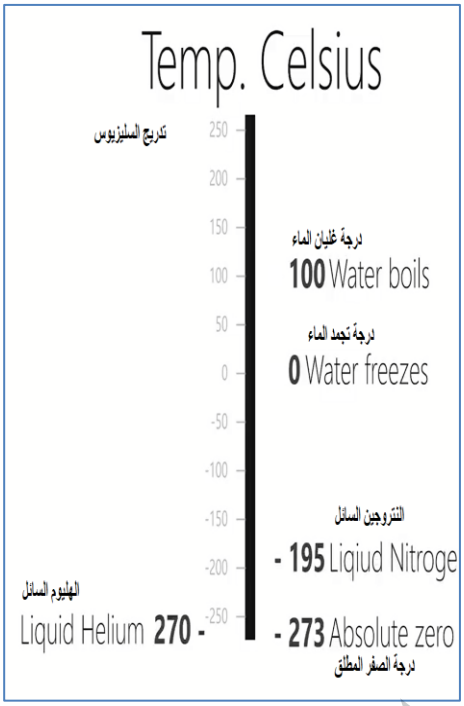
التوصيل المفرط (التوصيل الفائق)

مقدمة:

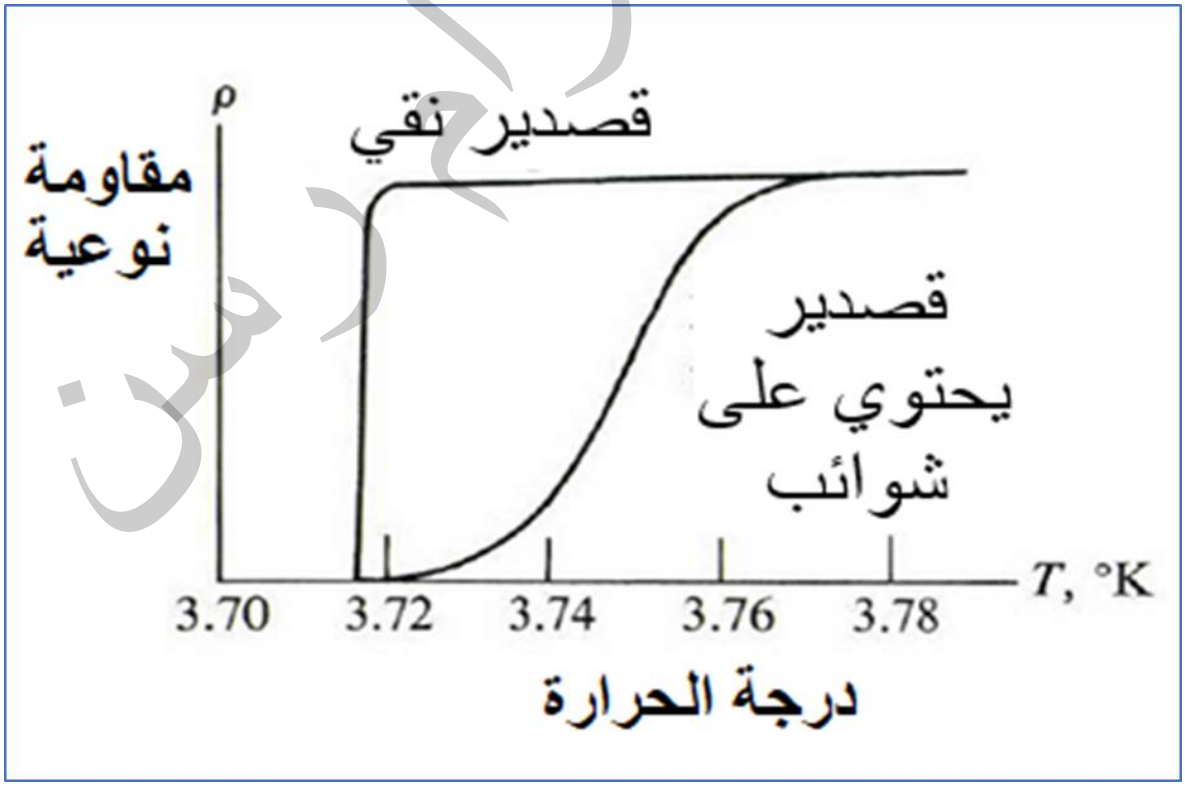
ان معظم العناصر المعدنية والمركبات والسبائك لها خاصية التوصيل المفرط عندما تنخفض درجة حرارتها لتقترب من الصفر المطلق. ان خواص المواد في حالة التوصيل المفرط (الفائق) تختلف كثيراً عن الحالة الاعتيادية بسبب التغير الحاصل في سلوك الكترونات التوصيل. ان المواد مفرطة التوصيل لها خاصية انعدام المقاومة النوعية وخاصية الدايا مغناطيسية المثالية.



درجة الحرارة الحرجة (T_C):

ان من اهم مزايا الموصل المفرط هو تلاشي المقاومة النوعية لتصبح قيمتها صفراً عند درجة حرارية معينة (T_C) تدعى (درجة الحرارة الحرجة) أي (درجة حرارة انتقالية) وهي تختلف من معدن الى آخر.

- عند زيادة درجة الحرارة الى درجة اعلى من T_C فإن المادة تعود الى طبيعتها الاعتيادية.
- ان عملية الانتقال من الحالة الاعتيادية الى حالة التوصيل المفرط لا تكون دائماً شديدة الانحدار ولكن تعتمد على نقاوة المعدن. كما في الشكل. (سائل النايتروجين 78 K و الهيليوم 3.4K)



ولقد وجد أن درجة الحرارة الحرجة تعتمد على العوامل التالية: -

1_ نقاوة المادة

2 الضغط المسلط على المادة

3_ سمك المادة

4 الشحنة الكهروستاتيكية على المادة

إن درجة الحرارة الحرجة للمادة تعتمد على الضـــغط المســـلط عليها . فلقد وجد أن زيادة الضغط يحدث انخفاضاً في الدرجة الحرجة Tc. اما تأثير سمك المادة على الدرجة الحرجة ، فأنه كلما كانت المادة على هيئة غشاء رقيق نجد أن Tc تقل بشكل كبير عند مقارنتها بعينة من نفس المادة ذات ســـمك كبير ، bulk . إن لهذين العاملين دور كبير على تحويل بعض اشباه الموصلات من الحالة الاعتيادية الى حالة فائقة التوصيل .

