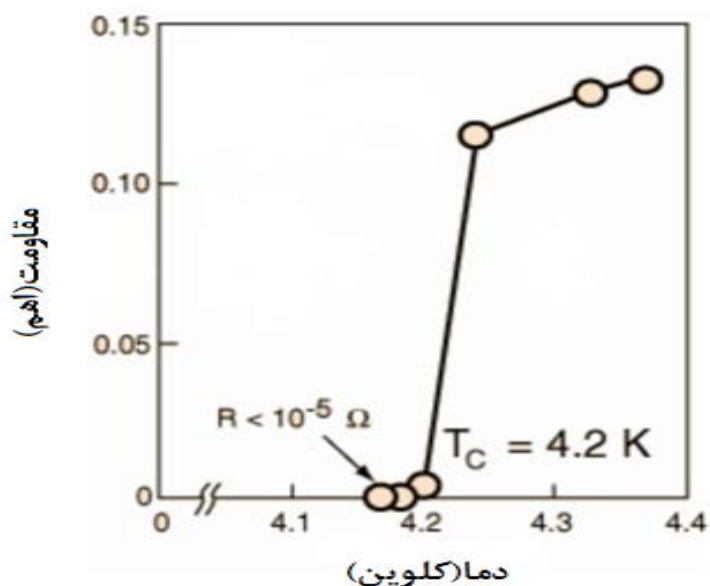


فصل اول

**ابرسانایی**

## ۱-۱ مقدمه

ابرسانایی در سال ۱۹۱۱ توسط کامرلینک اونس هلندی در دانشگاه لیدن کشف شد، او مقاومت الکتریکی جیوه جامد را در دماهای پایین بررسی کرد، و از هلیوم مایع که تازه کشف شده بود به عنوان سرد کننده استفاده نمود. او در دماهای  $4/2$  کلوین مشاهده نمود که مقاومت الکتریکی جیوه ناگهان به صفر می‌رسد به طوری که این پدیده معروف به ابرسانایی گردید. جیوه اولین ماده‌ای بود که این پدیده در آن مشاهده شد. در شکل (۱) تغییر مقاومت الکتریکی جیوه بر حسب دما رسم شده است و دمای گذار کاملاً "مشخص می‌باشد".



شکل ۱: تغییر مقاومت جیوه بر حسب تغییر دما [۱].

در سال‌های بعد تحقیق‌هایی بر روی فلزات دیگری همچون قلع و سرب انجام شد که خاصیت ابررسانایی را در دماهای خیلی پایین از خود نشان می‌دادند. این فلزات اولین نسل ابررساناها بودند. نسل بعدی آلیاژهای مرکبی مانند : وانادیم - سیلیکون، 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 ۲۳/۲ کلوین برای نیوبیم - ژرمانیم بود و تا کشف سومین نسل مواد ابررسانا در سال ۱۹۸۶ در ابررساناهای کوپرات، دمای بحرانی در این مقدار باقی ماند. در سال ۲۰۰۱ دانشمندان ژاپنی ابررسانایی را در  $MgB_2$  با دمای بحرانی ۳۹ کلوین کشف کردند [۲]. در نهایت در اوایل سال ۲۰۰۸ ابررساناهای پایه آهن کشف گردید [۱۵].

## ۱-۲ ویژگی های ابررسانایی

ابررسانایی پدیده ای است که در دماهای پایین برای برخی از مواد رخ می‌دهد. در حالت ابر - رسانایی مقاومت الکتریکی مواد صفر می‌شود. ماده خاصیت دیا مغناطیسی کامل پیدا می‌کند یعنی میدان مغناطیس را از درون خود طرد می‌کند. طرد میدان مغناطیسی تنها تفاوت اصلی ابررساناها با رسانایی کامل است زیرا در رسانای کامل وقتی ماده در حضور میدان مغناطیسی سرد می‌شود، میدان مغناطیسی ثابت می‌ماند، در حالی که در ابررساناها میدان مغناطیسی صفر است. مقاومت الکتریکی یک رسانای فلزی به تدریج با کاهش دما کاهش می‌یابد. در رسانای معمولی مانند مس و نقره وجود ناخالصی و ناکاملی‌ها این روند را کند می‌کند به طوری که حتی در دماهای نزدیک به صفر مطلق هم نمونه های معمولی مس همچنان مقاومت کمی دارند. در مقابل ابررساناها موادی هستند که اگر دماهایشان از دمای بحرانی کمتر شود ناگهان مقاومت الکتریکی خود را از دست می‌دهند.

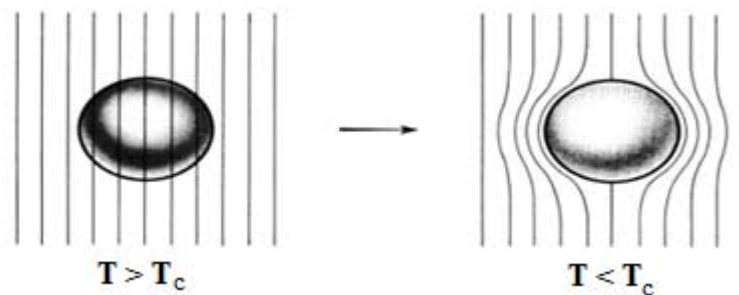
بیشتر خواص ابررساناها از موادی به مواد دیگر تغییر می‌کنند، خواصی مانند ظرفیت گرمایی و دمای بحرانی، اما گذشته از اینها دسته خاصی از خواص ابررساناها مشترک است. همه مواد ابررسانا در دماهای بسیار پایین مقاومت الکتریکی خود را از دست می‌دهند. همچنین در میدان‌های مغناطیسی ضعیف میدان مغناطیسی در درون آنها وجود نخواهد داشت. با توجه به چنین خواص مشترکی می‌توان ابررسانایی را یک تغییر فاز ترمودینامیکی در نظر گرفت و آن را گذار فازی به فاز دیگر قلمداد کرد.

