

برنام‌حداوندجان و

مقدمه‌ای بر ابرسانایی

ویراست دوم



انتشارات
۸۳۴

دکتر شعبان‌رضا قربانی
استاد دانشگاه فردوسی مشهد

سرشناسه:	قربانی، شعبان‌رضا، ۱۳۴۱ -
عنوان و نام پدیدآور:	مقدمه‌ای بر ابررسانایی / شعبان‌رضا قربانی؛ ویراستار ادبی هانیه اسدیپور فعال مشهد.
وضعیت ویراست:	ویراست ۲.
مشخصات نشر:	مشهد: دانشگاه فردوسی مشهد، انتشارات، ۱۴۰۱.
مشخصات ظاهری:	۲۵۲ ص.
فروست:	انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد؛ ۸۳۴.
شابک:	ISBN: 978-964-386-527-6
وضعیت فهرست‌نویسی:	فیپا.
یادداشت:	چاپ قبلی: دانشگاه تربیت معلم سبزوار، معاونت پژوهشی، ۱۳۹۰.
یادداشت:	کتابنامه: ص. [۲۳۵]-۲۳۷.
یادداشت:	نمایه.
موضوع:	ابررسانایی
شناسه افزوده:	دانشگاه فردوسی مشهد، انتشارات.
رده‌بندی کنگره:	QC۶۱۱/۹۲
رده‌بندی دیویی:	۵۳۷/۶۲۳
شماره کتابشناسی ملی:	۸۹۰۷۵۶۲
	Superconductivity

مقدمه‌ای بر ابررسانایی (ویراست دوم)

پدیدآورنده: دکتر شعبان‌رضا قربانی
ویراستار ادبی: هانیه اسدیپور فعال مشهد
مشخصات: وزیری، ۱۰۰ نسخه، چاپ دوم، پاییز ۱۴۰۴ (اول، ۱۴۰۱)
چاپ و صحافی: همیار
بها: ۳/۰۰۰/۰۰۰ ریال
حق چاپ برای انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد محفوظ است.



انتشارات
۸۳۴

مراکز پخش:

فروشگاه و نمایشگاه کتاب پردیس: مشهد، میدان آزادی، دانشگاه فردوسی مشهد، جنب سلف یاس
تلفن: ۳۸۸۳۳۷۲۷ - ۳۸۸۰۲۶۶۶ (۰۵۱)
مؤسسه کتابیران: تهران، میدان انقلاب، خیابان کارگر جنوبی، بین روانمهر و وحید نظری، بن‌بست
گشتاسب، پلاک ۸ تلفن: ۶۶۴۸۴۷۱۵ (۰۲۱)
مؤسسه دانشیران: تهران، خیابان انقلاب، خیابان منیری جاوید (اردیبهشت) نبش خیابان نظری، شماره ۱۴۲
تلفکس: ۶۶۴۰۰۲۲۰ - ۶۶۴۰۰۱۴۴ (۰۲۱)

<http://press.um.ac.ir>

Email: press@um.ac.ir

فهرست

پیشگفتار	۷
فصل ۱. تاریخچه ابرسانایی	۹
۱-۱ مقدمه	۹
۲-۱ مدل های ابرسانایی	۱۵
فصل ۲. رساناهای کامل	۱۹
۱-۲ مقدمه	۱۹
۲-۲ معادله اول لندن	۲۵
فصل ۳. مدل های کلاسیکی ابرسانایی	۳۵
۱-۳ مقدمه	۳۵
۲-۳ معادله دوم لندن	۳۵
۳-۳ ابرساناهای ناهمسان گرد	۴۰
۴-۳ دیامغناطیس کامل	۴۳
۵-۳ تعلیق مغناطیسی	۴۸
۶-۳ مدل دوستالی	۵۲
مسائل	۵۵
فصل ۴. مدل کوانتوم ماکروسکوپی ابرسانایی	۵۷
۱-۴ مقدمه	۵۷
۲-۴ معادله شرودینگر و جریان های احتمال	۵۷
۳-۴ جریان های کوانتومی ماکروسکوپی	۶۱
۴-۴ کوانتش شار مغناطیسی	۶۵
مسائل	۶۹
فصل ۵. ابرساناهای نوع II	۷۱
۱-۵ مقدمه	۷۱
۲-۵ گردشاره ها	۷۳
۳-۵ معادله اصلاح شده دوم لندن	۷۹
۴-۵ ترمودینامیک ابرساناها	۸۷
۵-۵ میدان های بحرانی	۹۳
۶-۵ گردشاره داخل ابرساناهای ناهمسان گرد	۱۰۱
مسائل	۱۱۱