حالة فرط التوصيل (ظاهرة فرط التوصيل): الهبوط المفاجئ الى قيمة الصفر تقريباً للمقاومة الكهربائية لمادة عند تبريدها الى درجة حرارة واطئة جداً عندما تصـــل الى درجة الحرارة الحرجة. والمواد التي تظهر فيها حالة فرط التوصيل تدعى (**المواد مفرطة التوصيل**).

المجال الحرج:

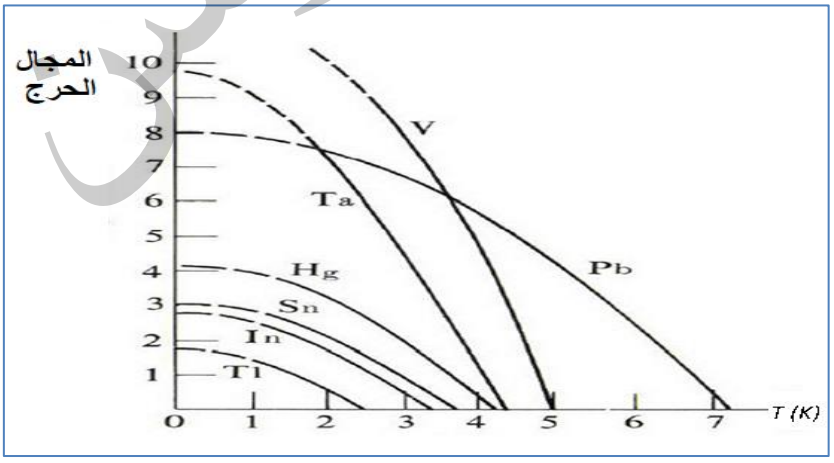
يتميز الموصـل المفرط بخاصـية أخرى، إضـافة الى كون مقاومته تسـاوي صـفراً بالنسـبة للتيار المســتمر، هي تحوله من حالة التوصــيل المفرط الى الحالة الاعتيادية وذلك بتســليط مجال مغناطيسي عالي يسمى المجال الحرج.

أي ان المواد المفرطة التوصيل تتحول الى حالتها الاعتيادية بتسليط مجال مغناطيسي عالي يسـمى المجال الحرج (B_C) وهو يعتمد على نوعية المادة المصـنوع منها الموصـل ودرجة الحرارة.

- حيث ان قيمة المجال الحرج تصبح صفراً عند درجة الحرارة الحرجة (T_C).
- وتزداد قيمتها بانخفاض درجة الحرارة.
- العلاقة التالية توضح العلاقة بين B_C , T_C:

$$B_C = B_O \left[1 - \left(\frac{T}{T_C}\right)^2\right]$$

ان قيمة المجال الحرج B_C تزداد لتصبح قيمته ثابتة وتساوي B_O هي اقصى قيمة للمجال المغناطيسي الحرج عند درجة الصفر المطلق. كما في الشكل التالي لبعض المواد المفرطة.



نلاحظ من الشكل:

- ان قيمة B_O تزداد بارتفاع T_C.
- في بعض الاحيان ليس من الضـروري ان نسـلط مجالاً مغناطيسـياً خارجياً لغرض ازالة خاصـــية التوصـــيل المفرط ولكن عندما تتجاوز قيمة التيار

المار في حلقة مصـــنوعة من مادة ذات توصـــيلية مفرطة قيمة **(التيار الحرج)** فإن المادة تتحول الى الحالة الاعتيادية. وتعتمد قيمة التيار الحرج على

- ✓ طبيعة المادة،
- ✓ شكلها الهندسي
- ✓ وعلى قيمة المجال المغناطيســـي الناتج عن مرور التيار. فاذا تجاوزت قيمة المجال الناتج عن مرور تيار في موصـــل مفرط القيمة الحرجة للمجال الحرج B_C فان المادة تكون في الحالة الاعتيادية.

- ان تحديد قيمة التيار المار في موصـل مفرط تُعد من احدى المشـاكل الصـناعية في توليد مجال مغناطيسي عالي.

س) متى يتحول الموصل المفرط من حالة التوصيل المفرط الى الحالة الاعتيادية؟

س) كيف يمكن ازالة خاصية التوصيل المفرط؟

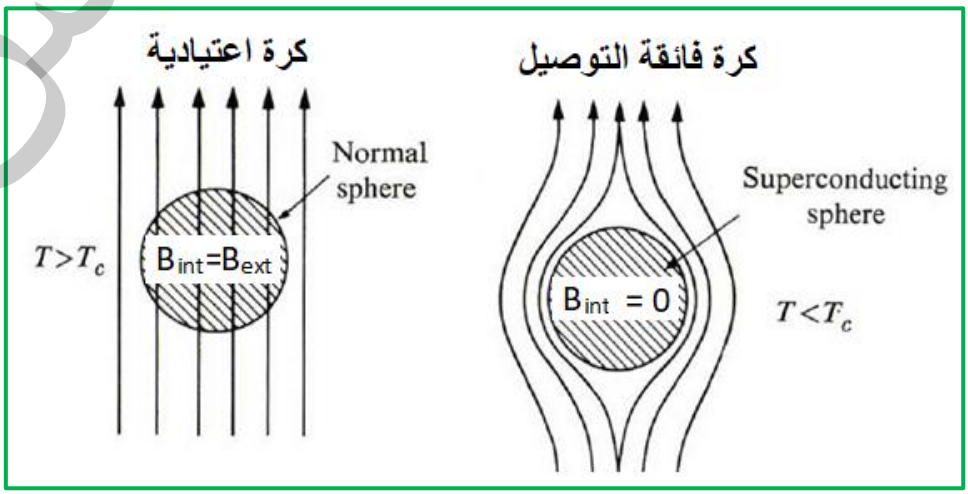
ج)1. يمكن ان تتحول المواد المفرطة التوصـــيل الى حالتها الاعتيادية بتســـليط مجال مغناطيســي عالي يسـمى المجال الحرج (B_C) وهو يعتمد على نوعية المادة المصـنوع منها الموصل ودرجة الحرارة.

