



دانشکده علوم پایه

تهران (واحد پرند)

پایان نامه

برای دریافت مدرک کارشناسی ارشد

رشته فیزیک حالت جامد

گروه فیزیک

لغزش فاز کوانتوم در نانوسیم های ابررسانا

امین مسیحی

استاد راهنما: دکتر محمد علی شاهزمانیان

استاد مشاور: دکتر مرتضی محسنی

آبان 1391



دانشگاه پیام نور
دانشگاه پیام نور استان تهران
انتم گل بویک شرح و ایندو انسر

صور تجلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد

شماره
تاریخ
پیوست

جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد امین مسیحی دانشجوی رشته فیزیک

تحت عنوان :

لغزش فاز کوانتوم در نانوسیم های ابر رسانا

جلسه دفاع با حضور داوران نامبرده ذیل در روز پنج شنبه مورخ ۹۱/۰۸/۰۴ ساعت ۱۲:۰۰ در محل ساختمان تحصیلات تکمیلی برگزار شد و پس از بررسی پایان نامه مذکور با نمره ، به عدد به حروف و با درجه مورد قبول واقع شد. / نگذرد .

ردیف	سمت	نام و نام خانوادگی	مرتبۀ علمی	امضاء
۱	استاد راهنما	دکتر علی شاهزادگان	استاد	
۲	استاد مشاور	مرتضی محسنی	استاد	
۳	استاد داور	دکتر سید علی هاشمی زاده عقدا	استاد	
۴	نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر اشرف السادات شکر باغانی		

پایان نامه نیاز به اصلاحات دارد. / ندارد .

تقدیم به پدر و مادر عزیزم

سپاس گذاری

من به سرچشمه خورشید نه خود بردم راه ذره ای بودم ومهر تومرا بالا برد

اولین سپاس به پیشگاه حضرت دوست که هرچه هست از اوست !

سپاس از فرزانه فهیم: دکتر محمد علی شاهزمانیان

سپاس از عزیز عالیقدر: دکتر مرتضی محسنی

سپاس از دوستان مهربان وماندنی : منیری,میرزایی,کامران,شهیدی, پیروی ,عباس نژاد و...

سپاس از دکتر هاشمی زاده که زحمت داوری این پایان نامه را بر عهده داشتند.

ودر نهایت سپاس ویژه از خانواده خود که اگر حمایتشان نبود راه به جایی نمی بردم.

چکیده:

هر گاه نمونه ابرسانایی که به شکل سیم یا حلقه نازک ساخته شده در حد ابعاد نانو باشد، یعنی پهنای نمونه ابرسانا از طول همدوسی و عمق نفوذ کوچک تر باشد، ابرسانای یک بعدی یا شبه یک بعدی خواهیم داشت. در ابرسانای یک بعدی است که قادر خواهیم بود به مرز پدیده ابرسانایی بسیار نزدیک شویم و چگونگی نظم ابرسانایی را در آن ها بررسی کنیم. یکی از پدیده های بسیار مهمی که در این پژوهش به آن پرداخته ایم بررسی افت و خیزهای ابرسانایی است.

پس از کشف پدیده ابرسانایی به عنوان افت ناگهانی مقاومت به مقدار بی اندازه کوچک غیرقابل اندازه گیری، دریافتند که غالباً گذار فاز ابرسانایی به هیچ وجه ناگهانی نیست و مقاومت اندازه گیری شده نمونه $R(T)$ در نزدیکی دمای بحرانی T_C می تواند پهنای متفاوتی داشته باشد. دلیل فیزیکی در پشت چنین پهن شدگی گذار، افت و خیزهای ابرسانایی است.

حال این سؤال مطرح است که آیا ابرسانایی در دستگاه های (شبه) یک بعدی می تواند باقی بماند یا افت و خیزها موجب توقف همدوسی فاز شده و در نتیجه هر جریانی را آشفته می کند؟

پاسخ به این سؤال هم بهره بنیادی و هم اهمیت کاربردی دارد. از یک سو، تحقیقات بر روی این موضوع به طور قطع به آشکار کردن فیزیک جدید کمک کرده و بر نقش مهم افت و خیزهای ابرسانایی در سامانه های یک بعدی، نور بیشتری می افکند، و از سوی دیگر، پیشرفت سریع در کوچک سازی نانو قطعات، افق های جدیدی را در کاربردهای نانو مدارهای ابرسانایی باز می کند و نیازمند درک بهتری از محدودیت های بنیادی برای پدیده ابرسانایی در ابعاد کاهش یافته است.

