

صلى الله عليه وسلم



دانشگاه اصفهان

دانشکده علوم

گروه فیزیک

پایان نامه کارشناسی ارشد رشته‌ی فیزیک گرایش ماده چگال

اثرات برهم‌کنش مایع فرمی بر روی آهنگ و اهلس شبه‌ذرات در ابررسانای موج-d

استاد راهنما:

دکتر محمدعلی شاهزمانیان

پژوهشگر:

مینا قضاوی

آبان ماه ۱۳۹۱

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 میناقضاوی
تحت عنوان

اثرات برهم‌کنش مایع فرمی بر روی آهنگ واهلش شبه‌ذرات در ابررسانای موج-d

در تاریخ ۹۱/۰۸/۰۹ توسط هیأت داوران زیر بررسی و با درجه ... عالی ... به تصویب نهایی رسید.

- | | | | |
|-----------------------------|-------------------------|-------------------------|------|
| ۱- استاد راهنمای پایان نامه | دکتر محمدعلی شاهزمانیان | با مرتبه‌ی علمی استاد | امضا |
| ۲- استاد داور داخل گروه | دکتر حشمت ا... یآوری | با مرتبه‌ی علمی دانشیار | امضا |
| ۳- استاد داور خارج از گروه | دکتر هادی سلامتی | با مرتبه‌ی علمی استاد | امضا |

امضای مدیر گروه

خداوندا...

اگر به خاطر آورم که چگونه در گذشته به من یاری رسانده‌ای، توکل کردن به تو در زمان حال و سپردن آینده

به دستان توانای تو برایم بسیار آسان می‌شود.

پس پروردگارم را که در مسیر علم آموزی دلیل راهم شد و بوسه شکر بردستان پدر و مادرم که سایه با عظمت

وجودشان آرامش جانم بود.

زحمات استاد کرامت‌زور کوارم جناب آقای دکتر محمد علی شاهزادگان راج می‌نم و قدردان راهنمایی‌های

استادانه و همراهی‌های بی‌دریغشان هستم، در پناه ایزدمنان عمرشان پربار همراه با عافیت.

و نیز بر خود لازم می‌دانم از اساتید و اور جناب آقای دکتر یاور و جناب آقای دکتر سلامتی از دانشگاه صنعتی اصفهان

شکر و قدردانی نمایم.

همچنین از مساعدت‌های تحصیلات تکمیلی دانشگاه، مدیریت محترم گروه و کلیه اساتید و کارمندان گروه شکر می‌نمایم.

این اندک را به

پدر و مادر عزیزم

به پاس محبت های بی دریغشان که هرگز فروکش نمی کند، تقدیم می کنم.

چکیده

پس از کشف ابررساناهای با دمای گذار بالا، معلوم شد که این ابررساناها مانند ابررساناهای BCS عادی رفتار نمی‌کنند. گاف انرژی آنها که به شکل $\Delta = \Delta_0 \cos 2\theta$ در دو بعد می‌باشد کاملاً متقارن نیست، جفت‌شدگی در آنها از نوع جفت-شدگی موج-S نمی‌باشد و جفت‌شدگی در آنها از نوع جفت‌شدگی موج-d می‌باشد. در این پایان‌نامه با استفاده از نظریه پدیده شناختی پارامکاتی و رندریا به بررسی اثرات برهم‌کنش مایع فرمی بر روی ابررساناهای موج-d پرداخته‌ایم.