2. او عندما تتجاوز قيمة التيار المار في حلقة مصـنوعة من مادة ذات توصـيلية مفرطة قيمة **(التيار الحرج)** فإن المادة تتحول الى الحالة الاعتيادية. فاذا تجاوزت قيمة المجال الناتج عن مرور تيار في موصـــل مفرط القيمة الحرجة للمجال الحرج B_C فان المادة تكون في الحالة الاعتيادية.

3. برفع درجة حرارة المادة بحيث تكون اعلى من T_c

ظاهرة مازنر MEISSNER EFFECT :

لقد لاحظ العالم الألماني مازنر انه عندما تكون المادة ذات التوصـــيل المفرط في مجال مغناطيســي فإن خطوط الفيض المغناطيســي تبتعد كلياً عن الموصـــل عند تبريده الى درجة حرارية اقل من T_C (وتدعى هذه الظاهرة بظاهرة مازنر او ظاهرة اقصـــاء الفيض المغناطيسي). يمكن فهم هذه الظاهرة على أساس ان عملية التحول بوجود مجال مغناطيسي من الحالة الاعتيادية الى حالة التوصيل المفرط تكون مصحوبة بتوليد تيارات سطحية كافية لإلغاء المجال المغناطيسي داخل العينة. كما في الشكل التالي:



ان المجال داخل المادة في الحالة الاعتيادية

$B_{int} = B_{ext} + \mu_o M_V$

حيث (B_{ext}) هو المجال المغناطيسي الخارجي. و μ_o تمثل النفاذية

$M_V \equiv$ العزم المغناطيسي لوحدة الحجم

وبما ان $B_{int} = 0$ للموصل المفرطة $M_V = \frac{-B_{ext}}{\mu o}$

وعليه فإن الموصـــل المفرط له تأثير كما لو كان لديه عزم مغناطيســـي معاكس الى المجال الخارجي ولهذا فيمكن اعتبار ان المادة ذات دايا مغناطيسية مثالية.

هنالك نوعان من المواد المفرطة التوصيل:

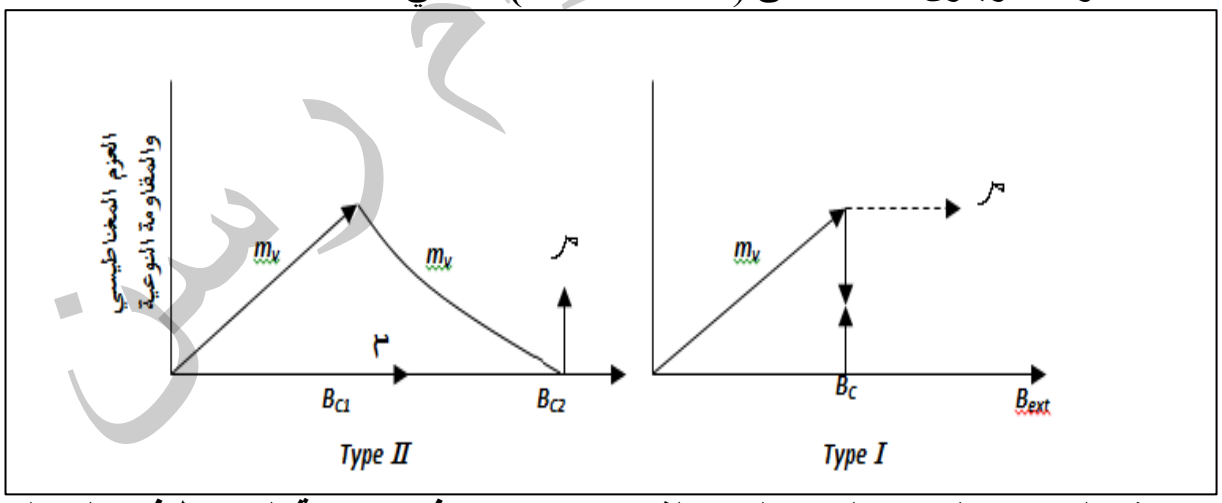
بالاعتماد على الطريقة التي يحدث بها الانتقال من حالة التوصـــيل المفرط الى الحالة الاعتيادية عندما تكون قيمة المجال المغناطيسي المسلط أكبر من قيمة المجال الحرج B_C.

1- **موصل مفرط من النوع الأول Type.I:** عندما تتجاوز قيمة المجال المغناطيسي المسلط المجال الحرج B_C فان الموصـــل يتحول كلياً الى الحالة الاعتيادية وبذلك يتمكن المجال الخارجي من اختراق الموصل وتصبح قيمة العزم المغناطيسي صفراً. أي ان

كما موضح في الشكل السابق $B_{int} = B_{ext}$

2- **موصـــل مفرط من النوع الثاني Type. II:** النوع الثاني يتميز بوجود قيمتين للمجال الحرج B_{C1} تمثل اقل قيمة له و B_{C2} تمثل اعلى قيمة للمجال.

- فعندما تتجاوز قيمة المجال المسلط اعلى قيمة للمجال الحرج B_{C2} $(B_{C2} > B_{C1})$ فان الموصـــل يتحول كلياً الى الحالة الاعتيادية وبذلك يتمكن المجال الخارجي من اختراق الموصل.
- اما إذا كانت قيمة المجال المسلط أعلى من B_{C1} واقل من B_{C2} فهنالك اختراق جزئي للموصل ويكون بحالة تسمى (**الحالة المختلطة**) كما في الشكل:



س) يفضل استعمال موصل من النوع الثاني Type. II في صناعة المغانيط ذات المجال العالي. علل ذلك؟

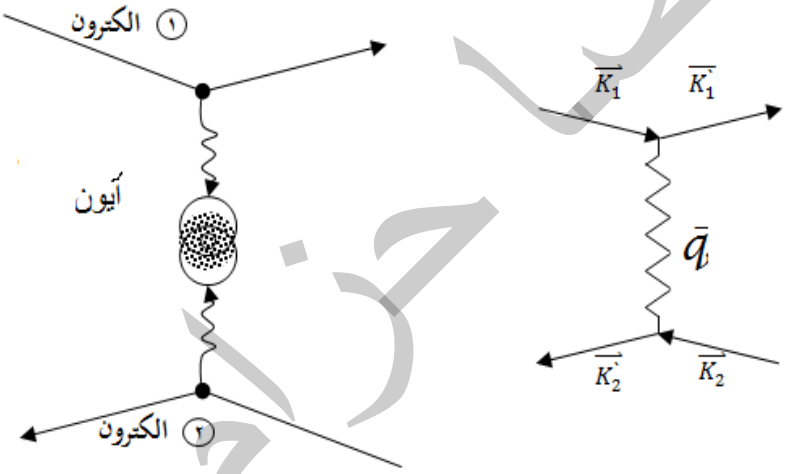
ج) ان القيمة النموذجية للمجال الحرج في موصـــل من نوع الأول I حوالي 10^2 كاوس بينما القيمة النموذجية للمجال الحرج في موصل من نوع الثاني II حوالي 10^5 كاوس ولهذا يكون الموصل من النوع الثاني مفضل في صناعة المغانيط ذات المجال العالي.