ما در این پژوهش به بررسی افت و خیزهای گرمایی و کوانتومی در نانو سیم های ابرسانا پرداخته ایم. در دماهای نزدیک T_C طبق نظریه لانگروامبرگاوکارافت و خیزهای گرمایی باعث ایجاد مقاومت در نانو سیم ها شده و جریان پایا در نانو سیم برقرار میشود. ما بابت این نظریه به سمت انرژی های پایین و دماهای پایین تر از T_C رفتیم و مقاومت کمتری را محاسبه کردیم. در واقع با کاهش دما تعداد افت و خیزهای گرمایی کاهش می یابد و مقاومت قابل ملاحظه ای مشاهده نمی شود.

اما پیشرفت های اخیر در فن آوری لیتوگرافی اجازه ساخت نانو سیم های ابرسانا با قطر بسیار کوچک (تا 10 نانومتر و حتی پایین تر) را می دهند که حتی نزدیک $T = 0$ هم جریان کنترل شده ابرسانایی از خود نشان می دهند. حال اگر افت و خیزهای گرمایی در نزدیک $T = 0$ مقاومت قابل اندازه گیری ایجاد نمی کنند چه عاملی باعث جریان کنترل شده ابرسانایی می شود؟

این احتمال را می توان در نظر گرفت که لغزش های فاز نه تنها به علت افت و خیزهای گرمایی بلکه در نتیجه افت و خیزهای کوانتومی پارامتر نظم ابرسانایی $\psi(r)$ رخ می دهند.

یک نظریه میکروسکوپی از فرآیندهای QPS در نانوسیم های ابررسانا توسط فن کنش مؤثر زمان موهومی توسعه داده شده است. این نظریه تا $T=0$ قابل اجرا بوده و به طور صحیحی برای آثار ناترازمندی، اتلافی و الکترومغناطیسی در طی رویداد QPS در نظر گرفته می شود. در این پژوهش پدیده تونل زنی به صورت لغزش فاز کوانتومی میدان پارامتر نظم بیان می شود. در واقع میدان پارامتر نظم ابررسانایی سد پتانسیل ایجاد شده را به شکل گرد شاره هایی تونل می زند. هر رویداد QPS شامل دو بخش هسته مرکزی و بخش هیدرودینامیکی اطراف آن می باشد. بخش هیدرودینامیکی QPS همانند یک گردشاره سد پتانسیل را تونل میزند. چرخش حول هسته باعث میشود در هر بار چرخش میدان پارامتر نظم حتما از مقدار صفر بگذرد. اما هسته QPS سد پتانسیل را همانند تونل زنی کوانتومی عبور میکند. تابع ψ به محض ورود به سد پتانسیل به شکل نمایی مقدارش صفر میشود. در واقع مغزی QPS به شکل فلز عادی مقاومت از خود نشان میدهد و در این قسمت اتلاف توسط جریان های عادی دارای اهمیت هستند.

کلمات کلیدی: ابررسانایی، نانوسیم ابررسانا، افت وخیزهای گرمایی، افت وخیزهای کوانتومی، لغزش

فاز

فهرست مطالب

عنوان

صفحه

فصل اول: خواص کلی و ویژگی های ابرسانایی

- 1-1 مقدمه..... 1
- 2-1 مقاومت..... 2
- 3-1 دمای بحرانی..... 3
- 4-1 گاف انرژی..... 4
- 5-1 انرژی چگالش..... 5
- 6-1 اثر مایسنر - اکسفنلد..... 5
- 7-1 خواص ترمودینامیکی..... 8
- 8-1 طول همدوسی و انرژی سطحی..... 13
- 9-1 معادلات لندن..... 16
- 10-1 کوانتس شار مغناطیسی با استفاده از تعمیم کوانتومی معادلات لندن..... 22
- 11-1 طبقه بندی ابرساناها..... 24
- 12-1 جمع بندی..... 28

فصل دوم: نظریه گینزبرگ - لاندائو

- 1-2 مقدمه..... 29
- 2-2 نظریه گینزبرگ - لاندائو برای گذار فاز حجمی..... 30
- 3-2 نظریه گینزبرگ - لاندائو برای دستگاه های ناهمگن..... 34
- 4-2 ابرساناهای سطحی..... 36
- 5-2 نظریه گینزبرگ - لاندائو در میدان مغناطیسی..... 38

BCS فصل سوم: نظریه

- 1-3 مقدمه..... 40

- 2-3 برهم کنش الکترون - فونون 41
- 3-3 جفت های کوپر..... 45
- 4-3 تابع موج BCS..... 48
- 5-3 هامیلتونی میدان متوسط..... 49
- 6-3 گاف انرژی BCS و حالت های شبه ذره ای..... 52
- 7-3 پراکندگی اندریف..... 55
- 8-3 جمع بندی..... 57