۱۱۳	فصل ۶. دینامیک گردشاره‌ها
۱۱۳	۱-۶ مقدمه
۱۱۴	۲-۶ برهم‌کنش بین گردشاره‌ها
۱۲۲	۳-۶ شبکه گردشاره‌ها
۱۲۸	۴-۶ توزیع جریان انتقالی و شار مغناطیسی در داخل ابرساناها
۱۳۱	۵-۶ شارش شار مغناطیسی در حضور جریان‌های خارجی
۱۴۰	۶-۶ میخ‌کوبی گردشاره‌ها
۱۶۱	۷-۶ روش‌های اندازه‌گیری خواص مغناطیسی
۱۶۳	مسائل
۱۶۵	فصل ۷. پدیده تونل‌زنی و پیوندگاه‌های جوزفسون
۱۶۵	۱-۷ مقدمه
۱۶۶	۲-۷ تونل‌زنی در پیوندگاه فلز-عایق-فلز (N-I-N)
۱۶۹	۳-۷ تونل‌زنی در پیوندگاه‌های رسانا-عایق-ابرسانا (N-I-S)
۱۷۱	۴-۷ تونل‌زنی در پیوندگاه ابرسانا-عایق-ابرسانا (S-I-S)
۱۸۴	۵-۷ تداخل کوانتومی ماکروسکوپی
۲۰۶	مسائل
۲۰۷	فصل ۸. نظریه گینزبرگ-لاندائو ابرسانایی
۲۰۷	۱-۸ مقدمه
۲۰۸	۲-۸ نظریه گینزبرگ-لاندائو
۲۱۷	۳-۸ معادلات گینزبرگ-لاندائو
۲۲۳	مسائل
۲۲۵	فصل ۹. نظریه میکروسکوپی ابرسانایی BCS
۲۲۵	۱-۹ مقدمه
۲۳۰	۲-۹ نظریه BCS
۲۳۱	۱-۲-۹ حالت پایه نظریه BCS
۲۳۶	۲-۲-۹ حالت‌های برانگیخته BCS در $T = 0$
۲۳۸	۳-۲-۹ نظریه BCS در دمای غیرصفر
۲۴۴	۴-۲-۹ مقاومت الکتریکی صفر و جریان دائمی
۲۴۴	مسائل
۲۴۵	مراجع
۲۴۹	نمایه

پیشگفتار

این کتاب ویراست دوم کتاب مقدمه‌ای بر ابررسانایی است. در طی سال‌هایی که از چاپ اولین ویراست کتاب می‌گذرد بازخوردهای زیادی جهت تکمیل کتاب دریافت گردید. لذا در این ویراست سعی شده است نواقص ویراست اول برطرف و نکات مربوط به بازخوردها به کتاب اضافه شود. بنابراین، این ویراست نه تنها واضح‌تر است بلکه دارای تغییراتی نسبت به ویراست اول است که باعث درک بهتر مفاهیم ابررسانایی می‌شود.

ابررساناها یکی از مهم‌ترین مواد کشف‌شده در اوایل قرن بیستم جهت استفاده کاربردی هستند. به‌عنوان مثال، از این مواد می‌توان هم برای اندازه‌گیری میدان‌های مغناطیس بسیار کوچک و هم ایجاد میدان‌های مغناطیسی دائمی بسیار بزرگ استفاده کرد. همچنین ابررسانایی با نقشی که در زمینه کاهش هزینه‌ها و افزایش بازدهی تولید و انتقال انرژی الکتریکی ایفا می‌کند، در آینده بشر نقش اساسی خواهد داشت، به‌طوری که برخی قرن ۲۱ را قرن انقلاب ابررسانایی برشمرده‌اند که به بروز تحولات بزرگی در عرصه علم و تکنولوژی منجر خواهد شد. بنابراین درک دقیق خصوصیات این مواد هم از لحاظ نظری و هم تجربی بسیار حائز اهمیت است. این امر نیز مستلزم دسترسی به متون آموزشی مناسب می‌باشد. از آنجایی که جهت آموزش ویژگی‌های ابررساناها متون درسی متناسب با سرفصل درس ابررسانایی اندک است، کتاب حاضر براساس تجربیات آموزشی نویسنده در دوره‌های کارشناسی و کارشناسی ارشد فیزیک به‌نگارش درآمد. در این کتاب سعی شده است تا ضمن حفظ سیر تاریخی کشف ابررسانایی در مواد مختلف، سیر تکاملی نظریه‌های اولیه ابررسانایی نیز به‌همراه مبانی نظری آن‌ها ارائه شود. در فصل ۱ تاریخچه ابررسانایی و مفاهیم اولیه آن مرور می‌شود. در فصل ۲ رسانایی کامل و تفاوت آن با ابررسانایی بررسی می‌گردد. در فصل ۳ مدل‌های کلاسیکی ارائه می‌شود. فصول ۴ تا ۷ به مدل کوانتومی ماکروسکوپی جهت توصیف خواص ابررسانایی شامل کوانتش شار مغناطیسی، ابررسانایی نوع II، برهم‌کنش بین گرد شاره‌ها، میخ‌کوبی شار مغناطیسی و پیوندگاه جوزفسون اختصاص یافته است. در فصل ۸ نظریه پدیده شناختی گینزبرگ-لاندائو ارائه می‌شود. سرانجام در فصل ۹ نظریه میکروسکوپی ابررسانایی، BCS، مورد بحث قرار می‌گیرد.