نظرية التوصيل المفرط:

تسمى نظرية BCS نسبة الى اسماء العلماء الفيزيائية Schrieffer , Cooper , Bardeen. لقد بنيت هذه النظرية على أساس النظرية الكمية.

ان مقاومة المعادن في درجات الحرارة الواطئة هو نتيجة لتصادم الكترونات التوصيل مع ذرات الشوائب وهي حالة لا يمكن التخلص منها.

- لذلك بنيت هذه النظرية على اساس آخر وهو مبدأ تجمع الالكترونات على شكل ازواج بواسطة قوة جذب من نوع خاص وبذلك تفسر ظاهرة انعدام المقاومة على اساس ان هذه الأزواج من الإلكترونات يمكن ان تتصادم بعد تزويدها بطاقة كافية لفصلها عن بعضها وتوليد الكترونين منفردين. ولكن عند درجات حرارة واطئة لا يمكن تزويد هذه الالكترونات بمثل هذه الطاقة وبذلك تمر هذه المجاميع من ازواج الالكترونات دون ان تتصادم مع الشوائب.
- ان تجاذب الالكترونات بدلاً من تنافرها نتيجة للقوى الكهروستاتيكية يمكن ان يُفهم على اساس استجابة الأيونات الموجبة في البلورة للأكترونات المارة بالقرب منها.



الشكل يبين تأثير التبادل بين الكترنين لتكوين زوج الكترون

- هنالك قوة جذب ولفترة وجيزة جداً بين الآيون الموجب والإلكترون المار قربه وربما يحدث عنه تحوير بسيط في اهتزاز ذلك الآيون.
- ويمكن ان يؤثر هذا الآيون على الكترون آخر ماراً قربه ويجذبه نحوه.
- ان نتيجة هذين التفاعلين هو ظهور قوة جذب بين الالكترونين ولا يمكن حدوث مثل هذا التجاذب لولا وجود الآيون الموجب.
- باستخدام نظرية المجال field theory فإن التأثير المتبادل هو نتيجة تبادل فونون افتراضي ذي طول موجي بين الالكترونين.

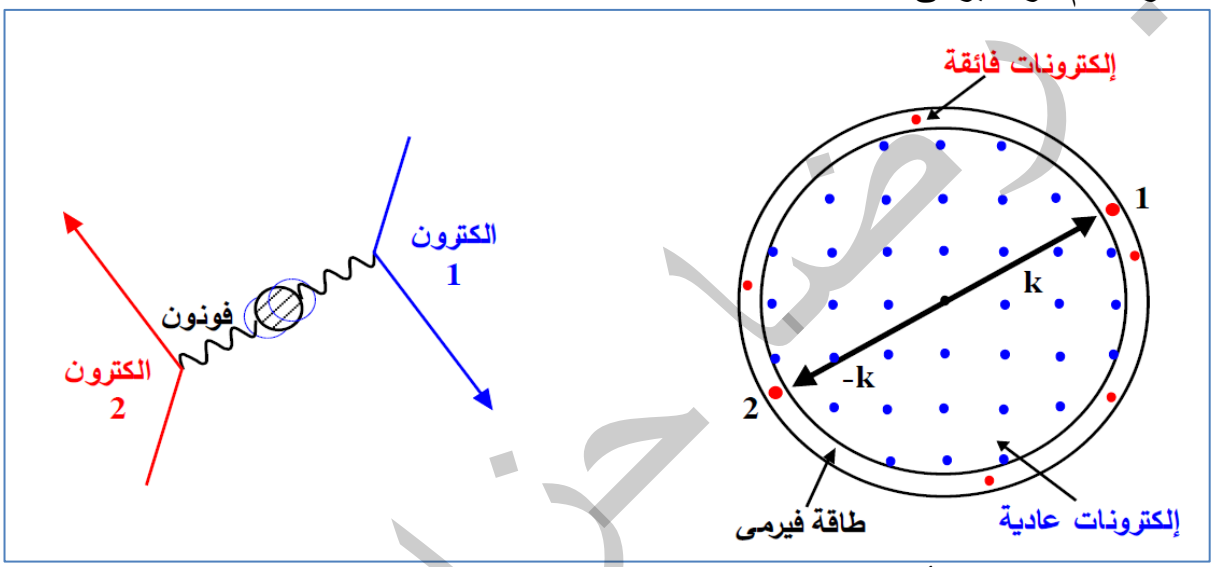
$$\vec{K_1} - \vec{q} = \vec{K_1'}$$

$$\vec{K_2} + \vec{q} = \vec{K_2'}$$

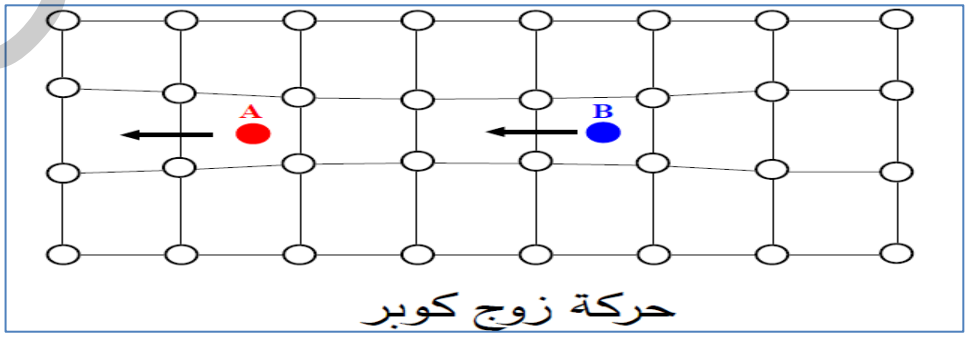
$$\therefore \vec{K_1} + \vec{K_2} = \vec{K_1'} + \vec{K_2'}$$

ازواج كوبر: أشـــار العالم كوبر عام 1956 انه في حالة وجود قوة جذب بين الالكترونات، مهما كانت ضـــعيفة، فان الحالة الارضـــية في درجة حرارة الصـــفر المطلق تحتوي على الكترونات متجمعة على اشـــكال ازواج. وهذه الأزواج من الالكترونات يطلق عليها ازواج كوبر.

