بسم الله الرحمن الرحيم

**دانشگاه اصفهان**

**دانشکده علوم**

**گروه فیزیک**

*پایان نامه ی کارشناسی ارشد رشته ی فیزیک گرایش ماده‌چگال*

# بررسي خواص لايه‌ي فرومغناطيس قرار گرفته بين دو انباره‌ي ابررساناي حالت اسپين– سه‌تايي

**استاد راهنما:**

**دکتر غلامرضا راشدی**

استاد مشاور:

**دکتر بهرام نصر اصفهانی**

پژوهشگر:

**یوسف راه‌نورد**

شهریور ماه **۱۳۸۹**

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 نامه ی کارشناسی ارشد رشته ی فیزیک گرایش ماده‌چگال آقای یوسف راه-نورد تحت عنوان

# بررسي خواص لايه‌ي فرومغناطيس قرار گرفته بين دو انباره‌ي ابررساناي حالت اسپين–سه‌تايي

در تاریخ ۱۳۸۹/۶/۲۹ توسط هیأت داوران زیر بررسی و با درجه به تصویب نهایی رسید.

۱- استاد راهنمای پایان نامه **دکتر غلامرضا راشدی** با مرتبه ی علمی **استادیار** امضا

۲- استاد مشاور پایان نامه دکتر **بهرام نصر اصفهانی** با مرتبه ی علمی **استادیار** امضا

۳- استاد داور داخل گروه دکتر **محمدعلی شاهزمانیان** با مرتبه ی علمی **استاد** امضا

۴- استاد داور خارج از گروه دکتر **علی اکبر بابایی بروجنی** با مرتبه ی علمی **دانشیار** امضا

**امضای مدیر گروه**

**تقدیم به مادر دلسوزم و پدر عزیزم که گر چه در بین ما نیست اما یادش در قلب ما زنده است**

**چکیده:**

در این پایان‌نامه با بدست آوردن توابع گرین به کار گرفته شده در معادله‌ی آیلنبرگر، جریان بار و اسپین و هم‌چنین چگالی حالت‌های دو سامانه‌ی مقیاس نانو ۱- ابررسانای اسپین–سه‌تایی/ فلز عادی/ ابررسانای اسپین–سه‌تایی و ۲- ابررسانای اسپین–سه‌تایی/ لایه‌ی فرومغناطیس/ ابررسانای اسپین–سه‌تایی به دست می‌آیند. بدین‌گونه که معادله‌ی آیلنبرگر برای لایه-های ابررسانا و عادی و فرومغناطیس به صورت جداگانه حل می‌کنیم و در نهایت ضرایب مجهول توابع گرین با استفاده از شرایط پیوستگی توابع گرین و همچنین شرایط مرزی سامانه را به دست می‌آوریم.

ابتدا سامانه ۱ با چرخش‌های مختلف پارامترهای نظم ابررساناهای دو طرف را مورد بررسی قرار می‌دهیم. اثر ضخامت لایه عادی و چرخش بین بردارهای پارامتر نظم ابررساناهای دو طرف بر روی جریان بار و اسپین و چگالی حالت‌ها و همچنین جریان بحرانی سامانه را مورد مطالعه قرار می‌دهیم. همچنین اثر گذار صفر و پای را برای موارد خاصی از سامانه به دست خواهیم آورد. سپس به بررسی خواص سامانه ۲ می‌پردازیم. در این سامانه ما بردار گاف ابررساناهای دو طرف را هم‌جهت در نظر می‌گیریم و اثر ضخامت لایه‌ی فرومغناطیس و بزرگی میدان تبادلی فرومغناطیس و هم‌چنین زاویه‌ی بین بردار میدان تبادلی و بردار گاف ابررسانایی را بر روی خواص ترابرد و چگالی حالت‌های سامانه بررسی می‌کنیم. همچنین شرایط خاص برقراری گذار صفر و پای در این سامانه را مطالعه می‌کنیم.

