

$$n = N_D N_C \exp - \left(\frac{E_g - E_D}{2k_B T} \right) \quad \dots(10.58)$$

وباستخدام المعادلة (10.57) نجد أن

$$N_C \exp - \left(\frac{E_g - E_f}{k_B T} \right) = N_D N_C \exp - \left(\frac{E_g - E_D}{2k_B T} \right)$$

أو ان

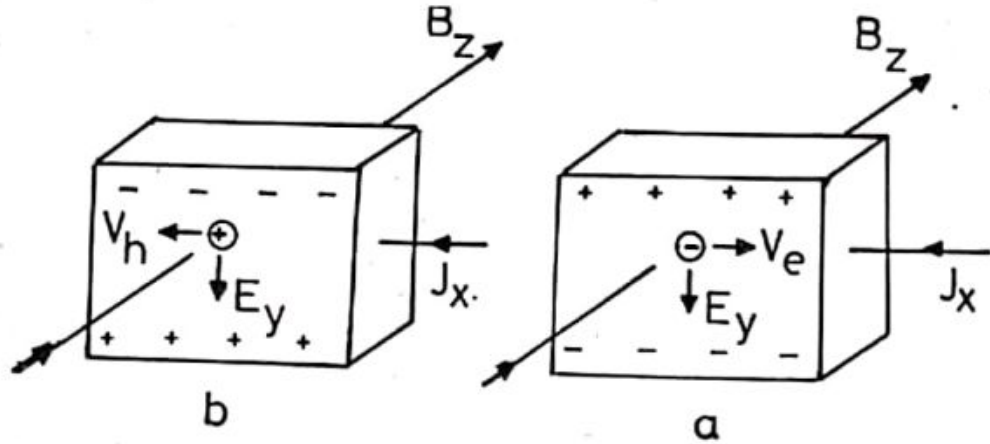
$$E_f = \frac{E_g - E_D}{2} + \frac{k_B T}{2} \ln \left(\frac{N_D}{N_C} \right) \quad \dots(10.59)$$

وهذا فإن مستوي فيرمي يكون في درجة حرارة الصفر المطلق في منتصف الفجوة ما بين حالة الشوائب المانحة وحافة حزمة التوصيل. وفي الواقع يمكن منسوب فيرمي عند هذا المستوي لمدى كبير من درجات الحرارة لان N_D تكون عملياً أصغر بكثير من N_C فيحمل الجزء اللوغاريتمي من المعادلة (10.59).

10.6 تأثير هول Hall effect

لقد اكتشف العالم الفيزيائي الأمريكي هول سنة 1879 أنه لو وضع شريحة من فلز في مجال مغناطيسي بصورة عمودية عليها وتمرر تيار كهربائي فيه، يتولد فرق جهد كهربائي عمودي على كل من اتجاه التيار وعلى المجال المغناطيسي وكما مبين في الشكل (10.12). وهذه تدعى بتأثير هول ولكن ماهو التفسير الفيزيائي لهذه الظاهرة؟ إن التيار الكهربائي كما هو معلوم عبارة عن سيل من الإلكترونات تتحرك بسرعة انحراف (V_d) drift velocity. وعند تسليط المجال المغناطيسي (B) على الشريحة تسبب قوة لورنتز $(F = e(\vec{V} \times \vec{B}))$ انحراف هذه الإلكترونات نحو الاسفل (حسب قاعدة اليد اليمنى). ان هذه القوة تعمل على تجميع الإلكترونات في الطرف الاسفل من الشريحة فيكون سالبة الشحنة وفي الوقت نفسه يحدث نقصاً في الإلكترونات في الطرف العلوي منه فيكون موجب الشحنة. ونتيجة لذلك يتولد مجال كهربائي متجه نحو الاسفل ينمو بالتدريج فيعمل على منع المزيد من الانحراف الجانبي للإلكترونات حتى يحدث الاتزان بين الشحنات ويتلاشى التيار نهائياً، ويدعى هذا المجال بمجال هول Hall electrical field E_H ويطلق على فرق الجهد بين طرفي الشريحة المتقابلتين بجهد هول V_H .

وللتعبير عن تأثير هول رياضياً ، نفرض ان التيار المار في شريحة من الفلز هو J_x في اتجاه (x) وان المجال المغناطيسي المؤثر B_z في اتجاه z وكما هو مبين في الشكل (10.12a).



الشكل (10.12) رسم تخطيطي لتأثير هول

a - شريحة من الفلز

b - شريحة من شبه موصل

إن القوة المؤثرة على الالكترن بوجود المجال الكهربائي (E) والمجال المغناطيسي (B) تعطى بالعلاقة التالية

$$F = -e(E + v \times B) \quad \dots(10-60)$$

وبما أن حركة الالكترن تكون في اتجاه محور (x) ، فعليه تكون القوة المؤثرة على الالكترن في اتجاه محور Y ، فعليه يمكن إعادة كتابة المعادلة (10.60) على هذا النحو:

$$F_y = -e(E_y - v_x \times B_z) \quad \dots(10-61)$$

وتصبح القوة F_y مساوية للصفر عندما يحدث التوازن بين تأثير المجال المغناطيسي (B_z) وتأثير المجال الكهربائي (E_y) الناتج عن انحراف الالكترونات.

$$0 = e E_y - e v_x B_z$$

أي أن

$$E_y = v_x B_z$$

...(10-62)