جهت تدوین و گردآوری این کتاب از بعضی یادداشتهای درسی پروفیسور اوستن رپ^۱، استاد بازنشسته دانشگاه KTH استکهلم سوئد و استاد راهنمای رساله دکتری این جانب استفاده شده است. بنابراین از پروفیسور رپ به خاطر اجازه استفاده از یادداشتهای درسی ایشان تشکر ویژه می‌کنم. از بازخوردهای تمام افرادی که ویراست قبلی را مطالعه کرده‌اند، تشکر ویژه دارم. از تمام افرادی که ویراست حاضر را مطالعه خواهند کرد نیز متشکر می‌شوم که مرا از نظرها و پیشنهادهای خود در جهت بهبود و تکمیل کتاب آگاه کنند. در پایان از سرکار خانم مریم همایی، کارشناس ارشد گروه فیزیک دانشگاه حکیم سبزواری که زحمت حروف چینی اولیه متن کتاب (ویراست اول) را برعهده داشتند، کمال تشکر را دارم.

شعبان‌رضا قربانی

استاد فیزیک ماده چگال دانشگاه فردوسی مشهد

بهار ۱۴۰۱

تاریخچه ابرسانایی

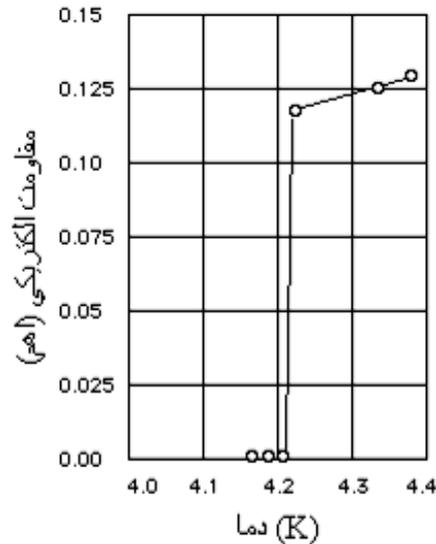
۱-۱ مقدمه

ابرسانایی تا اوایل قرن بیستم مشاهده نشده بود. دلیل این امر خیلی ساده است؛ چون مواد تحت شرایط عادی ابرسانا نخواهند شد. ابرسانایی فقط در دماهای خیلی پایین اتفاق می‌افتد. تعداد زیادی از مواد، حتی در دماهای نزدیک به صفر مطلق، نیز خواص ابرسانایی را نشان نمی‌دهند. بنابراین کشف ابرسانایی به بعد از تکنولوژی سردسازی به تعویق افتاد.

دوئر^۱، در سال ۱۸۹۸ م. موفق به مایع‌سازی هیدروژن در دمای 20 K شد. بنابراین، تنها گازی که تا آن زمان به صورت مایع در نیامده بود، گاز هلیوم بود. بنابراین مایع‌سازی هلیوم توجه محققان زیادی را به خود جلب کرد تا اینکه در سال ۱۹۰۸ م. کامرلینگ انس^۲، در دانشگاه لیدن موفق به مایع‌سازی هلیوم گردید و دسترسی به دماهای پایین حدود 1 K جهت تحقیقات بیشتر امکان‌پذیر شد. چون دمای نقطه جوش هلیوم فوق‌العاده پایین ($4/2\text{ K}$ در فشار یک اتمسفر) است، امکان انجام آزمایش‌ها در دماهای پایین و پایدار میسر می‌باشد. اندازه مقاومت الکتریکی فلزات تقریباً خالص در دماهای خیلی پایین یکی از اولین پژوهش‌ها بعد از مایع‌سازی هلیوم بود. انس که بر روی پلاتین کار می‌کرد، مشاهده کرد که مقدار مقاومت الکتریکی آن وقتی که سرد می‌شود، کاهش می‌یابد که اندازه آن به خلوص نمونه بستگی داشت. برای تحقیقات بیشتر، جیوه انتخاب شد؛ چون این فلز می‌توانست به وسیله تقطیر مکرر خالص شود. انس در سال ۱۹۱۱ م. دریافت که مقاومت ویژه الکتریکی جیوه در دمای $4/2\text{ K}$ به‌طور ناگهانی به مقدار بسیار کوچک و غیرقابل اندازه‌گیری کاهش می‌یابد. این پدیده در شکل ۱-۱ نشان داده شده است. بدین ترتیب، پدیده

1. J. Dewer
2. Kamerlingh Onnes

ابررسانایی کشف شد [۱]. دمایی که در آن مقاومت الکتریکی به طور ناگهانی افت می‌کند، دمای بحرانی ابررسانایی نامیده می‌شود.

