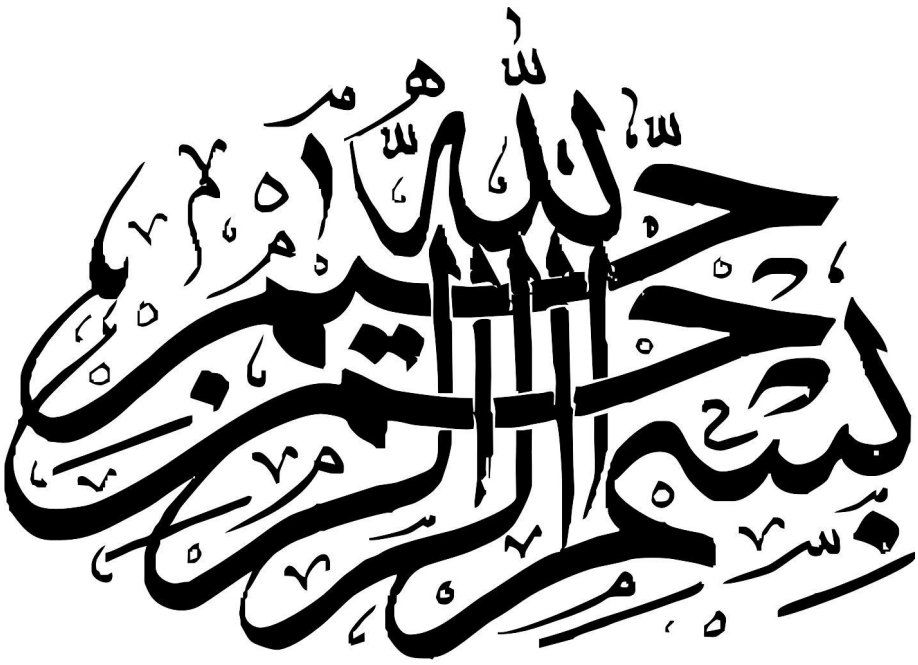

بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه اصفهان

دانشکده علوم

گروه فیزیک

پایان نامه ی کارشناسی ارشد رشته فیزیک گرایش ماده چگال

گره های خطی در تابع گاف ابررسانای بدون مرکز تقارن

استاد راهنما :

دکتر حشمت اله یاوری

استاد مشاور :

دکتر محمد علی شاهزمانیان

پژوهشگر :

زهره خواجه

شهریور ماه ۱۳۸۸

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 نامه‌ی کارشناسی ارشد رشته‌ی فیزیک گرایش ماده چگال

خانم زهره خواجه تحت عنوان

گره های خطی در تابع گاف ابررسانای فرمیون سنگین $CePt_3Si$

در تاریخ ۱۳۸۸/۶/۲۴ توسط هیات داوران زیر بررسی و با درجه عالی به تصویب نهایی رسید.

۱- استاد راهنما پایان نامه دکتر حشمت الله یاوری با مرتبه‌ی علمی استاد یار امضا

۲- استاد مشاور پایان نامه دکتر محمد علی شاهزمانیان با مرتبه‌ی علمی استاد امضا

۲- استاد داور داخل گروه دکتر غلامرضا راشدی با مرتبه‌ی علمی استاد یار امضا

۳- استاد داور خارج از گروه دکتر محمد اعتصامی با مرتبه‌ی علمی استاد یار امضا

امضای مدیر گروه

گروه فیزیک
University of Isfahan
Department of Physics

چکیده :

در دو دهه اخیر، ابررساناهایی کشف شده اند که تقارن های پارامتر نظم آنها با ابررساناهای موج- ، که مطابق نظریه BCS جفت شدگی در آنها به واسطه برهمکنش الکترون-فونون صورت می گیرد ، متفاوت است.

در اغلب این ابررساناها شواهدی وجود دارد که جفت شدگی به واسطه همبستگی های قوی الکترونی صورت می گیرد که با سازوکار ابررسانایی در ابررساناهای متعارف مانند و و غیره تفاوت دارد. سازوکارهای جفت شدگی غیر فونونی تعیین کننده ساختار اسپینی و تقارن مداری جفتهای کوپر می باشند. مثلا پارامتر نظمی که به واسطه همبستگی های آنتی فرومغناطیسی صورت می گیرد دارای تقارن موج- با گره هایی در سطح فرمی است. بنا بر این ابررساناهای نامتعارف به وسیله یک گاف انرژی ناهمسانگرد که متعلق به یک گروه تقارنی بلور است، مشخص می شوند این گاف انرژی دارای گره هایی در امتدادهایی مشخص در منطقه بریلوئن می باشد.لذا ساختار گاف انرژی ابررساناهای فرمیون سنگین در فهم فیزیک ابررساناهای نامتعارف در دستگاه های همبسته قوی بسیار با اهمیت است.

اخیرا ابررسانای فرمیون سنگین 3 با دمای گذار 0.75 کشف شده است و به دلیل خواص منحصر به فردی که دارد مورد توجه پژوهشگران نظری و تجربی قرار گرفته است. از مشخصه های برجسته این ابررسانا عدم وجود تقارن وارونی است . شکست تقارن وارونی در این دستگاه موجب ایجاد القای برهم کنش اسپین-مدار نوع راشبا می شود و لذا جفت شدگی در حالتهای یکتایی و سه تایی با پاریته متفاوت می توانند در حالت ابررسانایی مخلوط شوند.از نتایج تحربی و نظری عقیده براین است که به احتمال زیاد حالت ابررسانایی در ساختار 3 جفت شدگی + می باشد.

