بسم الله الرحمن الرحیم

دانشگاه اصفهان

دانشکده علوم

گروه فیزیک

پایان نامه ی کارشناسی ارشد رشته ی فیزیک گرایش ماده چگال

رسانندگی گرمایی ابررسانای Sr_2RuO_4 در حالت جفت شدگی سه تایی در حضور میدان مغناطیسی

استاد راهنما:

دکتر محمد علی شاهزمانیان

پژوهشگر:

مرضیه غزالی

دی ماه ۱۳۹۰

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات، ابتکارات

و نوآوری های ناشی از تحقیق موضوع این پایان نامه

متعلق به دانشگاه اصفهان است.

دانشگاه اصفهان

دانشکده علوم

گروه فیزیک

پایان نامه ی کارشناسی ارشد رشته ی فیزیک گرایش ماده چگال خانم مرضیه غزالی تحت عنوان

رسانندگی گرمایی ابررسانای Sr_2RuO_4 در حالت جفت شدگی سه تایی در حضور میدان مغناطیسی

در تاریخ ۱۳۹۰/۱۰/۷ توسط هیأت داوران زیر بررسی و با درجه عالی به تصویب نهایی رسید.

۱- استاد راهنمای پایان نامه دکتر محمدعلی شاهزمانیان با مرتبه ی علمی استاد امضا

۲- استاد داور داخل گروه دکتر زهرا نوربخش با مرتبه ی علمی استادیار امضا

۳- استاد داور خارج از گروه دکتر محمد اعتصامی با مرتبه ی علمی استادیار امضا

امضای مدیر گروه

سپاسگزاری

سپاس خدای را عزّ و جلّ که طاعتش موجب قربت است و به شکر اندرش مزید نعمت.

جا دارد که در اینجا از کسانی که من را در مطالعه، تحقیق و نگارش این پژوهش یاری داده‌اند، صمیمانه تشکر و قدردانی نمایم. کمال تشکر و قدردانی دارم از استاد ارجمند جناب آقای دکتر محمد علی شاهرمانیان که همچون یک معلم دلسوز و مهربان من را در انجام این پژوهش تشویق و راهنمایی کردند.

از کلیه‌ی اساتید گروه فیزیک و همچنین از کلیه‌ی دوستان و دانشجویان کارشناسی ارشد که در ایجاد یک محیط دوستانه و علمی نقش داشته‌اند، از صمیم قلب تشکر می‌کنم.

نمی‌دانم با کدام قلم و با چه واژه‌ای تشکر کنم از کسی که اگر فداکاری او نبود امروز من نیز اینجا که ایستاده‌ام نبودم، کسی که با تمام وجودش من را راهنمایی کرد و برای من از همه چیز خودش گذشت، فقط می‌گویم همسرم قدردانت هستم.

و در نهایت از پدر و مادر مهربان و فداکارم که در طی تمام سال‌های تحصیل همواره پشتیبان و تکیه‌گاه من بوده‌اند، صمیمانه و خالصانه تشکر و قدردانی می‌نمایم.

الهی: دلی ده که طاعت افزاید، طاعتی ده که به بهشت رهنمون آید، علمی ده که در او آتش هوا نبود، عملی ده که در او آب ریا نبود، دیده‌ای ده که عزّ ربوبیت تو بیند، دلی ده که ذل عبودیت تو گزیند. نفسی ده که حلقه‌ی بندگی تو در گوش کند، جانی ده که زهر حکمت را به طبع نوش کند.

تقدیم به

پدر و مادر فداکار

و همسر مهربانم

چکیده

برای بسیاری از نمونه‌های فلزی و آلیاژها یک دمای بحرانی یا دمای گذار وجود دارد که با T_c آن را نشان می‌دهیم که در زیر این دما مقاومت الکتریکی نمونه به صفر میل می‌کند و به آن ابررسانا می‌گوییم و در بالای این دما، نمونه در حالت عادی قرار دارد. ابررساناها با توجه به واکنش متفاوت‌شان به میدان مغناطیسی خارجی به دو دسته‌ی ابررساناهای نوع اول و ابررساناهای نوع دوم تقسیم می‌شوند که اثر مایسنر در نوع اول کامل است. طیف برانگیختگی‌های بنیادی ابررسانا، با یک گاف انرژی از تراز انرژی حالت پایه جدا می‌شود. وجود این گاف انرژی خاصیت بسیار مهمی از ابررساناهاست و بسیاری از جلوه‌های رفتاری آن را توضیح می‌دهد. این گاف انرژی تابع دما بوده و با افزایش دما کاهش می‌یابد.