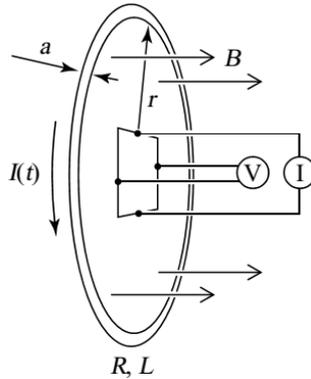


شکل ۱-۱ مقاومت الکتریکی جیوه به صورت تابعی از دما که توسط آنس در سال ۱۹۱۱ م. اندازه‌گیری شده است [۱].

روش مرسوم برای اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی استفاده از پل وتستون است. دقت و حساسیت این روش به حساسیت گالوانومتر مورد استفاده در پل بستگی دارد. اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی صفر با روش مستقیم امکان‌پذیر نیست. چون مقاومت الکتریکی صفر هم‌ارز رسانایی بی‌نهایت است و اندازه‌گیری کمیت‌های بی‌نهایت به روش مستقیم دور از دسترس است. اما با روش‌های غیرمستقیم می‌توان به این مهم رسید. یکی از مهم‌ترین مدل‌ها برای اثبات مقاومت الکتریکی صفر یا تعیین حد بالایی برای مقاومت الکتریکی القای یک جریان الکتریکی در یک حلقه ابررسانا و اندازه‌گیری تغییرات میدان مغناطیسی ایجاد شده توسط ابرجریان است. نتایج تجربی نشان می‌دهد که جریان القایی داخل یک سیم ابررسانا برای مدت‌زمان‌های طولانی ثابت باقی می‌ماند. بنابراین، این روش اندازه‌گیری این امکان را فراهم می‌کند که با اندازه‌گیری ثابت زمانی واپاشی، مقدار مقاومت الکتریکی مواد ابررسانا را می‌توان تخمین زد. برای این منظور، حلقه‌ای را در نظر بگیرید که تا زیر دمای بحرانی T_c سرد شده باشد و جریان I_0 در لحظه $t = 0$ در داخل آن به روش القایی ایجاد شود. سپس مطابق شکل ۱-۲، القای مغناطیس مربوط به جریان I_0 در مدت‌زمان طولانی، به عنوان مثال یک سال، اندازه‌گیری شود.

اگر مقاومت الکتریکی حلقه برابر R و ضریب القايدگی آن L باشد، طبق اصل بقای انرژی داریم:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} LI^2 \right) + RI^2 = 0 \quad (1-1)$$



شکل ۱-۲ روشی ساده جهت آشکارسازی کاهش جریان $I(t)$ از طریق اندازه‌گیری القای مغناطیسی ایجادشده توسط جریان. جهت اندازه‌گیری القای مغناطیسی از یک سنجه‌هال استفاده شده است.

جواب معادله (۱-۱) به صورت زیر است:

$$I(t) = I_0 e^{-\left(\frac{R}{L}\right)t} \quad (2-1)$$

که در آن I_0 جریان اولیه در $t = 0$ و $\tau = L/R$ ثابت زمانی جریان الکتریکی داخل حلقه و در نتیجه القای مغناطیس مربوطه B است.

القای مغناطیسی B ایجادشده توسط جریان $I(t)$ را می‌توان با دقت معینی که به حساسیت و دقت دستگاه اندازه‌گیری بستگی دارد، اندازه گرفت. فرض کنید حساسیت نسبی دستگاه اندازه‌گیری القای مغناطیسی برابر 10^{-5} ، یعنی $\delta B/B_0 = 10^{-5}$ ، باشد.

تغییر جریان جاری در حلقه بعد از گذشت زمان t عبارت است از:

$$\delta I = I_0 - I(t) = I_0(1 - e^{-\left(\frac{R}{L}\right)t}) \quad (3-1)$$

از طرفی، القای مغناطیسی متناسب با جریان الکتریکی است. بنابراین داریم:

$$\delta B = B_0 - B(t) = B_0(1 - e^{-\left(\frac{R}{L}\right)t}) \quad (4-1)$$

از روی معادلات (۳-۱) و (۴-۱) داریم:

$$\frac{\delta I}{I_0} = \frac{\delta B}{B_0} = 1 - e^{-\left(\frac{R}{L}\right)t} \quad (5-1)$$

مقاومت الکتریکی حلقه را می‌توان از حل معادله (۵-۱) تعیین کرد که عبارت است از:

$$R = -\frac{L}{t} \ln\left(1 - \frac{\delta B}{B_0}\right) = -\frac{L}{t} \ln\left(1 - \frac{\delta I}{I_0}\right) \quad (6-1)$$

تمام کمیت‌های طرف راست معادله (۶-۱) را می‌توان به‌طور تجربی تعیین کرد. ضریب القايدگي سيمي به قطر a که به‌صورت حلقه‌ای به شعاع r در صورتی که $r \gg a$ باشد، درآمده باشد عبارت است از:

$$L \cong \mu_0 r \ln\left(\frac{r}{a}\right) \quad (۷-۱)$$

با قرار دادن معادله (۷-۱) در معادله (۶-۱) داریم:

$$R = -\frac{\mu_0 r \ln(r/a)}{t} \ln\left(1 - \frac{\delta B}{B_0}\right) \quad (۸-۱)$$

بنابراین با معلوم بودن مشخصات حلقه و حساسیت نسبی دستگاه اندازه‌گیری القای مغناطیسی، می‌توان برای یک زمان اندازه‌گیری معین حد پایین مقاومت الکتریکی حلقه ابررسانا را تعیین کرد.