ولإلقاء الضوء على تركيب زوج كوبر، نفترض معدن تقع الكترونات التوصيل فيه داخل كرة فيرمى ونفترض أن الكترونين يقعان بالقرب من سطح فيرمى تماما. يحدث تنافر بين هذين الالكترونين بسبب تشابه الشحنة وبالتالي توجد قوة كولوم. وبسبب الحجب الذي تسببه الالكترونات الاخرى الموجودة بين هذين الالكترونين فإن قوة تنافر كولوم يمكن أن تتناقص وعند أخذ هذا الحجب في الاعتبار فإن قوة التنافر بين الالكترونين تختفى تماما بالرغم من صغر حجم كرة فيرمى.

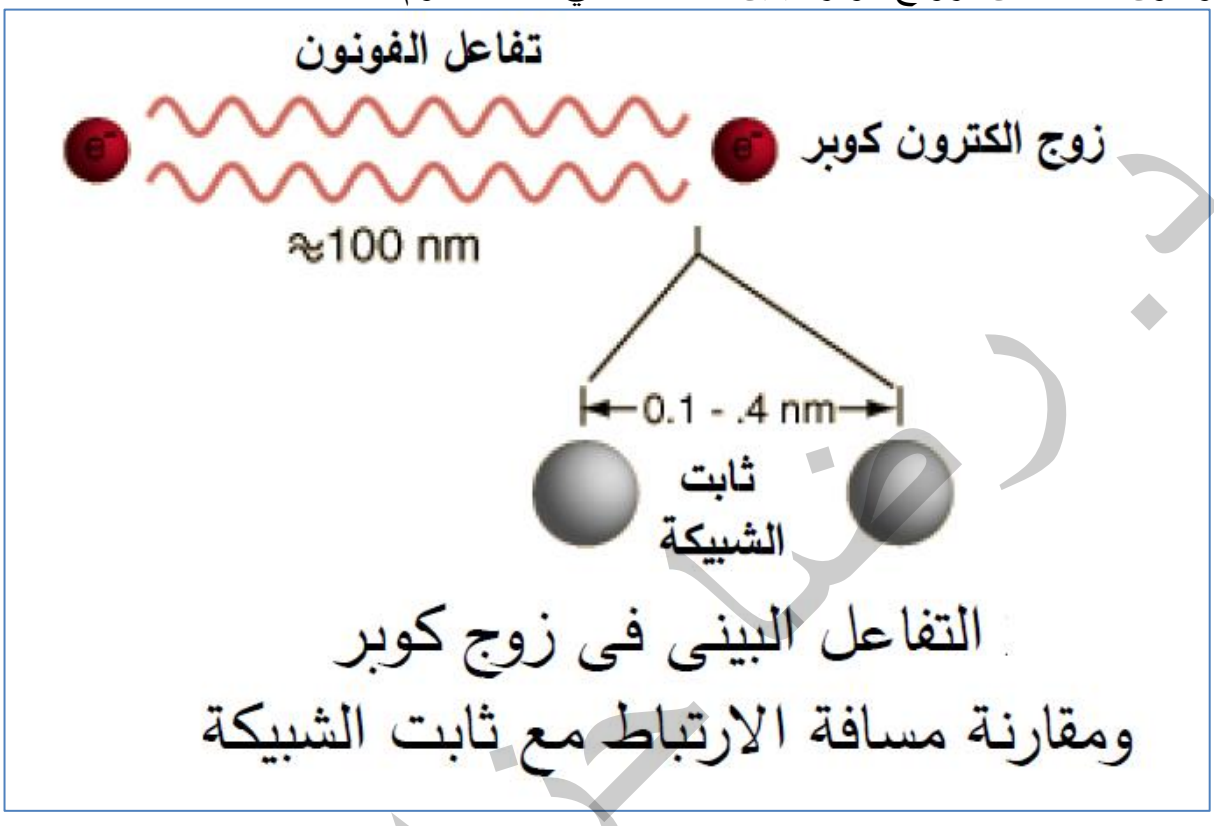


افترض العالم كوبر أن الالكترونين في زوج كوبر يكونان حالة ارتباط فيما بينهما وهذا الارتباط يُكون منهما نظاما واحدا وبالتالي ترتبط حركة أحدهما بالأخر ويتفكك زوج كوبر فقط عندما يأخذ النظام كمية طاقة تساوى طاقة الربط بين الالكترونين. فسر كوبر منشأ قوة الترابط في زوج الالكترونات على أساس وجود قوة جذب ولفترة وجيزة وتؤثر في اهتزاز الأيون الموجب الذي يمر بالقرب منه الالكترون) كما في الشكل السابق ويجذبه نحوه. وبالتالي ينتج تجمع استقطاب (للأيونات الموجبة بالقرب من الالكترون المار وهذا الاستقطاب يسبب ظهور جذب إضافي بين الالكترون والإلكترون الأخر وبالتالي يتولد زوج كوبر، كما هو مبين في الشكل التالي.



حركة زوج كوبر

تسمى قوة الارتباط بين الكتروني زوج كوبر بتفاعل الفونون وتكون طاقة الارتباط في بناء الزوج أكثر قوة عندما تكون عزوم ولف الالكترونين متعاكسة، بمعنى k- و k . على ذلك يمكن القول إن كل الالكترونات الموجودة بالقرب من سطح فيرمى تتكثف في الحالة الأرضية وتُكون أنظمة من أزواج كوبر. يبين الشكل التالي هذا المفهوم.



كما يوضح أيضا كيف أن أزواج كوبر ترتبط معا على مسافة مئات النانومتر أي على مسافة أكبر من ثابت الخلية بالف مرة ويكون سلوكها مثل سلوك البوزونات وتتكثف في الحالة الأرضية.