در این پایان‌نامه به محاسبه‌ی ضریب رسانندگی گرمایی ترکیب Sr_2RuO_4 در حالت عادی خواهیم پرداخت که پیش‌زمینه‌ی کار اصلی ما یعنی محاسبه‌ی رسانندگی گرمایی ترکیب Sr_2RuO_4 در حالت ابررسانایی می‌باشد. محاسبات خودمان را در هر دو حالت با استفاده از معادله‌ی بولتزمن و انتگرال برخوردی شروع خواهیم کرد و با تعریف پارامترها و در نظر گرفتن محدودیت‌ها به محاسبه می‌پردازیم. محاسباتی که ما انجام خواهیم داد در دو بعد انجام می‌شوند چون ترکیب Sr_2RuO_4 دارای ساختار لایه‌ای دوبعدی است.

Sr_2RuO_4 دارای ساختار لایه‌ای پروسکایت است، این ترکیب یک ابررسانای نامتعارف است و جفت‌های کوپر آن در حالت جفت‌شدگی سه‌تایی قرار دارند. حالت عادی این ترکیب به‌صورت یک مایع فرمی شبه دوبعدی است.

چون ساختار گاف Sr_2RuO_4 بسیار پیچیده است و همچنان مورد بحث و تحقیق است، به‌همین خاطر در طی انجام محاسبات به بررسی هر دو فرضیه‌ی گاف همسانگرد موج−p و گاف ناهمسانگرد دارای گره‌های خطی موج−p خواهیم پرداخت.

وابستگی دمایی ضریب رسانندگی گرمایی ابررسانای Sr_2RuO_4 در غیاب میدان مغناطیسی با فرض گاف همسانگرد به‌صورت $T^{1/2}$ به‌دست می‌آید که با نتایج تجربی در توافق است و با فرض گاف ناهمسانگرد مولفه‌های K_{xy} و K_{yx} مستقل از دما به‌دست می‌آیند، K_{xx} به‌صورت T^{-1} با دما تغییر می‌کند و K_{yy} وابستگی به‌صورت T به دما دارد که با نتایج تجربی مطابقت ندارند.

ضریب رسانندگی گرمایی ابررسانای Sr_2RuO_4 را در حضور میدان مغناطیسی نیز محاسبه می‌کنیم که در حضور میدان انرژی سیستم تغییر می‌کند و همان‌طور که از محاسبات انجام شده پیداست حضور میدان مغناطیسی باعث افزایش رسانندگی گرمایی این ترکیب می‌شود که این نتیجه با نتایج تجربی به‌دست آمده نیز در توافق است.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل اول: مقدمه‌ای بر ابررسانایی