به‌عنوان مثال، قطر سیم را برابر 0.5 mm و شعاع حلقه را برابر 5 cm فرض کنید. در صورتی که حساسیت نسبی دستگاه اندازه‌گیری القای مغناطیسی $\delta B/B_0 = 10^{-5}$ باشد و اندازه‌گیری به مدت یک سال، یعنی $t = 10^7 \text{ s}$ طول بکشد، مقاومت الکتریکی برابر $R \approx 10^{-19} \Omega$ خواهد شد. در این صورت، مقاومت ویژه الکتریکی حلقه می‌شود:

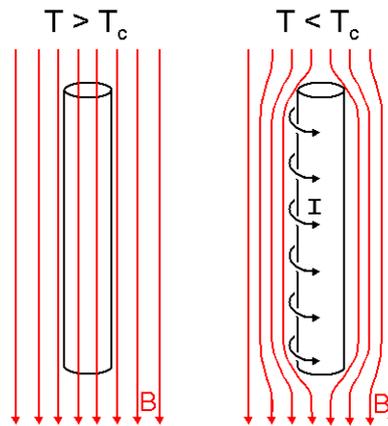
$$\rho = R \left(\frac{A}{l}\right) = R \left(\frac{\pi(\frac{d}{2})^2}{2\pi r}\right) \approx 10^{-25} \Omega \cdot m \quad (۹-۱)$$

مقاومت ویژه الکتریکی آلومینیم تقریباً خالص در دمای هلیوم مایع برابر $2.5 \times 10^{-12} \Omega \cdot m$ است. بنابراین در زیر دمای بحرانی ابررسانایی T_c آلومینیم مقاومت ویژه الکتریکی آن به اندازه 10^{-13} برابر افت می‌کند. به عبارت دیگر، مقاومت ویژه الکتریکی آلومینیم در حالت ابررسانایی 10^{-17} برابر مقاومت ویژه الکتریکی مس در دمای اتاق ($\rho_{Cu}^{273K} \approx 1.56 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$) است.

ثابت زمانی حلقه برابر $\tau = L/R \approx 10^{13} \text{ s}$ خواهد شد که حدود دو میلیون سال می‌شود. به عبارت دیگر، بایستی دو میلیون سال بگذرد تا جریان الکتریکی داخل حلقه ابررسانا به $(1/e)I_0$ عدد نپراست، یعنی تقریباً ۳۷ درصد مقدار اولیه‌اش کاهش یابد. حدهای بالایی که برای ابررساناهای دمای پایین و بالا گزارش شده‌اند، به ترتیب $3/6 \times 10^{-23} \Omega \cdot cm$ [۲] و $7 \times 10^{-23} \Omega \cdot cm$ [۳] هستند. چنین مقاومتی بیش از 10^{10} مرتبه بزرگی، یعنی 10^{10} برابر، کوچک‌تر از مقاومت مشاهده‌شده در مس فوق‌العاده خالص در دماهای پایین است.

خواص مغناطیسی مواد در حالت ابررسانایی به اندازه خواص الکتریکی آن‌ها برجسته هستند. دیامغناطیس کامل بودن، مهم‌ترین خاصیت مغناطیسی ابررساناهاست که در سال ۱۹۳۳ م. توسط مایسنر و اوشنفلد^۱، کشف شد [۴]. آن‌ها دریافتند به محض اینکه ماده به حالت ابررسانایی برسد، میدان مغناطیسی از

درون ابرسانای سرد شده در حضور میدان مغناطیسی برداشته می شود. این رفتار اثر مایسنر نامیده می شود و فقط وقتی رخ می دهد که میدان مغناطیسی نسبتاً کوچک باشد. اثر مایسنر و ویژگی دیامغناطیس کامل بودن ابرساناها در شکل ۳-۱ نشان داده شده است. بعضی از رویدادهای مهم تاریخ ابرسانایی در جدول ۱-۱ خلاصه شده اند. فیزیک مربوط به کشفیات بالا در فصول بعد توصیف خواهد شد.