در ابتدا با استفاده از قانون طلایی فرمی به محاسبه آهنگ واهلش، τ ، در برخورد شبه‌ذرات گرم با یکدیگر پرداختیم و نشان دادیم که τ متناسب با $\frac{1}{T^3}$ می‌باشد، به عبارت دیگر با نتایج تجربی در توافق است. احتمال گذار در فرآیندهایی که دو شبه‌ذره به دو شبه‌ذره، یک شبه‌ذره به سه شبه‌ذره و سه شبه‌ذره به یک شبه‌ذره تبدیل می‌شود را برحسب کمیت-های برهم‌کنشی متقارن و پادمقارن به‌دست آوردیم. همچنین رسانندگی گرمایی در برخورد شبه‌ذرات گرم را با یکدیگر نیز محاسبه کردیم. محاسبات ما نشان می‌دهد که در دماهای متفاوت رسانندگی گرمایی متناسب با $\frac{1}{T}$ و $\frac{1}{T^2}$ است که با نتایج تجربی در توافق نیستند، چون نتایج تجربی $K \propto T$ را تأیید می‌کند. بنابراین به محاسبه رسانندگی گرمایی در برخورد شبه‌ذرات پادگره با یکدیگر پرداختیم، که وابستگی دمایی آن متناسب با T به‌دست آمد که در توافق خوبی با نتایج تجربی می‌باشد، لذا می‌توان گفت که در رسانندگی ابررساناهای YBCO علاوه بر الکترون‌ها و فونون‌ها سازوکار دیگری نیز دخیل می‌باشد. علاوه بر این دیدیم که رسانندگی گرمایی YBCO در جهت‌های مختلف، مقدار یکسانی دارد که این نتیجه عدم وابستگی رسانندگی گرمایی در این ابررساناها را به جهت نشان می‌دهد. برای اطمینان حاصل کردن از محاسبات خود به محاسبه آهنگ واهلش و رسانندگی گرمایی با استفاده از رهیافت بولتزمن و شروع روابط از انتگرال برخوردی پرداختیم و دیدیم که به همان نتایج به‌دست آمده در روش قبل رسیدیم.

کلید واژه‌ها:

ابررسانای موج-d، آهنگ واهلش، رسانندگی گرمایی، YBCO.

فهرست مطالب

صفحه

عنوان

فصل اول: مقدمه‌ای بر ابررسانایی

- ۱-۱- مقدمه و تاریخچه..... ۱
- ۲-۱- مقاومت صفر..... ۲
- ۳-۱- گرمای ویژه..... ۳
- ۴-۱- گاف انرژی..... ۵
- ۵-۱- عمق نفوذ..... ۷
- ۶-۱- معادله لندن..... ۸
- ۱-۶-۱- تعمیم کوانتومی معادله لندن..... ۱۰
- ۷-۱- طول هم‌دوسی..... ۱۱
- ۸-۱- دسته‌بندی ابررساناها و بررسی خواص مغناطیسی آنها..... ۱۲
- ۱-۸-۱- ابررساناهای نوع اول..... ۱۲
- ۲-۸-۱- ابررساناهای نوع دوم..... ۱۳
- ۹-۱- نتیجه‌گیری..... ۱۵

فصل دوم: مایع فرمی

- ۱-۲- مقدمه..... ۱۶
- ۲-۲- مایعات فرمی جنبشی..... ۱۷
- ۳-۲- تعریف شبه‌ذره و شبه‌حفره..... ۱۸
- ۱-۳-۲- انرژی شبه‌ذرات..... ۱۹
- ۴-۲- برانگیختگی‌های اولیه گاز فرمی..... ۲۱
- ۵-۲- بسط انرژی آزاد..... ۲۳
- ۱-۵-۲- انرژی موضعی یک شبه‌ذره..... ۲۴
- ۶-۲- هلیوم سه..... ۲۵
- ۱-۶-۲- گرمای ویژه هلیوم سه..... ۲۶
- ۲-۶-۲- خواص تبهگنی هلیوم سه..... ۲۷

۲۷	۷-۲- هلیوم چهار.....
۲۸	۱-۷-۲- هلیوم مایع II.....
۲۸	۸-۲- چگالش بوز- انیشتین.....
۳۰	۹-۲- نتیجه گیری.....

فصل سوم: نظریه تعمیم یافته BCS

۳۱	۱-۳- مقدمه.....
۳۲	۲-۳- برهم کنش الکترون- فونون و تشکیل جفت های کوپر.....
۳۳	۳-۳- برهم کنش ها و حالت های پایه ای دو ذره.....
۳۵	۴-۳- جفت های کوپر و حالت زمینه BCS.....
۳۸	۱-۴-۳- حالت های پایه BCS.....
۳۹	۵-۳- نظریه میدان میانگین.....
۴۰	۶-۳- نمایش میدان میانگین Δ_k
۴۱	۷-۳- تبدیلات بوگولیوف.....
۴۴	۸-۳- جفت شدگی اسپین یگانه و گاف انرژی.....
۴۵	۱-۸-۳- گاف انرژی و وابستگی دمایی.....
۴۸	۹-۳- تابع موج تعمیم یافته BCS.....
۵۰	۱۰-۳- نتیجه گیری.....

