



دانشگاه اصفهان

دانشکده علوم

گروه فیزیک

پایان نامه‌ی کارشناسی ارشد رشته‌ی فیزیک گرایش ماده چگال

چسبندگی برشی (وشکسانی) ابرسانی Sr_2RuO_4 در حالت جفت‌شدگی اسپین

سه‌گانه

استاد راهنما:

پروفسور محمد علی شاهزادمانیان

پژوهشگر:

افسانه کریمی

مهر 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 نامه‌ی کارشناسی ارشد رشته‌ی فیزیک گرایش ماده چگال خانم افسانه کریمی
تحت عنوان

وشکسانی ابرسانی Sr_2RuO_4 در حالت جفت‌شدگی اسپین سه‌تایی

در تاریخ ۱۳۹۰/۰۷/۲۷ توسط هیأت داوران زیر بررسی و با درجه به تصویب نهایی رسید.

- ۱- استاد راهنمای پایان‌نامه دکتر محمدعلی شاهزمانیان با مرتبه‌ی علمی استاد امضا
- ۲- استاد داور داخل گروه دکتر حشمت‌الله یآوری با مرتبه‌ی علمی دانشیار امضا
- ۳- استاد داور خارج از گروه دکتر حسن ربانی با مرتبه‌ی علمی استادیار امضا

امضای مدیر گروه

خداوند...

چنان سایه‌ی حضورت را در تمام مراحل کار احساس کرده‌ام که گاهی نمی‌شدم در کدام محله مهربانی‌ات دستگیر شود؛ که اگر نبود آغاز و انجام کار میسر نمی‌گشت:

آنچه در این پایان نامه گفته‌ام می‌شود، بازگویی و بازنویسی پژوهش بزرگانی است که شاید سالها پیش در این علم داشته‌بودند. اما این به مانند حرکت پاهای کوچک طفلی است در کنش بزرگان، که اگر بزرگان یاریگر اطرافیان نباشند، رفتش محال است. از این رو شاید است از فرد فرد کسانی که به حریم خود مراد مطالعه، تحقیق و نگارش این پایان نامه یاری داده‌اند، صمیمانه تشکر و قدردانی کنم و از این میان، از عزیزانی نام ببرم که بیش از همه همچون لطف و یاری آنهایی باشم. بدین سبب:

از جناب آقای دکتر محمدعلی شاهرمانیان، که فراتر از یک استاد راهنما و معلم و دلسوز و مهربان برایم همواره سبیل اخلاق و نمونه‌ی کامل یک انسان وارسته‌اند، به پاس همه‌ی تلاشها و توفیق‌هایی بی‌ریا و محسوسی نپذیرشان، از صمیم قلب سپاسگزارم و همواره از اینکه مراد عنوان ساگر و کوچک خود پرورش دادند به خود می‌بالم، عرضشان پر بار.

از اساتید داور، جناب آقای دکتر ربانی و جناب آقای دکتر یاری و همچنین از استاد ناظر تحصیلات تکمیلی جناب آقای دکتر بهشتی که قبول زحمت فرمودند و در جلسه‌ی دفاعیه اینجانب شرکت نمودند صمیمانه تشکر می‌کنم.

از کلیه اساتید گروه فزیک، مسئولین کتابخانه گروه فزیک و همچنین از کلیه دوستان و دانشجویان کارشناسی ارشد و دکتری که در ایجاد محیطی دوستانه، علمی و قابل رشد نقش داشته‌اند صمیمانه قدردانی می‌نمایم.

و در نهایت از زیباترین کلمات با زندگیتم:

از پدر و مادر نازنینم، به پاس همه‌ی رنجهایی که متحمل شدند تا به بهترین شیوه برایم معنای گذشت و ایثار و سخاوت را بر دیوار سپید اندیشه‌ی ما بمالند به تصویر در آورند؛ از خواهر مهربانم که قلب سرشار از عطا و بخشش آفریننده‌ی زیباترین صفحه‌های خاطره انگیز انسانیت و مهربانی است و همواره بهترین پشتیبان و مشوق من در زندگی بوده است؛ از برادر عزیزم که با پاک‌ترین دل و والاترین اندیشه دلسوزانه برایم زحمت کشید و وجودش افتخار و روشنی‌بخش زندگی‌ام است صمیمانه تشکر و قدردانی می‌نمایم.

لَعْدِيمُ بِمَادَرُم

که هر چه دارم ثمره‌ی استقامت، ایثار، حمایت و مهربانی اوست. فرشته‌ای که رنجبار به جان خرید و نرگس چشمانش را یک محط از من دریغ نداشت. با زمین و زمان جنگید و برایم سایبان محکمی شد بر بارش ناملایمات زندگی. او که همه‌ی وجودش قلبی است که محبت را مادانه ایثار می‌کند و همه‌ی قلبش خورشیدی است که انوار مهر و دوستی می‌پراکند.

لَعْدِيمُ بِپَادَرُم

که در سایه‌ی مهر و عطوفتش، امن و آرام از هنر نامردمی، انگشت اشارت پندایش وقف راه‌نمایی ام شد به راه‌دینداری و بهرورزی.