مخلوط حالتهای جفت شدگی با پاریته مختلف موجب ایجاد خواص غیر معمول در کمیتهای قابل اندازه گیری مانند میدان بحرانی بالایی قله هایی در آهنگ واهلش و رفتار توانی دماهای پایین که بیانگر وجود گره های خطی در گاف انرژی شبه ذره است می شود. همچنین وجود گره های خطی در گاف انرژی ساختار نیز با اندازه گیری رسانندگی گرمایی و عمق نفوذ میدان مغناطیسی به اثبات رسیده است.

در این رساله ما با استفاده از روش تابع گرین و پارامتر نظم مخلوط + تابع همبسته مناسب برای به دست آوردن عمق نفوذ میدان مغناطیسی را محاسبه می کنیم. علاوه بر اثرات غیر موضعی و غیر خطی اثر ناخالصی را نیز در این تابع همبسته منظور می کنیم.

از آنجاییکه ابررسانای 3 یک ابررسانای تمیز است در حدموضعی وابستگی دمایی عمق نفوذ به صورت خطی است که با نتایج آزمایشگاهی در توافق است. همچنین در حد غیر موضعی وابستگی دمایی مربعی را در دماهای زیر 0.015 پیش بینی می کنیم که در آزمایش تاکنون چنین رفتاری گزارش نشده است و این به دلیل آن است که آزمایشها بالاتر از دمای مذکور صورت گرفته اند. از طرف دیگر توجه می کنیم که یک ابررسانای نوع ۲ با پارامتر گینزبرگ-لاندائو 140 = است از اثرات غیر موضعی می توان صرف نظر کرد و از طرفی چون یک ابررسانای خالص است از اثرات ناخالصی هم می توان چشم پوشی کرد.

برای یک ابررسانای بدون تقارن وارونی و ناخالص رفتار دمایی مربعی را برای عمق نفوذ در دماهای پایین به دست می آوریم که می تواند هم به واسطه اثر غیر موضعی و هم اثرات ناخالصی باشد. در این مورد نشان می دهیم که اثرات غیر موضعی توسط اثرات ناخالصی پوشش داده می شوند.
کلید واژه ها: پارامتر نظم، نظریه BCS ، جفتهای کوپر، پارامتر نظمی، گاف انرژی، منطقه بریلوئن، ابررساناهای فرمیون سنگین، آهنگ واهلش ، گره های خطی، رسانندگی گرمایی، عمق نفوذ میدان مغناطیسی، روش تابع گرین.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل اول : خواص ترمودینامیکی ابررساناها