فصل چهارم: ابررساناهای با دمای گذار بالا

۵۱	۱-۴- مقدمه.....
۵۲	۲-۴- خواص ابررساناهای با دمای گذار بالا.....
۵۴	۳-۴- ساختار $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$
۵۵	۴-۴- دسته بندی حالت های جفتی در مسین ها.....
۵۵	۱-۴-۴- حالت های جفتی ممکن در شبکه دو بعدی.....
۵۷	۲-۴-۴- آثار راست گوشه ای.....

- ۵-۴- گذار چار گوشه- راست گوشه و جفت شدگی..... ۵۸
- ۶-۴- نتیجه گیری..... ۶۰

فصل پنجم: اثرات برهم کنش مایع فرمی بر روی ابررساناهای موج-d

- ۱-۵- مقدمه..... ۶۱
- ۲-۵- محاسبه آهنگ واهلش شبه ذره..... ۶۲
- ۱-۲-۵- پراکندگی شبه ذرات گرمایی با یکدیگر..... ۶۶
- ۲-۲-۵- پراکندگی شبه ذرات پادگره با یکدیگر..... ۶۷
- ۳-۲-۵- پراکندگی شبه ذرات پادگره با شبه ذرات گره..... ۶۷
- ۳-۵- رسانندگی گرمایی $YBCO$ ۶۸
- ۴-۵- محاسبه رسانندگی گرمایی در برخورد شبه ذرات گرمایی- شبه ذرات گرمایی..... ۶۹
- ۵-۵- محاسبه رسانندگی گرمایی در برخورد شبه ذرات پادگره- شبه ذرات پادگره..... ۷۴
- ۶-۵- نتیجه گیری..... ۷۵
- پیوست الف..... ۷۶
- پیوست ب..... ۸۰
- منابع و مآخذ..... ۸۳

فهرست شکل ها

عنوان	صفحه
شکل ۱-۱- اعمال میدان مغناطیسی به رسانای ایده‌آل.....	۳
شکل ۱-۲- (الف) - تغییرات گرمای ویژه نسبت به دما برای یک رسانای ایده‌آل و ابررسانا (ب) تغییرات آنژیوبی نسبت به دما برای یک رسانای ایده‌آل و ابررسانا.....	۴
شکل ۱-۳- تغییرات جریان بر حسب ولتاژ در یک ابررسانا.....	۷
شکل ۱-۴- تغییرات میدان نفوذی نسبت به فاصله از سطح نمونه.....	۱۰
شکل ۱-۵- طول همدوسی و عمق نفوذ در ابررساناهای نوع اول.....	۱۲
شکل ۱-۶- نمایشی از حالت میانی (الف) و (ب) استوانه، (ج) کره.....	۱۳
شکل ۱-۷- طول همدوسی و عمق نفوذ در ابررساناهای نوع دوم.....	۱۳
شکل ۱-۸- تغییرات میدان اعمالی نسبت به دما (الف) ابررسانای نوع دوم (ب) ابررسانای نوع اول.....	۱۴
شکل ۳-۱- برهم‌کنش الکترون-الکترون.....	۳۲
شکل ۳-۲- گاف انرژی ابررساناهای موج-d در دو بعد.....	۴۷
شکل ۴-۱- نمایش ابررساناهای اکسیدی ($YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$).....	۵۳
شکل ۴-۲- ساختار $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ راست گوش.....	۵۴
شکل ۴-۳- نمایش ABX_3 در یک ساختار مکعبی.....	۵۵
شکل ۴-۴- چهار نمایش ممکن در یک صفحه مربعی CuO_2	۵۶
شکل ۴-۵- (الف) الگوی نواری از بلور پس از بازپخت (ب) شبیه‌سازی الگوی راه از بلور (ج) گذار چارگوشه- راست گوشه در YBCO به صورت تابعی از جمع شدگی (غلظت اکسیژن).....	۵۸
شکل ۵-۱- شبه‌ذرات گرم روی گره‌ها و شبه‌ذرات داغ روی پادگره‌ها.....	۷۰
شکل ۵-۲- شبه‌ذرات گره‌ای روی سطح فرمی ابررسانای YBCO.....	۷۰
شکل ۵-۳- تغییرات رسانندگی گرمایی YBCO نسبت به دما.....	۷۳

