فصل اول

مقدمه‌ای بر ابررسانایی

۱-۱مقدمه

در سال ۱۹۰۸، یعنی سیزده سال پس از کشف گازهلیوم، اونس توانست گاز مذکور را به مایع تبدیل نماید. با توجه به اینکه نقطه جوش هلیوم مایع ۴/۲ کلوین است، اونس قادر بود هدایت الکتریکی فلزات را تا دمای مزبور اندازه گیری نماید و همین امر سبب گردید که وی در این باره آزمایشهایی انجام دهد. در آن زمان، سه نظریه دربارهی مقاومت الکتریکی فلزات و چگونگی تغییر آن نسبت به تغییرات دما وجود داشت، این نظریات عبارت بودند از [۱] :

الف:نظریه ماتیسن[1]

ماتیسن مقاومت الکتریکی یک جسم فلزی در دماهای پایین را ناشی از ناخالصی موجود در آن در نظر میگرفت و چون مقدار ناخالصی در یک جسم مشخص ثابت است، لذا در دماهای پایین مقدار مقاومت ثابت می ماند.

ب:نظریه کلوین[2]

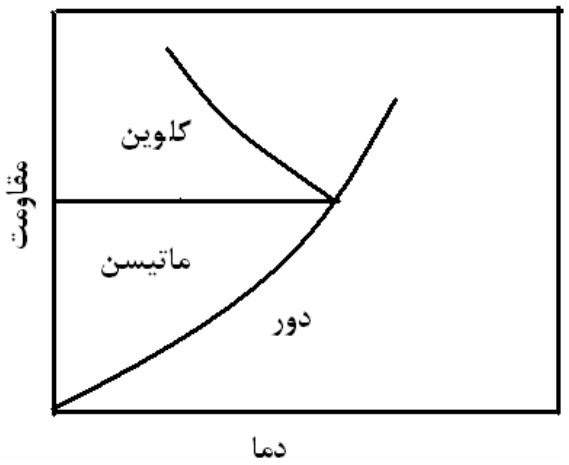
کلوین فرض کرد که در دماهای بالا، در حدود ۳۰۰ کلوین، هدایت الکتریکی در یک جسم فلزی توسط الکترونهایی صورت می گیرد که از اتمهای آن جدا میشوند. با کاهش دما، تعداد الکترونهای مزبور کاهش می یابند و در نتیجه بر مقاومت افزوده میشود. با توجه به این نظریه، چون در دمای صفر کلوین الکترون

[1] Motthissen Theory
[2] Kelvin Theorm

آزاد در جسم وجود ندارد، مقاومت الکتریکی آن به سمت بی نهایت میل می کند و در نتیجه هدایت الکتریکی جسم برابر صفر می‌شود.

ج:نظریه دور[1]

بر پایه این نظریه، مقاومت الکتریکی یک جسم فلزی خالص در اثر برهمکنش الکترونهای آزاد با نوسانات شبکه است. در واقع، فلزات ساختار منظم دارند و اتم های آنها مکانهای معینی را در فضا اشغال می‌کنند. در هر دمای معین،T، هر فلز تعدادی الکترون آزاد و یون دارد که یونها حول وضعیت تعادلشان دارای حرکت نوسانی هستند، حال آنکه الکترونهای آزاد می‌توانند در داخل جسم حرکت کنند و با یونها برخورد نمایند. با کاهش دما، به علت کم شدن دامنه‌ی نوسانی یونها، از احتمال برخورد الکترون با یونها کاسته می‌شود وبه تبع آن مقاومت فلز کاهش می یابد. به‌طوریکه در دمای صفر مطلق، که تقریباً احتمال هیچ گونه برخوردی وجود ندارد، مقاومت جسم به سمت صفر میل می‌کند. تغییر مقاومت یک جسم فلزی با دما، بر اساس سه نظریه‌ی فوق‌الذکردر شکل (۱-۱) نشان داده شده است.



شکل ۱-۱: نمودار تغییرات مقاومت نسبت به تغییرات دما بر اساس نظریه‌های ماتیسن، کلوین و دور[۲].

[1] Dewar Theorm

۱-۲ کشف ابررسانایی

در سال ۱۹۱۱ میلادی در آزمایشگاهی در لیدن[1] هلند، دانشمندی به نام کامرلینگ اونس [2] مشاهده نمود که مقاومت الکتریکی حلقه ای از جیوه در دمای ۴/۲ کلوین به طور ناگهانی تا صفر کاهش می‌یابد (حلقه مذکور در داخل ظرف محتوی هلیوم- مایع قرار داشت) اونس این پدیده را ابررسانایی نامید[۳]. جیوه اولین ماده‌ای بود که این پدیده در آن مشاهده شد. در سالهای بعد فلزات دیگری همچون قلع و سرب که خاصیت ابررسانایی را در دماهای خیلی پایین ازخود نشان می‌دادند نیز پیدا شدند. این فلزات اولین نسل ابررساناها بودند. نسل بعدی آلیاژهای مرکبی مانند: وانادیم- سیلیکون، نیوبیم- قلع، نیوبیم- تیتانیم بودند که از ۱۹۳۰ به بعد توسعه یافتند. گرچه افزایش دمای بحرانی یک هدف اصلی در تحقیقات ابررسانایی بود. اما بالاترین دمای بحرانی مشاهده شده $23/2\ K$ برای نیوبیم- ژرمانیم بود. تا کشف سومین نسل مواد ابررسانا، دما در این مقدار باقی ماند.

در سال ۱۹۸۶ دو پژوهشگر در IBM به نام‌های ژوهان بدنورز[3] و کارل مولر[4] از کشف اکسید ابررسانایی در ۳۰ کلوین خبر دادند[۴]. این اولین ماده از نسل سوم مواد ابررسانا که، سرامیک پروسکایت اکسید- مس نام دارد، می‌باشد. بعدها دمای بحرانی این ماده‌ها به ۳۰ کلوین رسید، ویک سال بعد پل چو[5] پدیده مزبور را درنوع تغییر یافته ای از همان سرامیک اما در دمای ۹۳ کلوین مشاهده نمود[۵]. دمای مزبور بیشتر از دمای نقطه جوش ازت مایع یعنی ۷۷ کلوین است.

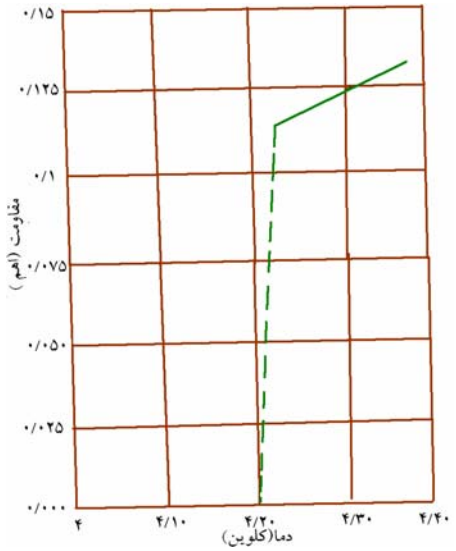
در سال ۲۰۰۱ دانشمندان ژاپنی ابررسانایی را در MgB_2 با دمای بحرانی ۳۹ کلوین کشف کردند. این کشف نقطه عطفی در حوزه پژوهش ابررسانایی ایجاد کرد[۶].