چکیده

در سال ۱۹۹۴ میلادی، می‌نو و همکارانش ابررسانایی را در Sr_2RuO_4 کشف کردند. اولین ابررسانای لایه‌ای پروسکایت دوبعدی بدون مس است که با وجود دمای گذار بسیار پایین $T_c \cong 1.48\text{K}$ هم‌ساختار با ابررساناهای دمای گذار بالا است. نتایج آزمایش‌های مختلف نشان دادند که Sr_2RuO_4 یک ابررسانا با حالت اسپینی سه‌گانه است که جفت‌های کوپر در حالت‌های اسپینی موازی $|\uparrow\uparrow\rangle, |\downarrow\downarrow\rangle$ هستند. بنابراین Sr_2RuO_4 یک ابررسانای نامتعارف با حالت اسپینی سه‌گانه و احتمالاً موج-p است. لذا بردار پارامتر نظم آن به صورت $\vec{d} = \Delta_0 \hat{z} (k_x \pm ik_y)$ پیشنهاد می‌شود و گاف انرژی آن بر روی سطح فرمی استوانه‌ای به صورت همسانگرد دوبعدی است. البته ساختار گاف این ابررسانا بسیار پیچیده و همچنان مورد بحث و بررسی است. نتایج آزمایش‌های کمیت‌های ترمودینامیکی رفتار قانون توانی را نشان می‌دهند که به نظر می‌رسد نشانه‌ی گره در گاف انرژی این ابررسانا باشد. اگرچه ما نشان داده‌ایم که رفتار قانون توانی در ابررساناهای دوبعدی لزوماً نشانه‌ی گره در گاف انرژی نیست.

در این پایان‌نامه به محاسبه‌ی ضریب چسبندگی برشی (وشکسانی) Sr_2RuO_4 بر اساس رهیافت معادله بولتزمان در حالت عادی و ابررسانایی پرداخته‌ایم. ابتدا روش سایکس-بروکر برای انجام محاسبات در نظر گرفته شد اما در هر دو حالت عادی و ابررسانایی به یک تکنیکی برای چسبندگی برشی رسیدیم که قطعاً قابل قبول نخواهد بود. لذا از روش ایجاد شده توسط خودمان برای انجام محاسبات استفاده کردیم. از آن‌جا که در حل معادلات مربوط به ضرایب ترابری، انتگرال‌های برخوردی وجود دارند، ابتدا از معادله ترابری بولتزمان شروع کرده و انتگرال برخوردی را محاسبه کردیم. نتایج محاسبات نشان می‌دهند که در حالت عادی وابستگی دمایی مؤلفه‌های چسبندگی برشی به صورت T^{-1} است که در توافق بسیار خوبی با نتایج تجربی آزمایش تضعیف فراصوت است. در حالت ابررسانایی نیز پس از محاسبه‌ی احتمال‌های گذار هر دو مورد گاف همسانگرد و ناهمسانگرد ابررسانای Sr_2RuO_4 را در محاسباتمان در نظر می‌گیریم و وابستگی دمایی مؤلفه‌های چسبندگی برشی را به دست می‌آوریم. در مورد گاف همسانگرد وابستگی دمایی مؤلفه‌های چسبندگی برشی به صورت $T^{1/2}$ به دست آمد که در توافق بسیار خوبی با نتایج تجربی چسبندگی برشی حالت ابررسانایی است. لویی و همکارانش با انجام آزمایش تضعیف فراصوت نشان دادند که وابستگی دمایی مؤلفه‌های چسبندگی برشی به صورت قانون توانی است ($T^{1.8}$ برای مدهای L100، T110 و L110 و $T^{1.4}$ برای مد T100). نتایج محاسبات ما در مورد گاف ناهمسانگرد برای η_{xx} وابستگی دمایی T^{-2} ، η_{yy} وابستگی دمایی T^{+2} و برای مؤلفه‌های η_{xy}, η_{yx} مستقل بودن از دما را نشان می‌دهند.

کلید واژه‌ها: چسبندگی برشی، Sr_2RuO_4 ، معادله بولتزمان و تضعیف فراصوت.

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
فصل اول: مقدمه‌ای بر پدیده ابررسانایی	
۱-۱- مقدمه	۱
۲-۱- مقاومت صفر	۲
۳-۱- گاف انرژی	۳
۴-۱- خاصیت دیامغناطیس	۴
۵-۱- گذار مرتبه‌ی دوم از دید ترمودینامیکی	۶
۶-۱- گرمای ویژه	۹
۷-۱- مدل دو شارهای و طول همدوسی	۱۱
۸-۱- معادلات لندن و عمق نفوذ	۱۲
۹-۱- ابررساناهای نوع I و نوع II	۱۵
۹-۱-۱- خواص مغناطیسی ابررساناهای نوع I	۱۵
۹-۱-۲- خواص مغناطیسی ابررساناهای نوع II	۱۷
۱۰-۱- نتیجه‌گیری	۱۹

فصل دوم: ابررسانایی در ماده Sr_2RuO_4

۱-۲- مقدمه	۲۰
۲-۲- کشف ابررسانایی در Sr_2RuO_4	۲۱
۳-۲- برخی ویژگی‌های حالت عادی Sr_2RuO_4	۲۳
۳-۲-۱- ناهمسانگردی مقاومت ویژه الکتریکی	۲۵
۳-۲-۲- گرمای ویژه الکترونی	۲۵
۳-۲-۳- پذیرفتاری استاتیک حالت عادی	۲۶
۳-۲-۴- پذیرفتاری مغناطیسی دینامیک حالت عادی	۲۷
۴-۲- ویژگی‌های حالت ابررسانایی Sr_2RuO_4	۲۹
۴-۲-۱- اثر ناخالصی‌ها روی دمای گذار	۳۰
۴-۲-۲- پذیرفتاری اسپینی به وسیله‌ی انتقال نایت NMR؛ قطعی‌ترین دلیل بر حالت اسپینی	
سه‌گانه	۳۲