۱-۱ مقدمه و تاریخچه ۱

۱-۲ مقاومت صفر ۲

۱-۳ گاف انرژی ۴

۱-۴ خاصیت دیامغناطیس ۷

۱-۵ اثر ترمودینامیکی در ابررساناها ۱۰

۱- ۶ گرمای ویژه الکترونی و شبکه ۱۱

۱-۷ ابررسانای نوع اول و دوم ۱۴

۱-۸ مدل دوشاره ای ۱۵

۱-۹ رسانندگی گرمایی ۱۶

۱-۹-۱ اندازه گیری تجربی رسانندگی گرما ۱۷

۱-۱۰ نتیجه گیری ۱۹

فصل دوم : ابررسانای فرمیون سنگین

۲-۱ مقدمه ۲۰

۲-۲ ساختار الکترونی ۲۴

۲-۳ تقارن ساختار الکترونی ۲۹

۲-۴ پارامترهای نظم ابررسانایی ۳۰

۲-۴-۱ تحلیل تقارن ۳۰

۲-۴-۲ گره های گاف ۳۳

۲-۵ توابع گرین ۳۴

۲-۶ گره های خطی در تابع گاف ابررسانای بدون مرکز تقارن ۳۵

۲-۷ مقاومت ویژه ( ) در ۳۶

۲-۸ رسانندگی گرمایی در ۳۷

۲-۹ ضرایب ترابرد شبه کلاسیک ۴۰

۲-۱۰ محاسبه رسانندگی گرمایی در ۴۶

عنوان **صفحه**

۲-۱۱ تصحیحات دمای پایین ۴۷

۲-۱۲ رسانندگی گرمایی الکترونی در میدان مغناطیسی ۵۱

۲-۱۳ حدتمیز ۵۲

۲-۱۴ روابط مقیاس بندی برای ۵۵

۲-۱۵نتیجه گیری ۵۷

فصل سوم : عمق نفوذ مغناطیسی در

۳-۱ مقدمه ۵۸

۳-۲ اثر پراکندگی ناخالصی بر عمق نفوذ مغناطیس ۶۲

۳-۳ محاسبه عمق نفوذ مغناطیسی ۶۴

۳-۴ نتیجه گیری ۷۷

منابع و مآخذ ۷۸

فهرست شکلها

عنوان **صفحه**

شکل(۱-۱): تغییرات مقاومت فلز با دما ۳

شکل(۱-۲): ناپدید شدن مقاومت ابررسانا در دماهای پائین ۴

شکل(۱-۳): نوار رسانش در دمای صفر درجه کلوین ۵

شکل(۱-۴): تغییر گاف انرژی نسبت به دما برای یک ابررسانا ۵

شکل(۱-۵): توضیع شار مغناطیسی در اطراف جسم کاملا دیامغناطیس ۸

شکل(۱-۶): آنتروپی قلع در حالتهای عادی و ابررسانایی ۹

شکل(۱-۷): گرمای ویژه قلع در حالت های ابررسانایی و عادی ۱۳

شکل(۲-۱): ساختار بلور ۲۵

شکل(۲-۲): ساختار نواری محاسبه شده بدون جفت شدگی اسپین –مدار ۲۶

شکل(۲-۳): ساختار نواری با برهمکنش اسپین- مدار ۲۷

شکل(۲-۴): سطح فرمی ۲۸

شکل(۲-۵): وابستگی دمایی ( ) در در یک مقیاس دمایی لگاریتمی ۳۶

شکل(۲-۶): جزئیات دما پایین ( ) در ۳۷

شکل(۲-۷): نمودار بر حسب ۳۸

شکل(۲-۸): رسانندگی گرمایی محور در برای ‖ در میدان های مختلف ۳۹

شکل(۲-۹): وابستگی میدانی ضریب خطی دمایی + = ... ۵۱

شکل(۲-۱۰): وابستگی میدان مغناطیسی رسانندگی گرمایی با پراکندگی حدیکانی ۵۴

شکل(۲-۱۱) ۵۵

شکل(۳-۱): Δ/( )Δλ برحسب / در محدوده های زیر دمای ۶۰

شکل(۳-۲): Δ( ) را بر حسب / برای یک نمونه چندبلوری ۶۱

شکل(۳-۳): Δ( ) را بر حسب / در نمونه چندبلوری در دماهای زیر $\simeq 0.16$ ۶۲

فصل اول

خواص ترمودینامیکی ابررساناها

۱- ۱ مقدمه وتاریخچه

ابررسانایی، نامی است که به ترکیب فوق العاده ای از خواص الکتریکی و مغناطیسی که در دماهای بسیار پائین در فلزات معینی نمایان می شود، داده شده است. چنین دماهای پائینی در سال ۱۹۰۸، وقتی که برای اولین بار کمرلینگ اونس موفق شد در دانشگاه لیدن، هلیوم را مایع کند ،فراهم شد و با استفاده از آن توانست به دماهائی در حدود یک درجه کلوین برسد.

یکی از اولین بررسیهائی که اونس، در دماهای پائینی که 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 می کند،ولی حد آن،وقتی که دما به صفر مطلق نزدیک می شد،معلوم نبود.

اونس با آزمایشی که با پلاتین انجام داد،دریافت که فلز وقتی سرد می شود،مقاومتش که بستگی به درجه خلوص نمونه داردبه مقدار کمی افت می کند.در آن زمان خالص ترین فلز موجود،جیوه بود و اونس به منظور کشف رفتار فلز خیلی خالص،مقاومت جیوه خالص را اندازه گرفت.

اودریافت که در دماهای خیلی پائین ،مقاومت به مقداری که غیر قابل اندازه گیری است،کاهش می یابد که چندان شگفت آور نبود،ولی به زودی (در سال ۱۹۱۱) کشف کرد که نحوه ناپدید شدن مقاومت،کاملا غیرمنتظره است.وقتی دما به صفر مطلق کاهش داده می شد،به جای اینکه مقاومت به طور هموار کاهش یابد،در

حدود ۴ درجه کلوین به طور سریعی سقوط می کردو زیر این دما،جیوه مطلقا مقاومتی نشان نمی داد.به علاوه این گذر ناگهانی به یک حالت فاقد مقاومت،منحصر به فلزات خالص نبود،بلکه حتی وقتی که جیوه کاملا ناخالص بودنیز اتفاق می افتاد.اونس تشخیص داد که زیر ۴ درجه کلوین،جیوه به حالت جدیدی از خواص الکتریکی می رسد که کاملا متفاوت از آن چیزی است که قبلا شناخته شده بود و این حالت جدید «حالت ابررسانش» نامیده می شود.

بعدا کشف گردید که ابررسانایی را می توان با اعمال میدان مغناطیسی که به قدر کافی قوی باشد،نابود کرد (یعنی مقاومت الکتریکی را برقرار کرد) و متعاقبا معلوم شد هر فلز در حالت ابررسانی،خواص مغناطیسی فوق العاده ای دارد که کاملا 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 آلیاژهادر دماهای پائین،ابررسانا می شوند.فلزاتی که هنگام سرد شدن به قدر کافی،خواص ابررسانایی از خود بروز می دهند،ابررسانا نامیده می شوند.

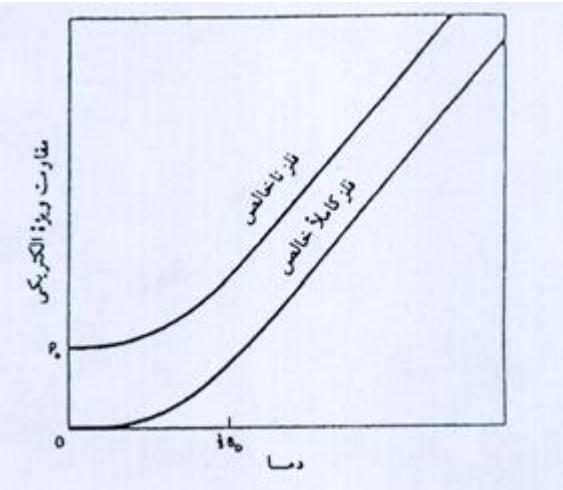
تا مدتها تصور می شد که اساسا تمام ابررساناها بر مبنای الگوئی یکسان رفتار می کنند،اما اکنون معلوم شده است که دو نوع ابرسانا وجود دارد، که به عنوان نوع اول و نوع دوم مشهورند. اغلب عناصر فلزی که ابررسانا هستند،ابرسانایی از نوع اول را بروز می دهند، در حالیکه آلیاژها عموما ابررسانایی از نوع دوم را نشان می دهند. دو نوع مذکور دارای تعداد زیادی خواص یکسان هستند ولی در رفتار مغناطیسی آنها تفاوت های عمده ای مشاهده می شود و این تفاوت ها کفایت می کنند که آنها به طور جداگانه بررسی شوند[۱].

