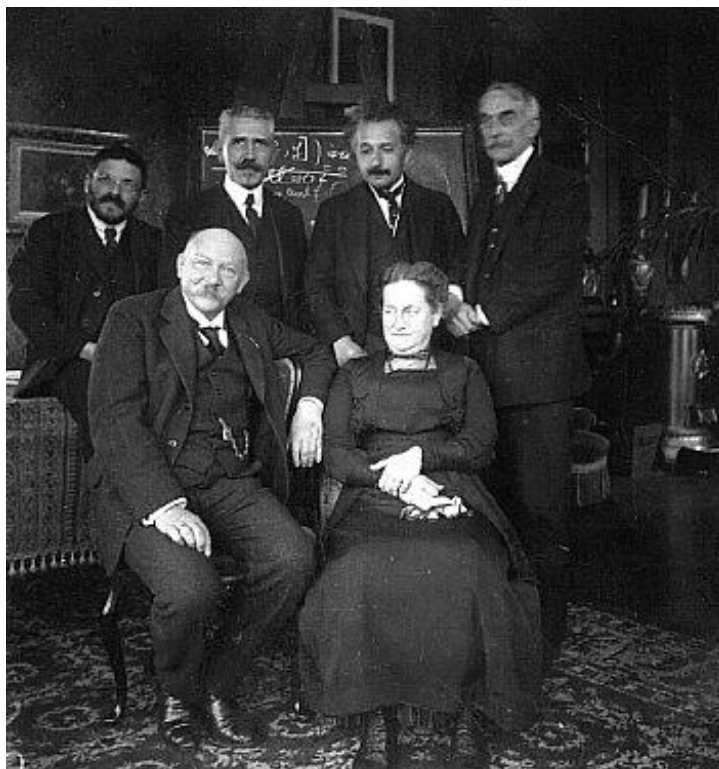


فصل اول

ابرسیانایی



اونز و همسرش نشسته و دوستان دانشمندش از جمله انیشتین پشت سر وی قرار دارند.

۱-۱ مقدمه

در سال ۱۹۰۸ هایک کامرلینگ اونز^۱ در دانشگاه لیدن^۲ موفق به تولید هلیوم مایع گردید و با استفاده از آن توانست به درجه حرارت حدود یک کلوین برسد. یکی از اولین بررسی‌هایی که اونز با دسترسی به این درجه حرارت پایین انجام داد، مطالعه تغییرات مقاومت الکتریکی فلزات بر حسب درجه حرارت بود. در آن زمان مشخص شده بود که مقاومت فلزات با کاهش دما کم می‌شود، اما معلوم نبود که با کاهش دما تا حدود یک درجه کلوین مقاومت تا چه مقداری کاهش می‌یابد. چون جیوه خالص ترین فلز در آن زمان بود، اونز مقاومت جیوه خالص را در دماهای مختلف اندازه‌گیری کرد. او در سال ۱۹۱۱ مشاهده کرد که وقتی درجه حرارت جیوه به سمت صفر مطلق کاهش داده می‌شود، در دمایی حدود ۴ کلوین مقاومت الکتریکی با افت بسیار بزرگی مواجه شده و در دمای پایین‌تر از این درجه حرارت، جیوه هیچ‌گونه مقاومت قابل اندازه‌گیری از خود نشان نمی‌دهد. این رفتار حتی در جیوه ناخالص نیز اتفاق افتاد. بنابراین اونز به این نتیجه رسید که در دمای پایین‌تر از ۴ کلوین، جیوه به حالت دیگری از خواص الکتریکی که کاملاً با

¹ Heike Kamerling Onnes

² Leiden

حالت‌های شناخته شده قبلی متفاوت بود ، رسیده است [۱-۲]. این حالت تازه "ابرسانایی" نام گرفت. در سال‌های بعد ابرسانایی در تعدادی از فلزات، آلیاژها و ترکیبات مشاهده شد. حالت ابرسانایی دارای ویژگی‌های خاصی است که در حالت‌های دیگر ماده دیده نمی‌شود. این ویژگی‌ها مختصراً در زیر بررسی می‌گردند.

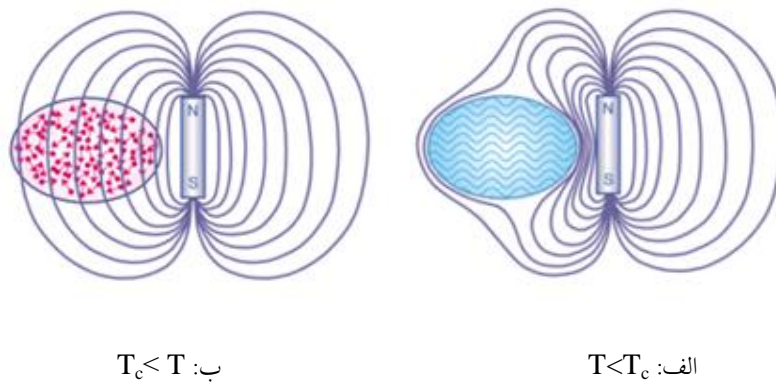
۲-۱ ویژگی‌های ابرسانایی

۱-۲-۱ مقاومت الکتریکی صفر

در یک دمای مشخص که دمای بحرانی (T_c) نامیده می‌شود، مقاومت به طور ناگهانی به مقدار کوچک غیرقابل اندازه‌گیری، که به ح ساسیت دستگاه اندازه‌گیری بستگی دارد، افت می‌کند. مقاومت صفر در ابرساناها به این معنی است که هیچ افت ولتاژی در طول ابرسانا وجود نداشته و بنابراین با عبور جریان از آن هیچ توانی در آن تلف نخواهد شد.