**کلید واژه‌ها:** ابررسانای اسپین–سه‌تایی، جریان بار و اسپین، پارامتر نظم

**فهرست مطالب**

عنوان صفحه


فصل اول:مقدمه ..... ۱

**فصل دوم: نظریه‌ی میکروسکوپی ابررسانایی** ..... ۸

۲-۱-جفت کوپر ..... ۸

۲-۲- اندازه‌ی جفت کوپر ..... ۱۲

۲-۳- ساختار اسپینی حالت‌های جفت شده ..... ۱۳

۲-۴- انرژی برانگیختگی‌های پایه در ابررسانا ..... ۱۶

۲-۵- گاف در بیناب برانگیختگی‌های پایه و دمای بحرانی ..... ۲۶

**فصل سوم: معادلات آیلنبرگر و توابع گرین** ..... ۳۳

۳-۱-فرمولبندی معادلات آیلنبرگر ..... ۳۳

۳-۲-نتایج تحلیلی و عددی ..... ۳۶

**فصل چهارم: سامانه S-N-S (ابررسانای سه‌تایی-فلز عادی-ابررسانای سه‌تایی)** ..... ۴۱

۴-۱- ابررسانایی موج-p وسامانه S-N-S مربوط به آن ..... ۴۱

۴-۱-۱-گاف ابررسانایی ..... ۴۲

۴-۱-۲- نتایج عددی جریان بار و اسپین: ..... ۴۴

۴-۱-۳- چگالی حالت‌ها: ..... ۴۶

۴-۲- ابررسانایی موج-f وسامانه S-N-S مربوط به آن ..... ۴۸

۴-۲-۱-گاف ابررسانایی ..... ۴۸

۴-۲-۲- نتایج عددی جریان بار و اسپین ..... ۵۰

۴-۲-۳- گذار $0-\pi$: ..... ۵۲

**عنوان** صفحه


۴-۲-۴- چگالی حالت‌ها: ..... ۵۴

۴-۳- نتیجه گیری: ..... ۵۷

**فصل پنجم: سامانه S-F-S (ابررسانای سه‌تایی-فرومغناطیس-ابررسانای سه‌تایی) ..... ۵۸**

۵-۱- اثر مجاورت ابررسانا- فرومغناطیس و نوسانات $\pi-0$: ..... ۵۸

۵-۲- خواص ترابرد سامانه S-F-S: ..... ۶۰

۵-۳- چگالی حالت‌ها: ..... ۶۸

۵-۴-نتیجه‌گیری: ..... ۷۱

**پیوست‌ها ..... ۷۳**

پیوست۱ ..... ۷۳

پیوست ۲ ..... ۷۹

**منابع و مآخذ: ..... ۸۳**


فهرست شکل‌ها

**عنوان** صفحه


شکل ۳-۱- فلز عادی قرار گرفته بین دو ابررسانا. ..... ۳۴

شکل ۴-۱- نمونه‌ای از بلور $Sr_2RuO_4$ ..... ۴۲

شکل ۴-۲- نمودار گاف ابررسانای موج-p ..... ۴۴

شکل ۴-۳- نمودار جریان جوزفسون برای ضخامت‌ها و چرخش‌های مختلف موج-p ..... ۴۵

شکل ۴-۴- جریان اسپینی سامانه S-N-S با ابررسانای موج-p ..... ۴۶

شکل ۴-۵- چگالی حالت‌ها برای ضخامت‌های مختلف سامانه S-N-S با ابررسانای موج-p ..... ۴۷

شکل ۴-۶- چگالی حالت‌ها برای چرخش‌های مختلف سامانه S-N-S با ابررسانای موج-p ..... ۴۸