## ۱-۲-۱ مقاومت صفر

یکی از روش‌های ابتدایی برای سنجش مقاومت الکتریکی مواد، قرار دادن آن‌ها در یک مدار به همراه یک منبع تغذیه و سپس اندازه‌گیری ولتاژ و جریان و محاسبه مقاومت از فرمول  $R = \frac{V}{I}$  است. اگر اختلاف پتانسیل صفر باشد، بدین معنی خواهد بود که مقاومت رسانا ضمن عبور جریان صفر خواهد بود و آن ماده یک ابررسانا است. ابررساناها می‌توانند جریان الکتریکی را بدون ولتاژ عامل حفظ کنند خاصیتی که در آهنرباهای ابررسانا استفاده می‌شود و کاربرد وسیعی دارند. آزمایشهای گوناگون نشان می‌دهند که حلقه‌ای از ابررساناها می‌تواند سالها جریان را بدون هیچ افت قابل اندازه‌گیری حفظ کند. در رساناهای معمولی جریان الکتریکی را می‌توان به صورت شار الکترون‌ها در یک شبکه یونی تصور کرد و الکترون‌ها در این حرکت به صورت پیوسته در حال برخورد با شبکه یونی هستند. در این برخوردها بخشی از انرژی الکترون‌ها به انرژی گرمایی تبدیل می‌شود که در واقع همان انرژی جنبشی شبکه یونی است، یعنی به واقع بخشی از انرژی جنبشی الکترون‌ها هدر می‌رود که این حالت را مقاومت الکتریکی می‌نامند. اما وضع در ابررساناها به گونه‌ای دیگر است در ابررساناها نمی‌توان جریان را به تک الکترون‌های جاری نسبت داد در عوض جریان توسط جفت الکترون‌های کوپر حمل می‌شود.

## ۱-۲-۲ خاصیت دیا مغناطیسی

اگر یک جسم ابررسانا تحت تاثیر میدان مغناطیسی ضعیفی قرار بگیرد خطوط میدان مغناطیسی به داخل جسم نفوذ نمی‌کنند و به سمت خارج دفع می‌شوند. مطالعه این پدیده در ابررساناها بسیار حائز اهمیت است. مایسنر و اوکسن فلد در سال ۱۹۳۳ نشان دادند که چه در حضور میدان مغناطیسی و چه درغیاب آن اگر دمای فلز به کمتر از دمای گذار کاهش یابد، جسم تبدیل به ابررسانا می‌شود و خطوط میدان مغناطیسی به داخل آن نفوذ نمی‌کنند بنابراین جسم مانند دیا مغناطیس کامل رفتار می‌کند. رفتار جسم در حالت ابررسانایی در شکل (۲) نشان داده شده است.



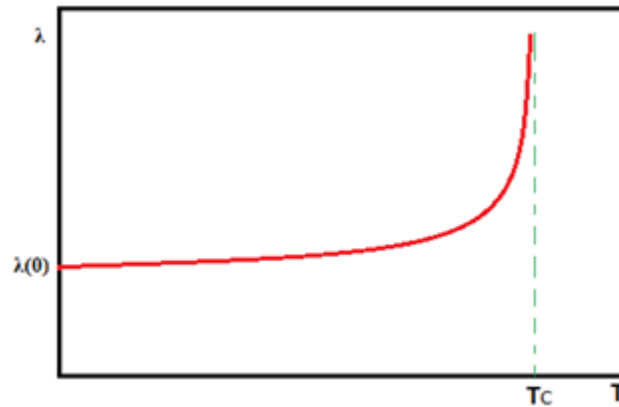
شکل ۲: اثر مایسنر در یک کره ابررسانا که در حضور میدان مغناطیسی ثابت سرد شده است، در زیر دمای بحرانی خطوط میدان از داخل کره طرد شده اند [۳].

### ۳-۱ عمق نفوذ میدان مغناطیسی

با توجه به اینکه در میدانهای مغناطیسی، خطوط میدان مغناطیسی از داخل جسم ابررسانا رانده می شود، اما میدان مذکور تا عمق بسیار کمی، به نام عمق نفوذ، بداخل آن نفوذ می کند. جریانهای پوششی باعث ایجاد یک میدان مغناطیسی در جهتی مخالف با میدان مغناطیسی اعمالی می شود و باعث می شود ابررسانا خاصیت دیا مغناطیس پیدا کند. عمق نفوذ میدان مغناطیسی ( $\lambda$ ) عبارتست از فاصله ای که در آن فاصله میدان به  $1/e$  مقدار اولیه اش در سطح جسم کاهش می یابد و تابعی از دما است که با افزایش دما مقدار آن افزایش می یابد. در دمای  $T=T_c$  عمق نفوذ بینهایت است بنابراین میدان مغناطیسی بداخل آن نفوذ می کند و ابررسانا به یک جسم عادی تبدیل می شود. رابطه عمق نفوذ با دما به صورت زیر می باشد [۴]

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

$\lambda(0)$  عمق نفوذ در دمای صفر است. شکل ۳ تغییرات عمق نفوذ نسبت به دما را نشان می دهد.



شکل ۳: تغییرات عمق نفوذ نسبت به دما [۴].

#### ۴-۱ پارامترهای بحرانی ابرسانایی

در این قسمت پارامترهای بحرانی ابرسانایی مانند دمای بحرانی، چگالی جریان بحرانی و میدان مغناطیسی بحرانی بطور مختصر معرفی می‌گردند.