فهرست جدول ها

صفحه	عنوان
۵۷.....	جدول ۴-۱- نمایش چهار حالت تک صفحه با تقارن مکعبی.....

فصل اول

مقدمه‌ای بر ابررسانایی

۱-۱ مقدمه و تاریخچه

ابررسانایی در سال ۱۹۱۱ میلادی در آزمایشگاه لیدن کشف شد [۱]. اچ. کامرلینگ اونس^۱ به هنگام مطالعه وابستگی دمایی مقاومت ویژه الکتریکی نمونه‌ای از جیوه، مشاهده کرد که در دمای T_c نزدیک به ۴ کلوین، مقاومت نمونه ناگهان به صفر میل می‌کند و در همه دماهای زیر T_c مقاومت دیگر قابل اندازه‌گیری نیست. ویژگی‌های مغناطیسی ابررساناها نیز جالب توجه‌اند. در سال ۱۹۳۳ میلادی مایسنر^۲ موفق به کشف اثر طردشار ابررساناها شد [۱]. ابررسانایی در دماهای بسیار پائین برای طیف وسیعی از فلزات و آلیاژها مثل قلع و آلومینیوم رخ می‌دهد. همچنین برخی از آلیاژها و نیمه‌رساناها نیز ابررسانا هستند ولی فلزاتی مثل طلا و نقره این پدیده را از خود نشان نمی‌دهند، این پدیده در فلزات فرومغناطیس نیز اتفاق نمی‌افتد. در سال ۱۹۵۷ نظریه میکروسکوپی BCS به خوبی حالت ابررسانایی را توصیف کرد [۱]. در همین سال یک مقاله نظری توسط آبریکوسوف^۳ منتشر شد که ابررساناها را به دو دسته I و II تقسیم کرد.

¹ H. Kamerlingh Onnes

² Meissener

³ Abrikosov

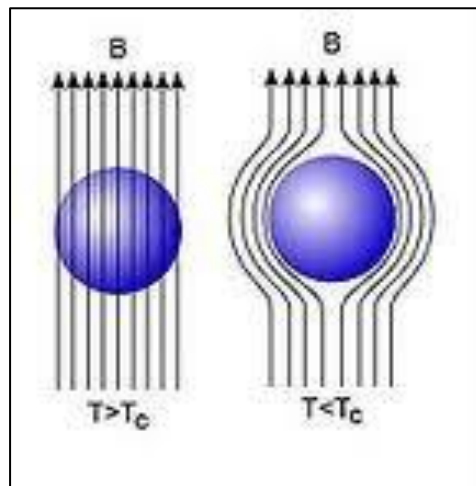
پس از آن با گسترش تحقیقات در دهه ۱۹۸۰ مولر^۱ و بدنورز^۲ در حال ساخت نوعی سرامیک بودند. این سرامیک-ها در دمای بسیار بالاتر از صفر مطلق در حدود ۳۰ تا ۴۰ کلوین، خاصیت ابرسانایی از خود نشان می‌دهند [۲]. البته امروزه ابرساناهای سرامیکی ساخته شده‌اند که تا بیش از ۲۰۰ کلوین از خود خاصیت ابرسانایی نشان می‌دهند [۳]. همانطور که از ظاهر امر، برمی‌آید خاصیت ابرسانایی در سرامیک‌ها و فلزات سرشتی متفاوت دارند. سرامیک‌ها نارسانا هستند و سپس به ابرسانا تبدیل می‌شوند، در حالی که فلزات رسانی هستند و ناگهان مقاومت آنها صفر می‌شود. دمای گذار به ابرسانایی در فلزات بسیار پایین‌تر از سرامیک‌ها است. به این ترتیب نظریه BCS دیگر قادر به توضیح ماهیت ابرسانایی در سرامیک‌های با دمای گذار بالا نیست.