شکل ۴-۷- نمودار گاف ابررسانای موج- f ..... ۵۰

**عنوان** صفحه

شکل ۴-۸- نمودار جریان جوزفسون برای ضخامت‌ها و چرخش‌های مختلف موج- f ..... ۵۱
شکل ۴-۹- جریان اسپینی سامانه S-N-S با ابررسانای موج-p ..... ۵۲
شکل ۴-۱۰- جریان بحرانی (پارامتر نظم ابررساناها محوری باشد) ..... ۵۳
شکل ۴-۱۱- جریان بحرانی (پارامتر نظم ابررساناها صفحه‌ای باشد) ..... ۵۴
شکل ۴-۱۲- چگالی حالت‌ها برای چرخش‌های مختلف سامانه S-N-S با ابررسانای موج- f ..... ۵۵
شکل ۴-۱۳- چگالی حالت‌ها برای ضخامت‌های مختلف فلز عادی سامانه S-N-S با ابررسانای موج- f ..... ۵۶
شکل ۴-۱۴- چگالی حالت‌ها برای اختلاف فازهای متفاوت سامانه ..... ۵۷
شکل ۵-۱- شکل فلز فرومغناطیس ساندویچ‌شده بین دو ابررسانای سه‌تایی ..... ۶۱
شکل ۵-۲- نمودارهای جریان بار برای ضخامت‌های مختلف لایه‌ی فرومغناطیس ..... ۶۴
شکل ۵-۳- نمودارهای جریان بار برای مقادیر مختلف بزرگی میدان تبادلی فرومغناطیس ..... ۶۵
شکل ۵-۴- نمودارهای جریان اسپینی برای مقادیر مختلف بزرگی میدان تبادلی فرومغناطیس ..... ۶۶
شکل ۵-۵- نمودارهای جریان اسپسنی برای ضخامت‌های مختلف لایه‌ی فرومغناطیس ..... ۶۷
شکل ۵-۶- نمودار جریان بحرانی سامانه S-F-S. ..... ۶۸
شکل ۵ -۷- چگالی حالت‌ها برای اختلاف فازهای متفاوت سامانهS-F-S ..... ۶۹
شکل ۵-۸- چگالی حالت‌ها برای ضخامت‌های مختلف لایه‌ی فرومغناطیس سامانه S-F-S ..... ۷۰
شکل ۵-۹- چگالی حالت‌ها برای زوایای مختلف بین بردارهای پارامتر نظم و بردار میدان تبادلی ..... ۷۱

# فصل اول

## مقدمه

ابررسانا ماده ای است که در دمای کمتر از یک دمای مطلق و مشخص به نامدمای بحرانی جریان الکتریکی را بدون مقاومت هدایت می‌کند و همچنین میدان مغناطیسی را از خود می‌راند. از طرفی در مقیاس ریز، ابررسانا سامانه‌ای شامل الکترون‌های چگالیده شده می‌باشدکه این الکترون‌ها جفت‌های کوپر را تشکیل داده‌ند. در حالی که فلز عادی سامانه‌ایی شامل گازی از الکترون‌های آزاد می‌باشد. برای اولین بار کامرلینگ اونس[1] در سال ۱۹۱۱ میلادی ابررسانایی جیوه در دمای کمتر از $T = 4.2°K$ را به صورت تجربی کشف کرد[۱]. در سال ۱۹۵۷ باردین کوپر و شریفر با استفاده از مفهوم جفت کوپر نظریه‌ی میکروسکوپی ابررسانایی(BCS) را ارائه دادند[۲]. کوپر قبلاً نشان داده بود که حالت پایه‌ی بعضی از فلزات در دمای به اندازه‌ی کافی کم، زمانی پایدار است که الکترونها با هم جفت تشکیل دهند[۳]. نظریه‌ی BCS بیان می‌کند که جفتهای کوپر در دماهای کم اصطلاحاً به یک حالت پایه‌ی

---

[1] Kammerling Onnes

کوانتومی معروف به تابع میکروسکوپی چگالیده می‌شوند و می‌توانند بدون اصطکاک حرکت کنند. همچنین دامنه تابع موج این جفت به عنوان پارامتر نظم در نظریه‌ی گینزبورگ-لاندائو(GL) گذار بین حالت‌های ابررسانایی و عادی را تعریف می‌کند[۴]. در حد $T \to T_c$ پارامتر نظم GL به طور مستقیم با گاف انرژی BCS ، $\Delta$، که مقدار انرژی برای شکستن جفت کوپر است، متناسب است. این گاف انرژی اطلاعاتی در مورد تقارن جفت‌شدگی الکترون‌ها به دست می‌دهد.

از لحاظ حالت‌های اسپینی جفتهای کوپر دو نوع ابررسانا وجود دارد، ابررسانای اسپین‌یکتایی و ابررسانای اسپین‌سه-تایی. تابع موج کلی جفت کوپر باید نسبت به جابجایی دو الکترون پادمتقارن باشد: $\psi_{copper-pair} = \psi(r_1, r_2)\varphi(s_1, s_2)$ که $r$ و $s$ به ترتیب مختصات فضایی و اسپینی هستند. برای حالت اسپین-یکتایی که نامتقارن است، بخش فضایی تابع موج باید تحت جابجایی الکترونها متقارن باشد بنابراین تکانه‌یزاویه‌ای باید زوج باشد (موج-S: $l = 0$ و موج-d: $l = 2$ و موج-g: $l = 4$) ابررساناهای با حالت اسپین یکتایی $l = 0$ به ابررساناهای متعارف معروفند.

