

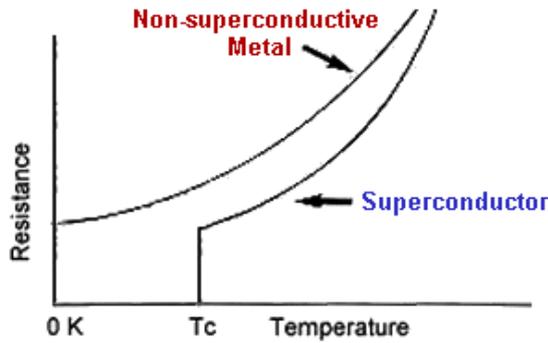
3.1 المقدمة Introduction

ان احد اهم الظواهر في فيزياء الحالة الصلبة هي ان بعض العناصر والمركبات تكاد ان تنعدم مقاومتها النوعية عند درجة حرارة معينة واطنة، ولقد اطلق على هذه الظاهرة بمصطلح التوصيلية الفائقة، وسميت درجة الحرارة التي تفقد المادة عندها مقاومتها وتتحول من مادة عادية إلى مادة فائقة التوصيل بدرجة الحرارة الحرجة (Critical temperature) ويرمز لها بالرمز (T_c).

إن ظاهرة التوصيلية الفائقة مثيرة من جميع جوانبها سواء ما يتعلق بدراستها أو ما يتعلق بتطبيقاتها، فسلوكها الكهربائي (انعدام مقاومتها للتيار الكهربائي، أي ان التيار الكهربائي يسري فيها دون أي تبديد في قيمته) وسلوكها المغناطيسي (رفضها للمجال المغناطيسي الذي اعتاد على التغلغل في المواد العادية) هما السمتان البارزتان اللتان جعلتا منها مواد ذات تطبيقات غير محدودة. من المعلوم أن مقاومة التيار الكهربائي في جميع المواد العادية هي السبب في ضياع وفقدان الكثير من الطاقة الكهربائية وهي السبب أيضاً في عطل الكثير من الأجهزة الكهربائية وارتفاع حرارتها.

ان عدم امكانية المجالات المغناطيسية من الدخول إلى جسم الموصل الفائق التوصيل مادام بصورته الفائقة يبشر بتطبيقات كثيرة تعتمد على هذه الخاصية على وجه التحديد. ومن التطبيقات، منها ما يتعلق بالنواحي العسكرية ومنها ما يتعلق بالنواحي المدنية والصحية والمواصلات والخدمات.

لقد اكتشفت هذه الظاهرة في عام 1911 من قبل العالم الفيزيائي الهولندي هايك كاميرلنك اونز (Heike Kamerlingh Onnes) من خلال دراسة التوصيل الكهربائي للزئبق نقي عند درجات حرارة واطنة جدا. فقد وجد اونز ان المقاومة النوعية للزئبق تختفي فجأة (تكاد ان تكون صفرا) عند تبريده الى درجة حرارة سائل الهليوم (4.2 كلفن). ان المنحنيين المبينين في الشكل (3.1) يوضحان الفرق في المقاومة مع درجة الحرارة لمعدن عادي (ليس فائق التوصيل) ولمادة فائقة التوصيل. حيث يتبين من المحني السفلي كيف ان المقاومة تصبح صفرا عند درجة الحرارة الحرجة (T_c).



الشكل (3.1) الفرق بين المقاومة لمعدن ليس فائق التوصيل ومادة ذات توصيلية فائقة.

ان قيمة المقاومة النوعية للزئبق في حالة التوصيل الفائق التي وجدها اونز بحدود 10^{-12} من قيمة المقاومة في الحالة الاعتيادية للزئبق.

لقد وجد ان تيارا محتثا يقدر بعدة مئات من الامبيرات يسري في حلقة من الرصاص في حالة التوصيل الفائق ولم يحصل له تغير لفترة بحدود سنة كاملة، وهذا برهان يؤكد ان المقاومة النوعية تكاد ان تكون صفرا في حالة التوصيل الفائق.

وبعد هذا الاكتشاف استمر العلماء والباحثين بالبحث عن مواد ذات درجات حرارة تحول أعلى، وحتى عام 2010 وجدوا على مايقارب واحد وثلاثين عنصرا وثلاثة وعشرون مركبا واثننا عشرة سبيكة مزدوجة فائقة التوصيل عند درجات حرارة حرجة، والجدول (3.1) يبين بعض العناصر التي تتراوح درجة حرارتها الحرجة بين 0.88 الى 125 كلفن. ويتضح ايضا من الجدول ان درجة الحرارة الحرجة في حالة المركبات اعلى منها مما في حالة العناصر.

الجدول (3.1) يبين درجة الحرارة الحرجة لبعض العناصر والمركبات.

Material	Type	T _c (K)
Zinc	Metal	0.88
Aluminum	Metal	1.19
Tin	Metal	3.72
Mercury	Metal	4.15
YBa ₂ Cu ₃ O ₇	Ceramic	90
TlBaCaCuO	Ceramic	125

3.2 ميزات المواد فائقة التوصيل عالية درجة الحرارة الحرجة

1. أنها سهلة التحضير ويستطيع المهتمين بهذا المجال الحصول عليها ببسر.
2. أنها رخيصة الثمن حيث أن أكبر مكوناتها هو النحاس والباريوم والكالسيوم وهي مواد رخيصة ومتوفرة.
3. يتحول الكثير منها الى مواد ذات توصيل عادي فوق درجة غليان النيتروجين (77 كلفن)، والنيتروجين رخيص الثمن ومتوفر وسهل النقل والحمل ويبقى لفترات طويلة مقارنة مع الهليوم المسال.
4. أن الفرق بين درجات تحولها (درجة الوسيط المبرد – النيتروجين المسال) كبير مقارنة مع حالة الزئبق (تزيد على الخمسين درجة) مما يجعلها أكثر استقرارا حيث أن هذا الاستقرار يزداد بزيادة الفرق بين درجة حرارة العمل ودرجة حرارة التحول.
5. أنه يسهل تشكيلها بأشكال مختلفة مثل الرقائق والأفلام أو المواد المكسدة وكذلك المواد وحيدة التبلور.