۲-۲-۱ اثر مایسنر- اوکسنفلد

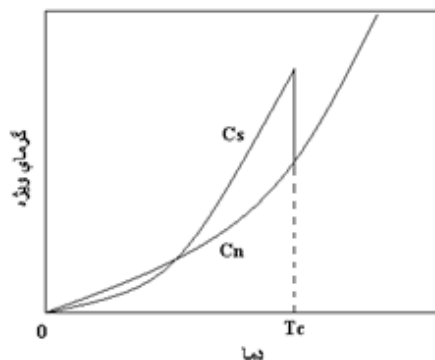
در سال ۱۹۳۳ مایسنر و اوکسنفلد توزیع شار مغناطیسی را در خارج نمونه‌هایی از قلع و سرب سرد شده تا زیر دمای بحرانی، در حضور میدان مغناطیسی اندازه‌گیری کردند. مطابق شکل ۱-۱ آنها دریافتند که نمونه‌ها در دمای گذار به طور آنی دیامغناطیس کامل می‌گردند و تمام شار از داخل آن بیرون رانده می‌شود، حتی هنگامی که نمونه‌ها ابتدا تا دمای بحرانی سرد شوند و سپس میدان مغناطیسی به آن اعمال شود نیز این اثر مشاهده می‌گردد. بنابراین مواد در حالت ابرسانش هرگز اجازه نمی‌دهند که چگالی شار مغناطیسی در درون آنها وجود داشته باشد. به عبارت دیگر، در داخل ابرسانا همیشه $B=0$ است [۳].



شکل ۱-۱: خطوط شار مغناطیسی در الف: حالت ابرسانایی (اثر مایسنر) ب: در حالت عادی

۳-۱ ظرفیت گرمایی ویژه

در فلزات معمولی گرمای ویژه به صورت $C = A\left(\frac{T}{\theta}\right)^3 + \gamma T$ با دما تغییر می کند. جمله خطی مربوط به الکترون های هدایت و جمله غیر خطی مربوط به شبکه است. اما در ابرسانا و در دمای کمتر از دمای گذار رابطه ظرفیت گرمایی ویژه برحسب دما به صورت $C = A\left(\frac{T}{\theta}\right)^3 + ae^{-\frac{b}{KT}}$ می باشد. همانطور که مشاهده می شود در این حالت سهم شبکه بدون تغییر مانده ولی سهم الکترون های هدایت به دلیل وجود جفت های کوپر با حالت عادی متفاوت است. ظرفیت گرمایی ویژه فلزات در حالت های عادی و ابرسانایی مطابق شکل ۱-۲ تغییر می کند. همانطور که مشاهده می شود در منحنی گرمای ویژه برحسب دما، یک پرش ناگهانی در دمای گذار وجود دارد. این تغییر ناگهانی بدین معناست که گذار از مرتبه دوم است. چون وقتی سیستم از حالتی به حالت دیگر می رود هیچ گرمای نهانی ردوبدل نمی شود [۴].



شکل ۱-۲: گرمای ویژه در حالت های ابرسانایی و عادی نسبت به دما برای میدان صفر.

۱-۴ هدایت گرمایی

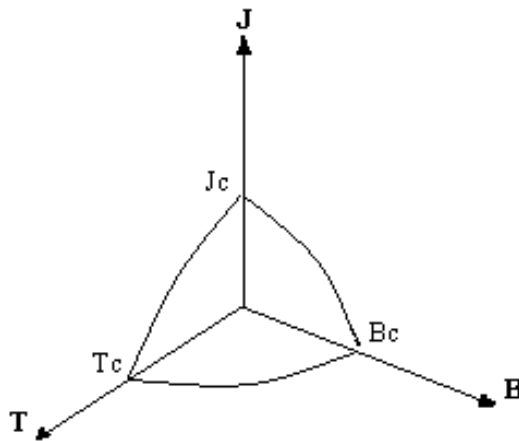
هدایت گرمایی در یک فلز معمولی توسط الکترون های هدایت و برخورد آنها با شبکه صورت می گیرد. اما در حالت ابررسانایی چون الکترون های ابررسانش با شبکه برخورد نمی کنند لذا تبادل انرژی صورت نمی گیرد، بنابراین هدایت گرمایی کاهش می یابد. هدایت گرمایی ابررسانا را می توان توسط میدان مغناطیسی کنترل کرد، بنابراین از این اثر در کلیدهای گرمایی استفاده می شود.

۱-۵ اثر ایزوتوپی

مشاهده شده است که دمای بحرانی ابررساناها با جرم ایزوتوپی تغییر می کند. هنگامی که ایزوتوپ-های گوناگون یک عنصر با هم مخلوط می شوند، دمای گذار به طور همواری تغییر می کند. نتایج تجربی نشان داده است که رابطه بین دمای بحرانی T_c و جرم به صورت $M^\alpha T_c = \text{cte}$ است. از وابستگی T_c به جرم ایزوتوپی نتیجه می شود که ارتعاشات شبکه و لذا برهمکنش های الکترون- شبکه در ابررسانایی نقش مهمی دارند. مدل میکروسکوپی ابررسانایی (BCS) مقدار α را برای α پیش-بینی می کند [۶۵].

۱-۶ دما، میدان مغناطیسی و چگالی جریان بحرانی

کاملینگ اوزن نشان داد که دمای بحرانی به میدان مغناطیسی اعمال شده و جریان عبوری از ماده بستگی دارد. بنابراین حالت ابررسانایی با سه فاکتور دمای بحرانی، میدان بحرانی و جریان بحرانی مشخص می شود که به نوع ماده بستگی دارد. شکل ۱-۳ وابستگی بین این پارامترهای بحرانی را نشان می دهد [۲].



شکل ۱-۳: نمودار فاز ابرسانا

۷-۱ انواع ابرسانا

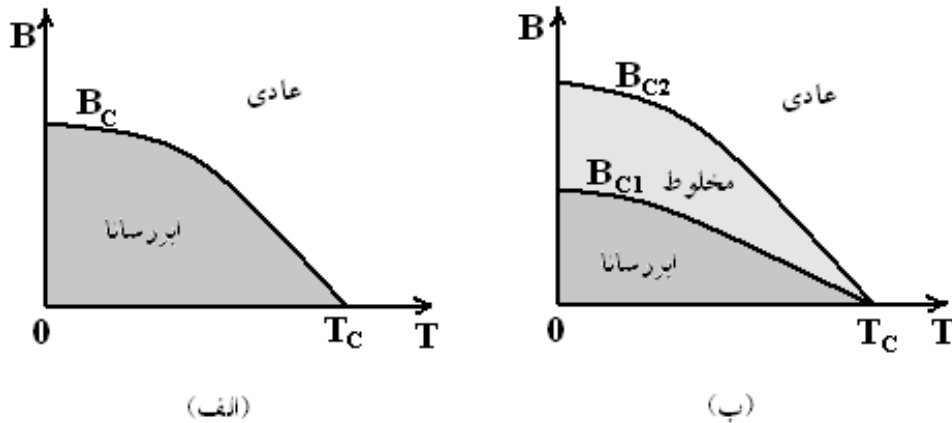
سال‌ها تصور می‌شد که تمام ابرساناها خصوصیت‌های مغناطیسی مشابهی دارند. اما اکنون ثابت شده است که ابرساناها رفتار فیزیکی متفاوتی در حضور میدان مغناطیسی دارند. برای این اساس ابرساناها به دو گروه مختلف، ابرسانای نوع اول I و نوع دوم II دسته‌بندی می‌شوند. ابرساناهای نوع اول شار مغناطیسی را در زیر میدان بحرانی B_c از درون خود می‌رانند لذا اثر مایسنر در این نوع ابرساناها کامل است. میدان بحرانی تابعی از دماست. وابستگی دمایی میدان مغناطیسی بحرانی از رابطه زیر پیروی می‌کند [۷]:

$$B_c(T) = B_c(0) \left(1 - \left(\frac{T}{T_c} \right)^2 \right) \quad (1-1)$$

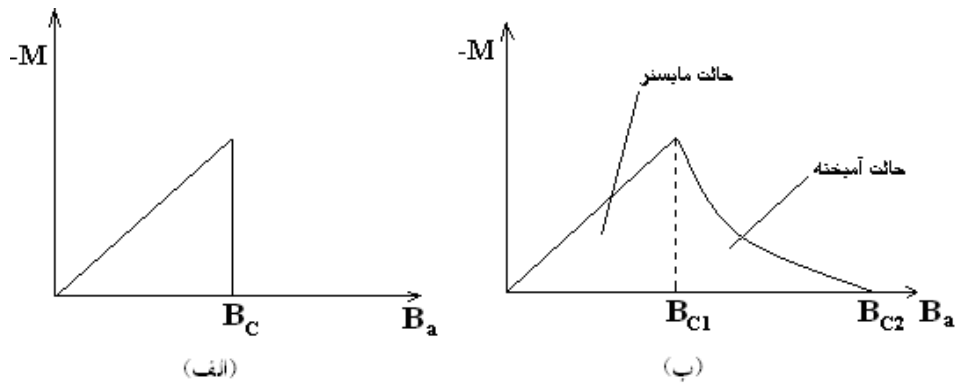
که در آن $B_c(0)$ میدان بحرانی در دمای صفر می‌باشد.

در ابرساناهای نوع دوم، در میدان‌های بزرگتر از میدان بحرانی پایینی B_{c1} ، شار مغناطیسی به داخل ماده نفوذ می‌کند. با افزایش میدان مغناطیسی به مقادیر بزرگتر از میدان مغناطیسی بحرانی بالایی B_{c2} ، خاصیت ابرسانایی به طور کامل از بین خواهد رفت. برخلاف ابرساناهای نوع اول که خاصیت ابرسانایی آن‌ها در میدان مغناطیسی بحرانی به یکباره از بین می‌رود، در ابرساناهای نوع دوم در میدان مغناطیسی کمتر از B_{c1} دیامغناطیس کامل است. اما در میدان‌های مغناطیسی بزرگتر از

B_{C1} و کمتر از میدان بحرانی بالایی، B_{C2} ، یک حالت آمیخته^۱ وجود دارد که علیرغم نفوذ شار ماده همچنان ابررسانا باقی می ماند. نمودار فاز ابررساناهای نوع I و II در شکل ۱-۴ نشان داده شده است. همچنین منحنی تغییرات مغناطیس شدگی M ناشی از جریان های سطحی بر حسب تغییر میدان مغناطیسی خارجی برای ابررساناهای نوع I و II در شکل ۱-۵ نشان داده شده است.



شکل ۱-۴: دیاگرام فاز ابررساناهای نوع ۱ (الف) و نوع ۲ (ب).

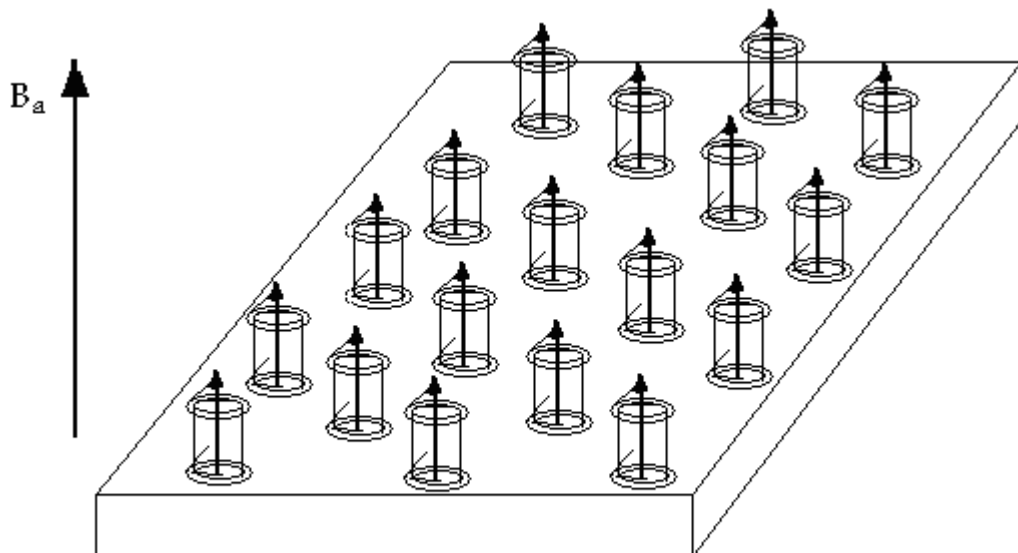


شکل ۱-۵: منحنی مغناطش بر حسب میدان مغناطیسی ابررساناهای نوع ۱ (الف) و نوع ۲ (ب).

