



سوگند نامه دانش آموختگان دانشگاه تربیت معلم سبزواری

## بسم الله الرحمن الرحيم

اکنون که با عنایات و الطاف بیکران الهی و با بهره مندی از نعمت های بی شمار او تحصیلاتم را در این دانشگاه به پایان رسانده ام و در آستانه مرحله جدیدی از ایفای وظیفه خطیر علمی قرار دارم، در برابر قرآن کریم، به خداوند قادر متعال که بر پیدای و پنهان آگاه است، سوگند یاد می کنم که همواره در عمل به وظایف آموزشی، پژوهشی و اجتماعی در صدد کسب رضای او، تعالی انسانها و وفادار به آرمان های والای انقلاب اسلامی و خدمتگوار ملت شریف ایران باشم و خداوند بزرگ را در همه حال، ناظر برگفتار و کردار خود بدانم.

نام و نام خانوادگی وامضای دانشجو

مریم باشی

## فهرست مطالب

| عنوان                                 | صفحه |
|---------------------------------------|------|
| <b>فصل اول: مقدمه‌ای بر ابرسانایی</b> |      |
| ۱-۱ پیشگفتار.....                     | ۲    |
| ۲-۱ ابرساناهای معمولی.....            | ۳    |
| ۱-۲-۱ دمای گذار ابرسانایی.....        | ۳    |
| ۲-۲-۱ مقاومت الکتریکی صفر.....        | ۴    |
| ۳-۲-۱ جریان بحرانی.....               | ۵    |
| ۴-۲-۱ میدان مغناطیسی بحرانی.....      | ۶    |
| ۵-۲-۱ رفتار مغناطیسی یک ابرسانا.....  | ۸    |
| ۶-۲-۱ نظریه BCS.....                  | ۱۰   |
| ۷-۲-۱ ابرسانای نوع I و II.....        | ۱۱   |
| ۸-۲-۱ میخکوبش شار مغناطیسی.....       | ۱۲   |
| ۳-۱ ابرساناهای دمای بالا.....         | ۱۴   |

## فصل دوم: خواص ابرسانایی $MgB_2$

|  |    |
|--|----|
| ۱-۲ مقدمه.....   | ۱۸ |
| ۲-۲ ساختار بلوری و الکترونی $MgB_2$ .....                        | ۱۹ |
| ۳-۲ تکنیک ساخت.....  | ۲۱ |
| ۱-۳-۲ ابرسانای $MgB_2$ در حالت بلوکه‌ای.....                     | ۲۱ |
| ۱-۱-۳-۲ روش در محل.....  | ۲۱ |
| ۲-۱-۳-۲ روش فشار در حرارت بالا (HIP).....                        | ۲۲ |
| ۲-۳-۲ روش ساخت نوارها و سیم‌های ابرسانای $MgB_2$ .....           | ۲۳ |
| ۱-۲-۳-۲ روش پودر - در- لوله (PIT).....                           | ۲۳ |
| ۳-۳-۲ روش‌های ساخت پیوسته.....                                   | ۲۴ |
| ۴-۲ خواص پایه‌ی $MgB_2$ .....                                    | ۲۶ |
| ۱-۴-۲ دمای بحرانی $T_c$ .....                                    | ۲۶ |
| ۲-۴-۲ جریان بحرانی، $I_c$ و میخکوبش شار.....                     | ۲۶ |
| ۳-۴-۲ تأثیر بلورینگی و اندازه‌ی دانه روی چگالی جریان بحرانی..... | ۲۸ |
| ۴-۴-۲ تأثیر پودر اولیه Mg روی ابرسانایی $MgB_2$ .....            | ۲۹ |
| ۵-۴-۲ تأثیر پودر اولیه بورن روی ابرسانایی $MgB_2$ .....          | ۳۰ |
| ۵-۲ تأثیر آلاینده‌های شیمیایی روی ابرسانایی $MgB_2$ .....        | ۳۰ |

|    |  |
|----|--|
| ۳۰ | ..... ۱-۵-۲ کربن                             |
| ۳۳ | ..... ۲-۵-۲ نانو لوله کربن CNT               |
| ۳۳ | ..... ۳-۵-۲ فلزات                            |
| ۳۳ | ..... ۱-۳-۵-۲ آلومینیوم                      |
| ۳۴ | ..... ۲-۳-۵-۲ روی                            |
| ۳۴ | ..... ۳-۳-۵-۲ پوشش طلا                       |
| ۳۴ | ..... ۴-۳-۵-۲ کادمیوم                        |
| ۳۵ | ..... ۵-۳-۵-۲ آهن                            |
| ۳۵ | ..... ۶-۳-۵-۲ لانتانیم                       |
| ۳۵ | ..... ۷-۳-۵-۲ زیرکونیوم                      |
| ۳۶ | ..... ۸-۳-۵-۲ دیگر فلزات                     |
| ۳۶ | ..... ۴-۵-۲ اکسیدها و دیگر فلزات             |
| ۳۶ | ..... Bi-2212 ۱-۴-۵-۲                        |
| ۳۷ | ..... Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ۲-۴-۵-۲ |
| ۳۷ | ..... MgO ۳-۴-۵-۲                            |
| ۳۷ | ..... ۴-۴-۵-۲ ترکیبات سیلسیدی                |
| ۳۸ | ..... SiO <sub>2</sub> ۵-۴-۵-۲               |
| ۳۸ | ..... ZrB <sub>2</sub> ۶-۴-۵-۲               |
| ۳۸ | ..... WB ۷-۴-۵-۲                             |
| ۳۹ | ..... ۶-۲ کابرد MgB <sub>2</sub>             |

### فصل سوم: مدل‌های میخکوبش شار مغناطیسی

|    |   |
|----|---|
| ۴۴ | ..... ۱-۳ مقدمه                                     |
| ۴۶ | ..... ۲-۳ مدل میخکوبش دو-هوغس                       |
| ۴۹ | ..... ۳-۳ مدل میخکوبش شی                            |
| ۵۲ | ..... ۴-۳ مدل میخکوبش پرکینز                        |
| ۵۳ | ..... ۵-۳ سازوکار میخکوبش $\delta T_c$ و $\delta I$ |

### فصل چهارم: روش‌های اندازه‌گیری

|    |                          |
|----|--------------------------|
| ۵۸ | ..... ۱-۴ مشخصات ساختاری |
| ۵۸ | ..... ۱-۱-۴ پراش پرتو X  |

|         |  |
|---------|--|
| ۵۹..... | ۲-۱-۴ میکروسکوپ الکترونی روبشی SEM                 |
| ۶۰..... | ۲-۴ اندازه‌گیری دمای بحرانی                        |
| ۶۳..... | ۳-۴ اندازه‌گیری چگالی جریان بحرانی                 |
| ۶۵..... | ۵-۴ تعیین میدان بحرانی بالایی و میدان برگشت‌ناپذیر |

## فصل پنجم: نتایج .

|         |   |
|---------|---|
| ۶۷..... | ۱-۵ روش آماده‌سازی                                      |
| ۶۹..... | ۲-۵ تعیین جریان بحرانی                                  |
| ۷۲..... | ۳-۵ میدان‌های برگشت‌ناپذیر و بحرانی بالایی              |
| ۷۴..... | ۴-۵ بررسی سازوکار میخکوبش (مدل شی)                      |
| ۷۶..... | ۵-۵ بررسی سازوکار میخکوبش (مدل دو-هوگس)                 |
| ۷۹..... | ۶-۵ مدل حرکت گردشاره‌ای فعال شده به طور حرارتی (پرکینز) |
| ۸۱..... | ۷-۵ بررسی سازوکار میخکوبش (مدل گرایسن)                  |
| ۸۷..... | جمع‌بندی  |
| ۸۸..... | مراجع   |
| ۹۷..... | مقالات  |

# فصل اول

مقدمه‌ای بر ابرسانایی

## ۱-۱ پیشگفتار

هنگامی که فلزات و آلیاژها تا دماهای پایین، که غالباً در گستره‌ی دمای هلیوم مایع است، سرد شوند مقاومت ویژه الکتریکی آن ناگهان صفر می‌شود. این پدیده را نخست کامرلینگ اونس<sup>۱</sup> در لیدن<sup>۲</sup> در سال ۱۹۱۱، سه سال بعد از آن که برای اولین بار هلیوم را به صورت مایع در آورد، مشاهده کرد [۱]. از مهمترین خواص ابررساناها می‌توان به مقاومت الکتریکی صفر و دیامغناطیس کامل اشاره کرد. در زیر دمای بحرانی،  $T_c$ ، مقاومت الکتریکی مواد ابررسانا صفر می‌شود. در سال‌های بعد ابررسانایی در تعدادی از فلزات، آلیاژها و ترکیبات مشاهده شد. علاوه بر فلزات؛ مواد آلی و اکسیدها نیز از خود خواص ابررسانایی را نشان می‌دهند. تا آن که کشف ابررسانایی در اکسید فلزی از مس-لانتانیم-باریوم توسط بدنورز<sup>۳</sup>-مولر<sup>۴</sup> در سال ۱۹۸۶ در موسسه‌ی IBM سوئیس توجه فیزیکدانان را به پدیده‌ی ابررسانایی دمای بالا<sup>۵</sup> (HTSC) جلب کرد [۲].

طی مدت زمان کوتاهی پس از کشف ابررسانایی در دمای بالا، دماهای گذار بالاتر به سرعت قابل دسترسی شدند، این پیشرفت سریع عمدتاً به دلیل ساخت آسان ابررساناهای دمای بالا با استفاده از روش‌های ساخت سرامیک‌های معمولی است. به طوری که هر روز شاهد خلق آزمایش‌ها و ابزارهای جدید برای شناسایی و مطالعه‌ی خواص ابررساناها و حتی ابررساناهای متعارف و فرمیون‌های سنگین و ابررسانای آلی ... هستیم. یک مرحله مهم در مسیر رسیدن به ابررساناهای توان بالا، توجه به فرآیندهای ساختی است که به خواص فیزیکی مطلوب، و به هزینه‌های رسانایی قابل قبول منجر می‌شود. در این فصل پدیده‌ی ابررسانایی برای ابررساناهای

---

<sup>1</sup> H. Kamerling Onnes

<sup>2</sup> Leiden

<sup>3</sup> J. G. Bednorz

<sup>4</sup> K. A. Müller-

<sup>5</sup> High Temperature SuperConductor

متعارف و مشخصه‌های اساسی مربوطه به آن به طور خلاصه توضیح داده می‌شود. در فصل دوم به طور خاص ابرسانای  $MgB_2$  مورد بررسی قرار می‌گیرد. که در بررسی سازوکار میخکوبش این ابرسانا چندین مدل در فصل سوم معرفی می‌شوند. در فصل‌های چهارم و پنجم به ترتیب روش‌های اندازه‌گیری و نتایج ارائه خواهد شد.

## ۲-۱ ابرساناهای معمولی

اولین ماده ابرسانا فلز جیوه است که توسط اونس کشف شد. در اوایل قرن بیستم، ابرسانایی به طور سیستماتیک از طریق جدول تناوبی عناصر تعقیب گردید و کارهای اولیه روی مواد ابرسانا در آزمایشگاه‌های دمای پایین انجام گرفت. پژوهشگران تجربی دمای گذار بالاتر را در مواد غیر معمول دنبال کردند که این تلاش‌ها منجر به کشف ابرساناهای آلی، ابرساناهای فرمیون سنگین و ابرساناهای با چگالی کم الکترون شد. در تمام این مدت  $30\text{K}$  عدد جادویی شد که امکان دستیابی به ابرسانایی در دماهای بالاتر را غیر ممکن می‌نمود. با کشف خاصیت ابرسانایی در ترکیب اکسیدی این سد شکست. این امر که ترکیبات اکسیدی خاصیت ابرسانای از خود بروز دهند خود به قدر کافی عجیب بود چه برسد به این‌که دمای گذار این ترکیبات اکسیدی جدید در محدوده‌ای از دماها که نسبت به ابرساناهای قبلی بسیار بالاتر است، قرار گیرد.

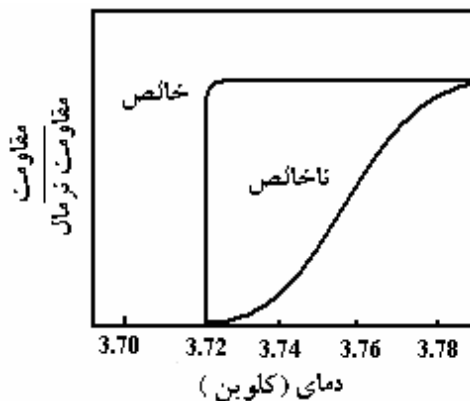
با کشف ترکیبات اکسیدی  $(RE-123)REBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ ، که در آن RE عناصر خاکی نادر به جز Ce و Pr است، ابرساناها برحسب دمای بحرانی‌شان به دو دسته‌ی ابرساناهای دمای پایین (متعارف) و ابرساناهای دمای بالا تقسیم شدند.

## ۱-۲-۱ دمای گذار ابرسانایی

دمایی که ابرسانا در آن دما مقاومت الکتریکی خودش را از دست می‌دهد دمای گذار یا دمای بحرانی ابرسانا،  $T_c$ ، نامیده می‌شود که برای هر ماده‌ی ابرسانا متفاوت است. پایین بودن دمای گذار ابرسانایی، در حدود دمای هلیوم مایع، مشکل اساسی در ابرسانایی متعارف بود که با کشف سرامیک‌های دمای بالا، این دما به حدود  $100\text{K}$  افزایش یافته و آینده‌ی روشنی را پیش رو می‌گذارد. تصور دست یافتن به خاصیت ابرساناهای در دمای

اتاق به معنای رسیدن به مقاومت الکتریکی صفر و دستیابی به شدت جریان‌ها و میدان‌های مغناطیسی بسیار بالا در دمای اتاق است که موارد کاربرد بسیاری در علوم و صنایع دارد. تاکنون بالاترین دمای گذار  $K$  ۱۳۵ در فشار محیط برای  $HgBa_2Ca_2Cu_3O_{8+\delta}$  به دست آمده است [۴,۳]. در این ترکیب، ابرسانایی در دماهای بالاتر  $K$  ۱۶۴ تحت فشار  $GPa$  ۳۱ نیز مشاهده شده است [۵].

گرچه ناخالصی‌های مغناطیسی دمای گذار را پایین می‌آورند ولی در حالت کلی دمای گذار به مقادیر کم ناخالصی وابسته نیست. اگر نمونه خیلی خالص و از لحاظ فیزیکی کامل و ایده‌آل باشد، در هنگام سرد شدن گذار به حالت ابرسانایی ممکن است خیلی سریع باشد، در صورتی که در نمونه ناخالص و یا دارای نواقص بلوری محدوده‌ی گذار ممکن است به طور قابل توجهی پهن‌تر شود [۶]. شکل ۱-۱ گذار از حالت عادی به حالت ابرسانایی را برای نمونه‌های فلزی خالص و ناخالص را نشان می‌دهد.



شکل ۱-۱. گذار به حالت ابرسانایی برای فلز قلع [۶].

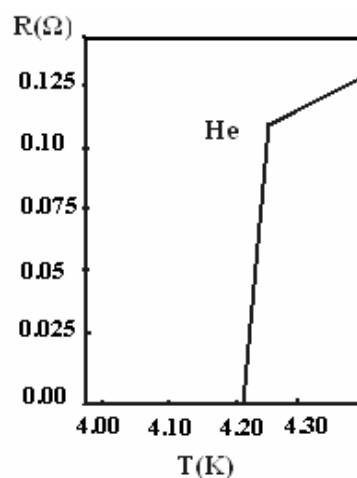
## ۲-۲-۱ مقاومت الکتریکی صفر

یکی از اولین بررسی‌هایی که اونس با دستیابی به درجه حرارت پایین انجام داد، مطالعه تغییرات مقاومت ویژه الکتریکی فلزات بر حسب دما بود. اونس در سال ۱۹۱۱ دریافت که مقاومت ویژه الکتریکی جیوهی خالص (حاصل از تقطیرهای مکرر در خلأ) در دمای تقریبی  $K$  ۴/۲ به طور ناگهانی به یک مقدار غیر قابل اندازه‌گیری



افت می‌کند، همان طور که در شکل ۱-۲ نشان داده شده است این اتلاف مقاومت الکتریکی در داخل محدوده دمای کمتر از  $0.1\text{ K}$  رخ می‌داد [۷].

البته به طریق تجربی نمی‌توان ثابت کرد که مقاومت حقیقتاً صفر می‌شود بلکه مقاومت نمونه ممکن است همیشه کمتر از دامنه حساسیت دستگاه‌های مورد استفاده در اندازه‌گیری‌ها باشد. در هر صورت هیچ آزمایشی تا به حال نتوانسته است مقاومتی را در حالت ابررسانایی ثبت کند [۶]. بنابراین پذیرفتنی است که مقاومت الکتریکی در زیر  $T_c$  صفر فرض شود.



شکل ۱-۲. مقاومت الکتریکی نمونه‌ای از هلیوم به اهم برحسب دمای مطلق [۹].

مفیدترین روش برای تعیین بیشترین مقاومت الکتریکی در حالت ابررسانایی، القاء یک جریان الکتریکی در داخل یک حلقه ابررسانا و سپس آشکارسازی تغییر میدان‌های مغناطیسی تولید شده توسط ابرجریان‌ها است [۱].

### ۱-۲-۳ جریان بحرانی

آزمایش‌های اونس در سال ۱۹۱۳ نشان داد که اگر یک فلز بخواهد ابررسانا باقی بماند اندازه حرکت خالص ابرالکترون‌ها نباید از یک مقدار معلوم بیشتر شود. به این دلیل مقدار چگالی جریان بدون مقاومت

الکتریکی که از هر ناحیه‌ی فلز می‌گذرد، دارای یک حد خواهد بود که چگالی جریان بحرانی  $J_c^1$  نامیده می‌شود [۷،۶]. اگر جریان از این حد بگذرد مقاومت الکتریکی در نمونه ظاهر می‌شود و ابرسانایی از بین می‌رود. هم‌چنین مشخص شد که مقدار چگالی جریان بحرانی با کاهش دما افزایش می‌یابد [۷]. چگالی جریان بحرانی یکی از شروط مهم برای عملیاتی کردن اقتصادی قطعات ابرسانا است، طوری که برای کاربردهای آهن‌ربایی و انرژی به سیم‌های ابرسانای بلند با چگالی جریان بحرانی بسیار بالاتر از  $10^4 \text{ A/cm}^2$  نیاز است [۸].

## ۱-۲-۴ میدان مغناطیسی بحرانی<sup>۲</sup>

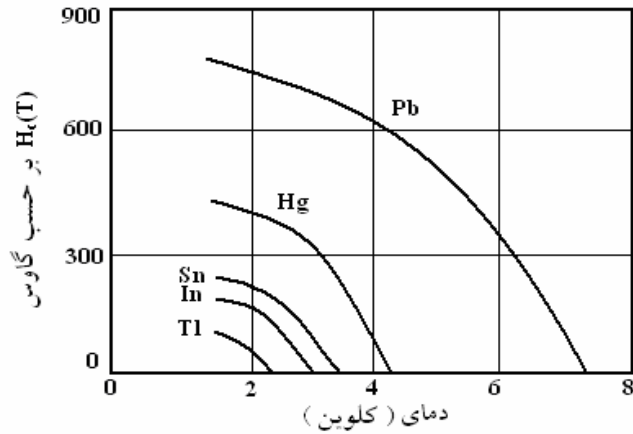
در سال ۱۹۱۴، اونس دریافت که یک میدان مغناطیسی به اندازه کافی قوی ابرسانایی را از بین می‌برد. آستانه یا مقدار بحرانی میدان مغناطیسی خارجی که باعث از بین رفتن ابرسانایی در ابرساناهای متعارف می‌شود با  $H_c(T)$  که تابعی از دماست، نشان داده می‌شود [۷،۹]. به طور تجربی مشاهده شده است که این میدان بحرانی تقریباً به صورت تابعی از مربع دما کاهش پیدا می‌کند در نتیجه منحنی‌های میدان به صورت خیلی نزدیک با هذلولی‌هایی به فرم زیر در نظر گرفته شده‌اند [۶]:

$$H_c = H_0 [1 - (T/T_c)^2] \quad (1-1)$$

که در این رابطه  $H_0$  میدان بحرانی در صفر مطلق و  $T_c$  دمای گذار است. هر ابرسانا یک مقدار مشخصی  $H_0$  و  $T_c$  دارد. معمولاً دمای گذار  $T_c$  و میدان بحرانی به ساختار بلوری بستگی دارند [۱]. فلزاتی که دمای گذار پایینی دارند دارای میدان بحرانی پایینی در صفر مطلق می‌باشند. شکل ۱-۳ منحنی  $H_c(T)$  را برای ابرساناهای متعارف نشان می‌دهد.

<sup>1</sup> Critical current density

<sup>2</sup> Critical magnetic field

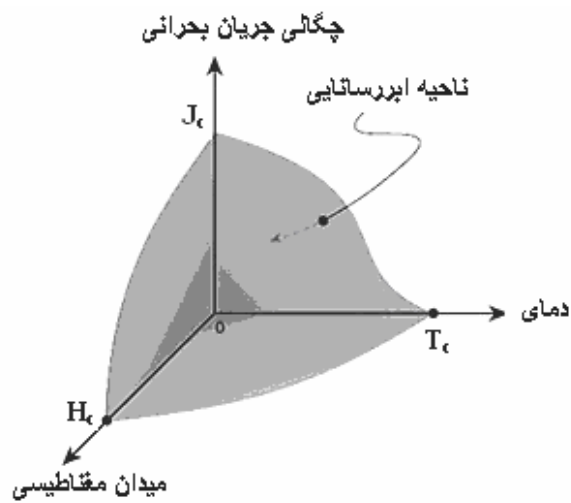


شکل ۳-۱. منحنی آستانه میدان بحرانی  $H_c(T)$  بر حسب دما برای چند ابررساناهای متعارف [۹].

نمودار فاز میدان مغناطیسی، جریان و ارتباط آن‌ها با دما در شکل ۴-۱ نشان داده شده است. در فضای

سه بعدی  $(T, H, J)$  سطحی مشخص شده است که به ازاء مقادیر سه‌گانه مزبور در خارج از این سطح، جسم در

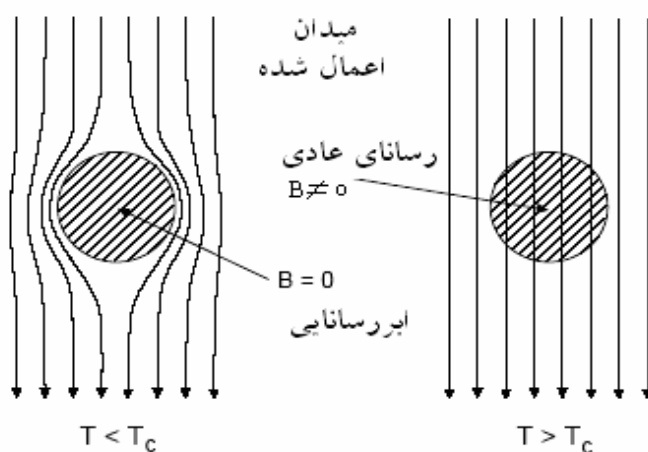
حالت عادی خواهد بود.



شکل ۴-۱. نمودار فاز میدان مغناطیسی، جریان و دما در ابررسانا [۱۰].

## ۵-۲-۱ رفتار مغناطیسی یک ابررسانا

اگر ابررسانا در یک میدان مغناطیسی خارجی ضعیف قرار داده شود، میدان فقط تا فاصله کمی در ابررسانا نفوذ می‌کند که عمق نفوذ لندن<sup>۱</sup>  $\lambda_L$  نامیده می‌شود. پس از این فاصله میدان به سرعت به صفر میل می‌کند. در سال ۱۹۳۳ دو دانشمند آلمانی به نام‌های مایسنر<sup>۲</sup> و اوکسنفلد<sup>۳</sup> توزیع شار مغناطیسی را در خارج فلزات قلع و سرب که در داخل میدان مغناطیسی تا دمای گذار سرد شده بود اندازه‌گیری کردند. آنها دریافتند که نمونه‌های مورد آزمایش با وجودی که در داخل میدان مغناطیسی سرد شده بودند در دمای گذارشان به طور آنی به یک دیامغناطیس کامل تبدیل شدند این پدیده اثر مایسنر نام دارد که در شکل ۵-۱ نشان داده شده است.



شکل ۵-۱. اثر مایسنر در یک کره‌ی ابررسانایی که در یک میدان مغناطیسی ثابت سرد شده است. در دمای گذار ،

خطوط القای مغناطیسی از کره به بیرون رانده می‌شوند [۹].

با اینکه ابررسانا به عنوان یک دیامغناطیس کامل در نظر گرفته می‌شود ولی با وجود این شار مغناطیسی اندکی به داخل آن نفوذ می‌کند. عمقی را که شار مغناطیسی اعمال شده در آن نفوذ کند «عمق نفوذ» نامیده می‌شود که یکی از طول‌های مشخصه ابررسانایی است. عمق نفوذ لندن در دمای صفر برای ابررساناهای متعارف کمتر از ۱۰۰ nm و برای ابررساناهای دمایی بالادر محدوده‌ای بین ۳۰۰-۱۰۰ nm است [۱].

<sup>1</sup> London

<sup>2</sup> M. Meissner

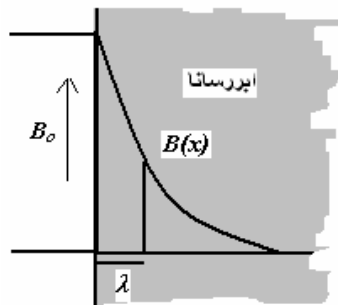
<sup>3</sup> R. Ochsenfeld

چون عمق نفوذ خیلی کوچک است در اندازه‌گیری‌های مغناطیسی روی یک نمونه ابررسانا با اندازه‌ی معمولی، نفوذ شار مغناطیسی غالباً به حساب آورده نمی‌شود. اما در اندازه‌گیری بر روی نمونه‌های کوچک مثل پودرها و لایه‌های نازک، که اندازه‌ی آنها خیلی از عمق نفوذ  $\lambda$  بیشتر نیست، نفوذ شار مغناطیسی قابل توجه است.

توزیع میدان در داخل یک ابررسانای نیمه بینهایت به صورت زیر است:

$$B(x) = B(0) \exp(-x / \lambda_{L0}) \quad (2-1)$$

در این رابطه  $B(0)$  میدان اعمال شده در روی سطح و  $B(x)$  میدان در فاصله  $x$  در داخل ابررسانا می‌باشد. میدان به صورت نمایی در داخل یک ابررسانا میرا می‌شود و در فاصله  $x = \lambda_{L0}$  به  $1/e$  مقدار خود بر روی سطح می‌رسد. به این فاصله عمق نفوذ لندن گفته می‌شود [۶]. تغییرات القاء مغناطیسی بر حسب فاصله در شکل ۶-۱ نشان داده شده است.



شکل ۶-۱. تغییرات القاء مغناطیسی بر حسب فاصله در داخل یک ابررسانای نیمه بی نهایت [۶].

پیش‌بینی نظری پارامتر  $\lambda$ ، موفقیت بزرگی برای نظریه لندن بود که بعداً با آزمایش تأیید شد. عمق نفوذ لندن تابعی از دماست. تغییرات  $\lambda$  بر حسب دما مطابق رابطه زیر است:

$$\lambda = \lambda(0) (1 - T^4 / T_c^4)^{-1/2} \quad (3-1)$$

$$\lambda(0) = (m/\mu_0 n e^2)^{1/2} \quad (4-1)$$

با افزایش  $T$  از صفر مطلق،  $\lambda$  افزایش می‌یابد و در  $T=T_c$ ، عمق نفوذ  $\lambda$  نامتناهی می‌شود [۱۰].

### ۱-۲-۶ نظریه BCS

سازوکار ابرسانایی تا ۶۰ سال بعد از کشف این پدیده بدون تغییر مانده بود تا آن که سه دانشمند آلمانی جان باردین<sup>۱</sup>، لئون کوپر<sup>۲</sup> و رابرت شریفر<sup>۳</sup> در سال ۱۹۵۷ به طور نظری این پدیده را توضیح دادند. به افتخار این سه دانشمند این نظریه BCS نامیده می‌شود. نظریه BCS مبتنی بر این اصل است که حامل‌های بار نه به صورت تک الکترون بلکه به صورت زوج الکترون هستند که به آنها زوج‌های کوپر گفته می‌شود.

الکترون‌ها در حالت عادی همدیگر را دفع می‌کنند. در نتیجه برای تشکیل یک زوج الکترون سازوکار ویژه‌ای مورد نیاز است. در نظریه‌ی BCS دو الکترون با اسپین مخالف، که دارای بار منفی هستند برخلاف انتظار همدیگر را جذب می‌کنند. علت این جاذبه برهم‌کنش فونون-الکترون‌ها می‌باشد. در این سازوکار هر الکترون یک فونون مجازی مبادله می‌کند. فونون مجازی فقط برای دوره‌ی زمان خیلی کوتاهی وجود دارد و فقط در حضور دومین الکترون آماده جذب آن، می‌تواند گسیل شود [۱۱]. انرژی برای حالت‌های اولیه و نهایی پایسته است با این حال طی دوره‌ی کوتاهی از زمان هنگامی که فونون مجازی وجود دارد انرژی سیستم ممکن است از مقدار اولیه آن تفاوت داشته باشد. در صورتی که اختلاف انرژی بین حالت اولیه و میانی کمتر از انرژی فونون باشد برهم‌کنش الکترون-الکترون جاذبه است. برهم‌کنش جاذب الکترون‌ها می‌تواند به یک حالت پایه منجر شود که با یک انرژی متناهی  $E_g$  از پایین‌ترین حالت خود جدا شده است. میدان بحرانی، ویژگی‌های گرمایی، و اغلب ویژگی‌های الکترو مغناطیسی از پیامدهای این گاف انرژی اند.

<sup>1</sup> J. Bardeen

<sup>2</sup> L. Cooper

<sup>3</sup> R. Schrieffer

شکل ۷-۱ وابستگی دمایی گاف انرژی تعیین شده به وسیله نظریه BCS را نشان می‌دهد که در

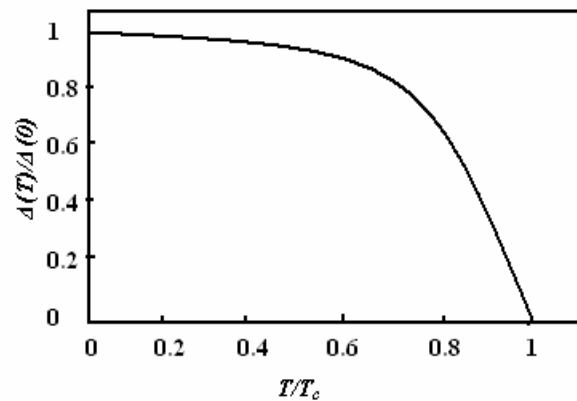
دماهای زیر  $T_c$   $0/6$  پهنای انرژی به طور ضعیفی به دما بستگی دارد. همچنین پهنای گاف انرژی  $2\Delta(0)$  ارتباط فیزیکی با دمای گذار  $T_c$  دارد:

$$2\Delta(0) = 3.5k_B T_c \quad (5-1)$$

به علاوه نظریه BCS ما را قادر به پیش‌بینی دمای گذار  $T_c$  می‌کند. با فرض اینکه جاذبه الکترون-فونون بتواند با ثابت  $V_P$  توصیف شود، عبارت زیر برای  $T_c$  بدست می‌آید [۱]:

$$T_c = 1.14 \frac{\hbar\omega_D}{k_B} \exp\left[\frac{-1}{D_n(E_F)V_P}\right] \quad (6-1)$$

که در این رابطه  $\omega_D$  بسامد دبی و  $D_n(E_F)$  چگالی حالت‌های عادی در انرژی فرمی  $E_F$  است.



شکل ۷-۱. بستگی دمایی گاف انرژی تعیین شده به وسیله نظریه BCS [۱].

## ۷-۲-۱ ابرسانای نوع I و II

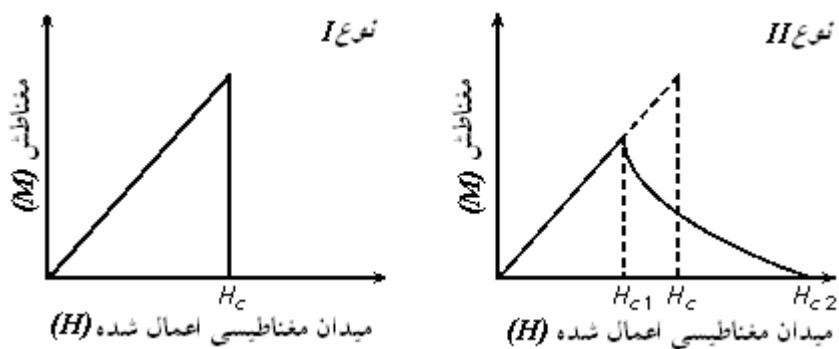
ابرساناها در حضور میدان مغناطیسی خارجی رفتار متفاوتی را نشان می‌دهند، بر این اساس ابرساناها

را به دو نوع تقسیم می‌شوند: در ابرساناهای نوع I اگر میدان مغناطیسی از یک آستانه  $H_c$  بیشتر شود، ابرسانایی

ناگهان از بین می‌رود لذا اثر مایسنر در این نوع ابرساناها کامل است. در ابرساناهای نوع II اگر میدان مغناطیسی

خارجی از حد  $H_{c1}$  بیشتر شود شار به صورت استوانه‌ای شکل به داخل آن نفوذ می‌کند. لذا در این حالت اثر مایسنر کامل نیست و آن حالت را مخلوط گویند. ولی اگر جریان کمتر از جریان بحرانی باشد مقاومت الکتریکی آن هم چنان صفر است. با افزایش میدان مغناطیسی به مقادیر بزرگتر از میدان مغناطیسی بحرانی بالایی،  $H_{c2}$ ، ابرسانایی از بین می‌رود. شکل ۸-۱ منحنی مغناطیدگی را بر حسب میدان مغناطیسی خارجی اعمال شده برای ابرساناهای نوع I و II را نشان می‌دهد.

این حالت مخلوط با شبکه‌ای از مغزهای عادی در داخل ابرسانا مشخص می‌شود که در حالت مخلوط ابرجریان‌ها آن‌ها را احاطه می‌کنند. به این مغزهای عادی گردشاره<sup>۱</sup> گویند. شعاع هر مغز عادی در حدود طول هم‌دوسی  $\xi$  است که یکی دیگر از طول‌های مشخصه ابرسانایی می‌باشد [۱]. اگر طول هم‌دوسی بزرگتر از عمق نفوذ باشد، ابرسانا از نوع I خواهد بود. ولی اگر کمتر از عمق نفوذ باشد ابرسانا از نوع II خواهد بود [۲].



شکل ۸-۱. مغناطش بر حسب میدان مغناطیسی اعمال شده برای ابرسانای نوع I (چپ) و ابرسانای نوع

II (راست) [۹].

### ۸-۲-۱ میخکوبش شار مغناطیسی<sup>۲</sup>

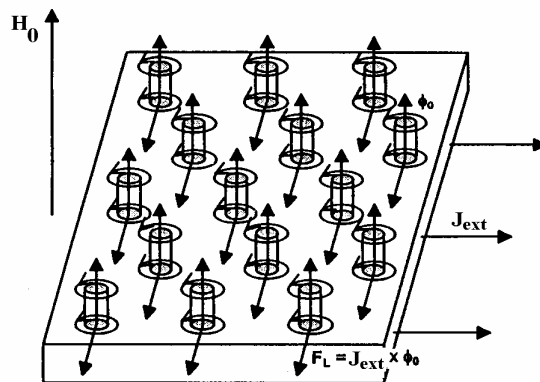
ابرسانای نوع دوم در حالت مخلوط می‌تواند جریان را بدون مقاومت الکتریکی از خود عبور دهد. البته جریان همانند ابرسانای نوع اول تنها بر روی سطح نیست بلکه درون تمام توده‌ی فلز جاری می‌شود. طولی از ابرسانای نوع دوم که در میدان مغناطیسی عمودی با شدتی بیشتر از  $H_{c1}$  قرار گرفته است را در نظر می‌گیریم.

<sup>1</sup> Vortex

<sup>2</sup> Magnetic flux pinning



اگر جریانی از این نمونه عبور داده شود در هر نقطه یک چگالی جریان انتقال  $J$  وجود خواهد داشت. جریان انتقال جریانی است که در طول یک نمونه جاری می‌شود. از این عبارت استفاده می‌شود تا تفاوت بین حرکت الکترون‌ها و جریان‌های گردابی حول مغزی‌ها معین گردد [۶]. شار مغناطیسی در میدان‌های بزرگتر از  $H_{C1}$  به صورت مجزا، یعنی رشته‌های میکروسکوپی به درون ماده نفوذ می‌کند. هر گردش‌ه‌ها حامل یک کوانتوم شار مغناطیسی  $\varphi_0$  است [۱۲] همان طور که در شکل ۹-۱ نشان داده شده است. بر گردش‌ه‌ها نیروی لورنتس مانند  $\vec{F}_L = \vec{j} \times \vec{\varphi}_0$  وارد می‌شود که منجر به حرکت گردش‌ه‌ها در جهت جریان و عمود بر جهت شار می‌شود [۶]. این نیرو باعث حرکت گردش‌ه‌ها و در نتیجه اتلاف توان و گرم شدن ابررسانا و در نهایت از بین رفتن پدیده‌ی ابررسانایی می‌گردد. لذا بایستی به نحوی از حرکت گردش‌ه‌ها جلوگیری کرد. یکی از راه‌های جلوگیری از حرکت گردش‌ه‌ها ایجاد ناکاملی در داخل ابررسانا است.



شکل ۹-۱. ابررسانای نوع دوم حامل جریان در حالت مخلوط. برای مغزی‌های ثابت نیروی لورنتس مانند بر محور

مغزی‌ها و چگالی جریان بر هر دو عمود است [۱].

مغزی‌ها می‌توانند به ناکاملی‌ها بچسبند و متوقف یا میخکوب<sup>۱</sup> شوند. اگر نیروی لورنتس مانند کوچکتر از این نیروی میخکوبش باشد مغزی‌ها ثابت مانده و تحت تأثیر نیروی لورنتس حرکت نخواهند کرد [۶]. علاوه بر ناکاملی بلوری، رسوبات عادی، مرزدانه‌ها، در رفتگی‌ها<sup>۱</sup> هم می‌توانند به عنوان مراکز میخکوبش عمل کنند [۱].

<sup>1</sup> Pin  
<sup>2</sup> Grain- boundary

شار در درون هر مغزی توسط یک جریان گردابی ایجاد می‌شود که در اطراف هر مغزی در جهتی مخالف با جریان سطحی دیامغناطیس نمونه گردش می‌کند. جریان گردابی که یک مغزی معمولی را احاطه می‌کند با میدان مغناطیسی حاصل از جریان گردابی دیگر مغزی‌ها اندرکنش کرده و در نتیجه هر دو مغزی مجاور یکدیگر را دفع می‌کنند. به دلیل این اندرکنش دو طرفه، مغزی‌هایی که از میان یک ابرسانا در حالت مخلوط عبور می‌کنند به شکل اتفاقی قرار نمی‌گیرند بلکه متناوباً به شکل یک شبکه منتظم شش وجهی نظم می‌گیرند [۶]. البته ممکن است شبکه شار شش گوشه به خاطر برهم‌کنش خطوط گرداب و مراکز میخکوبش اندکی تغییر شکل دهد [۱].

### ۳-۱ ابرساناهای دمای بالا

از سال ۱۹۱۱ تا سال ۱۹۷۳ یعنی حدود ۶۲ سال دانشمندان تنها توانستند دمای بحرانی را از ۴ درجه به ۲۳/۳ درجه کلون که کمی بیشتر از دمای هیدروژن مایع است برسانند. اما کار با هیدروژن مایع نیز پرهزینه، مشکل ساز و خطرناک بود و کاربردهای ابرسانا را محدود می‌ساخت.

در سالهای بعد علاوه بر فلزات و آلیاژهای فلزی، تحقیقاتی در زمینه ترکیبات نیمه فلزی توسط برخی دانشمندان آغاز شد. سرانجام در ۲۷ ژانویه ۱۹۸۷ بدنورز و مولر موفق به کشف پدیده ابرسانایی در سرامیکی از نوع اکسید مس شامل لانتانیم و باریوم شدند. دمای بحرانی نمونه ساخته شده، حدود ۳۵ کلون بود که بسیار بیشتر از دمای بحرانی پیش بینی شده توسط نظریه BCS است لذا به آن‌ها ابرسانای دمای بالا گفته می‌شود.

طی مدت زمان کوتاهی پس از کشف ابرسانای دمای بالا، دسترسی به دماهای بحرانی بالاتر به سرعت توسعه یافت. اندکی بعد عضو جدیدی از خانواده مواد ابرساناهای گرم با جایگزینی ایترویم Y به جای لانتانیم کشف شد. این ماده سرامیکی که دمای بحرانی آن ۹۲ کلون است به YBCO معروف است. با توجه به نقطه جوش نیتروژن که ۷۷ کلون در فشار یک اتمسفر است، برای سرد شدن این ابرسانا تا دمای بحرانی استفاده از نیتروژن مایع هم امکان پذیر گردید که بسیار ارزان تر و بی‌خطر تر از هیدروژن و هلیوم مایع است. بنابراین فقط طی سه سال پس از کشف اصلی، دمای انتقال به حالت ابرسانایی افزایشی سه برابر داشت. در طول ۶ سال بعد،

---

<sup>1</sup> Dislocations

چند خانواده دیگر از ابررساناها کشف شدند که شامل ترکیبات تالیوم Tl و جیوه Hg بوده، که به ترتیب دارای حداکثر دمای بحرانی ۱۲۰ کلوین و ۱۳۵ کلوین تحت شرایط معمولی بودند. به این ابررساناها، ابررسانای کوپرات<sup>۱</sup> گفته می‌شود. ویژگی مهم و عمومی این ابررساناها لایه‌ای بودن آنهاست. این لایه‌ها شامل صفحات  $\text{CuO}_2$  و زنجیره‌های  $\text{CuO}$  هستند. به خاطر این ساختار لایه‌ای، این ابررساناها شدیداً ناهمسانگرد هستند. ناهمسانگردی و میخکوبش ضعیف منجر به خزش شار عظیمی در دماهای بالا و یک خط برگشت ناپذیری بین میدان‌های بحرانی پایین و بالای می‌شود. بالای میدان برگشت ناپذیری<sup>۲</sup> گردش‌ها قادر به حرکت هستند و بنابراین چگالی جریان بحرانی صفر است.

هر چند دمای بحرانی ترکیبات جدید سرامیکی در حد قابل توجهی از دمای بحرانی مواد ابررسانای معمولی (فلزات و آلیاژها) بزرگتر است، اما به دلیل خصوصیت‌های فیزیکی این مواد مانند شکنندگی، پایین بودن چگالی جریان بحرانی کاربردهای صنعتی این مواد هنوز در مرحله تحقیق است [۱،۷].

---

<sup>1</sup> Cuprates

<sup>2</sup> irreversibility field