فصل چهارم: تعمیم نظریه لانگر و امبرگاوکار

1-4

- مقدمه..... 58
- 2-4 ابرسانایی ضعیف..... 59
- 1-2-4 اثر جوزفسون DC..... 60
- 2-2-4 اثر جوزفسون AC..... 62
- 3-4 ابرسانایی در یک بعد..... 65
- 4-4 لغزش فاز..... 66
- 5-4 نظریه لانگر و امبرگاوکار..... 69
- 1-5-4 افت و خیزها و مقاومت..... 69
- 2-5-4 سد انرژی - آزاد..... 76
- 6-4 تعمیم نظریه..... 90

لغزش فاز در نانوسیم های ابرسانا: فصل 5

1-5

98.....	مقدمه
99.....	2-5 افت و خیزهای ابرسانایی
100.....	1-2-5 افت و خیزهای گرمایی
103.....	2-2-5 افت و خیزهای کوانتومی
105.....	3-5 کنش مؤثر
105.....	1-3-5 فرمول بندی کلی
108.....	2-3-5 نظریه اختلال
114.....	4-5 نظریه لغزش های فاز کوانتومی در نانوسیم های ابرسانا
115.....	1-4-5 کنش QPS
120.....	2-4-5 آهنگ QPS
121.....	3-4-5 برهم کنش های QPS و گذارهای فاز کوانتومی

فصل اول

خواص کلی و ویژگی های ابررسانایی

1-1 مقدمه

ابررسانایی در سال 1290 هجری شمسی در آزمایشگاه لیدن کشف شد. اونس¹ به هنگام مطالعه وابستگی دمایی مقاومت ویژه الکتریکی نمونه ای از جیوه مشاهده کرد که در دمای T_c نزدیک به 4K، مقاومت نمونه ناگهان به صفر سقوط می کند [1]. نکته مهم این که با کاهش دما مقاومت در T_c ناگهان به صفر می رسد 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 [2]

هر گونه تلاش برای یافتن کوچک ترین اثری از مقاومت در ابررسانایی کپه ای، راه به جایی نبرد. با توجه به حساسیت وسایل اندازه گیری جدید، می توان گفت که مقاومت ویژه ابررساناها حداقل تا دقت $10^{-24} \Omega$ ، صفر است. در مقایسه می دانیم که مرتبه بزرگی مقاومت ویژه مس با خلوص بالا در 4.2K برابر است با $10^{-9} \Omega$.

1. Onnes

خواص مغناطیسی ابررساناها نیز شگفت انگیزند از جمله اثر مایسنر¹. این اثر را دو فیزیکدان آلمانی به نام های مایسنر و اکسنفلد² در سال 1312 هجری شمسی مشاهده و گزارش دادند. اثر مایسنر شامل بیرون راندن یک میدان مغناطیسی ثابت اما نه چندان قوی از یک نمونه ابررسانا است [3]. یک پیامد آشکار مقاومت صفر وجود جریان های ماندگار است [4]. نظریه باردین، کوپر و شریف³ [23] (که مستلزم جفت شدگی است) که اغلب جفت شدگی کوپر نامیده می شود در سال 1336 هجری شمسی ارائه شد. ان.ان. بوگلیوبوف⁴ نظریه BCS را با زبان ریاضی به دقت بیان کرد و ال. پی. گورکوف⁵ رابطه بین نظریه BCS و مفاهیم پیشین ابررسانایی را نشان داد. [3]

1-2 مقاومت

همان طور که می دانیم در فلزات مقاومت الکتریکی تابعی از سطح مقطع، طول و مقاومت ویژه نمونه فلزی است. که با سطح مقطع نسبت عکس و با طول و مقاومت ویژه رابطه مستقیم دارد. با سرد کردن آلیاژها و فلزات، مقاومت به تدریج کاهش می یابد، زیرا با توجه به اینکه جریان در یک رسانا توسط الکترون های رسانشی حمل می شود، در صورتی که شبکه بلوری نظم عادی خود را از دست دهد مقاومتی در مقابل جریان ایجاد می شود. دو اثر مهم که نظم عادی شبکه بلوری را بر هم می زنند نوسان های گرمایی و نقص بلوری است [5]. با پایین آوردن دما نوسان های گرمایی اتم ها کاهش می یابد و ی رسانش کمتر پراکنده می شود. با کاهش دما در جهت صفر مطلق مقاومت ویژه باید به صفر میل کند ولی چنین نیست زیرا تمام فلزات دارای ناخالصی خواهند بود. بعضی از فلزات وقتی سرد می شوند مقاومت الکتریکی آن ها به روش معمولی کاهش می یابد اما وقتی به چند درجه بالای صفر مطلق می رسند ناگهان مقاومت الکتریکی خود را از دست می دهند، یعنی به حالت ابررسانش می روند [شکل (1-1)].