عمق الاختراق:

ان اهم فرضية في هذا النموذج هو انه في الموصل المفرط عند $T < T_C$ فإن جزءاً مقداره $n_s(T)/n$ من العدد الكلي لألكترونات التوصيل n يستطيع ان يساهم في (**التيار المفرط**). نفترض ان هنالك مجالاً كهربائياً لحظياً عبر موصل مفرط (المقدار n_s يدعى بكثافة **الكترونات التوصيل الفائق**). فتكون معادلة الحركة **للالكترونات (الالكترونات فائقة التوصيل) Superelectron** في هذا المجال الكهربائي:

$$m\frac{d\mathbf{v}_s}{dt} = -e\mathscr{E}$$

حيث أن V_s **سرعة الكترونات التوصيل الفائقة**. القوة الوحيدة المؤثرة على الإلكترون هي القوة الناتجة عن المجال الكهربائي. أما قوة الاستطارة أو التصادم فليست موجودة في المعادلة وذلك لأن الكترونات التوصيل الفائق لا تستطير أو تتصادم. وبالتالي يتم إعطاء **كثافة التيار الفائق J_s (كثافة التيار الناتجة عن الكترونات التوصيل الفائق)** بواسطة:

$$\mathbf{J}_s = n_s(-e)\mathbf{v}_s$$

$$\frac{dj_s}{dt} = -e\left(\frac{dV_s}{dt}\right)n_s$$

نأخذ مشتقة V_s بالنسبة للزمن من المعادلة الاولى ونعوضها في المعادلة الاخيرة، فينتج:

$$\dot{\mathbf{j}}_s = \frac{n_s e^2}{m}\mathscr{E}$$

حيث تشير النقطة فوق J إلى المشتقة بالنسبة للزمن.

في الحالة المستقرة، يكون التيار في الموصل الفائق ثابتًا. لذلك فإن المعادلة الأخيرة تشير الى أن $J_s = 0$ ، (مشتقة الثابت صفر) وهذا يعني ان المجال الكهربائي في المعادلة الأخيرة يساوي صفر:

$$\mathscr{E} = 0$$

يؤكد هذا الاستنتاج المهم أنه في الحالة المستقرة، يختفي المجال الكهربائي داخل الموصل الفائق. بعبارة أخرى، انخفاض الجهد عبر موصل فائق يساوي صفرًا.

المعادلة الأخيرة تؤدي على الفور إلى نتيجة مهمة أخرى. عندما يتم الجمع بين العلاقة مع معادلة ماكسويل،

$$\dot{\mathbf{B}} = -\nabla \times \mathscr{E}$$

ويمكن ان نجد

$$\dot{\mathbf{B}} = 0$$

هذا يؤكد أنه في الحالة المستقرة يكون المجال المغناطيسي ثابتًا.

لكن المعادلة الأخيرة تتعارض مع تأثير مايسنر (تاثير مازنر). تنص هذه المعادلة على أن B ثابت بغض النظر عن درجة الحرارة، بينما نتذكر أنه عند رفع T الى Tc سوف يخترق التدفق فجأة العينة عند الوصول إلى نقطة الانتقال. وعليه لابد لنا من ادخال بعض التعديلات على المعادلات المذكورة أعلاه لنحصل على النتيجة المطلوبة

نعوض $\mathscr{E}$ من المعادلة $\dot{\mathbf{j}}_s = \frac{n_s e^2}{m}\mathscr{E}$

في المعادلة الأخيرة، $\dot{\mathbf{B}} = -\nabla \times \mathcal{E}$

فنحصل على معادلة لندن *London equation*

$$\dot{\mathbf{B}} = -\frac{m}{n_s e^2}\nabla \times \dot{\mathbf{J}}_s$$

هذه المعادلة غير صحيحة، كما رأينا للتو، لأنها تتنبأ $\dot{\mathbf{B}} = 0$.

لتصحيح هذا، افترض الاخوين لندن العلاقة

$$\dot{\mathbf{B}} = -\frac{m}{n_s e^2}\nabla \times \dot{\mathbf{J}}_s \qquad \text{والتي لها نفس الشكل} \qquad \mathbf{B} = -\frac{m}{n_s e^2}\nabla \times \mathbf{J}_s,$$

إلا أنه تم إلغاء التمايز (المشتقة) بالنسبة للزمن. سنرى الآن أن العلاقة **(معادلة لندن)** تؤدي إلى نتائج تتفق مع التجربة.

$$\mathbf{B} = -\frac{m}{n_s e^2}\nabla \times \mathbf{J}_s,$$

هي علاقة بين B و J ترتبط هذه الكميات أيضًا بمعادلة ماكسويل

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J}_s.$$

μ_o تمثل النفاذية المغناطيسية . نأخذ التفاف curl المعادلة الاخيرة، نعوض عن $\nabla \times \mathbf{J}_s$ ثم استخدم المتطابقة:

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{B} = \nabla(\nabla \cdot \mathbf{B}) - \nabla^2 \mathbf{B} = -\nabla^2 \mathbf{B} \qquad \text{لكن} \qquad \nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

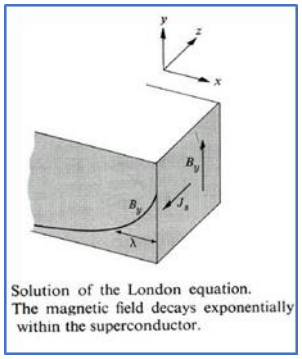
$$\nabla \times \nabla \times B = -\nabla^2 B = \mu_o \nabla \times j_s$$

$\because$

$$\mathbf{B} = -\frac{m}{n_s e^2}\nabla \times \mathbf{J}_s, \qquad \therefore \frac{-n_s e^2 B}{m} = \nabla \times j_s$$

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

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



Solution of the London equation. The magnetic field decays exponentially within the superconductor.