تمام انواع دیگر ابررساناها شامل ابررساناهای اسپین‌یکتایی( $l \neq 0$) واسپین سه‌تایی ابررساناهای نامتعارف می‌باشند. یک ابررسانای موج- s در فضای تکانه پارامتر نظم همسانگرد دارد $\Delta(\hat{k}) = \Delta_0$ که $\hat{k}$ بردار یکه‌ی عمود بر سطح فرمی است. ترکیبات ابررسانایی نامتعارف با استفاده از رابطه‌ی $\sum_k \Delta(k) = 0$ ، با جمع روی سطح فرمی تعریف می‌شوند. برای حالت اسپین‌سه‌تایی متقارن، بخش فضایی تابع موج باید پادمتقارن باشد و تکانه مداری باید عدد فرد (موج-p: $l = 1$ و موج-f: $l = 3$ و موج-h: $l = 5$) بگیرد. اینجا، واژه‌های موج-s و موج-p وغیره از واژگان مربوط به اتم هیدروژن امانت گرفته شده است. حالت‌های جفت‌شدگی ابررسانای اسپین‌سه‌تایی در فضای اسپینی با یک بردار $\vec{\mathbf{d}}(\hat{k})$ سه بعدی معروف به بردار گاف نمایش داده شده است.

تحقیقات نظری و آزمایشگاهی زیادی بر روی ابررساناهای اسپین‌سه‌تایی انجام شده است که خلاصه‌ای از مهمترین ویژگی‌های آنها در زیر بیان شده است:

۱- ابررساناهای اسپین‌سه‌تایی به طور کلی ابررساناهای با دمای بحرانی پایین هستند. در مقایسه با ابررسانایی با دمای بحرانی بالا که در ابررساناهای موج-d قرار دارند[۵و۶و۷] .

۲- رابطه‌ی بین دمای بحرانی و گاف انرژی آن‌ها در دمای صفر متفاوت از رابطه‌ی BCS برای ابررسانایی موج-s $\left(\Delta(T=0)>1.76\,k_B T_c\right)$ است[۸و۹].

۳- در ساختارهای شامل ابررسانایی اسپین-سه‌تایی یک جریان اسپینی می‌تواند شارش یابد در حالی که در مورد ابررسانایی اسپین‌یکتایی جریان اسپینی فقط در موردی که ابررسانا در مجاورت فرومغناطیس ناهمگن قرار گیرد ممکن است شارش یابد. این بدین معنی است که در ابررساناهای اسپین-سه‌تایی نه تنها بار بلکه اسپین الکترون‌ها نیز می‌تواند ابرشاره شود.

۴- ابررسانایی فرومغناطیس پدیده‌ی دیگر از حالت اسپین‌سه‌تایی است. هیچ کدام از ابررساناهای متعارف مواد مغناطیسی نیستند. قبلاً فکر می‌شد که ابررسانایی و فرومغناطش فازهای ناسازگاری هستند در حالی که اخیراً ابررسانایی فرومغناطیس در تعدادی ابررسانای اسپین-سه‌تایی مثل $ZrZn_2, UGe_2, URhGe_2$ مشاهده شده است[۱۰و۱۱].

۵-بردار گاف غیریکانی ویژگی دیگری از ابررسانایی اسپین-سه‌تایی است. در حالت‌های اسپین-سه‌تایی غیریکانی ممکن است زوج‌های کوپر یک گشتاور اسپینی ذاتی متوسط متناهی را حمل کنند. که البته ما در اینجا به این نوع ابررساناها نمی‌پردازیم[۱۲-۱۴].

این حالت غیر یکانی یک نامزد خوب برای فاز-B ابررسانایی در ترکیب $UPt_3$ است. این فاز در دماها ومیدان‌های مغناطیسی کوچک مشاهده شده است[۱۵ و ۱۶].

