بسم الله الرحمن الرحیم

دانشگـــده علوم– گروه فیزیـــک
گـــرایش حالـــت جامـــد فیزیـــک ماده چـــگال

عنـــوان

جریان جوزفسون در ساختار ابررسانا– فرومغناطیس– ابررسانا در حضور ناخالصی‌های مغناطیسی و برهم‌کنش اسپین مدار

استـــاد راهنمـــا

دکتـــر قدیر محمـــدخـــانی

استاد مشـــاور

دکتـــر محمـــدعلـــی ملـــکی

نگارنـــده

ذکریـــا مـــرادی

زمستـــان ۹۰

همه عمر برندارم سر از این خمار مستی

که هنوز من نبودم که تو بر دلم نشستی

تو، نه مثل آفتابی که حضور و غیبت افتد

دگران روند و آیند، تو همچنان که هستی

تقدیم به:

روح بزرگوار مادرم که همیشه یاری گر من بوده است.

تقدیر و تشکر:

زبان خامه ی این حقیر، از برشمردن دین سنگینی که استاد بزرگوار و محترم، جناب آقای دکتر محمد خانی بر گردنم نهاده قاصر است. چون سپاس گزارم او را، که همه بزرگی است و کرم، و آموخت مرا درس زیستن. امیدوارم این پروژه گوشه ای از زحمات آن بزرگوار را ارج نهد.

از جناب آقای دکتر عبدالهی و آقای دکتر رسولی که قبول زحمت نموده و داوری این پروژه را بر عهده گرفته اند کمال سپاس را دارم.

از پدر و برداران و خواهر عزیزم که همیشه با تشویق هایشان به من دلگرمی داده اند سپاسگزارم.

اما از هرچه بگذریم سخن دوست خوشتر است:

از دوستان عزیزم آقایان: علی اصغر حکمی زنجانی، محمد جواد مرادی و سایر عزیزانی که این کوتاه سخن را، مجال ذکر نامشان نیست و مراد انجام این پروژه چه با راهنمایی های ارزشمندشان و چه با تهیه کتاب و . . . یاریم نموده اند، سپاسگزارم. امید که در تمامی مراحل زندگیشان، پیروز باشند.

چکیده

در این پایان نامه جریان جوزفسون را برای مقادیر اختیـاری از غلظـت ناخالصـی در یـک اتصـال ابررسانا – فرومغناطیس- ابررسانا که شامل، پراکندگی اسپین مدار و ناخالصی مغناطیسـی مـی‌باشـد، بررسی می‌کنیم. در حد اثر مجاورت معادله آیلنبرگ را خطی کرده و یک عبارت تحلیلی برای جریـان جوزفسون برحسب پارامترهای موجود در اتصال به دست می‌آوریم. این عبـارت ایـن امکـان را بـه مـا خواهد داد که نه تنها در حد کثیف و تمیز، بلکه در ناحیه میانی از غلظـت ناخالصـی کـه در مقیـاس داده‌های آزمایشگاهی مهم هستند، نتایج فیزیکی جالبی را بدست آوردیم.

واژگان کلیدی: اثر جوزفسون، بازتاب آندریف، اتصال ضعیف، تابع گرین، معادله آیلنبرگ، شـرط مرزی زایتسف، پارامتر نظم ابررسانایی، جریان جوزفسون، اثر مجاورت، میدان تبادلی، شفافیت

پیشگفتار

پدیده‌ی ابررسانایی برای اولین بار در سال ۱۹۱۱ توسط کامرلینگ انس[1] در دانشگاه لیدن هلند به هنگام مطالعه وابستگی دمایی مقاومت ویژه جیوه کشف شد[۱]. وقتی دمای یک نمونه فلز که می‌تواند از خود خاصیت ابررسانایی نشان دهد، را کاهش می‌دهیم، متوجه می‌شویم که در یک دمای بخصوص مقاومت آن به طور ناگهانی صفر می‌شود. به چنین دمائی که در آن مقاومت از بین می‌رود، دمای بحرانی (T_c) گفته می‌شود. تعداد زیادی از روش‌های پدیده شناختی توانستند با موفقیت خوبی خواص مختلف ابررساناها را توجیه کنند.