در حالت آمیخته، در داخل ماده نواحی با حالت عادی وجود دارد. در این حالت اثر میسر وجود نداشته و شار مغناطیسی به صورت کوانتیده به داخل ماده نفوذ می کند. نفوذ شار مغناطیسی به صورت

¹ Mixed state

استوانه‌های باریکی در راستای میدان مغناطیسی اعمال شده می باشد که در داخل آن ماده در حالت عادی است. هر استوانه حامل یک کوانتوم شار به اندازه $\Phi_0 = h/2q$ می باشد. این استوانه‌ها گردشاره نامیده می شوند و با الگوی منظمی قرار گرفته و تشکیل شبکه ای می دهند که شبکه فلوکسن^۱ نامیده می شود. بنابراین شار مغناطیسی کل داخل ابررسانا به صورت $\Phi = n\Phi_0$ کوانتیده است. در داخل گردشاره‌ها میدان مغناطیسی هم جهت با میدان اعمالی بوده و این استوانه ها به وسیله جریان های حلقوی القا شده از نواحی ابررسانای اطراف جدا شده اند. این جریان های ابررسانایی به همراه جریان های چرخشی سطحی موجب حفظ خاصیت دیامغناطیس می شوند [۸]. شکل ۱-۶ شبکه گردشاره را برای ابررساناهای نوع II در حالت مخلوط نشان می دهد.



شکل ۱-۶: شبکه گردشاره‌ها در ابررسانای نوع ۲ در حالت مخلوط آن نفوذ می کند [۷].

۱-۸ عمق نفوذ (λ)

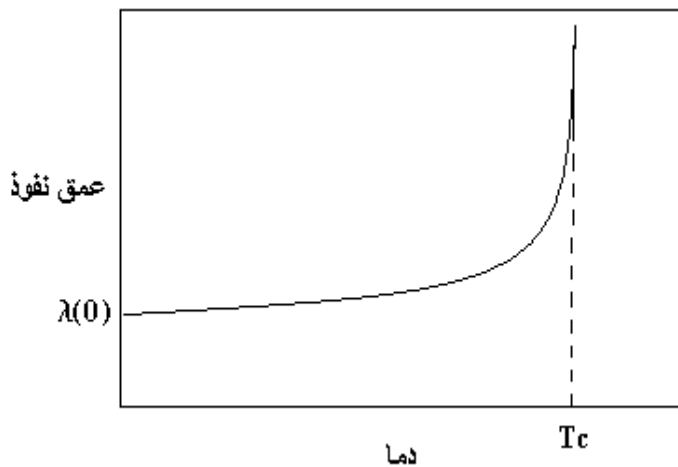
وقتی که میدان مغناطیسی به یک ابررسانا اعمال می شود، در میدان های مغناطیسی به اندازه کوچک شار مغناطیسی به داخل لایه نازکی از سطح ابررسانا نفوذ می کند. عمق نفوذ، طول مشخصه افت نمائی ناشی از نفوذ شار مغناطیسی به درون ابررسانا می باشد. عمق نفوذ به دما بستگی دارد و در

^۱ Fluxen

دمای گذار T_c بی نهایت می شود. شکل ۷-۱ نمودار عمق نفوذ بر حسب دما را نشان می دهد. بستگی دمایی عمق نفوذ با رابطه زیر تعیین می شود [۹]:

$$\lambda(T) = \lambda(0) \left[1 - \left(\frac{T}{T_c} \right)^4 \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (2-1)$$

$\lambda(0)$ عمق نفوذ در دمای صفر می باشد. در ابررساناهای خالص عمق نفوذ در حدود $2000-5000 \text{ \AA}$ می باشد.



شکل ۷-۱: نمودار عمق نفوذ به دما [۹].

۹-۱ طول همدوسی (ξ)

طول همدوسی معیاری از شعاع گردشاره ها و یا پهنای ناحیه گذار از حالت ابررسانایی به حالت عادی می باشد. آنرا می توان به صورت اندازه بیشینه مسافت بین زوج های کوپر نیز تعریف کرد. بر طبق نظریه میکروسکوپی ابررسانایی مقدار دقیق طول همدوسی از رابطه زیر به دست می آید [۹]:

$$\xi_0 = \frac{\hbar v_f}{\pi \Delta_0} \quad (3-1)$$

Δ_0 گاف انرژی در دمای صفر می باشد و v_f سرعت الکترون در سطح فرمی است.

طول همدوسی ارتباط تنگاتنگی با مسیر آزاد میانگین الکترون ها در داخل ابررسانا دارد. مقادیر بزرگ مسیر آزاد میانگین الکترون ها منجر به یک طول همدوسی بزرگ می شود. بنابراین بیشتر عناصر

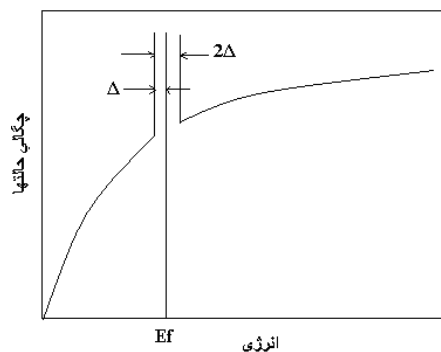
ابرسانای نوع اول هستند. به خاطر کاهش مسیر آزاد میانگین الکترون در آلیاژها و ترکیبات بین فلزی این مواد عموماً ابرسانای نوع دوم می‌باشند.

۱۰-۱ پارامتر گینزبرگ- لاندائو (κ)

نسبت عمق نفوذ به طول همدوسی ($\kappa = \lambda/\xi$) پارامتر بدون بعد بسیار مهمی به نام پارامتر گینزبرگ- لاندائو نامیده می‌شود. مقدار κ می‌تواند معیاری برای تعیین نوع ابرسانا باشد. اگر مقدار κ بزرگتر از $1/\sqrt{2}$ باشد، ابرسانا نوع II است در حالی که اگر κ کوچکتر از $1/\sqrt{2}$ باشد، ابرسانا نوع I می‌باشد یا به طور کلی تر اگر $\xi \gg \lambda$ باشد، ابرسانا نوع II ولی اگر $\xi \ll \lambda$ باشد، ابرسانا نوع I می‌باشد [۱۰].

۱۱-۱ گاف انرژی

گاف انرژی در ابرساناها طبیعت کاملاً متفاوتی از گاف انرژی در عایق‌ها دارد. در ابرسانا گاف به گاز فرمی وابسته است. نتایج به دست آمده برای ظرفیت گرمایی ویژه نشان می‌دهد که طیف انرژی زوج الکترون‌ها دارای یک گاف $\pm\Delta$ در اطراف تراز فرمی E_F است. یعنی پهنای گاف 2Δ است، که از مرتبه 10^{-3} eV می‌باشد. این گاف در نزدیکی دمای T_c به صفر کاهش می‌یابد. اما در $0K$ بیشینه می‌شود. شکل ۱-۸ چگالی حالت‌ها را بر حسب انرژی و گاف انرژی نشان می‌دهد. نظریه BCS این گاف را به خوبی پیش‌بینی می‌کند [۹].