اونس در ادامه‌ی آزمایشهای خود، مشاهده نمود که با افزایش دما می‌توان خاصیت ابررسانایی را از بین برد و جسم را از حالت ابررسانایی به حالت عادی انتقال داد. دمایی که در آن جسم از حالت عادی به حالت ابررسانایی (یا بالعکس) می رسد، دمای بحرانی یا دمای گذار نامیده می‌شود. دمای گذار برای فلزات مختلف متفاوت است.

---

[1] Liden
[2] Kamerling Onnes
[3] Johannes Bednorz
[4] Karl Muller
[5] Paul Chu

به عنوان مثال دمای گذار برای قلع، سرب و جیوه به ترتیب برابر۳/۷، ۴/۲ و ۷ کلوین است. در شکل (۱-۲) تغییر مقاومت الکتریکی جیوه بر حسب دما رسم شده است و دمای گذار کاملاً مشخص می‌باشد.



شکل ۱-۲: تغییر مقاومت جیوه برحسب تغییر دما[۲].

پس از موفقیت‌های اولیه، اونس فلزات بیشتری را مورد مطالعه قرار داد و به نتایج جالبی دست یافت. او مشاهده کرد که مقدار جریانی که از یک سیم ابررسانا عبور می کند یا شدت میدان مغناطیسی‌ایی که می‌توان بر یک ابررسانا اعمال نمود، مقادیر کاملاً دلخواهی نیستند و باید از مقادیر معینی کمتر باشند. به عبارت دیگر، اگر مقدار جریانی که از یک سیم ابررسانا عبور می کند از مقدار معینی به نام جریان بحرانی (I_c) بزرگتر شود، یا اگر مقدار میدان مغناطیسی اعمال شده بر یک ابررسانا از مقدار معینی به نام میدان بحرانی (H_c) بیشتر شود، خاصیت ابررسانایی از بین می‌رود. ابررساناها خواص منحصر بفردی دارند که در سایر مواد مشاهده نمی‌شود در بخشهای بعدی مهمترین خواص ابررسانایی به طور خلاصه بیان می‌شوند.

۱-۳ مقاومت الکتریکی صفر

در دمای گذار مقاومت یک ابررسانا به طور ناگهانی به صفر کاهش می یابد. با توجه به حساسیت دستگاه‌های اندازه‌گیری، به طور تجربی نمی‌توان عملاً دریافت که مقاومت حقیقتاً برابر صفر است، صفر بودن مقاومت را می‌توان به طریق غیرمستقیم نتیجه گرفت. مثلاًاگر جریان i در یک حلقه ابررسانا برقرار گردد، با

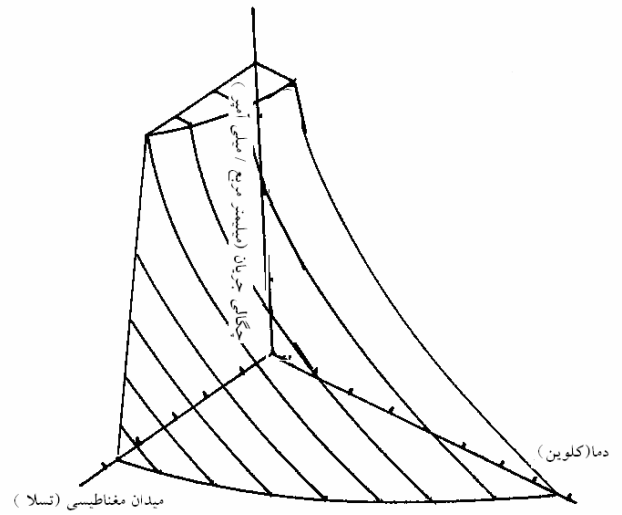
اندازه‌گیری میدان مغناطیسی حاصل از جریان مذکور و عدم تغییر آن نسبت به زمان می‌توان پایدار بودن جریان و عدم اتلاف انرژی و صفر بودن مقاومت را نتیجه گرفت.

وجود میدان مغناطیسی دائمی در اطراف یک حلقه ابررسانای حامل جریان (نظیر جیوه) با قوانین ترمودینامیک در تضاد نمی‌باشد زیرا تا زمانی که از میدان مغناطیسی استفاده نشود، اتلاف انرژی به‌وجود نخواهد آمد ودر نتیجه جریان حلقه و میدان مغناطیسی در اطراف آن ثابت باقی خواهد ماند. همچنین با توجه به تصوری که از گردش دایمی الکترونها در اطراف هسته اتم داریم، در اثر گردش الکترونها در مدارهای فرضی و عبور بار الکتریکی از این مدارها، جریانی ازآنها عبور می کند و یک میدان مغناطیسی پایدار در اطراف آنها بوجود می‌آورد.

۱-۴ مقادیر بحرانی

برای پایداری حالت ابررسانایی، باید چگالی جریان عبوری، میدان مغناطیسی اعمال شده به نمونه، (میدان مغناطیسی ممکن است ناشی از عبور جریان از نمونه و یا ناشی از میدان مغناطیسی خارجی باشد)، و دمای محیطی که نمونه در آن قرار گرفته است، کمتر از مقادیری باشند که به مقادیر بحرانی معروفند.

در شکل۱-۳ فضای سه بعدی (T ,H ,J) سطحی مشخص شده است که به ازاء مقادیر سه گانه مزبور در خارج از این سطح، جسم در حالت عادی خواهد بود . مقادیر بحرانی برای ابررساناهای مختلف متفاوت است. در اکثر کاربردهای عملی، دمای ابررسانا باید کمتراز $\frac{2}{3}T_c$ باشد. در یک چنین دمایی، میدان بحرانی تقریبا برابر½ مقدار آن و چگالی جریان بحرانی برابر ¼ مقدار آن در دمای صفر کلوین است.



شکل ۱-۳: ابررسانایی فقط به‌ازای مقادیر T_c و J_c و H_c درون سطح پایدار است[۲].

۱-۵ خاصیت دیا مغناطیسی

اگر یک جسم ابررسانا تحت تاثیر میدان مغناطیسی خارجی قرار گیرد، خطوط میدان مغناطیسی به داخل جسم نفوذ نمی‌کند وبه طرف خارج دفع می‌شوند. مطالعه این پدیده در بررسی ابررساناها بسیار مهم است.