۱-۱ مقدمه و تاریخچه ۱

۱-۲ مقاومت صفر ۳

۱-۳ گاف انرژی ۵

۱-۴ خاصیت دیامغناطیسی ۷

۱-۵ آنتروپی ابررسانا ۹

۱-۶ گرمای ویژه ۱۱

۱-۷ ابررساناهای نوع اول و دوم ۱۴

۱-۸ رسانندگی گرمایی ۱۵

۱-۸-۱ اندازه‌گیری تجربی رسانندگی گرمایی ۱۷

۱-۸-۲ رسانندگی گرمایی Sr_2RuO_4 ..... ۱۷

۱-۹ نتیجه‌گیری و خلاصه‌ی فصل ۱۸

فصل دوم: محاسبه‌ی رسانندگی گرمایی Sr_2RuO_4 در حالت عادی

۲-۱ مقدمه ۱۹

۲-۲ معادله‌ی ترابرد بولتزمن ۲۰

۲-۳ انتگرال برخورد ۲۱

۲-۴ حل معادلات انتگرالی ۲۶

۲-۵ محاسبه‌ی رسانندگی گرمایی به روش سایکس و بروکر ۳۲

۲-۶ روش جدید محاسبه‌ی رسانندگی گرمایی ۳۵
۲-۶-۱ محاسبه‌ی انتگرال برخوردی ۳۵
۲-۶-۲ رسانندگی گرمایی Sr_2RuO_4 در حالت عادی ۳۸
۲-۷ نتیجه‌گیری و خلاصه‌ی فصل ۳۹
فصل سوم: نظریه‌ی لندن، نظریه‌ی گینزبورگ-لاندائو و نظریه‌ی تعمیم یافته‌ی BCS وساختارSr_2RuO_4
۳-۱ مدل پدیده‌شناختی لندن ۴۰
۳-۲ نظریه‌ی گینزبورگ لاندائو ۴۲
۳-۲-۱ چگالی انرژی آزاد ۴۴
۳-۲-۲ معادلات گینزبورگ- لاندائو (GL) ۴۵
۳-۲-۳ ناوردایی پیمانه‌ای نظریه‌ی گینزبورگ- لاندائو ۴۶
۳-۳ نظریه‌ی تعمیم یافته‌ی BCS ۴۷
۳-۳-۱ برهم‌کنش الکترون- فونون ۴۹
۳-۳-۲ جفت‌های کوپر ۵۲
۳-۳-۳ تابع موج دو الکترون بدون برهم‌کنش و دو الکترون بابرهم‌کنش ۵۲
۳-۳-۴ فرضیه‌ی میکروسکوپی برای حالت ابررسانایی کوپر در صفر مطلق ۵۳
۳-۳-۵ تابع موج فضایی دو ذره با برهم‌کنش $V(\vec{r_1}-\vec{r_2})$ ۵۵
۳-۳-۶ تابع موج فضایی یک جفت کوپر ۵۶
۳-۳-۷ تابع موج تعمیم یافته‌ی BCS ۵۷
۳-۳-۸ برهم‌کنش دو الکترون در تشکیل جفت کوپر ۶۱
۳-۳-۹ گاف انرژی به ازای حالت‌های l فرد (حالت اسپینی سه‌تایی) ۶۴

۳-۳-۱۰ گاف انرژی به ازای حالت‌های l زوج (حالت اسپینی یک‌تایی) ۶۵
۳-۴ آشنایی با ابرشاره هلیوم سه ۶۶
۳-۵ ساختار Sr_2RuO_4 ..... ۶۷
۳-۵-۱ کشف ابررسانایی در Sr_2RuO_4 ..... ۶۹
۳-۵-۲ خصوصیات حالت نرمال Sr_2RuO_4 ..... ۶۹
۳-۵-۳ سهم الکترونی گرمای ویژه Sr_2RuO_4 ..... ۷۰
۳-۵-۴ مقاومت ویژه ناهمسانگردSr_2RuO_4 ..... ۷۱
۳-۵-۵ تاثیر ناخالصی‌ها ۷۲
۳-۵-۶ پارامترهای گینزبورگ- لاندائو Sr_2RuO_4 خالص ۷۳
۳-۶ رسانندگی گرمایی و هدف تحقیق ما ۷۵
۳-۷ خلاصه‌ی فصل ۷۶

فصل چهارم: محاسبه‌ی رسانندگی گرمایی ابررسانای Sr_2RuO_4 با فرض جفت‌شدگی سه‌تایی در غیاب و حضور میدان مغناطیسی

۴-۱ مقدمه ۷۷
۴-۲ رسانندگی گرمایی ابررسانای Sr_2RuO_4 در غیاب میدان مغناطیسی ۷۸
۴-۲-۱ محاسبه‌ی رسانندگی گرمایی ابررسانای Sr_2RuO_4 با فرض گاف همسانگرد ۸۱
۴-۲-۲ محاسبه‌ی رسانندگی گرمایی ابررسانای Sr_2RuO_4 با فرض گاف ناهمسانگرد ۸۳
۴-۳ رسانندگی گرمایی ابررسانای Sr_2RuO_4 در حضور میدان مغناطیسی ۸۷
۴-۴ نتیجه‌گیری و خلاصه‌ی فصل ۹۱
پیوست الف ۹۲
منابع ۹۴

فهرست شکل ها

عنوان **صفحه**

شکل۱-۱- تغییرات مقاومت فلزات با دما ۴

شکل ۱-۲- ناپدید شدن مقاومت ابررسانا در دماهای پایین ۵

شکل ۱-۳- تغیر گاف انرژی نسبت به دما برای ابررسانا ۶

شکل ۱-۴- (الف) اعمال میدان مغناطیسی به یک ابررسانای ایده‌آل در $T < T_c$. (ب) اعمال میدان در $T > T_c$ ... ۸