۷- ویژگی دیگر ابررساناهای اسپین- سه‌تایی تشابه ساختارآنها به بعضی از ساختارهای ابررساناهای اسپین-یکتایی دمای بالا است. مثلاً ابررسانای اسپین-سه‌تایی $Sr_2RuO_4$ ساختاری شبیه ابررسانای اسپین-یکتایی دمای بالای $La_x Ba_y CuO_z$ دارد. بنابراین بررسی ابررسانای اسپین-سه‌تایی به فهم اسپین-یکتایی‌ها کمک می‌کند[۵].

اولین پارامتر نظم سه‌تایی کشف‌شده تقارن جفت‌شدگی موج-p است که در ابرشاره‌ی هلیوم۳ مشاهده شده است. همچنین پارامتر نظم موج-p به عنوان یک نامزد برای حالت ابررسانایی $Sr_2RuO_4$ در نظر گرفته شده است[۱۹و۲۰]. یک شکل معروف از تقارن جفت‌شدگی موج-p در فضای تکانه $\vec{\mathbf{d}}(T,k)=\Delta(T)(k_x+ik_y)\hat{z}$ است که $\hat{z}$ بردار یکه است[٦]. $\Delta(T)$ بستگی به دمای $T$ را برای پارامتر نظم را بیان می‌کند.

گروه مهم دیگری از ابررساناهای اسپین-سه‌تایی ابررسانایی موج- f است که برای ترکیب فرمیون سنگین $UPt_3$ در[۲۱و۲۲] وبرای ترکیب $Sr_2RuO_4$ در[۲۳] پیشنهاد شده است. فازهای متفاوتی از ابررسانایی موج- f تقارن‌های پارامتر نظم متفاوتی در فضای تکانه دارند برای مثال تقارن حالت محوری موج- f دارای پارامتر نظمی به شکل $\vec{\mathbf{d}}(T,k)=\Delta_0(T)\hat{\mathbf{z}}k_z(k_x+ik_y)^2$ [۲٤] است در حالی که پارامتر نظم حالت صفحه‌ای آن به شکل $\vec{\mathbf{d}}(T,k)=\Delta_0(T)k_z(\hat{\mathbf{x}}({k_x}^2-i{k_y}^2)+\hat{\mathbf{y}}2k_xk_y$ می‌باشد که $\hat{\mathbf{x}},\hat{\mathbf{y}},\hat{\mathbf{z}}$ بردارهای یکه هستند[۱۵].

ابررساناهای متعارف و نامتعارف معمولاً با چند ویژگی از هم متمایز می‌شوند مثل همسانگردی پارامتر نظم در فضای تکانه، ظرفیت گرمایی، هدایت گرمایی، چگالی حالتها، رفتار اتصالات، وخصوصاً گره‌های فضای تکانه که در فصل دوم به آن‌ها خواهیم پرداخت. گره یک جهت در فضای تکانه است که در آن پارامتر نظم ابررسانایی به سمت صفر میل می‌کند.

**اثر مجاورت:** یکی از جالبترین مفاهیم در زمینه ی ابررسانایی، اتصال ضعیف ابررساناست. آزمایشات اتصال ضعیف به گروه‌هایی تقسیم بندی شده‌اند از جمله S-I-S و S-N-S و S-C-S که در آنها دو انباره‌ی ابررسانا به ترتیب با یک لایه‌ی نازک عایق و با یک فلز عادی یا یک تماس نقطه‌ای از هم جدا شده‌اند. اینجا S وI و N و C به ترتیب ابررسانا و عایق و فلز عادی و اتصال نقطه‌ای می‌باشند.

ضعیف بودن اتصال بدین معنی است که پارامتر نظم ابررساناها در حجم ابررساناهای جدای از هم یکسان است. اولین پیکربندی توسط جوزفسون بررسی شد که در آن یک عایق نازک بین دو ابررسانا قرار گرفت. در مورد دوم یک لایه‌ی عادی بین دولایه‌ی ابررسانا قرار می‌گیرد.