شکل ۱-۸: گاف انرژی در حالت ابرسانایی حول انرژی فرمی.

۱-۱۲ زوج کوپر

بر اساس نظریه BCS که برای توصیف ابررسانایی در فلزات ارائه شد، الکترون‌ها در حضور شبکه بلوری همدیگر را جذب می‌کنند و به صورت جفت‌هایی در می‌آیند که به جفت‌های کوپر مشهورند. سازوکار جفت‌شدگی را می‌توان این‌طور توصیف کرد که الکترون‌ها می‌توانند از طریق نوسانات شبکه (فونون‌ها) برهمکنش کنند. در این فرایند دو الکترون یک فونون مجازی مبادله می‌کنند. فونون مجازی فقط برای دوره زمانی کوتاهی وجود دارد و فقط در حضور دومین الکترون آماده جذب آن می‌تواند گسیل شود. در دوره زمانی کوتاهی که فونون مجازی وجود دارد، انرژی سیستم ممکن است با مقدار اولیه آن متفاوت باشد، که این ناشی از اصل عدم قطعیت بین انرژی و زمان است. در صورتی که اختلاف انرژی بین حالت‌های اولیه و میانی کوچکتر از $h\nu_p$ باشد برهمکنش الکترون-الکترون جاذبه است. این جاذبه را می‌توان در غالب قطبیده شدن شبکه توسط الکترون دیگر درک کرد. تمرکز بارهای مثبت ایجاد شده به وسیله اولین الکترون باعث کاهش انرژی پتانسیل دومین الکترون می‌شود. به‌خاطر این برهمکنش جاذبه، الکترون‌های با تکانه و اسپین مخالف، زوج-های کوپر ابررسانا را تشکیل می‌دهند. تکانه و اسپین یک زوج کوپر صفر است و از اصل طرد پائولی پیروی نمی‌کنند [۷].

فصل دوم

ابرسیاتناهای دمای بالا

۱-۲ مقدمه

در حدود ۷۰ سال پس از کشف ابررسانایی پیشرفت های انجام شده جهت افزایش دمای بحرانی به کندی انجام گرفت . طوری که از سال ۱۹۱۱ تا سال ۱۹۷۳ یعنی حدود ۶۲ سال دانشمندان تنها توانستند دمای بحرانی را از ۴ به ۲۳/۳ کلوین، که کمی بیشتر از ۲۰/۳ کلوین یعنی دمای هیدروژن مایع است، برسانند. اما کار با هیدروژن مایع نیز پرهزینه ، مشکل و خطر ساز بود و کاربردهای ابررسانا را محدود می ساخت. در سال های بعد علاوه بر فلزات آلیاژهای فلزی، فعالیت هایی در زمینه ترکیبات نیمه فلزی توسط برخی دانشمندان آغاز شد ، اما هنوز ماده ای دیگر به جز فلزات و آلیاژها یافته نشده بود که بتواند در دماهای مورد انتظار ابررسانا باشد.

سرانجام در ۲۷ ژانویه ۱۹۸۶ جرج بدنورز^۱ و آکس مولر^۲ در موسسه تحقیقاتی IBM شهر زوریخ سوئیس موفق به کشف پدیده ابررسانایی در سرامیکی از نوع اکسید مس و لانتانوم و باریوم یعنی $La_{2-m}Ba_mCuO$ شدند. دمای بحرانی نمونه ساخته شده حدود ۳۵ کلوین بود . سپس جایگزینی Y در پروسکیت $BaCuO$ و ساخت ترکیب سرامیکی $YBa_2Cu_3O_7$ (Y-123) منجر به یک جهش بزرگ در دمای گذار شد.

بعد از کشف ابررساناهای دمای بالا (HTS)^۳، نه تنها دمای گذار این ابررساناها عامل تمایز آنها از ابررساناهای متعارف بود، بلکه ویژگی های خاصی نیز در این ترکیبات دیده شد . این ویژگی ها نشان می دهد که بره مکنش الکترون- فونون در نظریه BCS قادر به توجیه ابررسانش در این مواد نیست. به دلیل مشاهده این تفاوت ها بین ابررساناهای دمای بالا و ابررساناهای متعارف ، تحقیقات گسترده ای برای درک سازوکار ابررسانایی در حالت ابررسانشی و همچنین تلاش هایی برای بالا بردن دمای گذار صورت گرفته است. در این زمینه محققین با اعمال فشار بر ترکیباتی از ابررساناهای دمای بالا ، تغییر

¹George Bednorz

²Alex Muller

³High Temperature Superconductors

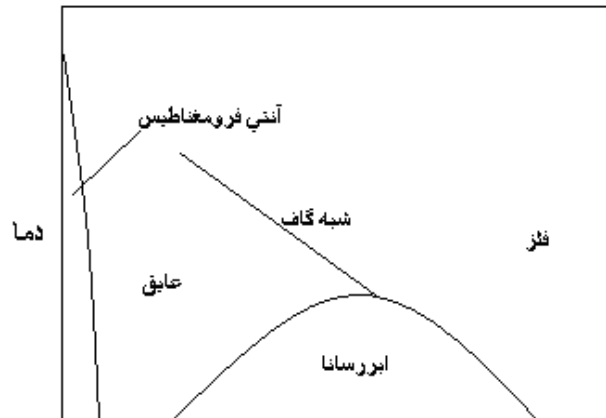
در استوکیومتری اکسیژن، آرایش‌های مختلف در ترکیبات ابررساناهای دمای بالا و ساخت ترکیباتی از یک خانواده با استوکیومتری از عناصر تشکیل دهنده‌ی آن ترکیب، در صدد افزایش دمای گذار جهت درک سازوکار حالت ابررسانشی بوده‌اند. اما تاکنون موفق به توصیف دقیق سازوکار ابررسانایی نشده‌اند [۱۲].