شکل ۱-۵- وابستگی دمایی اختلاف آنتروپی $S_s - S_n$ ۱۱

شکل ۱-۶- گرمای ویژه در حالت‌های ابررسانایی و عادی ۱۳

شکل ۲-۱- برخورد ذرات در فضای اندازه حرکت ۲۳

شکل ۲-۲- تغییرات رسانندگی گرمایی (تقسیم بردما) نسبت به دما برای دو نمونه Sr_2RuO_4 با T_c متفاوت ... ۳۸

شکل ۳-۱- برهم‌کنش الکترون- الکترون از طریق مبادله‌ی فونون ۵۰

شکل ۳-۲- دو پوسته به شعاع P_F و ضخامت $\Delta p = \frac{mh\nu_q}{P_F}$ که مرکزهای آن‌ها با بردار $\vec{P}$ جدا شده‌اند ۵۴

شکل ۳-۳- ساختار لایه‌ای پروسکایت ترکیب Sr_2RuO_4 ..... ۶۸

شکل ۳-۴- سطح فرمی ترکیب Sr_2RuO_4 ..... ۷۰

شکل ۳-۵- گرمایی ویژه کل Sr_2RuO_4 در میدان صفر و میدان مغناطیسی از مرتبه‌ی ۱۴T ۷۱

شکل ۳-۶- مقاومت ویژه ناهمسانگرد در Sr_2RuO_4 ..... ۷۲

شکل ۳-۷- مقاومت ویژه در دماهای پایین حاصل از سه نمونه‌ی Sr_2RuO_4 ..... ۷۳

شکل ۴-۱- تغییرات رسانندگی گرمایی (تقسیم بردما) نسبت به دما برای دو نمونه Sr_2RuO_4 با T_c متفاوت ... ۸۶

شکل ۴-۲- رسانندگی گرمایی (تقسیم بردما) برای Sr_2RuO_4 در میدان صفر و ۱.۲T و ۱.۵T ۹۰

فصل اول

مقدمه‌ای بر ابررسانایی

۱-۱ مقدمه و تاریخچه

ابررسانایی، نامی است که به ترکیب فوق‌العاده‌ای از خواص الکتریکی و مغناطیسی که در دماهای بسیارپایین در فلزات معینی نمایان می‌شود، داده شده است. چنین دماهای پایینی در سال ۱۹۰۸ میلادی، موقعی‌که برای اولین بار کمرلینگ اونس[1] موفق شد در دانشگاه لیدن، هلیوم را مایع کند، فراهم شد و با استفاده از آن، توانست به دماهایی درحدود یک درجه کلوین برسد. یکی از اولین بررسی‌هایی که اونس، در دماهای پایینی که در آن زمان به تازگی فراهم شده بود، به عهده گرفت، مطالعه تغییرات مقاومت الکتریکی فلزات با دما بود. سال‌های زیادی این آگاهی وجود داشت که مقاومت فلز وقتی که تا زیر دمای اتاق سرد شود، افت می‌کند، ولی حد آن، وقتی که دما به صفر مطلق نزدیک می‌شد، معلوم نبود. اونس، با آزمایشی که با پلاتین انجام داد، دریافت که فلز وقتی سرد می‌شود مقاومتش که بستگی به درجه خلوص نمونه دارد به مقدار کمی افت می‌کند. در آن زمان، خالص‌ترین فلز موجود، جیوه بود و اونس به منظور کشف رفتار فلز خیلی خالص، مقاومت جیوه خالص را اندازه گرفت. او دریافت که در دماهای خیلی پایین، مقاومت به مقداری که غیرقابل اندازه‌گیری است، کاهش می‌یابد که چندان شگفت‌آور نبود، ولی به زودی (در سال ۱۹۱۱ میلادی) کشف کرد که نحوه ناپدید شدن مقاومت، کاملاً غیرمنتظره است. وقتی دما به صفر مطلق کاهش داده می‌شد، به جای اینکه مقاومت به طور هموار کاهش یابد، در