آزمایش سوم قرار دادن یک سطح غیر قابل نفوذ بین ابررسانا و تعبیه‌ی یک سوراخ برای مخلوط شدن فاز ابررساناها در بین آنها بود. اثر جوزفسون S-I-S در سال ۱۹٦۲ توسط جوزفسون مورد بررسی قرار گرفت[۲٦]. او یک جریان الکتریکی شارش کننده‌ی بین دو ابررسانا را پیش‌بینی کرد. در حالی که آنها توسط یک عایق از هم جدا شده بودند. این لایه‌ی عایق بسیار نازک است و الکترون‌ها می توانند از آن عبور کنند. حتی اگر انرژی‌های کمتر از ارتفاع سطح پتانسیل عایق داشته باشند شارش جریان بین ابررساناها در غیاب یک ولتاژ کاربردی به جریان جوزفسون dc معروف است(یک اختلاف فاز به جای ولتاژ کاربردی وجود دارد) و حرکت الکترونها در عرض سد به تونل زنی جوزفسون

معروف است. این پدیده تونل زنی اثر جوزفسون می‌تواند در وسایل الکترونیکی مانند وسایل تداخل‌سنج کوانتومی ابررسانایی(SQUID) برای آشکارسازی شار کوچک بکار گرفته شود. اثر جوزفسون می تواند به وسیله‌ی میدان‌های مغناطیسی خارجی دچار اختلاف فاز خارجی شود. در نتیجه اتصال جوزفسون می‌تواند برای اندازه‌گیری میدان‌های مغناطیسی ضعیف به کار گرفته شود.

جریانی که شارش می‌یابد به شکل $j(\varphi) = j_c \sin\varphi$ توصیف می‌شود که در آن $\varphi$ اختلاف فاز ماکروسکوپی بین دو ابررساناست و $j_c$ چگالی جریان بحرانی است که به هندسه‌ی اتصال بستگی دارد. در اثر جوزفسون فازهای متفاوت $\phi_L$ و $\phi_R$ در ابررساناهای $S_L$ و $S_R$ قرار دارند. دز این سامانه الکترون‌های واقع در دو طرف سطح تماس جابجا می‌شوند. اتصال جوزفسون می‌تواند به عنوان یک تداخلگر بین حالتهای ماکروسکوپی کوانتومی ابررسانا در نظر گرفته شود.

نتیجه‌ی این تداخل ابرجریانی است که در یک ابررسانا به ابررسانای دیگر شارش می‌یابد و به اختلاف فاز $\phi = \phi_L - \phi_R$ بستگی دارد. تابع $j(\varphi)$ به هندسه سامانه بستگی دارد. در ساده‌ترین موردی که توسط جوزفسون مطالعه شد، جریان نسبت به فاز بستگی سینوسی دارد اما موارد زیادی از اتصال جوزفسون وجود دارد که جریان نسبت به فاز بستگی سینوسی ندارد. همان‌طور که در این پایان‌نامه برای اتصال S-N-S هم نشان داده خواهد شد رابطه جریان فاز برای ابررساناهای نا متعارف خیلی متفاوت‌تر از آن رابطه در ابررساناهای متعارف است. به طور مثال در ابررساناهای نامتعارف جریان علاوه بر اختلاف فازبه زاویه‌ی بین بردارهای گاف نیز بستگی دارد.

اگر نتایج مطالعاتی که بر روی اثر جوزفسون انجام شده ر ا خلاصه کنیم خواهیم داشت:

بین دو ابررسانای مجاور با فازهای متفاوت $\varphi_L$ و $\varphi_R$ واختلاف ولتاژ صفر(V)، اثر جوزفسون dc (ac) منجر به جریانی متناسب با اختلاف فاز $\phi = \phi_L - \phi_R$ می‌شود.

۱- معادلات مرسوم برای اثر جوزفسون به این صورت می‌باشد:

$$J = J_c \sin(\phi)$$
$$\phi = \phi_0 + \frac{2e}{\hbar}\int_0^t V\ dt \qquad (۱-۱)$$
$$J = J_c \sin[(\frac{2eV}{\hbar})t + \phi_0] \quad V = \text{ثابـــــت}$$