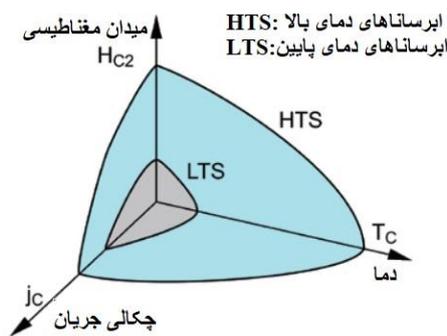


شکل ۳-۱ خاصیت دیامغناطیس کامل ابرسانا (اثر مایسنر)

جدول ۱-۱ رویدادهای مهم تاریخ ابرسانایی

مایع سازی هلیم [۱] ۱۹۰۸
کشف ابرسانایی در Hg در زیر دمای $4/2\text{ K}$ ۱۹۱۱
پیدا کردن خاصیت دیامغناطیس کامل در حالت ابرسانایی [۴] ۱۹۳۳
ارائه نظریه لندن برای ابرساناها [۵] ۱۹۳۵
کشف ابرسانا در مواد $V_7Si, A15$ با $T_c = 17/1\text{ K}$ [۶] ۱۹۵۳
ارائه نظریه کوانتومی ابرسانایی (نظریه BCS) [۷] ۱۹۵۷
تأیید تجربی کوانتیزه بودن شار به واحدهای $\Phi_0 = h/2 e $ که وجود زوج های کوپر را تأیید کرد. [۸، ۹] ۱۹۶۱
پیش بینی نظری تونل زنی زوج های کوپر توسط جوزفسون [۱۰] ۱۹۶۲
ثبت مقدار $T_c = 23/2\text{ K}$ برای فیلم های Nb_3Ge کندوپاش شده [۱۱، ۱۲] ۱۹۷۴
کشف ابرسانایی در $T_c = 30\text{ K}$ در سیستم $LaBaCuO$ [۱۳] ۱۹۸۶
کشف ابرسانایی در دمای 92 K برای $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ [۱۴] ۱۹۸۷
کشف ابرسانایی در $T_c = 91\text{ K}$ [۱۵] ۱۹۹۱
ثبت بالاترین دمای بحران ابرسانایی $T_c = 135\text{ K}$ در $HgBa_2Ca_2Cu_3O_{8-\delta}$ در شرایط محیط [۱۶] ۱۹۹۳
کشف ابرسانایی در $T_c = 39\text{ K}$ با MgB_2 [۱۷] ۲۰۰۱
کشف ابرسانایی در ابرساناهای پایه آهن [۱۸] ۲۰۰۸

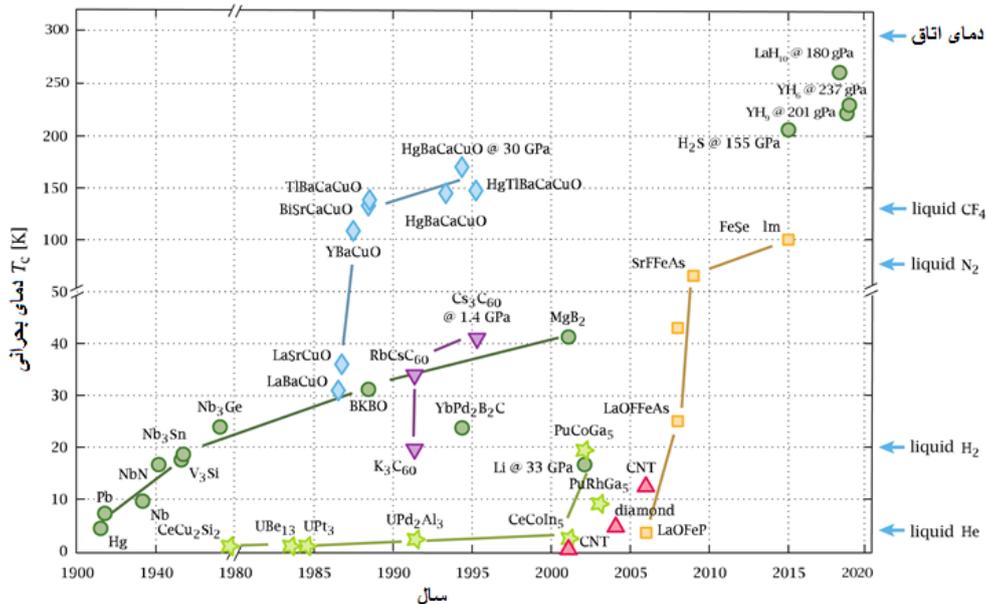
اُنس در سال ۱۹۱۳ م. کشف کرد که دمای بحرانی ابررسانایی به مقدار جریان عبوری از داخل ابررسانا بستگی دارد. به طوری که اگر جریان آستانه که جریان بحرانی نامیده می‌شود، از درون ابررسانا بگذرد، حالت ابررسانایی از بین می‌رود. او همچنین در سال ۱۹۱۴ م. گزارش کرد که میدان مغناطیسی نیز می‌تواند حالت ابررسانایی را از بین ببرد. درست همانند جریان بحرانی، یک میدان مغناطیسی بزرگ‌تر از میدان مغناطیسی بحرانی به گذار از حالت ابررسانایی به حالت عادی منجر می‌شود. بنابراین، حالت ابررسانایی توسط سه پارامتر بسیار مهم تعریف می‌شود که عبارت‌اند از: دمای بحرانی T_c ، میدان بحرانی B_c و چگالی جریان بحرانی J_c . این سه پارامتر به نوع ماده بستگی دارد. برای حفظ کردن ماده در حالت ابررسانایی لازم است که میدان مغناطیسی و جریان بحرانی همانند دمای بحرانی کمتر از مقادیر بحرانی باشد. شکل ۱-۴ به طور شمایی رابطه بین این سه پارامتر یعنی T_c ، J_c و B_c را نشان می‌دهد.