۳۴.....	۲-۴-۳- چرخش اسپین میون و شکستگی تقارن وارونی زمان
۳۶.....	۲-۵- ساختار گاف انرژی Sr_2RuO_4
۳۷.....	۲-۶- تضعیف فراصوت و نتایج تجربی وشکسانی (چسبندگی برشی) Sr_2RuO_4
۴۲.....	۲-۷- نتیجه گیری

فصل سوم: نظریه ی تعمیم یافته ی BCS

۴۴.....	۳-۱- مقدمه
۴۵.....	۳-۲- تشکیل جفت های کوپر
۴۶.....	۳-۳- برهم کنش دو ذره ای
۴۹.....	۳-۴- انرژی جفت شدگی دو الکترون
۵۱.....	۳-۵- تابع موج تعمیم یافته ی BCS
۵۲.....	۳-۶- نظریه میدان میانگین
۵۳.....	۳-۷- تبدیلات بوگلیوف
۵۶.....	۳-۸- نمایش میدان میانگین Δ_k در حالت جفت شدگی اسپین سه گانه و یگانه
۵۷.....	۳-۸-۱- نمایش میدان میانگین Δ_k در حالت جفت شدگی اسپین سه گانه
۵۸.....	۳-۸-۲- نمایش میدان میانگین Δ_k در حالت جفت شدگی اسپین یگانه
۵۹.....	۳-۹- وابستگی دمایی گاف انرژی
۶۲.....	۳-۱۰- نتیجه گیری

فصل چهارم : محاسبه وشکسانی (چسبندگی برشی) Sr_2RuO_4 در حالت عادی

۶۳.....	۴-۱- مقدمه
۶۴.....	۴-۲- محاسبه وشکسانی (چسبندگی برشی) بر اساس روش سایکس و بروکر
۶۴.....	۴-۲-۱- معادله بولتزمن
۶۵.....	۴-۲-۲- انتگرال برخورداری
۷۰.....	۴-۲-۳- حل معادلات انتگرالی
۷۲.....	۴-۲-۳-۱- معادلات انتگرالی ناهمگن: توابع زوج
۷۴.....	۴-۲-۴- وشکسانی (چسبندگی برشی)

۷۶.....	۳-۴- محاسبه وشکسانی (چسبندگی برشی) بر اساس روش ابریکازوف و خلالتنیکوف
۷۶.....	۱-۳-۴- محاسبه انتگرال برخوردی و تابع $q(t)$
۷۸.....	۲-۳-۴- وشکسانی از روش ابریکازوف و خلالتنیکوف
۸۱.....	۴-۴- روش جدید محاسبه وشکسانی
۸۱.....	۱-۴-۴- محاسبه انتگرال برخوردی
۸۲.....	۲-۴-۴- وشکسانی Sr_2RuO_4 در حالت عادی
۸۳.....	۵-۴- تحلیل نتایج آزمایش تضعیف فراصوت بر روی Sr_2RuO_4 و نقش برهم کنش الکترون-فونون
۸۸.....	۶-۴- نتیجه گیری

فصل پنجم : محاسبه وشکسانی (چسبندگی برشی) Sr_2RuO_4 در حالت ابررسانایی

۹۰.....	۱-۵- مقدمه
۹۱.....	۲-۵- محاسبه ی احتمال های گذار
۹۱.....	۵-۲-۱- احتمال های گذار با فرض گاف ناهمسانگرد
۹۵.....	۵-۲-۲- احتمال های گذار با فرض گاف همسانگرد
۹۸.....	۳-۵- محاسبه ی وشکسانی ابررسانای Sr_2RuO_4 در دماهای پایین با استفاده از روش سایکس و بروکر
۹۸.....	۵-۳-۱- محاسبه ی وشکسانی ابررسانای Sr_2RuO_4 با فرض گاف ناهمسانگرد از روش سایکس و بروکر
۹۸.....	۵-۳-۲- محاسبه ی وشکسانی ابررسانای Sr_2RuO_4 با فرض گاف همسانگرد از روش سایکس و بروکر
۱۰۲.....	۴-۵- روش جدید محاسبه ی وشکسانی ابررسانای Sr_2RuO_4
۱۰۳.....	۵-۴-۱- محاسبه ی وشکسانی ابررسانای Sr_2RuO_4 با فرض گاف ناهمسانگرد
۱۰۶.....	۵-۴-۲- محاسبه ی وشکسانی ابررسانای Sr_2RuO_4 با فرض گاف همسانگرد
۱۱۰.....	۵-۵- تحلیل نتایج آزمایش تضعیف فراصوت بر روی Sr_2RuO_4 در حالت ابررسانایی
۱۱۳.....	۵-۶- نتیجه گیری
۱۱۵.....	پیوست ۱
۱۱۷.....	منابع