الان اذا طبقنا معادلة المجال هذه على حالة هندسية بسيطة. العينة مع سطحها في مستوى yz (كما هو موضح في الشكل) ، ويتم تطبيق الحقل في الاتجاه y نظرًا لأن الكميات تختلف فقط في الاتجاه السيني ، فإن المعادلة الأخيرة تختزل الى:

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} B_y = \frac{\mu_0 n_s e^2}{m} B_y$$

حل هذه المعادلة التفاضلية البسيطة هو

$$B_y(x) = B_y(0)\, e^{-x/\lambda},$$

where

$$\lambda = (m/\mu_0\, n_s\, e^2)^{1/2}.$$

نستنتج من العلاقة الأخيرة التي تمثل عمق اختراق لندن: $\boldsymbol{\lambda = (m/\mu_o\, n_s e^2)^{1/2}}$

1. ان فيض المجال يستطيع ان ينفذ الى مسافة محدودة عند السطح وتسمى المسافة **(بعمق الاختراق)** $(\boldsymbol{\lambda})$.
2. ان عمق الاختراق يتغير مع درجات الحرارة حيث تزداد قيمة $(\boldsymbol{\lambda})$ بأرتفاع درجات الحرارة لتصبح مالا نهاية عند $T = T_C$ وذلك لأن المادة تتحول الى الحالة الاعتيادية

اذا **استبدلنا n من المعادلة التالية** التي تعطي تركيز الإلكترونات الفائقة:

نلاحظ بان عدد الإلكترونات الفائقة يعتمد على درجة الحرارة.

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

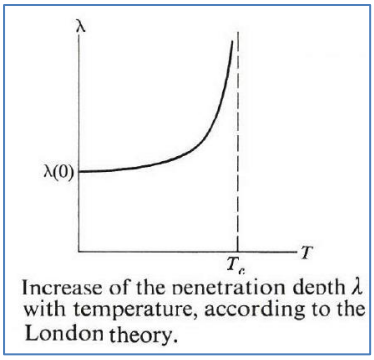
بالمعادلة $\boldsymbol{\lambda = (m/\mu_o\, n_s e^2)^{1/2}}$

نحصل على:

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

where

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



Increase of the penetration depth λ with temperature, according to the London theory.

3. التيار الكهربائي في موصل مفرط يجري قرب السطح للموصل وليس بداخله:

$$J_z(x) = -\left(\frac{n_s e^2}{\mu_0 m}\right)^{1/2} B_y(x) = -J_s(0)\, e^{-(x/\lambda)}$$

وهذا يعني ان التيار يتناقص اسياً عندما ننتقل من سطح الموصل الى داخله. أي ان التيار محصور قرب سطح الموصل.

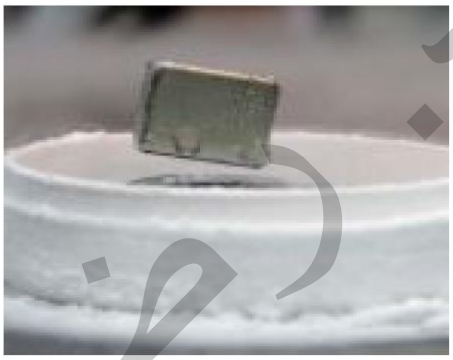
إذا كان الموصل على شكل أسطواني فان التيار يجري على سطح الأسطوانة فقط وهذا يختلف عن الموصل الاعتيادي حيث التيار يمر بشكل منتظم خلال العينة كلها.

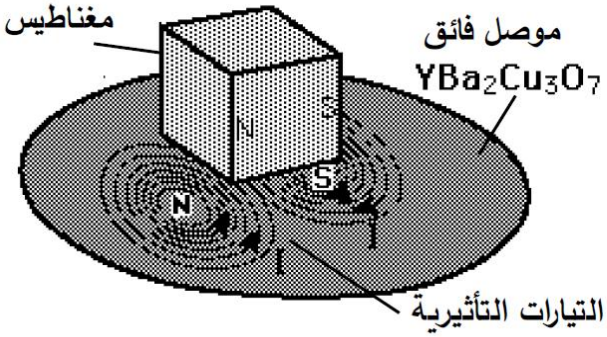
وبذلك فان ظاهرة مازنر هي نتيجة لهذا التيار السطحي الذي يحفظ الموصل من المجال المغناطيسي وبذلك يكون الموصل ذا خاصية دايامغناطيسية مثالية او بمعنى اخر، ان المجال الناتج عن التيارات السطحية يعاكس كلياً المجال المغناطيسي الذي ينفذ الى داخل الموصل.

ظاهرة الرفع:

تحدث في المواد فائقة التوصيل ظاهر مثيرة تسمى (ظاهرة الرفع). تنتج هذه الظاهرة عن التيارات الدوامة المتولدة في دوائر الموصلات الفائقة والتي بدورها تولد مجالات مغناطيسية تتنافر مع الأجسام الأخرى والتي تظهر كما لو كانت معلقة في الهواء فوق الموصل الفائق. فإذا أسقطنا مثلا مغناطيسا صغيراً فوق موصل فائق ينشأ مجال مغناطيسي تأثيري نتيجة

تكون تيارات دوامة على سطح الموصل وتكون التيارات التأثيرية صورة مرآة للأقطاب على سطح الموصل وبالتالي تتنافر مع أقطاب المغناطيس وتقاوم هذا المجال حركة السقوط. عند اقتراب المغناطيس من الموصل تزداد قوة التنافر حتى تتساوى مع وزن المغناطيس فيعلق فى الهواء فوق الموصل الفائق وكأنه مرفوع. تم الاستفادة من ظاهرة الرفع فى تقليل حركة الاحتكاك في القطارات فتم تصميم القطار بدون احتكاك حيث يتحرك مرفوعا فوق القضبان بواسطة الوسائد المغناطيسية والموصلات الفائقة وبالتالي تكون سرعته عالية نظراً لانعدام الاحتكاك.