نخستین نظریه موفق در توصیف الکترودینامیک ابررساناها نظریه لندن[2] بود[۲]. بنابر این نظریه الکترونی در یک ابررسانا را می‌توان به صورت مخلوطی از الکترون‌های ابررسانشی و الکترون‌های عادی در نظر گرفت. چگالی عددی الکترون‌های ابررسانشی (n_s) با افزایش دما کاهش می‌یابد و در $T=T_c$ به صفر می‌رسد. دومین روش پدیده شناختی ابررسانایی، نظریه گنیزبرگ لانداو[3] است که برای توصیف خواص ابررساناها از مکانیک کوانتومی استفاده کرد[۳]. این نظریه تنها نزدیک به دمای بحرانی معتبر است، همه الکترون‌های ابررسانشی را با یک تابع موج نمایش می‌دهد اختصاص داد که فقط وابستگی فضائی دارد.این تابع موج باعث می‌شود که ابررسانائی را به عنوان یک سیستم کوانتومی ماکروسکوپی در نظر بگیرند، در حالی که در فلز نرمال هر الکترون با یک تابع موج بیان می‌شود.۴۶ سال بعد یعنی در سال ۱۹۵۶ کوپر نشان داد که اگر الکترونها همدیگر را جذب کنند، سیستم الکترونی حالت نرمال ناپایدار می شود و به تشکیل جفت‌های کوپر می‌انجامد[۴]. حال این جفت‌های الکترونی (جفت-کوپر) ذرات بوزونی هستند و می توانند یک ابرشاره الکترونی را تشکیل دهند. این ایده منجر به نظریه میکروسکوپی ابررسانایی توسط باردین ـ کوپر و شریفر[4] (Bcs) شد[۵و۴]. بعدها گورکوف[5] [۶] نظریه Bcs را توسط توابع گرین تدوین کرد.

در مورد سطح مشترک یک ابررسانا و فلز نرمال (SN) جفت‌های کوپر می‌توانند تا یک فاصله‌ای که برابر با $\xi_T \sim v_F/T$ است، در فلز نرمال نفوذ کنند. بنابراین خواص ابرررسانا در فلز نرمال القاء

1 Kamerling Onnes
2 London
3 Ginzburg, Landau
4 Bardeen, Cooper, Schrieffer
5 Gorkov

می‌شود و این پدیده را اثر مجاورت[1] می‌گویند. این اثر را می‌توان برحسب نفوذ جفت‌های‌کوپر از ابررسانا به داخل فلز نرمال و براساس فرآیند بازتاب آندریف[۷] توجیه کرد. یک تک الکترون موقعی می‌تواند در ابررسانا نفوذ کند که انرژی آن بزرگتر از گاف ابررسانا (Δ) باشد، زیرا داخل گاف حالت الکترونی وجود ندارد. حال یک الکترون با انرژی کمتر از Δ، از فلز نرمال به سمت سطح مشترک با ابررسانا حرکت می‌کند. طبق استدلال بالا این الکترون نمی تواند در ابررسانا نفوذ کند. اگر هیچ سد پتانسیلی در مرز بین ابررسانا – فلز نرمال وجود نداشته باشد، الکترون به خاطر پایستگی تکانه نمی‌تواند باز پراکنده شود. با توجه به فرآیند بازتاب آندریف الکترون فرودی در سطح مشترک به صورت یک حفره در راستای مخالف سرعت الکترون منعکس می‌شود و این فرآیند، جفت کوپری را در داخل ابررسانا تولید می‌کند.

از پدیده‌های دیگر ابررسانایی، که خاصیت کوانتومی ماکروسکوپی را نشان می‌دهد، اثر جوزفسون[2] است[۸]. این اثر موقعی اتفاق می افتد که دو ابر رسانا از طریق یک عایق در اتصال ابر رسانا ـ عایق ـ ابررسانا (SIS)، به هم وصل شوند. در سال ۱۹۶۲ جوزفسون پیش بینی کرد که اگر دو ابررسانا دارای اختلاف فاز ϕ و سد عایق بین آنها به اندازه کافی نازک ($۱۰A^{\circ}$) باشد، توابع موج ابررساناها می توانند از عایق عبور کنند. در این حالت، الکترونهای جفت شده قادرند بدون اتلاف و در غیاب ولتاژ از یک ابررسانا به ابررسانای دیگرتونل بزنند و یک ابر جریان $I=I_c sin\phi$، موسوم به جریان جوزفسون مستقیم (dc) را در عرض اتصال بوجود آورند. کمیت I_c در این رابطه جریان بحرانی یا بیشینه جریان جوزفسون است.

بازتاب آندریف فرآیند اساسی در توصیف اثر جوفسون dc در ساختارهای پیوند ضعیف، مانند اتصالهای ابررسانا ـ فلز نرمال ـ ابر رسانا (SNS) است. یک الکترون با تکانه k به یکی از سطوح مشترک برخورد می کند و به صورت یک حفره در راستای معکوس با همان سرعت الکترون، بر می‌گردد. بنابراین یک جفت کوپر را در ابررسانا خلق می‌کند. این حفره نیز در سطح مشترک دوم بازتاب آندریف انجام داده و به صورت یک الکترون منعکس می‌گردد، که منجر به نابودی یک جفت کوپر در ابررسانا می‌شود. به عنوان یک نتیجه از این چرخه، یک جفت الکترون همبسته شده از یک

1 Proximity effect
2 Josephson Effect

ابررسانا به ابررسانای دیگری انتقال می‌یابد، که این نیز یک شارش جریان موسوم به ابر جریان جوزفسون را در عرض اتصال تولید می‌کند.