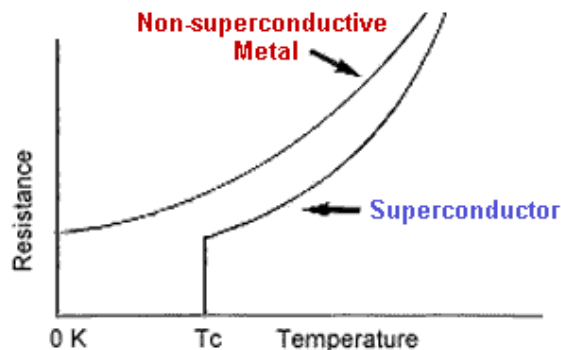
2. Meissner Effect

3. Meissner and Ochsenfeld

4. Bardeen, Cooper, Schrieffer (BCS)

5. N.N.Bogoloyubov

6. L.P.Gorkov

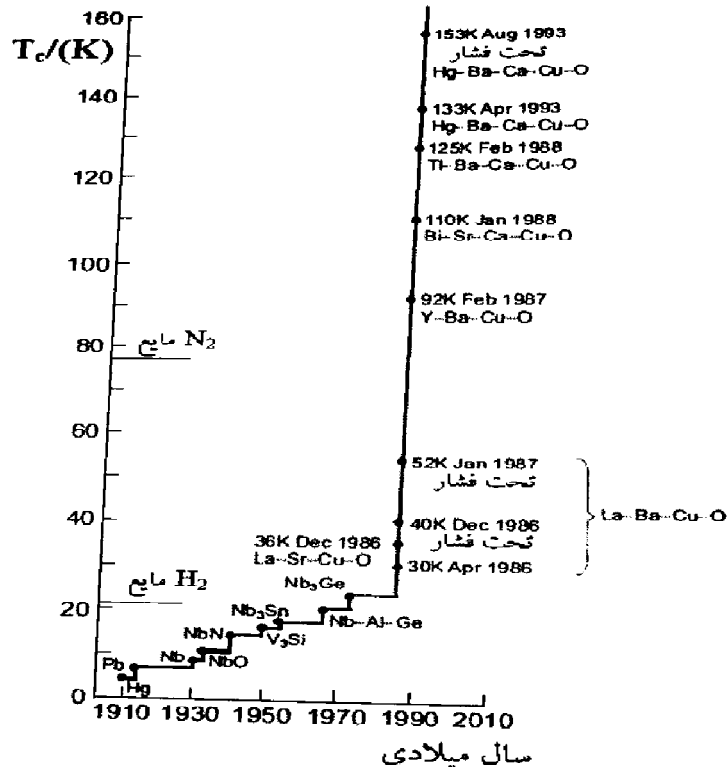


شکل (1-1) مقایسه بین مقاومت الکتریکی ابررسانا و فلز عادی در دماهای پایین (کمتر از 20K). برای فلزی که به حالت ابررسانایی می رود یک افت ناگهانی تیز به مقاومت صفر وجود دارد که در دمای گذار ابررسانایی T_c رخ می دهد. در مقابل برای فلز عادی، همچنان که دما کاهش می یابد، مقاومت الکتریکی سرانجام بکناخت می شود و به عبارت دیگر وابستگی دمایی ندارد.