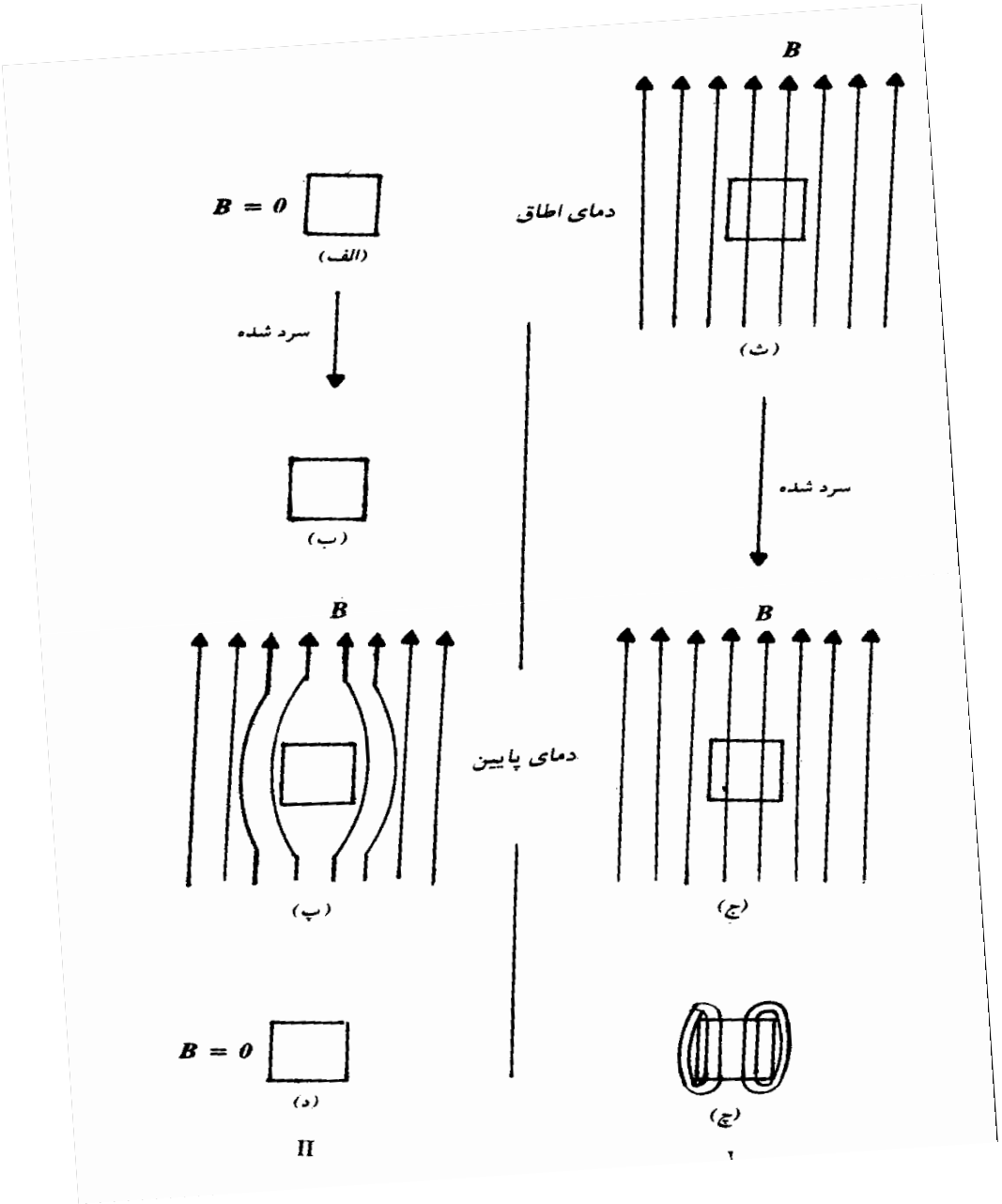
چنانچه یک جسم فلزی در حضور میدان مغناطیسی و یا در غیاب آن، مقاومت خود را از دست داده و تبدیل به یک رسانای کامل شود، مقدار شار مغناطیسی که ازآن عبورمی‌کند به ترتیب مخالف یا برابر صفر خواهد بود. در شکل ۱-۴ رفتار مغناطیسی یک رسانای کامل در دو حالت فوق نشان داده شده است.

مایسنر واوکسن فلد در سال ۱۹۳۳ نشان دادند که چه در حضور میدان مغناطیسی وچه در غیاب آن اگر دمای فلز به کمتر از دمای گذار کاهش یابد، جسم تبدیل به ابررسانا می‌شود و خطوط میدان مغناطیسی بداخل آن نفوذ نخواهند کرد لذا جسم نظیر یک دیامغناطیس کامل رفتار خواهد کرد. رفتار مزبور در شکل۱-۵ نشان داده شده است.

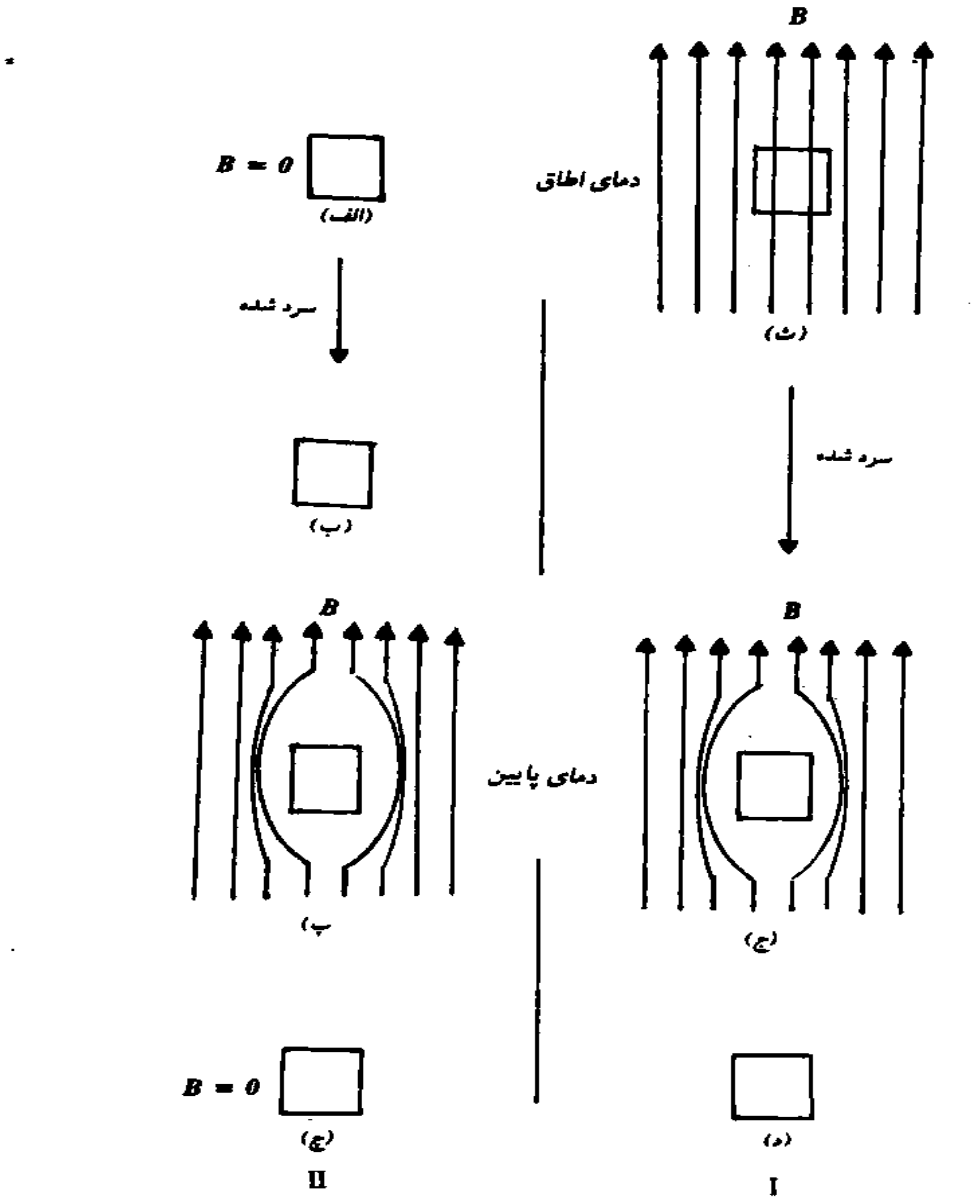
تا حدود ۲۰ سال بعد از کشف ابررسانایی توسط اونس و تا قبل ازپدیده طرد شار مغناطیسی توسط ابررساناها صفر بودن مقاومت در دماهای کمتر از T_c مشخصه یک ابررسانا بشمار می‌رفت. اما کشف مزبور نشان داد که یک ابررسانا فقط یک ماده رسانای کامل نیست بلکه علاوه بر آن دارای این خاصیت است که هرگز اجازه نمی‌دهد که شار مغناطیسی به درون آن نفوذ کند، به این پدیده مایسنر گفته می‌شود. پدیده مایسنر وقتی اتفاق می‌افتد که میدان