سیستم‌های ابررسانا ـ فرمغناطیس SF غنی‌تر از اتصال‌های SN است. در این ساختارها پارامتر نظم ابررسانایی در مقایسه با مورد SN علاوه بر میرا شدن به طور نمایی نوسان نیز می‌کنند. این رفتار نوسانی به خاطر میدان تبادلی فرومغناطیس است که به صورت یک پتانسیل با علامتهای متفاوت برای دو الکترون جفت کوپر عمل می‌کند و درنتیجه منجر به یک تکانه خالص در جفت می‌شود.

در این پایان‌نامه هدف ما بررسی جریان جوزفسون در ساختار (SFS) در حضور ناخالصیهای مغناطیسی و اسپین مدار با روش تابع گرین می‌باشد که برای این کار باید معادله‌ی گورکوف را حل کنیم که کاری بسیار دشوار می‌باشد. اما در سیستم‌های واقعی فیزیکی به خاطر این که با انرژی‌های نزدیک سطح فرمی سر و کار داریم، مقیاسهای طولی موجود در سیستم از طول موج فرمی الکترون‌ها (λ_F) بزرگ‌تر هستند و تمام کمیات فیزیکی در مقیاس طول موج فرمی، کند تغییر هستند بنابراین می‌توانیم از روش‌های شبه کلاسیک برای حل مسئله استفاده کنیم. با بهره‌گیری از این روش به جای معادله‌ی گورکوف از معادله‌ی آیلنبرگ برای تحلیل این سیستم‌ها استفاده می‌کنیم.

این پایان نامه شامل پنج فصل می‌باشد.

فصل اول، سرشت مقدماتی دارد که مروری بر ابررسانایی و فرومغناطیس است. در این فصل با مفاهیمی همچون گاف انرژی- نظریه BCS اثر مجاورت و بازتاب آندریف آشنا خواهیم شد.

در فصل دوم به توضیح تقریب شبه کلاسیک خواهیم پرداخت و بررسی خواهیم کرد که چگونه با استفاده از تقریب شبه کلاسیک می‌توان معادلات گورکوف را با شکل ساده‌تر معادله‌ی آیلنبرگ جهت بررسی سیستم‌های ابررسانا جایگزین کرد.

برهمکنش اسپین مدار و هامیلتونی مؤثر برآن مطالب فصل ۳ را تشکیل می‌دهند.

در فصل چهارم با استفاده از ماتریس گرین و معادله‌ی آیلنبرگ به محاسبه جریان جوزفسون در شرایط مختلف و تحلیل نمودارهای آن می‌پردازیم.

و سر انجام فصل آخر به نتیجه گیری در مورد محاسبات این پایان نامه اختصاص می‌یابد.

فهرست مطالب

چکیده..... V
پیشگفتار..... VI

فصل اول: خواص عمومی ابررساناها و فرومغناطیس

۱-۱ ابررسانا..... ۱
۱-۱-۱ دمای بحرانی ابررسانا..... ۱
۱-۱-۲ کوانتش شار مغناطیسی..... ۲
۱-۱-۳ نظریه BCS در مورد ابررسانایی..... ۳
۱-۱-۴ گاف انرژی..... ۴
۱-۱-۵ وابستگی دمایی گاف انرژی..... ۴
۱-۱-۶ اثر مجاورت..... ۵
۱-۱-۷ بازتاب آندریف..... ۵
۱-۲ فرومغناطیس..... ۷
۱-۲-۱ حوزه‌های مغناطیسی..... ۷
۱-۲-۲ میدان تبادلی در فرومغناطیس..... ۹
۱-۲-۳ اثر مجاورت در فرومغناطیس..... ۱۰
۱-۲-۴ بازتاب اندریف در سطح S/F..... ۱۰

فصل دوم: تقریب شبه کلاسیک

۲-۱ اثر جوزفسون..... ۱۲
۲-۱-۱ اثر جوزفسون ایستا (dc)..... ۱۲
۲-۱-۲ ساختار SNS..... ۱۳
۲-۱-۳ ساختار SFS..... ۱۳
۲-۱-۴ اثر مجاورت در SF..... ۱۳
۲-۲ تئوری میکروسکوپیک ابررسانائی..... ۱۵
۲-۲-۱ توابع گرین..... ۱۵
۲-۳ تقریب شبه کلاسیکی..... ۱۶
۲-۳-۱ معادله آیلنبرگ..... ۱۶
۲-۳-۲ تکنیک ماتسوبارا..... ۱۷
۲-۳-۳ حد کثیف: معادله اوزادل..... ۱۸
۲-۴ شرایط مرزی..... ۱۹

فصل سوم:جفت شدگی اسپین مدار
۳-۱ برهمکنش اسپین مدار..... ۲۲

فصل چهارم: محاسبه جریان جوزفسون در ساختار SFS در حضور ناخالصی های مغناطیسی و اسپین مدار
۴-۱ مقدمه..... ۲۶
۴-۲ حل معادله آیلنبرگ و بدست آوردن جریان جوزفسون..... ۲۸
۴-۳ حالت شبه بالستیک..... ۴۷
۴-۴ حد پخش..... ۵۱
۴-۵ پراکندگی اسپین مدار..... ۶۱