تطبيقات المواد فائقة التوصيل:

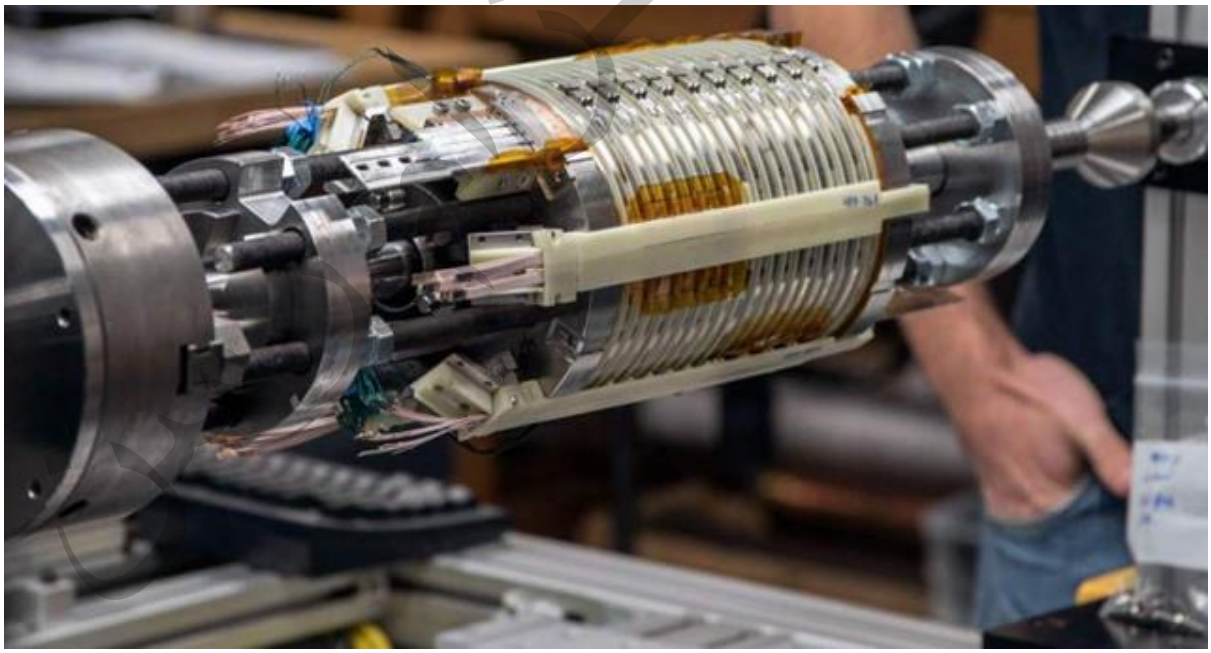
1_ صنع قطارات تسير بسرعة هائلة على وسادة من المغناطيس.
2_ صناعة الاجهزة الالكترونية المختلفة وخاصة صناعة اجهزة حاسوب صغيرة الحجم سريع الاداء.
3 _ صناعة اسلاك ضخمة فائقة التوصيل لنقل الكهرباء لإنارة المدن مثلاً.
4_ عمل ملفات عملاقة لكي تخزن الكهربائية.
5_ صناعة الاجهزة ذات التوصيل الفائق والتي تستخدم في مجال البحوث بدلاً من المغانيط التقليدية.
6- صناعة أجهزة خاصة لتوليد الطاقة الكهربائية.

امثلة على هذه التطبيقات: هي تستخدم في:

- أجهزة التصوير بالرنين المغناطيسي الطبية.
- وفي القياس بواسطة مطياف الكتلة.
- ومغناطيسات توجيه حزم الجسيمات المشحونة معجلات الجسيمات مثل معجل LHC التي تديره المنظمة الأوروبية للبحث النووي سيرن.
- كما يمكن استخدامها أيضا في الفصل المغناطيسي.
- وتستخدم الموصلات الفائقة في صنع مفارق جوزفين Josephson junctions أكثر مقاييس المغنطيسية حساسية على الإطلاق. وتستخدم أجهزة "SQUIDs" في المجهر الإلكتروني الماسح.
- والمواد النانو مجهرية مثل: أنابيب النانو، والمواد المركبة.
- والتبريد المغنطيسي فائق التوصيل.
- صناعة مجسات فائقة التوصيل

قطار مغناطيسي معلق يسير على وسادة

أقوى مغناطيس فائق التوصيل في العالم تم تصنيعه في مختبر(National MagLab)
الذي يقع في فلوريدا و قد حقق الاكتشاف الجديد رقما قياسيا يبلغ 32 تسلا



أسئلة:

س1) إذا علمت ان عمق الاختراق λ للزئبق Hg يساوي 75 nm عند درجة حرارة 3.5 K. فاذا علمت بان درجة الحرارة الحرجة للزئبق هي 4.15 K. جد
1- عمق الاختراق عند درجة الحرارة من الصفر المطلق $\lambda(0)$.
2- كثافة الكترونات التوصيل n_s عندما تقترب درجة الحرارة من الصفر المطلق

==========

س2) إذا علمت ان عمق الاختراق λ لمعدن النيوبيوم Nb يساوي 4890 Å عند درجة حرارة 5K. فاذا علمت بان درجة الحرارة الحرجة للنيوبيوم هي 9.5 K. جد
1- عمق الاختراق عندما تقترب درجة الحرارة من الصفر المطلق.
2- كثافة الكترونات فرط التوصيل n_s عندما تقترب درجة الحرارة من الصفر المطلق
3- نسبة تركيز الكترونات فائقة التوصيل الى تركيز الكترونات التوصيل $\left(\frac{n_s}{n}\right)$

==========

س3) احسب قيمة المجال المغناطيسي B_C الحرج للرصاص عند 2.5 K و 5 K اذا علمت ان درجة الحرارة الحرجة تساوي T_c=7.19 K و اقصى قيمة للمجال المغناطيسي الحرج عند درجة الصفر المطلق $B_c(0) = B_O = 0.0803$.

تطبيق مباشر على العلاقة التالية

$$B_C = B_O \left[1 - \left(\frac{T}{T_C}\right)^2\right]$$

$$B_C = \mathbf{0.0803} \left[1 - \left(\frac{2.5}{7.19}\right)^2\right] = 0.0706$$

$$B_C = \mathbf{0.0803} \left[1 - \left(\frac{5}{7.19}\right)^2\right] = 0.0415$$

سؤال: احسب قيمة المجال المغناطيسي الحرج B_C للرصاص عند 5.5 K اذا علمت ان درجة الحرارة الحرجة تساوي T_c=7.15 K و اقصى قيمة للمجال المغناطيسي الحرج عند درجة الصفر المطلقة تساوي $B_c(0) = B_O = 0.08$

$$B_C = \mathbf{0.08} \left[1 - \left(\frac{5.5}{7.15}\right)^2\right] = 0.0326627 = 0.0327$$ صح

إجابة خاطئة بدون التربيع = 0.0185