##### ۴-۱-۱ دمای بحرانی $T_c$

در فلزات عادی مقاومت بطور پیوسته با افزایش دما کاهش پیدا می‌کند تا در دماهای پایین به مقدار ثابت  $\rho_0$  می‌رسد. در ابرسانا با تغییرات دما رفتار متفاوتی دیده می‌شود این مواد در یک دمای مشخص ناگهان مقاومت الکتریکی خود را از دست می‌دهند و به حالت ابرسانایی گذار پیدا می‌کنند. به این دما که در آن ماده از حالت عادی به ابرسانا گذار می‌کند دمای بحرانی یا دمای گذار گویند.

##### ۴-۱-۲ جریان بحرانی $J_c$

اونس در جریان آزمایشات خود روی فلزات ابرسانا نشان داد که برای چگالی جریان عبوری از یک ابرسانا یک مقدار آستانه وجود دارد بطوریکه اگر چگالی جریان عبوری از مقدار آستانه بیشتر شود نمونه به حالت عادی گذار می‌یابد. به این مقدار آستانه چگالی جریان بحرانی  $J_c$  می‌گویند. چگالی جریان بحرانی در ابرساناهای دمای بالا در میدان مغناطیسی صفر، با دما به صورت زیر تغییر می‌کند [۴]:

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

که در این رابطه  $\alpha$  عددی بین ۱ و ۲ می‌باشد.

### ۳-۴-۱ میدان بحرانی $H_c$

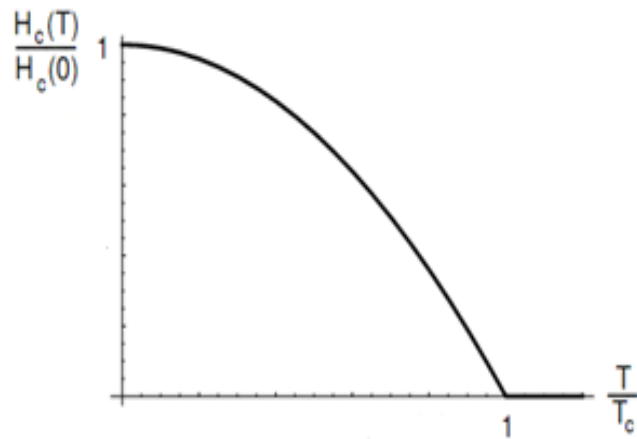
وقتی که یک نمونه ابررسانا تحت امواج الکترو مغناطیس قرار می‌گیرد پاسخی که به این امواج می‌دهد متفاوت از پاسخ فلزات معمولی است. پاسخ یک ابررسانا به میدان مغناطیسی با دامنه  $H(0)$  به صورت زیر خواهد بود [۵]

$$H(x) = H(0) \exp(-x/\lambda) \quad (3-1)$$

که در آن  $x$  فاصله از مرز محیط ابررسانا و عادی است و  $\lambda$  عمق نفوذ لندن است. آزمایشات اونس نشان داد که یک میدان مغناطیسی اعمالی مشابه جریان می‌تواند ابررسانایی را از بین ببرد که به آن میدان مغناطیسی بحرانی می‌گویند. این میدان بحرانی نیز به دما بستگی دارد و وابستگی دمایی میدان بحرانی از رابطه زیر پیروی می‌کند [۵]:

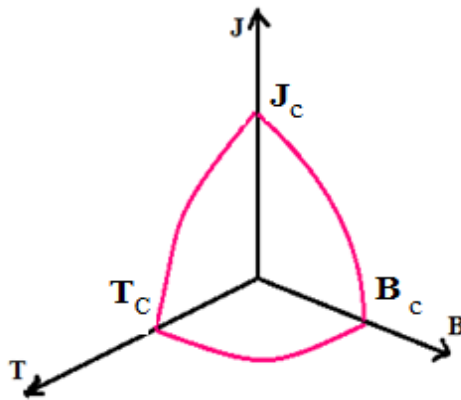
$$H_c(T) = H_c(0) \left[ 1 - \left( \frac{T}{T_c} \right)^2 \right] \quad (4-1)$$

در دمای بحرانی مقدار آن صفر و در دمای صفر مقدار آن بیشینه است. در شکل (۴) تغییرات میدان مغناطیسی بحرانی به صورت تابعی از دما برای دسته‌ای از ابررساناها به نام ابررسانای نوع I نشان داده شده است.



شکل ۴ : تغییرات میدان بحرانی با دما [۵].

همان‌طور که در قسمت‌های قبل بیان گردید دمای بحرانی تابعی از میدان مغناطیسی و جریان بحرانی است. جریان بحرانی و میدان مغناطیسی نیز تابعی از دما هستند. شکل (۵) وابستگی این پارامترها را نشان می‌دهد [۶].



شکل ۵ : نمودار فاز ابررسانا [۶].

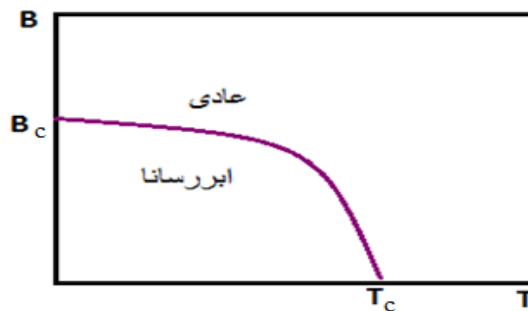
### ۱-۵ انواع ابررسانا

ابررساناها براساس رفتاری که در حضور میدان‌های مغناطیسی خارجی دارند به دو دسته، ابررسانای نوع اول (I) و ابررسانای نوع دوم (II) تقسیم می‌گردند [۷].



### ۱-۵-۱ ابرسانای نوع اول (I)

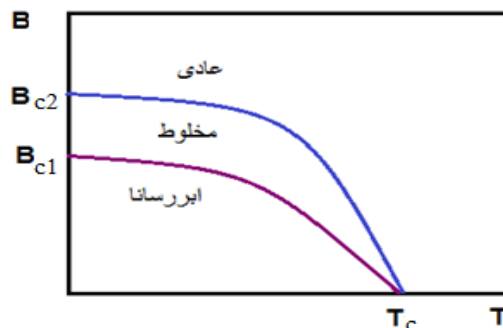
در این ابرسانا اثر مایسنر کامل است اما وقتی که میدان به مقدار بحرانی  $B_c$  می رسد اثر مایسنر و خاصیت ابرسانایی از بین می رود. بیشتر عناصر شیمیایی که خاصیت ابرسانایی دارند ابرسانای نوع I هستند. شکل (۶) نمودار فاز B-T را برای این نوع ابرساناها نشان می دهد.



شکل ۶: نمودار فاز ابرسانای نوع ۱ [۸].

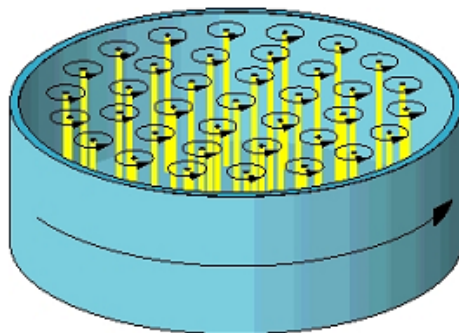
### ۱-۵-۲ ابرسانای نوع دوم (II)

در این نوع ابرساناها، وقتی میدان مغناطیسی ضعیف است اثر مایسنر کامل می باشد اما با افزایش میدان مغناطیسی وقتی که اندازه میدان به مقدار بحرانی  $B_{c1}$  که میدان بحرانی پایینی نامیده می شود، برسد میدان مغناطیسی به داخل ابرسانا نفوذ می کند و یک وضعیت مخلوط از ابرسانایی و حالت عادی ایجاد می شود. ولی همچنان در این حالت مقاومتی در برابر جریان وجود ندارد. زمانی که میدان برابر با میدان بحرانی بالایی،  $B_{c2}$ ، شود ابرسانایی از بین می رود. نمودار فاز ابرساناهای نوع II در شکل (۷) نشان داده شده است.



شکل ۷: نمودار فاز ابرسانای نوع ۲ [۸].

برخلاف ابرساناهای نوع اول که خاصیت ابرسانایی آنها در میدان مغناطیسی بحرانی بطور ناگهانی از بین می رود، در ابرساناهای نوع دوم که در میدان مغناطیسی کمتر از  $B_{c1}$  دیامغناطیس کامل هستند با افزایش میدان های مغناطیسی در میدان های بزرگتر از  $B_{c1}$  و کمتر از  $B_{c2}$ ، یک حالت آمیخته وجود دارد که علی رغم نفوذ شار، ماده همچنان در حالت ابرسانایی باقی می ماند. شار مغناطیسی به صورت استوانه هایی به نام گردشاره به داخل ماده نفوذ می کند. هر گردشاره حاوی یک کوانتوم شار  $\varphi_0 = h/2q$  است. با افزایش میدان مغناطیسی بر تعداد گردشاره ها افزوده می گردد تا اینکه تمام ماده را پر نمایند. در این حالت روی هم افتادگی شار رخ داده و ابرسانایی از بین می رود. شکل (۹) شبکه گردشاره ها در درون ابرسانا را نمایش می دهد [۹].



شکل ۸: ابرسانای نوع ۲ در حالت آمیخته [۹].

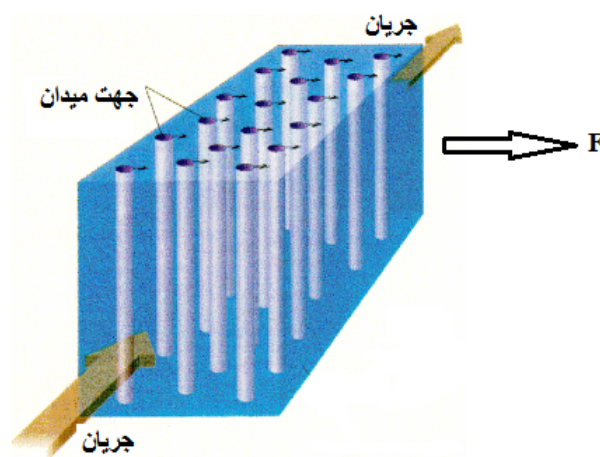
شار درون هر مغزی باعث ایجاد یک جریان گردابی در اطراف هر مغزی در جهتی مخالف با جریان سطحی دیامغناطیس نمونه می شود (مطابق شکل ۸). جریان گردابی که اطراف هر مغزی را احاطه می کند با میدان مغناطیسی حاصل از جریان گردابی دیگر مغزی ها اندرکنش می کند و در نتیجه هردو مغزی مجاور یکدیگر را دفع می کنند. به دلیل این اندرکنش ها، مغزی ها به شکل تصادفی قرار نمی گیرند بلکه تشکیل یک شبکه منتظم شش وجهی می دهند. گردشاره ها دارای الگوی منظمی هستند و تشکیل شبکه می دهند که به آن شبکه فلوکسن می گویند. شعاع گردشاره ها، طول همدوسی ( $\xi$ ) نامیده می شود که از مقیاس های طولی مهم ابرسانایی است. همچنین طول همدوسی

می‌تواند معیاری از پهنای ناحیه گذار از حالت ابرسانایی به حالت عادی و یا اندازه مسافت بیشینه بین زوج‌های کوپر باشد [۹].

### ۶-۱ میخکوبی شار مغناطیسی

ابرسانای نوع دوم در حالت مخلوط می‌تواند جریان را بدون مقاومت الکتریکی از خود عبور دهد. همانطور که در شکل ۹ نشان داده شده است در اثر عبور جریان از درون یک ابرسانا بر گرد شاره‌ها نیروی لورنتس مانند

$$F_L = J \times \Phi \quad (5-1)$$



شکل ۹: ابرسانای نوع ۲ حامل جریان در حالت مخلوط [۹] پیکان‌ها در قسمت بالای شکل جهت نیروی وارد بر گردشاره‌ها را نشان می‌دهد.

وارد می‌شود که در آن  $\Phi_0$  کوانتوم شار است. این نیرو باعث حرکت گردشاره‌ها در جهت عمود بر جریان راستای شار می‌شود. حرکت گردشاره‌ها باعث اتلاف توان و گرم شدن نمونه ابرسانا و در نهایت از بین رفتن ابرسانایی می‌شود. برای جلوگیری از این حالت باید به نحوی مانع حرکت گردشاره‌ها شد، یکی از راه‌های جلوگیری از حرکت گردشاره‌ها، ایجاد مراکز میخکوبی در داخل ابرسانا است.

هر کدام از مغزی ها می توانند به مراکز میخکوبی چسبیده و متوقف یا میخکوب شوند. اگر نیروی لورنتس مانند از نیروی میخکوبش کوچکتر باشد، مغزی ها ثابت می مانند. آلاینده های شیمیایی، رسوبات عادی، مرزخانه ها و دررفتگی ها می توانند به عنوان مراکز میخکوبی عمل کنند.

## ۷-۱ نظریه BCS

مقاومت ویژه یک فلز معمولی به علت برخورد میان الکترون های آزاد و یون های شبکه فلزی به وجود می آید. ابررسانایی را نمی توان با مدل کلاسیکی توجیه کرد زیرا الکترون ها همواره در یک شبکه کامل بدون ناکاملی و بدون ارتعاش گرمایی برخورد می کنند. پدیده ابررسانایی را فقط می توان با مدل مکانیک کوانتومی توضیح داد که بر اساس آن موج الکترونی که در شبکه بلوری کامل حرکت می کند برخورد انجام نمی دهند.

حدوداً ۵۰ سال بعد از کشف ابررسانایی، جان باردین، لئون کوپر و رابرت شریف در سال ۱۹۵۷ میلادی نظریه میکروسکوپی برای ابررسانایی ارائه دادند. این افراد در سال ۱۹۷۲ جایزه نوبل را برای تکمیل نظریه ابررسانایی دریافت کردند. این نظریه به نظریه BCS، که از اول اسم این سه دانشمند گرفته شده است، معروف است. به طور خلاصه نظریه BCS را می توان به ۳ قسمت تقسیم کرد که ابررسانایی را توصیف می کنند :

۱: تشکیل جفت های الکترون گونه در حضور یک نیروی جاذبه.

در صورتی که یک اندرکنش جاذبه بین الکترون های سطح فرمی وجود داشته باشد، جفت های ثابتی از الکترون های با بردار موج و اسپین مخالف تشکیل می شود که به آنها جفت های کوپر گویند [۱۰].

۲: جاذبه بین الکترون ها، که ارتعاشات شبکه بلوری یا همان فونون ها علت آن می باشد.

۳: تشکیل یک گاف انرژی در چگالی حالت ها در نزدیکی سطح فرمی.

نظریه BCS فقط برای ابررساناهایی که جفت شدگی الکترون - فونون ضعیفی دارند، کاربرد دارد ولی برای ابررساناهای دمای بالا نمی تواند تمام پدیده ها را توصیف کند چون فونون ها به تنهایی قادر به توصیف علت جفت شدگی حامل های بار نیستند [۱۱ و ۱۲].

فصل دوم

ابرسیاتناهای

پایه آهن

## ۱-۲ ابررساناهای دمای بالا

در ۲۷ ژانویه ۱۹۸۶ جرج بدنورز<sup>۱</sup> و آلکس مولر<sup>۲</sup> 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 پروسکایت  $BaCuO$  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، نه تنها دمای گذار این ابررساناها عامل تمایز آنها از ابررساناهای متعارف بود، بلکه ویژگی‌های خاصی نیز در این ترکیبات دیده شد. این ویژگی‌ها نشان می‌دهد که برهمکنش الکترون-فونون در نظریه BCS قادر به توجیه ابررسانش در این مواد نیست. به دلیل مشاهده این تفاوت‌ها بین ابررساناهای دمای بالا و ابررساناهای متعارف، تحقیقات گسترده‌ای برای درک سازوکار ابررسانایی در حالت ابررسانشی و همچنین تلاش‌هایی برای بالا بردن دمای گذار صورت گرفته است. در این زمینه محققین با اعمال فشار بر ترکیباتی از ابررساناهای دمای بالا، تغییر در تناسب عنصری اکسیژن، آلیش‌های مختلف در ترکیبات ابررساناهای دمای بالا و ساخت ترکیباتی از یک خانواده با استوکیومتری از عناصر تشکیل دهنده آن ترکیب، در صدد افزایش دمای گذار

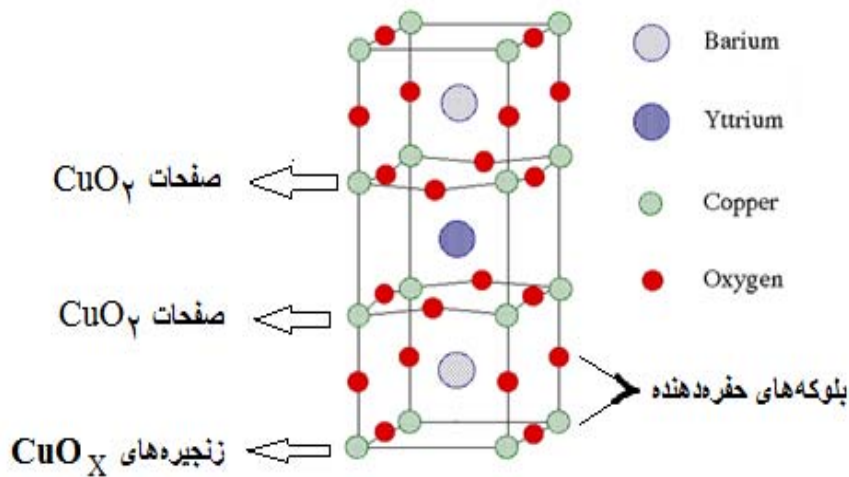
---

<sup>۱</sup> George Bednorz  
<sup>۲</sup> Alex Muller

جهت درک سازوکار حالت ابررسانشی بوده‌اند. اما تاکنون موفق به توصیف دقیق سازوکار ابررسانایی نشده‌اند [۱۳].

## ۲-۲ ساختار ابررساناهای دمای بالا

ساختار بلوری آنها به صورت نقص اکسیژن در ساختار پروسکایت است (شکل ۱). منظور از نقص همان جاهای خالی شبکه است. پروسکایت‌ها خانواده بزرگی از سرامیک‌های بلوری با یک فلز هستند که نسبت اتم‌ها به اکسیژن ۲ به ۳ است. فرمول کلی ساختار پروسکایت‌ها  $AXO_3$  است که  $A$  یک یون فلزی با ظرفیت +۲ و  $X$  یک فلز با ظرفیت +۴ است. این ابررساناها به صورت لایه‌ای هستند که در آن صفحات  $CuO_2$  در بین زنجیره‌های  $CuO_x$  و بلوک‌های حفره دهنده قرار گرفته و ساختار ابررسانا های دمای بالا (HTSC)<sup>۱</sup> را با دمای بحرانی بیشتر از ۴۰ کلوین تشکیل می‌دهند [۱۴].

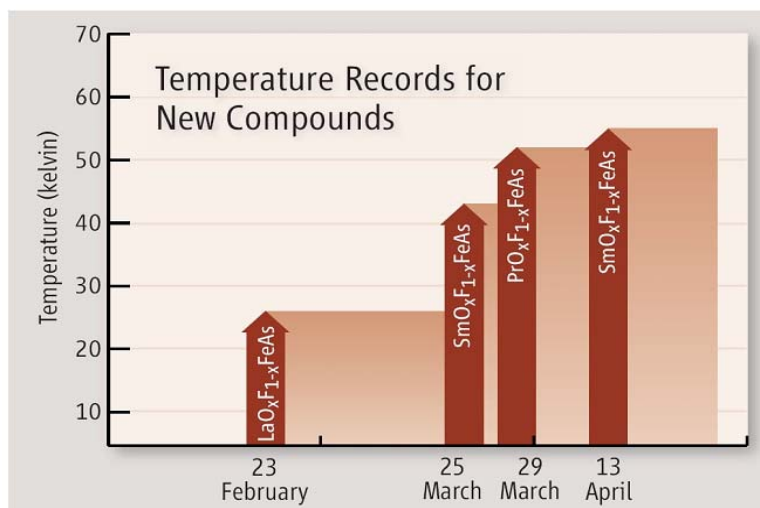


شکل ۱: ساختار بلوری ابررساناهای دمای بالا [۱۹].

## ۳-۲ ابررساناهای پایه آهن

<sup>۱</sup> - High Temperature Cuprate Superconductors

تا حدود ۳ سال پیش تمام محققین حوزه ابررسانایی بر روی ابررساناهای کوپرات و  $MgB_2$  کار می‌کردند و تقریباً تمام جوانب ابررسانایی این مواد بررسی شده است. اما در فوریه ۲۰۰۸ یوچی کامیها ابررساناهای پایه آهن با فرمول شیمیایی  $LaO_{1-x}F_xFeAs$  و دمای بحرانی  $T_c = 26$  کلوین را معرفی کرد [۱۵]. به دنبال آن مشاهده گردید که وقتی La با دیگر عناصر خاکی مانند  $R=La, Ge$  جایگزین می‌شود دمای گذار افزایش می‌یابد [۱۶]. که در شکل (۲) افزایش دمای بحرانی در ترکیبات  $ReO_{1-x}F_xFeAs$  با عناصر Re متفاوت و آرایش‌های متفاوت نشان داده شده است.



شکل ۲: نمودار تغییرات دمای بحرانی با تغییر آرایش [۱۶].

## ۴-۲ تشابه ابررساناهای پایه آهن و ابررساناهای دمای بالا

- (۱) هر دو سیستم ساختار لایه ای دارند.
- (۲) ترکیبات مادر آنها، آنتی فرومغناطیس هستند و به محض ورود آرایش (افزودن ناخالصی)، حالت ابررسانایی ایجاد می‌شود که در نتیجه دمای بحرانی تا حدودی افزایش می‌یابد.

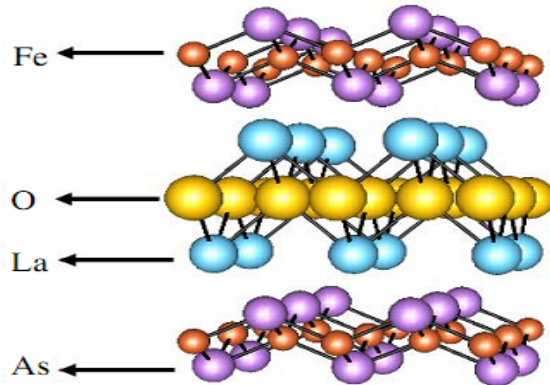


۳) نمودار فاز T-X آنها مشابه است.

۴) هر دو ابررساناهای نوع دوم (II) هستند [۱۵].

## ۵-۲ ساختار ابررساناهای پایه آهن

ابررساناهای پایه آهن<sup>۱</sup> یک ساختار تتراگونال لایه ای دارند که در شکل (۳) نشان داده شده است.



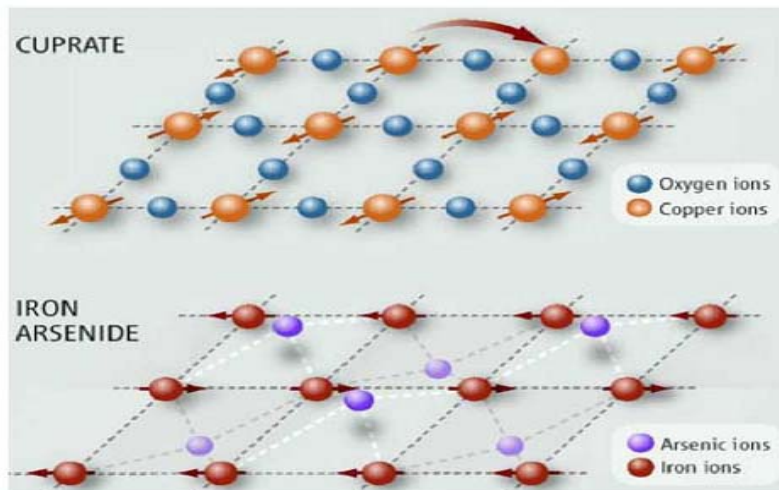
شکل ۳: ساختار یک ابررسانای پایه آهن با فرمول شیمیایی  $LaO_{1-x}F_xFeAs$  [۱۸].

ساختار لایه ای آنها شامل صفحات ReO و صفحات FeAs است که صفحات ReO، صفحات  $Fe_2As_2$  را از هم جدا می‌کند. همچنین مشابه ابررساناهای دمای بالا (HTSC)، این صفحات ReO مخازن بار هستند. در ابررساناهای پایه آهن صفحه رسانش (ابررسانایی)، صفحات  $Fe_2As_2$  است. بنابراین حامل های رسانش که به صورت دوبعدی در لایه  $Fe_2As_2$  محدود می شوند، باعث برهم کنش قوی بین الکترون‌ها می‌گردند [۱۹-۱۷]. با وارد کردن ناخالصی به ترکیب LaOFeAs یک گذار فاز ساختاری ناگهانی را به دمای کمتر از ۱۵۵ کلوین مشاهده می‌شود یعنی تقارن آن از تتراگونال به مونوکلینیک در دماهای پایین تغییر می‌کند و سپس در دمای ۱۳۷ کلوین گستره وسیعی از آنتی فرومغناطیس های نوع  $SDW^2$  گسترش می‌یابد [۲۰]. در شکل (۴) صفحات ابررسانایی هردو گروه کوپرات و ابررساناهای پایه آهن جهت مقایسه آورده شده‌اند. در ابررساناهای دمای بالا کوپرات، صفحات  $CuO_2$  وجود دارد در حالیکه در ابررساناهای پایه آهن، صفحات FeAs هستند. الکترون های  $As-4p$  در مقایسه با الکترون های  $O-2p$  در ابررساناهای پایه آهن غیرجایگزیده تر

<sup>۱</sup> - Pinictides

<sup>۲</sup> - Spin Density Wave

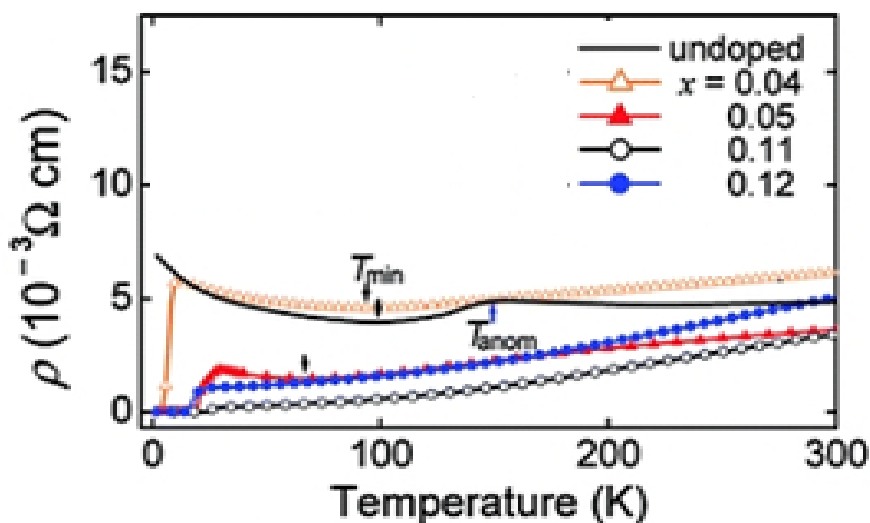
هستند. ترکیب مادر در ابررساناهای دمای بالا کوپرات، عایق است اما در ابررساناهای پایه آهن ترکیب مادررسانای ضعیف یا بعضی اوقات نیمه رسانا است. در کوپرات‌ها اسپین آن‌ها با صفحات زاویه‌دار می‌باشد، اما در ابررساناهای پایه آهن در راستای صفحات قرار می‌گیرند.



شکل ۴: لایه‌های ابررساناهای پایه آهن و کوپرات‌ها. در ابررساناهای پایه آهن صفحه  $As-Fe-As$  مسئول ابررسانایی است [۱۹].

## ۶-۲ خواص ابررسانایی

در شکل ۵ نمودار مقاومت بر حسب دما برای ابررساناهای پایه آهن نشان داده شده است [۲۱]. همان‌طور که در شکل (۵) مشخص است تا زمانی که نمونه غیرآلاییده است حالت ابررسانایی وجود ندارد اما به محض ورود آلایش، حالت ابررسانایی ایجاد می‌شود. در ترکیبات ابررسانای آلاییده همان‌طور که برای ترکیب فلزی انتظار داریم،  $\rho$  با کاهش دما، کاهش پیدا می‌کند. در  $T_C=24$ ،  $\rho$  ناگهان کاهش پیدا می‌کند که بیانگر خاصیت ابررسانایی است.