فصل پنجم: نتیجه گیری

منابع و مأخذ..... ۶۸

Abstract

فهرست تصاویر

شکل ۱-۲ گاف انرژی درابررسانا ۳
شکل ۱-۳ وابستگی دمای گاف انرژی در ابررسانا ۵
شکل ۱-۴ نمودار طرح واره‌ای از بازتاب آندریف ۶
شکل ۱-۵- حوزه‌های فرومغناطیسی ۷
شکل ۱-۶- حرکت مرز حوزه‌های فرومغناطیسی در اثر اعمال میدان مغناطیسی خارجی ۸
شکل ۲-۱. سطح اندریف در اتصال جوزفسون ۱۴
شکل ۲-۲. خط سیر در سطح مشترک ۱۹
شکل ۳-۱. نمایش حرکت الکترونی که در مدار دایره‌ای بوهر حرکت می‌کند. ۲۲
شکل ۴-۱ بستگی جریان جوزفسون I_c به ضخامت لایه فرومغناطیس $2d$ برای مقادیر مختلف $h\tau$ ۵۵
شکل۴-۲-الف بستگی جریان جوزفسون I_c به ضخامت لایه فرومغناطیس $2d$ برای مقدار $h\tau_t = 2.2$ و مقادیر مختلف λz ۵۸
شکل۴-۲-ب بستگی جریان جوزفسون I_c به ضخامت لایه فرومغناطیس $2d$ برای مقدار $h\tau_t = 2.2$ و مقادیر مختلف λz ۵۹
شکل۴-۲-ج بستگی جریان جوزفسون I_c به ضخامت لایه فرومغناطیس $2d$ برای مقدار $h\tau_t = 2.2$ و مقادیر مختلف λz ۵۹
شکل۴-۳ بستگی جریان جوزفسون I_c به ضخامت لایه فرومغناطیس $2d$ برای مقدار $h\tau = 1.2$ و مقادیر مختلف $\lambda_\perp$ ۶۰

فصل اول

خواص عمومی ابررساناها و فرومغناطیس

در این فصل به بررسی ویژگی‌های عمومی ابررساناها و فرومغناطیس‌ها می‌پردازیم. خواص الکتریکی و مغناطیسی ابررساناها مورد بررسی قرار می‌گیرند. نظریه BCS و اثر مجاورت و بازتاب آندریف را توضیح داده و گاف انرژی ابررسانا و بستگی دمایی آن را بررسی می‌کنیم. در قسمت دوم فصل، مواد فرومغناطیس را مطالعه می‌کنیم و ساختار حوزه‌ای این مواد و رفتار آنها در حضور میدان‌های مغناطیس خارجی بررسی می‌شوند.

۱-۱ ابررسانا

۱-۱-۱ دمای بحرانی ابررسانا

برای ابررسانا افزایش دما سبب افزایش مقاومت ویژه آنها می‌شود. این افزایش را این گونه توجیه می‌کنند که در دمای بالاتر از صفر مطلق، اتم‌ها و یون‌ها به طور دائم در حال ارتعاش هستند. حال هرچه دما بالاتر رود دامنه این ارتعاش‌ها بیشتر می‌شود که در نتیجه آن الکترون‌های رسانش مشکل‌تر می‌توانند از بین آنها عبور کنند. اگر ارتعاش‌های اتمی تنها ساز و کار مقاومت در مقابل حرکت الکترون‌ها باشد، باید انتظار داشته باشیم که با کاهش دما و رسیدن به صفر مطلق، مقاومت ویژه رسانا هم به تدریج و به آرامی به صفر میل کند. در حالی که آزمایش‌ها نشان می‌دهند که در عمل وضعیت به این صورت نیست بلکه دو نوع رفتار بسیار متفاوت در مقاومت ویژه الکتریکی جامدهای بسیار سرد دیده می‌شود. یا مقاومت ویژه الکتریکی در دمایی که بالاتر از صفر مطلق است به طور ناگهانی صفر می‌شود و یا اینکه اصلاً صفر نمی‌شود. علاوه بر ارتعاش‌های اتمی، ساز و کار دیگری نیز برای ایجاد مقاومت الکتریکی وجود دارد. این ساز و کار ناشی از بی‌نظمی‌هایی است که در ترتیب قرار گرفتن اتم‌ها ممکن است وجود داشته باشد.

دمایی را که در آن افت ناگهانی مقاومت ویژه روی می‌دهد دمای بحرانی می‌نامند و آن را با T_c نمایش می‌دهند. بنابراین T_c را دمای گذار به حالت ابررسانایی نیز می‌گویند. زمان کوتاهی پس از این کشف معلوم شد که نه تنها گرم کردن نمونه بلکه با قرار دادن در میدان مغناطیسی نسبتاً ضعیف می‌توان ابررسانایی را از بین برد. این میدان (H_{cm}) را میدان بحرانی می‌نامند.

