Phys 570

Lecture #14

Physics & Astronomy Dept.
College of Science
King Saud University

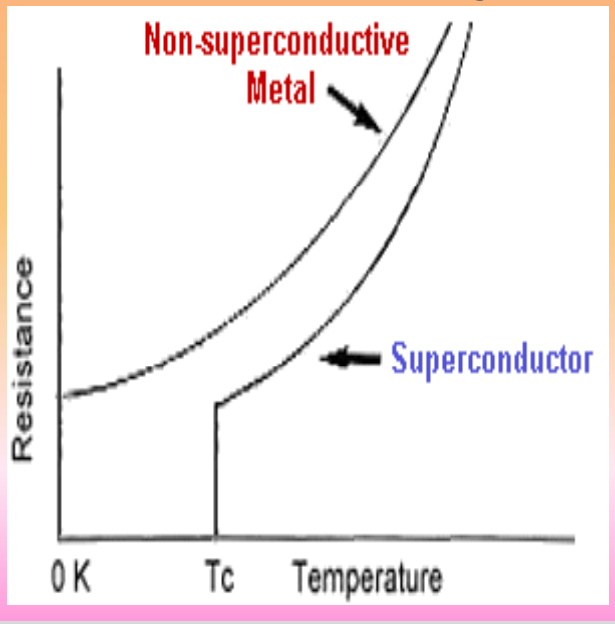
Nasser S. Alzayed

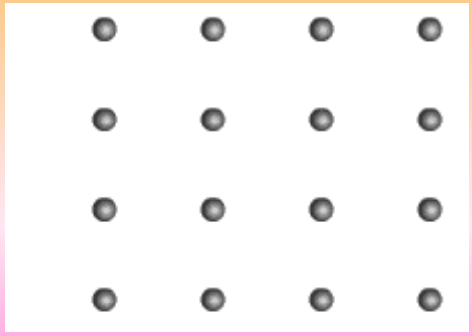
nalzayed@ksu.edu.sa

الفصل العاشر: الموصلات الفائقة

مقدمة

- تعرف الموصلية الفائقة بأنها انعدام المقاومة تماما عند الوصول إلى درجة حرارة معينة أو اقل منها.
- تم اكتشاف هذه الظاهرة لأول مرة من قبل عالم اسمه كامرلن أونس في عام 1911 م.
- وكان هذا العالم قد تمكن من تسييل الهيليوم قبل ذلك بثلاث سنوات.





- عندما تصل درجة الحرارة إلى درجة محددة تسمى بدرجة التحول الحرج فإن المقاومة تهبط فجأة إلى الصفر.
- بسبب انعدام المقاومة، يمكن أن يبقى التيار داخل الموصل لفترة لا نهائية تقريبا.

