دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده فیزیک

مطالعه مغناطش دستگاه های ابررسانای چند نواره و آثار سطحی

پایان نامه کارشناسی ارشد فیزیک

گرایش ماده چگال

میلاد صادقی

استاد راهنما

دکتر علی اکبر بابائی بروجنی

۱۳۹۲

کلیه‌ی حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات، ابتکارات و نوآوری های ناشی از تحقیق موضوع این پایان نامه (رساله) متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است.

دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده فیزیک

پایان نامه کارشناسی ارشد فیزیک ماده چگال آقای میلاد صادقی

تحت عنوان

مطالعه مغناطش دستگاه های ابررسانای چند نواره و آثار سطحی

در تاریخ ۹۲/۱۱/۲ توسط کمیته تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت.

۱- استاد راهنمای پایان نامه	دکتر علی اکبر بابائی بروجنی
۲- استاد مشاور پایان نامه	دکتر پیمان صاحب سرا
۳- استاد داور	دکتر فرهاد شهبازی
۴- استاد داور	دکتر فرهاد فضیله
سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده	دکتر مجتبی اعلایی

تشکر و قدردانی

بر خود لازم میدانم پیش و بیش از هر چیز از پدر و مادرم به سبب زحمات، تلاش ها و صبوری شان در مدت تحصیلم به ویژه در دوره کارشناسی ارشد، تشکر و قدر دانی کنم.

از جناب آقای دکتر علی اکبر بابائی بروجنی که استاد راهنمای بنده در انجام این پایان نامه بودند به سبب راهنمایی ها و تلاش هایشان، و جناب آقای دکتر پیمان صاحب سرا استاد مشاور پایان نامه تشکر و قدردانی می‌نمایم.

همچنین از آقایان دکتر فرهاد فضیله و دکتر فرهاد شهبازی که داوری این پایان نامه را پذیرفتند سپاسگزاری می کنم.

در پایان سپاسگزار تمامی دوستانی هستم که در این مسیر همراه من بودند.

چکیده

در این پژوهش ما رفتار ناشی از آثار سطحی لبه های یک دستگاه نواری شکل ابررسانا را که در یک میدان مغناطیسی اعمالی متناوب عمود قرار گرفته بررسی می کنیم. توزیع میدان مغناطیسی و چگالی جریان الکتریکی را به دست می‌آوریم و با رسم منحنی مغناطش برای دستگاه هایی با تعداد نوار متفاوت، نشان می دهیم همانگونه که انتظار داریم افزوده شدن سد هندسی لبه به دستگاه می تواند مانع از تخلیه کامل شار مغناطیسی از دستگاه شود و یک پسماند مغناطیسی در دستگاه وجود خواهد داشت که این پسماند با افزایش تعداد نوارها افزایش می یابد. افزودن تعداد نوارها یا گاف ها در یک پهنای معین، می تواند سطح حلقه پسماند را نیز افزایش دهد.

همچنین نقش گاف ها در طرد شار مغناطیسی را از طریق محاسبه‌ی کمیتی به نام « مساحت موثر» بررسی کرده ایم. نمودارهای به دست آمده به وضوح نقش گاف ها در طرد و تخلیه‌ی شار مغناطیسی از نوارهای ابررسانا را نشان می دهند.

واژگان کلیدی: ابررسانایی نوع II، اسکوئید، دستگاه های چند نواره ، مساحت موثر

فهرست مطالب:

چکیده ۱

فصل نخست: مقدمه ۲

فصل دوم: ابررسانایی ٤

۲-۱ تاریخچه ابررسانایی ۴

۲-۲ پدیده مایسنر، جریان های پوششی و عمق نفوذ ۷

۲-۳ میدان مغناطیسی بحرانی، جریان بحرانی ۸

۲-۴ تراوایی مغناطیسی ابررساناها ۱۰

۲-۵ پذیرفتاری مغناطیسی ابررساناها ۱۰

۲-۶ اثر مایسنر، میدان مغناطیسی بحرانی و انرژی آزاد ۱۰

۲-۷ طول همدوسی ۱۲

۲-۸ ابررسانای نوعII ۱۲

۲-۹ ضریب گینزبرگ لاندائو و انرژی آزاد یک ابررسانا ۱۳

۲-۱۰ رفتار ابررسانای نوعII هنگام نفوذ شار میدان مغناطیسی به نمونه ۱۴

۲-۱۱ مقاومت شارشی و جریان های بحرانی ابررسانای نوعII ۱۸

فصل سوم: انگیزه انتخاب مساله ۲۱

۳-۱ اسکوئید ۲۱

۳-۲ استفاده از نوارهای ابررسانا برای رفع مشکلات طراحی اسکوئیدها ۲۵

فصل چهارم: مدل حالت بحرانی ۳۰

فصل پنجم: مطالعه مغناطش دستگاه های نواری شکل ابررسانا و آثار سطحی ۳٦

۵-۱ آنالیز مختلط و نوارهای ابررسانا ۳۶
۵-۲ سد هندسی چیست؟ ۳۸
۵-۳ رفتار دستگاه های نواری شکل ناشی از سد هندسی ۴۲
فصل ششم: اثر یک میدان مغناطیسی متناوب روی یک دستگاه ٤ نواری ابررسانای هم صفحه ناشی از سد هندسی **٤٤**
۶-۱ توصیف دستگاه و تعریف مساله ۴۴
۶-۲ چهار نوار ابررسانا در یک میدان مغناطیسی اعمالی صعودی ۵۰
۶-۳ چهار نوار ابررسانا در یک میدان مغناطیسی اعمالی نزولی ۵۹
۶-۴ محاسبات و تحلیل عددی نتایج سد هندسی برای دستگاه های نواری شکل ۶۴
۶-۴-۱ مراحلی عبوری دستگاه های نواری شکل در یک تناوب کامل از میدان اعمالی ۶۵
۶-۴-۲ توزیع میدان مغناطیسی و جریان الکتریکی برای یک دستگاه ۴ نواره ابررسانا ۶۶
۶-۴-۳ توزیع میدان مغناطیسی و جریان الکتریکی برای یک دستگاه ۵ نواره ابررسانا ۶۹
۶-۴-۴ بررسی کانونی سازی شار مغناطیسی و نقش گاف‌ها در طرد شار از طریق محاسبه «مساحت موثر» ۷۰
۶-۴-۵ منحنی مغناطش ۷۵
۶-۴-۶ نقطه پیچش ۷۹
نتیجه گیری **۸۱**
پیوست ها **٨٤**
پیوست ۱: به دست آوردن $H(x)$ بر حسب $j_z(X)$ از طریق حل معادله انتگرال کوشی گون ۸۴
پیوست ۲: محاسبه قسمت های موهومی و حیقیقی میدان مختلط ۹۲

در متن این پایان نامه منظور از « شـار»، شار میدان مغناطیسی در واحد طول و منظور از «میدان»، میدان مغناطیسـی اسـت. این مختصـرنویسی به سبب پرهیز از عبارات و اصطلاحات طولانی و تکراری که در برخی موارد منجر به پیچیدگی گفتار و جمله بندی می‌شود صورت گرفته است.

۱ فصل نخست: مقدمه

امروزه طراحی و ساخت حسگرهای مغناطیسی بر پایه‌ی اسکوئید، به سبب تردی، شکنندگی و عدم انعطاف پذیری ابررساناهای دمای بالا، با استفاده از لایه های نازک ابررسانا صورت می گیرد. در این میان استفاده از نوارهای لایه نازک مسطح ابررسانا به چند دلیل مورد توجه است:

۱) برای افزایش قدرت تفکیک و آشکارسازی اسکوئید نیاز به حلقه ای با سطح بزرگ است، اما بزرگ شدن سطح حلقه، القاییدگی را نیز افزایش می دهد. برای رفع این مشکل معمولا از یک پیچه‌ی تقویت کننده‌ی شار به نام مبدل شار استفاده می کنند. این پیچه در اسکوئیدها به صورت یک سری نوار لایه نازک موازی، پیرامون حلقه‌ی اسکوئید که آن هم با نوارهای لایه نازک مسطح ساخته شده، قرار می گیرد.

۲) نفوذ گردابه‌های شار مغناطیسی به لایه‌ی نازک ابررسانا الگوی تداخلی اسکوئید را بر هم زده، سبب ایجاد نویز در خروجی آن می گردد. برای جلوگیری از این امر لازم است سطوح پهن و بزرگ را به نوارهای کوچکتر تقسیم کنیم. گاف های بین نوارها، فضایی برای طرد شار میدان مغناطیسی از قسمت های ابررسانا فراهم می‌کند.

۳) بر خلاف اسکوئیدهای واشری دایره ای شکل، نوارهای لایه نازک توانایی پوشش سراسری صفحه را دارند.

به همین دلیل مطالعه‌ی خواص دستگاه های نواری شکل، به دست آوردن توزیع های میدان مغناطیسی و چگالی جریان آن ها، پیدا کردن منحنی مغناطش این دستگاه ها بر اساس مراکز میخکوبی یا آثار سطحی و بررسی پاسخ زمانی چگالی جریان و میدان مغناطیسی این دستگاه ها به میدان ها و جریان های متغیر با زمان به سبب کاربرد آن ها در تحلیل خروجی اسکوئیدها، از علاقه مندی های پژوهشی در زمینه‌ی ابررسانایی است. تلاش برای به دست آوردن دستگاه هایی که بتوانند جریان بحرانی بالاتری داشته باشند یا شار میدان مغناطیسی بیشتری را کانونی کنند نیز از دیگر اهداف این دسته از پژوهش ها است.

پژوهش پیش رو به مطالعه مغناطش دستگاه های ابررسانای چند نواره و آثار سطحی می پردازد. از آن جا که پایه این مطالعات بر اساس خواص ابررساناها است، در فصل دوم به معرفی ابررساناها پرداخته است. در فصل سوم انگیزه حل مساله‌ی پیش رو و اهمیت دستگاه های نواری شکل و کاربرد آن ها بیان می شود. در این فصل اسکوئیدها را به عنوان ابزارهای دقیق اندازه‌گیری میدان مغناطیسی معرفی کرده، به مشکلاتی اشاره می کنیم که در طراحی آنان

وجود داشت و تلاش هایی که منجر به استفاده از دستگاه های نواری شکل ابررسانا شد ارائه می شود.

فصل چهارم درباره مدل های حالت بحرانی است. آشنایی با تابعیت $J(H)$ برای مطالعه خواص مغناطیسی ابررساناهای سخت اهمیت به سزایی دارد. به سبب همین اهمیت در این فصل به طور کامل انواع مدل های حالت بحرانی شرح داده شده است.

فصل پنجم به معرفی دستگاه مورد مطالعه و آثار سطحی لبه نوار می پردازد. مطالعه این فصل برای ورود به فصل ششم ضروری است. در فصل ششم نتایج محاسبات و تحلیل داده ها و نمودارهای به دست آمده ارائه شده اند. این نتایج در قالب سه بخش ارائه می شوند:

- به دست آوردن توزیع میدان مغناطیسی و چگالی جریان الکتریکی
- بررسی نقش گاف ها در طرد و تخلیه شار مغناطیسی از دستگاه
- رسم منحنی های مغناطش و بررسی رفتار های مغناطیسی و پسماند مغناطیسی

در نهایت در فصل هفتم، داده های ارائه شده در فصل ششم جمع بندی و تحلیل شده و نتیجه گیری مربوطه ارائه می شود. افزون بر این مواردی را به عنوان موضوعاتی برای ادامه پژوهش در این زمینه ارائه می کنیم.

۲ فصل دوم: ابررسانایی

۲-۱ تاریخچه ابررسانایی

تا سال ۱۹۰۸ تنها گاز نجیبی که همچنان مایع نشده بود هلیوم بود. در این سال دانشمندی هلندی به نام هاینس کمرلینگ اونز[۱] که از شاگردان ون در والس[۲]، دیگر فیزیکدان مشهور هلندی بود، و روی روش های سردسازی کار می کرد توانست هلیوم را مایع کند و بدین ترتیب به دماهای نزدیک صفر مطلق دست یابد. او در مقاله ای با عنوان «مایع سازی هلیوم[۳]» نتایج کارهایش را منتشر ساخت [۱] و بلافاصله شروع به اندازه گیری مقاومت الکتریکی فلزات در دماهای پایین کرد. او علاقه مند بود بداند در صفر مطلق، مواد چه مقدار مقاومت الکتریکی خواهند داشت. او ابتدا طلا و پلاتین را که امکان خالص سازی آن ها در آن زمان موجود بود انتخاب کرد و سپس به سراغ جیوه رفت و با تقطیر چند باره آن به خلوصی مناسب جهت آزمایش ها دست یافت. او هنگام اندازه گیری مقاومت الکتریکی جیوه در دماهای پایین متوجه شد مقاومت جیوه در محدوده دمای ۴K به طور ناگهانی افت می کند و به مقدار ناچیزی می رسد[۲] . این نتیجه چیزی نبود که او منتظرش بود. او انتظار داشت مقاومت به صورت خطی با دما کاهش یابد، اما افت ناگهانی مقاومت نشان از فیزیکی ناشناخته داشت. او آزمایش را با نمونه هایی با درجه خلوص متفاوت انجام داد و متوجه شد برای ناپدید شدن مقاومت، خلوص نمونه اهمیتی ندارد. برای او دو پرسش مطرح بود:

نخست: چرا مقاومت الکتریکی به طور ناگهانی افت می کند؟

دوم: آیا مقاومت به طور دقیق صفر است یا مقدار آن به دلیل کمتر بودن از حساسیت دستگاه های اندازه گیری، صفر انگاشته می شود؟

او برای پاسخ به سوال دوم، یک جریان مستقیم را در یک حلقه‌ی بسته جیوه القا کرد و متوجه شد با گذشت زمان هیچ افتی در این جریان دیده نمی شود [۳]. او این حالت بدون مقاومت الکتریکی را ابررسانایی نامید. پس از کشف ابررسانایی علاقه مندی های بسیاری به مطالعه و بررسی این مواد در بین فیزیک دانان شکل گرفت. در آغاز امر سه پرسش عمده و اساسی پیش روی فیزیک دانان قرار داشت:

---

[۱] Heince kamerlingh onnes
[۲] Van der valce
[۳] The Liquefaction of Helium

۱) چرا ابررسانایی و مقاومت صفر اتفاق می افتد؟

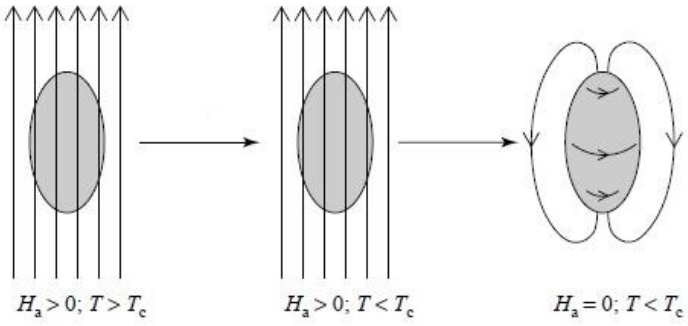
۲) چه موادی ابررسانا هستند؟

۳) آیا ابررسانایی همان رسانایی ایده آل بدون مقاومت است؟

تا حدود بیست سال پس از کشف ابررسانایی، این گونه پنداشته می شد که ابررسانایی همان رسانش کامل الکتریکی است. اما در سال ۱۹۳۳، دو دانشمند آلمانی به نام های مایسنر[۱] و اوشن فلد[۲] که روی مایع سازی هلیوم و صنایع برودتی فعالیت می کردند طی آزمایش هایی روی نمونه‌های قلع و سرب که تا زیر دمای بحرانی سرد شده بودند نشان دادند ابررسانایی یک ویژگی ذاتی برای برخی مواد است و تفاوت اساسی با رسانش کامل الکتریکی دارد [۳]. آن ها پی بردند یک ماده ابررسانا اجازه نفوذ شار مغناطیسی به درون خود را نمی دهد. چیزی که کاملا متفاوت از یک رسانای کامل بود.