3.3 بعض تطبيقات المواد فائقة التوصيل

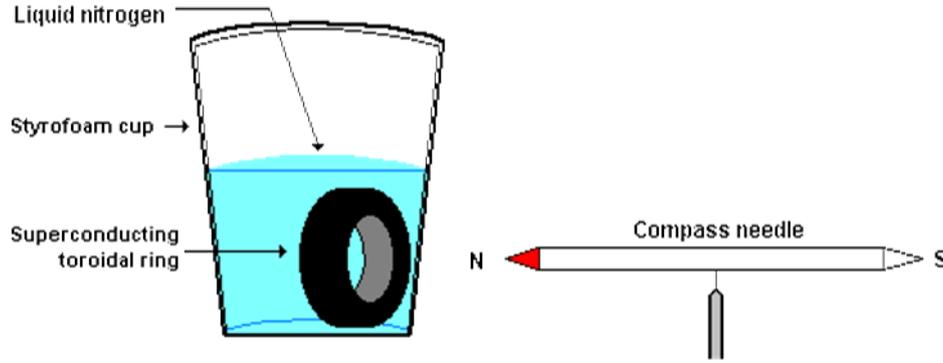
1. الموصلات: في القطارات على وجه الخصوص، حيث تم صنع قطارات تسير بسرعة هائلة (مقاربة لسرعة الطائرة) على وسادة (سكة) مغناطيسية؟ إن من شأن الاستفادة من ظاهرة الطفو المغناطيسي أو التعليق أن تتوفر قطارات معلقة في الهواء، وبالتالي فهي تسير بدون احتكاك مما يعطي توفيراً هائلاً في الطاقة من جهة ويوفر سرعات كبيرة من جهة أخرى، إلى جانب التخلص من الضوضاء. بالإضافة إلى أن تلك القطارات سوف تكون مريحة جداً وخالية من المطبات لأنها تسير على وسادة هوائية. وفي اليابان تم تجريب هذه الفكرة عملياً، حيث يرتفع القطار بحدود عشرة سنتيمترات عن المسار. والقطار يحوي المواد فائقة التوصيل في حين تتوفر المغناط الكبيرة على الطريق. وفي داخل القطار يتوفر جهاز تبريد، وهذا الجهاز هو كل ما يلزم حيث يستفاد من قوة التناثر مع المغناط نفسها في دفع القطار وتسييره بسرعات تزيد على 500 كم في الساعة.

2. عجلات الطاقة: عندما يدور قرص ضخمة الكتلة حول محوره فإنه يقال إن لديه طاقة حركية، ولديه الاستعداد للتخلي عن تلك الطاقة لصالح شيء آخر متى ما لزم الأمر. لقد تمت الاستفادة من هذه الفكرة في تخزين كمية كبيرة من الطاقة في عجلات ضخمة الكتلة تدور بسرعات عالية جداً وتحفظ في داخل كبسولات خاصة، لقد استفيد منها ولفترة طويلة في تحريك القطارات. غير أن المشكلة التي كانت تواجهها دائماً هي أن الاحتكاك الداخلي يستنزف الطاقة الحركية مع مرور الزمن، غير أن الاستفادة من ظاهرة الطفو المغناطيسي تمكننا من صنع عجلات دوارة في جو خالٍ من الاحتكاك تماماً مما يجعلها تحتفظ بطاقتها إلى الأبد، وهكذا جميع المحركات والآلات يمكن أن تستفيد من الظاهرة اللاحتكاكية مما يقلل الحاجة إلى كثير من أعمال الصيانة والأعطال ويجعل عمرها يتضاعف إلى عدة مرات.

3. التطبيقات العسكرية: إن قدرة الموصلات الفائقة على طرد المجالات المغناطيسية جعلت منها مرشحة لاستعمالها في الرادارات العسكرية. فمن المعلوم أن دقة الصور التي يوفرها الرادار تعتمد على قدرته على التحليل غير أن تلك القدرة تتأثر سلباً بالمجالات المغناطيسية المجاورة سواء الأرضية أو غيرها. وقد تم اقتراح استعمال دروع مغناطيسية لحل هذه المشكلة. والدروع المشار إليها عبارة عن أسطوانات ذات مقاسات مختلفة مصنوعة من المواد فائقة التوصيل يوضع بداخلها مصدر الإلكترونات المهبطية فيحميها من المجالات الخارجية ويجعل الصورة الرادارية غاية في الوضوح.

4. التطبيقات الطبية: يمكن الاستفادة من نفس الدروع التي سبقت الإشارة إليها في الفقرة (3) في تطبيقات طبية كثيرة، وبصورة عامة عندما يراد دراسة الإشارات الكهربائية والمغناطيسية الصغيرة جداً المتولدة من المخ أو القلب أو الجهاز العصبي، فإنه يفضل توفير جو خالٍ من المجالات المغناطيسية الخارجية التي تكون عادة أكبر كثيراً من تلك الإشارات. وقد تم الاستفادة بنجاح في اليابان من خاصية الدروع المغناطيسية (الشكل 5.2) التي وفرت قدرات فائقة على قراءة الإشارات الصغيرة المشار إليها مما يوفر مزيداً من التشخيص لتلك الأعضاء الحساسة من جسم الكائن الحي. إذ يوضع (يغلف) رأس المريض

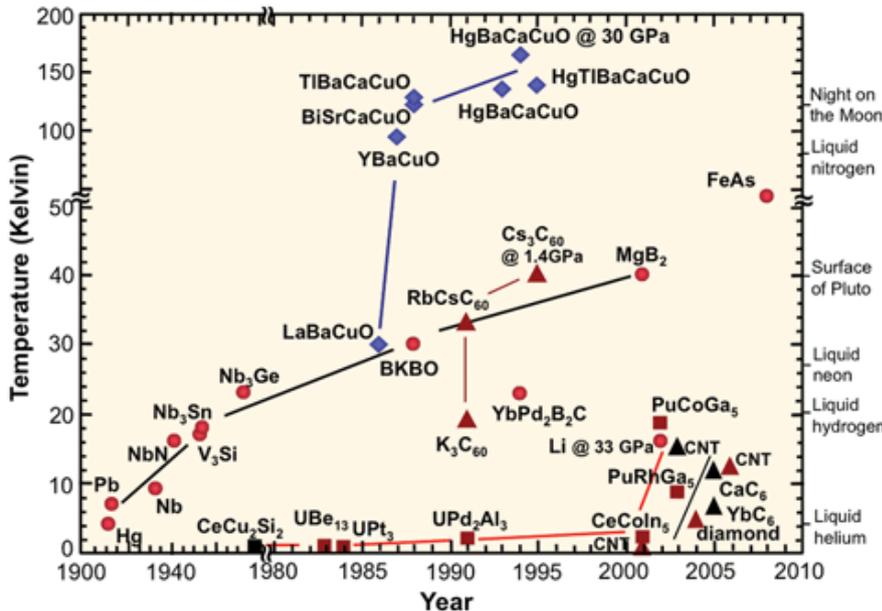
في مجموعة كبيرة مصنوعة من مادة فائقة التوصيل على شكل نصف كروي او حلقي (Toroid)، حيث تقوم هذه الحلقة بحجب المجالات المغناطيسية عن رأس المريض.



الشكل (3.2) رسم تخطيطي لحلقة مصنوعة من مادة فائقة التوصيل موضوعة في كأس مصنوع من رغوة الستايرو (styrofoam) يحتوي الكاس على النيتروجين المسال، وابرة مغناطيسية موجودة خارج الكاس.

3.4 درجة الحرارة الحرجة Critical Temperature

كما ذكرنا في المقدمة، فان درجة الحرارة الحرجة (T_c) او درجة الحرارة الانتقالية (Transition temperature) تعرف بانها الدرجة الحرارية التي يتم فيها التحول من الحالة الاعتيادية للمادة الى حالة التوصيل الفائق، والتي تكاد ان تكون عندها المقاومة النوعية للمادة تساوي صفرا. وجد الباحثون ان درجة الحرارة الحرجة للمواد ازدادت وبالاخص بعد عام 1986، والشكل (3.3) يوضح لنا كيفية ازدياد درجة الحرارة الحرجة للمواد فائقة التوصيل منذ عام 1911 وحتى عام 2010. يتبين من الشكل ان درجة الحرارة الحرجة لمركب (HgBaCaCuO) عند (30 GPa) بلغت مايزيد على (160) كلفن.



الشكل (3.3) يبين درجات الحرارة الحرجة لعدد من العناصر والمركبات فائقة التوصيل.

لقد وجد ان درجة الحرارة الحرجة تعتمد على العوامل التالية:

1. نقاوة المادة، فكلما كانت المادة نقية تكون درجة حرارتها الحرجة اعلى.
2. زيادة الضغط المسلط على المادة يزيد درجة الحرارة الحرجة، على سبيل المثال عند الضغط الجوي العادي تكون درجة الحرارة الحرجة للمركب $(\text{HgBa}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x)$ (135) كلفن، ولكنها تصل الى (164) كلفن عند الضغط العالي (30 GPa) او اكثر.
3. سمك المادة، وجد بشكل عام ان سمك المادة فائقة التوصيل يتناسب مع درجة الحرارة الحرجة، وهذا يعتمد ايضا على طبيعة المادة.
4. الشحنة الكهروستاتيكية على المادة. ان وجود الشحنة الكهروستاتيكية على سطح المادة الفائقة التوصيل يحتاج الى دراسة اعماق واكثر تفصيلا لفهمها من ناحية دورها على انخفاض او ارتفاع درجة الحرارة الحرجة.

اضافة الى ماسبق ذكره في الجدول (3.1) عن درجات الحرارة الحرجة لبعض العناصر والمركبات، نلاحظ من الجدول (3.2) درجات الحرارة الحرجة وعدد المستويات والتركيب البلوري في وحدة الخلية لمجموعة من المركبات الفائقة التوصيل، والتي تبين بشكل جلي كيف ان درجة الحرارة الحرجة للمركبات اعلى مما في حالة العناصر.

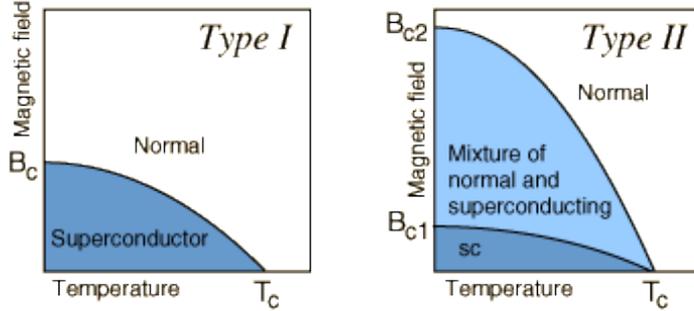
الجدول (3.2) يوضح تدوين ودرجات الحرارة الحرجة (T_c) والتركيب البلوري وعدد مستويات اوكسيد النحاس في وحدة الخلية اضافة الى البنية البلورية لمجموعة من المركبات الفائقة التوصيل ذات درجات حرارة حرجة عالية.

Formula	Notation	T_c (K)	Number of Cu-O planes in unit cell	Crystal structure
$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$	123	92	2	Orthorhombic
$\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CuO}_6$	Bi-2201	20	1	Tetragonal
$\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$	Bi-2212	85	2	Tetragonal
$\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_6$	Bi-2223	110	3	Tetragonal
$\text{Tl}_2\text{Ba}_2\text{CuO}_6$	Tl-2201	80	1	Tetragonal
$\text{Tl}_2\text{Ba}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$	Tl-2212	108	2	Tetragonal
$\text{Tl}_2\text{Ba}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$	Tl-2223	125	3	Tetragonal
$\text{TlBa}_2\text{Ca}_3\text{Cu}_4\text{O}_{11}$	Tl-1234	122	4	Tetragonal
$\text{HgBa}_2\text{CuO}_4$	Hg-1201	94	1	Tetragonal
$\text{HgBa}_2\text{CaCu}_2\text{O}_6$	Hg-1212	128	2	Tetragonal
$\text{HgBa}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_8$	Hg-1223	134	3	Tetragonal

3.6 المجال المغناطيسي الحرج Critical Magnetic Field

يعرف المجال المغناطيسي الحرج (B_c) بأنه المجال الذي عنده تتحول المادة من حالة التوصيل الفائق الى الحالة الاعتيادية عند درجة حرارة معينة. ان مقدار المجال المغناطيسي الحرج يعتمد

على نوع المادة وعلى درجة الحرارة. فقد وجد ان قيم المجال المغناطيسي الحرج تشكل قطعاً مكافئاً داخل مخطط المجال المغناطيسي الخارجي ودرجة الحرارة للمادة وكما في الشكل (3.4) حيث يبين ذلك نوعين من المواد فائقة التوصيل نوع (I) و نوع (II).



الشكل (3.4) يبين منحنيات المجال المغناطيسي الخارجي الحرج ودرجة الحرارة لنوعين من المواد فائقة التوصيل.

نلاحظ من الشكل (3.4) ان الموصل الفائق التوصيل من النوع الاول (I) يفقد توصيلته الفائقة بسهولة عندما يوضع في مجال مغناطيسي خارجي ضعيف ، ويسمى هذا النوع بالنوع الضعيف (اللين) soft superconductive ويخضع لتأثير مايسنر (Meissner effect). ومن الامثلة على هذا النوع الالمنيوم والزنك اللذان يكون المجال المغناطيسي الحرج لهما (0.0105 و 0.0054) تسلا، على التوالي.

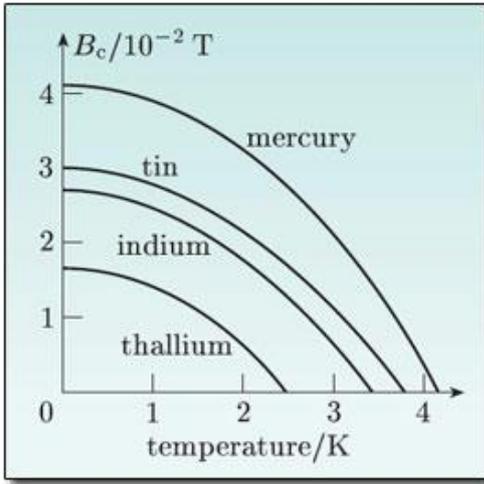
اما الموصل الفائق التوصيل من النوع الثاني (II) فعند وضعه في مجال مغناطيسي خارجي يفقد توصيلته الفائقة تدريجاً وليس بسهولة (او بشكل مفاجئ) ولهذا يسمى بالموصل الفائق التوصيل الشديد (او الصارم) hard superconductive . لكن نلاحظ في الجزء الايمن من الشكل (3.4) ان النوع الثاني (II) يبدأ بفقدان توصيليه الفائقة عندما تكون قيمة المجال المغناطيسي الحرج (B_{c1}) اقل مما في النوع الاول (I) الموضح في الجزء الايسر من الشكل (3.4)، ويفقدها بشكل كامل عند القيمة العليا (B_{c2}). في النوع الثاني (II) تسمى الحالة بين القيمة الدنيا والقيمة العليا للمجال المغناطيسي الحرج بالحالة الوسطية، وبعد الحالة الحرجة العليا للمجال المغناطيسي (B_{c2}) يصبح النوع الثاني (II) للمواد فائقة التوصيل عبارة عن مادة موصلة عادية. ومن الامثلة على هذا النوع مركب نتريد النيوبيوم (Niobium nitride - NbN) ومركب بزموت الباريوم (Barium Bismuth – BaBi₃) اللذان يكون المجال المغناطيسي الحرج لهما (8×10^6 و 5×10^3) تسلا، على التوالي. ولهذا يستخدم النوع الثاني (II) للمواد فائقة التوصيل في التطبيقات ذات المجالات المغناطيسية القوية.

ان منحنى الجزء الايمن من الشكل (3.4) يخضع للعلاقة الرياضية التالية:

$$B_c = B_c(0) \left[1 - \left(\frac{T}{T_c} \right)^2 \right] \quad (3.1)$$

حيث ان $[B_c(0)]$ اقصى قيمة للمجال المغناطيسي الحرج عند درجة حرارة الصفر المطلق، و $[T]$ درجة الحرارة فوق درجة الحرارة الحرجة.

نلاحظ ايضا من الشكل (3.4) والمعادلة (3.1) ان قيمة المجال المغناطيسي الحرج يصبح صفرا عند درجة حرارة مساوية لدرجة الحرارة الحرجة لتلك المادة ($T=T_c$)، وتزداد قيمة المجال المغناطيسي الحرج تدريجيا كلما انخفضت درجة حرارة المادة فانقة التوصيل عن درجة الحرارة الحرجة، وعند درجة حرارة الصفر المطلق تصل قيمة المجال المغناطيسي الحرج اقصى قيمة له. ولقد اجريت العديد من التجارب على العديد من المواد الفائقة التوصيل للحصول على قيم للمجال المغناطيسي الحرج من خلال رسم العلاقة بينه وبين درجة الحرارة الحرجة. يبين الشكل (3.5) العلاقة بين درجة حرارة الحرجة وبين المجال المغناطيسي الخارجي (المسلط) الحرج لعدد من العناصر فانقة التوصيل. كذلك يبين الجدول (3.5) قيم درجة الحرارة الحرجة واقصى قيم المجال المغناطيسي الحرجة لبعض المواد فانقة التوصيل من النوع الاول (I) والنوع الثاني (II).



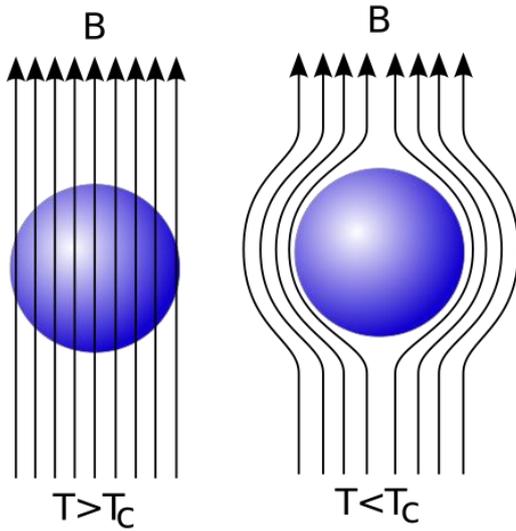
الشكل (3.5) تأثير المجال المغناطيسي الخارجي الحرج على درجة الحرارة الحرجة لعناصر الزئبق والقصدير والاندسيوم والثاليوم.

الجدول (3.3) يبين قيم درجة الحرارة الحرجة والقيم القصوى للمجال المغناطيسي الحرج لمواد فانقة التوصيل من النوعين الاول (I) والثاني (II).

Metals	T_c (K)	B_c (T)	Type	Metals	T_c (K)	B_c (T)	Type
Al	1.20	0.01	I	Re	2.4	0.03	I
Cd	0.52	0.0028	I	Ru	0.49	0.005	I
Ga	1.083	0.0058	I	Sn	3.72	0.03	I
α -Hg	4.15	0.04	I	Ta	4.48	0.09	I
β -Hg	3.95	0.04	I	Tc	7.46–11.2	0.04	II
Ga	1.1	0.005	I	α -Th	1.37	0.013	I
In	3.4	0.03	I	Ti	0.39	0.01	I
Ir	0.14	0.0016	I	Tl	2.39	0.02	I
Mo	0.92	0.0096	I	V	5.03	1	II
Nb	9.26	0.82	II	α -W	0.015	0.00012	I
Os	0.65	0.007	I	Zn	0.855	0.005	I
Pb	7.19	0.08	I				

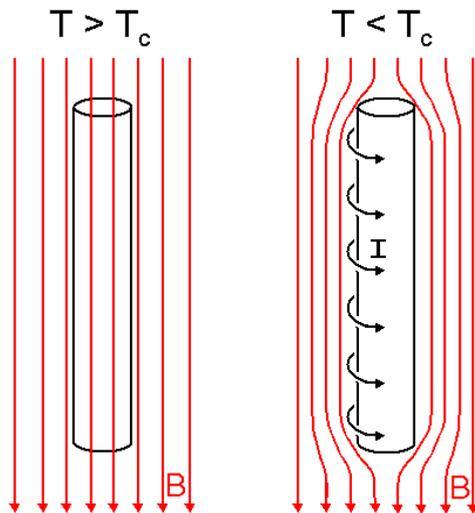
3.7 ظاهرة مايسنر Meissner Effect

في عام 1933 وجد العالمان الالمان والتر مايسنر (Walter Meissner) و روبرت اوكسفلد (Robert Ochsenfeld) انه عند تسليط مجال مغناطيسي على مادة فائقة التوصيل (اجريت تجربتهما على عينتين من القصدير والرصاص) فان خطوط الفيض المغناطيسي تبتعد كلياً عن المادة عند تبريدها الى درجة حرارة اقل من الدرجة الحرجة، أي ان الحث المغناطيسي للمادة فائقة التوصيل يساوي صفر ($B = 0$)، حيث ينشأ رفض متبادل بين المجال المغناطيسي الخارجي والموصل فائق التوصيل. يطلق على هذه الظاهرة بظاهرة طرد (او اخراج) المجال المغناطيسي (Magnetic field expulsion) او بظاهرة مايسنر، والشكل (3.6) يوضح هذه الظاهرة. لقد اكتشفا مايسنر واوكسفلد هذه الظاهرة بشكل غير مباشر، وبما ان المجال المغناطيسي محفوظ بواسطة الموصل الفائق، فان نقصان المجال الداخلي يؤدي الى زيادة المجال الخارجي.



الشكل (3.6) يبين ظاهرة مايسنر. نلاحظ من الشكل كيف ان خطوط المجال المغناطيسي تنحرف بحيث لايمكنها اختراق الموصل عندما تكون تصبح درجة الحرارة اقل من الدرجة الحرجة.

لقد اجريت دراسات وتجارب كثيرة من اجل فهم وادراك هذه الظاهرة، وتبين انه بالامكان تفسيرها على اساس ان عملية التحول (بوجود المجال المغناطيسي) من الحالة الاعتيادية الى حالة التوصيل الفائق نتيجة توليد تيارات سطحية مستمرة كافية لمحو تأثير المجال المغناطيسي الخارجي داخل المادة وكما موضح في الشكل (3.7).



الشكل (3.7) يبين في ظاهرة مايسنر كيفية اقضاء خطوط المجال المغناطيسي الخارجي عن المادة فائقة التوصيل عند ($T < T_c$) نتيجة التيارات السطحية المستمرة.

من اجل توضيح ذلك رياضيا، دعنا نفرض ان المجال المغناطيسي داخل المادة (B_{int}) في الحالة الاعتيادية بدلالة المجال المغناطيسي الخارجي المسلط على المادة (B_{ext}) والذي يكتب بالعلاقة التالية:

$$B_{int} = \mu_o B + \mu_o M \quad (3.2)$$

او

$$B_{int} = B_{ext} + \mu_o M \quad (3.3)$$

حيث (μ_o) تمثل النفوذية المغناطيسية، و (M) تمثل العزم المغناطيسي لوحدة الحجم.

وبما ان المجال المغناطيسي الداخلي لمادة فائقة التوصيل يساوي صفرا، فعليه يعطى العزم المغناطيسي بالعلاقة التالية:

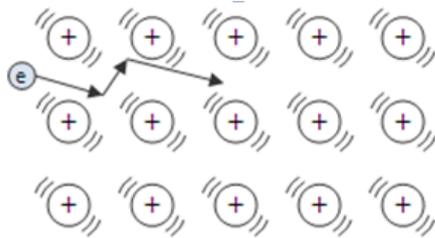
$$M = -\frac{B_{ext}}{\mu_o} \quad (3.4)$$

توضح المعادلة (3.4) ان التمغنط يكون مساويا ومعاكسا لشدة المجال المغناطيسي الخارجي. وعليه فان المادة فائقة التوصيل لها تاثير كما لو كان لديها عزم مغناطيسي معاكس للمجال المغناطيسي الخارجي المسلط عليها. ولهذا يمكن اعتبار المادة ذات دايامغناطيسية مثالية.

3.8 نظرية التوصيلية الفائقة Superconductivity Theory

يعرف التوصيل الكهربائي الاعتيادي في المواد الصلبة على انه قابلية انتقال الالكترونات التكافؤ او الالكترونات التوصيل من موقع الى اخر. وبما ان المواد الصلبة عبارة عن رص من القلوب الايونية الموجبة، فعندما تتحرك الالكترونات داخل البلورة فانها سوف تعاني من استقطارات

نتيجة تصادمها العشوائي مع القلوب الايونية الموجبة ومع بعضها وينتج عن ذلك اعاقا لحركة الالكترونات الانتقالية (او نستطيع القول تولد حرارة) وهذه الاعاقا تدعى بالمقاومة الكهربائية، وكما موضح في الشكل (3.8).



الشكل (3.8) يوضح عملية تحرك الالكترونات وتصادمها مع الشبكة لينتج عن ذلك مقاومة كهربائية في الموصل العادي.

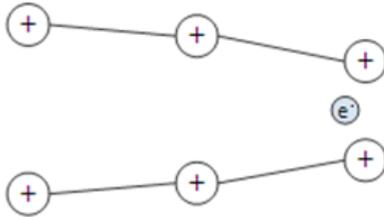
تعتمد المقاومة الكهربائية على عدة عوامل ومن اهمها درجة الحرارة التي تعمل على اهتزاز شبكة البلورة حيث تستطار الالكترونات التوصيل بالفونونات الناتجة عن اهتزاز شبكة البلورة.

فعلية يجب ان لاتختفي المقاومة الكهربائية ابدا مهما انخفضت درجة الحرارة. ولكن في واقع الحال وجد ان قيمة المقاومة الكهربائية تكاد ان تكون صفرا عند درجات الحرارة الواطئة جدا، وهذا مايتطلب توضيحه هنا.

لقد اجريت دراسات عديدة لظاهرة التوصيلية الفائقة ووضعت نظريات مختلفة لتفسير هذه الظاهرة. ان اخر هذه النظريات التي اصبحت مقبولة ومقنعة هي النظرية التي وضعها الفيزيائيون باردين (Bardeen) وكوبر (Cooper) وشريفر (Schrieffer) عام 1957، حيث حصلوا بموجبها على جائزة نوبل في الفيزياء عام 1972، ولقد اطلق على هذه النظرية بنظرية (BCS) نسبة الى الحروف الاولى من اسماء هؤلاء العلماء.

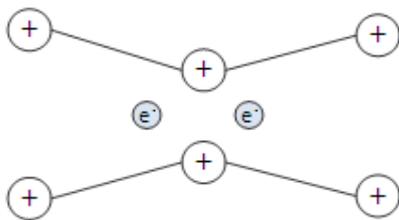
لقد لاقت نظرية (BCS) نجاحا متميزا عن باقي النظريات في تفسير الكثير من الظواهر الفيزيائية التي تتميز بها المواد فائقة التوصيل مثل ظاهرة مايسنر. ان الخوض في تفاصيل هذه النظرية يتطلب منا معلومات كافية في ميكانيك الكم المتقدم وفي الرياضيات المتقدمة العالية اللذين يقعان خارج نطاق المعلومات الحالية لهذا الموضوع، وبسبب محدودية الوقت المخصص للمنهج سوف نكتفي في دراستنا هذه بذكر الشرح المبسط لذكر نظرية (BCS).

لقد فسرت نظرية (BCS) ان انعدام المقاومة الكهربائية في المواد فائقة التوصيل ناتج عن الحالة الخاصة لترتيب الكترونات التوصيل من التأثير المتبادل بين الالكترونات واهتزازات الشبكة. لقد افترض انه بدلا من التنافر بين زوج من الالكترونات نتيجة القوى الكهروستاتيكية، فان الكترونات التوصيل تتجمع في طبقة رقيقة جدا بالقرب من سطح فيرمي وتكون قادرة على التجاذب. وقد وضحت نظرية (BCS) ذلك على اساس استجابة القلوب الايونية الموجبة في



البلورة للالكترونات المارة بالقرب منها وكما مبين في الشكل (3.9)، حيث نلاحظ كيف الالكترون يمر بين صفيين من النوى الموجبة الشحنة وهذه النوى (القلوب الايونية) الموجبة تجذب الالكترونات المارة، وهذا هو المبدأ الاساسي لنظرية (BCS).

الشكل (3.9) يبين كيف ان الالكترون السالب الشحنة يمر بين صفيين من النوى (القلوب الايونية) الموجبة الشحنة.



كما نلاحظ من الشكل (3.9) ان الالكترون المتحرك يسبب تشوها للشبكة حيث تزداد كثافة الشحنة الموجبة القريبة من الالكترونات. ونلاحظ من الشكل (5.10) ان الكترون ثان يجذب باتجاه الالكترون الاول (على الرغم من الالكترونين يتنافران). ان هذا الزوج (او الثنائي) من الالكترونات والذي يسمى بزوج كوبر (Cooper pair)، يتحرك بسهولة خلال المادة، ويعد كل زوج منظومة منفردة، أي ترتبط حركة احد الالكترونيين بحركة الالكترون الاخر.

الشكل (3.10) يبين كيفية حركة زوج كوبر الالكتروني خلال المادة.

لقد فسرت نظرية (BCS) ظاهرة انعدام المقاومة الكهربائية عند درجات الحرارة الواطئة بانها تنتج عن تكوين أزواج من الالكترونات (أزواج كوبر) والتي تسير بحرية داخل المادة الصلبة من دون تصادم أو استقطار مع القلوب الايونية الموجبة أو مع ذرات الشوائب التي تحويها المادة الصلبة. ان عملية تكوين أزواج الالكترونات يعمل على تقليل الكثرونات التوصيل في المادة الى حد كبير.

ان تاثير درجة الحرارة على المواد فائقة التوصيل واضح جدا، فعند هبوط درجة الحرارة الى حد معين فان الكثرونات التوصيل تشكل فيما بينها أزواج الالكترونات. اما ازدادت درجة الحرارة عن الحد المعين فان الطاقة الحرارية سوف تزداد تبعا لذلك حتى تصبح كافية لفصل الأزواج الالكترونية وتوليد الكثرونات منفردة وبهذا تتحول المادة من حالة التوصيل الفائق الى حالة التوصيل الاعتيادي.

3.9 عمق الاختراق Penetration Depth

لقد ناقشنا في الفقرة (3.4) ظاهرة اقضاء الفيض المغناطيسي أو ظاهرة مايسنر على اسس مثالية في توضيح المادة فائقة التوصيل. لقد استطاعت هذه الظاهرة من ايضاح البعض من الظواهر التي يمكن ملاحظتها في التوصيل الفائق ولكنها فشلت في تفسير بعض التفاصيل الدقيقة لبعض اخر من الظواهر التي يمكن ملاحظتها في داخل المادة. فمثلا استثناء المجال المغناطيسي من باطن المادة فائقة التوصيل لا يصح دائما لجميع الظواهر ولجميع مواصفات البلورة، وكذلك نجد ان المجال المغناطيسي يستطيع اختراق منطقة صغيرة بالقرب من سطح المادة فائقة التوصيل الى عمق يدعى بعمق الاختراق (λ) والذي تتراوح قيمته بحدود (10^{-7} - 10^{-8}) متر.

في عام 1935 استطاع الاخوين لندن (H. and F. London) تفسير ظاهرة مايسنر وكذلك ايجاد علاقة رياضية تعطي عمق الاختراق. لقد اعتمدا في تحليلهما النظري على نموذج المائعين (Two-fluid model) الذي وضع من قبل كورتر (Gorter) وكازيمير (Casimir) في عام (1934). لقد فرضا الاخوين لندن عند ($T < T_c$) ان جزا مقداره (n_s/n) من العدد الكلي (n) لالكترونات التوصيل يمكن ان تساهم في التيار الفائق (super current) داخل المادة. ان المقدار (n_s) يدعى بكثافة الكثرونات التوصيل الفائق. ان قيمة (n_s) تقترب من قيمة الكثافة الالكترونية الكلية (n) عندما تنخفض درجة الحرارة لتصبح اقل من درجة الحرارة الحرجة ($T < T_c$)، وتنخفض قيمة المقدار (n_s) الى الصفر عندما تصبح درجة الحرارة اعلى من الدرجة الحرجة ($T > T_c$)، حيث تتحطم أزواج الالكترونات وبذلك تتحطم التوصيلية الفائقة وسيعاني الموصل الفائق التوصيل انتقالا من حالة التوصيل الفائق الى حالة التوصيل الاعتيادي. وللحصول على تطابق بين هذه الفكرة والقياسات التجريبية وضع كورتر وكازيمير العلاقة التالية:

$$\frac{n_s}{n} = 1 - \left(\frac{T}{T_c}\right)^4 \quad (3.5)$$

حيث ان (n_s/n) تمثل تركيز الكترولونات التوصيل الفائق الى التركيز الكلي لأالكترولونات التوصيل الاعتيادي.

لقد فرضا الاخوين لندن، انه عند تسليط مجال كهربائي شدته (E) لفترة لزمنية قصيرة (لحظة واحدة) على مادة فائقة التوصيل فان الكترولونات التوصيل الفائق تتحرك وفق المعادلة التالية:

$$\vec{F} = m \frac{d\vec{V}_s}{dt} = -e\vec{E} \quad (3.6)$$

حيث ان: (\vec{F}) القوة و (\vec{V}_s) سرعة الكترولونات التوصيل الفائقة و (m) كتلة الالكترولون.

نلاحظ من المعادلة (3.6) ان القوة الوحيدة التي تؤثر على هذا النوع من الالكترولونات هي القوة الناتجة عن المجال الكهربائي. اما قوة الاستطارة او التصادم فليست موجودة في المعادلة وذلك لان الكترولونات التوصيل الفائق لاتستطير او تتصادم. ان كثافة التيار الناتج عن الكترولونات التوصيل الفائق يكتب على النحو التالي:

$$\vec{J}_s = -e\vec{V}_s n_s \quad (3.7)$$

$$\frac{d\vec{J}_s}{dt} = -e \left(\frac{d\vec{V}_s}{dt}\right) n_s \quad (3.8)$$

فبتعويض المعادلة (3.6) في المعادلة (3.8) نحصل على:

$$\frac{d\vec{J}_s}{dt} = \frac{n_s e^2}{m} \vec{E}$$

او ممكن كتابة المعادلة اعلاه كالآتي:

$$\vec{J}_s = \frac{n_s e^2}{m} \vec{E} \quad (3.9)$$

لاجل حساب مقدار اختراق المجال للمادة الموصلة، دعنا نفرض ان الحالة مستقرة، أي ان $(\vec{J}_s = 0)$ وهذا يعني ان المجال الكهربائي في المعادلة (3.9) يساوي صفرا. ففي هذه الحالة لا يستطيع التيار الاعتيادي ان يمر عبر الموصل الفائق وان التيار المار هو فقط ناتج عن سيل من الكترولونات التوصيل الفائق.

فبند تعويض قيمتي $(\vec{J}_s = 0)$ و $(\vec{E} = 0)$ في احدى معادلات ماكسويل المعروفة:

$$\vec{B} = -\vec{\nabla} \times \vec{E} \quad (3.10)$$

$$\vec{B} = 0 \quad (3.11)$$

ان المعادلة (3.11) تؤكد ان المجال المغناطيسي للحالة المستقرة يكون ثابتا بغض النظر عن درجة الحرارة، وهذا يتناقض مع ظاهرة مايسنر التي تؤكد على انه عند ارتفاع درجة الحرارة فان المجال المغناطيسي يخترق المادة. وعليه لا بد من ادخال بعض التعديلات على المعادلات المذكورة اعلاه لنحصل على النتيجة المطلوبة. فعند تعويض المعادلة (3.9) في المعادلة (3.10) نحصل على:

$$\vec{B} = -\frac{m}{n_s e^2} \vec{\nabla} \times \vec{J}_s \quad (3.12)$$

ويطلق على المعادلة (3.12) بمعادلة لندن، والتي ادت الى نتائج مطابقة للتجربة.

المعادلة (3.12) تمثل العلاقة بين (\vec{B}) و (\vec{J}_s) . هذه الكميات كذلك مرتبطة بمعادلة ماكسويل بدلالة (\vec{J}_s) ، وعلى النحو التالي:

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J}_s \quad (3.13)$$

اذا استبعدنا (\vec{J}_s) من المعادلتين (3.12) و (3.13)، يمكننا اخذ (curl) لطرفي المعادلة (3.13) فنحصل على:

$$\vec{\nabla} \times \vec{\nabla} \times \vec{B} = \vec{\nabla}(\vec{\nabla} \cdot \vec{B}) - \vec{\nabla}^2 \vec{B} = -\vec{\nabla}^2 \vec{B} = \mu_0 \vec{\nabla} \times \vec{J}_s \quad (3.14)$$

حيث تم استخدام $(\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0)$. وبتعويض $(\vec{\nabla} \times \vec{J}_s)$ من المعادلة (3.12) في المعادلة (3.14) نجد ان:

$$\nabla^2 \vec{B} = \frac{\mu_0 n_s e^2}{m} \vec{B} \quad (3.15)$$

واما بالطريقة نفسها، او بضرب طرفي المعادلة (3.15) ب (\vec{J}_s / \vec{B}) نحصل على:

$$\nabla^2 \vec{J}_s = \frac{\mu_0 n_s e^2}{m} \vec{J}_s \quad (3.16)$$

ولحل المعادلتين (3.15) و (3.16) نفرض شكلا هندسيا بسيطا غير محدود يمتد على الجانب الموجب للمحور السيني. فعند تسليط مجال مغناطيسي خارجي (B_{ext}) يوازي سطح الشكل الهندسي وباتجاه محور (z) ، فان حل المعادلة (3.15) عندما $(x < 0)$ يكون:

$$B_z = B_{ext} \exp\left(-\frac{x^2}{\lambda}\right) \quad (3.17)$$

حيث ان:

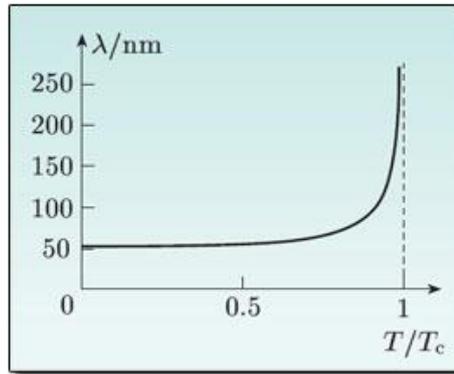
$$\lambda = \left(\frac{m}{\mu_0 n_s e^2}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.18)$$

وتمثل المسافة التي ينخفض بها (B_z) لوغارتميا $\left(\frac{1}{e}\right)$ مع قيمة المجال المغناطيسي الخارجي، ويطلق على هذه المسافة (λ) بعمق الاختراق.

ان اول من قام تجريبيا بقياس عمق الاختراق في المواد فائقة التوصيل هو العالم شوينبيرك (D Schoenberg) حيث اجرى اول تجاربه على قطرات صغيرة من الزئبق، ووجد ان المجال المغناطيسي المسلط على قطرة الزئبق يخترقها بعمق صغير جدا بحدود (10 – 100) نانومتر. ووجد ايضا ان عمق الاختراق يتغير مع درجة الحرارة، حيث تزداد قيمته بارتفاعها لتصبح قيمتها مالا نهاية عندما $(T = T_c)$ وذلك لان المادة التي في حالة التوصيل الفائق تتحول الى حالتها الاعتيادية، وعليه فان المجال المغناطيسي الخارجي يخترقها كليا. الشكل (3.11) يوضح عمق الاختراق كدالة لدرجة حرارة عنصر القصدير، والعلاقة التالية تبين تغير عمق الاختراق مع درجة الحرارة:

$$\lambda = \lambda_0 (1 - (T/T_c)^4)^{-1/2} \quad (3.19)$$

حيث ان (λ_0) تمثل عمق الاختراق عند درجة الصفر المطلق، أي عندما $(T = 0 \text{ K})$.



الشكل (3.11) يوضح عمق الاختراق (λ) كدالة لدرجة حرارة عنصر القصدير.

3.10 اسئلة الفصل الخامس Problems of Chapter Five

3.10.1 إذا علمت ان عمق الاختراق (λ) للزئبق (75) نانومتر عند درجة حرارة (3.5 K) جد عمق الاختراق عند درجة الحرارة الحرجة.

$$\lambda_o = \lambda(1 - (T/T_c)^4)^{1/2} = 75nm(1 - (3.5K/4.2)^4)^{1/2}$$

$$\lambda_o = 53.969nm$$

3.10.2 إذا علمت ان عمق الاختراق لعنصر النيوبيوم عند درجة حرارة (5 K) يساوي (489) نانومتر احسب، عمق الاختراق عندما تقترب درجة الحرارة الحرجة للنيوبيوم ونسبة تركيز الالكترونات فائقة التوصيل الى الالكترونات التوصيل (n_s/n).

$$\lambda_o = \lambda \left(1 - \left(\frac{T}{T_c} \right)^4 \right)^{1/2} = 489nm(1 - (5K/9.26)^4)^{1/2}$$

$$\lambda_o = 467.756nm$$

$$n_s/n = 1 - (T/T_c)^4 = 1 - (0.54)^4 = 0.915$$

3.10.3 وضح لماذا يتلاشى المجال المغناطيسي الخارجي في داخل الموصل الفائق التوصيل عند درجة الحرارة الحرجة؟

4.10.5 اشرح ظاهرة مايسنر؟