۲-۲ خواص ابررساناهای دمای بالا

آزمایش‌های مختلف روی خواص ابررساناهای اکسید مس نشان داد که این ابررساناها از ابررساناهای متعارف پیچیده ترند. ابررساناهای دمای بالا، ابررساناهای نوع II می‌باشند. بنابراین خصوصیات مشابهی دارند. یکی از جالبترین خصوصیات ابررساناهای دمای بالا، لایه‌ای بودن آن - هاست و به این دلیل خواص فیزیکی شان معمولاً ناهمسانگرد می‌باشد. اختلاف قابل توجه این مواد با ابررساناهای عادی، ناشی از طول هم‌دوسی بسیار کوتاه در امتداد محور C بلورشناسی است.

۲-۳ ساختار اکسیدهای لایه‌ای

ساختار کوپرات‌های ابررسانای دمای بالا به صورت اکسیدهای لایه‌ای که شامل دو صفحه CuO_2 می‌باشد که توسط یک اتم RE (عنصر خاکی نادر) از هم جدا شده‌اند. بین این لایه‌ها ناحیه‌های بین لایه‌ای به نام زنجیره‌های CuO وجود دارند. زنجیره‌های CuO را می‌توان به عنوان منبع بار در نظر گرفت که بار را به صفحات CuO_2 انتقال می‌دهد. به این ترتیب ابررساناهای دمای بالا را می‌توان به صورت صفحات CuO_2 که با منابع بار از هم جدا شده‌اند در نظر گرفت. حاملین بار توسط آرایش اضافه می‌شوند. با جانشین کردن اتم‌های دو ظرفیتی به جای اتم‌های سه ظرفیتی مثل Sr^{+2} به جای La^{+3} در ترکیب $\text{La}_{2-x}\text{Ba}_x\text{CuO}_4$ یا با اضافه کردن اکسیژن به ترکیب $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_6$ که به صورت O^{-2} در ترکیب وارد می‌شود و زنجیره‌های CuO را تشکیل می‌دهد، ترکیب آلائیده می‌شود. برای به دست آمدن تعادل الکترونی، الکترون‌ها از صفحات مس برداشته می‌شوند و حفره‌های باقی مانده که متحرک هستند در دمای پایین تر از T_c ، باعث ایجاد ابررسانایی می‌شوند. با تغییر حالت اکسیداسیون مس، ماده از یک عایق آنتی فرومغناطیس به یک ابررسانا و بعد به یک فلز معمولی تغییر حالت می‌دهد (شکل ۲-۱). تغییر حالت اکسیداسیون مس، توسط منبع بار کنترل می‌شود [۱۶-۱۳].



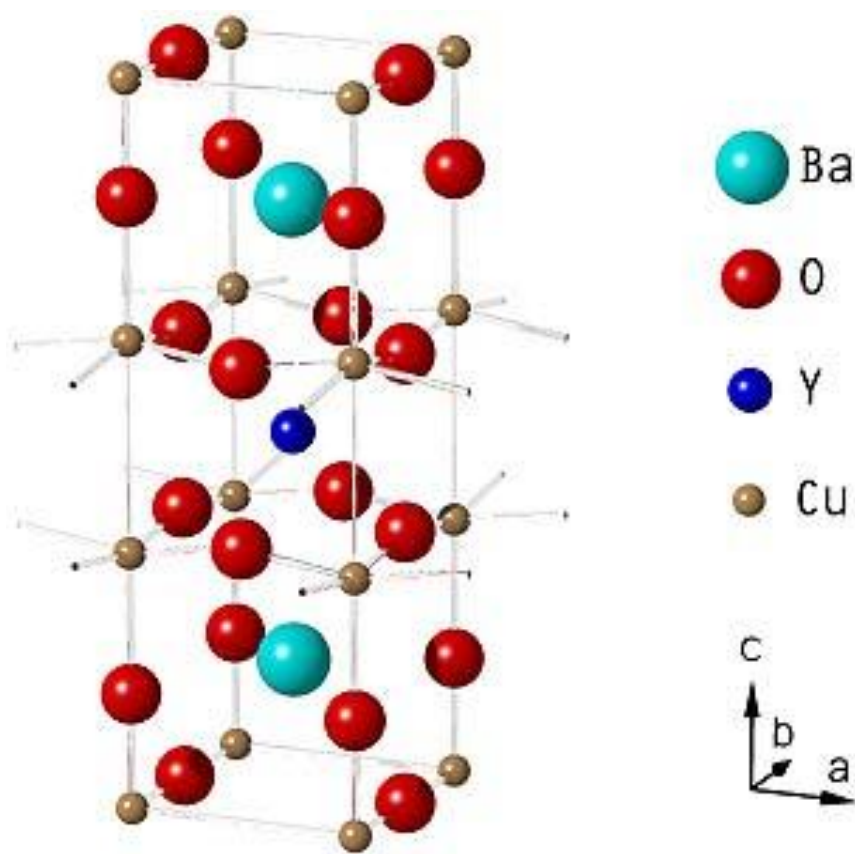
چگالی حفزه ها

شکل ۲-۱: نمودار فاز مخصوص ابرسیانای کوپرات [۱۳].

۲-۳-۱ ساختار ترکیب Y-123

در ابتدای کشف Y-123 تصور می شد که ترکیب شیمیایی این ماده به صورت $YBa_2Cu_3O_9$ می باشد که از ۳ برابر ساختار پروسکایت ایده آل ABO_3 یعنی $A_3B_3O_9$ تشکیل شده که YBa_2 نقش A_3 و Cu_3 نقش B_3 را دارد و توکیب ۹ اکسیژن دارد. این تصور به دلیل عدم تعیین مکان و تعداد اتم های اکسیژن بود. در آن زمان برای مطالعه ساختار مواد اولیه از پراش X استفاده می شد که اغلب کیفیت پایینی داشتند. چون اکسیژن عنصری سبک است که توسط پراش X مکان آن را نمی توان به طور دقیق تعیین کرد و همچنین در تعیین مکان سایر اتم ها نیز دقت کافی وجود نداشت، این ساختار غلط تصور می شد. اما پس از به کارگیری پراش نوترون در مطالعات ساختاری که دقت بسیار بالاتری دارد، مشخص شد که ساختار ترکیب Y-123 کمی کمتر از ۷ اکسیژن دارد و دارای ساختار اورتورومبیک ($a \neq b$) است. اما اگر نمونه در مرحله کلوخه سازی به سرعت سرد شود، ساختار بلوری تتراگونال خواهد بود. ساختار تتراگونال در غلظت های کم اکسیژن ایجاد می شود. اما اگر Y-123 در حین ساخت فرصت کافی برای جذب و نظم یافتن اکسیژن داشته باشد، ساختار اورتورومبیک خواهد بود، که تفاوت مقادیر a و b در این ساختار حدود ۰/۲٪ است [۱۶]. مطابق شکل ۲-۲ در ساختار ۱۲۳ اتم Y در وسط ساختار قرار دارد. در قسمت بالا و پایین اتم Y دو اتم Ba قرار دارد که هر یک با ۴