۱-۲ مقاومت صفر

مقاومت الکتریکی تمام فلزات و آلیاژها ،هنگام سرد شدن، کاهش می یابد.برای درک چگونگی این امر ، لازم است علل وجود مقاومت در رسانا را مورد بررسی قرار دهیم.حمل جریان الکتریکی در رساناها توسط « الکترونهای رسانش» که آزادانه در ماده حرکت می کنند،صورت می گیرد. البته الکترونها دارای طبیعت موج مانندی هستند و می توان الکترونی را که در فلزی حرکت می کند، توسط موج تختی که در همان جهت حرکت الکترون پیش می رود نمایاند.هر فلزی دارای ساختار بلوری است،به این معنی که اتمهای آن بر روی شبکه ای منظم قرار دارند و یک خصوصیت موج تخت آن است که می تواند از ساختاری کاملا تناوبی عبور کندبدون اینکه در جهت های دیگر پراکنده گردد.بنابراین الکترون قادر است از بلوری کامل عبور کند بی آنکه هیچ تکانه

ای را در جهت اولیه اش از دست بدهد. به عبارت دیگر ،اگر جریانی را در بلوری کامل برقرار کنیم (یعنی به الکترونهای رسانش، تکانه ای 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 می شود که نتیجه آن بروز مقاومت در مقابل جریان است. در دماهای بالای صفر مطلق، اتمها در حال ارتعاش هستند و از موقعیت تعادل خود به مقدارهای مختلفی تغییر مکان می یابند، به علاوه اتمهای خارجی و نقصهای دیگر که به طور آماری توزیع شده اند نیز، می توانند تناوبی بودن بلور را کاملا مختل کنند.نوسانات حرارتی و هر گونه ناخالصی یا نا کاملی، هر دو موجب پراکنده شدن الکترونهای رسانش می شوند که نتیجه آن بروز مقاومت الکتریکی است.

اکنون برای ما روشن است که چرا مقاومت الکتریکی ، وقتی که فلزی یا آلیاژی سرد می شود، کاهش می یابد.وقتی که دما کاهش می یابد، ار تعاشات حرارتی اتمها کم شده و الکترونهای رسانش کمتر پراکنده می شوند. کاهش مقاومت تا دمایی که برابر یک سوم دمای دبی جسم است، به صورت خطی است اما هر چه از این دمای مشخصه پائین تر برویم، تغییرات دما با مقاومت، به تدریج کندتر می شود (شکل ۱-۱) [۱].

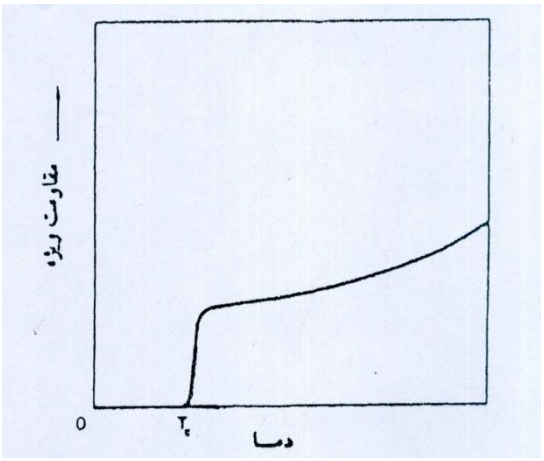


شکل (۱-۱) :تغییرات مقاومت فلز با دما [۱]

برای فلزی کاملا خالص ، که در آن فقط ارتعاشات حرارتی شبکه مانع حرکت الکترون می شود، با نزدیک شدن دما به صفر مطلق، مقاومت بایستی به صفر نزدیک شود.لکن این مقاومت صفرکه نمونه ای فرضی و کاملا بی عیب، به هنگام رسیدن دمای آن به صفر مطلق از خود نشان می دهد، پدیده ابررسانایی نیست. واقعیت این است که نمونه فلزی واقعی نمی تواند کاملا خالص باشد و همیشه دارای مقداری ناخالصی است.

بنابراین نه تنها ارتعاشات شبکه، الکترونها را پراکنده می کنند، بلکه ناخالصیها نیز موجب پراکنده شدن الکترونها می شوند که این پراکندگی کم و بیش مستقل از دماست. در نتیجه « مقاومت باقیمانده » معینی وجود دارد (ρ در شکل ۱-۱) که حتی در پایین ترین دما نیز باقی خواهد ماند. هر اندازه که نا خالصی فلز بیشتر باشد، این مقاومت باقیمانده نیز بزرگتر خواهد بود.

به هر حال بعضی از فلزات رفتار جالبی از خود نشان می دهند، به این معنی که وقتی آنها را سرد کنیم، مقاومت الکتریکی آنها طبق معمول کاهش می یابد، اما با رسیدن دما به مقداری معین که چند درجه بالای صفر مطلق خواهد بود، به ناگهان مقاومت الکتریکی خود را کاملا از دست می د هند (شکل۱-۲). در چنین حالتی گفته می شود که فلز به حالت ابررسانی گذار کرده است. گذار به حالت ابررسانایی حتی در مواردی که ناخالصی آنقدر زیاد است که مقاومت باقیمانده ی خیلی بزرگی در حالت غیر ابررسانایی ایجاد می کند، امکان پذیر است.



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

۱-۳ گاف انرژی

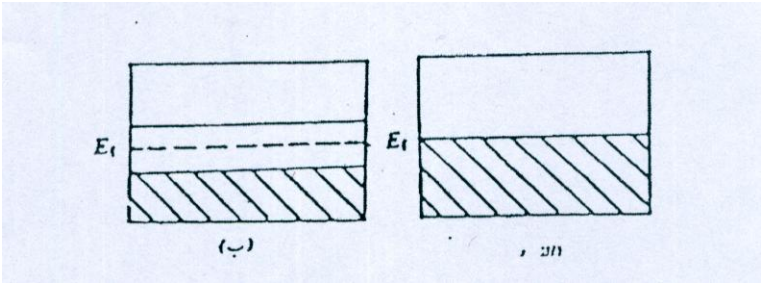
بر خلاف الکترون آزاد، الکترونهای یک جسم جامدفقط انرژی هایی را اختیار می کنند که داخل نوارهای مجاز انرژی قرار گرفته اند. نوارهای مجاز انرژی به وسیله گاف هایی از انرژی ممنوعه از یکدیگر جدا شده اند. گاف انرژی یک مفهوم کاملا کوانتومی است و برای اولین بار در نیم رساناها به اثبات رسیده است.

اگر چه الکترونهای یک نوار کاملا پر نمی توانند در عمل رسانندگی الکتریکی شرکت نمایند ولیکن می تواند با کسب انرژی از یک نوار کاملا پر به یک نوار خالی رفته و سپس در عمل رسانندگی الکتریکی شرکت نمایند، این نوع رسانایی در اجسام نیم رسانای ذاتی مشاهده شده است.

از طرف دیگر الکترونهای موجود در نوار انرژی که بخشی از آن به وسیله الکترون اشغال شده است به راحتی می توانند در عمل رسانندگی الکتریکی شرکت داده شوند.

بالاترین نوار پر در عایق ها و نیم رساناها را نوار ظرفیت و اولین نوار خالی در بالای نوار مذکور را نوار رسانش گویند و اختلاف بین دو نوار مذکور را با نمایش می دهند . برای اجسام نیم رسانا در حدود الکترون ولت و برای اجسام عایق در حدود چندین الکترون ولت است.

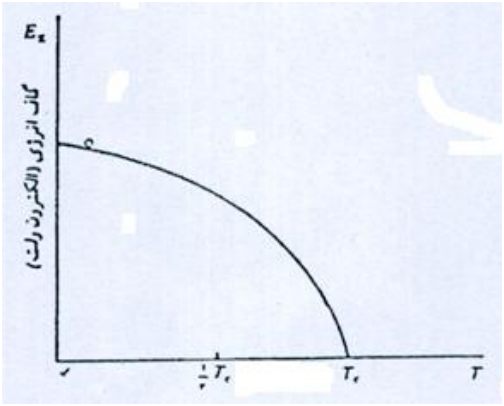
وجود گاف انرژی ابررساناها به اثبات رسیده رسیده است. در شکل (۱-۳) نوار رسانش در دمای صفر درجه کلوین برای یک فلز در حالت ابررسانایی و در حالت عادی نشان داده شده است.گاف انرژی در ابررساناها در حدود $۱۰^{-۴}$ الکترون ولت (معادل حدودا چندین درجه کلوین) است.



شکل (۱-۳) : نوار رسانش در دمای صفر درجه کلوین برای حالت[۲]

الف : عادی ب : ابررسانایی

در ابررساناها گاف انرژی تابع دما بوده و با افزایش دما کاهش می یابد و حال آنکه مقدار گاف انرژی در نیم رساناها تقریبا نسبت به دما ثابت است. در شکل (۱-۴) تغییر گاف انرژی برای یک ابررسانا نسبت به دما رسم شده است [۱].



شکل (۱-٤) : تغییر گاف انرژی نسبت به دما برای یک ابررسانا[۱]

گاف انرژی در ابررساناها را می توان به چندین روش تجربی اندازه گیری کرد :
یکی از این روشها ، روش اپتیکی است که در این روش در دماهای پائین (<) ، ابررساناها را تحت تابش پرتویی از نور فروسرخ حدودا ^{11}۱۰ هرتز قرار می دهند.اگر انرژی فوتون های تابشی بیشتر از گاف انرژی باشد ،فوتونهای مزبور توسط ابررسانا جذب می شوند.از بررسی نمودار تغییر ضریب جذب نسبت به طول موج می توان گاف انرژی را اندازه گیری کرد.چون در عمل جذب هر فوتون پیوند دو الکترون هر زوج کوپر شکسته می شود، پس باید انرژی فوتون تابشی دو برابر گاف انرژی باشد. روشهای تجربی دیگری که وجود گاف انرژی در ابررساتاها را به اثبات می رسانند روش اندازه گیری گرمای ویژه ابررسانا در دماهای مختلف است. در هر دمایی هم الکترونها و هم اتمهای یک شبکه بلوری می توانند در عمل رسانندگی گرمایی یک جسم و در نتیجه در گرمای ویژه آن نقش داشته باشند در این صورت گرمای ویژه برابر است با :

$$= C \ + C \qquad (۱-۱)$$

در دماهای خیلی پایین جمله اول نقش عمده را در گرمای ویژه ی فلز دارد. ثابت شده است که سهم شبکه در گرمای ویژه ی وقتی که فلز در حالت عادی یا حالت ابررسانایی است تغییر نمی کند [۳] بنابراین اختلاف گرمای ویژه ی این دو حالت فقط مربوط به گرمای ویژه ی الکترونی است که در دماهای کمتر از دمای گذار از رابطه زیر پیروی می کند [۱] :

$$C = ae^{\overline{\ }} \qquad (۲-۱)$$

در این رابطه و مقادیر ثابتی هستند ، یک چنین وابستگی دمایی تایید کننده گاف انرژی است.روشی که به بهترین نحو گاف انرژی در نمودار انرژی ابررساناها را به اثبات می رساند، پدیده تونل زنی الکترونهای عادی یا زوجهای کوپر است. در این روش از ساختار فلز–عایق–ابررسانا و یا ابررسانا–عایق–ابررسانا استفاده می شود و با رسم نمودار مشخصه ولت – آمپر برای ساختار مزبور ، می توان گاف انرژی را مشخص نمود[۱].

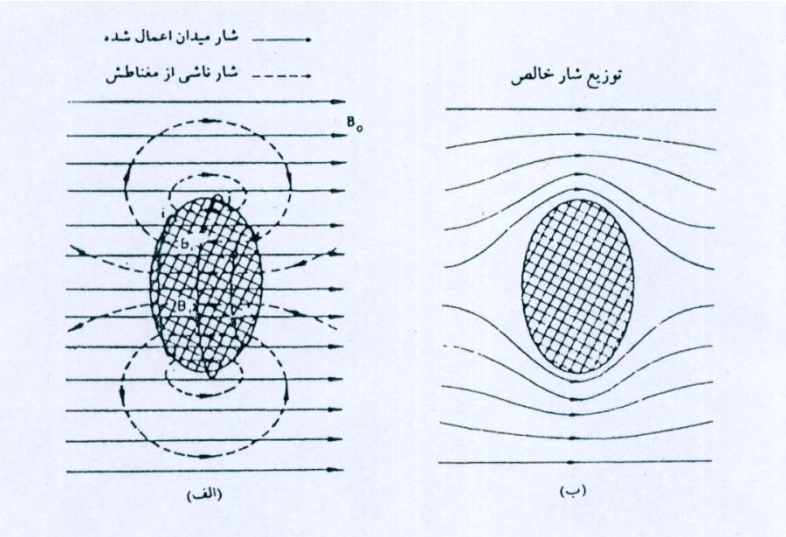
۱-٤ خاصیت دیامغناطیسی (اثر مایسنر – اوکسنفلد)

بیست و دو سال پس از کشف ابررسانایی ، دانسمندان هنوز بر این باور بودند که ابررسانا تنها یک رسانای ایده ال است، یعنی قطعه ای فلز با مقاومت صفر. اکنون به این نکته می پردازیم که چنبن رسانای ایده الی در یک میدان مغناطیسی خارجی که به قدر کافی ضعیف است و نمی توانند رسانش ایده آل نمونه را تخریب کند، باید چگونه رفتاری داشته باشد.نخست فرض کنید رسانای ایده آل در حضور میدان مغناطیسی خارجی صفر تا زیر دمای بحرانی سرد شده است و سپس یک میدان مغناطیسی خارجی برقرار می شود. به آسانی می توان نشان داد که میدان به درون نمونه نفوذ نمی کند (شکل ۱-۵) . در واقع بلافاصله پس از نفوذ میدان به لایه سطحی رسانای ایده آل ،یک جریان القایی ایجاد می شود که بنابر قانون لنز ، میدان مغناطیسی در خلاف جهت میدان مغناطیسی اولیه تولید می کند. بنابرین میدان کل درون نمونه صفر است.

اکنون این رفتار را به کمک معادلات ماکسول اثبات می کنیم.

با تغییر القای $\vec{B}$ ، بنا بر رابطه ی $\text{Curl}\,\vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$ باید در نمونه میدان الکتریکی $\vec{E}$ القا شود. در رسانای ایده آل $\vec{E}=0$ و $\vec{E} = \vec{j}$ که در آن مقاومت ویژه (که در این مورد صفر است) و $\vec{j}$ چگالی جریان القایی است. نتیجه می شود که $\vec{B}$ باید ثابت باشد و با توجه به اینکه پیش از اعمال میدان خارجی $\vec{B}=0$ بوده است، بنابراین پس از برقراری میدان نیز باید صفر باشد.

این پدیده را می توان از راه دیگری نیز تفسیر کرد : چون $\rho = 0$ ، زمان برای نفوذ میدان مغناطیسی به درون رسانای ایده آل به طور نامحدودی طولانی است. به این ترتیب ثابت شد که در هر نقطه از رسانای ایده آل واقع در میدان مغناطیسی خارجی $\vec{B} = 0$ است .ولی می توان با انتخاب گامهای متفاوتی به این وضعیت (رسانای ایده آل در($>$) در میدان مغناطیسی خارجی) رسید، به این ترتیب که نخست نمونه « گرم » را در میدان مغناطیسی خارجی قرار دهیم و سپس آن را تا ($<$) سرد کنیم. در آن صورت ، برای رسانای ایده آل ، الکترودینامیک، نتیجه کاملا متفاوتی پیش بینی می کند.



شکل (۱-۵) : توضیع شار مغناطیسی در اطراف جسم کاملا دیامغناطیس[۱]

در ($<$)، مقاومت ویژه نمونه متناهی است و از اینرو میدان مغناطیسی به درون آن نفوذ می کند. پس از سرد کردن نمونه و گذار به حالت ابررسانایی ، آنچنان که در شکل (۵-۱ ب) نشان داده شده است ، میدان درون آن ماندگار می شود . توجه داشته باشید که در استدلال بالا نمونه با ویژگی $\rho = 0$ را همواره به صورت رسانای ایده آل نام می بریم نه ابررسانا [۴].

پس از سال ۱۹۳۳ همه بر این باور بودند که یک ابررسانا به راستی چیزی بیش از یک رسانای کامل نیست ولی آزمایش های انجام شده توسط مایسنر و اوکسنفلد نشان دادند که این باور درستی نبود[۵] . آنها پی بردند که در($<$) میدان درون نمونه ابررسانا در حضور میدان مغناطیسی خارجی ، مستقل از روش انتخابی برای سرد کردن ابررسانا به زیر T_c، همواره صفر است $\vec{B} = 0$ و این دستاورد بسیار با اهمیتی بود .در واقع ، اگر بی توجه به گذشته نمونه ،$\vec{B} = 0$ باشد ، القای صفر را می توان به صورت خاصیت ذاتی حالت ابررسانایی در $<$ در نظر گرفت که میدان بحرانی ترمودینامیکی است[۴] . افزون بر آن می توان گذار به حالت ابررسانایی رابه صورت گذار فاز بررسی کرد و در نتیجه رهیافت ترمودینامیکی را برای آزمون فاز ابررسانایی به کار بست. به این ترتیب ، حالت ابررسانایی از معادلات زیر پیروی می کند :

$\rho=0$

(۳-۱)

$\vec{B}=0$

(۴-۱)

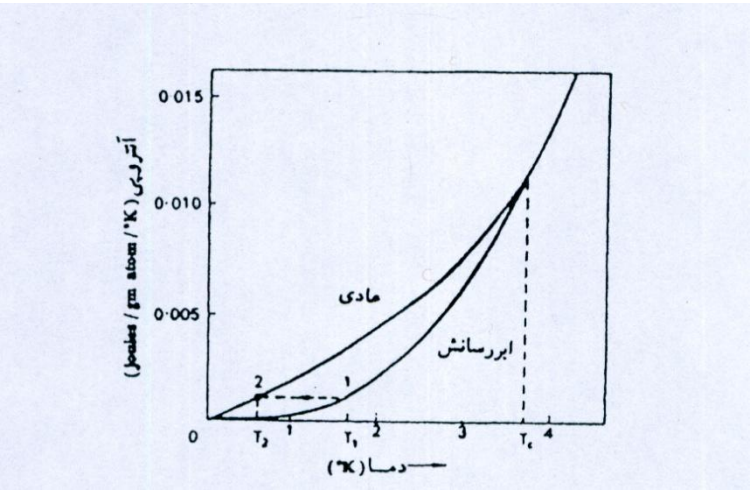
اولین مشخصه بلافاصله از این حقیقت نتیجه می شود که = و از آنجاییکه در دمای گذار ، S = است، بنابراین وقتی گذار اتفاق می افتد ، هیچ تغییری در آنتروپی و در نتیجه گرمای نهان رخ نمی دهد. مشخصه دوم از این حقیقت نتیجه می شود که گرمای ویژه ی ماده توسط رابطه

$$C = VT —$$ (۵-۱)

داده می شود که در آن حجم واحد جرم است، لذا اختلاف بین گرمای ویژه دو حالت ابررسانش و عادی را می توان به صورت زیر نوشت :

$$C - C = VT\,\mu \quad ——$$ (۶-۱)

که مقدار ناپیوستگی در گرمای ویژه ابررسانا را در دمای گذار پیش بینی می کند. —— خاصیتی از ماده است که مقدار آن به حضور یا عدم حضور میدان بستگی ندارد. گرچه در غیاب میدان مغناطیسی هیچ گرمای نهانی به هنگام عبور فلز از نقطه گذار ابررسانا –عادی وجود ندارد ولی وقتی که میدان حضور داشته باشد ، گرمای نهان وجود خواهد داشت. وجود گرمای نهان به این دلیل است که در دمایی بین و صفر مطلق ، آنتروپی حالت عادی بزرگتر از آنتروپی حالت ابررسانایی است. بنابراین برای اینکه گذار در دمایی ثابت رخ دهد لازم است که گرما به جسم داده شود.پس، در حضور میدان مغناطیسی ، گذار ابررسانا–عادی از مرتبه اول است،یعنی گرچه g (انرژی آزاد جسم در واحد حجم) پیوسته است ، ولی — (آنتروپی در واحد حجم) پیوسته نیست [۶]. در شکل (۱-۶) تغییر آنتروپی یک جسم در حالت عادی و در حالت ابررسانایی نسبت به تغییرات دما رسم شده است.



شکل (۱-٦) : آنتروپی قلع در حالتهای عادی و ابررسانایی[۱]

۱-۵ اثر ترموالکتریک در ابررساناها

تا مدتها بر این باور بودند که در ابررساناها آثار ترموالکتریک وجود ندارد، ولی واقعیت این چنین نیست. برای پی بردن به این که در ابررسانا واقعا چه رخ می دهد نخست اثر ترموالکتریک معمولی را در یک فلز عادی بررسی می کنیم. فرض می کنیم که دو سر یک میله ی فلزی در دماهای متفاوت و قرار دارند. به این ترتیب یک شیب دمایی ∇ در طول فلز ایجاد می شود.. در این صورت به الکترونهای آزاد فلز نیرویی وارد می شودو آنها را از انتهای «گرم» به انتهای «سرد» می راند. انبارش بارهای مخالف در دو سر فلز موجب پیدایش یک میدان الکتریکی در آن می شود که به نوبه خود بر الکترونها نیرویی در راستای مقابل ، یعنی از انتهای سرد به انتهای گرم وارد میکند. در شرایط ایستا بین این دو نیرو موازنه برقرار می شود و حاصل آن یک افت پتانسیل ثابت ، ، در دو سر نمونه است که آن را نیروی محرکه ترموالکتریکی (ترمو emf) می خوانند :

$$V = \alpha(T - T) \qquad (۷-۱)$$

که در آن α توان ترموالکتریکی مطلق (ترمو توان) فلز است.

در یک ابررسانا ، فرایند انتقال گرما به پدیده الکترونی متفاوتی مربوط می شود، این بار فرض می کنیم که دو سر یک میله ابررسانا در دماهای متفاوت و قرار دارند. باز هم شیب دمایی ∇ بر برانگیختگیهای عادی ابررسانا نیرو وارد می کند و جریانی از برانگیختگیهای عادی به صورت زیر تولید می شود :

$$J = \sigma\alpha\nabla T \qquad (۸-۱)$$

که در آن σ رسانندگی حالت عادی ابررساناست. به عنوان یک پاسخ آنی ، جریان موازنه کننده ای از بخش ابررسانایی، j ، آغاز خواهد شد، که در اثر آن جریان عادی j جبران می شود. در واقع بنابر معادله (۱-۷) جریان j از نوع جریان پتانسیلی است یعنی curl j =0 است این نشان می دهد که برای جریان کل که به صورت زیر تعریف می شود :

$$= + \qquad (۹-۱)$$

$$\text{Curl } j = \text{Curl } j$$

جریان ابررسانش j باید در شرایط ایستا ، در معادله لندن صدق کند و از آنجا به معادله آشنای میدان مغناطیسی $\nabla \vec{H} = -\vec{H}$ می رسیم که از این معادله به طور مستقیم اثر مایسنر-اوکسنفلد نتیجه می شود. این نشان می دهد که ، در حضور شارش گرما ، جریان کل در درون یک قطعه همسانگرد همگن ابررسانا نیز باید صفر باشد $= 0 + =$ یعنی $= -$.

این نشان می دهد که برانگیختگیهای عادی با نزدیک شدن به لبه های ابررسانا در اثر شیب دمایی به حامل های ابررسانش یعنی زوجهای الکترون تبدیل می شوند و در راستای مخالف حرکت می کنند و بدین ترتیب جریان موازنه کننده ی j را به وجود می آورند. پس می توان گفت در یک ابرسانا توان ترموالکتریک در دمای گذار به طور ناگهانی کاهش می یابد و به صفر می رسد [۴]. به طور تجربی و نظری معلوم شده است که در یک ابررسانا ، اثر ترموالکتریک رخ نمی دهد. به عنوان مثال، هیچ جریانی در مداری متشکل از دو ابررسانای متفاوت ،وقتی که محل های اتصال آنها در دماهای مختلفی زیر دمای گذار نگه داشته شود ، برقرار نمی گردد.

اگر یک نیروی محرکه گرمایی به وجود آید، وضعیت غریبی پدیدار خواهد شد که در آن جریان به مقدار بحرانی خود افزایش خواهد یافت، صرفنظر از اینکه اختلاف دمای دو محل اتصال تا چه اندازه کوچک باشد. از روابط تامسون نتیجه می شود که اگر هیچ نیروی محرکه ی گرمایی در مدار ابررسانا وجود نداشته باشد ، ضرایب پلتیه و تامسون برای تمام فلزات ابررسانا باید یکی باشد، و در واقع آنها صفر هستند.

از آنجا که تمام فلزات ابررسانا ضرایب ترموالکتریکی یکسانی دارند، اصولا ممکن است از آنها به عنوان استانداردی برای اندازه گیری روی فلزات دیگر استفاده کرد. قدر مطلق ضرایب ترمودینامیکی فلز عادی را می توان در مداری تشکیل شده از این فلز و هر ابررسانایی اندازه گرفت.

۱-٦ گرمای ویژه الکترونی و شبکه

دو عامل در گرمای ویژه فلز سهم دارند . گرما، هم موجب بالا رفتن دمای شبکه می شود و هم اینکه دمای الکترونهای رسانش را بالا می برد. بنابراین گرمای ویژه فلز را می توان به صورت زیر نوشت:

$$C = C \quad + C \qquad (۱۰-۱)$$