3-1 دمای بحرانی

دمای بحرانی، دمایی است که در آن یک فلز مقاومت خود را از دست داده و از حالت عادی (فلز) به حالت ابررسانا می رود و آن را با T_c نمایش می دهیم که برای هر فلزی متفاوت است. گرچه ناخالصی های مغناطیسی، دمای گذار را پایین می آورند ولی در مورد کلی دمای گذار T_c به مقادیر کم ناخالصی زیاد حساس نیست. ابررسانایی چند تا از فلزات مانند ایریدم و مولیبدن را که در حالت خالص دارای دمای گذار خیلی پایینی هستند می توان با ورود مقدار خیلی کمی ناخالصی مغناطیسی از بین برد. بنابراین این گونه عناصر وقتی خاصیت ابررسانایی از خود نشان خواهند داد که بسیار خالص باشند و نمونه های موجود از این فلزات با درجه خلوص معمولی، ابررسانا نخواهند بود. نباید تصور شود که تمام فلزات خالص ابررسانا می شوند. برای مثال مس، آهن و سدیم در پایین ترین دماهای ممکن خاصیت ابررسانایی از خود نشان نداده اند. البته تحقیقات در دماهای پایین تر ممکن است ابررساناهای جدیدی را بشناسد اما دلیل اساسی برای این که تمام فلزات حتی در صفر مطلق باید خاصیت ابررسانایی از خود نشان دهد، وجود ندارد [5]. با وجود این باید توجه کرد که ابررسانایی پدیده نادری نیست. معلوم شده که حدوداً نصف عناصر فلزی ابررسانا می شوند و به

علاوه تعداد زیادی از آلیاژها نیز ابررسانا می باشند. نیویوم یک عنصر فلزی است و دارای بالاترین دمای گذار است (9.3K). در سال 1365 هجری شمسی معلوم شده است که اکسیدهای فلزی خاصی (برای مثال $YBa_2Cu_3O_7$) در حدود 92K به ابررسانا تبدیل می شوند یعنی در دمایی بالاتر از دمای ازت مایع، این آلیاژها با دمای گذار نسبتاً بالا در کاربردهای مهندسی ابررسانایی بسیار حائز اهمیت اند.



(شکل 1-2) سیر تکاملی دمای گذار ابررسانشی از زمان کشف ابررسانایی [6].

4-1 گاف انرژی

دستگاهی از گاز الکترون آزاد در دمای صفر مطلق را در نظر می گیریم. بالاترین سطح اشغال شده

توسط سطح فرمی محدود می شود که انرژی فرمی $E_F = \frac{P_F^2}{2m}$ است. یک الکترون در حالت پایه با

انرژی $\frac{P^2}{2m}$ چنانچه برانگیخته شود به حالتی با اندازه حرکت P' که $P' > P_F$ می رود. انرژی لازم

برای به وجود آمدن این جفت الکترون- حفره $E_{pp'} = \frac{p'^2 - p^2}{2m} \geq 0$ است.

در ابررساناها انرژی لازم برای خلق یک جفت الکترون- حفره به صورت زیر است [7]

$$E_{pp'} \geq 2\Delta \quad (1-1)$$

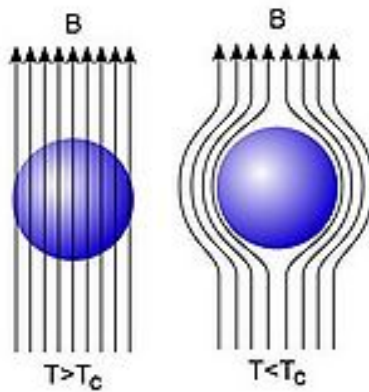
که Δ انرژی گاف است. 2Δ حداقل انرژی لازم برای ایجاد دو برانگیختگی و Δ حداقل انرژی هر برانگیختگی است. وجود این گاف توسط باردین، کوپر و شریفبر برای شکل دهی جفت های چگالی گزارش داده شده بود [4]. بعضی آزمایش ها که به وسیله آن ها می توان Δ را اندازه گیری کرد عبارت اند از گرمای ویژه دمای پایین که متناسب با $\exp\left(-\frac{\Delta}{k_B T}\right)$ است، جذب انرژی الکترومغناطیسی و اثر تونلی.

5-1 انرژی چگالش

اختلاف بین انرژی آزاد یک نمونه در حالت ابررسانا و حالت عادی در دمای صفر مطلق، انرژی چگالش نامیده می شود. این اختلاف از مرتبه $(k_B T_c)^2 / E_F$ است [8]. این انرژی حدود $10^{-6} eV$ است. اگر تمام الکترون های رسانشی در فرآیند چگالش شرکت کنند، اختلاف انرژی برابر $k_B T_c$ می شود بنابراین فقط کسر $k_B T_c / E_F$ از الکترون های رسانشی در این فرآیند شرکت می کنند.