اتم اکسیژن در اضلاع سلول واحد احاطه شده است. در قسمت مرکزی هر سلول واحد اتم های Cu و O به دنبال هم قرار گرفته اند که به زنجیره های CuO معروف است. در ابتدا تصور می شد که زنجیره های CuO نقش اساسی در ابرسانایی دارد، اما با کشف ترکیبات خانواده Bi و Tl که زنجیره های CuO ندارند، معلوم شد که صفحات CuO_2 هستند که نقش اساسی ابرسانایی را بر عهده دارند. اما باید توجه داشت که در فاز تتراگونال ۱۲۳ با وجود صفحات CuO_2 گذار ابرسانایی وجود ندارد. این بدین معناست که تنها حضور صفحات CuO_2 برای ابرسانایی کافی نیست. عقیده کلی بر آن است که ابرسانایی به صفحات شبه دو بعدی محدود می شود که حامل های بار از زنجیره های مثل CuO به صفحات CuO_2 وارد می شوند. تعداد این حامل ها با وارد کردن آلایش قابل تغییر است.



شکل ۲-۲: ساختار بلوری $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$. زنجیره های CuO در جهت b هستند [۷].

۲-۴ اثر آرایش بر ساختار الکترونی ابررساناها

در ترکیبات اکسید مسی دمای بالا، ظرفیت اسمی و ظرفیت واقعی تعدادی از اتم‌ها مثل Ba^{+2} ، Y^{+3} ، Nd^{+3} ، Eu^{+3} ، Sr^{+2} یکسان می‌باشد. در مورد ظرفیت اکسیژن و مس نمی‌توان با قاطعیت صحبت کرد. بعضی دیگر از عناصر مثل Pr که جایگزین عناصر اتمی ترکیبات ابررسانای دمای بالا می‌شود، نیز به نظر می‌رسد ظرفیت مشخصی نداشته باشند.

در ترکیبات ابررسانای دمای بالا، به علت همجواری اتم‌های مس و اکسیژن هیبریداسیون قوی بین حالت‌های 3d مس و 2p اکسیژن وجود دارد. این هیبریداسیون قوی حالت اکسیداسیون واقعی این اتم‌ها را از حالت اسمی Cu^{+2} و O^{-2} تغییر می‌دهد. در واقع بار این یون‌ها به مقدار آرایش و غلظت اکسیژن بستگی دارد.

در ترکیبات $REBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ دو نوع موقعیت مکانی متفاوت در ساختار بلوری برای اتم‌های مس وجود دارد، Cu_2 در صفحه CuO_2 و Cu_1 در زنجیره CuO . در ترکیب عایق $REBa_2Cu_3O_6$ اتم‌های مس در زنجیره در حالت ظرفیت Cu^{+1} در حالی که اتم‌های مس موجود در صفحات CuO_2 در حالت ظرفیت Cu^{+2} قرار دارند. با افزایش مقدار اکسیژن ظرفیت اسمی اتم‌های مس در زنجیره به Cu^{+2} تغییر می‌یابد و ظرفیت مس تا مقدار اکسیژن حدود $\frac{6}{4} \sim 7-\delta$ برابر ۲+ تقریباً ثابت می‌ماند و از آن پس با افزایش بیشتر اکسیژن، با انتقال بار از زنجیره‌ها به صفحات، سیستم به حالت فلزی گذار می‌کند. در این بین نظم کوتاه برد مکان‌های اتمی اکسیژن در زنجیره‌ها نقش مهمی در تعیین خواص ابررسانایی و ظرفیت مس بازی می‌کند [۱۴ و ۱۷].

۲-۵ ناهمسانگردی اکسیدهای لایه‌ای

پارامتر بدون بعد ناهمسانگردی γ به صورت زیر بیان می‌شود [۷]:

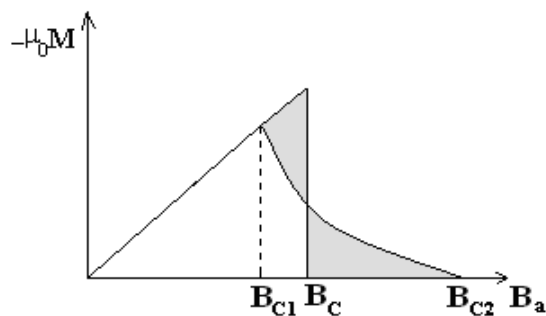
$$\gamma = \left(\frac{m_c}{m_{ab}} \right)^{\frac{1}{2}} = \frac{\lambda_c}{\lambda_{ab}} = \frac{\xi_{ab}}{\xi_c} = \frac{B_{c2,ab}}{B_{c2,c}} = \frac{B_{c1,ab}}{B_{c1,c}} = \frac{\rho_c}{\rho_{ab}} \quad (1-2)$$

که در آن m_c و m_{ab} به ترتیب جرم‌های موثر حامل‌های بار برای جریان‌های داخل صفحه ab و در امتداد c هستند. $\lambda_c, \lambda_{ab}, \xi_c$ و ξ_{ab} به ترتیب عمق نفوذ و طول همدوسی در صفحه ab و محور c می‌باشند. B_{c1} و B_{c2} میدان‌های بحرانی پایینی و بالایی هستند. اندیس‌های ab و c به ترتیب مربوط به جهت‌های میدان در صفحه ab و در امتداد c هستند. ρ_c و ρ_{ab} نیز مقاومت ویژه الکتریکی در جهت صفحه ab و محور c را نشان می‌دهد. این ناهمسانگردی بر روی خیلی از خواص ابررسانایی و حالت عادی مثل رسانایی الکتریکی و گرمایی و توان گرما الکتریسته تاثیر دارد. همان‌طور که قبلاً گفت‌شد ابررساناهای دمای بالا ناهمسانگردی بالایی دارند. به‌عنوان مثال ناهمسانگردی در ترکیب $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ حدود ۵۰ است ($\rho_c/\rho_{ab} = 50$) و در ترکیب $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+x}$ به‌حدود 10^4 می‌رسد. مقدار اکسیژن موجود در ترکیب بر روی ناهمسانگردی تاثیر دارد. به‌عنوان مثال در ترکیب $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ با $\delta \approx 0.07$ ، $\rho_c/\rho_{ab} = 50$ است در حالی که با $\delta \approx 0.3$ ناهمسانگردی به بالای ۳۰۰۰ می‌رسد [۱۹].

