

### الموصلية الفائقة Superconductivity

(١٠،١) مقدمة

#### Introduction

في أواخر الثمانينيات تزايدت جهود الأبحاث في مجال المواد فائقة التوصيل بشكل دراماتيكي بسبب اكتشاف ما يسمى بالمواد فائقة التوصيل عند درجة حرارة عالية بواسطة بدنورز وميللر Bednoz and Muller في 1986. لقد كان اكتشافهم مهماً بالدرجة التي منحتهم جائزة نوبل في الفيزياء من الأكاديمية السويدية للعلوم بعد عام من هذا الاكتشاف.

للمواد فائقة التوصيل خاصيتان منفردتان جعلتا منها اهتماماً تجارياً بهذه المواد. أولاً: أن لها مقاومة كهربية صفر ومن ثم تحمل تياراً بدون فقد طاقة: قد يسبب هذا ثورة في انتقال الطاقة في المدن على سبيل المثال، وقد تم استثماره بالفعل في لفافات المغنطيسيات فائقة التوصيل المستخدمة في مطيافات NMR. ثانياً: أنها تطرد كل الفيض المغنطيسي من داخلها وبالتالي تجبر على الخروج من مجال مغنطيسي. يمكن للمواد فائقة التوصيل أن تقوم أو تسبح فوق مجال مغنطيس: كان لليابانيين تجربة قطار لا احتكاكي يطفو فوق خطوط سكك حديدية مغنطيسية ويمكنه إحراز شحنة فوق  $500 \text{ km h}^{-1}$  (300 m.p.h) حتى عام 1986، كانت المواد فائقة التوصيل تعمل عند درجة  $23 \text{ K}$  لذا لا بد من تبريدها بالهليوم السائل (درجة غليان (b.t.)،  $4 \text{ K}$  ~). يجعل هذا بالطبع أي استخدام للمواد فائقة التوصيل مكلفاً. لقد أدى اكتشاف أكسيد نحاس - لا ثنائوم المدمم بالباريوم الذي أصبح موصلًا فائقًا - عند  $35 \text{ K}$  إلى سيل من مواد فائقة التوصيل عند درجة حرارة عالية جديدة بعضها كان موصلًا فائقًا فوق درجة غليان النروجين  $77 \text{ K}$ . أكثر من 50 من الموصلات الفائقة عند درجة حرارة عالية، تحتوي غالبيتها على طبقات من أكسيد النحاس أصبحت الآن معروفة.

لقد شهد العقدان الأخيران أيضاً اكتشاف أنواع غير متوقعة من الموصلات الفائقة. تم ملاحظة الموصلية الفائقة عند درجة حرارة منخفضة أيضاً في البوليمرات العضوية في  $C_{60}$  المدمم. في 2001 تم ملاحظة درجة حرارة مسجلة بـ 40 K الموصلية الفائقة التقليدية في  $MgB_2$ . رغم أن هذه الدرجة ليست عالية بالقدر الكافي للتبريد بالنتروجين السائل إلا أنها تكون مهمة من الناحية التكنولوجية حيث يمكن اختزال درجة حرارة المبردات التي تعمل عند درجة حرارة منخفضة إلى 30 K بحيث لا تتطلب الأدوات المصنوعة من هذه المادة تبريداً بالهليوم السائل.

اكتشاف آخر غير متوقع كان في الموصلات الفائقة التي تكون أيضاً فزومغناطيسيات، اتحاد من الخواص التي تكون غير متوافقة طبقاً للنظرية المقبولة للموصلات فائقة التوصيل التقليدية. ستناقش كل هذه التطورات المثيرة، لكن سوف نبدأ بالنظر إلى خواص الموصلات الفائقة عند درجة حرارة منخفضة تم اكتشافها منذ قرن تقريباً.

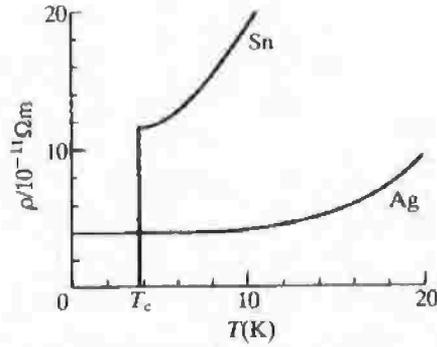
### (١٠,٢) موصلات فائقة التوصيل تقليدية

#### Conventional Superconductors

#### (١٠,٢,١) اكتشاف الموصلات فائقة التوصيل The discovery of Superconductor

في عام 1908 نجح كاميرلنج أونيس Kamerlingh Onnes في إسالة الهليوم وقد فتح هذا الطريق لإنجاز تجارب عديدة جديدة على سلوك المادة عند درجة حرارة منخفضة. لفترة طويلة كان معروفاً من تجارب الموصلية أن المقاومة الكهربائية للمادة تقل مع الحرارة. في عام 1911 كان أونيس يقيس التغير في المقاومة الكهربائية للزئبق مع درجة الحرارة حيث اندهش عندما وجد أنه عند درجة 4.2 K هبطت المقاومة فجأة إلى الصفر. أطلق على هذا التأثير الموصلية الفائقة *superconductivity* وسميت درجة الحرارة التي حدث عندها هذا بدرجة الحرارة الحرجة (التوصيل الفائق) *superconducting critical temperature TC*. يوضح الشكل رقم (١٠,١) هذا التأثير للقصدير. إحدى تأثيرات المقاومة صفر هي أنه لا يحدث فقد قدرة في دائرة كهربية مصنوعة من موصل فائق التوصيل. حالما يتم تثبيت التيار الكهربائي، فإنه لا يظهر أي انحلال يمكن إدراكه طالما يكون بالإمكان متابعة التجارب!

لأكثر من 20 عاماً، تم عمل تقدم طفيف في فهم الموصلات فائقة التوصيل وقد تم فقط إيجاد مواد أكثر تظهر التأثير. أكثر من 20 من العناصر الفلزية بالإمكان عملها موصلات فائقة التوصيل تحت ظروف مناسبة (الشكل رقم ١٠,٢) والآلاف من السبائك. لاحظ ميسنر Meissner في عام 1933 تأثيراً جديداً.



الشكل رقم (١٠،١). رسم المقاومة  $\rho$  ضد درجة الحرارة  $T$  موضعاً المهبوط إلى الصفر عند درجة الحرارة الحرجة  $T_c$ ، لموصل فائق التوصيل والمقاومة المحددة لفلز طبيعي عند درجة الصفر المطلق.

H																		He																											
Li*	Be											B†	C†	N	O†	F	Ne																												
Na	Mg											Al	Si†	P†	S†	Cl	Ar																												
K	Ca*	Sc*	Ti	V	Cr*	Mn	Fe*	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge*	As*	Se*	Br*	Kr																												
Rb	Sr*	Y*	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd*	Ag	Cd	In	Sn	Sb*	Te*	I*	Xe																												
Cs*	Ba*	Lq	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi*	Po	At	Rn																												
Fr	Ra																																												
<table border="1" style="width: 100%; text-align: center;"> <tr> <td>La</td> <td>Ce*</td> <td>Pr</td> <td>Nd</td> <td>Pm</td> <td>Sm</td> <td>Eu</td> <td>Gd</td> <td>Tb</td> <td>Dy</td> <td>Ho</td> <td>Er</td> <td>Tm</td> <td>Yb</td> </tr> <tr> <td>Ac</td> <td>Th</td> <td>Pa</td> <td>U</td> <td>Np</td> <td>Pu</td> <td>Hm</td> <td>Cm</td> <td>Bk</td> <td>Cf</td> <td>Es</td> <td>Fm</td> <td>Md</td> <td>No</td> </tr> </table>																		La	Ce*	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Hm	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No
La	Ce*	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb																																
Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Hm	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No																																

- Al فائق التوصيل
- Li عناصر لا فلزية
- Na فلزية، لكن لم تتواجد حتى الآن كونهما فائقة التوصيل
- Si† فائق التوصيل عند ضغط مرتفع أو في أعشمة رقيقة
- Co عناصر برتبة مغنطيسية

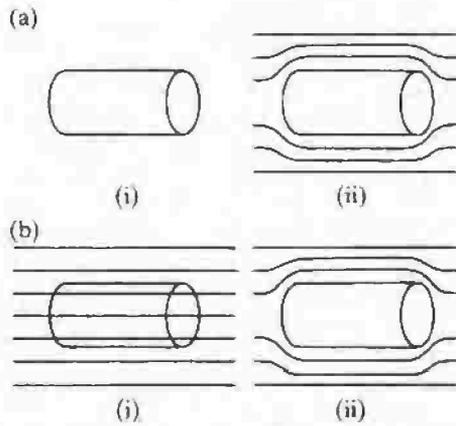
الشكل رقم (١٠،٢). العناصر فائقة التوصيل.

(١٠،٢،٢) الخواص المغنطيسية للموصلات فائقة التوصيل

**The Magnetic Properties of Superconductors**

وجد كل من Meissner وأتشنفلد Ochsenfeld أنه عند تبريد مادة فائقة التوصيل دون درجة حرارتها الحرجة  $T_c$ ، فإنها تطرد كل الفيض المغنطيسي من خلال الجزء الداخلي لها (الشكل رقم ١٠،٣ (a)): هكذا يكون الفيض المغنطيسي  $B$  صفر بداخل مادة فائقة التوصيل بسبب أن  $B = \mu_0 H(1 + \chi)$  عندما  $B = 0$  فإن  $\chi$  لا بد أن تساوي -1 (أي

تكون الموصلات فائقة التوصيل دايامغناطيسيات تامة). عند تطبيق مجال مغناطيسي لموصل فائق التوصيل يتم لفظ الفيض المغناطيسي (الشكل رقم ١٠,٣ (b)) ويطرد الموصل فائق التوصيل المغناطيس. إن هذا مصوراً في الصورة الفوتوغرافية في الشكل رقم (١٠,٤) حيث يشاهد المغناطيس عائياً في وسط الهواء فوق موصل فائق التوصيل.



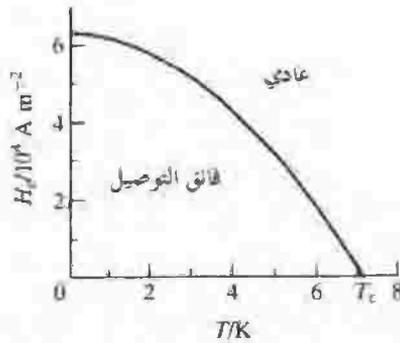
الشكل رقم (١٠,٣). (a) موصل فائق التوصيل بدون مجال مغناطيسي. عند تطبيق مجال (ii) يتم لفظ الفيض المغناطيسي. (b) مادة فائقة التوصيل فوق درجة الحرارة الحرجة  $T_c$ ، في مجال مغناطيسي عندما يهبط درجة الحرارة دون درجة الحرارة الحرجة (ii) يُطرد الفيض المغناطيسي من الداخل. يسمى كل منها تأثيرات ميسنر.



الشكل رقم (١٠,٤). مغناطيس دائم يطفو فوق سطح فائق التوصيل. (Courtesy of Darren Peets, UBC Superconductivity Group)

لقد وجد أيضاً أن درجة الحرارة الحرجة  $T_c$ ، تتغير في وجود مجال مغناطيسي. يصف الشكل رقم (١٠,٥) رسم تقليدي من  $T_c$  ضد تزايد المجال المغناطيسي حيث يمكن مشاهدة أنه كلما زاد المجال المطبق تهبط درجة الحرارة الحرجة.

تلى ذلك أنه يمكن للباة فائقة التوصيل أن تكون كباة غير فائقة التوصيل بتطبيق مجال مغنطيسي كبير بالقدر الكافي. يطلق على الحد الأدنى من شدة المجال المطلوبة لإحضار هذا التأثير شدة المجال الحرج،  $H_{c1}$ : critical field strength، وتعتمد قيمته على الباءة المطلوبة وعلى درجة الحرارة. يكون للنوع أو النمط I من الموصلات فائقة التوصيل التي تشمل معظم الموصلات فائقة التوصيل بفلز نقي مجال وحيد. يسمح النوع II من الموصلات فائقة التوصيل التي تشمل السباتك والموصلات فائقة التوصيل بـ  $T_c$  عالية ببعض الاختراق للمجال المغنطيسي داخل السطح فوق المجال الحرج  $H_{c1}$ ، لكن لا تعود إلى حالتها غير فائقة التوصيل حتى يتم الوصول إلى مجال  $T_{c2}$  أعلى. يتجه النوع II من الموصلات فائقة التوصيل إلى أن تكون لها درجات حرارة مرتفعة عن الموصلات فائقة التوصيل من النمط II.



الشكل رقم (١٠،٥). تغير شدة التيار الحرج  $H_c$  للرباص. لاحظ أن  $H_c$  تكون صفراً عند تساوي درجة الحرارة  $T$  درجة الحرارة الحرجة  $T_c$ .

بالمثل إذا تعدى التيار في الموصل فائق التوصيل تياراً حرجاً critical current، فإن الموصلية الفائقة تنهار. يكون

هذا معروفاً على أنه تأثير سلسبي Silsbee effect. يعتمد حجم التيار الحرج على الطبيعة أو الهندسة لعينة معينة.

(١٠،٢،٣) تأثيرات جوسفسون Josephson Effect

في عام 1962 استنبط جوسفسون أنه لو تم وضع فلزين فائقي التوصيل يلي أحدهما الآخر مفصولان فقط

بطبقة عازلة رقيقة (مثل طلاء أكسيدي لسطحهما)، فإن تياراً سوف يمر في غياب أي جهد مطبق. يتم مشاهدة هذا

التأثير فعلياً لو أن الحاجز لا يكون سميكاً لكي يمكن للأزواج الإلكترونية أن تعبر الوصلة من موصل فائق

التوصيل إلى الآخر بدون تفكك. يكون هذا معروفاً على أنه تأثير جوسفسون d.c. Josephson effect. لقد استنتج

أكثر من هذا أن تطبيق جهد كهربي d.c صغير لتلك الوصلة سوف ينتج تياراً متردداً- تأثير جوسفسون Josephson a.c effect. تكون هاتان الخاصيتان ذواتي أهمية بالغة للإلكترونيات وصناعات الحاسوبات حيث يمكن استثمارها لأهداف الدوائر التليفونية أو الكهربية.

#### (١٠,٢,٤) نظرية BCS للموصلية الفائقة The BCS Theory of Superconductivity

يحاول هذا القطع أن يعطي صورة وصفية للأفكار الداخلة ويعطي بعض الألفه للمصطلحات الفنية. اشتغل الفيزيائيون لسنوات عديدة لإيجاد نظرية تفسر الموصلية الفائقة. لكي نبدأ، فمن المعتقد أن الشبكية لا تلعب دوراً في آلية التوصيل مثل دراسات الشعاع السيني التي توضح أنه لا يكون هناك تغير في أي من التماثل أو مسافات الفصل للشبكية عندما تحدث الموصلية الفائقة. من ناحية ثانية، لوحظ تأثير نظير isotope effect في عام 1950: لفلز معين وجد أن درجة الحرارة الحرجة تعتمد على كتلة النظير M بعلاقة:

$$(١٠,١) \quad T_C \propto \frac{1}{\sqrt{M}}$$

يكون تردد الاهتزاز  $\nu$  لجزيء ثنائي الذرة معروف جداً بالعلاقة:

$$(١٠,٢) \quad \nu = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{\mu}}$$

حيث  $\mu$  هي الكتلة المختزلة للجزيء،  $k$  هي ثابت القوة للرابطة. يمكن ملاحظة أن الاهتزاز يغير من التردد عند الإحلال النظائري بحيث يكون التردد  $\nu$  لا يتناسب مع  $\frac{1}{\sqrt{mass}}$ : يقترح هذا على الفيزيائيين بأن الموصلية الفائقة لها علاقة بطريقة ما بنمط الاهتزاز للشبكية وليس بالإلكترونات التوصيل بالضغط. تكون الأنماط الاهتزازية لشبكية مكممة كما في الجزيء المعزول: تسمى كمّات (جمع كم) اهتزازات الشبكية بالفونونات phonos.

اقترح فروهليش Frohlich أنه سيكون هناك تداخل فونون/ إلكترون قوي في موصل فائق التوصيل، الذي يؤدي إلى قوى مجاذبية attractive بين إلكترونين التي تكون قوية بالدرجة الكافية لكي تتغلب على تنافر كولومب Coulmb بينهما. تعمل الآلية ببساطة جداً بهذه الطريقة: كلما مر إلكترون توصيل خلال الشبكية فإنه يزيح بعضاً من الأيونات موجبة الشحنة عن مواضع الاتزان، رافعا لها دافعاً ومعطياً مساحة من كثافة موجبة الشحنة متزايدة. عندما تهتز هذه خلفاً وأماماً، فإن إلكترونات ثانياً يمر خلال هذه المنطقة المتحركة من الكثافة موجبة الشحنة المتزايدة وينجذب إليها. يكون التأثير الخالص هو أن يحدث تداخل بين الإلكترونين معاً، باستخدام اهتزاز الشبكية

كوسيط. أكثر من هذا، يكون التداخل بين الإلكترونات تجاذبياً بسبب أن كلاً من الخطوتين المفصولتين تشمل تداخل كولومب تجاذبي.

إن تشتت إلكترونات التوصيل بواسطة اهتزازات الشبكية، الفونونات هو الذي ينتج مقاومة كهربية عند درجة حرارة الغرفة (عند درجات حرارة منخفضة يكون تشتت بواسطة عيوب الشبكية هو الذي يعطي المقاومة الكهربية بصفة أساسية). على عكس ما قد نتوقه بديهياً، سوف يكون للموصل فائق التوصيل مقاومة عالية عند درجة حرارة الغرفة، بسبب أن له تداخلات إلكترون/فونون قوية. في الواقع، فإن الموصلات الإلكترونية الأفضل عند درجة حرارة الغرفة - الفضة والنحاس - لا تكون موصلات فائقة التوصيل على الإطلاق. لا تملك الموصلات فائقة التوصيل مقاومة كهربية منخفضة فوق درجة حرارة التوصيل الفائق الحرجة  $T_c$ .

في عام 1957، نشر باردن Barden، كوبر Cooper وشيريفر Schrieffer نظريتهم عن الموصلية الفائقة المعروفة على أنها نظرية BCS. إنها تتنبأ بأنه تحت ظروف معينة، يكون التجاذب بين إلكترونات التوصيل راجعاً إلى تعاقب من تداخلات الفونون التي بإمكانها أن تتغلب بشكل ضئيل على التنافر المبدول بشكل مباشر لإحداها على الأخرى بسبب تداخل كولومب من شحنات متشابهة. يكون الإلكترونان مترابطين معاً بدرجة ضعيفة ليكونا ما يطلق عليه زوج كوبر Cooper pair. تكون أزواج كوبر هي المسئولة عن الموصلية الفائقة في الموصلات فائقة التوصيل التقليدية، تكون هذه الإلكترونات متزاوجة بحيث يتلاشى العزم المغزلي والزواوي له. تكون هذه الإلكترونات موصوفة بدالة موجية معروفة على أنها بارامتر رتبة order parameter. في هذه الحالة يكون لبارامتر الرتبة تماثل مماثل لتماثل الدالة الموجية من إلكترونات s ويمثل حالة منفردة.

تظهر نظرية BCS أنه لا بد من استيفاء العديد من الشروط لتكوين عدد كاف من أزواج كوبر وإحراز الموصلية الفائقة. إنه خارج نطاق مادة هذا الكتاب أن نذهب إلى هذا بعمق أكثر: نكتفي بالقول بأن تداخل إلكترون-فونون لا بد أن يكون قويا وأن درجة الحرارة المنخفضة تشجع تكوين الزوج - هكذا لا يمكن التنبؤ بها بواسطة نظرية BCS. إن درجة حرارة  $MgB_2$  المرتفعة نسبياً من المعتقد بأنها تعود إلى الترددات الاهتزازية العالية المتلازمة مع الذرات B الخفيفة والتداخل القوي بين الإلكترونات واهتزازات الشبكية. يأتي الإثبات على إدخال اهتزازات الذرة B من ملاحظة أن  $T_c$  تزيد بحوالي 1 K عندما يتم استبدال  $^{11}B$  بواسطة  $^{10}B$ .

تكون أزواج كوبر ضعيفة الترابط بمسافة فصل تقليدية بالقيمة  $10^6$  pm للإلكترونين. إنها تكون أيضاً ثابتة في التحطيم وإعادة التكوين (عادة مع مشاركات أخرى). هكذا يحدث تداخل ضخم بين أزواج مختلفة وتكون

عملية الاقتران عملية ديناميكية معقدة. هكذا تكون الحالة الأرضية للموصل فائق التوصيل حالة "جماعية" تصف الحركة المنتظمة لأعداد كبيرة من أزواج كوبر. عند تطبيق مجال كهربائي خارجي تتحرك أزواج كوبر خلال الشبكية تحت تأثيرها. من ناحية ثانية، فإنها لا تفعل هذا بالطريقة التي تحافظ بها على ترتيب الأزواج؛ تكون حركة كل زوج معوقة لحركة كل الأزواج الأخرى، ولا يمكن لأي منها أن تتشتت انفرادياً بواسطة الشبكية. بسبب أن الأزواج لا يمكنها أن تشتت بواسطة الشبكية تكون المقاومة صفر ويكون النظام موصلاً فائقاً.

### (١٠،٣) موصلات فائقة عند درجة حرارة عالية

#### High Temperature Superconductors

بعام 1973 كانت درجة الحرارة الأعلى الموجودة لمستخدم الموصلية الفائقة هي 23.3 K؛ كان هذا المركب الثيوبيوم والجرمانيوم وقد ظل حتى عام 1986 عندما سجل كل من جورج بدنورز Georg Bednorz والكس ميللر Alex Müller اكتشافهما. وقد حصل بدنورز وميللر على جائزة نوبل بأواخر عام 1986، عندما وجدوا موصلية فائقة في أكسيد مادة عند درجة حرارة 12 °C أعلى من المعروفة سابقاً. كان المركب الذي شهد بحثهما الأول هو  $La_{2-x}Ba_xCuO_4$  حيث  $x = 0.2$  مع تركيب يعتمد على  $K_2NiF_4$ ، مركب طباقي له علاقة بتركيب البيروفسكيت: لقد لاحظنا بداية الموصلية الفائقة عند 35 K. إن الفكرة التي جلبها هذا المجال هو التحرك بعيداً عن فحص الفلزات وسبائكها ودراسة فيزياء الحالة الصلبة وكيمياء الأكاسيد الفلزية بشكل منهجي.

سريعاً ما تولدت الفكرة بأنه بالإمكان أن نرفع درجة الحرارة أكثر من ذلك بالإحلال بفلزات مختلفة. باستخدام هذه التقنية عبرت مجموعة شو Chu's group حاجز درجة حرارة النيتروجين السائل مع موصل فائق أصبح معروفاً الآن على أنه "1-2-3". يستبدل هذا الموصل الفائق اللانثانوم بالأتريوم yatrium ويكون له الصيغة  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ . تحدث بداية الموصلية الفائقة لـ (1-2-3) عند 93 K. إن أعلى درجة حرارة حرجة تم اكتشافها حتى الآن هي 134 K (2003) للمركب المشاب  $HgBa_2Ca_2Cu_3O_8$ .

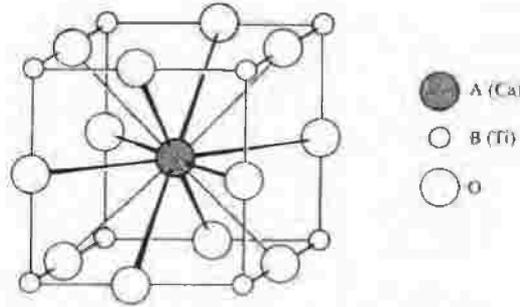
### (١٠،٣،١) التراكيب البلورية للموصلات فائقة التوصيل عند درجة حرارة عالية

#### The Crystal Structures of High Temperature Superconductors

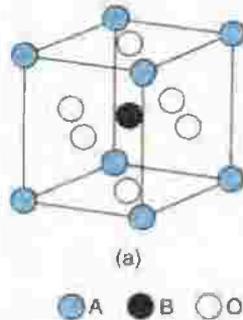
تحتوي كل المواد فائقة التوصيل عالية  $T_c$  تم اكتشافها حتى الآن بدون استثناء على مستويات ضعيفة الاقتران من أكسيد النحاس  $CuO_2$ . وجدت درجة حرارة الحرجة الأعلى للنحاسيات المحتوية على عنصر المجموعة 2 (Ca, Ba, Sr) وعنصر ثقيل من Tl، Bi أو Hg. تعتمد تراكيب الموصلات فائقة التوصيل النحاسية على تركيب

البيروفسكيت أو ما له علاقة بتركيب البيروفسكيت. في عام 2000 تم تسجيل موصل فائق التوصيل عند درجة حرارة عالية لا يحتوي على النحاس في  $\text{Na}_x\text{WO}_3$  بموصلية فائقة التوصيل سطحية. يعتمد تركيب  $\text{Na}_x\text{WO}_3$  أيضاً على تركيب البيروفسكيت.

أطلق الاسم بيروفسكيت بعد المعدن أو المنرال  $\text{CaTiO}_3$  (انظر الفصل الأول، المقطع ٤، ٣، ٦، ١): عديد من الأكاسيد التي لها الصيغة العامة  $\text{ABO}_3$  توافق هذا التركيب (أيضاً الفلوريدات  $\text{ABF}_3$  والكبريتيدات  $\text{ABS}_3$ ) يصف الشكل رقم (١٠، ٦) ما يسمى بالبيروفسكيت بخلية وحدة تركيب من النمط A- (مع ذرة نمط A- في مركز الخلية). تكون الذرة A المركزية (Ca) متناسقة ثانياً بعدد 8 ذرات التيتانيوم عند أركان المكعب وعدد 12 ذرة أكسجين في منتصف ضلع الخلية. يمكن وصف البيروفسكيت على نحو متساو بتحريك أصل خلية وحدة التركيب إلى مركز الجسم: ويكون لهذا تأثير في وضع ذرات Ca (A) عند كل ركن، ذرات Ti(B) عند مركز الجسم وذرة O عند مركز كل وجه (الشكل رقم ١٠، ٧).



الشكل رقم (١٠، ٦). خلية وحدة تركيب نمط A- من تركيب البيروفسكيت للمركب  $\text{CaTiO}_3$ .



الشكل رقم (١٠، ٧). خلية نمط B- لتركيب البيروفسكيت  $\text{ABO}_3$ .

يصف الشكل رقم (٨, ١٠) التركيب البلوري للموصل فائق التوصيل  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  1-2-3. يصف الشكل رقم (٨, ١٠) (a) مواضع ذرات الفلز فقط. لو ناقشناها في ضوء تركيب البيروفسكيت  $ABO_3$  حيث  $B = Cu$ ، يكون القطاع المركزي الآن هو خلية تركيب بيروفسكيت نمط-A و فوقها وأسفلها أيضاً خلايا وحدة تركيب نمط-A مع طبقاتها السفلية والعلوية مفقودة. يعطي هذا ذرات النحاس على أركان خلية وحدة التركيب وعلى أضلاع الخلية عند إحداثيات كسرية  $\frac{1}{2}$  و  $\frac{3}{4}$ . تكون الذرة في قلب الجسم من خلية وحدة التركيب (أي في مركز القطاع الأوسط) هي الأتريوم *yttrium*. والذرات في المكعبات العلوية والسفلية هي الباريوم *barium*.

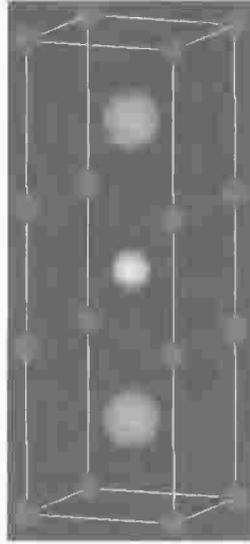
إذا كانت القطاعات الثلاثة في هذا التركيب معتمدة بالضبط أو تماماً على خلايا وحدة التركيب البيروفسكيت، سوف نتوقع أن نجد ذرات الأكسجين في وسط ضلع كل مكعب الشكل رقم (٨, ١٠) (b): سوف يعطي هذا صيغة تركيبية  $YBa_2Cu_3O_4$  إجمالية. تكون هذه الصيغة بعيدة الاحتمال بسبب أنها تعطي حالة أكسدة متوسطة  $\frac{11}{3}$  لذرات النحاس الثلاثة، مما يعني أن خلية وحدة التركيب تشمل  $Cu(III)$  و  $Cu(IV)$ ، الذي لا يكون محتملاً حيث إن معقدات  $Cu(IV)$  نادرة للغاية. تحتوى خلية وحدة التركيب في الحقيقة على سبع ذرات أكسجين تقريباً  $(YBa_2Cu_3O_{7-x})$ : عند  $x = 0$  لا تكون هناك ذرات أكسجين على الأضلاع الرأسية من المكعب المركزي وهناك اثنان أيضاً مفقودان من كل من الأوجه العلوية والسفلية (الشكل رقم ٨, ١٠) (c) يكون لخلية وحدة التركيب المحتوية على سبع ذرات أكسجين متوسط حالة أكسدة للنحاس 2.33 إشارة إلى وجود  $Cu(II)$  و  $Cu(III)$  في خلية وحدة التركيب، (ليس  $Cu(IV)$  على الإطلاق).

في تركيب 1-2-3 (عند  $x = 0$ ) تكون ذرة الأتريوم متناسقة مع 8 ذرات أكسجين وذرات الباريوم مع 10 ذرات أكسجين. تُنشئ فجوات الأكسجين في الموصل فائق التوصيل طبقات وسلاسل من ذرات نحاس وأكسجين متصلة تجري من خلال التركيب (يكون هذا موضحاً بشكل تقليدي ضعيف في المخططات، حيث تكون ذرات النحاس في الواقع خارج مستوى الأكسجينات قليلاً): يكون النحاس في تناسق رباعي مستو رباعي النقلة (الطية) أو تناسق هرمي مربع القاعدة خماسي النقلة (الطية) (الشكل رقم ٨, ١٠) (d). توجد الموصلية الفائقة في اتجاهات موازية لمستويات النحاس التي تنشأ بواسطة القواعد من الهرميات  $CuO$  والتي تكون مفصولة بطبقات من ذرات الأتريوم. تبدو شبكات النحاس / الأكسجين هذه أنها سمة مميزة لكل الأنواع الجديدة من الموصلات فائقة التوصيل عند درجة حرارة عالية. لو تم عمل هذا الموصل الفائق أكسجين بنقص أو قصور أكثر في

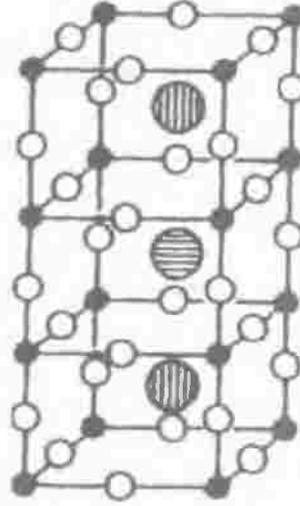
الأكسجين عند  $YBa_2Cu_3O_{6.5}$  ( $x = 0.5$ ) فسوف تهبط درجة الحرارة الحرجة للتوصيل الفائق إلى 60 K وعند  $YBa_2Cu_3O_6$  تختفي الموصلية الفائقة. لا يتم فقد الأكسجين عشوائياً لكن يذهب من مواضع معينة، بالتدرج مغيراً التناسق الرباعي للمستوي للنحاس على طول الاتجاه c إلى تناسق خطي بنقلتين مميزاً لأيون  $Cu^+$ ، ولا يتأثر ترتيب ذرات النحاس والأكسجين في قاعدة الهرميات. من ناحية ثانية، عندما تكون الصيغة  $YBa_2Cu_3O_6$  تصبح كل وحدات المربع المستوي على طول c سلاسل محتوية على  $Cu^+$  وتحتوي قواعد الهرم فقط  $Cu^{2+}$ ؛ تتراصف الغزول غير المقترنة من  $Cu^{2+}$  مختلفة التوازي ويصبح المركب فرومغناطيسياً مضاداً. ليس قبل أن تزيد محتوى الأكسجين إلى  $YBa_2Cu_3O_{6.5}$  حتى تتحطم الخواص الفرومغناطيسية المضادة ويصبح المركب موصلاً فائقاً. من المعتقد أن هذا المركب يحتوي على نحاس في كل حالات الأكسدة الثلاثة I، II و III. يحتوي  $YBa_2Cu_3O_7$  على  $Cu(II)$  و  $Cu(III)$  في كل من الألواح والسلاسل. من الواضح أن حالة الأكسدة للنحاسيات في التركيب (وهكذا اتصالات الترابط وأطوال الرابطة لها) تكون مهمة للغاية في تحديد فيما لو أن الموصلية الفائقة تحدث على الإطلاق، ودرجة الحرارة التي تحدث عندها ( $T_c$ ).

تعتمد الموصلات فائقة التوصيل النحاسية المحتوية على Hg المعروف منها أكثر من 40 نوعاً والتي تشمل على المادة التي لها أعلى قيمة  $T_c$  معروفة (في عام 2003) عند الضغط السائد على تراكيب بيروفسكيت أيضاً. يقع تراكيب هذه المواد الصلبة في واحد من ثلاثة أصناف 1201 المعتمدة على  $HgBa_2CuO_4$ ، 1212 المعتمدة على  $HgBa_2CaCu_2O_6$  و 1223 المعتمدة على  $HgBa_2Ca_2Cu_3O_8$ . لا تحتوي طبقات Hg في المركبات العائلة على أكسجين وتكون موصلات فائقة التوصيل فقيرة. من ناحية ثانية، فقد وجد في عام 1993 أن تلدين هذه المركبات في الأكسجين ينتج عنه ذرات أكسجين مغروزة في الموضع  $(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, 0)$  في طبقة Hg ويكون  $HgBa_2CuO_{4-5}$  موصلاً فائق التوصيل. عند ضغط أعلى من 10 GPa يكون  $HgBa_2Ca_2Cu_3O_{8+8}$  له درجة حرارة حرجة أعلى من 150 K. باستبدال بعض من ذرات Hg بذرات فلز في حالات أكسدة عالية، تكونت مركبات بأكسجين إضافي والتي تكون أكثر ثباتاً عند الضغوط العادية. كانت  $T_c$  الأعلى هي لتركيب 1223 مع استبدال خمس ذرات للأكسجين بذرات Tl،  $Hg_{0.8}Ba_2Ca_2Cu_3O_{8+0.33}$ ، في وقت الكتابة لهذا الكتاب. يصف الشكل رقم (٩، ١٠) تركيب هذا المركب. تحتوي خلية وحدة التركيب على أربع طبقات  $CuO_2$  مع Cu في تناسق هرمي رباعي ومع قمم الأهرامات متوجهة بالتناوب إلى أعلى وإلى أسفل. يشغل Ba مواضع قريبة إلى قمم هذه الأهرام وتكون مواضع Ca بالضبط فوق أو دون (تحت) القواعد. عند قمة وقاع الخلية،

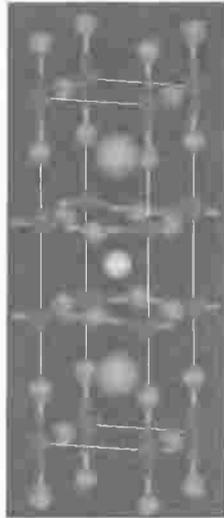
بين طبقتين من ذرات Ca تكون طبقات CuO مع Cu في تناسق رباعي مستو. تكون طبقة Hg في مركز الخلية. يعطي التدميم الزائد مركباً فلزياً بخواص توصيل فائق فقيرة.



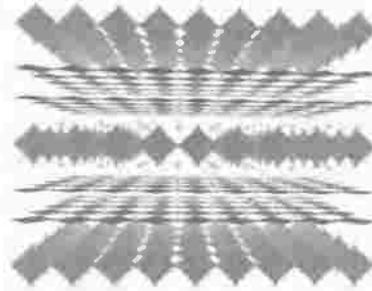
(a)



(b)

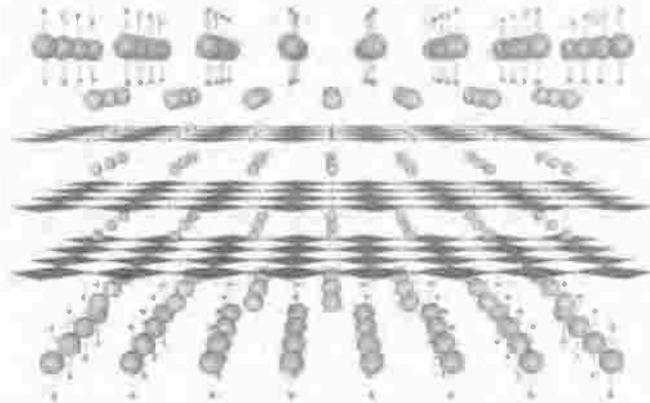


(c)



(d)

الشكل رقم (٨، ١٠). التركيب 1-2-3 (a) مواضع الفلز (b) خلية وحدة تركيب مثالية الافتراض من  $YBa_2Cu_3O_7$ ، افتراض اعتياداً على ثلاث خلايا وحدة تركيب بروفيسكيت نمط A- (c) تركيب  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$  مثالي و (d) التركيب الممتد من  $YBa_2Cu_3O_7$  واصفاً مستويات النحاس-الأكسجين بينهما (شاهد إدراج اللون في صفحة 399). مفتاح: Cu أزرق؛ Ba أخضر؛ Y مائي و O أحمر.



الشكل رقم (٩، ١٠). تركيب  $\text{HgBa}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_8$  واصفاً معينات نحاس أكسجين بين طبقات Ca وطبقات نحاس أكسجين مكوناً قواعد الأهرامات. تكون قمم الأهرامات من طبقات باريوم أكسجين في الموصلات فائق التوصيل  $\text{Hg}_{0.8}\text{Th}_{0.2}\text{Ba}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{8+0.33}$  يكون خمس أيونات  $\text{Hg}^{2+}$  مستبدلة بأيونات  $\text{TI}^{3+}$  وتوجد أيونات أكسجين إضافية في طبقة الزئبق. (لاحظ إدراج اللون في صفحة 399). مفتاح: Cu أزرق؛ Ca أخضر؛ Ba مائي؛ Hg/TI رمادي و O أحمر.

في 1-2-3،  $\text{La}_{2-x}\text{Ba}_x\text{CuO}_4$  ونحاسيات الزئبق، يكون متوسط حالة أكسدة Cu أعلى من 2 وتتكون فجوات موجبة نتيجة لذلك في نطاقات التكافؤ. يتم حمل الشحنة بواسطة فجوات موجبة، ولهذا تعرف هذه المواد على أنها مواد فائقة التوصيل نمط p- type superconductors p-. تكون إضافة الأكسجين في 1-2-3 ونحاسيات الزئبق فجوات موجبة، لكن أنواعاً أخرى تكون متاحة. في  $\text{SrCuO}_2\text{F}_{2+8}$  تكون الموصلية الفائقة مستحثة بغرس الفلورين وفي الكربونات الأكسجينية المنهارة كما في  $\text{TlBa}_2\text{Sr}_2\text{Cu}_2(\text{CO}_3)\text{O}_7$ ، يمكن إنتاج الموصلية الفائقة بالقصّ shearing بحث تظهر إزاحة على طول أحد المستويات كل n من الثنائيات (حيث تكون n من 3 - 5)، التي تترك طبقات  $\text{CuO}_2$  بدون تغيير ويخلط طبقات TlO و CO يمكن لـ  $T_c$  في هاليدات الأكسيد أن تصل إلى 80 K؛ للكربونات المنهارة، تكون  $T_c$  في المدى من 60 - 77.

حتى عام 1988، كانت كل الموصلات فائقة التوصيل الموجودة من النمط p- وقد افترض العديد أن هذا سيكون سمة مميزة للموصلات فائقة عند درجة حرارة عالية. رغم هذا، تم اكتشاف موصلات فائقة عند نمط n- type superconductors n- حيث تكون الشحنة محمولة بالإلكترونات؛ اعتمد الأول الذي تم إيجاده على تركيب  $\text{Nd}_2\text{CuO}_4$  مع كميات صغيرة من النيوديميوم ثلاثي التكافؤ Neddodymium المستبدل بالسيريوم رباعي التكافؤ

$\text{Nd}_{2-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_{4-y}$  حيث  $x \sim 0.17$  (يمكن للساريوم، الأيروبيوم، أو الباراسوديميوم samarium europium، praescodymium أن تحل في هذا التركيب محل النيوديميوم). تم إيجاد مركبات مماثلة معتمدة على هذا التركيب حيث يتم استبدال عنصر اللانثانيد الثلاثي بثوريوم رباعي التكافؤ، على سبيل المثال في  $\text{Nd}_{2-x}\text{Th}_x\text{CuO}_{4-y}$ . تحدث الموصلية الفائقة عند  $T_c \leq 25 \text{ K}$  لهذه المركبات.

يبدو واضحاً أن لكل هذه الموصلات فائقة التوصيل السيراميكية سمة مميزة - وجود طبقات نحاس/أكسجين مشطورة بين طبقات من عناصر أخرى. تحدث الموصلية الفائقة في هذه المستويات والعناصر الأخرى الموجودة وتتغير المسافات بين هذه المستويات درجة حرارة انتقال التوصيل الفائق - كيف يتم هذا؟ غير معروف حتى الآن.

#### (١٠،٣،٢) نظرية الموصلات الفائقة عند $T_c$ مرتفعة Theory of High $T_c$ superconductors

إن الإجماع هو أن الموصلات فائقة التوصيل عند درجة حرارة عالية كما هو شائع مع الموصلات فائقة التوصيل الفائقة التقليدية تحتوي على أزواج كوبر (انظر المقطع ١٠،٢،٤). لكن يحدث اختلاف في الأزواج المتكونة. تقترن أزواج كوبر في الموصلات فائقة التوصيل التقليدية لكي تعطي كمية حركة زاوية كلية صفر ويمكن وصفها ببارامتر رتبة بتماثل موجة s. في الموصلات فائقة التوصيل عند درجة حرارة عالية تمتد أزواج كوبر لكي تعطي كمية حركة زاوية لا صفيرية ويمكن وصفها ببارامتر رتبة بتماثل الموجة d. لا تحتاج حالة الاقتران في نظرية BCS إلى أن تحدث بتداخل فونون- إلكترون، ويعتقد أن الاقتران في الحالة d نتيجة تفاعلات أو تقلبات الغزل الفرومغناطيسي المضاد أو اقتران إلكترون- ماجنون. تم فحص هذه الاحتمالية بواسطة كوهن Kohan و لوتنجر Luttinger، اللذين وجدوا أنه بالإمكان توليد تجاذب متخلف ضعيف التجمع من تنافر كولومب بين الإلكترونات، لكن فقط لو أن الإلكترونات في أزواج كوبر تكون ممنوعة من المجابهة المتقاربة. يمكن إحراز هذا لو أن للأزواج كمية حركة زاوية (لو أنها كانت موصوفة بواسطة موجات p أو موجات d). تكون قيمة  $T_c$  الأولية المقدرة في مثل تلك الأنظمة منخفضة جداً، لكن كأن هناك أملاً في إمكانية إيجاد درجات حرارة أعلى في الفلزات بتفاعلات غزل قوية. كما في نظرية BCS للموصلات فائقة التوصيل التقليدية يكون الاقتران خاصية تجمعية وتكون عملية الاقتران عملية ديناميكية. يكون الاقتران بغزل بسيط أكثر تأثيراً في إحضار الموصلية الفائقة في بعدين بدلاً من ثلاثة وقد يفسر هذا لماذا تكون الموصلية الفائقة عند  $T_c$  مرتفعة موجود في المواد الصلبة الموجودة في شبه بعدين كما في

النحاسيات. اقترحت التجربة أيضاً أن البوليمرات العضوية فائقة التوصيل الموجودة في شبه بعدين (انظر الفصل السادس) تكون لها موصلات فائقة بالموجة d.

إن وجود تماثل الموجة d- قد تم برهنته في تجربة رائعة باستخدام مجهرية التنفق الماسح scanning tunneling microscopy (STM)، انظر الفصل الثاني). استخدم متعاونان في بركلي Berkely وطوكيو Tokyo بقيادة J.C. Seamus Davis و Shin-ichi Uchida الـ STM لقياس التوصيل النفقي التفاضلي على عينة من أكسيد نحاس كالسيوم أسترونشيوم بزموت مع ذرات زنك تحل محل عدد صغير من ذرات النحاس. يتناسب التوصيل النفقي التفاضلي مع كثافة الحالات المتاحة لتنفق الإلكترونات من العينة إلى شريط المجهر. ينبغي لهذا أن يكون صفرًا خلال طاقة محددة فوق المستويات المشغولة الأعلى المعروفة على أنها فجوة التماثل للتوصيل. لتماثل الموجة d- تكون طاقة الفجوة صفر في اتجاهات معينة، مشابهة لعقد المدارات d. تكسر ذرات الزنك أزواج التوصيل عند مواضعها بحيث ظهرت قمة التوصيل عند مواضع ذرات الزنك. كان الانبعث من مواضع الذرات خطوطاً بتوصيل مرتفع نسبياً في اتجاه العقد المتوقعة للدالة الموجية d.

#### (٤, ١٠) الموصلات الفائقة الفرومغناطيسية

##### Ferromagnetic Superconductors

كما نوقش سابقاً، استنبطت نظرية BCS أن الموصلات الفائقة تكون ديامغناطيسية تماماً. لهذا فقد كان من المفاجأة أن مواد صلبة تم اكتشافها حديثاً تكون فرومغناطيسية وفائقة التوصيل.

تم في عام 2001 نشر تقارير عن ثلاث من تلك السبائك  $URhGe$ ،  $UGe_2$  و  $ZrZn_2$ . ربما الأكثر إثارة للكيميائيين هو مركب  $Sr_2RuO_4$ . يكون لهذا تركيب بلوري مطابق غالباً لبلورة  $La_2CuO_4$ ، المركب الأصل، الموصل فائق التوصيل 1-2-3 عند  $T_c$  مرتفعة. رغم هذا، بينما يكون  $La_2CuO_4$  عازلاً فرومغناطيسياً مضاداً، يكون  $Sr_2RuO_4$  فلزياً ودون درجة حرارة حوالي 1.5 K يكون فائق التوصيل. يوجد الروثينيوم في  $Sr_2RuO_4$  أصلاً في صورة  $Ru(IV)$  معطياً تشكياً إلكترونياً  $4d^4$ . يكون Ru في مركز ثنائي أوجه من الأكسجين وهكذا تنقسم نطاقات d إلى  $t_{2g}$  و  $e_g$ . تشغل إلكترونات 4d الأربع النطاق  $t_{2g}$  جزئياً. إنها الإلكترونات القريبة إلى المستويات المشغولة من هذا النطاق التي تكون مسئولة عن الموصلية الفائقة.

إن هذه الموصلات الفائقة الفرومغناطيسية من المعتقد أنها تملك أزواج كوبر متكونة بالتداخلات المغناطيسية كما في الموصلات الفائقة التوصيل عند  $T_c$  مرتفعة، لكن بتراصف يعطي حالة ثلاثية. لا بد للدالة الموجية من أزواج كوبر أن تكون بتماثل مضاد نسبة إلى تبادل الإلكترونات لأزواج كوبر منفردة، يؤدي التبادل إلى تغير في الغزل ومن ثم لا بد لبارامتر الرتبة أن يكون زوجياً (s-, d-, ... إلخ). لزوج ثلاثي يكون للإلكترونين نفس الغزل وهكذا لا بد للبارامتر أن يكون فردياً. من المقبول عامة أن يكون للموصلات الفائقة التوصيل الفرومغناطيسية بارامترات رتبة الموجة p-.

### (١٠،٥) استخدامات الموصلات الفائقة التوصيل عند درجة حرارة عالية

#### Uses of High Temperature Superconductors

تستخدم المغناطيسيات الفائقة التوصيل عند درجة منخفضة حالياً لعدد من الاستخدامات المهمة. تستخدم المغناطيسيات القوية لإزالة الشوائب من الطعام و المواد الخام. على سبيل المثال، تزيل الشوائب المغناطيسية في الطفلة الصينية الألوان من المنتج الصناعي إذا لم يتم إزالته تستخدم مطايف NHR الأخيرة المغناطيسيات الفائقة التوصيل لتوفير مجالات مغناطيسية كبيرة، من ثم تحسن الحساسية. إنها تكون أداة مهمة في البحث العلمي الأساسي لمسح الجسم في التصوير بتقنية NHR (التصوير الرنيني المغناطيسي) MRI المستخدم في التشخيص الطبي.

يمكن للكهرومغناطيسيات (المصنوعة بامرار تيار كهربائي خلال سلك نحاس معزول ملفوف حول حديد) أن تنتج مجالات بحوالي اثنين من التسلا. يتم تصنيع المغناطيسيات الفائقة التوصيل عند درجة حرارة منخفضة من كل من أسلاك NbTi و Nb<sub>3</sub>Sn التي بإمكانها حمل تيارات أعلى من سلك النحاس ( $400\ 000\ \text{amp cm}^{-2}$ ) وبالتالي لفظ الحاجة إلى تكبير ملف الحديد. تكون مثل تلك المغناطيسيات فائقة التوصيل أخف و أكثر قوة (~ 10 تسلا) عن نظيرتها التقليدية- لكن يجب تبريدها إلى 4 K لكي تصبح فائقة التوصيل.

تستخدم توصيلات جوسفسون Josephson في أدوات التداخل الكمي الفائقة التوصيل Superconducting Quantum Interference Devices (SQUIDS) إنها تتكون من ملف من سلك فائق التوصيل بوصلة جوسفسون واحدة مُبَيَّنة (RF SQUID) أو اثنين (DC SQUID). يكون الجهاز حساساً جداً للتغيرات في المجال المغناطيسي وبإمكانه قياس جهود حتى  $10^{-18}$  فولت، تيار كهربائي حتى  $10^{-18}$  amp ومجالات مغناطيسية حتى  $10^{-14}$  تسلا. تستخدم SQUIDS حالياً في البحث الطبي للكشف عن التغيرات الصغيرة في المجال الكهربائي في المخ. بإمكان الجيولوجيين

أن يستخدموا SQUIS في توقع وجود معادن وبتترول حيث يمكن للترسبات أن تُحدث تغيرات موضعية في المجال المغنطيسي للأرض: إنهم يستخدمون أيضاً جهازاً للبحث في بنية القشرة الأرضية، تجميع البيانات المغنطيسية للصحور من أعمار مختلفة. يستخدم الفيزيائيون أيضاً SQUIDS للبحث في الدقائق الأساسية، و يعتقد أن هناك تطبيقات عسكرية في الكشف عن التغير في المجال المغنطيسي الأرضي الحادث بواسطة الغواصات. من الواضح أن SQUIDS بحساسيتها الملحوظة بالإمكان أن يكون لها عدد ضخم من الاستخدامات المحتملة.

إن تطوير قطارات بالتعويم المغنطيسي - ما يسمى ماجليف maglav قد بدأ في السبعينات. استخدمت أول قطارات ماجليف كهرومغنطيسيات تقليدية التي تنتج قوة جاذبة بين دليل الطريق والقطار. ربط مثل تلف النظام مطار برمنجهام بمحطة السكة الحديد في الثمانينات. إن ألمانيا هي الدولة الغربية الوحيدة التي امتلكت خطاً فعلية لسكة حديدية للماجليف حديثاً. لقد ربط مشروع النقل السريع برلين مع هامبورج في 2005. لقد توقف هذا الخط عن الخدمة، لكن مازال النقل السريع يعمل في تصدير نظامه. لقد عمل المهندسون الألمان على خط سكة حديد ماجليف في شنغهاي بالصين: كان هذا مساراً بطول 30 km يجري من المطار إلى المنطقة الاقتصادية في بودنج Pudong. وصلت سرعة القطار إلى 430 kph (270 mph). يعمل اليابانيون على نظام قطار ماجليف باستخدام موصلات فائقة التوصيل عند درجة حرارة منخفضة. يتم في هذا المشروع تنافر الموصلات فائقة التوصيل بالمجالات المغنطيسية الناتجة بملفات من سلك على المسار رافعة القطار من 4 إلى 6 أنشأت (بوصة) الوجه فوق دليل الطريق. في نوفمبر 2003، تم إطلاق قطار ماجليف ياباني للجري على مسار اختبار بالقرب من كوفو Kofu على بعد 68 ميل غرب طوكيو بسرعة وصلت إلى 560 kph (347 mph).

إن استخدام الموصلات فائقة التوصيل عند درجة حرارة عالية الجديدة من شأنه أن يخفض من التكلفة الباهظة للتبريد. لسوء الحظ، تكون عملية التبريد نسبة صغيرة فقط من تكاليف التشغيل ورأس المال وبالتالي من المحتمل أن لا يكون هناك فرق فيما لو أصبح هذا قابلاً للتطبيق كوسيلة نقل أم لا.

إن استخدام المواد فائقة التوصيل سوف يخفض التكلفة في التطبيق. تكون النحاسيات مواد سيراميكية هشة لا تتكون بسهولة في الأسلاك وتكون الموصلية الفائقة في هذه المواد غير متساوية الخواص. تم عمل تطور للتغلب على هذه المشاكل. أن المواد فائقة التوصيل النحاسية لعمل الأسلاك الموجودة حتى الآن (2003) هي أكاسيد نحاس كالسيوم أسترونشيوم بزموت  $Bi_2Sr_2CaCu_3O_{10}$  و  $Bi_2Sr_2Cu_2O_8$ . لقد تم تسيرها في أسلاك طويلة بواسطة رش

بشير على هيئة مسحوق في أنبوبة من الفضة، تسخن لكي تكوّن موصلاً فائق التوصيل وسحب أنابيب الفضة لتكوين سلك. لقد تم اختيار النحاسيات المعتمدة على البزموت بسبب أن تكون أكثر مرونة من الموصلات فائقة التوصيل عند  $T_c$  عالية الأخرى بسبب ضعف الرابطة عبر طبقات Bi/O المزدوجة التي تسمح بانزلاق الطبقات. تكون الأسلاك بإمكانها حمل 100 A لكل سلك مجداول عند 77 K بأطوال 100 m.

لقد تم تطوير سيارات كهربية باستخدام موصلات فائقة التوصيل عند درجة حرارة عالية ومغناطيسيات تحتوي على مثل تلك المواد. في عام 1997 تم تركيب مغناطيس فائق التوصيل بـ  $T_c$  عالية في مسار الحزمة لمعجل فان دي جراف van der Graaf لتقدير عمر الكربون في معهد العلوم الجيولوجية والنوية في ولينجتون Wellington، نيوزلندا. في عام 1998 أقامت شركة أكسفورد لتكنولوجيا المغناطيس وشركة سيمنس Siemens ماسح جسم MRI بروتوني بملفين مصنوعين من أسلاك بـ  $T_c$  عالية وقد أظهرت شركة هيتاشي مغناطيساً فائق التوصيل بقيمة 23.4 تسلا قريب إلى 23.5 تسلا المطلوبة لمطياف NMR الذي يعمل عند 1 GHz.

إن غياب المقاومة الكهربائية قد يكون مفيداً للغاية في توزيع الكهرباء خلال جميع مناطق الدولة، كما في أسلاك النحاس والألومنيوم المستخدمة الآن والتي تفقد 5 إلى 8% من القدرة بسبب مقاومة هذه العناصر. باستخدام الموصلات فائقة التوصيل يتم التخلص تماماً من نقص القدرة. رغم أن الموصلات فائقة التوصيل تحمل تياراً مباشراً (dc) بدون فقد قدرة وبدون توليد حرارة، يحدث فقد صغير في القدرة عندما تحمل تياراً متردداً (ac) بسبب إنتاج موجات راديو. رغم هذا، يكون هذا الفقد أقل بكثير عنه لأسلاك النحاس والألومنيوم. من غير المحتمل استبدال الشبكة العامة بكابلات فائقة التوصيل في المستقبل القريب، لكن تكون مثل تلك الكابلات قادرة على تقديم حل لمشكلة توفير قدرة إضافية للمدن. تمر القدرة في المدن عبر كابلات في مواسير أسلاك كهربائية تحت الأرض. عديد من المواسير الحاملة للقدرة للمدن الكبرى تكون ممتلئة ويعني توفير قدرة إضافية، شراء، حفر لمواسير جديدة. باستبدال الكابلات الحالية بكابلات  $T_c$  عالية يمكن إمداد مزيد من القدرة باستخدام المواسير الحالية. في مايو 2001، استقبل 150000 مقيم في كوبنهاجن كهرباء من خلال كابل موصل فائق التوصيل عند درجة حرارة عالية بطول 30 m. في نفس العام استبدل بيرلي Pirelli (تسع كابلات نحاس عند محطة فرعية في ديترويت بكابل 120 m مكون من ثلاثة كابلات فائقة التوصيل عند درجة حرارة عالية. كان الوزن الكلي لهذا الكابل العالي الحرارة 70 مرة أقل من النحاس المستبدل. للمرة الأولى، يتم توصيل القدرة على أساس تجارى للمستهلكين في الولايات المتحدة عبر أسلاك فائقة التوصيل.

من المتوقع زيادة التطبيقات في المستقبل. وفي 2000، قدرت لجنة من الشركات الأوروبية أن السوق العالمي في إنتاج الموصلات فائقة التوصيل يصل إلى 22 بليون إسترليني بعام 2020.

### الأسئلة

#### Questions

١- عندما عاد بعض من المدعوين إلى حفلة متأخرة إلى المنزل قرروا أن يأخذوا طريقاً مختصراً حول حقل. لسوء الحظ، كان الليلة مظلمة ومعتمة وكان الحقل يحتوي على حفر عميقة. فكر البعض في فكرة مذهلة بأنه لو تواصلوا بالأذرع وتقدموا معاً عبر الحقل، فإذا دخل واحد من المجموعة بداخل الحفرة من الممكن رفعه بقوة الدعم الجماعي! خذ هذه القصة كمشابهة (ليس بالضبط تماماً) لنظرية BCS حاول أن تتعرف على المكونات بقدر الإمكان مع المكونات المقابلة في نظرية BCS.

٢- ارسم مخطط تراص (الفصل الأول، المقطع ١,٤,٥) للبيروفسكيت نمط الخلية A ( $\text{CaTiO}_3/\text{ABO}_3$ )، حدد عدد الوحدات التركيبية  $\text{ABO}_3$ ، وصف هندسة التناسق حول كل نوع من الذرات كرر العملية للبيروفسكيت بخلية وحدة تركيب نمط B.

٣- أكمل الجدول الآتي، ملخصاً أنواع الموصلية الفائقة:

المادة	تمائل رتبة البارامتر	حالة العزل
فلزات وسبائك		
نحاسيات فائقة التوصيل		
موصلات فائقة التوصيل		
فرو مغناطيسية		

٤- احسب متوسط حالة الأكسدة للنحاس في  $\text{Hg}_{0.8}\text{Tl}_{0.2}\text{Ba}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{8.33}$ . افترض أن Tl موجود على هيئة

$\text{Tl}^{3+}$  و  $\text{Hg}^{2+}$ .