برای درک بهتر تفاوت بین این دو مفهوم، برای یک نمونه رسانای کامل، آزمایش‌های اعمال میدان مغناطیسی به نمونه و سردسازی نمونه تا زیر دمای بحرانی را با ترتیب های مختلف انجام می دهیم و رفتار پایانی ماده را در هر روند بررسی می‌کنیم:

الف) به یک نمونه‌ی رسانای کامل که در دمایی بالاتر از دمای گذار قرار دارد، یک میدان مغناطیسی اعمال می‌کنیم. شار میدان مغناطیسی به نمونه نفوذ می کند. اکنون نمونه را تا زیر دمای بحرانی سرد می‌کنیم. همچنان میدان مغناطیسی در نمونه حضور دارد. حتی اگر اکنون میدان اعمالی را حذف کنیم، به دلیل قانون لنز- فارادی، یک جریان القایی را در نمونه شاهد خواهیم بود. به سبب صفر بودن مقاومت، یک جریان دائمی در نمونه همان میدان مغناطیسی پیشین را در نمونه ایجاد می کند. (تصویر ۲-۱)

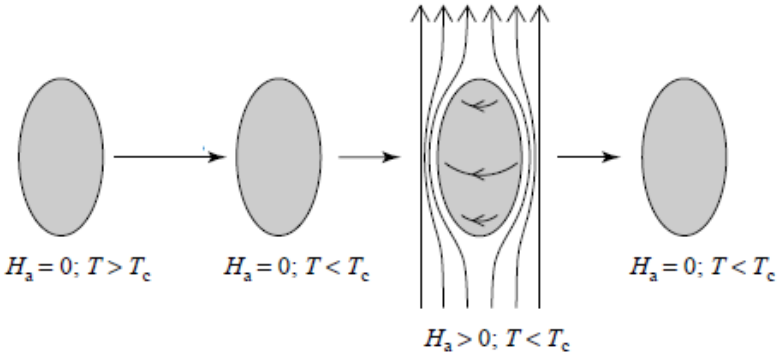


تصویر ۲-۱: اعمال میدان و سردسازی نمونه تا زیر دمای بحرانی برای یک نمونه رسانای کامل. ابتدا میدان اعمال می شود و سپس نمونه تا زیر دمای بحرانی سرد می‌شود.

---

[۱] Meissner
[۲] Oshenfeld

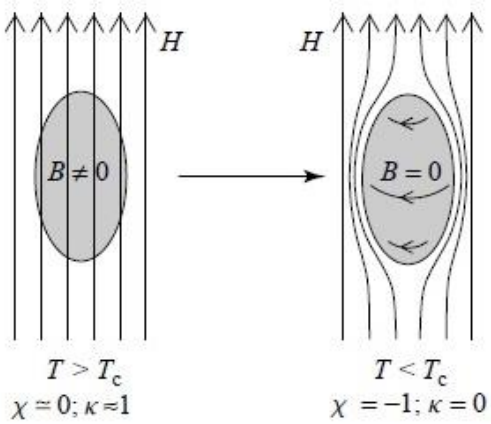
ب) یک نمونه رسانای کامل را در غیاب میدان اعمالی سرد می‌کنیم تا به زیر دمای بحرانی برسد. سپس یک میدان مغناطیسی به آن اعمال می‌کنیم. آن چه شاهد هستیم طرد شار میدان مغناطیسی از نمونه و مقاومت کامل نمونه در پذیرش شار مغناطیسی اعمالی است. در این جا جریان‌هایی در نمونه القا می شوند به گونه ای که با میدان مغناطیسی اعمالی مخالفت می کنند. (تصویر ۲-۲)



تصویر ۲-۲: اعمال میدان و سردسازی نمونه تا زیر دمای بحرانی برای یک نمونه رسانای کامل.
ابتدا نمونه تا زیر دمای بحرانی سرد می شود و سپس میدان اعمال می‌شود.

در واقع رفتار یک رسانای کامل در فرایندهای اعمال میدان مغناطیسی و سردسازی تا زیر دمای بحرانی تابع ترتیب انجام آزمایش هاست.

مایسنر و اوشنفلد نشان دادند رفتار یک نمونه ابررسانا از این «ترتیب» مستقل است. یک نمونه ابررسانا همواره میدان مغناطیسی را طرد می کند و طرد شار میدان مغناطیسی از آن، به ترتیب انجام آزمایش‌ها بستگی ندارد. در حالی که یک نمونه رسانای کامل تمایل دارد در برابر تغییر شار مخالفت کند، یک نمونه ابررسانا همواره یک دیامغناطیس کامل است و پاسخش به شار مغناطیسی اعمالی همواره طرد شار در هر شرایطی است. اگر نمونه‌ی رسانای کامل بالا را با یک نمونه‌ی ابررسانا تعویض کنیم، رفتار پایانی دستگاه همواره طرد شار مغناطیسی خواهد بود(تصویر ۲-۳). این ویژگی که تمایز بین ابررسانا و رسانای کامل را آشکار می سازد به سبب تلاش های کاشف آن به «پدیده مایسنر» معروف است.