۶-۲ میدان‌های بحرانی

همان‌طور که در فصل قبل گفته شد بروز خاصیت ابررسانایی در مواد، علاوه بر دمای محیط به میدان مغناطیسی هم بستگی دارد. یعنی حتی اگر جسم در دمایی پایین‌تر از دمای بحرانی باشد، وقتی میدان مغناطیسی از میدان مغناطیسی بحرانی بزرگتر می‌شود، خاصیت ابررسانایی از بین می‌رود. میدان بحرانی ترمودینامیکی B_c ، با توجه به شکل ۲-۳، با عبارت زیر تعریف می‌شود:

$$\int_{B_{c1}}^{B_c} (B_a + \mu_0 M) dB_a = \mu_0 \int_{B_c}^{B_{c2}} -M dB_a \quad (2-2)$$



شکل ۲-۳: منحنی مغناطش ابررسانای نوع ۲. نواحی رنگی در طرف چپ و راست میدان بحرانی ترمودینامیکی B_c برابر هستند.

در ابرساناهای دمای بالا میدان بحرانی ترمودینامیکی B_c با رابطه زیر داده می‌شود [۲۰ و ۲۱]:

$$B_c = \frac{\Phi_0}{2\sqrt{2\pi\lambda_{ab}\xi_{ab}}} \quad (۳-۲)$$

که در آن Φ_0 کوانتوم شار است. عبارت‌های حاصل برای میدان‌های بحرانی بالایی عبارتند از:

$$B_{c2,c} = \frac{\Phi_0}{2\pi\xi_{ab}^2} \quad (۴-۲)$$

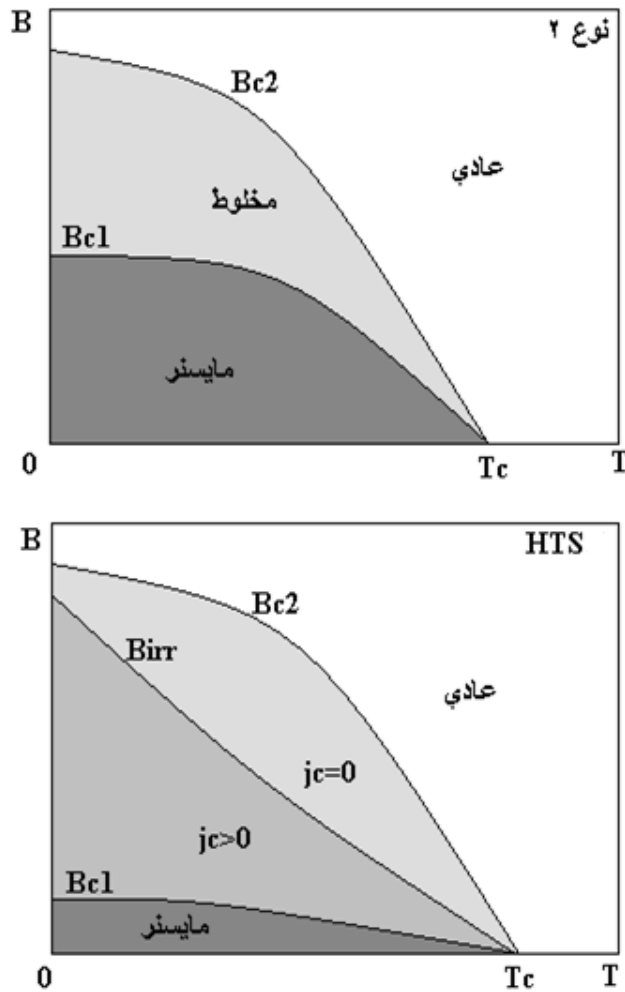
$$B_{c2,ab} = \frac{\Phi_0}{2\pi\xi_c\xi_{ab}} \quad (۵-۲)$$

به‌خاطر میدان بحرانی بالایی بسیار بزرگ ابرساناهای کوپرات، میدان مغناطیسی بحرانی بالایی در دمای صفر، $B_{c2}(0)$ را نمی‌توان مستقیماً اندازه‌گیری کرد. از عبارت زیر برای تخمین $B_{c2}(0)$ استفاده می‌شود [۹]:

$$B_{c2}(0) = 0.69T_c \left. \frac{dB_{c2}}{dT} \right|_{T=T_c} \quad (۶-۲)$$

میدان‌های بحرانی بالایی برای ابرساناهای کوپرات معمولاً حدود $T = 100$ هستند [۷].

نمودار فاز مغناطیسی ساده شده برای ابرساناهای معمولی نوع II و کوپرات‌های دمای بالا در شکل ۲-۴ نشان داده شده‌اند. یک ویژگی برجسته ابرساناهای دمای بالا وجود خط برگشت ناپذیری در زیر میدان بحرانی بالایی B_{c2} می‌باشد. بالای این خط گردش‌ها قادر به حرکتند و چگالی جریان بحرانی صفر است.



شکل ۲-۴: نمودار فاز مغناطیسی ساده شده ابررساناهای معمولی نوع ۲ (بالا) و دمای بالا (پایین).

۷-۲ چگالی جریان بحرانی

در کاربردهای آهن ربایی و توانی، چگالی جریان بحرانی یکی از مهم ترین خواص فیزیکی ابررساناهای دمای بالاست. چگالی جریان بحرانی بیشترین جریانی است که در حالت ابررسانایی عبور می کند و در جریان های بیشتر از آن ابررسانایی از بین می رود. چگالی جریان بحرانی در ابررساناهای دمای بالا برای میدان اعمال شده صفر با رابطه زیر داده می شود [۷]:

$$j_c = j_c(T=0) \left(1 - \frac{T}{T_c}\right)^\alpha \quad (7-2)$$

که در این رابطه α عددی بین ۱ و ۲ می باشد.