6-1 اثر مایسنر - اکسفنلد

بیست و دو سال پس از کشف ابررسانایی، دانشمندان هنوز بر این باور بودند که ابررسانا تنها یک رسانای ایده آل، یعنی قطعه ای فلز با مقاومت صفر است. امروزه این تعریف که مقاومت صفر است، به عنوان تعریف درستی از ابررسانایی در نظر گرفته نمی شود. اثبات اساسی رخ دادن ابررسانایی در هر ماده ای، نمایش اثر مایسنر - اکسفنلد است. این اثر بدان معنی است که ابررسانا شار مغناطیسی ضعیف را از خود اخراج می کند. ابتدا فرض کنید رسانای ایده آل در حضور میدان مغناطیسی خارجی صفر تا زیر دمای بحرانی سرد شده است و سپس یک میدان مغناطیسی خارجی برقرار می شود. از بررسی های عمومی، به آسانی می توان نشان داد که میدان به درون نمونه نفوذ نمی کند، شکل (1-3-الف) را ببینید. در واقع، بلافاصله پس از نفوذ میدان به لایه سطحی رسانای ایده آل، یک جریان القایی برقرار می شود که بنابر قانون لنز، در راستای مقابل میدان خارجی، میدان مغناطیسی تولید می کند. بنابراین میدان کل در نمونه صفر است.



شکل 3-1 ب

شکل 3-1 الف

اکنون این رفتار را به کمک معادلات ماکسول اثبات می کنیم با تغییر القای \vec{B} ، بنابر رابطه زیر داریم

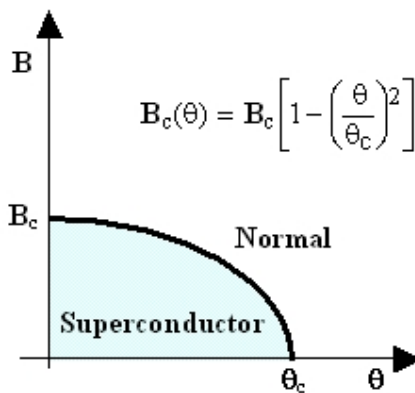
$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, \quad (2-1)$$

بنابراین باید در نمونه میدان الکتریکی \vec{E} القا شود. در رسانای ایده آل $\vec{E} = 0$ زیرا $\vec{E} = \vec{j}\rho$ که در آن ρ مقاومت ویژه (که در این مورد صفر است) و \vec{j} چگالی جریان القایی است. نتیجه می شود که \vec{B} باید ثابت باشد و با توجه به این که پیش از اعمال میدان خارجی $\vec{B} = 0$ بوده است، بنابراین پس از برقراری میدان نیز باید $\vec{B} = 0$ باشد. این پدیده را می توان از راه دیگری هم تفسیر کرد: چون $\rho = 0$ ، زمان برای نفوذ میدان مغناطیسی به درون رسانای ایده آل به طور نامحدودی طولانی است. به این ترتیب، ثابت شد که در هر نقطه از رسانای ایده آل واقع در میدان مغناطیسی خارجی $\vec{B} = 0$ است. اما، می توان با انتخاب راه های متفاوتی به این وضعیت (رسانای ایده آل در $T < T_c$ در میدان مغناطیسی خارجی) رسید، به این ترتیب که نخست نمونه «گرم» را در میدان مغناطیسی خارجی قرار دهیم و سپس آن را تا $T < T_c$ سرد کنیم. در آن صورت، برای رسانای ایده آل، الکتروستاتیک نتیجه کاملاً متفاوتی پیش بینی می کند. در $T > T_c$ مقاومت ویژه نمونه متناهی است و از این رو میدان مغناطیسی به درون آن نفوذ می کند. پس از سرد کردن نمونه به حالت ابررسانا، میدان درون آن ماندگار می شود.

توجه داشته باشید که در استدلال بالا نمونه با ویژگی $\rho = 0$ را همواره به صورت رسانای ایده آل نام می بریم نه ابررسانا، شکل (3-1-ب) را ببینید.

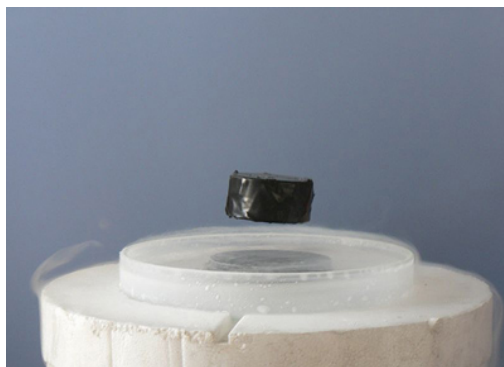
تا پیش از سال 1312 هجری شمسی، دانشمندان بر این باور بودند که یک ابررسانا به راستی چیز بیش از یک رسانای کامل نیست. ولی آزمایش های انجام شده توسط مایسنر و اکسفلد نشان داده که این باور درستی نبود. آن ها پی بردند که در $T < T_c$ میدان درون نمونه ابررسانا در حضور میدان مغناطیسی خارجی، مستقل از روش انتخابی برای سرد کردن ابررسانا به زیر T_c (یعنی چه قبل و چه بعد از سرد کردن نمونه در معرض میدان مغناطیسی ضعیف) همواره صفر است ($\vec{B} = 0$). این دستاورد بسیار با اهمیتی بود. در واقع اگر بی توجه به گذشته نمونه، $\vec{B} = 0$ باشد، القای صفر را می توان به عنوان خاصیت ذاتی حالت ابررسانایی در $H < H_c$ در نظر گرفت. علاوه بر این می توان گذر به حالت ابررسانا را به صورت گذار فاز بررسی کرد و در نتیجه همه توانایی رهیافت ترمودینامیکی را برای آزمون فاز ابررسانایی به کار بست. در نتیجه، حالت ابررسانایی از $\rho = 0$ و $\vec{B} = 0$ پیروی می کند.