۲- با جابجا کردن فاز دو ابررسانا، جهت جریان برعکس میشود یعنی:

$$\vec{J}(\varphi) = -\vec{J}(-\varphi)$$

۳- یک ابرجریان dc تنها وقتی اتفاق می‌افتد که یک اختلاف فاز پارامتر نظم وجود داشته باشد یعنی:

$$J(2n\pi) = 0 \quad , \quad n = 0, \pm 1, \pm 2, \ldots \qquad (۲-۱)$$

۴- از معادلات۱-۱ و ۱-۲ خواهیم داشت:

$$J(n\pi) = 0 \quad , \quad n = 0, \pm 1, \pm 2, \ldots \qquad (۳-۱)$$

۵- به طور کلی می توان جریان جوزفسون را به صورت زیر بسط فوریه داد:

$$J(\phi) = \sum_{n \geq 1} \{ I_n \sin(n\phi) + J_n \cos(n\phi) \} \qquad (۴-۱)$$

که در آن $I_n$ , $J_n$ ضرایبی هستند که باید تعیین شوند. اگر تقارن وارونی زمانی نقض نشود $J_n$ صفر می-شود.

البته این مواردی که برای جریان جوزفسون در بالا به طور کلی در نظر گرفته شده است در ابررساناهای اسپین-سه-تایی به این سادگی قابل بررسی نیست و پیچیدگی‌های مخصوص به خود را دارد[۲۶-۳۰].

موضوع اصلی بحث ما در این پایان‌نامه بررسی سامانه های S-N-S (ابررسانای اسپین-سه‌تایی- فلز عادی- ابررسانای اسپین-سه‌تایی) و S-F-S (ابررسانای اسپین-سه‌تایی -فلز فرومغناطیس-ابررسانای اسپین-سه‌تایی) در حد تمیز می-باشد. مبنای برقراری ابرجریان در این سامانه از نظر میکروسکوپی بازتاب آندریو می‌باشد که بدین صورت بیان می-شود که هنگامی که یک الکترون درون فلز عادی به فصل مشترکش با ابررسانای مجاور برخورد می‌کند برای خود شریکی می‌یابد و با هم به حالت چگالیده می‌روند و هم‌زمان حفره‌ای تشکیل می شود 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 $\Delta(T)$ از میان فصل مشترک NS شارش می‌یابد. فرآیند تبدیل جریان عادی به جریان ابررسانشی در مرتبه‌ی $\xi(T)$ (طول همدوسی) رخ می‌دهد. این فصل مشترک‌ها برای ابررساناهای اسپین-یکتایی در مقالات زیادی مورد بررسی قرار گرفته‌اند و نتایج جالبی را در برداشته‌اند[۳۳-۳۱].

در این پایان نامه ابتدا مقدمه‌ای از نظریه‌ی BCS مطرح خواهد شد و نیز چگونگی محاسبه‌ی بردار گاف $\Delta$ در موارد مختلف ابررساناهای با تقارن جفت‌شدگی های متفاوت بررسی خواهد شد.

سپس به معادلات کلی آیلنبرگر و شرایط مرزی آن در اتصال ضعیف پرداخته خواهد شد. و نیز به صورت مفصل این معادلات و شرایط مرزی آن در اتصالات S-N-S و S-F-S مورد بررسی قرار خواهد گرفت و تابع گرین مربوط به این سامانه را به دست خواهیم آورد .

در فصل‌های بعدی پایان‌نامه بردار گاف ابررساناهای اسپین سه‌تایی موج-p و موج-f را در دمای صفر و دمای نزدیک به دمای بحرانی را به صورت تحلیلی ودربقیه‌ی دماها به صورت عددی بدست خواهیم آورد.سپس جریان‌های بار و اسپین در اتصالات S-N-S و S-F-S را مورد بررسی قرار می‌دهیم. همچنین چگالی حالت‌های موضعی در فلز عادی یا فرومغناطیس ساندویچ شده را بررسی خواهیم کرد، و نیز اثر ضخامت لایه‌ی عادی و اختلاف فازهای متفاوت و نیز چرخش‌های مختلف ابررساناها نسبت به هم را بر روی جریان‌ها و چگالی حالت‌ها مورد مطالعه قرار خواهیم داد.

قابل ذکر می‌باشد که در همه‌ی محاسبات انجام شده در این پایان نامه ثابت‌های پلانک و بولتزمن $\hbar$ و $k_B$ را یک در نظر گرفته‌ایم.