فهرست شکل ها

صفحه	عنوان
۲	شکل ۱-۱- تغییرات مقاومت ویژه الکتریکی فلزات با دما.....
۳	شکل ۱-۲- ناپدید شدن مقاومت یک ابررسانا در دماهای پایین.....
۴	شکل ۱-۳- نوار رسانش در دمای صفر مطلق برای حالت (الف) عادی؛ (ب) ابررسانایی.....
۴	شکل ۱-۴- تغییر گاف انرژی نسبت به دما برای یک ابررسانا.....
۵	شکل ۱-۵- اعمال میدان مغناطیسی به یک رسانای ایده آل (الف) در $T < T_C$ ؛ (ب) در $T > T_C$
۸	شکل ۱-۶- تغییرات آنتروپی یک جسم در حالت ابررسانایی و حالت عادی نسبت به تغییرات دما.....
۹	شکل ۱-۷- گرمای ویژه قلع در حالت‌های ابررسانایی و عادی.....
۱۳	شکل ۱-۸- تغییرات چگالی شار مغناطیسی در سطح مرزی یک ابررسانا.....
۱۶	شکل ۱-۹- (الف) منحنی مغناطش ابررسانا (ب) گشتاور مغناطیسی در واحد حجم M ، بر حسب H_0
۱۶	شکل ۱-۱۰- نمایشی از حالت میانی.....
۱۸	شکل ۱-۱۱- (الف) القای مغناطیسی B به صورت تابعی از میدان خارجی H_0 (ب) گشتاور مغناطیسی در واحد حجم به صورت تابعی از H_0 برای یک ابررسانای نوع II.....
۲۲	شکل ۱-۲- پذیرفتاری (در واحدهای اختیاری) و مقاومت ویژه نمونه چندبلوری Sr_2RuO_4 به صورت تابعی از دما زیر $5K$
۲۳	شکل ۲-۲- رفتار دماهای پایین تک‌بلورهای Sr_2RuO_4 (الف) X' و X'' (بخش حقیقی و موهومی پذیرفتاری مغناطیسی) (ب) ρ_c مقاومت ویژه عمود بر لایه‌ها و ρ_{ab} در امتداد لایه‌ها.....
۲۴	شکل ۲-۳- ساختار لایه‌ای پروسکایت برای Sr_2RuO_4 و $La_{2-x}Ba_xCuO_4$
۲۴	شکل ۲-۴- ساختار سطح فرمی Sr_2RuO_4
۲۵	شکل ۲-۵- ناهمسانگردی مقاومت ویژه در Sr_2RuO_4
۲۶	شکل ۲-۶- گرمای ویژه کل تقسیم بر دما، از T_C تا $14K$ در میدان مغناطیسی صفر (مربع‌های پر) و یک میدان مغناطیسی اعمال شده $14K$ موازی با محور c (دایره‌های پر).....
۲۷	شکل ۲-۷- پذیرفتاری مغناطیسی استاتیک Sr_2RuO_4 برای میدان‌های $1T$ موازی با صفحه ab و محور c

عنوان

صفحه

- شکل ۲-۸-الف) نسبت واهلش اسپین-شبكة $^{171}\text{T}_1(1)$ برای محل $\text{O}(1)$ [●]، $^{171}\text{T}_1(2)$ برای محل $\text{O}(2)$ [λ] و $^{101}\text{T}_1$ در محل Ru [□] ب) $^{171}\text{T}_1(1)\text{T}$ [●]، $^{171}\text{T}_1(2)\text{T}$ [λ] و $^{101}\text{T}_1\text{T}$ با علامت [□]..... ۲۸
- شکل ۲-۹- مقاومت ویژه سه نمونه Sr_2RuO_4 با سطوح مختلف پراکندگی ناخالصی..... ۳۱
- شکل ۲-۱۰- وابستگی T_c به مقاومت ویژه برای Sr_2RuO_4 . مربع‌ها نمونه‌هایی را مشخص می‌کنند که یک کاهش کوچک در مقاومت ویژه دارند اما بالای 130mK علامت ابرسانی را نشان نمی‌دهند. خط پر تطبیق تابع زوج‌شکن ابریکازوف-گورکوف با داده‌های توضیح داده شده در متن است..... ۳۲
- شکل ۲-۱۱- وابستگی دمایی $^{99}\text{K}^{\text{S}}$. منحنی خط‌چین بر اساس محاسبات مدل موج-d اسپین یگانه با یک گره خطی به دست آمده است..... ۳۳
- شکل ۲-۱۲- نتایج پراکندگی نوترون قطبیده (a) از یک ابرسانی موج- $(\text{V}_3\text{Si})\text{s}$ و (b) Sr_2RuO_4 ۳۴
- شکل ۲-۱۳- آهنگ واهلش اسپین-شبكة میون یک تغییر را برای ابرسانی Sr_2RuO_4 در T_c حتی در میدان‌های مغناطیسی صفر برای میون‌های قطبیده موازی و عمود بر صفحات Ru-O نشان می‌دهد..... ۳۵
- شکل ۲-۱۴- گره‌های خطی افقی در گاف انرژی ابرسانی روی سطح فرمی استوانه‌ای..... ۳۷
- شکل ۲-۱۵- تضعیف فراصوت بر حسب وشکسانی برای چهار مد داخل صفحه در Sr_2RuO_4 ۳۸
- شکل ۳-۱- برهم‌کنش الکترون-الکترون از طریق گسیل و جذب یک فونون با تکانه $\hbar q$ ۴۶
- شکل ۳-۲- وابستگی دمایی گاف انرژی در نظریه BCS..... ۶۱
- شکل ۴-۱- هندسه‌ی برخورد..... ۶۶
- شکل ۴-۲- نتایج آزمایش تضعیف فراصوت بر روی Sr_2RuO_4 بر حسب وشکسانی η ۸۰