۲-۱ مقاومت صفر

مقاومت الکتریکی یک رسانای فلزی به تدریج با کاهش دما، کم می‌شود. در رساناهای معمولی مثل مس و نقره، وجود ناخالصی و مشکلات دیگر این روند را کند می‌کند. به طوریکه حتی در صفر مطلق هم نمونه‌های معمول مس، همچنان مقاومت الکتریکی کمی دارند. در مقابل ابرساناها موادی هستند که اگر دمایشان از یک دمای بحرانی کمتر شود ناگهان مقاومت الکتریکی خود را از دست می‌دهند، به طوریکه جریان الکتریسته در یک حلقه ابرسانا می‌تواند برای مدت نامحدودی بدون وجود منبع جریان وجود داشته باشد. مانند پدیده فرومغناطیس و خطوط طیفی اتم‌ها، ابرسانایی نیز پدیده‌ای کوانتومی است و نمی‌توان آن را با فیزیک کلاسیک مانند یک رسانای مطلوب توصیف کرد. در حالت ابرسانایی مقاومت الکتریکی ماده صفر می‌شود و ماده خاصیت دیامغناطیس کامل پیدا می‌کند یعنی میدان را از درون خود طرد می‌کند که به این اثر، اثر مایسنر می‌گویند. طرد میدان مغناطیسی تنها تفاوت اصلی ابرسانا با رسانای کامل است، زیرا در رسانای کامل انتظار می‌رود میدان مغناطیسی ثابت بماند در حالی که در ابرسانا میدان مغناطیسی همواره صفر است. لازم به ذکر است که اثر مایسنر اساسی‌ترین خاصیت ابرسانا است. این خاصیت با توجه به اینکه جریان‌های پوششی دیامغناطیسی نسبت به زمان ثابت بوده و مادام که میدان اعمال شده تغییر نکند از بین نمی‌روند، در برگرنده خاصیت مقاومت صفر نیز است. در بسامدهای اپتیکی، حالت ابرسانش همان مقاومت ویژه حالت عادی را نشان می‌دهد و بسامدی که در آن مقاومت شروع به ظاهر شدن می‌کند در ناحیه میکروموج یا ناحیه موج بلند فرسرخ بیناب است.

¹ K. Alex Muller

² J. Georg Bednorz



شکل ۱-۱ اعمال میدان مغناطیسی به رسانای ایده‌آل [۱]

۳-۱ گرمای ویژه

ابتدا به معرفی آنتروپی می‌پردازیم. آنتروپی، معرف نظم سامانه است که با توجه به رابطه (۱-۱) و طبق نظریه نرنست^۱، که بیان می‌کند آنتروپی یک جسم در $T=0$ صفر است می‌توان نتیجه گرفت $\left(\frac{\partial H_{cm}}{\partial T}\right)_{T=0} = 0$ یعنی در $T=0$ منحنی H_{cm} دارای مشتق صفر است. حال با در دست داشتن آنتروپی، می‌توان گرمای ویژه را به صورت زیر محاسبه کرد [۱]

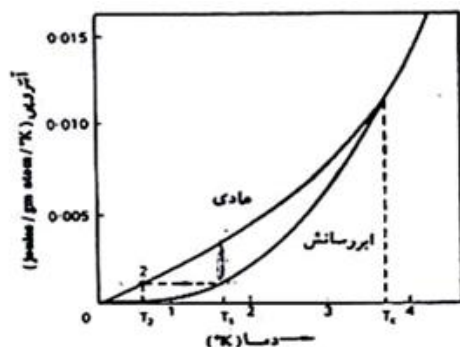
$$C_s - C_n = T \frac{d}{dT} (S_n - S_s) = \mu_0 \gamma T_c \left(\frac{dH_c}{dT} \right)^2, \quad (1-1)$$

که این رابطه به رابطه راتجزز^۲ معروف است.