۱-۱-۲ کوانتش شار مغناطیسی

جریان الکتریکی در یک حلقه ابررسانا می‌تواند تا زمان نامحدودی باقی بماند. طبیعتاً، این ماندگاری جریان به چشمه انرژی نیاز ندارد، زیرا مقاومت حلقه صفر است. چنین جریان ماندگاری را می‌توان به شرح زیر تولید کرد:

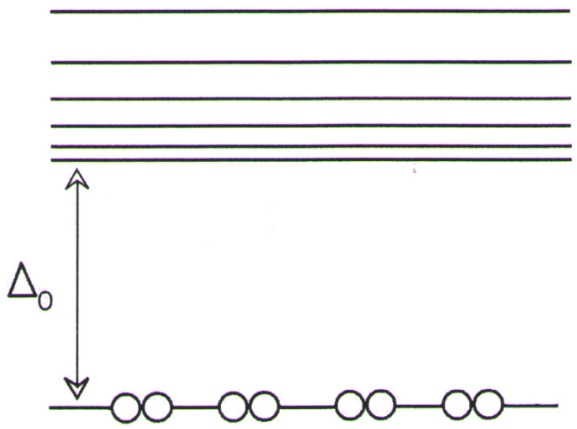
نخست حلقه را در $T > T_c$ در میدان مغناطیسی خارجی قرار می‌دهیم به طوری که خطوط میدان مغناطیسی از درون حلقه بگذرند. سپس حلقه را تا دمای زیر T_c، تا جایی که ماده ابررسانا می‌شود، سرد کرده و میدان مغناطیس خارجی را قطع می‌کنیم. در نخستین لحظه پس از قطع میدان، شار مغناطیسی درون حلقه کاهش می‌یابد و بنابر قانون القای فاراده، در حلقه جریانی القا می‌شود که از این لحظه به بعد دوام خواهد داشت. این جریان از کاهش بیشتر شار مغناطیس حلقه جلوگیری می‌کند. یعنی اکنون که میدان خارجی صفر است، جریان القایی خود باعث تأمین شار به مقدار اولیه آن از حلقه می‌شود. در واقع، اگر حلقه دارای مقاومت محدود R باشد، شار از حلقه با ثابت زمانی L/R کاهش خواهد یافت. L خود القایی حلقه است. در یک حلقه ابررسانا، چون R=0 است. آهنگ کاهش شار مغناطیس نامحدود است. یعنی تا وقتی در حلقه جریان ماندگاری شارش می‌یابد شار مغناطیسی در آن به انجماد در می‌آید، معمولاً چنین جریانی را جریان ابررسانشی یا ابر جریان می‌نامند.

در نخستین نگاه ممکن است چنین به نظر آید که شار مغناطیسی منجمد شده می‌تواند هر مقدار دلخواهی داشته باشد. پس از آزمایش‌های بسیار [۹و۱۰] معلوم شد که این مقادیر فقط مضرب درستی از Φ_0 هستند که این مقدار را کوانتوم شار مغناطیسی می‌نامند.

۱-۱-۳ نظریه *BCS* ابررسانایی

اولین مورد ابررسانایی در سال ۱۹۱۱ میلادی در جیوه مشاهده شد. ولی از آن سال تا سال ۱۹۵۷ میلادی هیچ توجیه قانع کننده‌ای برای صفر شدن ناگهانی مقاومت ویژه الکتریکی عرضه نشد. اما دراین سال، سه دانشمند به نام‌های جان باردین، لئون کوپر و رابرت شریفر[1] توانستند نظریه‌ای برای ابررسانایی ارائه کنند. این نظریه با استفاده از سه حرف نام‌های آن سه نفر، BCS خوانده شد [۵]. بر اساس این نظریه در پدیده ابررسانایی الکترون‌ها به صورت زوج در رسانش شرکت می‌کنند که هر یک از این زوج الکترون‌ها را جفت کوپر می‌نامند [۴].

مقاومت در مقابل حرکت زوج‌های کوپر بسیار ناچیز است. به عبارت دیگر زوج‌های کوپر در اثر برخورد با ارتعاش‌های اتمی یا ناکاملی‌ها، تکانه زیادی از دست نمی‌دهند. دلیل اینکه چرا حالت ابررسانایی در دماهای کم دیده می‌شود آن است که انرژی بستگی دو الکترون در زوج کوپر بسیار کم است و در دماهای بالاتر، انرژی گرمایی باعث می‌شود که پیوند دو الکترون یک زوج کوپر، از هم گسسته شود.



شکل ۱-۲ گاف انرژی درابررسانا. جفت‌های کوپر در حالت پایه قرار دارند و حالت‌های برانگیخته به اندازه حداقل Δ_0 بالاتر از این حالت‌های پایه قرار می‌گیرند.