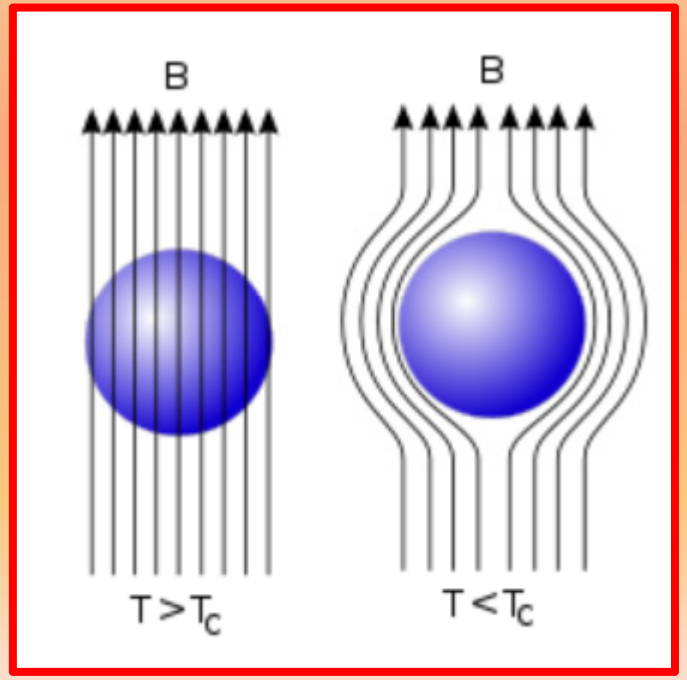
الفصل العاشر: الموصلات الفائقة

مقدمة

- الخصائص المغناطيسية لا تقل أثارة عن انعدام المقاومة، حيث أن تلك الخصائص لا يمكن تفسيرها بافتراض أن هذا الموصل موصل عادي بدون مقاومة.
- عندما يسلط مجال مغناطيسي خارجي فأن الموصل يسلك كما لو كان مادة ديامغناطيسية تماما حيث يرفض المجال ولا يسمح له بالدخول
- عندما يتم تسليط مجال قبل تبريد الموصل فإنه يدخل في وسطل الموصل ولكن عندما يبرد الموصل فإنه يطرد المجال المغناطيسي إلى الخارج، وتسمى هذه الظاهرة بظاهرة مايزنر Meissner effect
- إن الخصائص المغناطيسية للموصلات الفائقة تميزها عن غيرها وهي صفة خاصة بها وتستخدم في محاولة تفسير الظاهرة.

الفصل العاشر: الموصلات الفائقة

مقدمة



الفصل العاشر: الموصلات الفائقة

حصول الموصلية الفائقة Occurrence of Superconductivity

- تحصل التوصيلية الفائقة في عدد كبير من العناصر المعدنية وسبائكها ومركباتها وكذلك في بعض أشباه الموصلات المطعمة.
- وتتراوح درجات حرارة التحول من 0 K وحتى 160 K.
- بعض المواد تصبح موصلات فائقة فقط تحت الضغط الشديد مثل: السليكون الذي يصبح كذلك عند ضغط مقداره: 165 kbar
- سوف نلاحظ وجود نوعين من الموصلات الفائقة تسمى: النوع الأول Type I والنوع الثاني: Type II
- مطلوب من كل طالب أو طالبة: جدول بالعناصر والمركبات ودرجات تحولها تجمع من الإنترنت (50 على الأقل وليس هناك حد أعلى).

الفصل العاشر: الموصلات الفائقة

المجالات العالية تدمر التوصيلية الفائقة Destruction of Sup. by Magnetic Fields

- التوصيلية الفائقة تتأثر سلبا بالمجالات المغناطيسية الخارجية. وقد يحصل دمار كامل للتوصيلية عندما تكون هذه المجالات عالية جدا.
- لذا يوجد مجال مغناطيسي يطلق عليه المجال المغناطيسي الحرج H_c يختلف من مركب إلى مركب ومن عنصر إلى آخر ويعتمد على درجة الحرارة. وبشكل عام ترتفع قيمة هذا المجال كلما تم تبريد المركب أكثر.
- هناك ملاحظة حول الرمز المستخدم: في نظام CGS يستخدم الباحثون الرمز H_c و B_c أو B_{ac} دون تفريق. ولكن في SI العلاقة بينهما كالتالي: $H_c = B_{ac}/\mu_o$.
- سوف يتبين لنا بعد قليل أن المجال الحرج يختلف من النوع الأول إلى النوع الثاني حيث يوجد مجال حرج واحد فقط في النوع الأول ومجالان في النوع الثاني.

الفصل العاشر: الموصلات الفائقة

المجالات العالية تدمر التوصيلية الفائقة Destruction of Sup. by Magnetic Fields

- التوصيلية الفائقة تتأثر سلبا بالمجالات المغناطيسية الخارجية. وقد يحصل دمار كامل للتوصيلية عندما تكون هذه المجالات عالية جدا.
- لذا يوجد مجال مغناطيسي يطلق عليه المجال المغناطيسي الحرج H_c يختلف من مركب إلى مركب ومن عنصر إلى آخر ويعتمد على درجة الحرارة. وبشكل عام ترتفع قيمة هذا المجال كلما تم تبريد المركب أكثر.
- هناك ملاحظة حول الرمز المستخدم: في نظام CGS يستخدم الباحثون الرمز H_c و B_c أو B_{ac} دون تفريق. ولكن في SI العلاقة بينهما كالتالي: $H_c = B_{ac}/\mu_o$.
- سوف يتبين لنا بعد قليل أن المجال الحرج يختلف من النوع الأول إلى النوع الثاني حيث يوجد مجال حرج واحد فقط في النوع الأول ومجالان في النوع الثاني.

الفصل العاشر: الموصلات الفائقة

أثر مايزنر Meissner Effect

- هناك صفة بارزة في التوصيلية الفائقة لا تشاركها فيها أي موصلات أخرى وهي تتعلق بما يسمى أثر مايزنر.
- وأثر مايزنر يقصد به أنه عند تسليط مجال مغناطيسي خارجي على المركب قبل وصوله إلى التوصيلية الفائقة فإنه يدخل في داخل الموصل، وبمجرد أن يصل الموصل إلى درجة حرارة تحت الحرجة T_c فإنه يقوم بطرد المجال المغناطيسي إلى خارجه. وأما عندما يتم تسليط مجال مغناطيسي خارجي على موصل في حالة التوصيلية الفائقة فإنه لن يسمح للمجال بالدخول.
- وقد تم الحصول على موصلات مصنوعة من بعض البوليمرات تصل مقاومتها إلى قريب من الصفر، غير أنها لم تعط أثر مايزنر، وبالتالي فقد تم رفض أعطائها اسم (موصلات فائقة).
- باختصار الموصولات الفائقة في الظروف العادية لا يوجد بداخلها مجالات مغناطيسية $B = 0$.

الفصل العاشر: الموصلات الفائقة

أثر مايزنر Meissner Effect

- المجال المغناطيسي من جميع النواحي عندما يطبق على موصل فائق فهو يكتب بالصورة التالية:

$$\text{(CGS)} \qquad B = B_a + 4\pi M = 0 \ ; \qquad \text{or} \qquad \frac{M}{B_a} = -\frac{1}{4\pi} \ ; \qquad (1)$$

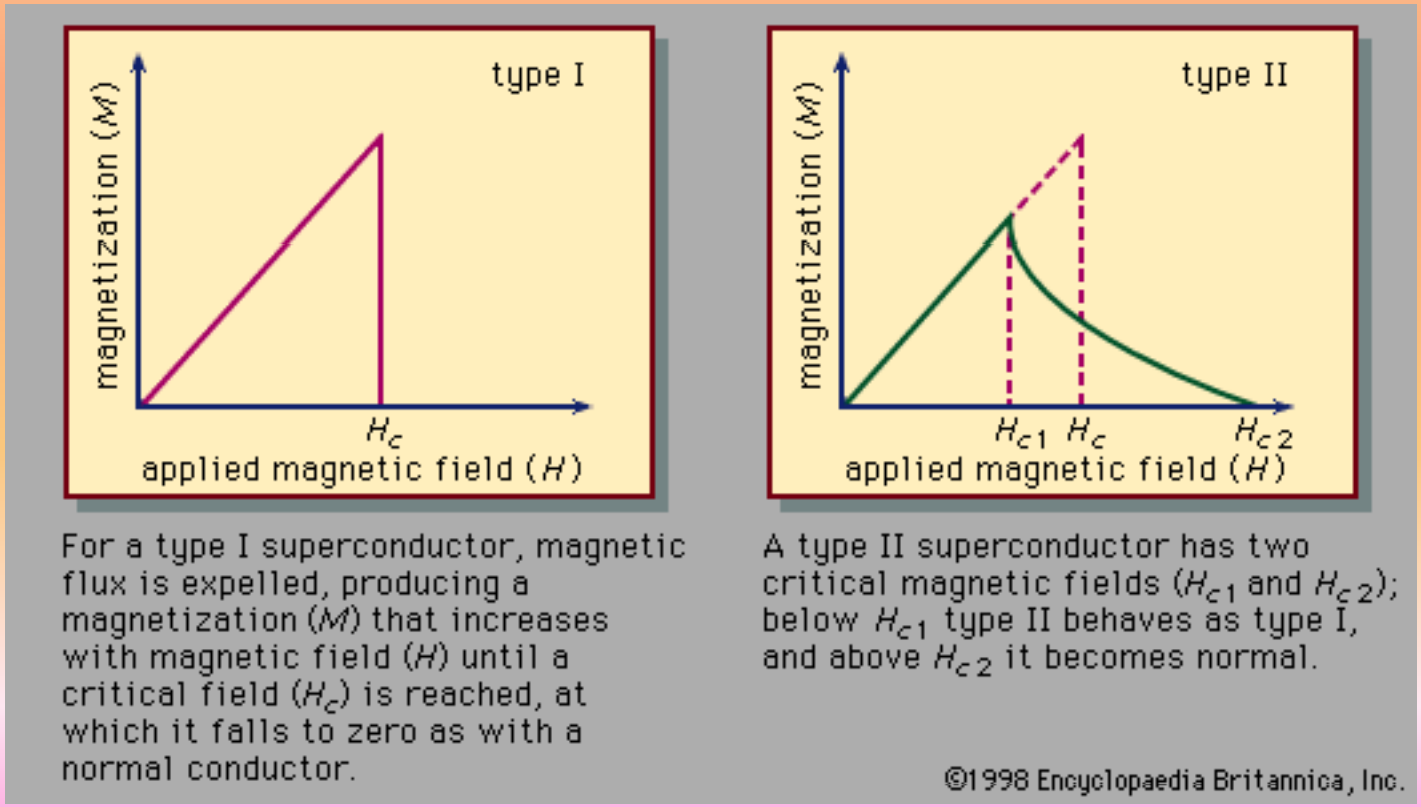
$$\text{(SI)} \qquad B = B_a + \mu_0 M = 0 \ ; \qquad \text{or} \qquad \frac{M}{B_a} = -\frac{1}{\mu_0} = -\epsilon_0 c^2 \ .$$

- أن خاصية كون B =0 في داخل الموصل الفائق لا يمكن اشتقاقها من مجرد خاصية انعدام المقاومة.
- لو أخذنا قانون أوم: E = ρj فلو كانت ρ = 0 فإن معنى ذلك أن E = 0 وحيث أن معادلات ماكسويل تعطي بناء على ذلك dB/dt =0 فهذا يدل على أن الاشتقاق يساوي صفرا ولكن B = constant ، وغاية ذلك أن المجال المغناطيسي ثابت لا يتغير مع الزمن ولكن هذه الطريقة لا تستطيع أثبات أن المجال يساوي الصفر.

الفصل العاشر: الموصلات الفائقة

أثر مايزنر Meissner Effect

- أثر مايزنر في الموصلات من النوع الأول والثاني يظهر بالصورة:



For a type I superconductor, magnetic flux is expelled, producing a magnetization (M) that increases with magnetic field (H) until a critical field (H_c) is reached, at which it falls to zero as with a normal conductor.

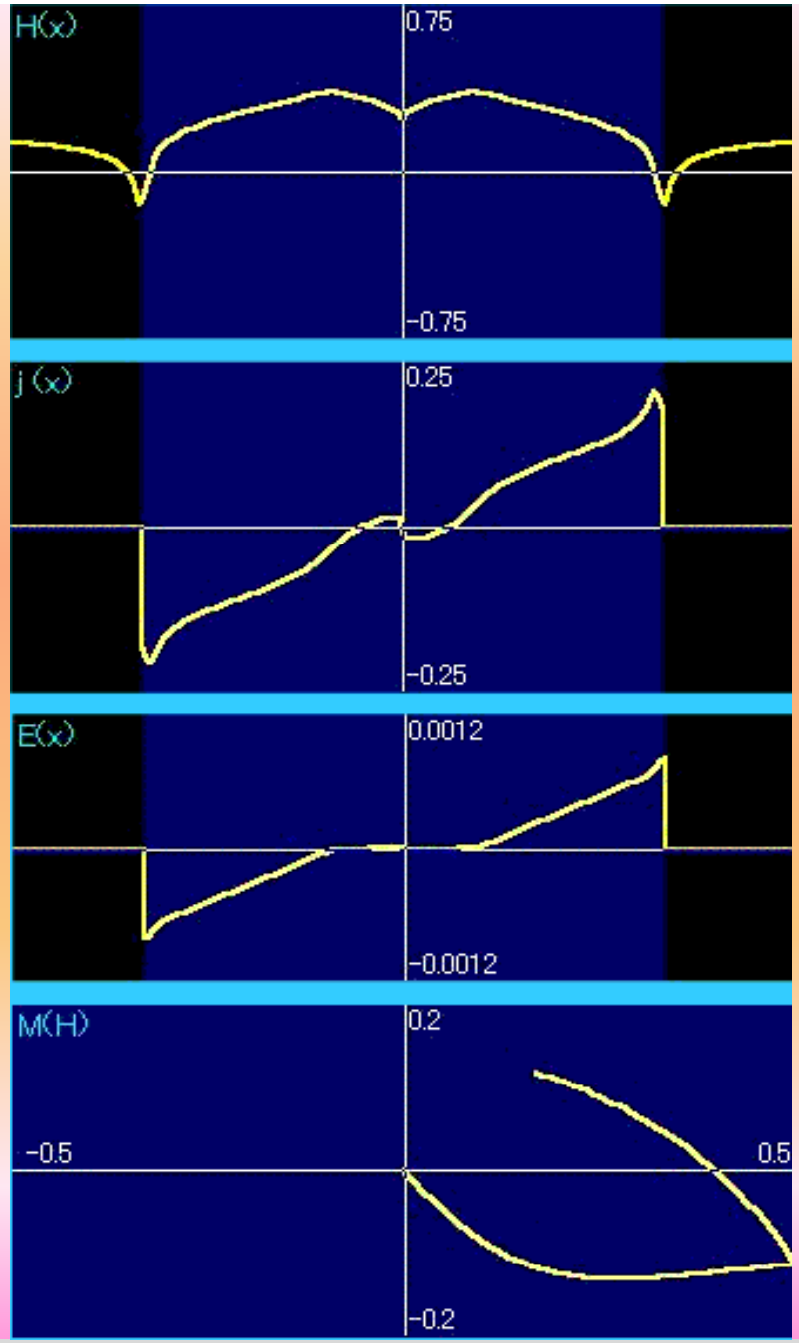
A type II superconductor has two critical magnetic fields (H_{c1} and H_{c2}); below H_{c1} type II behaves as type I, and above H_{c2} it becomes normal.

©1998 Encyclopaedia Britannica, Inc.

الفصل العاشر: الموصلات الفائقة

أثر مايزنر Meissner Effect

- إذن النوع الأول يحافظ على التوصيلية الفائقة ثم ينهار فجأة عند الوصول للمجال الحرج ويفقد توصيليته الفائقة بشكل تام تقريبا.
- النوع الثاني عندما يصل للمجال الحرج الأول فأنه يسمح للمجال المغناطيسي بالمرور من خلال بؤر معينة تسمى الفورتات Vortices بحيث أن كل بؤرة تمثل خطا واحدا فقط.
- هذه الحالة للمواد من النوع الثاني تسمى بالحالة المختلطة Mixed State حيث توجد مناطق توصيليتها فائقة بجانب مناطق توصيليتها عادية.
- هناك نقطة مهمة وهي أن التوصيلية الفائقة لا تدمر تماما في الموصلات من النوع الثاني إلا عند الوصول إلى المجال الحرج الثاني H_{c2}
- وحيث أن H_{c2} عالي جدا (حوالي 100 ضعف H_{c1}) فأن الموصلات من النوع الثاني مناسبة في التطبيقات حيث يمكن استخدامها بشكل عادي أثناء بقائها في الحالة المختلطة.


H(x)
0.75
-0.75
j (x)
0.25
-0.25
E(x)
0.0012
-0.0012
M(H)
0.2
-0.5
0.5
-0.2

الفصل العاشر: الموصلات الفائقة

السعة الحرارية *Heat Capacity*

- في جميع الموصلات فائقة التوصيل، تنخفض الأنتروبية بشكل كبير عندما يتم التبريد تحت درجة حرارة التحول T_c . وهذا فيه أشارة إلى أن المادة عندما تكون في حالة التوصيل الفائق، فإنها تكون أكثر انضباطا (أفضل من حيث النظام) منها عندما تكون في الحالة العادية.
- إن معنى ذلك أن كثيرا من الألكترونات يتم ترتيبها بشكل أفضل عندما يتم التبريد مقارنة بوضعها أثناء الاثارة الحرارية قبل التبريد.
- وتبين التجربة إلى أن السعة الحرارية المعتمدة على مشاركة الالكترونات تعتمد بصورة أسية على مقلوب درجة الحرارة 1/T ، انظر الشكر المرفق.

الفصل العاشر: الموصلات الفائقة

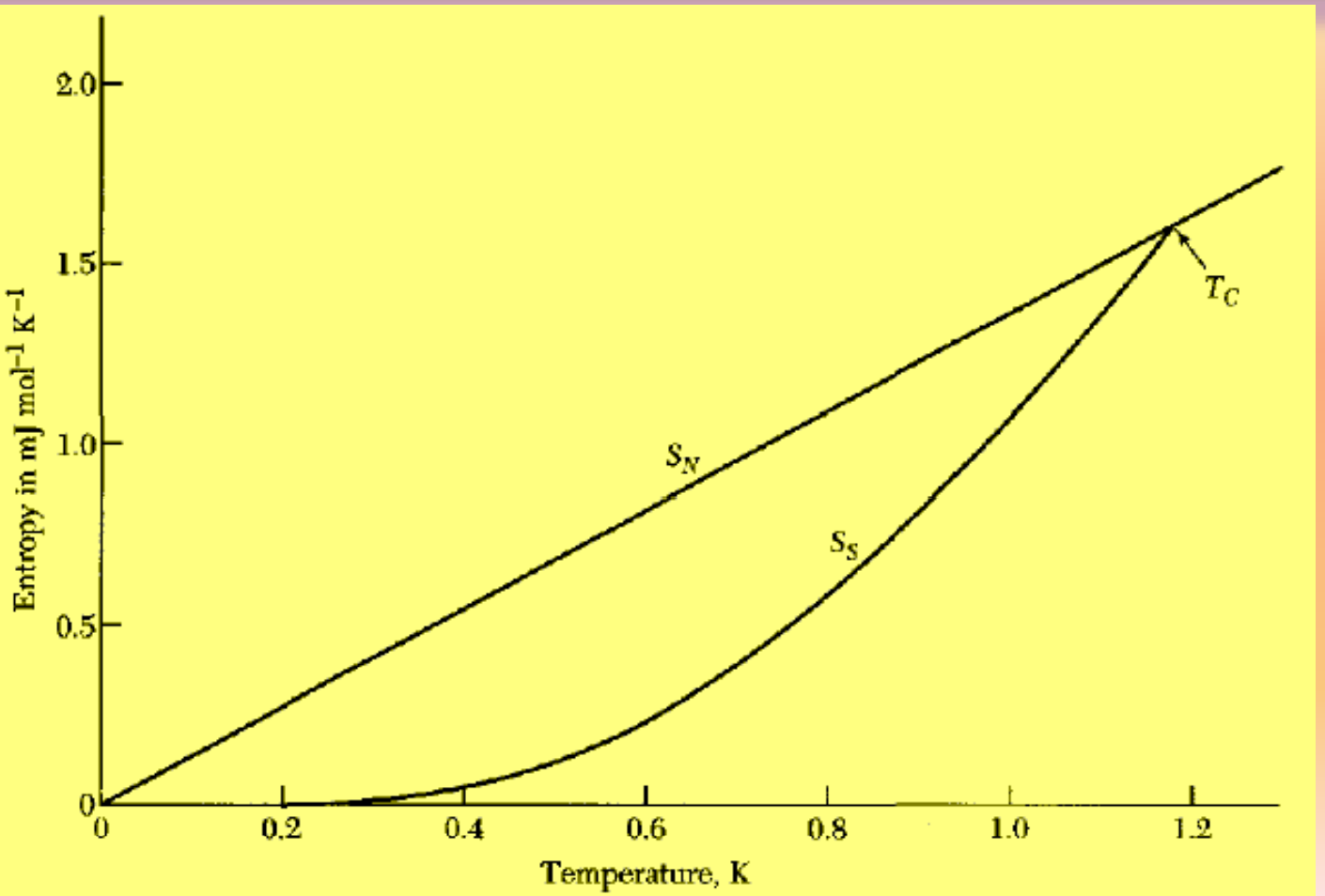


Figure 6 Entropy S of aluminum in the normal and superconducting states as a function of the temperature. The entropy is lower in the superconducting state because the electrons are more ordered here than in the normal state. At any temperature below the critical temperature T_c the specimen can be put in the normal state by application of a magnetic field stronger than the critical field.

الفصل العاشر: الموصلات الفائقة

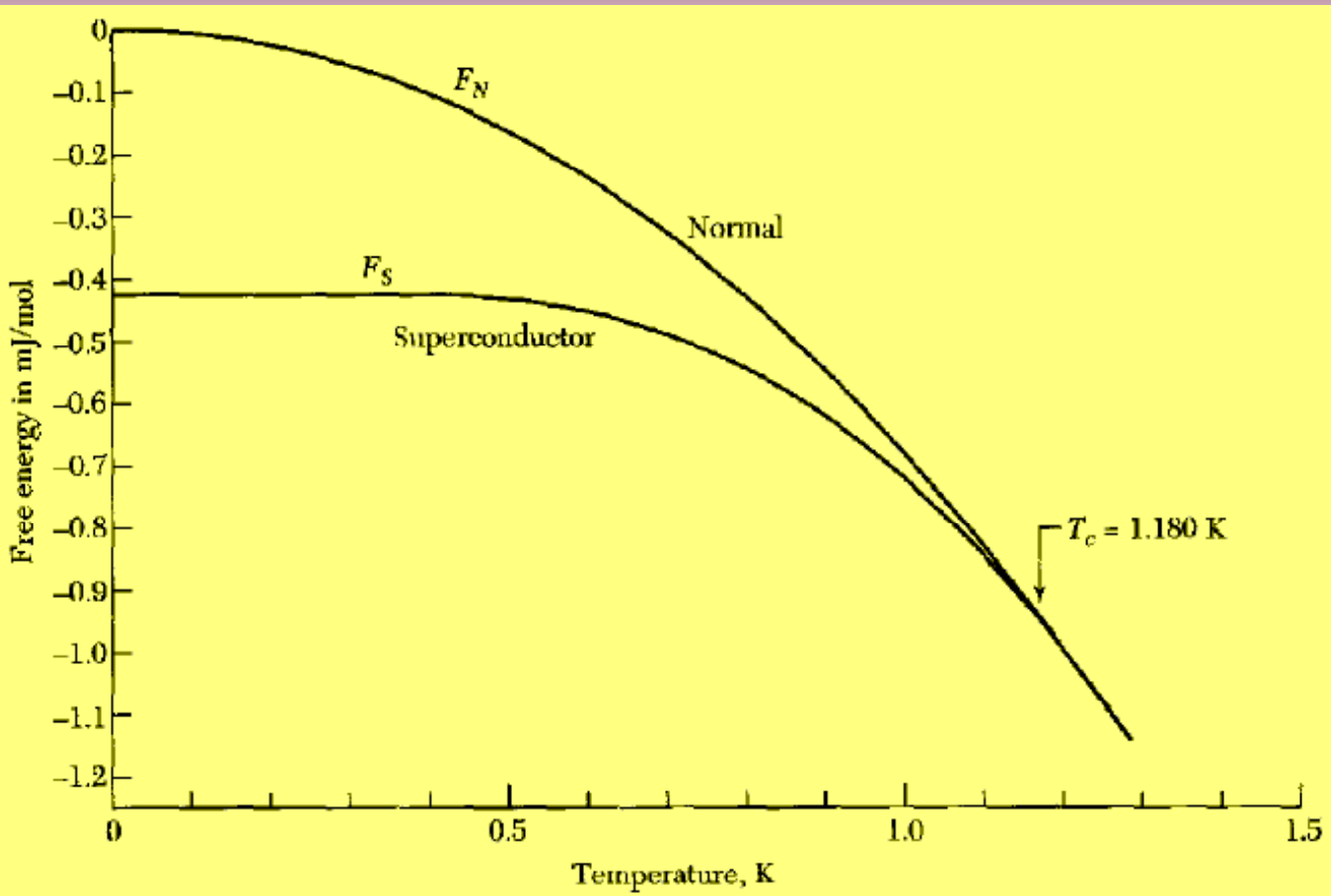


Figure 7 Experimental values of the free energy as a function of temperature for aluminum in the superconducting state and in the normal state. Below the transition temperature $T_c = 1.180$ K the free energy is lower in the superconducting state. The two curves merge at the transition temperature, so that the phase transition is second order (there is no latent heat of transition at T_c). The curve F_S is measured in zero magnetic field, and F_N is measured in a magnetic field sufficient to put the specimen in the normal state. (Courtesy of N. E. Phillips.)

Energy Gap فجوة الطاقة

- طاقة الفجوة في المواد فائقة التوصيل تختلف كلية عن طاقة الفجوة التي تحدثنا عنها في العوازل.
- مصدر تلك الفجوة في المواد العازلة ناتج أساسا من التفاعل بين الألكترونات والشبيكة حيث يؤدي هذا التفاعل إلى ارتباط الألكترونات بالشبيكة.
- مصدر تلك الفجوة في الموصلات الفائقة هو التفاعل بين الألكترونات والألكترونات الأخرى مما يؤدي إلى ترتيب مميز للألكترونات في الفضاء المقلوب.
- فجوة الطاقة في الموصلات الفائقة يعتمد على $-E_g/2k_BT$ وليس $-E_g/k_BT$

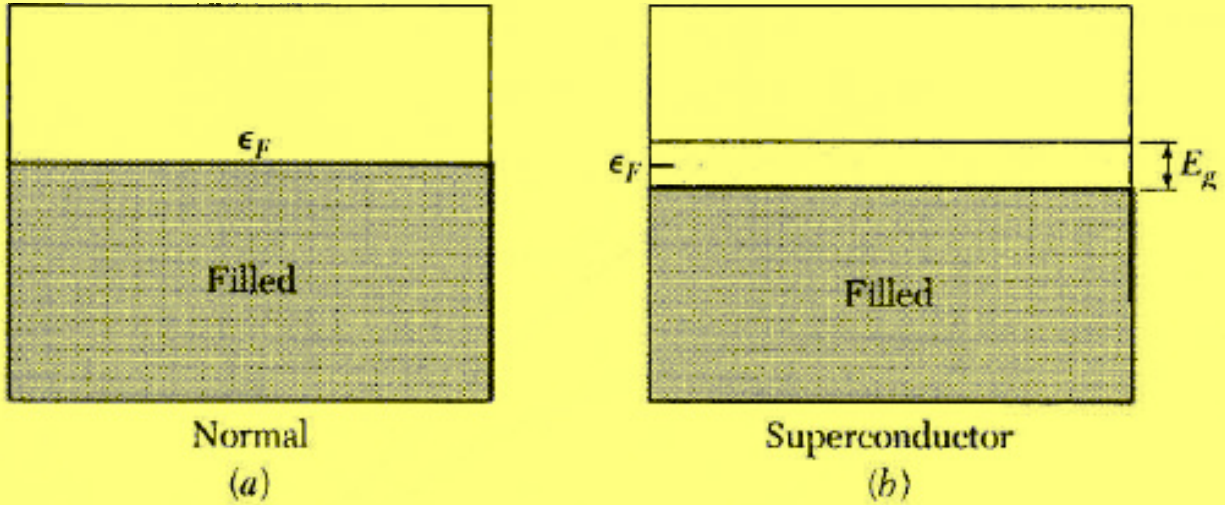


Figure 9 (a) Conduction band in the normal state: (b) energy gap at the Fermi level in the superconducting state. Electrons in excited states above the gap behave as normal electrons in rf fields: they cause resistance; at dc they are shorted out by the superconducting electrons. The gap E_g is exaggerated in the figure: typically $E_g \sim 10^{-4}\,\epsilon_F$.

أثر النظير في الموصلات الفائقة Isotope *Effect*

- النظائر هي تلك المواد التي تتفق في العدد الذري وتختلف في العدد الكتلي، أي لها نفس عدد الألكترونات والبروتونات ولكن تختلف فقط في عدد النيوترونات.
- مثال ذلك الكربون 12 والكربون 13 والكربون 14 كلها كربون وكلها تملك عدد 6 بروتونات ولكن لديها: 6 ثم 7 ثم 8 نيوترونات على الترتيب.
- إذن كتلة المول الواحد من النظائر يختلف باختلاف النظير.
- لوحظ في الموصلات الفائقة أن درجة حرارة التحول T_c تختلف في نفس العنصر بحسب النظير حيث تقل كلما زادت كتلة النظير.
- تعطى العلاقة رياضيا بالشكل التالي: $M^{\alpha}T_c$= Constant

Substance	α	Substance	α
Zn	0.45 ± 0.05	Ru	0.00 ± 0.05
Cd	0.32 ± 0.07	Os	0.15 ± 0.05
Sn	0.47 ± 0.02	Mo	0.33
Hg	0.50 ± 0.03	Nb_3Sn	0.08 ± 0.02
Pb	0.49 ± 0.02	Zr	0.00 ± 0.05

الفصل العاشر: الموصلات الفائقة

السعة الحرارية *Heat Capacity*

- إن اعتماد الموصلات الفائقة على كتلة النظير وكونها تقل عندما تزيد قد أعطى مؤشرا على تفسير ظاهرة التوصيلية الفائقة.
- فمن المعلوم أن التوصيلية مرتبطة بصورة أو بأخرى بتذبذب الشبيكات وبعلاقة ذلك بالألكترونات. وبالتأكيد أن الكتل الأثقل تتذبذب بشكل مختلف عن الكتل الخفيفة وهذا مصدر الفرق.
- إن هذه النظرة قد كانت هي الأساس الذي قامت عليه نظرية بي سي أس التي سوف نتعرض لها لاحقا والتي فسرت التوصيلية الفائقة بشكل جيد.