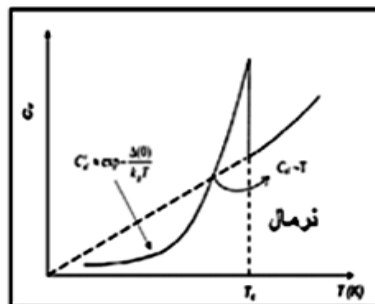
آنتروپی حالت ابررسانایی کمتر از حالت عادی است به دلیل اینکه در حالت ابررسانایی الکترون‌ها به صورت جفت مرتب شده‌اند و نظم خاصی بین الکترون‌ها وجود دارد که این نظم در بین الکترون‌ها در حالت عادی نیست. لذا با توجه به اینکه می‌دانیم با افزایش نظم، آنتروپی کاهش می‌یابد پس آنتروپی حالت ابررسانایی کمتر از حالت عادی است. با توجه به رابطه (۱-۱) وقتی $T = T_c$ باشد، گرمای ویژه حالت ابررسانایی در مقایسه با حالت عادی به اندازه جمله سمت راست بزرگتر است. که این پرش در شکل زیر نشان داده شده است.

¹ Narensset

² Rutgers



(ب)



(الف)

شکل ۱-۲ (الف) - تغییرات گرمای ویژه نسبت به دما برای یک رسانای ایده‌آل و ابررسانا (ب) تغییرات آنتروپی

نسبت به دما برای یک رسانای ایده‌آل و ابررسانا [۱]

داده‌های گرمای ویژه شواهد بیشتری در تأیید وجود نوعی گاف انرژی در ترازهای الکترونی به دست می‌دهند. می‌دانیم گرمای ویژه شامل گرمای ویژه الکترونی و گرمای ویژه شبکه است. لذا وقتی سامانه‌ای ابررسانا می‌شود تنها الکترون‌هایش جفت می‌شوند و شبکه هیچ تغییری نمی‌کند بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که گرمای ویژه شبکه برای هر دو حالت عادی و ابررسانایی یکسان است.

لذا تفاوت در گرمای ویژه حالت‌های ابررسانا و عادی مربوط به گرمای ویژه الکترونی است [۱].

$$C_n - C_s = (C_{el})_n - (C_{el})_s \quad (۲-۱)$$

در یک سامانه جامد عادی گرمای ویژه از رابطه زیر داده می‌شود [۱]

$$C = A \left(\frac{T}{\theta} \right)^3 + \gamma T, \quad (۳-۱)$$

در این رابطه جمله اول سهم گرمای ویژه شبکه و جمله دوم سهم الکترون‌هاست.

پس از انجام آزمایش و مشاهدات، سهم گرمای ویژه الکترونی برای یک ابررسانا به صورت زیر به دست می‌-

آید [۱]

$$(C_{el})_s = ae^{\frac{-b}{k_B T}} = ae^{\frac{-\Delta}{k_B T}} \quad (۴-۱)$$

که a مقدار ثابت و b مقداری است که به گاف انرژی ابررسانا مربوط است. همچنین گرمای ویژه در حالت عادی را می‌توان به صورت زیر نوشت