1 Bardeen, Cooper, Schrieffer

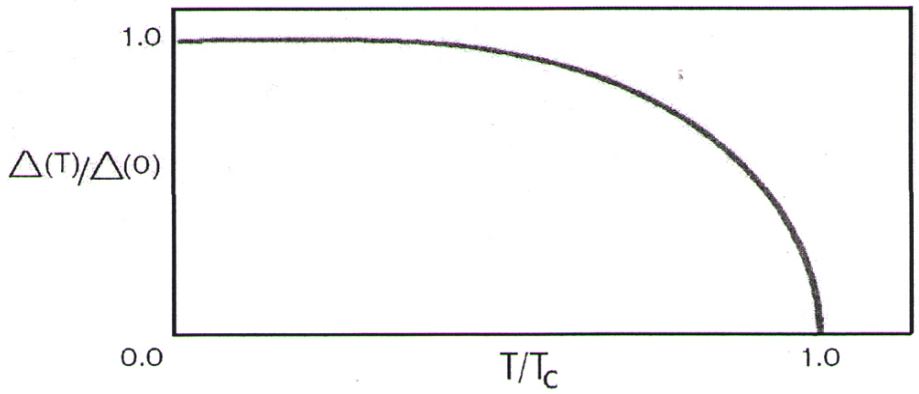
۱-۱-۴ گاف انرژی

گاف انرژی در ابررساناها طبیعت کاملاً متفاوتی از گاف انرژی در عایق‌ها دارد. هرگاه یکی از الکترون‌ها از زوج خارج شود به این معناست که دو الکترون جفت نشده (برانگیخته) ظاهر می‌شود. برای شکستن یک زوج حداقل به $2\Delta_0$ انرژی نیاز داریم که Δ_0 گاف انرژی در دمای صفر کلوین می‌باشد.

همان گونه که در شکل ۱-۲ مشخص است، همه حالت‌های زوج به بستر چگالیده تعلق دارند که تراز انرژی حالت پایه را اشغال می‌کند. یک تک الکترون اضافی مجاز نیست در این تراز باقی بماند و از این رو باید نخستین تراز خالی موجود در طیف برانگیختگی بنیادی را اشغال کند. اگر زوج شکسته شود هر دو الکترون باید به ترازهای برانگیختگی بنیادی بالاتر بروند که به انرژی بیشتر از $2\Delta_0$ نیاز است.

۱-۱-۵ وابستگی دمایی گاف انرژی

با افزایش دما گاف انرژی کاهش می‌یابد (نماد Δ_0 برای $T=0$ در نظر گرفته شده است). چنان که می‌دانیم برای شکستن زوج کوپر و خلق دو برانگیختگی بنیادی به 2Δ انرژی نیاز است. اگر دما چنان باشد که k_BT در حد 2Δ باشد، روشن است که تعداد زیادی جفت کوپر از راه فرآیند گرمایی شکسته می‌شوند. در پی آن، حالت‌های زیادی در فضای تکانه با برانگیختگی‌های بنیادی (تک الکترون‌ها) پر خواهند شد و این بیانگر آن است که این حالت‌ها دیگر نمی‌توانند در گذارهای زوج شرکت کنند و در نتیجه نمی‌توانند سهمی در کاهش خالص انرژی ابررسانا داشته باشند. بنابراین، انرژی ابررسانا باید افزایش یابد. به عبارت دیگر این حالت‌ها نمی‌توانند در تشکیل گاف انرژی شرکت کنند. بنابراین با افزایش تعداد زوج‌های شکسته شده، افزایش در تعداد برانگیختگی‌های بنیادی و کاهش درگاف انرژی به وجود می‌آید. شکل ۱-۳ نمودار وابستگی گاف انرژی در ابررسانا را نسبت به دما نشان می‌دهد. همانطور که از شکل مشخص است وقتی دما را از صفر مطلق افزایش می‌دهیم، مشاهده می‌شود که گاف انرژی تقریباً ثابت می‌ماند. تا اینکه در دمای خاصی شروع به نزول می‌کند و در دمای T_c به مقدار صفر می‌رسد.



شکل ۱-۳ وابستگی دمایی گاف انرژی در ابررسانا. پارامتر T_c دمایی است که در آن مقاومت به طور ناگهانی به صفر می‌رسد و Δ_0 گاف انرژی در دمای طفر مطلق می‌باشد.