فصل اول

مقدمه‌ای بر پدیده ابررسانایی

۱-۱ مقدمه

ابررسانایی در سال ۱۹۱۱ میلادی در آزمایشگاه لیدن کشف شد. کامرلینگ اونس^۱ به هنگام مطالعه وابستگی دمایی مقاومت ویژه الکتریکی نمونه‌ای از جیوه مشاهده کرد که در دمای گذار، T_c ، نزدیک به ۴K، مقاومت نمونه ناگهان به صفر سقوط می‌کند. نکته مهم این که با کاهش دما مقاومت ناگهان در دمایی به صفر می‌رسد نه به تدریج. آشکار بود که نمونه باید دستخوش گذاری به حالت جدیدی با مقاومت الکتریکی صفر شده باشد که در آن زمان ناشناخته بود. این پدیده را «ابررسانایی» نامیدند [۱].

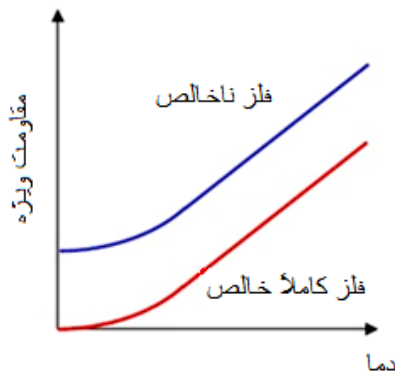
هرگونه تلاش برای یافتن کوچک‌ترین اثری از مقاومت در ابررساناهای کپه‌ای، راه به جایی نبرد. با توجه به حساسیت وسایل اندازه‌گیری جدید، می‌توان گفت که مقاومت ویژه‌ی ابررساناها حداقل تا دقت $10^{-24} \Omega\text{cm}$ ، صفر است. در مقایسه می‌دانیم که مرتبه‌ی بزرگی مقاومت ویژه‌ی مس با خلوص بالا در ۴/۲K برابر است با $10^{-9} \Omega\text{cm}$. مدت کوتاهی پس از کشف ابررسانایی در جیوه، این خاصیت در سایر فلزات مانند: قلع، سرب، ایندیم، آلومینیم، نیوبیم و غیره یافت شد. همچنین معلوم شد که تعداد زیادی آلیاژ و ترکیبات بین‌فلزی نیز ابررسانا هستند.

¹ H. Kamerlingh Onnes

زمان کوتاهی پس از این کشف معلوم شد که نه تنها با گرم کردن نمونه، بلکه با قرار دادن آن در میدان مغناطیسی نسبتاً ضعیف می‌توان ابررسانایی را از بین برد. این میدان، H_c ، را میدان بحرانی ماده‌ی کپه‌ای می‌خوانند [۱].

۲-۱ مقاومت صفر

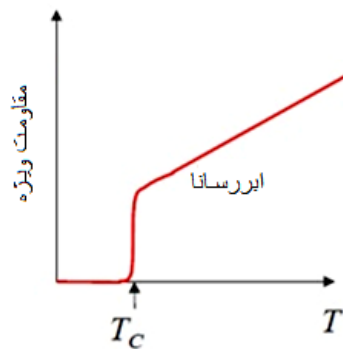
با سرد کردن آلیاژها و فلزات، مقاومت به تدریج کاهش می‌یابد زیرا با توجه به این که جریان در یک رسانا توسط الکترون‌های رسانشی حمل می‌شود در صورتی که شبکه بلوری نظم عادی خود را از دست دهد، مقاومتی در مقابل جریان ایجاد می‌شود. دو اثر مهم که نظم عادی شبکه بلوری را بر هم می‌زنند نوسان‌های گرمایی و نقص بلوری هستند. با پایین آوردن دما نوسان‌های گرمایی اتم‌ها کاهش می‌یابد و الکترون‌های رسانش کمتر پراکنده می‌شوند. این کاهش مقاومت تا دمایی حدود یک سوم دمای مشخصه‌ی دبی^۱ ماده، خطی است و در دماهای پایین‌تر مقاومت با سرعت کمتری کاهش می‌یابد [۲]. اما از آنجا که تمام فلزات دارای ناخالصی هستند نمی‌توان انتظار داشت که با میل دادن دما به صفر مطلق، مقاومت ویژه صفر شود و همیشه یک مقدار «مقاومت مخصوص باقی مانده» ρ_0 وجود دارد (شکل ۱-۱).



شکل ۱-۱ تغییرات مقاومت ویژه الکتریکی فلزات با دما [۲]

اما بعضی فلزات رفتار خارق العاده‌ای از خود نشان می‌دهند، وقتی سرد می‌شوند مقاومت الکتریکی به طریق معمولی که گفته شد کاهش می‌یابد اما وقتی به چند درجه بالای صفر مطلق می‌رسند، ناگهان تمام نشانه‌های مقاومت الکتریکی را از دست می‌دهند (شکل ۲-۱)؛ یعنی به حالت ابررسانایی می‌روند.

¹ Debye



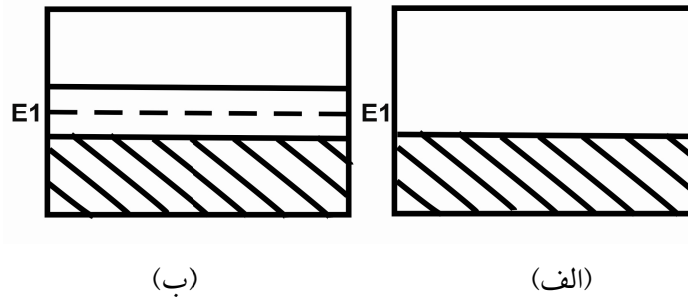
شکل ۱-۲ ناپدید شدن مقاومت یک ابرسانا در دماهای پایین [۲]

دمایی که در آن یک فلز مقاومت خود را از دست می‌دهد و از حالت عادی به حالت ابرسانا می‌رود را دمای بحرانی می‌نامیم و آن را با T_c نمایش می‌دهیم که برای هر فلزی متفاوت است. گرچه ناخالصی‌های مغناطیسی دمای گذار را پایین می‌آورند ولی در حالت کلی دمای گذار T_c به مقادیر کم ناخالصی زیاد حساس نیست [۲]. یکی از دست‌آوردهای مقاومت صفر وجود جریان‌های ماندگار است: اگر جریان در یک نمونه حلقه ابرسانا به وجود آید برای سال‌ها کاهشی در آن مشاهده نخواهد شد.

۱-۳ گاف انرژی

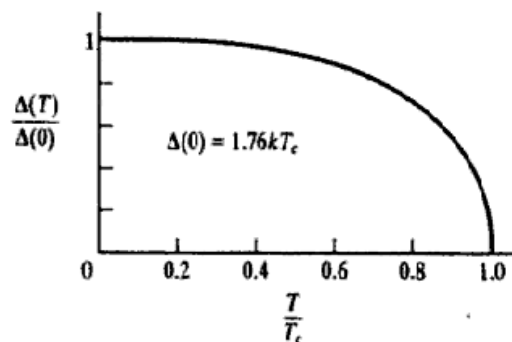
بر خلاف الکترون آزاد، الکترون‌های یک جسم جامد فقط انرژی‌هایی را اختیار می‌کنند که داخل نوارهای مجاز انرژی قرار گرفته‌اند. نوارهای مجاز انرژی به وسیله‌ی گاف‌هایی از انرژی ممنوعه از یکدیگر جدا شده‌اند. گاف انرژی یک مفهوم کاملاً کوانتومی است و برای اولین بار در نیم‌رساناها به اثبات رسیده است. اگر چه الکترون‌های یک نوار کاملاً پر نمی‌توانند در عمل رسانندگی شرکت نمایند ولیکن می‌توانند با کسب انرژی از یک نوار کاملاً پر به یک نوار خالی رفته و سپس در عمل رسانندگی الکتریکی شرکت نمایند، این نوع رسانایی در اجسام نیم‌رسانای ذاتی مشاهده شده است. از طرف دیگر الکترون‌های موجود در نوار انرژی که بخشی از آن به وسیله‌ی الکترون اشغال شده است به راحتی می‌توانند در عمل رسانندگی الکتریکی شرکت داده شوند. بالاترین نوار پر در عایق‌ها و نیم‌رساناها را نوار ظرفیت و اولین نوار خالی در بالای نوار مذکور را نوار رسانش گویند و اختلاف بین دو نوار مذکور را با E_g نمایش می‌دهند. برای اجسام نیم‌رسانا در حدود الکترون ولت و برای اجسام عایق در حدود چندین الکترون ولت است.

وجود گاف انرژی در ابررساناها به اثبات رسیده است. در شکل ۳-۱ نوار رسانش در دمای صفر مطلق برای یک فلز در حالت ابررسانایی و در حالت عادی نشان داده شده است. گاف انرژی در ابررساناها در حدود 10^{-4} الکترون ولت (معادل حدوداً چندین درجه کلوین) است.



شکل ۳-۱ نوار رسانش در دمای صفر مطلق برای حالت (الف) عادی؛ (ب) ابررسانایی [۳]

در ابررساناها گاف انرژی تابع دما بوده و با افزایش دما کاهش می‌یابد و حال آن‌که مقدار گاف انرژی در نیم‌رساناها تقریباً ثابت است. در شکل ۴-۱ تغییر گاف انرژی برای یک ابررسانا نسبت به دما رسم شده است [۲].



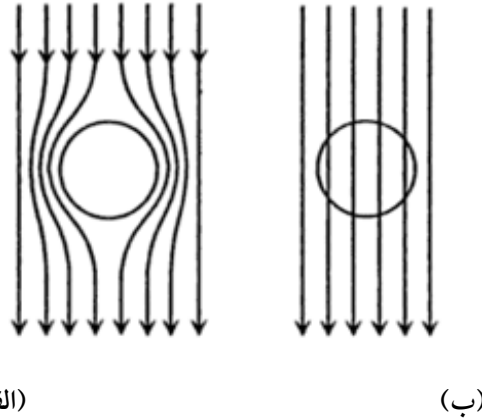
شکل ۴-۱ تغییر گاف انرژی نسبت به دما برای یک ابررسانا [۲]

بعضی از آزمایش‌ها که به وسیله‌ی آن‌ها می‌توان گاف انرژی را اندازه‌گیری کرد عبارتند از: گرمای ویژه در دمای پایین که متناسب با $\exp(-\Delta/k_B T)$ است، روش ایتیکی و اثر تونلی [۴].

۴-۱ خاصیت دیامغناطیس

بیست و دو سال پس از کشف ابررسانایی، دانشمندان هنوز بر این باور بودند که ابررسانا تنها یک رسانای ایده‌آل است، یعنی قطعه‌ای فلز با مقاومت صفر. در اینجا به چگونگی رفتار این رسانای ایده‌آل در حضور یک میدان مغناطیسی خارجی که به قدر کافی ضعیف است، می‌پردازیم:

فرض می‌کنیم رسانای ایده‌آل در غیاب میدان مغناطیسی خارجی تا زیر دمای بحرانی سرد شده است و آن-گاه یک میدان مغناطیسی خارجی اعمال می‌کنیم. می‌توان نشان داد که میدان در نمونه نفوذ نمی‌کند (شکل ۱-۵). در واقع، بلافاصله پس از نفوذ میدان به لایه سطحی رسانای ایده‌آل، یک جریان القایی ایجاد می‌شود که بنابر قانون لنز میدان مغناطیسی مخالف میدان تولید می‌کند. بنابراین میدان کل در درون نمونه صفر است [۱].



شکل ۱-۵ اعمال میدان مغناطیسی به یک رسانای ایده‌آل الف) در $T < T_c$ ؛ ب) در $T > T_c$ [۱]

با توجه به معادله ماکسول زیر

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, \quad (1-1)$$

و این که در یک رسانای ایده‌آل $\vec{E} = 0$ و \vec{B} باید ثابت باشد و با توجه به این که پیش از اعمال میدان خارجی $\vec{B} = 0$ پس از برقراری میدان نیز باید $\vec{B} = 0$ باشد. بنابراین در این شرایط در هر نقطه داخل رسانای کامل $\vec{B} = 0$ در $T > T_c$ ، مقاومت ویژه متناهی است و از این رو، میدان مغناطیسی به درون آن نفوذ می‌کند. پس از سرد کردن نمونه و گذار به حالت ابررسانش، مطابق شکل ۱-۵ سمت راست، میدان درون آن ماندگار می‌شود [۱].

پیش از سال ۱۹۳۳ میلادی همه بر این باور بودند که یک ابررسانا به راستی چیزی بیش از یک رسانای کامل نیست. ولی آزمایش‌های انجام شده توسط مایسنر^۱ و اوکسنفلد^۲ نشان داد [۵] که این باور درستی نیست. آن‌ها پی

^۱ W. Meissner

^۲ R. Ochsenfeld

بردند که در $T \ll T_C$ میدان درون نمونه ابررسانا در حضور میدان مغناطیسی خارجی مستقل از ترتیب سرد کردن ابررسانا به زیر T_C ، همواره صفر است $(\vec{B}=0)$ [۱].

این اثر یعنی این که یک ابررسانا حتی وقتی که در میدان مغناطیسی اعمال شده قرار گرفته باشد دارای شار عبوری مغناطیسی در داخل خود نیست اثر مایسنر گفته می شود و به نمونه ای که در آن هیچ شار مغناطیسی وقتی که میدان اعمال می شود وجود ندارد دیامغناطیس کامل گفته می شود. بنابراین یک ابررسانا تنها یک رسانای ایده آل نیست بلکه دیامغناطیس کامل نیز است. به این ترتیب حالت ابررسانایی از معادلات زیر پیروی می کند

$$\begin{cases} \rho = 0, \\ \vec{B} = 0, \end{cases} \quad (2-1)$$

۵-۱ گذار مرتبه‌ی دوم از دید ترمودینامیکی

یک نمونه‌ی ابررسانا را که به صورت یک میله‌ی طویل است، در نظر می گیریم. وقتی که نمونه تا زیر دمای انتقال خود سرد شود ابررسانا می شود. بنابراین زیر دمای گذار انرژی آزاد حالت ابررسانایی باید کمتر از حالت معمولی باشد و در غیر این صورت فلز به صورت معمولی باقی می ماند. فرض کنید در یک دمای T و در غیاب میدان مغناطیسی ($H_a = 0$) انرژی آزاد گیبس برای واحد حجم در حالت ابررسانایی $g_s(T, 0)$ و در حالت معمولی $g_n(T, 0)$ باشد. حال میدان مغناطیسی به شدت H_a به طور موازی با طول میله اعمال می کنیم. هر ماده‌ای که در یک میدان مغناطیسی H_a مغناطیس شدگی I را به دست آورد انرژی آزاد خود را در واحد حجم به مقدار زیر تغییر می دهد

$$\Delta g(H_a) = -\mu_0 \int_0^{H_a} I dH_a. \quad (3-1)$$

در مورد یک نمونه‌ی ابررسانا اعمال میدان مغناطیسی تولید مغناطیس شدگی منفی می کند به طوری که اگر نفوذ میدان قابل صرف نظر کردن باشد دقیقاً شار مربوط میدان اعمال شده را خنثی می کند به طوری که $I = -H$

$$g_s(T, H) = g_s(T, 0) + \mu_0 \frac{H_a^2}{2}. \quad (4-1)$$

پس با اعمال یک میدان مغناطیسی به یک ابررسانا انرژی آزاد آن تا مقدار بالا به علت مغناطیس شدگی افزایش می یابد [۲].

میدان بحرانی H_C شدت میدانی است که نیاز داریم تا انرژی آزاد یک ابرسانا را بالاتر از حالت معمول افزایش دهیم. بنابراین در صورت اعمال میدان مغناطیسی H_a یک اختلاف بین انرژی آزاد در حالت عادی و در حالت ابرسانایی خواهیم داشت

$$g_n - g_s(H_a) = \frac{1}{2} \mu_0 (H_C^2 - H_a^2). \quad (5-1)$$

انرژی آزاد یک جسم مغناطیسی به صورت زیر می‌تواند نوشته شود

$$G = U - TS + PV - \mu_0 H_a M, \quad (6-1)$$

که در آن U انرژی داخلی، S آنتروپی، P فشار، V حجم، H_a میدان مغناطیسی اعمال شده و M ممان مغناطیسی است. اگر فشار و میدان اعمال شده ثابت بمانند

$$dG = dU - TdS - SdT + PdV - \mu_0 H_a dM, \quad (7-1)$$

طبق قانون اول ترمودینامیک داریم

$$dU = TdS - PdV + \mu_0 H_a dM, \quad (8-1)$$

در نتیجه آنتروپی در واحد حجم به صورت زیر داده می‌شود

$$S = - \left(\frac{\partial g}{\partial T} \right)_{P, H_a}, \quad (9-1)$$

با جانشینی معادله (5-1) در معادله فوق داریم

$$S_n - S_s = -\mu_0 H_c \frac{dH_c}{dT}, \quad (10-1)$$

$$C = VT \frac{\partial S}{\partial T} \rightarrow C_s - C_n = VT \mu_0 \left[H_c \frac{d^2 H_c}{dT^2} + \left(\frac{dH_c}{dT} \right)^2 \right]. \quad (11-1)$$

بنابراین گرمای نهان با رابطه‌ی زیر مشخص می‌شود

$$L = VT (S_n - S_s) = -VT \mu_0 H_c \frac{dH_c}{dT}. \quad (12-1)$$

میدان مغناطیسی بحرانی با افزایش دما کاهش می‌یابد، یعنی $\frac{dH_c}{dT}$ همواره منفی است. بنابراین طرف

راست رابطه‌ی (10-1) همیشه مثبت است، نتیجه این که آنتروپی حالت ابرسانایی از حالت عادی کمتر است (به

جز وقتی که دما برابر T_c یا صفر باشد که در این حالت‌ها به دلیل این که به ترتیب H_c یا $\frac{dH_c}{dT}$ صفر هستند،

آنتروپی حالت عادی و ابرسانایی برابر می‌شوند). به عبارت دیگر ماده در حالت ابرسانایی دارای نظم بیشتری

است. نکته دیگر در ارتباط با رابطه‌ی (۱۰-۱) این است که اختلاف آنتروپی دو فاز عادی و ابرسانا، فقط به میدان بحرانی H_c و تغییرات دمایی آن بستگی دارد. یک مثال از تغییرات دما با آنتروپی در شکل ۶-۱ نشان داده شده است.



شکل ۶-۱ تغییرات آنتروپی یک جسم در حالت ابرسانایی و حالت عادی نسبت به تغییرات دما [۲]

در دمای گذار $S_n = S_s$ و با استفاده از رابطه (۹-۱) می‌توان نوشت

$$\left(\frac{\partial g}{\partial T}\right)_n = \left(\frac{\partial g}{\partial T}\right)_s \quad (۱۳-۱)$$

گذار فازی که شرط بالا را ارضاء کند، به گذار فاز از مرتبه دوم موسوم است (در آن g و $\frac{\partial g}{\partial T}$ پیوسته هستند). یک گذار مرتبه دوم دارای دو مشخصه مهم است. در حالت گذار طبق رابطه (۱۲-۱) هیچ گرمای نهانی وجود ندارد. همچنین یک پرش در گرمای ویژه دیده می‌شود. در دمای گذار جمله اول سمت راست رابطه (۱۱-۱) صفر می‌شود، که نمایش دهنده‌ی جهش در گرمای ویژه است

$$(C_s - C_n)_{T_c} = VT_c \mu_0 \left(\frac{dH_c}{dT}\right)_{T_c}^2 \quad (۱۴-۱)$$

که به فرمول راجرز^۱ معروف است و میزان انفصال در گرمای ویژه در دمای گذار را نمایش می‌دهد [۲]. باید خاطر نشان کرد که در حضور میدان مغناطیسی گذار فاز ابرسانایی به حالت عادی یک گذار فاز از مرتبه اول است یعنی با وجودی که g پیوسته است ولی $\frac{\partial g}{\partial T}$ پیوسته نیست. به عبارت دیگر در موردی که میدان خارجی به نمونه اعمال می‌گردد، برای گذار فاز به گرمای خارجی نیاز داریم تا گذار فاز در دمای ثابت انجام گیرد؛ یعنی چنین گذاری به گرمای نهان احتیاج دارد.

^۱ Rutgers