مغناطیسی خارجی ضعیف باشد. اگر شدت میدان مزبور از مقدار بحرانی H_c بیشتر باشد، خطوط میدان بداخل جسم نفوذ کرده و جسم از حالت ابررسانایی خارج می‌شود. پدیده مایسنر نشان داد که به هر حال چه در حضور میدان وچه در غیاب میدان، وقتی جسم به حالت ابررسانایی می‌رسد، خطوط میدان مغناطیسی بداخل جسم نفوذ نخواهد کرد. حال آنکه در مورد یک رسانای کامل، نفوذ خطوط میدان مغناطیسی به نحوه گذار جسم از حالت عادی به حالت رسانش کامل بستگی دارد.

تبدیل فاز از حالت عادی به حالت ابررسانایی "گذار فاز" از نوع دوم است. مشخصه این نوع گذار، عدم وجود گرمای نهان (مقدار گرمایی که در یک دمای ثابت به یک جسم داده می‌شود تا از یک فاز به فاز دیگر انتقال یابد.) و تغییر ناگهانی گرمای ویژه در یک دمای معین است[۷]. اما در حضور میدان مغناطیسی، گذار از فاز عادی به فاز ابررسانایی، "گذار فاز" از نوع اول است. در این حالت جسم در دماهایی کمتر از T_c به حالت ابررسانایی می‌رسد. در این دماها آنتروپی در فاز عادی بیشتر از فاز ابررسانایی است و اگر گذار فاز در یک دمای ثابت صورت بگیرد، باید مقداری گرما از جسم گرفته شود(گرمای نهان).

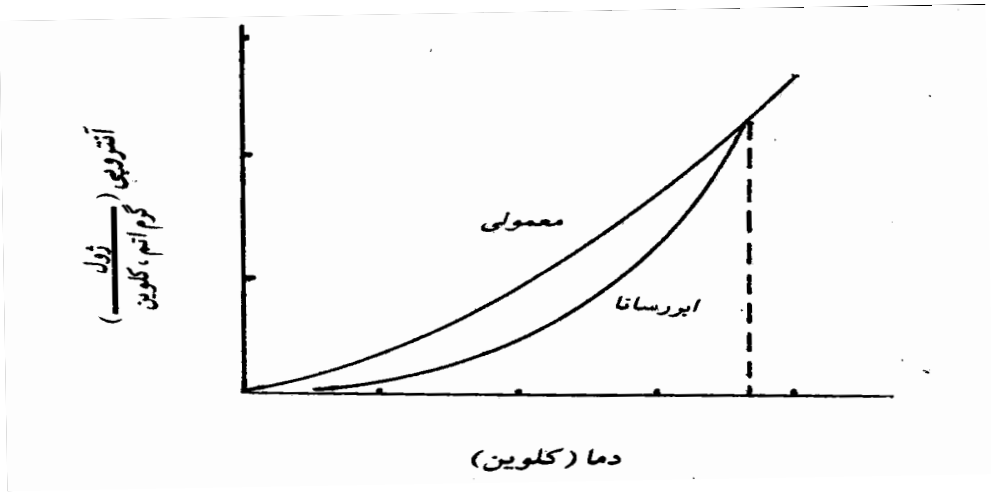


شکل ۱-۴: رفتار قابل پیش بینی برای یک جسم فلزی که مقاومت خودرا (I) در حضور میدان مغناطیسی، (II) درغیاب میدان مغناطیسی، ازدست داده و تبدیل به یک رسانای کامل شده است، در (د) و (چ) میدان مغناطیسی خارجی حذف شده است[۲].



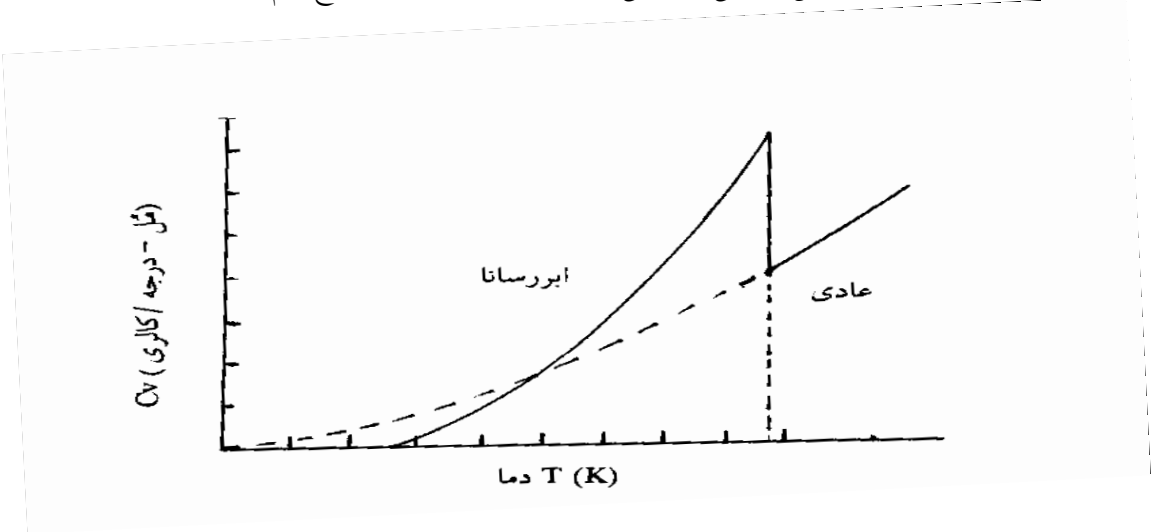
شکل۱-۵: **رفتار یک جسم فلزی در گذار از حالت عادی به حالت ابررسانایی، (I)درحضور میدان مغناطیسی (II)درغیاب میدان مغناطیسی. در(د) و(چ) میدان مغناطیسی خارجی حذف شده است[۲].**

در شکل۱-۶ تغییر آنتروپی یک جسم در حالت عادی ودر حالت ابررسانایی نسبت به دما رسم شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، در دمای گذار، آنتروپی برای حالت عادی و ابررسانایی یکسان است و در نتیجه در گذار فاز از حالت عادی به حالت ابررسانایی گرمای نهان وجود ندارد (dQ=Tds).



شکل۱-۶: تغییرات آنتروپی یک جسم درحالت ابررسانایی وحالت عادی نسبت به تغییرات دما. در دمای $T < T_c$ آنتروپی در حالت ابررسانایی کمتر از حالت عادی است[۲].

در شکل ۱-۷ گرمای ویژه به صورت تابعی از دما نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود گرمای ویژه در دمای گذار یک جهش ناگهانی نشان می‌دهد که مشخصه "گذار فاز"نوع دوم است.



شکل ۱-۷: گرمای ویژه ی قلع در حالت‌های عادی و ابررسانایی[۲].

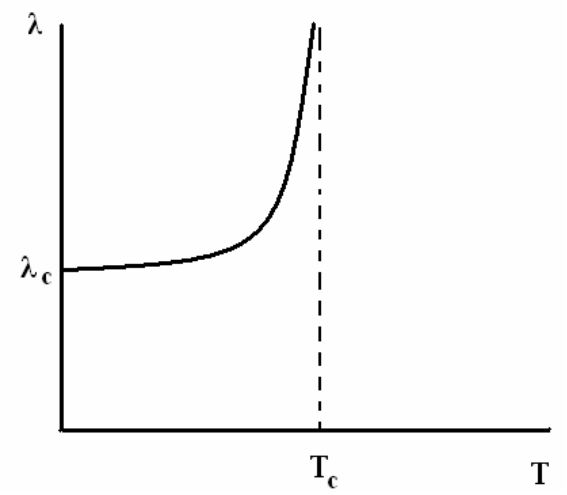
۱-۶ کوانتیدگی شار مغناطیسی

اگر حلقه‌ای از یک جسم ابررسانا در دمای بیشتر از T_c را درنظر بگیرد که یک میدان مغناطیسی یکنواخت عمود بر سطح حلقه بر آن اعمال شود. در حضور میدان مغناطیسی دمای حلقه تا دماهای کمتر از T_c

کاهش داده می‌شود و سپس میدان مغناطیسی حذف می‌گردد لذا در حلقه یک جریان ا لقایی پایدار بوجود می‌آید و در نتیجه یک شار مغناطیسی از سطح حلقه عبور خواهد کرد. در سال ۱۹۵۰ فریتس لندن بر مبنای مفاهیم کوانتومی نشان داد که شار مذکور کوانتیده است[۸] که در سال ۱۹۶۱ به وسیله آزمایش به اثبات رسید اما نشان داده شد که کوانتای شار مغناطیسی نصف مقداری است که از نظریه لندن نتیجه می‌شود[۱۰، ۹].

۱-۷ عمق نفوذ میدان مغناطیسی

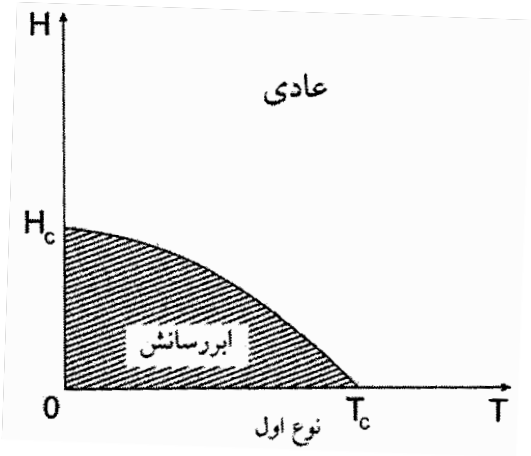
با توجه به اینکه در میدان‌های مغناطیسی، خطوط میدان مغناطیسی از داخل حجم ابررسانا طرد می‌شود اما میدان مزبور تا عمق بسیار کمی بداخل آن نفوذ می‌کند اما جریان‌های پوششی باعث ایجاد میدان مغناطیسی، مخالف با میدان خارجی می‌شود و باعث می‌گردد که ابررسانا خاصیت دیامغناطیسی پیدا کند. عمق نفوذ میدان مغناطیسی(λ) عبارت است از فاصله‌ای که در آن فاصله میدان به 1/e مقدار اولیه‌اش در سطح جسم کاهش می‌یابد. در واقع عمق نفوذ میدان مغناطیسی تابعی از دما بوده و با افزایش دما مقدار آن افزایش می‌یابد. در دمای $T=T_c$ عمق نفوذ برابر بینهایت است و ابررسانا تبدیل به یک جسم عادی می‌شود و میدان مغناطیسی کاملاً بداخل آن نفوذ می‌کند. در شکل۱-۸ تغییرات λ برحسب دما رسم شده است.



شکل ۱-۸: تغییرات عمق نفوذ میدان مغناطیسی نسبت به دما [۲].

۱-۸ ابررسانای نوع I

همه نمونه‌های خالص عناصر ابررسانا، بجز Nb رفتار ابررسانای نوع I را از خود نشان می‌دهند. در این نوع ابررسانا، خاصیت ابررسانایی با میدان مغناطیسی اعمال شده نه چندان بزرگ B_c، که به میدان بحرانی معروف است از بین می‌رود. لذا شار مغناطیسی تحت اعمال یک میدان مغناطیسی کمتر از میدان بحرانی B_c از درون ابررسانا به طور کامل طرد می‌شود[۱۱]. در شکل ۱-۹ میدان مغناطیسی H بر حسب دما برای جیوه نشان داده شده است[۱۲]. همان طور که در شکل نشان داده شده است در میدانهای بزرگتر از B_c، میدان مغناطیسی به طور یکنواخت به درون ماده نفوذ می‌کند. با افزایش میدان مغناطیسی تا مقدار B_c افزایش انرژی مغناطیسی برابر با اختلاف انرژی بین حالت‌های عادی و ابررسانندگی است لذا ماده از حالت ابررسانایی به حالت عادی گذار می‌کند[۱۲].

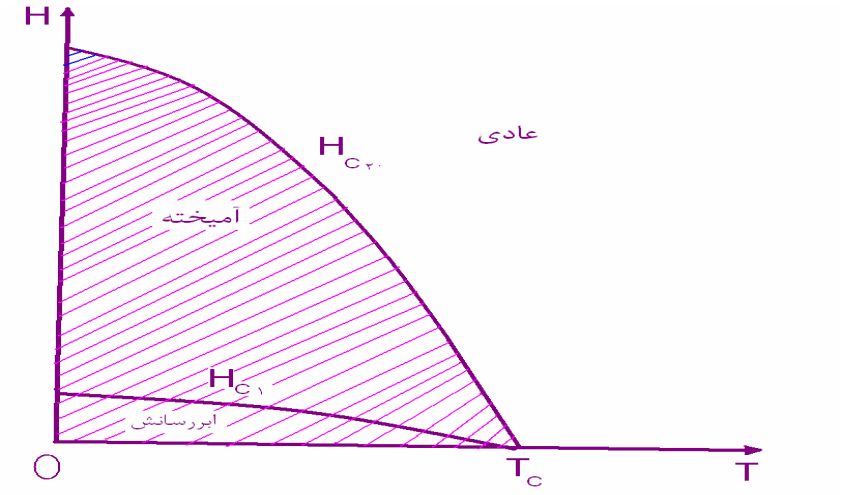


شکل ۱-۹: نمودار فاز ابررسانای نوع I [۱۲].

۱-۹ ابررسانای نوع II

در این نوع ابررساناها دو میدان بحرانی وجود دارد. میدان بحرانی پایینی H_{c1} و میدان بحرانی بالایی H_{c2}. شار مغناطیسی در میدانهای اعمال شده $H<H_{c1}$ کاملاً از درون ابررسانا طرد می‌شود ودر میدان‌های $H>H_{c1}$ به صورت مجزا، یعنی رشته‌های میکروسکوپی ایزوله‌ای که گردشاره نامیده می‌شوند، به درون ماده نفوذ می‌کند [۱۱]. آلیاژها وفلزات واسطه که مقاومت ویژه الکتریکی آنها در حالت عادی زیاد است، یعنی مسیر آزاد میانگین

الکترونی آنها در حالت عادی کوتاه است، از جمله این موادند[۱۳]. در شکل ۱-۱۰ نمودار H بر حسب T برای ابررسانای نوع II رسم شده است.



شکل ۱-۱۰: نمودار فاز ابررسانای نوع II [۱۲].

در حالی که ابررسانای نوع I می‌تواند در دو حالت ابررسانایی و عادی باشد، ابررسانای نوع II می‌تواند در یکی از سه حالت ابررسانایی، مرکب یا عادی وجود داشته باشد[۱۴].

۱-۱۰ نظریه های ابررسانایی

بررسی خواص الکتریکی مواد جامد بخش مهمی ازفیزیک حالت جامد را تشکیل می‌دهد. با توجه به مقاومتی که اجسام مختلف در مقابل عبور جریان الکتریکی که ناشی از حرکت حامل‌های بار، الکترون و حفره ایجاد می‌شود از خود نشان می‌دهند، می‌توان آنها را به گروه عایقها، نیمرساناها، رساناها و ابررساناها تقسیم کرد. سه گروه عایقها، نیمرساناها، رساناها در زندگی بشر نقش بسیار مهمی داشته‌اند. اگرچه ابررسانایی از سال ۱۹۱۱ برای بشر شناخته شد اما بدلیل پایین بودن دمای گذار، شکنندگی و پیچیدگی شرایط استفاده ازابررساناها، کاربردهای محدودی داشته‌اند هرچند پس از کشف ابررساناهای دمای بالا در سال ۱۹۸۷، این اجسام جایگاه خود را بتدریج در تکنولوژی جدید پیدا کرده‌اند.

اجسام رسانا دارای تعداد زیادی الکترون آزاد هستند که اصطلاحاً دریای فرمی را تشکیل می‌دهند و می‌توانند آزادانه در تمام جسم حرکت کنند و وقتی میدان الکتریکی بر جسم اعمال می‌شود، باعث هدایت جریان الکتریکی شوند. از طرف دیگردر عایقها، الکترونها شدیداً وابسته به هسته بوده و برای جدا کردن آنها مقدار زیادی انرژی لازم است که این انرژی معمولاًدر حدود چندین هزار درجه کلوین است. در دمای اتاق نیمرساناها دارای تعداد کمی الکترون آزاد و حفره هستند که این الکترونها و حفره‌ها می‌توانند درعمل هدایت الکتریکی شرکت نمایند.

پس از کشف الکترون در سال ۱۸۹۷ اولین نظریه‌ی علمی در مورد هدایت الکتریکی فلزات توسط درود در سال ۱۹۰۰ تدوین گردید. بر اساس این نظریه مقاومت الکتریکی فلزات ایده‌آل در مقابل عبور جریان الکتریکی برابر صفر است. وجود هر گونه نقص در ساختار تناوبی جسم ایجاد مقاومت می‌کند. در یک بلور فاقد نقص، حرکت ارتعاشی اتمها حول وضعیت تعادلشان در شبکه بلوری ایجاد نوعی بی‌نظمی در شبکه می‌نماید و در نتیجه مقاومتی در برابرعبور جریان ایجاد خواهد شد. در واقع الکترونها در حال حرکت با اتمهای در حال ارتعاش برخورد نموده، پراکنده می‌شوند. دامنه‌ی حرکت ارتعاشی تابع دما می‌باشد و با افزایش دما افزایش می‌یابد. کوانتوم ارتعاشات شبکه فونون نامیده می‌شود. فونونها نقش بسیار مهمی در هدایت الکتریکی اجسام دارند. با استفاده ازمفاهیم مکانیک کوانتومی می‌توان نشان داد که برهمکنش بین الکترون و فونون منجر به ایجاد مقاومت می‌شود. باکاهش دما، تعداد فونونها ودر نتیجه امکان برخورد الکترونهای آزاد با آنها کاهش می‌یابد به‌طوری که در دمای صفر مطلق صرفنظر از انرژی نقطه صفر، مقاومت الکتریکی یک فلز ایده‌آل به صفر تنزل می‌یابد.

اونس برای توجیه علمی پدیده‌ای که خود کشف کرده بود تلاش بسیاری انجام داد، ولیکن توجیه علمی پدیده‌ی ابررسانایی نیاز به اطلاعات بیشتری داشت که در آن زمان در دسترس نبود. در سال ۱۹۳۲ مایسنر و اوکسن فلد نشان دادند که در حالت ابررسانایی میدان مغناطیسی نمی‌تواند بداخل ابررسانا نفوذ کند[۱۵]. به عبارت دیگر یک ابررسانا نظیر یک جسم دیامغناطیس کامل عمل کرده و خطوط میدان مغناطیسی را دفع می‌کند. این کشف، نشانه‌ی دیگری در اثبات این نکته است که در هنگام گذار از حالت عادی به حالت ابررسانایی، جسم

یک گذار فاز انجام می‌دهد. در سال ۱۹۳۴ اولین مدل برای توجیه علمی پدیده‌ی ابررسانایی توسط گورتر[1] و کاسیمر[2] پیشنهاد گردید[۱۶]. در این نظریه که به مدل دو سیالی شهرت یافته است، الکترونها به دو گروه؛ الف)الکترون‌های عادی و ب)ابرالکترونها، تقسیم می‌شوند. ابر الکترونها عامل اصلی ابررسانایی بشمار می‌روند و در دماهای کمتر از دمای گذار، عمل هدایت الکتریکی را به‌عهده دارند. در همان سال با معرفی دو معادله توسط برادران لندن، گامی دیگر در جهت توجیه پدیده ابررسانایی برداشته شد[۱۷]. درفاصله‌ی سالهای ۱۹۳۰ تا ۱۹۳۶ پیشرفتهای دیگری در جهت شناخت هر چه بیشتر پدیده ابررسانایی صورت گرفت. در سال ۱۹۳۵ مندلسن و همکارانش پدیده ناکامل مایسنر را در آلیاژهایی که به ابررسانا تبدیل می‌شوند، مشاهده نمودند[۱۸]. در این نوع ابررساناها با افزایش دما میدان مغناطیسی به داخل بخش‌هایی از جسم نفوذ کرده و سبب می‌شود که این بخش‌ها به حالت عادی برگردند و حال آنکه بخشهای دیگر جسم در حالت ابررسانایی باقی می‌مانند. در سال ۱۹۵۰ فریتز لندن پیش‌بینی کرد که شار مغناطیسی عبوری از یک حلقه‌ی ابررسانا نظیر بار الکتریکی ، اسپین و ... کوانتیده است[۸]. در ادامه‌ی کوشش برای شناخت ماهیت ابررسانایی، در همان سال توسط گینزبرگ و لاندائو نظریه‌ای مدون گردید که بعدها به نظریه‌ی گینزبرگ-لاندائو معروف گردید[۱۹]. اولین نظریه مبتنی بر خواص میکروسکوپی ابررسانا در سال ۱۹۷۵، یعنی ۴۷ سال بعد از کشف اولیه‌ی اونس، بوسیله‌ی باردین، کوپر و شریفر عنوان گردید که به نظریه BCS شهرت یافت[۲۰].

۱-۱۰-۱ مدل دو – سیّالی

بر اساس این مدل، الکترونهای یک ابررسانا در دماهای کمتر از T_c، یک سیال عادی و یک ابر سیال[3] بوجود می‌آورند که همچون دو سیال غیرقابل نفوذ تمام حجم جسم را پر کرده‌اند. الکترونهای ابر سیال را، ابر الکترون می‌گویند. بر خلاف الکترونهای عادی، ابر الکترونها در هیچ گونه فرایند پراکندگی نظیر پراکندگی الکترون با فونون ویا ناراستی شرکت نمی‌کنند. آنتروپی ابرالکترونها برابر صفر و طول همدوسی آنها حدود 10^4 آنگستروم

[1] C.Gorter
[2] H.B.Casimir
[3] Super Fluid

است که مقدار قابل ملاحظه‌ای می‌باشد. در هر دمای معین، خواص یک ابررسانا بستگی به تعداد الکترونهای این دو گروه دارد.

با استفاده از مدل دو- سیالی می‌توان مقاومت الکتریکی صفر، گاف انرژی و تغییرات آن نسبت به دما و مقاومت الکتریکی ابررسانا در جریانهای متناوب را نتیجه گرفت. با توجه به اینکه در دماهای کمتر از T_c هر دو نوع الکترون عادی و ابر الکترون در ابررسانا وجود دارد. جریان مستقیم طبیعتاً در مسیری جریان می‌یابد که مقاومت الکتریکی کمتری (مقاومت صفر) دارد. به‌عبارت دیگر جریان بدون مقابله با هیچ گونه مقاومتی توسط ابرالکترونها انتقال می‌یابد. در جریانهای متناوب با توجه به اینرسی حرکتی الکترونهای عادی و ابر الکترونها، الکترونها در مقابل تغییر حرکت در هنگام تعویض جهت میدان مقاومت کرده و طبیعتاً مقداری از انرژی حرارتی تلف خواهد شد. با افزایش فرکانس، مقدار اتلاف انرژی نیز افزایش می‌یابد. در مدل دو- سیالی گذار از حالت ابررسانایی به حالت عادی یک "گذار فاز" از مرتبه‌ی دوم محسوب می‌شود چون گرمای نهان فرایند گذار برابر صفر است.

۱-۱۰-۲ نظریه لندن

مشابه نظریه‌ی دو- سیالی در سال ۱۹۳۵ نظریه‌ای توسط برادران لندن برای توجیه پدیده ابررسانایی تدوین گردید[۱۷]. با استفاده از این نظریه می‌توان صفر بودن مقاومت الکتریکی dc و پدیده مایسنر را توصیف کرد. امتیاز عمده این نظریه بر نظریه‌های قبلی این است که با استفاده از آن می‌توان نتیجه گرفت که میدان مغناطیسی تا عمق محدودی بداخل ابررسانا نفوذ می‌کند. وقتی جسمی فلزی در میدان مغناطیسی خارجی قرار می‌گیرد، با توجه به قانون لنز، یک جریان القایی در آن بوجود می‌آید که از نفوذ میدان خارجی به داخل آن جلوگیری می‌کند. برای یک فلز معمولی، جریانهای مزبور به دلیل مقاومت الکتریکی جسم در مقابل عبور جریان، به صورت انرژی گرمایی تلف می‌شوند اما در یک ابررسانا، این جریانها، که جریانهای پوششی یا جریانهای مایسنر نام دارند، به دلیل عدم مقاومت جسم در برابر عبور جریان، به صورت جریان پایدار در می‌آیند واز نفوذ میدان مغناطیسی خارجی به داخل ابررسانا جلوگیری می‌کنند. عمق نفوذ میدان مغناطیسی خارجی به خاصیت

دیامغناطیسی ابررسانا بستگی دارد. در حقیقت به دلیل جریان سطحی مزبور عمق نفوذ میدان مغناطیسی بـه داخـل ابررسانا نمی‌تواند صفر باشد. عمق لایه نفوذ در حدود ضخامت چندین لایه‌ی اتمی است.

۱-۱۰-۳ نظریه‌ی گینزبرگ -لاندائو

بر خلاف دو نظریه قبلی که بیشتر در جهت توجیه پدیده‌های شناخته شده ابررسانایی تدوین شده‌اند، در نظریه گینزبرگ-لاندائو بیشتر بررسی مسایل بنیادی ابررسانایی مورد نظر است. در این نظریه با استفاده از مکانیک کوانتومی و انتساب یک تابع موج به ابر الکترون، رفتار ابر الکترونها در حالت ابررسانایی مورد مطالعـه قرارگرفتـه است. با استفاده از این نظریه می‌توان وابستگی عمق نفوذ مغناطیسی به ابعاد جسم و میدان مغناطیـسی بحرانـی را نتیجه گرفت. بعدها بوسیله گورکوف نشان داده شد که نظریه گینزبرگ-لانـدائو بخـشی از نظریـه جـامعتر BCS است[۲۱].

۱-۱۰-۴ نظریه BCS

مبانی این نظریه در سال ۱۹۷۵ توسط باردین، کوپر وشریفر تدوین گردیـد[۲۰]. آنهـا در یـک موفقیـت بی نظیر در فیزیک بس‌ذره‌ای، مساله ربایش الکترونها را نه فقط برای دو الکترون بلکـه بـرای همـه‌ی الکترونهـای یک جامد در غالب نظریه میکروسکوپی ابررسانایی BCS حل نمودند. آنها موفق به سـاخت تـابع مـوج وردشـی برای حالت پایه ابررسانا، که همبستگی‌های بس‌ذره‌ای را به حساب آورده بود، شدند و نشان دادند که حالت پایـه از نوار برانگیختگی تک ذره‌ها با یک گاف انرژی جدا می‌شود. به این ترتیب نشان داده شد کـه گـذار بـه حالـت ابررسانایی با شرکت الکترونها برای پایین بردن انرژی سیستم رخ می‌دهد. این گـذار از چگـالش جفتهـای منفـرد ناشی نمی‌شود، بلکه از چگالش میلیاردها جفت الکترون با همبستگی شدید پدیـد مـی‌آیـد. اگـر الکترونهـا فقـط دوبه‌دو جفت شده بودند، آن وقت پهنای دمای گذار باریک نبود. وقتی که یک جفت چگالیده شد، وضعیت بـرای چگالش جفت دیگر مناسب می‌شود که جفت اخیر نیز زمینه را برای جفتهای دیگرآمـاده مـی‌کنـد. یعنـی بـه‌طـور همزمان الکترون‌ها به کمک هم چگالیده می‌شوند و بـه حالـت انـرژی پـایین‌تـر مـی‌رونـد. نظریـه BCS همـه‌ی

پدیده‌های ابررسانایی در ابررساناهای با زوج‌شدگی ضعیف را به‌خوبی توصیف می‌کند. نظریه BCS در نزدیکی دمای بحرانی و میدان صفر، انرژی گاف را به صورت زیر پیش‌بینی می‌کند:

$$\Delta(T)/\Delta(0) = ۱/۷۴(۱ - T/T_c)^{۱/۲} \qquad (۱-۱)$$

نظریه BCS میدان بحرانی را به صورت تابعی از دما به‌خوبی با رابطه زیر بیان می‌کند

$$H_{cm}(T) = H_{cm}(0)\,[\,۱ - (T/T_c)^{۲}\,] \qquad (۱-۲)$$

نظریه BCS در واقع بیانگر فرآیندهای میکروسکوپی است که در یک ابررسانا بوجود می‌آیند. بر اساس آن می‌توان کلیه خواص شناخته شده ابررساناهای دمای پایین را توجیه کرد، بعلاوه می‌توان خواص جدیدی را نیز برای ابررساناها پیش بینی نمود. برهمکنش جاذبه‌ای بین الکترونهای رسانش در ابررساناها، عامل بسیار مهمی در وقوع ابررسانایی است. در سال ۱۹۵۰، فورلیچ برای اولین بار این موضوع را مطرح نمود که ماهیت ابررسانایی نمی‌تواند به دلیل برهمکنش دافعه الکترون- الکترون باشد، بلکه حاصل برهمکنش الکترون- فونون است. این واقعیت تجربی که رساناهای بسیار خوب به علت برهمکنش ناچیز بین الکترون و فونون تبدیل به ابررسانا نمی‌شوند، اهمیت و نقش ابررسانایی را نشان می‌دهد[۲۲].

بر اساس این نظریه برهمکنش بین الکترونها و فونونها سبب جذب دوبه دوی الکترونهایی می‌شود که در حالت عادی یکدیگر را دفع می‌کنند. زوج‌های مذکور که به زوج‌های کوپر مشهورند، در دمای کمتر از T_c، بدون مقاومت، در عمل هدایت الکتریکی شرکت می‌کنند. حال آنکه در دماهای بیشتر از T_c پیوند بین دو الکترون زوج کوپر شکسته می‌شود و این الکترونها به الکترونهای عادی تبدیل می‌شوند. پس از کشف ابررسانای دمای بالا، مشخص گردید که فقط برهمکنش بین الکترون و فونون نمی‌تواند عامل ایجاد زوج کوپر باشد و باید عوامل دیگری را نیز در نظر گرفت.

به طور کلی دو دیدگاه عمده برای تعیین عاملی که منجر به تشکیل زوج کوپر در ابررساناهای دمای بالا می‌شود پیشنهاد شده است. در دیدگاه نخست، عامل تشکیل زوج را یا برهمکنش الکترون- فونون، نظیر ابررساناهای معمولی، و یا مبادله برانگیختگی‌های بوزونی نظیر پارامگنونها، اکسیتونها و یا پلاسمونها می‌دانند[۲۳].

در دیدگاه دوم دانشمندی به‌نام اندرسون[1]، مدل پیوند ظرفیتی تشدیدی[2] RVB را پیشنهاد نموده است که در این مدل، برهم‌کنشهایی که منجر به تشکیل زوج می‌شود، برهم‌کنشهای کولمبی است[۲۴]. از طرفی دیگرتعدادی از پژوهشگران نظیر هایزنبرگ [۲۵] اگرچه برهمکنش کولمبی را عامل تشکیل زوج می‌دانند ولی معتقدند که جفت-شدگی بین الکترونهایی بوجود می‌آید که در یک شبکه شبه- ویگنر[3] جایگزیده هستند[۲۶].

۱-۱۱ کاربردهای ابررسانایی

اونس نه تنها کاشف ابررسانایی است، بلکه اولین فردی است که در جهت استفاده عملی از ابررساناها اقدام نمود. کوشش‌های اونس در جهت ساخت آهنرباهای الکتریکی، به دلیل پایین بودن میدان مغناطیسی بحرانی ابررساناها در آن زمان، ناموفق ماند[۳]. همچنین در سال ۱۹۳۰ با استفاده از ابررساناها، کلیدهایی طراحی و ساخته شد که با اعمال میدان مغناطیسی مناسب از حالت روشن به خاموش انتقال می‌یافتند. پس از کشف ابررسانایی در آلیاژها بویژه در آلیاژ Nb_3Sn در سال ۱۹۵۳، استفاده از ابررساناها چشم‌انداز بهتری پیدا کرد و ابرساناها با توجه به صفر بودن مقاومت الکتریکی، برای ایجاد میدانهای مغناطیسی و انتقال نیرو مورد استفاده قرار گرفتند. کشف پدیده جوزفسون و تونل زنی الکترونهای عادی و ابرالکترونها، دریچه‌های جدیدی را در جهت استفاده هرچه بیشتر از ابررساناها باز نمود. در این بخش بعضی از کاربردهای مهم ابررساناهای نوع اول و دوم را مورد بررسی قرار می‌دهیم.

۱-۱۱-۱ توانایی تولید میدانهای مغناطیسی قوی

پدیده ابررسانایی در فن‌آوری‌های جدید از توانایی‌های گسترده‌ای برخوردار است. خواص ابررسانایی در مواد، علاوه بر دمای محیط و شدت جریان عبوری، به میدان مغناطیسی هم بستگی دارد. یعنی حتی اگر جسم در دمایی پایین‌تر از حد ابررسانایی باشد، وقتی میدان مغناطیسی از میزان مشخصی بیشتر باشد، خاصیت

[1] Anderson
[2] Resonating Valance Bound
[3] Wigner Like Lattice