[1] Kamerlingh Onnes

حدود چهار درجه‌ی کلوین به‌طور سریعی سقوط می‌کرد، و در زیر این دما، جیوه مطلقاً مقاومتی نشان نمی‌داد. به‌علاوه این گذار ناگهانی به یک حالت فاقد مقاومت، منحصر به فلزات خالص نبود، بلکه حتی وقتی‌که جیوه کاملاً ناخالص بود نیز اتفاق می‌افتاد. اونس تشخیص داد که در زیر ۴ درجه کلوین، جیوه به حالت جدیدی از خواص الکتریکی می‌رسد که کاملاً متفاوت از آن چیزی است که قبلاً شناخته شده بود و این حالت جدید «حالت ابررسانش» نامیده شد. بعداً کشف گردید که ابررسانایی را می‌توان با اعمال میدان مغناطیسی که به قدر کافی قوی باشد، نابود کرد (یعنی مقاومت الکتریکی را برقرار کرد) و متعاقباً معلوم شد که هر فلز در حالت ابررسانش، خواص مغناطیسی جالبی دارد که کاملاً متمایز از خواصی است که در دماهای معمولی داراست.

تاکنون معلوم شده است که در حدود نیمی از عناصر فلزی و همچنین تعداد زیادی از آلیاژها در دماهای پایین، ابررسانا می‌شوند. فلزاتی که هنگام سرد شدن به‌قدر کافی، خواص ابررسانایی از خود بروز می‌دهند، ابررسانا نامیده می‌شوند. تا مدت‌ها تصور می‌شد که اساساً تمام ابررساناها بر مبنای الگوی یکسان رفتار می‌کنند. اما، بعداً معلوم شدکه دو نوع ابررسانا وجود دارد، که به‌عنوان‌های نوع اول و دوم مشهورند. اغلب عناصری که ابررسانا هستند، ابررسانایی از نوع اول را بروز می‌دهند؛ در حالی‌که آلیاژها عموماً ابررسانایی از نوع دوم را نمایش می‌دهند. دو نوع مذکور دارای تعداد زیادی خواص یکسان هستند ولی در رفتار مغناطیسی آن‌ها، تفاوت‌های عمده‌ای مشاهده می‌شود. این تفاوت‌ها، کفایت می‌کند که ما آن‌ها را به‌طور جداگانه مطالعه کنیم.

پس از کشف ابررسانایی در سال ۱۹۱۱ میلادی توسط اونس، در سال ۱۹۳۳ میلادی مایسنر[۱] و اوکسنفلد[۲] توانستند اثر مایسنر را کشف کنند که در قسمت‌های بعد به آن می‌پردازیم. در سال ۱۹۵۰ میلادی نظریه گینزبورگ-لاندائو[۳] در مورد ابررساناها بیان شد که یک نظریه پدیده شناختی بود و اساس آن بر تغییر فاز مرتبه‌ی دوم بنا شده است و توصیف‌کننده‌ی پدیده در $T \sim T_c$ می‌باشد و ایده‌ای برای بسط انرژی آزاد به‌دست می‌دهد. سپس در سال ۱۹۵۷ میلادی نظریه میکروسکوپیکی ابررسانایی کامل شده توسط باردین[۴]، کوپر[۵] و شریفر[۶](BCS) بیان شد و در سال ۱۹۶۲میلادی، اثر جوزفسون[۷] توسط جوزفسون بیان شد که بر اساس آن در

[1] Meissner
[2] Ochsenfeld
[3] Landau-Ginzburg
[4] Bardeen
[5] Cooper
[6] Schrieffer
[7] Josephson

پیوندگاه‌های تونلی ابررسانشی وقتی جریان از اتصال ضعیف گذر کند، در دو سر پیوندگاه ولتاژ تولید نمی‌شود. این بیانی از سیر تحولی در ابررساناها بود.