$$(C_{el})_n = \gamma T. \quad (5-1)$$

با توجه به منحنی آنتروپی بر حسب دما چون تغییرات آنتروپی حالت ابررسانایی سریعتر از تغییرات آنتروپی حالت عادی است بنابراین گرمای ویژه حالت ابررسانایی بزرگتر از گرمای ویژه حالت عادی می‌باشد. اما در دماهای نزدیک دمای صفر چون همه‌ی الکترون‌ها به صورت جفت مرتب شده‌اند و حالت زمینه دستگاه توسط یک گاف انرژی حالت ابررسانایی، از حالت‌های بالایی فاصله گرفته است؛ بنابراین هیچ الکترون منفردی وجود ندارد که بتواند در فرآیند جذب گرما شرکت کند، از طرفی جفت‌های کوپر^۱ نیز نمی‌توانند در انتقال گرما نقش داشته باشند، لذا گرمای ویژه حالت عادی در دماهای نزدیک دمای صفر بزرگتر از گرمای ویژه حالت ابررسانایی است. آنچه از این قسمت نتیجه می‌شود این است که در دماهای پایین گرمای ویژه ابررسانا کمتر می‌شود و به صورت نمایی با دما تغییر می‌کند. لازم به ذکر است با توجه به این که هنگام گذار از حالت عادی به ابررسانا هیچ‌گونه گرمای نهانی وجود ندارد و پرشی در گرمای ویژه مشاهده می‌شود به این نوع گذارها، گذارهای مرتبه‌ی دوم می‌گویند. به گذارهایی مرتبه دوم می‌گویند که در حین تغییر حالت از یک فاز به فاز دیگر گرمای نهان و میدان وجود نداشته باشد به عبارتی می‌توان گفت در $T=0$ ، $S_n = S_s$ و در نتیجه گذار در $T = T_C$ شامل گرمای نهان نمی‌شود، بنابراین در $T = T_C$ گذار فاز مرتبه دوم است. اما در $T < T_C$ با اعمال میدان مغناطیسی نسبتاً شدید، گذار حالت ابررسانایی به حالت عادی رخ می‌دهد به دلیل اینکه $S_n < S_s$ است چنین گذاری با جذب گرما همراه است، بنابراین در حضور میدان مغناطیسی همه گذارها در $T < T_C$ گذارهای فاز مرتبه اول هستند.

۴-۱ گاف انرژی

همانطور که در بالا گفتیم، اندازه‌گیری گرمای ویژه ابررسانا در دمای پایین به دلیل وجود گاف انرژی می‌باشد. از آنجایی که در فلز عادی گرمای ویژه به صورت توانی با دما تغییر می‌کند و در دمای پایین به صورت خطی است، این گاف در فلز عادی مشاهده نمی‌شود. در ضمن باید به این نکته توجه کنیم که سازوکار این گاف انرژی در ابررسانا با گاف انرژی در نیمه‌رساناها متفاوت است. گاف انرژی یک مفهوم کاملاً کوانتومی است و اولین بار در نیمه‌رساناها به اثبات رسیده است. در ابررسانا گاف انرژی تابع دما بوده و با افزایش دما کاهش می‌یابد در حالی که مقدار گاف انرژی در نیمه‌رساناها تقریباً ثابت است. برای درک مفهوم گاف انرژی، یک گاز الکترونی آزاد را

¹ Cooper pairs

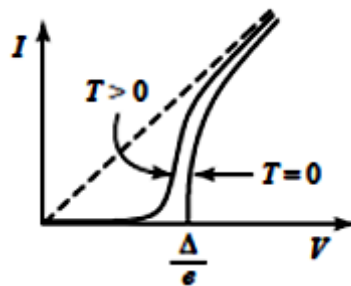
در نظر می‌گیریم. می‌دانیم که حالت زمینه دستگاہ با قرار گرفتن الکترون‌ها در حالت‌هایی با تکانه P و پیروی از اصل طرد پائولی تشکیل می‌شود. حالت‌های زیر سطح فرمی، پر و حالت‌های بالای آن خالی است. حالت برانگیخته وقتی ایجاد می‌شود که یک الکترون از حالتی با تکانه P که قبلاً اشغال بوده ($P < P_F$) به حالتی با تکانه P' که قبلاً خالی بوده ($P' > P_F$) انتقال یابد که در اینجا اصطلاحاً یک جفت الکترون-حفره تشکیل می‌شود. انرژی لازم برای ایجاد چنین برانگیختگی به این صورت است [۱]