# فصل دوم

# نظریه‌ی میکروسکوپی ابررسانایی

## ۲-۱-جفت کوپر

شروع تحقیقات نظری در مایعات فرمی به سال ۱۹۵۷، زمانی که باردین،کوپر و شریفر [۱] نظریه ابررسانایی (معروف به نظریه BCS) را بیان کردند، برمی‌گردد. این نظریه بر مبنای نظریه کوپر در مورد ناپایداری حالت پایه‌ی یک گاز الکترونی با یک جاذبه کوچک اختیاری بین ذراتش ، یعنی جفت‌های کوپر می‌باشد. در یک سامانه ابررسانا جاذبه‌ی بین الکترون‌ها که از دافعه‌ی کولنی مستقیم قویتر است ناشی از برهم‌کنش بین الکترون‌ها و ارتعاشات (فونون‌ها) شبکه بلوری است.

این برهم‌کنش یک بار مثبت اضافی حول یک الکترون تولید می‌کند. برهم‌کنش جاذب معمولاً همسانگرد می‌باشد، به گونه‌ای که جفت‌های کوپر یک حالت با تکانه زاویه‌ای مداری صفر (جفت‌شدگی موج-s)، تشکیل می‌دهند. این

وضعیت در ابرشاره $^3He$ کاملاً متفاوت است یعنی جفت‌شدگی کوپر ناشی از برهم‌کنش بین اسپین‌های هسته‌ای اتم-های $^3He$ و افت‌وخیزهای مغناطش مایع (پارامگنون) می‌باشد. برهم‌کنش ناشی از پارامگنون‌ها اساساً ناهمسانگرد می‌باشد و به تشکیل جفت‌های کوپر با تکانه‌ی زاویه‌ای مداری $l=1$ (جفت‌شدگیموج-p) منجر می‌شود. اگر چه طبیعت جاذبه‌ی بین ذرات ممکن است به گونه‌ی قابل ملاحظه‌ای متفاوت باشد. جفت‌شدگی کوپر یک فرایند معمولی برای تشکیل حالت‌های ابرشارگی در سامانه‌های فرمیونی گوناگون می‌باشد. به تبعیت از کوپر ما یک مسئله‌ی کوانتوم-مکانیکی با دو الکترون در یک فلز عادی در دمای صفر را در نظر می‌گیریم.

فرض کنیم دو الکترون با پتانسیل $V(\mathbf{r}_1-\mathbf{r}_2)$ مستقل از اسپینشان با هم برهم‌کنش می‌کنند، و الکترون‌های دیگر که حالت‌های پایین‌تر از تراز فرمی ر ا پر کرده‌اند فقط در اصل طرد پائولی خود را نشان می‌دهند. برای تعیین سطوح انرژی تابع موج $\psi(r_1,r_2)$ جفت الکترون، ما باید معادله شرودینگر را حل کنیم:

$$-\frac{\hbar^2}{2m}(\nabla_1^2+\nabla_2^2)\psi(\mathbf{r_1},\mathbf{r_2})+V(\mathbf{r}_1-\mathbf{r}_2)\psi(\mathbf{r_1},\mathbf{r_2})=(\Delta+\frac{\hbar^2k_F^2}{m})\psi(\mathbf{r_1},\mathbf{r_2}) \qquad (۱-۲)$$

که $\Delta$ انرژی یک جفت الکترون، نسبت به حالتی است که دو الکترون جفت‌نشده (با انرژی فرمی $\frac{\hbar^2k_F^2}{m}$) داریم.

می‌توانیم از مختصات $r_1$ و $r_2$ به مختصات مرکز جرم $\mathbf{R}=\frac{\mathbf{r}_1+\mathbf{r}_2}{2}$ و مختصات حرکت نسبی $\mathbf{r}=\mathbf{r}_1-\mathbf{r}_2$ برویم. اگر مرکز جرم در سکون فرض شود، به عبارت دیگر، اگر الکترون‌ها تکانه‌های مخالف $\vec{\mathbf{k}}$ و $-\vec{\mathbf{k}}$ داشته باشند، مختصات $\mathbf{R}$ در تابع $\psi$ حذف می‌شود و معادله شرودینگر به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$-\frac{\hbar^2}{m}\frac{\partial^2\psi(\mathbf{r})}{\partial\mathbf{r}^2}+V(\mathbf{r})\psi(\mathbf{r})=(\Delta+\frac{\hbar^2k_F^2}{m})\psi(\mathbf{r}) \qquad (۲-۲)$$

در نمایش تابع موج: