

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

جلسه یازدهم

مبانی ابررسانایی

مقدمه

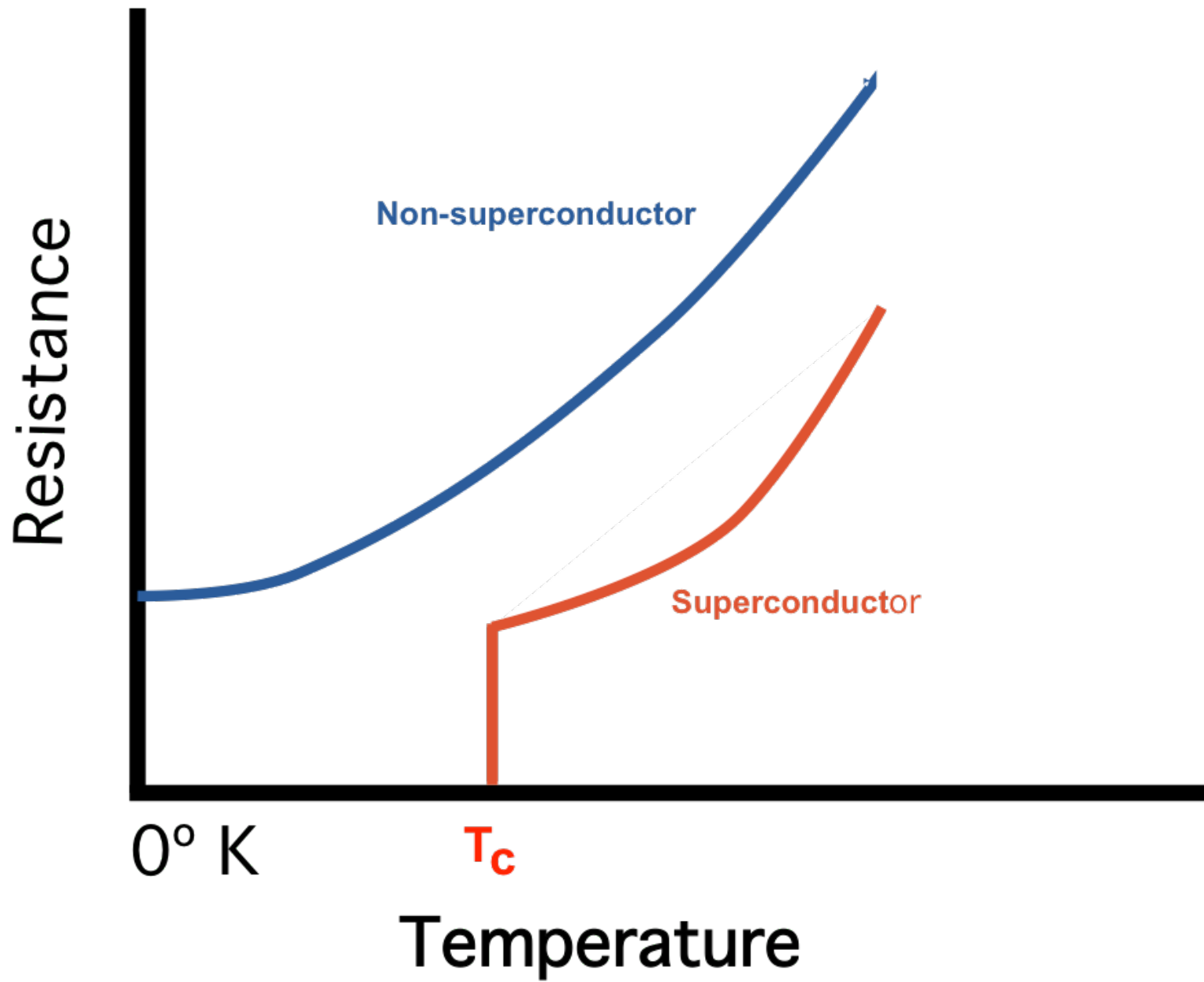
یکی از حوزه های مهم فیزیک که از دیر زمان علاقه مندی محققین را به خود جلب کرده، حوزه فیزیک دماهای پایین است.

یکی از ویژگی های مهم رساناها که بسیار تحت تاثیر تغییرات دما می باشد، مقاومت ویژه است.

در رساناها با کاهش دمای، مقاومت ویژه (ρ) کاهش می یابد و در نتیجه رسانایی (σ) طبق رابطه $\sigma = 1/\rho$ افزایش پیدا می کند.

دانشمندان از حدود 150 سال پیش به دنبال یافتن پاسخ این سوال بودند که آیا کاهش مقاومت یک رسانا با کاهش دمای آن می تواند منجر به دستیابی به مقاومت صفر شود؟ یعنی می توان شرایط را فراهم نمود که مقاومت یک ماده صفر شود؟

این مطالعات در حوزه فیزیک دماهای پایین سرانجام در سال 1911 با تحقیقات H. Kamerlingh-Onnes نتیجه داد. او هنگام کار کردن در آزمایشگاه دمای پایین خود کشف کرد که در دمای چند درجه بالای صفر مطلق، جریان الکتریسیته می تواند بدون هیچ افت پتانسیل در فلز جیوه جریان پیدا کند. او این واقعه منحصر به فرد را " ابررسانایی " (Superconductivity) نامید.⁴



هیچ نظریه‌ای برای توضیح این رخداد در طول پنجاه و شش سال بعد از کشف ارائه نگردید، تا وقتی که در سال 1957، سه فیزیکدان Bardeen، Cooper و Schrieffer نظریه میکروسکوپی خود ارائه کردن که بعداً با نام نظریه BCS (حروف ابتدایی نام محققان) شناخته شد.

سومین رخداد مهم در تاریخ ابررسانایی در سال 1986 با کشف ابررسانایی در دماهای بالاتر در آزمایشگاه IBM اتفاق افتاد.

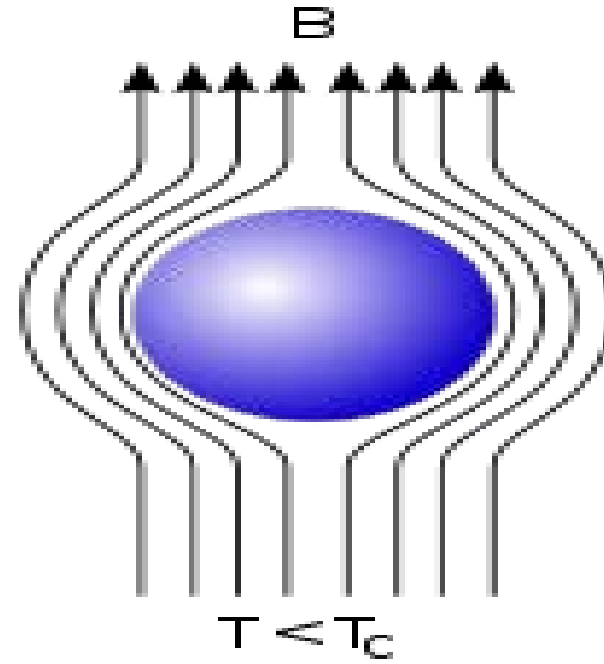
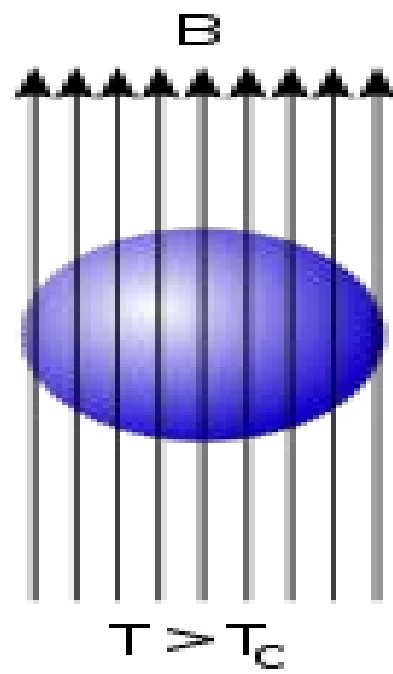
سوال: چگونه می توان با یک آزمایش ساده فیزیکی ابررسانایی یک قطعه سیم ابررسانا را نشان داد؟

می توان از آن سیم ابررسانا یک سیملوله تهیه نمود و جریان الکتریکی را در آن برقرار نمود. می دانیم که سیملوله در حالت عادی از خود مقاومتی در قبال عبور جریان الکتریکی نشان می دهد که از آن به پدیده خودالقاء تعبیر می شود. این موضوع سبب می شود تا جریان الکتریکی آنا در سیملوله برقرار نشود. در واقع ماده در مقابل عبور جریان الکتریکی از خود مقاومت نشان می دهد. اما اگر ماده ابررسانا باشد چنین مقاومتی از خود نشان نمی دهد و جریان الکتریکی بدون تاخیر زمانی برقرار می شود.

اثر مایسنر

هنگامی که یک میدان مغناطیسی ضعیف به یک نمونه ابررسانا که در زیر دمای گذارش ($T < T_C$) قرار دارد اعمال گردد، نمونه شار مغناطیسی را دفع می کند و به یک دیامغناطیس کامل تبدیل می گردد. این پدیده را اثر مایسنر می نامند.

این پدیده برگشت پذیر است، یعنی هرگاه دمای ماده بالاتر از مقدار بحرانی گردد، شار مغناطیسی مجدداً از میان آن عبور می کند و ماده دوباره به حالت عادی باز می گردد.



یکی از خواص اساسی ابررسانا، علاوه بر مقاومت صفر آن، این است که اگر در یک میدان مغناطیسی بزرگتر از یک مقدار بحرانی (H_c) بر نمونه اعمال گردد، مقاومت عادی آن باز می گردد. H_c هم به جنس ماده و هم به دما بستگی دارد. این میدان در T_c صفر است. وقتی دما کاهش پیدا می کند، مقدار آن افزایش می یابد.

$$H_c = H_0 \left[1 - \left(\frac{T}{T_c} \right)^2 \right]$$

میدان بحرانی حتما لازم نیست یک میدان خارجی باشد. جریان الکتریکی که در یک حلقه ابررسانا جاری است مغناطیسی ایجاد می کند و اگر جریان به اندازه کافی بزرگ باشد بطوری که میدان متناظر با آن به مقدار بحرانی برسد، خاصیت ابررسانایی از بین می رود. این امر مقدار شدت جریانی را که می تواند از یک ابررسانا بگذرد محدود می کند و در واقع این یک محدودیت برای ساخت آهنرباهای قوی ابررسانا می باشد.

القای مغناطیسی درون ماده با رابطه زیر بیان می شود:

$$\mathbf{B} = \mu_0(\mathbf{H} + \mathbf{M})$$

$\mathbf{H}$ شدت میدان مغناطیسی خارجی و $\mathbf{M}$ مغناطش ماده است. مغناطش از طریق پذیرفتاری مغناطیسی (χ) با $\mathbf{H}$ رابطه دارد.

$$\mathbf{M} = \chi \mathbf{H}$$

$$\mathbf{B} = \mu_0(1 + \chi)\mathbf{H}$$

در نتیجه

چون در حالت ابررسانایی $\mathbf{B} = 0$ است، پس: $\mathbf{M} = -\mathbf{H}$

یعنی مغناطش مساوی و در خلاف جهت $\mathbf{H}$ می گردد. بنابراین ماده

دیامغناطیس کامل و پذیرفتاری مغناطیسی آن برابر است با $\chi = -1$.

باید در نظر داشت که برای یک فلز دیامغناطیس $\chi = 10^{-5}$ می باشد.

انواع ابررسانا

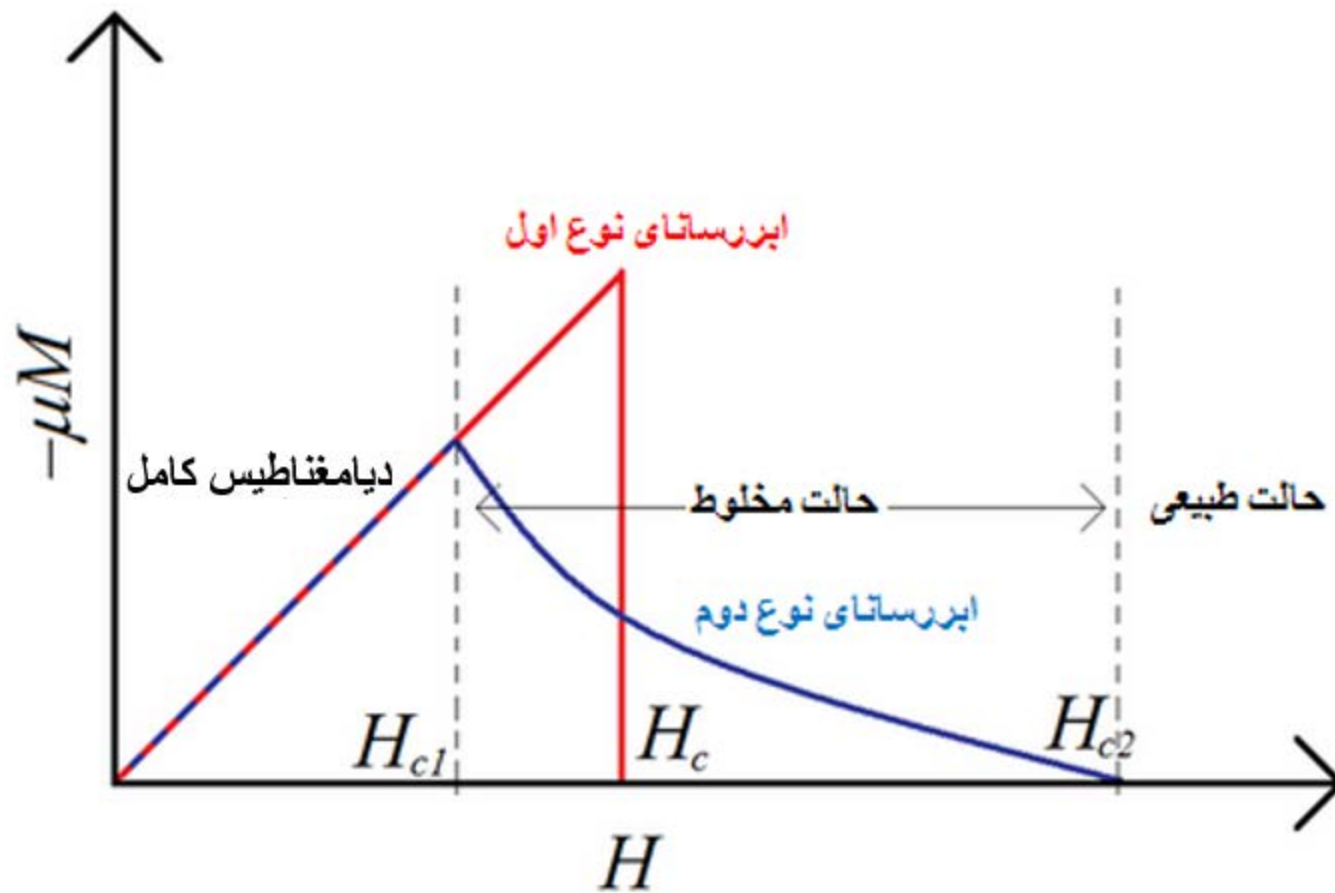
ابر رسانا ها دو نوع هستند:

1- ابر رسانای نوع اول- ابر رساناهایی که یک اثر مایسنر کامل از خود نشان می دهند را ابر رسانای نوع اول می نامند. در این نوع، حالت دیامغناطیس در یک میدان مغناطیسی بحرانی H_c بطور ناگهانی ناپدید می شود و گذار از ابررسانایی به حالت طبیعی بسرعت اتفاق می افتد. Al ، Zn و Hg از این نوع می باشند.

2- ابر رسانای نوع دوم- این نوع ابر رساناها اثر مایسنر کامل را از خود نشان نمی دهند. یعنی هنگامی که دما به زیر دمای بحرانی می رسد شار مغناطیس یکباره از درون ماده پس زده نمی شود.

شار مغناطیس در یک میدان مغناطیسی H_{c1} شروع به نفوذ در نمونه می کند و در یک میدان مغناطیسی H_{c2} نمونه به یک رسانای عادی تبدیل می گردد.

Ta، v و Nb از این نوع می باشند.



مدل دوشاره ای

طبق این مدل در مواد ابر رسانا الکترون های رسانشی به دو دسته تقسیم می شوند: الکترون های طبیعی و ابر الکترون ها. ابر الکترون ها هرگز پراکنده نمی شوند، آنتروپی آن ها صفر است (نظم کامل) و دارای یک طول همدوسی بسیار بزرگ (در حدود $10^4 \text{\AA}$) می باشند.

در $T=T_C$ تمام الکترون ها طبیعی هستند و دما که کاهش می یابند نسبت ابر الکترون ها به الکترون های طبیعی افزایش پیدا می کنند، بطوری که در $T=0$ همه الکترون ها به ابرالکترون تبدیل می گردند.

$$n_s = n \left[1 - \left(\frac{T}{T_C} \right)^4 \right]$$

n چگالی الکترون ها و n_s چگالی ابرالکترون ها است.

الکترو دینامیک ابر رساناها

برادران لندن در سال 1935 با استفاده از مدل دوشاره ای جنبه های مغناطیسی را بطور کمی بررسی کردند.

طبق مدل پیشنهادی برادران لندن، جمع کل ابر الکترون ها و الکترون های طبیعی در هر درجه حرارتی برابر با الکترون های رسانشی ماده در حالت طبیعی می باشد.

فرض بر این است که جریان طبیعی و ابرجریان موازی با هم
شارش می کنند.

از آنجائیکه ابرجریان بدون هیچ مقاومتی شارش می نماید، تمام جریانی را که توسط یک میدان الکتریکی کوچک القاء می گردد را حمل می کند. در نتیجه از الکترون های عادی چشم پوشی می شود. فرض کنید یک میدان الکتریکی کوچک E در یک ابررسانا برقرار شود که سبب شتابدار شدن ابرالکترون ها گردد. اگر v_s سرعت متوسط، m و e به ترتیب جرم و بار الکتریکی ابرالکترون باشند، آنگاه معادله حرکت عبارت خواهد بود از:

$$m \frac{dv_s}{dt} = -eE$$

از طرفی چگالی ابرجریان برابر است با:

$$J_s = -en_s v_s$$

$$\frac{dJ_s}{dt} = \frac{n_s e^2}{m} E$$

پس

این معادله را **اولین معادله لندن** می نامند.

دیده می شود که در غیاب میدان الکتریکی، جریان ابررسانایی مقدار متناهی و ثابتی است.

$$E=0 \quad \frac{dJ_s}{dt} = 0 \quad \Rightarrow \quad J_s = \text{ثابت}$$

اینکه $E=0$ منجر به حالت پایایی در داخل ابررسانا می گردد به این معنی است که در حالت پایا میدان الکتریکی داخل یک ابررسانا صفر می شود. یعنی افت ولتاژ دو سر یک ابررسانا صفر است. اگر $E=0$ را در معادله ماکسول قرار دهیم:

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t}$$

$$\frac{\partial B}{\partial t} = 0$$

خواهیم داشت:

$B =$ ثابت

در نتیجه

از اینجا نتیجه می گیریم که در حالت تعادل، B درون یک ابررسانا بدون در نظر گرفتن دما، مقدار ثابتی است. این تایید با اثر مایسنر مطابقت ندارد. زیرا طبق این اثر، میدان مغناطیسی در داخل یک ابررسانا تابع دما می باشد. برای رفع این نقص، از طرفین اولین معادله لندن کرل می گیریم.

$$\nabla \times \left[\frac{dJ_s}{dt} \right] = \frac{n_s e^2}{m} \nabla \times E$$

$$\nabla \times \left[\frac{dJ_s}{dt} \right] = - \frac{n_s e^2}{m} \left(\frac{\partial B}{\partial t} \right) \quad \text{یا}$$

با انتگرال گیری از طرفین خواهیم داشت:

$$\nabla \times J_s = - \frac{n_s e^2}{m} B$$

این رابطه را **دومین معادله لندن** می نامند که با نتایج تجربی مطابقت دارد.

عمق نفوذ لندن

طبق معادلات لندن، شار مغناطیسی در ابررساناهای نوع دوم یکباره صفر نمی گردد، بلکه بطور نمایی کاهش می یابد.

$$\nabla \times B = \mu_0 J \quad \text{از معادلات ماکسول داریم:}$$

از طرفین کرل می گیریم:

$$\nabla \times \nabla \times B = \mu_0 \nabla \times J$$

از طرفی داریم:

$$\nabla \times \nabla \times B = \nabla(\nabla \cdot B) - \nabla^2 B$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

چون:

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{B} = -\nabla^2 \mathbf{B}$$

پس:

$$-\nabla^2 \mathbf{B} = \mu_0 \times \left(-\frac{n_s e^2}{m} \mathbf{B}\right)$$

آنگاه:

$$\nabla^2 \mathbf{B} = \frac{\mu_0 n_s e^2}{m} \mathbf{B}$$

یا

$$\nabla^2 \mathbf{B} = \frac{1}{\lambda^2} \mathbf{B}$$

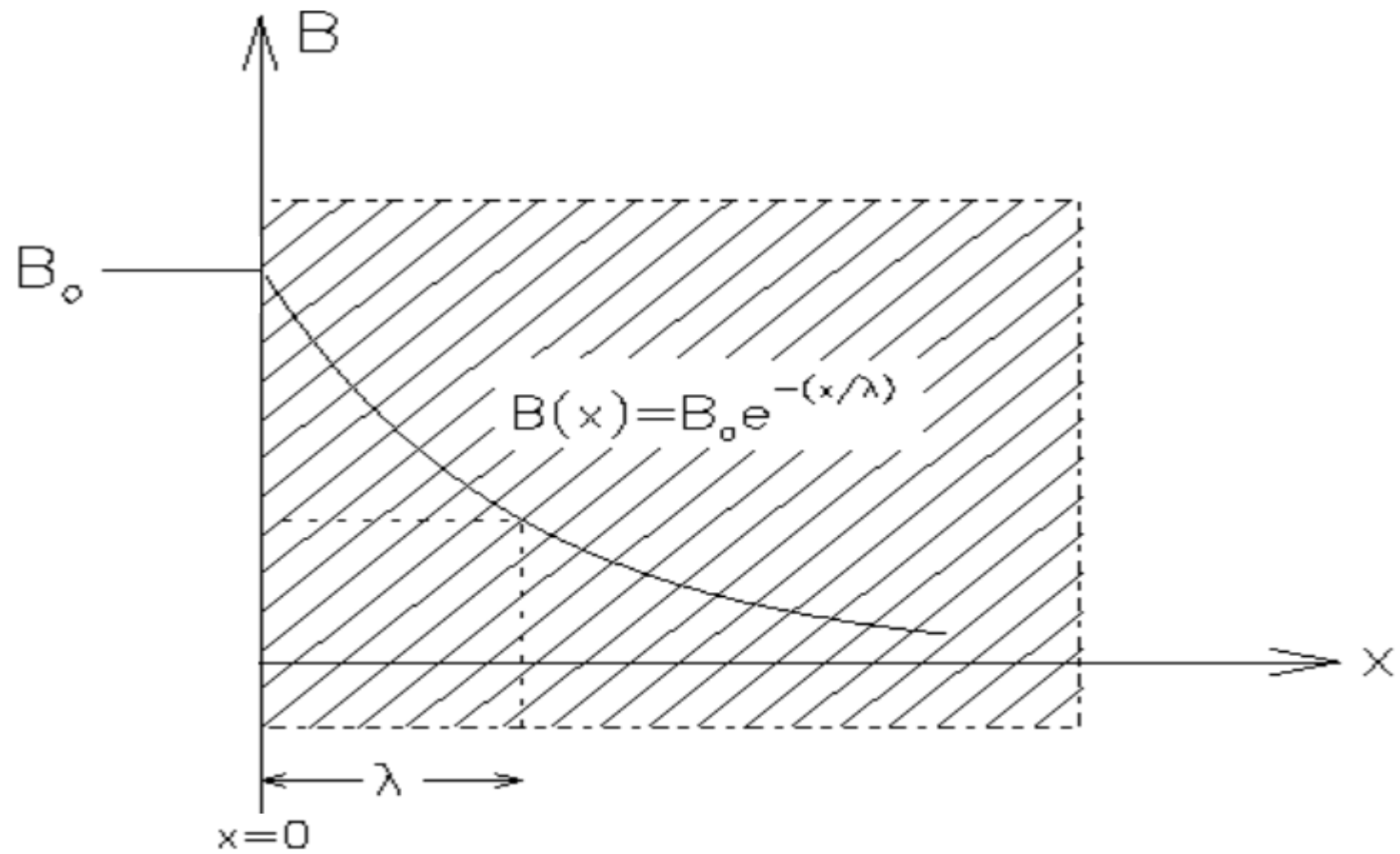
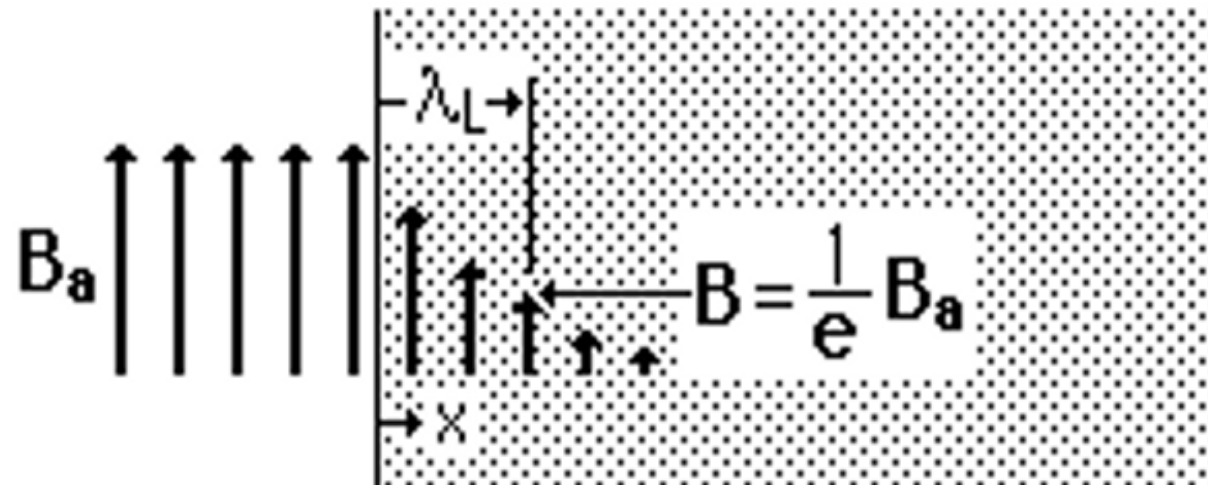
که در آن: $\lambda = \left(\frac{m}{\mu_0 n_s e^2}\right)^{1/2}$ را عمق نفوذ لندن می نامند.

فرض می کنیم که نمونه نیم نامتناهی است و سطح آن صفحه yz باشد و میدان مغناطیسی در امتداد جهت z اعمال گردد. حل معادله فوق بصورت زیر داده می شود:

$$B_z(x) = B_z(0)e^{\frac{-x}{\lambda}}$$

معادله فوق نشان می دهد که میدان مغناطیسی در داخل ابررسانا بصورت نمایی کاهش می یابد و در فاصله λ از سطح به $1/e$ مقدار اولیه اش می رسد.

همچنین نشان می دهد که در داخل ابررسانا میدان مغناطیسی صفر²⁵ می شود که در تطابق با اثر مایسنر می باشد.



عمق نفوذ لندن طبق رابطه زیر با دما مرتبط می باشد. در بیشتر ابررساناها λ در حدود $500 \text{ \AA}$ است.

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

در $T = T_C$ عمق نفوذ بینهایت می شود، یعنی ماده به یک رسانای معمولی تبدیل می شود و شار مغناطیسی سرتاسر نمونه را در بر می گیرد. $T = 0$ ، عمق نفوذ کمترین مقدار خود را خواهد داشت.

مسئله: عمق نفوذ λ جیوه در $3/5\text{ K}$ در حدود 75 nm است. عمق نفوذ را در صفر کلوین تخمین بزنید. همچنین چگالی ابر الکترون (n_s) را محاسبه کنید. برای جیوه $T_C = 4/2\text{ K}$ ، $\rho = 13/55 \times 10^3\text{ Kg/m}^3$ ، $M = 200/6$ و $N_A = 6/026 \times 10^{26}\text{ atom/m}^3$

مسئله: عمق نفوذ لندن برای سرب در 3 K و 7.1 K به ترتیب برابر 39.6 nm و 173 mm است. دمای گذار (بحرانی) و عمق نفوذ را در صفر کلوین محاسبه کنید.

کاربردهای ابررساناها

ابررساناهای دمای پایین امروزه در ساخت آهنرباهای ویژه طیف سنجهای تشدید مغناطیسی هسته، تشدید مغناطیسی برای مقاصد تشخیص طبی، شتاب دهنده ذره‌ها، قطارهای سریع مغناطیسی و انواع ابزارهای رسانایی الکترونیکی بکار می‌روند. از دیگر کاربردهای آنها می‌توان به دستگاههای عکسبرداری تشدید مغناطیسی هسته و قطارهای جدیدی که توسط نیروهای مغناطیسی در هوا معلق هستند و با سرعت 400 کیلومتر بر ساعت حرکت می‌کنند، اشاره کرد.

کاربردهای توان و قدرت موتور و ژنراتور ابررسانا

صنعت تولید موتور و ژنراتور ابر رسانا از سال 1999 شروع شده است.

استفاده از ژنراتورهای ابر رسانایی موجب بهبود پایداری شبکه به میزان 30% بیشتر از انواع سنتی آن می شود. میزان اتلاف در این ژنراتورها 50% کمتر و بازده 1 تا 2 درصد بیشتر از نوع سنتی است.

حجم ژنراتورهای ابر رسانایی حدود 30% و وزن آنها حدود 50% کمتر از انواع سنتی میباشد.

کاربردهای حمل و نقل (قطارهای مگ لو MagLev)

بر اثر پدیده ماینسر، ابر رسانا میدان مغناطیسی را عبور نمی دهد و یک عنصر مغناطیسی می تواند روی ابر رسانا معلق بماند. از این خاصیت در ساخت قطارهای شناور مغناطیسی موسوم به مگ لو استفاده شده است. کوئل ابر رسانا در داخل قطار قرار می گیرد و ریل های دو طرف قطار به تناوب مغناطیسی و دارای قطب های مخالف می گردند. قطار با توجه به خاصیت شناوری، بدون هرگونه اصطکاک و بر خورد با ریل، در اثر تقابل قطب های آهنربایی با سرعت زیادی به حرکت در می آید. اولین قطار مغناطیسی در سال 1997 در ژاپن با سرعت 510 کیلومتر در ساعت به بهره برداری رسید. در سال 2000 قطار دیگری با سرعت 581 کیلومتر در ساعت ساخته شد. اخیراً قطار مغناطیسی با سرعت 630 کیلومتر در ساعت در ژاپن ساخته شده است.