۱-۲ مقاومت صفر

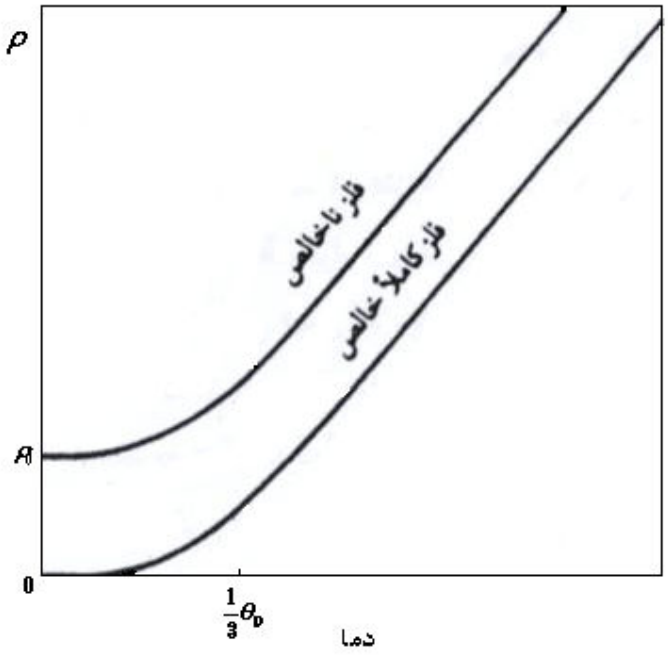
مقاومت الکتریکی تمام فلزات و آلیاژها، هنگام سرد شدن، کاهش می‌یابد. برای درک چگونگی این امر، لازم است علل وجود مقاومت در رساناها را مورد بررسی قرار دهیم. حمل جریان الکتریکی در رسانا توسط «الکترون‌های رسانش» که آزادانه در داخل ماده حرکت می‌کنند، صورت می‌گیرد. البته، الکترون‌ها دارای طبیعت موج مانندی هستند و می‌توان الکترونی را که در فلزی حرکت می‌کند، توسط موج تختی که در همان جهت حرکت الکترون پیش می‌رود، نمایاند. هر فلز دارای ساختار بلوری است، به این معنی که اتم‌های آن بر روی شبکه‌ای منظم قرار دارند و یک خصوصیت موج تخت آن است که می‌تواند از ساختاری کاملاً تناوبی عبور کند بدون این‌که در جهت‌های دیگر پراکنده گردد. بنابراین، الکترون قادر است از بلوری کامل عبور کند بدون آن‌که هیچ تکانه‌ای را در جهت اولیه‌اش از دست بدهد. به‌عبارت دیگر، اگر جریانی را در بلوری کامل برقرار کنیم (یعنی به الکترون‌های رسانش، تکانه‌ای را در جهت جریان بدهیم) هیچ مقاومتی در مقابل جریان وجود نخواهد داشت. اما، وجود هر گونه نقصی در تناوبی بودن بلور، موجب پراکنده شدن موج الکترونی می‌شود که نتیجه آن بروز مقاومت در مقابل جریان است. بالای صفر مطلق، اتم‌ها در حال ارتعاش هستند و از موقعیت تعادل خود، به مقدارهای مختلفی تغییر مکان می‌یابند؛ به‌علاوه، اتم‌های خارجی و نقص‌های دیگر که به‌طور آماری توزیع شده‌اند نیز، می‌توانند تناوبی بودن بلور را کاملاً مختل کنند. نوسانات حرارتی و هر گونه ناخالصی یا ناکاملی، هر دو موجب پراکنده شدن الکترون‌های رسانش می‌شود که نتیجه آن، بروز مقاومت الکتریکی است.

اکنون برای ما روشن است که چرا مقاومت الکتریکی، وقتی که فلزی یا آلیاژی سرد می‌شود، کاهش می‌یابد. وقتی که دما کاهش یابد، ارتعاشات حرارتی اتم‌ها کم شده و الکترون‌های رسانش کمتر پراکنده می‌شوند. کاهش مقاومت تا دمایی که برابر یک سوم دمای دبی جسم است، به‌صورت خطی است. اما، هر چه از این دمای مشخصه پایین‌تر برویم، تغییرات مقاومت با دما، به‌تدریج کندتر می‌شود (شکل ۱-۱).

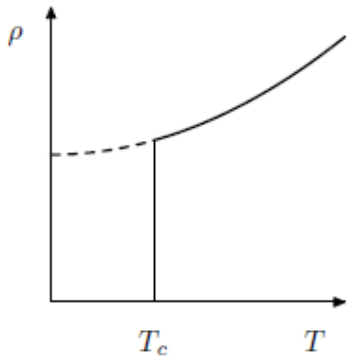
برای فلزی کاملاً خالص، که در آن فقط ارتعاشات حرارتی شبکه مانع حرکت الکترون‌ها می‌شود، با نزدیک شدن دما به صفر مطلق، مقاومت بایستی به صفر نزدیک شود. لکن، این مقاومت صفر که نمونه‌ای فرضی و کاملاً

بی‌عیب به هنگام رسیدن دمای آن به صفر مطلق از خود نشان می‌دهد، پدیده‌ی ابررسانایی نیست. واقعیت این است که نمونه‌ی فلزی واقعی نمی‌تواند کاملاً خالص باشد و همیشه دارای مقداری ناخالصی است. بنابراین، نه تنها ارتعاشات اتم‌های شبکه الکترون‌ها را پراکنده می‌کنند، بلکه ناخالصی‌ها نیز موجب پراکنده شدن الکترون‌ها می‌شوند که این پراکندگی دوم کم و بیش مستقل از دما است. در نتیجه، «مقاومت باقی‌مانده» معینی وجود دارد (ρ_0 در شکل ۱-۱) که حتی در پایین‌ترین دما نیز باقی خواهد ماند. هر اندازه که ناخالصی فلز بیشتر باشد، این مقاومت باقی‌مانده نیز بزرگتر خواهد بود [۱].

به‌هر حال، بعضی از فلزات رفتار جالبی از خود نشان می‌دهند، به این معنی‌که وقتی آن‌ها را سرد کنیم، مقاومت الکتریکی آن‌ها طبق معمول کاهش می‌یابد، اما با رسیدن دما به مقداری معین که چند درجه‌ای بالای صفر مطلق خواهد بود، به ناگهان مقاومت الکتریکی خود را کاملاً از دست می‌دهند (شکل ۱-۲). در چنین حالتی گفته می‌شود که فلز به حالت ابررسانش گذر کرده است گذر به حالت ابررسانش حتی در مواردی‌که ناخالصی آن‌قدر زیاد است که مقاومت باقی‌مانده خیلی بزرگی را در حالت غیر ابررسانش ایجاد می‌کند، امکان‌پذیر است [۱].



شکل (۱-۱) : تغییرات مقاومت فلزات با دما [۱].



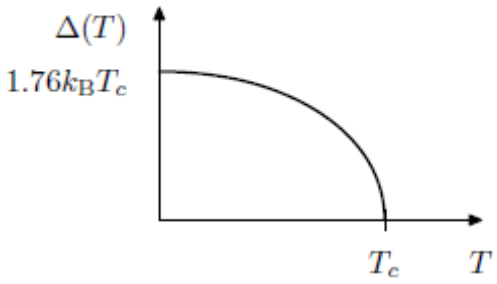
شکل (۱-۲) : ناپدید شدن مقاومت ابررسانا در دماهای پایین [۱].

۱-۳ گاف انرژی

برخلاف الکترون آزاد، الکترون‌های یک جسم جامد فقط انرژی‌هایی را اختیار می‌کنند که داخل نوارهای مجاز انرژی قرار دارند. نوارهای مجاز انرژی به‌وسیله‌ی گاف‌هایی از انرژی ممنوعه از یکدیگر جدا شده‌اند. گاف انرژی یک مفهوم کاملاً کوانتومی است و برای اولین بار وجود آن در نیم‌رساناها به اثبات رسیده است.

در نیم‌رساناها یک جدایی در انرژی، یا «گاف انرژی» بین بالای نوار ظرفیت (کاملاً پر) ترازهای انرژی الکترون و پایین نوار رسانش (خالی) وجود دارد. اگر بسامد تابش فرودی به اندازه‌ای بالا باشد که انرژی فوتون $h\upsilon$ بیشتر از گاف انرژی باشد، فوتون‌ها قادر خواهند بود که الکترونی را از نوار والانس به نوار رسانش تحریک کنند و خود در ضمن فرآیند، جذب شوند. طبیعی است که فرض کنیم که در مورد ابررسانا نیز چیزی شبیه به این رخ می‌دهد و این‌که وقتی انرژی فوتون کافی برای تحریک الکترون‌ها در عرض گاف انرژی باشد، تابش به شدت جذب می‌شود. از آن‌جاکه در ابررساناها جذب در بسامدهای بزرگتر از $10^{11} HZ$ اتفاق می‌افتد، گاف انرژی باید در حدود $10^{-4} ev$ باشد. می‌توان دید که اگر این گاف انرژی برحسب KT بیان شود، در آن‌صورت T در حدود $1°K$ خواهد بود که در حدود بزرگی دمای بحرانی ابررساناست.

وجود این گاف انرژی خاصیت بسیار مهمی از ابررساناست و بسیاری از جلوه‌های رفتاری آن را توضیح می‌دهد.



شکل (۱-۳) : تغییر گاف انرژی نسبت به دما برای ابررسانا [۱].