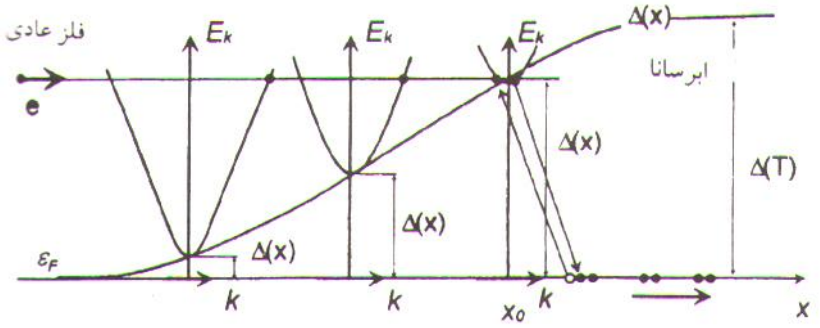
۱-۱-۶ اثر مجاورت

نقش طول همدوسی به طور اخص وقتی آشکار می‌شود که یک فلز عادی N و یک ابررسانای S با یکدیگر در تماس کامل باشند. زوج‌های کوپر می‌توانند از S به N نفوذ کنند و برای مدتی آنجا باقی بمانند. در نتیجه، لایه نازکی نزدیک به فصل مشترک SN به ابررسانا تبدیل می‌شود. به عبارت دیگر، نفوذ زوج‌های کوپر از S به N موجب کاهش چگالی آنها درS می‌شود. این پدیده‌ای است که آن را اثر مجاورت می‌خوانند.

۱-۱-۷ بازتاب آندریف

اکنون فرآیند تبدیل جریان عادی به جریان ابررسانشی را بررسی می‌کنیم. وقتی یک فلز- عادی و یک ابررسانادر تماس با یکدیگر قرار می‌گیرند،به خاطر اثر مجاورت در فصل مشترک آنها، اثرات فیزیکی جالبی رخ می‌دهد. در $T \approx T_c$ پهنای فصل مشترک نسبتاً بزرگ است و می‌توان از تحلیل زیر استفاده کرد. ما به آنچه که برای یک الکترون فلز عادی حین حرکت به سمت ابررسانا و هنگام روبرو شدن با فصل مشترک NS رخ می‌دهد، علاقه مندیم. فرض کنیم انرژی الکترون از گاف انرژی ابررسانا کوچکتر است. این فرآیند در شکل ۱-۴ رسم شده است. در لحظه‌ای که الکترون عادی به ناحیه ابررسانشی نزدیک می‌شود، به نقطه x می‌رسد که به ناحیه ابررسانشی تعلق دارد ولی مقدار گاف $\Delta(x)$ در آن نقطه هنوز کوچک است. در این لحظه، الکترون به یک شبه ذره الکترون – گونه ابررسانا

تبدیل می‌شود و در فضای تکانه، حالت kی مناسبی را برحسب مقدار انرژی E_K خود پر مـی‌کنـد. در لحظه بعدی، ضمن این که شبه ذره به ناحیهٔ ابررسانشی نزدیکتر می‌شود به پهنه‌ای با مقدار بزرگتری از گاف می‌رسد که در آنجا، در فضای تکانه به حالت k دیگری که به k_F نزدیکتر است حرکت می‌کند. این فرآیند موجب افزایش بارشبه ذره می‌شود.



شکل ۱-۴ نمودار طرح واره‌ای از بازتاب آندریف.

بنابراین، با حرکت یک برانگیختگی الکترون- گونه از فلز عادی به سمت فصل مشترک NS، به تدریج بار آن کاهش می‌یابد. بالاخره، چنان که از شکل ۱-۴ پیداست، تکانه شبه ذره برابر k_F می‌شود، سرعت گروه آن صفر و بار آن به صفر کاهش می‌یابد. این فرآیند وقتی رخ می‌دهد که شبه ذره به نقطه x_0 می‌رسد، که در آن جا انرژی‌اش با گاف برابر است. در این نقطه، شبه ذره از فصل مشترک به عقب بازتاب می‌یابد و در فضای تکانه به شاخه سمت چپ انرژی که دارای جمعیت زیادی از حفره‌هاست، حرکت می‌کند. اکنون جهت سرعت گروه آن به سمت چپ است، یعنی راستای آن از ابررسانا به سمت فلز عادی است و بار آن هم منفی می‌شود. ولی انتشار یک بار منفی به سمت چپ با انتشار یک بار مثبت به سمت راست هم ارز است. بنابراین فرآیند بازتاب که هم اکنون تحلیل کردیم به انتقال بار از فلز عادی به ابررسانا، یعنی به یک جریان الکتریکی منجر می‌شود. این فرآیند که به طور نظری نخستین بار از سوی آندریف[1] [۷] پیشنهاد شد، بازتاب آندریف خوانده می‌شود. کاهش بار شبه ذره ضمن نزدیکی آن به ناحیه ابررسانشی، دلیل روشنی است که فرآیند بازتاب آندریف با چگالیده نیز درگیر است. بار شبه ذره ناپدید نمی‌شود بلکه به چگالیده منتقل می‌شود. از نظر فیزیکی، این نشان می‌دهد که وقتی شبه ذره به فصل مشترک می‌رسد برای خود شریکی می‌یابد و با هم

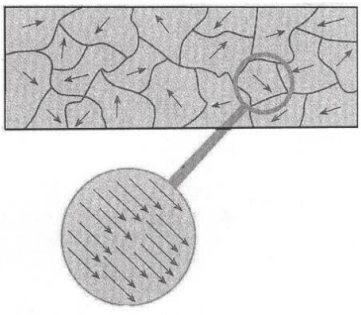
1 Andreev

چگالیده می‌روند و همزمان حفره‌ای تشکیل می‌شود که به عقب یعنی به فلز عادی باز می‌گردد. این فرآیند مسئول انتقال بخشی از جریان است که از طریق برانگیختگی‌های با انرژی کمتر از انرژی گاف از میان فصل مشترک NS شارش می‌یابد. فرآیند تبدیل جریان عادی به جریان ابررسانشی در گستره‌ای از مرتبه ξ رخ می‌دهد.