علاوه بر گرم کردن نمونه، با قرار دادن آن در میدان مغناطیسی معین نیز می توان ابررسانایی را از بین برد [2]. این را میدان بحرانی ماده کپه ای می خوانند. شدت میدان مغناطیسی بحرانی H_c را به صورت $\vec{H}_c = \vec{B}_c / \mu_0$ تعریف می کنیم [5]. با اندازه گیری H_c مشخص می شود که مقدار آن به دما بستگی دارد، که از یک مقدار $H_c(0)$ در دمای خیلی پایین تا صفر در دمای T_c کاهش پیدا می کند [5]، شکل (4-1) را ببینید.



شکل (4-1) تغییرات میدان مغناطیسی بحرانی نسبت به دما در یک ابررسانا

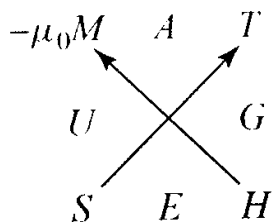
شکل (5-1) یک آهن ربای شناور در بالای ابررسانای دما بالا را نشان می دهد که توسط ازت مایع سرد شده است. جریان الکتریکی مانا که در سطح ابررسانا شارش می کند موجب نگه داشتن میدان مغناطیسی آهن ربا می شود (اثر مایسنر). این جریان به شکل مؤثری تشکیل یک آهنربای الکتریکی می دهد که آهن ربا را دفع می کند [6]



شکل (5-1) شناوری مغناطیسی

7-1 خواص ترمودینامیکی

یک جنبه سودمند ترمودینامیک، آن است که می توان از آن برای به دست آوردن روابط بین کمیت هایی که به وسیله تحلیل انرژی های آزاد قابل اندازه گیری اند، استفاده کرد. حال، این مطلب را در مورد ابررساناها مورد بررسی قرار می دهیم. در شکل (6-1) طرح مفیدی جهت بررسی سریع ارتباط بین روابط پایه، نشان داده شده است که مربع ترمودینامیک نامیده می شود.



شکل (6-1) مربع ترمودینامیک

در این شکل M مغناطش، T دما، A انرژی آزاد هلمهولتز، U انرژی گیبس، S آنترپی، E آنتالپی و H میدان مغناطیسی اعمالی است و هر انرژی آزاد باید وابسته به دو متغیر کناری اش در نظر گرفته شود. جهت پیکان ها، مشتق های ترمودینامیکی را نشان می دهد. اگر در جهت پیکان برویم، علامت مثبت و اگر در خلاف جهت برویم، علامت منفی قرار می دهیم، به طور مثال داریم

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial G}{\partial H}\right)_T &= -\mu_0 M, \\ \left(\frac{\partial G}{\partial H}\right)_H &= -S, \\ \left(\frac{\partial U}{\partial S}\right)_M &= T, \end{aligned} \tag{3-1}$$

هنگامی که از حالت ابرسانایی در میدان مغناطیسی خارجی \vec{H} و مغناطش ایجاد شده صحبت به عمل می آید، می بایست از انرژی گیبس G استفاده شود و آن را وابسته به T و \vec{H} در نظر گرفت و طبق اولین رابطه در (3-1) به صورت زیر نوشته می شود

$$dG = -\mu_0 M dH, \quad (4-1)$$

رابطه (4-1)، هم در حالت عادی و هم در حالت ابرسانایی به کار می رود. اگر از رابطه (4-1) در حالت ابرسانایی و در T ثابت از صفر تا H_c انتگرال بگیریم، داریم

$$\int_0^{H_c} dG_s = -\mu_0 \int_0^{H_c} M_s(T, H) dH, \quad (5-1)$$

$M = M(T, H)$ است ولی هنگامی که در طی انتگرال گیری T ثابت در نظر گرفته می شود، M تنها با H تغییر می کند. حال ابرسانای نوع I را در نظر می گیریم. طبق اثر مایسنر، $M = -H$ ، رابطه (5-1) به صورت زیر در می آید

$$\int_0^{H_c(T)} dG_s = -\mu_0 \int_0^{H_c(T)} (-H) dH = \frac{\mu_0}{2} H_c^2(T), \quad (6-1)$$