تصـــویر ۲-۳: یک نمونه ابررســـانا در دماهای زیر دمای بحرانی همواره شـار مغناطیسی را از خود طرد می کند. این پدیده به اثر مایسنر معروف است.

«پدیده مایســنر » نشـان می دهد ابررســانایی یک ویژگی ذاتی ماده اســت که در دمای زیر دمای بحرانی بروز می‌یابد. دمای بحرانی دمایی اسـت که در آن ماده ابررسـانا شـده و پدیده مایسـنر مشاهده می شود. این دما برای مواد مختلف متفاوت است. جدول ۲-۱ دمای بحرانی را برای برخی مواد ابررسانا نشان می دهد.

جدول ۲-۱: دمای بحرانی برای برخی عناصر و ترکیبات ابررسانا

z	عنصر	T_c(K)	z	عنصر	T_c(K)	ماده	T_c(K)
۴	Be	۰/۰۲۶	۷۱	La	۰/۱	Hg	۴/۱
۱۳	Al	۱/۱۸	۷۲	Hf	۰/۱۳	Pb	۷/۲
۲۱	Sc	۰/۰۱	۷۳	Ta	۰/۴۷	Nb	۹/۲
۲۲	Ti	۰/۴۰	۷۴	W	۰/۰۱۵	$NbN_{.96}$	۱۵/۲
۲۳	V	۵/۴۰	۷۵	Re	۱/۷۰	Nb_3Sn	۱۸/۱
۳۰	Zn	۰/۸۵	۷۶	Os	۰/۶۶	Nb_3Ga	۲۰/۳
۳۱	Ga	۱/۰۸	۷۷	Ir	۰/۱۱	Nb_3Ge	۲۳/۲
۴۰	Zr	۰/۶۱	۸۱	Tl	۲/۳۸	$Ba_xLa_{5-x}Cu_5O_y$	۳۰-۳۵
۴۱	Nb	۹/۲۵	۸۲	Pb	۷/۲۰	$YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$	۹۵
۴۲	Mo	۰/۹۲	۹۰	Th	۱/۳۸	$Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_3$	۱۱۰
۴۳	Tc	۷/۸	۹۱	Pa	۱/۴	$Tl_2Ba_2Ca_2Cu_3O_3$	۱۲۵
۴۴	Ru	۰/۴۹	۹۵	Am	۱/۰		

۲-۲ پدیده مایسنر، جریان های پوششی و عمق نفوذ

اگر یک نمونه ابررسـانا که تا زیر دمای بحرانی سـرد شـده اسـت در معرض یک میدان مغناطیسی قرار بگیرد جریان‌هایی در آن القا می شود که همواره اثر میدان اعمالی را حذف کرده و اجازه نفوذ شار میدان مغناطیسی به نمونه

را نمی دهند. از آن جایی که $\nabla \times B = \mu_{\cdot} j$و با توجه به صفر بودن میدان درون نمونه $(B = \cdot)$ به دست می‌آید:

$$\nabla \times \mathrm{B} = \mu_{\cdot} \mathrm{j}, \qquad \mathrm{B} = \cdot \qquad \Longrightarrow \mathrm{j} = \cdot \tag{۱-۲}$$

یعنی جریان القایی ناشی از اعمال میدان مغناطیسی، در حجم نمونه حضوری ندارد و تنها این امکان را دارد که در پوسته‌ی نمونه جاری باشد. این سطحی بودن جریان، حتی برای جریان های ترابرد[۱] هم صادق است. در یک نمونه ابررسانا همه‌ی جریان ها چه جریان مایسنر چه جریان ترابرد، در پوسته ای با ضخامت ناچیز جاری می شود. افزون بر این، طرد کامل شار مغناطیسی از یک نمونه ابررسانایی نیز به طور گسسته انجام نمی گیرد و میدان اعمالی روی سطح تا مقداری نفوذ می کند. مقدار λ که با رابطه زیر تعریف می شود «عمق نفوذ[۲]» نامیده می شود که نشانگر مقدار نفوذ میدان به نمونه ابررساناست.

$$\int_{\cdot}^{\infty} \mathrm{B(x)dx} = \lambda \mathrm{B}(\cdot) \tag{۲-۲}$$

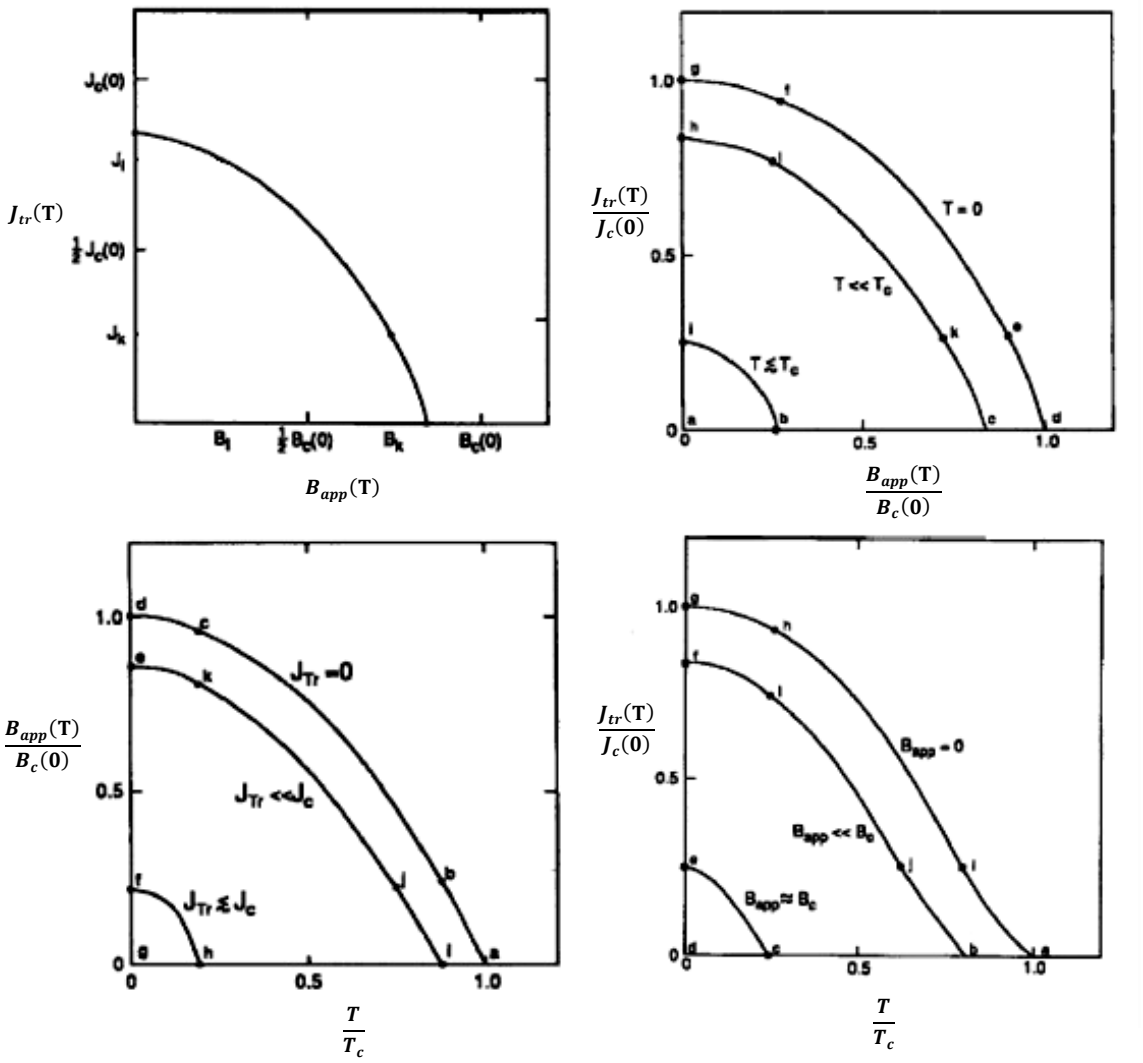
۲-۳ میدان مغناطیسی بحرانی، جریان بحرانی

برای مشاهده‌ی اثر مایسنر یک مقدار آستانه برای میدان مغناطیسی وجود دارد که «میدان مغناطیسی بحرانی[۳]» خوانده می‌شود. یعنی یک نمونه ابررسانا در این میدان اعمالی و مقادیر بالاتر از آن، دیگر ابررسانا نیست و به صورت یک ماده غیر ابررسانا در می‌آید. در واقع خطوط شار میدان مغناطیسی در این میدانِ آستانه به نمونه‌ی ابررسانا نفوذ می‌کنند و دیگر نمی توان «اثر مایسنر» را مشاهده کرد. از آن جایی که میدان مغناطیسی در اطراف نمونه و جریان پوششی از آن از طریق قانون آمپر $(\nabla \times \mathrm{B} = \mu_{\cdot} \mathrm{j})$ به همدیگر مربوط اند، می توان متناظر با میدان مغناطیسی بحرانی، یک چگالی جریان بحرانی برای ابررسانا تعریف کرد. در واقع چگالی جریان بحرانی، بیشینه جریانی است که می تواند از یک نمونه ابررسانا عبور کند بدون آن که نمونه به حالت معمولی برود و مقاومت الکتریکی از خود نشان دهد. آشکار است اعمال همزمان چگالی جریان ترابرد و میدان مغناطیسی، مقادیر بحرانی آن ها را کاهش می‌دهد. هر چه میدان اعمالی بزرگتر باشد، چگالی جریان بحرانی کاهش بیشتری می یابد و برعکس. در واقع میدانی که یک نمونه‌ی ابررسانا مشاهده می کند، هم ناشی از میدان مغناطیسی اعمالی و هم ناشی از میدان ایجاد شده توسط جریان ترابرد است. از این جهت اعمال همزمان میدان مغناطیسی و جریان ترابرد، مقادیر بحرانی آن ها را کاهش می‌دهد.

---

[۱] Transport current
[۲] Penetration depth
[۳] Critical magnetic field

هم جریان بحرانی و هم میدان بحرانی، رابطه وارون با دما دارند. یعنی افزایش دما سبب کاهش جریان بحرانی و میدان مغناطیسی بحرانی نمونه می شود. تصویر ۲-۴ رابطه بین این کمیت ها را نشان می‌دهد. دردمای بحرانی، مقدار میدان مغناطیسی بحرانی و جریان بحرانی صفر است. یعنی اعمال کوچکترین میدان مغناطیسی یا جریانی می‌تواند نمونه را به حالت معمولی ببرد.



تصویر ۲-۴: رابطه چگالی جریان بحرانی، میدان مغناطیسی بحرانی و دما با یکدیگر- برگرفته از کتاب Superconductivity by C.P.Poole-۲nd edition-۲۰۰۷

۲-٤ تراوایی مغناطیسی[۱] ابررساناها

تراوایی مغناطیسی یک ماده μ به طور کیفی به صورت « توانایی نفوذ میدان مغناطیسی به ماده » تعریف می‌شود. به گونه ای که برای ماده‌ای با نفوذ کامل داریم: $\mu = ۱$ و برای عدم نفوذ میدان به نمونه داریم: $\mu = ۰$.

بیشتر مواد مقادیری نزدیک به ۱ دارند، یعنی خطوط میدان مغناطیسی تقریبا به طور کامل به آن‌ها نفوذ می‌کند. اما برای ابررساناها که طرد کامل شار صورت می‌گیرد داریم: $\mu = ۰$. در واقع ابررساناها تنها دسته ای از مواد هستند که تراوایی مغناطیسی صفر دارند.

۲-۵ پذیرفتاری مغناطیسی[۲] ابررساناها

پذیرفتاری مغناطیسی χ_m به طور کیفی به صورت « میدان مغناطیسی ناشی از دو قطبی های مغناطیسی ماده در مقایسه با میدان مغناطیسی خارجی» تعریف می‌شود. برای یک نمونه ابررسانا که ماده مقاومت کاملی را در برابر میدان اعمالی نشان می دهد داریم $\chi_m = -۱$ و در نتیجه:

$$\chi_{\mathrm{m}} = -۱\,,\ \ \mathrm{M} = \chi_{\mathrm{m}}\,\mathrm{H} \implies \mathrm{M} = -\mathrm{H} \qquad (۲-۳)$$

۲-٦ اثر مایسنر، میدان مغناطیسی بحرانی و انرژی آزاد

اثر مایسنر یا مقاومت ماده‌ی ابررسانا در برابر نفوذ میدان مغناطیسی به نمونه، از ویژگی های اساسی هر ابررساناست. اشاره کردیم اعمال میدان مغناطیسی بیش از یک مقدار آستانه، می تواند نمونه را به فاز معمولی ببرد. این مقدار خاص را «میدان مغناطیسی بحرانی» نامیدیم. از دیدگاه انرژی آزاد، می توان این گونه استدلال کرد که در دماهای زیر دمای بحرانی ماده علاقه‌مند است در فاز ابررسانایی باشد، یعنی انرژی آزاد نمونه در حالت ابررسانایی کمتر از حالت معمولی است. حضور جریان ترابرد، اعمال میدان مغناطیسی به نمونه و افزایش دما، انرژی ماده را افزایش می دهد. در مقادیر کمتر از میدان مغناطیسی بحرانی، این افزایش انرژی به اندازه ای نیست که بتواند اختلاف انرژی آزاد ماده با حالت معمولی را جبران کند و برای ماده همچنان فاز ابررسانایی برتری دارد.

در میدان مغناطیسی بحرانی انرژی آزاد ماده دقیقا برابر با انرژی آزاد حالت معمولی می‌شود و لذا ماده فاز ابررسانایی را ترک کرده و به حالت معمولی می رود.

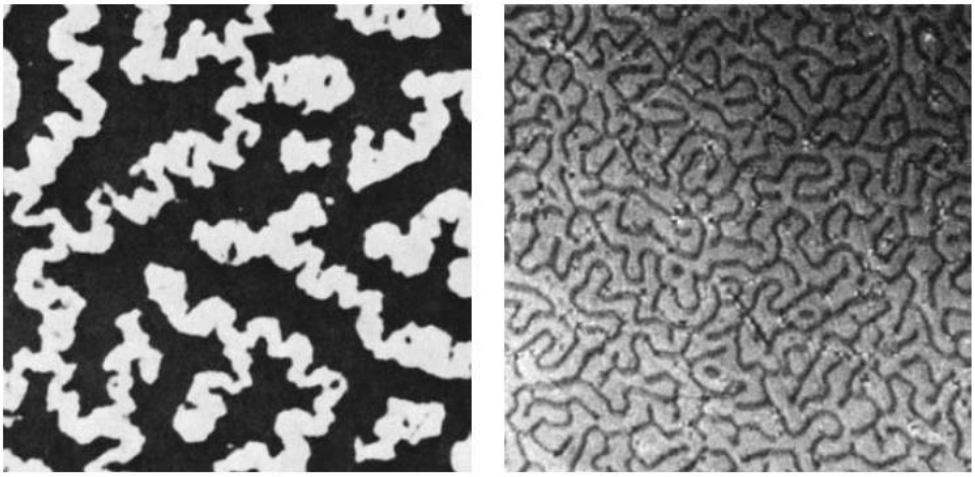
سوال این است که روند نفوذ میدان به نمونه های ابررسانا و افزایش انرژی آزاد دستگاه چگونه صورت

---

[۱] Magnetic permeability
[۲] Magnetic susceptibility

می گیرد؟

بررسی ها و آزمایش ها نشان می دهد در $H_a < H_c$ با افزایش میدان اعمالی، مناطقی معمولی در ماده ابررسانا رشد می کند. این مناطق با میدان اعمالی همسو و هم جهت بوده و شار مغناطیسی از طریق آن ها می تواند از ماده ابررسانا عبور کند. در واقع ماده به نواحی موازی ابررسانا و معمولی تقسیم می شود. به این وضعیت «حالت میانی[۱]» گفته می‌شود.



تصویر ۲-۵ : (راست) ساختار میانی برای یک لایه سرب به ضخامت ۷ میکرون (چپ) ساختار حالت میانی برای یک صفحه ایندیوم با ضخامت ۱۱/۷mm- نواحی تیره رنگ نواحی ابررسانا و نواحی روشن مناطق معمولی را نشان می‌دهد. - برگرفته از کتاب :

Superconductivity by W.Buckel and R.Kleiner-۲nd edition-۲۰۰۴

وجود پدیده مایسنر به معنای این است که تشکیل نواحی معمولی و حالت میانی، با افزایش انرژی آزاد همراه است؛ یعنی این نواحی انرژی سطحی مثبت دارند و با تشکیل آن ها، انرژی دستگاه افزایش می یابد. چرا که اگر انرژی سطحی آن ها منفی می بود، نمونه تمایل داشت کوچکترین میدان مغناطیسی اعمالی را به درون خود راه دهد و بنابراین نباید پدیده مایسنر مشاهده می شد.

[۱] Intermediate state

۲-۷ طول همدوسی

طول همدوسی از مشخصه های اصلی طول در ابررساناهاست و با تغییر تدریجی مرز میان مناطق ابررسانایی و معمولی در ارتباط است. در واقع مرز میان مناطق ابررسانا و مناطق معمولی نمی تواند خیلی باریک باشد. چگالی ابرالکترون ها در مناطق معمولی صفر است و در طول فاصله ای برابر با طول همدوسی به مقدار n_s در مناطق ابررسانا می رسد.

طول همدوسی به خلوص نمونه بستگی دارد. یعنی هر چه خلوص نمونه بیشتر باشد طول همدوسی بیشتر است. طول همدوسی در آلیاژهای ابررسانا بیش از طول همدوسی در فلزات ابررساناست. در جدول ۲-۲ مقادیر طول همدوسی برای برخی مواد ابررسانا نشان داده شده است.

۲-۸ ابررسانای نوع II

اندازه گیری‌های دهه ۳۰ رفتارهایی را برای برخی ابررساناها ثبت کرد که چندان با دیگر مواد ابررسانا همخوانی نداشت. در یک نمونه دهاس[۱] و وود[۲] دریافتند آلیاژهای سرب- بیسموت تا ۲۰ برابر بیشتر از سرب خالص در برابر میدان مغناطیسی مقاومت می کنند [۳]. این ناهمخوانی‌ها سوال برانگیز بود. لاندائو علت آن ها را بزرگ بودن نسبت $\kappa = \frac{\lambda}{\xi}$ در این مواد حدس زد [۳]. نسبت $\kappa = \frac{\lambda}{\xi}$ ضریب گینزبورگ – لاندائو[۳] خوانده می شود.

این حدس لاندائو که از یک دید تجربی ناشی شده بود راه گشا شد و در سال ۱۹۵۷ «الکسی الکسیوویچ ابریکاسوف» فیزیکدان روسی آکادمی علوم شوروی در مقاله ای با عنوان «در باب ویژگی های مغناطیسی ابررساناهای نوع II» با اشاره به حدس لاندائو، توانست توجیه قابل قبولی از خواص آن دسته از ابررساناهایی بدهد که تا حدی متفاوت رفتار می کردند [۴]. او این دسته از ابررساناها را ابررسانای نوع II نامید و اشاره کرد آن چه سبب تفاوت رفتار این مواد می‌شود منفی بودن انرژی سطحی آن ها در هنگام تشکیل نواحی معمولی در ماده است. یعنی بر خلاف حالت میانی در ابررساناهای نوع I که با انرژی سطحی مثبت همراه بود، حالتی در این ابررساناها هست که با انرژی سطحی منفی همراه است و علت ناهمخوانی برخی خواص و ویژگی های این دسته از ابررساناها با دسته پیشین همین انرژی سطحی منفی هنگام تشکیل نواحی معمولی در ماده است.

ابریکاسوف این حالت را «حالت مخلوط[۴]» نامید و بیان داشت برای موادی که در آن ها $\kappa = \frac{\lambda}{\xi} > \frac{۱}{\sqrt{۲}}$ این حالت رخ می دهد.

---

۱ DeHaas
۲ Woogd
۳ Ginzburg Landao factor
۴ Mixed state