۱-۲ فرومغناطیس

۱-۲-۱ حوزه‌های مغناطیسی

در برخی از مواد مغناطیسی دوقطبی‌های مغناطیسی کوچک به طور خودبخود با دوقطبی‌های مجاور خود هم خط می‌شوند. این گونه مواد را فرومغناطیس می‌نامند. در عمل همه‌ی بخش‌های مغناطیسی در یک ماده فرومغناطیسی در یک راستا قرار ندارند بلکه این گونه مواد مانند شکل ۱-۵ از بخش‌های کوچکی با ابعاد خیلی کمتر از میلیمتر تشکیل شده‌اند به طوری که دو قطبی‌های مغناطیسی درون هر بخش به طور کامل هم‌خط‌اند، ولی سمت گیری دو قطبی‌های مغناطیسی هربخش با بخش‌های مجاور آن تفاوت دارد. هر بخش را یک حوزه مغناطیسی می‌نامند.

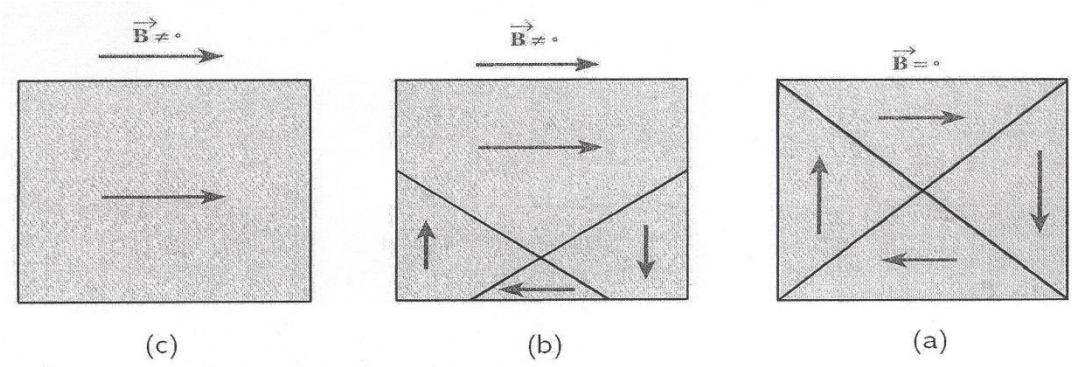


شکل ۱-۵ حوزه‌های فرومغناطیسی

ممکن است سمت گیری و اندازه حوزه‌های مغناطیسی در یک ماده‌ی فرومغناطیس به گونه‌ای باشد که در کل اثر یکدیگر را خنثی کنند و ماده در مجموع آهنربا نباشد. این گونه مواد را می‌توان با قرار دادن در یک میدان مغناطیسی آهنربا کرد. اثر میدان مغناطیسی خارجی باعث می شود که دوقطبی‌های مغناطیسی هر حوزه تحت تاثیر میدان مغناطیسی قرار گیرند و جهت آنها به جهت میدان خارجی متمایل شود. علاوه بر این حوزه هایی که نسبت به میدان در وضع مناسبی قرار دارند

(با میدان همسو هستند) رشد می‌کنند، یعنی حجمشان زیاد می‌شود و درنتیجه حوزه‌هائی که سمت گیری آنها نسبت به میدان مناسب نیست کوچک می‌شوند، به عبارتی مرز بین حوزه‌ها جابجا می شود و ماده در مجموع خاصیت آهنربائی پیدا می‌کند.

حرکت مرز حوزه‌ها در مواد فرومغناطیسی به طور طرح وار در شکل ۱-۶ نشان داده شده است. در قسمت (a) یک ماده فرومغناطیسی با چهار حوزه با میدان خارجی صفر را نشان می‌دهد. در شکل (b) ماده فرومغناطیسی را در یک میدان خارجی B قرار داده‌ایم. مرز حوزه‌ها جابجا شده‌اند و در نتیجه ماده در حالت کل خاصیت مغناطیسی پیدا کرده است در شکل (c) میدان مغناطیسی خارجی آن قدر قوی است که حجم حوزه‌های با سمت گیری نامناسب عملاً به صفر رسیده است و همه حجم ماده را



شکل ۱-۶ حرکت مرز حوزه‌های فرومغناطیسی در اثر اعمال میدان مغناطیسی خارجی

حوزه‌ی با سمت گیری مناسب (همسو با میدان) اشغال کرده است. در این حالت ماده در مجموع بیشترین خاصیت آهنربائی را دارد.