شکل ۵: مقاومت الکتریکی ( $\rho$ ) بر حسب دما ( $T$ ) برای نمونه غیرآلاییده و  $La[O_{1-x}F_x]FeAs$

$x=0.04, 0.05, 0.11, 0.12$ : [ ۲۱ ] .

در جدول ۳ بعضی از پارامترهای ابرسانایی مانند عمق نفوذ لندن، طول همدوسی و میدان بحرانی ابرساناهای دمای بالای کوپرات و پایه آهن آورده شده است.

جدول ۳: عمق نفوذ، طول همدوسی و میدان بحرانی برای ابرساناهای دمای بالا و ابرساناهای پایه آهن [ ۲۱ ] .

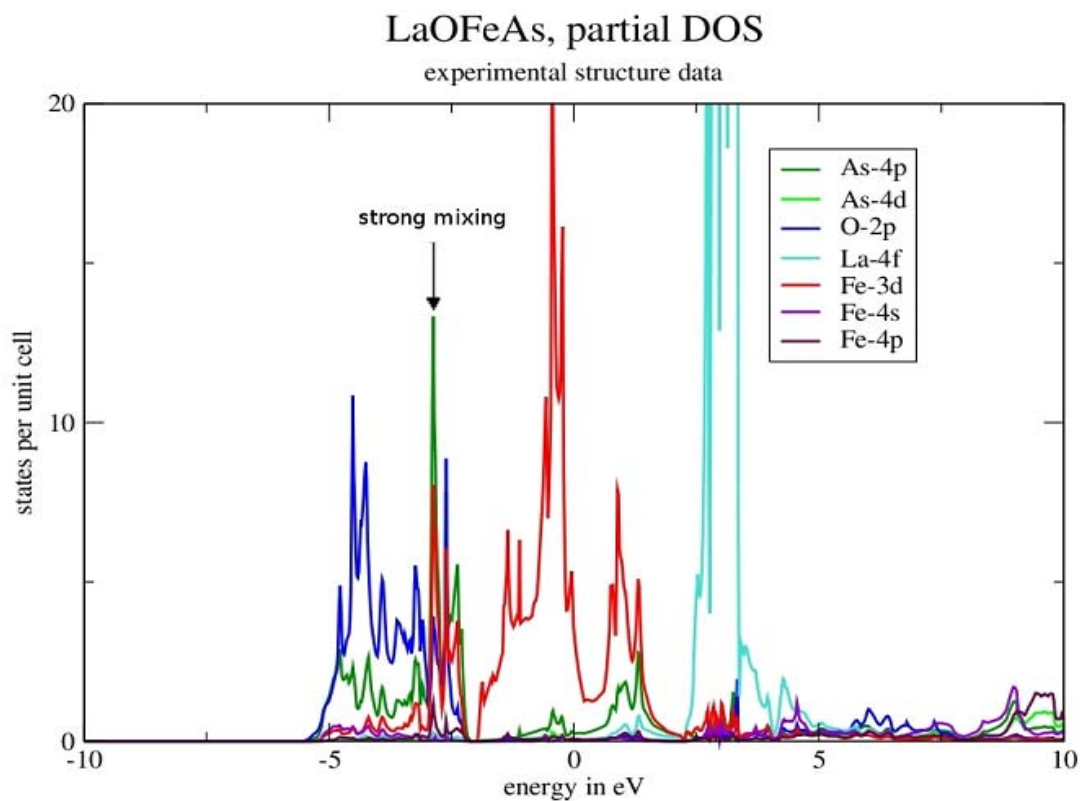
ابرسانا	$\lambda$ [nm]	$\xi$ [nm]	B[T]
کوپرات‌ها	۱۰۰~۲۵۰	۱~۲	۴۰۰
پایه آهن	۱۸۰~۲۵۰	۱~۵	۵۰

همانطور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود پارامترهای ابرسانایی برای ابرساناهای کوپرات و ابرساناهای پایه آهن تقریباً یکسان هستند. هر دو خانواده ابرساناها دارای میدان بحرانی بالایی هستند که استفاده کاربردی را امکان پذیر می‌کند.

## ۷-۲ چگالی حالت‌ها

نمودار چگالی حالت‌ها بر حسب انرژی برای ابررسانای پایه آهن در شکل ۶ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود حالت‌های غالب در سطح فرمی ناشی از حالت‌های اتمی Fe-3d هستند که از  $-2\text{ eV}$  تا  $2\text{ eV}$  گسترده شده‌اند. در  $-2.7\text{ eV}$  که نوار As-4p کشیده شده یک آمیختگی شدید با نوار Fe-3d مشاهده می‌شود [۲۲]. چگالی حالت بالای  $E_F$  به این معناست که با نوار n رسانا سروکار داریم.

حالت‌های O-2p مشابه حالت‌های F-2p، ضرورتاً اشغال شده‌اند، از آنجا که فلئوئر نسبت به اکسیژن الکترونگاتیویته بالاتری دارد و همچنین تعداد الکترون‌های لایه ظرفیت فلئوئر یکی کمتر از اکسیژن است، با جایگزینی F با O، یک الکترون را به لایه Fe-3d وارد می‌کند. همان‌طور که در شکل (۷) نشان داده شده است در اثر جایگزینی F به جای اکسیژن در ترکیب LaOFeAs، الکترون اضافی وارد بلوکه مخزن بار، LaO، می‌گردد. این الکترون‌های اضافی سپس به لایه FeAs که مسئول ابررسانایی در این ابررساناها است، انتقال می‌یابد [۲۲].



شکل ۶: چگالی حالت‌ها به ازای سلول واحد بر حسب انرژی  $\text{eV}$  [۲۲].