شکل ۱-۴ فاز ابررسانایی در دما، میدان مغناطیسی و جریان به اندازه کافی پایین پایدار است.

در سال‌های بعد از کشف انس، ابررسانایی در تعدادی از فلزات، آلیاژها و ترکیبات مشاهده شد. دماهای گذار فلزات و ترکیبات به طور یکنواخت افزایش یافت تا به مقدار بیشینه $T_c = 23.2 \text{ K}$ در سال ۱۹۷۲ م. برای فیلم‌های Nb_2Ge کندوپاش شده رسید [۱۱، ۱۲]. باقی ماندن این دما به عنوان بالاترین دمای بحرانی برای حدود ۱۵ سال تأکیدی است بر دشواری رسیدن به دماهای گذار بالاتر در ترکیبات بین فلزی. علاوه بر فلزات، مواد آلی و اکسیدها نیز پدیده ابررسانایی را نشان داده‌اند. اولین اکسید ابررسانا SrTiO_3 با $T_c = 0.25 \text{ K}$ در سال ۱۹۶۴ م. کشف شد [۱۹]. در پروسکایت $\text{BaPb}_{1-x}\text{Bi}_x\text{O}_3$ یک دمای بحرانی $T_c = 13 \text{ K}$ در سال ۱۹۷۵ م. پیدا شد [۲۰]. در فلوترن K_xC_6 ابررسانایی با دمای بحرانی $T_c \approx 19 \text{ K}$ کشف گردید [۱۵]. کشف ابررسانایی در اکسیدها توجه بدنورز و مولر^۱ را برای جست‌وجوی دماهای گذار بالاتر به خود جلب کرد تا آن‌ها ابررسانایی را در $(\text{La}, \text{Ba})_x\text{CuO}_4$ در اواخر سال ۱۹۸۶ م. با دمای $T_c \approx 30 \text{ K}$ کشف کردند [۱۳]. بلافاصله بعد از کشف غیرمنتظره بدنورز و مولر، دماهای گذار کاملاً بالاتر از

نقطه جوش ازت مایع در چندین ابررسانایی کوپرات با پایه‌های Y, Bi, Tl و Hg پیدا شدند. تاکنون بالاترین دمای گذار ۱۳۵ K در فشار محیط برای $HgBa_2Ca_2Cu_3O_{8-\delta}$ به دست آمده است [۱۶]. در این کوپرات، ابررسانایی در دماهای بالاتر از ۱۶۴ K تحت فشار ۳۱ GPa نیز مشاهده شده است [۲۱]. اولین ماده ابررسانایی غیراکسیدی با دمای گذار بالاتر از ۳۰ K در MgB_2 با دمای $T_c = 39$ K در سال ۲۰۰۱ م. کشف شد [۱۷]. به دنبال آن، بعد از مدتی توقف، مجدداً ابررسانایی در ابررساناهای غیرکوپرات پایه آهن شد [۱۸]. کشف شد [۱۸]. در حال حاضر امکان تعیین حد بالایی برای مقادیر T_c قابل دستیابی در ابررساناهای کوپرات، فلئورون‌ها و ابررساناهای پایه آهن ممکن نیست. شکل ۱-۵ بهبودی در دمای ابررسانایی را برحسب سال‌های کشف نشان می‌دهد.



شکل ۱-۵ بهبود دمای بحرانی ابررسانایی از سال ۱۹۱۱ م. تاکنون

۲-۱ مدل‌های ابررسانایی

برای استفاده و کاربرد بهینه از ابررساناها، درک پدیده ابررسانایی بسیار ضروری است. بدون یک مدل قابل قبول از پدیده ابررسانایی، طراحی یک دستگاه عملی مشکل است. در این قسمت مدل‌های مختلفی که از ابتدا برای توصیف این پدیده ارائه شده‌اند، به‌طور خلاصه بررسی می‌شوند. اولین مدل ارائه‌شده برای توصیف پدیده ابررسانایی، مدل کلاسیکی است. براساس این مدل، خواص اصلی ابررسانایی، یعنی مقاومت الکتریکی صفر و دیامغناطیس کامل، وارد معادلات الکترومغناطیس

می‌شوند. این کار توسط برادران لندن [۵] در سال ۱۹۳۵ م. بر مبنای تجربی و بدون در نظر گرفتن سازوکارهای میکروسکوپی در داخل ماده ارائه شد. با این حال، روابط مدل کلاسیکی بسیار مفید است؛ زیرا دقیقاً همانند طراحی دستگاه‌ها بر مبنای قانون اهم که بدون اطلاع داشتن از جزئیات فرایندهای رسانایی فلزات انجام می‌شود، می‌توان با استفاده از معادلات لندن پارامترهای مربوط به یک دستگاه ابررسانایی (مانند حافظه‌های ابررسانا، موجبرهای بدون اتلاف انرژی، و قطارهای معلق مغناطیسی) را محاسبه کرد و تخمین زد.