در طرف چپ رابطه (6-1) داریم

$$\int_0^{H_c} dG_s = G_s(T, H_c) - G_s(T, 0), \quad (7-1)$$

در نتیجه داریم

$$G_s(T, H_c) - G_s(T, 0) = \frac{\mu_0}{2} H_c^2(T), \quad (8-1)$$

حال می خواهیم اختلاف انرژی بین حالت های عادی و حالت ابرسانایی، که پاسخی به مسئله پایداری حالت ابرسانایی می باشد، را به دست می آوریم. پذیرفتاری مغناطیسی برای فلز عادی $\chi \ll 1$ است. این مطلب نشان دهنده آن است که فلز عادی در میدان H_c و در میدان صفر، تقریباً دارای انرژی گیبس یکسانی است. در نتیجه داریم

$$G_n(T, H_c) = G_n(T, 0), \quad (9-1)$$

این مطلب مشابه با آن است که بگوییم انتگرال زیر

$$\int_0^{H_c} dG_n = -\mu_0 \int_0^{H_c} M_n dH, \quad (10-1)$$

که در حالت عادی بررسی شده است را می توان صفر گرفت.

از این مطلب که هر دو فاز در حالت میانی نوع I، با میدان H_c در حالت عادی و میدان صفر در حالت ابرسانایی، وجود دارند نتیجه زیر گرفته می شود

$$G_n(T, H_c) = G_s(T, H_c), \quad (11-1)$$

با مقایسه (9-1) و (11-1) داریم

$$G_n(T,0) = G_s(T, H_c), \quad (12-1)$$

با جایگذاری این رابطه در رابطه (8-1) داریم

$$G_n(T,0) - G_s(T,0) = \frac{\mu_0}{2} H_c^2(T), \quad (13-1)$$

جنبه جالب توجه این رابطه آن است که اختلاف چگالی انرژی بین انرژی (گیس) حالت عادی و حالت ابررسانایی، بدون حضور میدان، می تواند توسط انرژی مشخصه $\frac{\mu_0}{2} H_c^2$ در شکل ساده رابطه (13-1) بیان شود. طبق این رابطه، H_c^2 در معنی عمیق تر، مقیاسی از انرژی چگالش حالت مایسنر یا پایداری حالت مایسنر نسبت به حالت عادی می باشد. در حالت ابررسانایی، چگالی انرژی به مقدار $\frac{\mu_0}{2} H_c^2(T)$ کمتر از حالت عادی می باشد که این مقدار به صورت $\frac{\mu_0}{2} B_c^2(T)$ نیز نوشته می شود.

در ادامه مباحث، کمیت های ترمودینامیکی دیگر فاز مایسنر را بررسی می کنیم. برای این منظور باید عبارتی برای $H_c(T)$ پیدا کنیم. آزمایش ها نیز با تقریب خوبی نتیجه $H_c(T) = H_c(0) \left(1 - \frac{T}{T_c}\right)^2$ را ارائه داده اند. شکل مسئله به صورت سهمی است که رأس آن در $H_c(0)$ در محور H عمودی است و هنگامی که به محور T نزدیک می شود، به طور تقریبی خطی می شود. رابطه آنتروپی به صورت زیر نوشته می شود

$$S_s = - \left(\frac{\partial G_s}{\partial T} \right)_H, \quad (14-1)$$

با کمک گرفتن از فرمول (13-1) اختلاف آنتروپی حالت های عادی و ابررسانایی به صورت زیر بدست می آید:

$$S_n(T,0) - S_s(T,0) = -\mu_0 H_c \frac{dH_c}{dT}. \quad (15-1)$$

توجه کنید که کمیت $-\mu_0 H_c \frac{dH_c}{dT}$ همواره مثبت است، به این معنی که آنتروپی حالت ابررسانایی همواره کمتر از حالت عادی است. در نتیجه، حالت ابررسانایی نسبت به حالت عادی دارای نظم بیشتری است. منحنی وابستگی $S_s - S_n$ در شکل (7-1) نشان داده شده است [2].