$$E_{pp'} = \frac{P'^2 - P^2}{2m} \geq 0. \quad (۶-۱)$$

اگر P و P' نزدیک تکانه فرمی باشند این مقدار بسیار کم است. این مسأله برای یک فلز عادی قابل کاربرد است اما برای یک ابررسانا مسأله به گونه‌ای دیگر است: به عبارتی در حالت ابررسانایی انرژی لازم برای خلق یک جفت الکترون-حفره از رابطه (۱-۲) به دست نمی‌آید و برای ایجاد برانگیختگی در یک ابررسانایی لازم است که $E_{pp'} \geq 2\Delta$ باشد که در این رابطه Δ گاف انرژی ابررسانا است. در دماهای پایین گاف توسط رابطه $\Delta \approx 1.76k_B T$ به دمای گذار مربوط می‌شود. بدیهی است که 2Δ ، انرژی لازم برای ایجاد دو جفت الکترون-حفره است در نتیجه برای ایجاد یک جفت الکترون-حفره انرژی به اندازه Δ لازم است. روش‌های تجربی فراوانی برای اندازه‌گیری گاف انرژی در ابررسانا وجود دارد که در اینجا به برخی اشاره می‌کنیم [۴]:

- ۱ - رفتار نمایی گرمای ویژه بر حسب دما نشان دهنده وجود یک گاف انرژی است.
- ۲ - تابش موج الکترومغناطیسی: اگر فوتونی با بسامد ω به یک ابررسانا تابیده شود، زمانی این فوتون جذب و منجر به ایجاد حالت‌های برانگیخته می‌شود که انرژی فوتون حداقل برابر 2Δ باشد.
- ۳ - پدیده تونل زنی

در اینجا اگر نمودار جریان بر حسب ولتاژ را رسم کنیم مشاهده می‌کنیم که تا قبل از ولتاژ آستانه جریانی وجود ندارد و پس از آن نمودار به صورت خطی است.



شکل ۳-۱ تغییرات جریان بر حسب ولتاژ در یک ابررسانا [۴]

آزمایش‌ها نشان می‌دهند که گاف انرژی با دما تغییر می‌کند. در دمای صفر بیشترین گاف انرژی را داریم و همچنان که دما افزایش یابد، گاف انرژی کاهش می‌یابد و در دمای $T = T_c$ گاف انرژی از بین می‌رود. از آنجا که گاف انرژی مشخصه ابررسانایی است، این رفتار دمایی مورد انتظار است چون در $T=0$ جسم ابررسانا است و در $T = T_c$ جسم به حالت عادی می‌رود و گاف انرژی حذف می‌شود.

لازم به ذکر است ابررساناهایی نیز وجود دارند که گاف ندارند که به این وضعیت ابررسانایی بی‌گاف می‌گویند. که در این نوع ابررساناها کمینه‌ای در چگالی حالت‌ها در سطح فرمی وجود دارد اما گاف واقعی وجود ندارد.

۵-۱ عمق نفوذ^۱

برای آنکه ابررسانا میدان را به‌طور کامل از خود دفع کند لازم است که جریان‌های پوششی روی سطح ابررسانا جاری شود [۵] و اگر این جریان در ناحیه‌ای به ضخامت صفر جاری شود آنگاه چگالی جریان بی‌نهایت می‌شود که از نظر فیزیکی مفهومی ندارد، لذا جریان در پوسته نازکی روی سطح ابررسانا جاری است. بنابراین درون پوسته میدان مغناطیسی وجود دارد که این فاصله را عمق نفوذ میدان مغناطیسی می‌نامیم. عمق نفوذ به دما بستگی دارد. اگر $\lambda(0)$ را عمق نفوذ میدان در دمای صفر باشد عمق نفوذ در هر دمایی از رابطه تجربی زیر به دست می‌آید

$$\lambda(T) = \frac{\lambda(0)}{\left[1 - \left(\frac{T}{T_c}\right)^4\right]} \quad (7-1)$$

از این رابطه پیداست که عمق نفوذ با افزایش دما، افزایش می‌یابد. لازم به تذکر است که بدانیم ماهیت جریان تراپردی و پوششی با هم متفاوت است اما به‌طور کلی اثرشان یکی است. با اعمال میدان مغناطیسی به یک ابررسانا موجب جاری شدن ابرجریان بدون مقاومت می‌شود که میدان ناشی از این جریان که به آن جریان پوششی می‌-

¹ Penetration depth