مدل کلاسیکی دارای دو محدودیت اصلی است: نخست، دید عمیقی از پدیده ابررسانایی را ارائه نمی‌دهد. دوم، بسیاری از خواص ابررسانایی را نمی‌توان در غالب این مدل درک کرد؛ زیرا ابررسانایی در پدیده‌های کوانتومی، خود را نشان می‌دهد، همان‌طور که فریتز لندن در سال ۱۹۴۸ م. نشان داد که دو معادله لندن ناشی از طبیعت کوانتومی ابررسانایی است. برای رفع محدودیت‌های مدل کلاسیکی، مدل کوانتومی ماکروسکوپی^۱ (MQM) گسترش یافت که علاوه بر توصیف نتایج مدل کلاسیکی می‌تواند سایر خواص ابررسانایی را که در کاربردهای عملی مهم‌اند، نیز توصیف کند. به‌عنوان مثال، از مدل MQM می‌توان برای مطالعه اسکوئیدها که هسته مرکزی دستگاه‌های ابررسانایی با مقیاس بسیار کوچک است، استفاده کرد. این مدل خواص الکترومغناطیسی و کوانتومی ابررسانایی را توصیف می‌کند.

مدل دیگری که ارتباط نزدیکی با مدل MQM دارد، مدل گیتزبرگ-لانداو است که در سال ۱۹۵۰ م. ارائه شد [۲۲]. این مدل علاوه بر خواص الکترومغناطیسی و کوانتومی ابررسانایی، خواص ترمودینامیکی آن‌ها را نیز به خوبی شرح می‌دهد و مدل بسیار توانایی برای درک عمومی پدیده ابررسانایی است.

تمام مدل‌های ارائه شده دارای سرشت پدیده‌ای هستند. به عبارت دیگر، این مدل‌ها نمی‌توانند علت رخ دادن پدیده ابررسانایی را شرح دهند. چون این پدیده یک سازوکار میکروسکوپی است که به صورت ماکروسکوپی به نمایش در می‌آید. بنابراین نیاز به یک مدل میکروسکوپی وجود دارد. نظریه BCS (برگرفته از حروف اول ارائه‌دهندگان مدل بالا) در سال ۱۹۵۹ م. توسط باردین-کوپر-شریفر^۲ ارائه شد [۷]. هسته مرکزی این نظریه زوج شدن الکترون‌ها در حالت ابررسانایی است. به این حامل‌های بار، ابرالکترون، در حالت ابررسانایی زوج‌های کوپر گفته می‌شود که ابرجریان‌ها را بدون هیچ‌گونه اتلافی حمل می‌کنند. بنابراین، بار و جرم ابرالکترون‌ها دو برابر بار و جرم یک الکترون است.

چگالی ابرالکترون‌ها به دما بستگی دارد، به طوری که در دماهای خیلی پایین‌تر از دمای بحرانی ابررسانایی، تعداد زوج‌های کوپر بیشتری تشکیل می‌شوند. انرژی بستگی زوج‌های کوپر به اندازه 2Δ است که برای ابررساناهای متعارف، یعنی ابررساناهایی که دارای دمای بحرانی کمتر از 25 K هستند، از مرتبه meV است. بنابراین برای جدا کردن زوج‌های کوپر به دو الکترون غیرمقیّد، به انرژی‌ای از مرتبه meV

1. Macroscopic Quantum Model
2. Bardeen - Cooper - Schrieffer

نیاز است. معمولاً 2Δ به عنوان گاف انرژی ابرسانایی شناخته می‌شود. یکی از ویژگی‌های ابرسانایی، داشتن گاف انرژی است که از اختلاف انرژی الکترون‌ها در حالت عادی و ابرسانایی ناشی می‌شود. گاف انرژی بر اثر برهم‌کنش بین زوج‌های کوپر جهت تشکیل یک حالت هم‌دوس است که در آن الکترون‌ها در حالت ابرسانایی دارای کمترین انرژی نسبت به حالت عادی هستند. یکی از پیش‌بینی‌های اصلی نظریه BCS آن است که نشان می‌دهد وقتی الکترون‌ها به حالتی چگالیده می‌شوند که دارای پایین‌ترین حالت کوانتومی پایدار با انرژی کمتر از انرژی گاف (2Δ) باشند.

اگرچه نظریه BCS به طور صحیح ابرساناهای متعارف را توصیف می‌کند، اما این نظریه نمی‌تواند پدیده ابرسانایی دماهای بالا را شرح دهد. با این حال، شواهد تجربی نشان می‌دهد که ابرالکترون‌ها در مواد ابرسانای دمای بالا نیز دارای بار و جرمی دو برابر یک الکترون هستند.