در ابررساناها، گاف انرژی تابع دما بوده و با افزایش دما، گاف انرژی Δ کاهش می‌یابد در حالی‌که در نیم‌رساناها گاف انرژی تقریباً نسبت به دما ثابت است. در شکل (۱-۳) تغییر گاف انرژی نسبت به دما برای یک ابررسانا رسم شده است [۱].

داده‌های گرمای ویژه، شواهد بیشتری در تایید وجود نوعی گاف انرژی در ترازهای الکترونی به‌دست می‌دهند. همان‌طور که تاکنون خاطر نشان کرده‌ایم، در دماهای خیلی پایین، گرمای ویژه مربوط به الکترون‌های رسانش، متناسب با $e^{-b/kT}$ است که دقیقاً به شکلی است که اگر گافی در گستره‌ی انرژی الکترون وجود داشته باشد، باید انتظار آن را داشت. وقتی که دما افزایش یابد، الکترون‌ها به‌طور گرمایی در عرض گاف برانگیخته می‌شوند و به ازای هر یک از این الکترون‌ها، مقداری انرژی برابر گاف انرژی E_g در فرایند جذب می‌شود. با کاربرد ساده مکانیک آماری، نتیجه می‌شود که تعداد الکترون‌هایی که در دمای T در ترازهای انرژی بالاتر از گاف هستند متناسب با $e^{-E_g/2kT}$ است، که در آن k ثابت بولتزمن[1] است.

شواهد دیگری مبنی بر وجود گاف انرژی در حالت ابررسانش به‌وسیله آزمایش تونل‌زنی داده شده است (تونل-زنی الکترون‌های عادی یا زوج‌های کوپر[2]). از روی منحنی مشخصه‌ی I-V تونل‌زنی، می‌توانیم گاف انرژی ابررسانا (برابر 2Δ) را تعیین کنیم. تونل‌زنی یک آزمایش نسبتاً آسان و مفیدترین وسیله برای اندازه‌گیری گاف انرژی است.

[1] Boltzmann
[2] Cooper

۱-۴ خاصیت دیامغناطیسی

بیست و دو سال پس از کشف ابررسانایی، دانشمندان هنوز بر این باور بودند که ابررسانا تنها یک رسانای ایده-آل است، یعنی قطعه‌ای فلز با مقاومت صفر. اکنون به این نکته می‌پردازیم که چنین رسانای ایده‌آلی در یک میدان مغناطیسی خارجی که به‌قدر کافی ضعیف است و نمی‌تواند رسانش ایده‌آل نمونه را تخریب کند، باید چگونه رفتاری داشته باشد.

نخست فرض کنید رسانای ایده‌آل در حضور میدان مغناطیسی خارجی صفر تا زیر دمای بحرانی سرد شده است و سپس یک میدان مغناطیسی خارجی برقرار می‌شود. از بررسی‌های عمومی، به آسانی می‌توان نشان دادکه میدان به درون نمونه نفوذ نمی‌کند (شکل۱-۴). در واقع، بلافاصله پس از نفوذ میدان به لایه سطحی رسانای ایده-آل، یک جریان القایی برقرار می‌شود که بنابر قانون لنز، در راستای مقابل میدان خارجی، میدان مغناطیسی تولید می‌کند. بنابراین، میدان کل در درون نمونه صفر است [۲].

اکنون این رفتار را به یاری معادلات ماکسول اثبات می‌کنیم. با تغییر القای B، بنابر رابطه‌ی

$$\nabla \times \boldsymbol{E} = -\frac{1}{c}\frac{\partial \boldsymbol{B}}{\partial t} \qquad (۱-۱)$$

باید در نمونه میدان الکتریکی E القا شود، در این رابطه c سرعت نور در خلا است. در رسانای ایده‌آل E=0، زیرا $E = j\rho$، که در آن ρ مقاومت ویژه (که در این مورد صفر است) و j چگالی جریان القایی است. نتیجه می‌شود که B باید ثابت باشد و با توجه به این‌که پیش از اعمال میدان خارجیB=0 بوده است، بنابراین پس از برقراری میدان نیز باید B=0 باشد.این پدیده را می‌توان از راه دیگری هم تفسیر کرد: چون $\rho = 0$، زمان برای نفوذ میدان مغناطیسی به درون رسانای ایده‌آل به‌طور نامحدودی طولانی است.