إن التيار J_x الناتج من حركة الإلكترونات باتجاه x يعطى بدلالة سرعة الانجراف وعدد الإلكترونات (n) أي أن :

$$J_x = - n e v_x \quad \dots(10-63)$$

أو

$$v_x = - \frac{J_x}{n e} \quad \dots(10-64)$$

حيث أن n تركيز الإلكترونات

فبتعويض المعادلة (10.64) في (10.62) مع الأخذ بنظر الاعتبار كتابة E_y و E_H نحصل على :

$$E_H = - \left(\frac{1}{n e} \right) J_x B_z \quad \dots(10-65)$$

إن المعادلة (10.65) تعني أن مجال هول E_H يتناسب مع كثافة التيار وشدة المجال المغناطيسي، ويدعى ثابت التناسب بمعامل هول Hall coefficient R_H أي أن

$$R_H = \frac{E_H}{J_x B_z} = - \frac{1}{n e} \quad \dots(10-66)$$

وهكذا نلاحظ أن معامل هول لا يعتمد على أبعاد الشريحة ولكن يعتمد على تركيز الإلكترونات (n). فمن الجدير بالذكر أن المعادلة (10.66) يمكن تطبيقها على الفلزات الأحادية مثل النحاس والفضة والبلاتين والصدويوم حيث أن الإلكترونات هي المسؤولة عن نقل التيار الكهربائي، بينما نرى أنه لا يصح تطبيقها على أشباه الموصلات وذلك لكون أن الفجوات هي المسؤولة عن نقل التيار.

فلقد لوحظ في بعض الفلزات كالحديد والخرصين والكوبالت وفي أشباه الموصلات أن فرق الجهد يكون معكوساً، أي أن الجهد عند الطرف الأسفل للشريحة يكون أعلى من الجهد عند الطرف العلوي.

اسئلة الفصل العاشر

- 10.1 ماثأثير وجود ذرات شائبة قابلة أو ذرات شائبة واهبة على مستوي طاقة فيرمي؟
وضح ذلك بالرسم
- 10.2 بلورة شبه موصلة تضم 10^{24} ذرة قابلة لكل متر مكعب . فاذا كان مستوي الطاقة لهذه القابلات يساوي نصف الكترون فولت فوق قمة نطاق التكافؤ في البلورة وأن حركية الفجوات في هذه الحزمة لانعتمد على درجة الحرارة وتساوي 10^{-2} متر مربع لكل فولت ثانية . احسب معامل التوصيل الكهربائي لهذه البلورة عند درجة حرارة الغرفة بأفترض أن الكتلة الفعالة للفجوة m_h تساوي الكتلة الحرة للإلكترون m .
ملاحظة : $m_e = 0.7 m$ و $m_h = m$
- 10.3 احسب تركيز الالكترونات والفجوات في الجيرمانيوم الذي يحتوي على $10^{19} \times 2.4$ ذرة لكل متر مكعب من الانتيومون عند درجة حرارة $300k$. احسب التغير في تركيز ناقلات الشحنة اذا اضيف ايضاً $10^{19} \times 4.8$ ذرة لكل متر مكعب من ذرات الانديوم .
- 10.4 قطعة من الجيرمانيوم نوع n - متوازية الاضلاع سمكها $2mm$ يمر فيها تيار مقداره $10mA$ ويتعامد مع التيار مجال مغناطيسي قدره $0.1T$. فاذا كان جهد هول الناشيء هو $(1mV)$. احسب ثابت هول وكثافة الالكترون في شبه الموصل .
- 10.5 تعد اشباه الموصلات الذاتية مواد غير جيدة التوصيل الكهربائي عند درجة حرارة اقل من درجة حرارة الغرفة وجيدة التوصيل الكهربائي عند درجات الحرارة العالية . اشرح سبب ذلك .
- 10.7 اكتب حاصل ضرب np . وهل لهذه العلاقة من اهمية في تحديد تركيز حاملات الشحنة في شبه الموصل .
- 10.8 قطعة من الجيرمانيوم تحتوي على 10^{23} ذرة لكل متر مكعب تصبح ذاتية عند درجة حرارة $70^\circ C$. فعند اي درجة حرارة تصبح قطعة من السيليكون نقية اذا احتوت على نفس التركيز من الشوائب .
- 10.9 ما هو المقصود بأشباه الموصلات الذاتية والمطعمة اشرح ذلك .

لتفسير هذه الظاهرة أن نفترض أن ناقلات الشحنة تكون موجبة في هذه المواد وليست سالبة ، أي أن التيار يتولد في هذه المواد نتيجة لحركة الشحنات الموجبة . وهذا يعني أن سرعة انجراف V_h هذه الشحنات هي بنفس اتجاه التيار في هذه الحالة ، وعليه يكون اتجاه القوة المؤثرة عليها كذلك نحو الأسفل حسب قاعدة اليد اليمنى ، وهكذا فإن الطرف الأسفل يكون هذه المرة موجب الشحنة بينما يكون الطرف العلوي سالب الشحنة وكما هو مبين في الشكل (10.12b) . وهكذا ينعكس فرق جهد هول في هذه المواد . وياتباع نفس الطريقة الواردة اعلاه في إيجاد معامل هول الذي يعتمد على تركيز الإلكترونات سوف نحصل على

$$R_H = \frac{1}{Pc} \quad \dots(10-67)$$

حيث أن P يمثل تركيز الفجوات .

أما بالنسبة لمعامل التوصيل الكهربائي للمواد شبه الموصلة فيكتب أيضاً بدلالة معامل هول ومعامل الحركة لهول ، أي ان

$$\sigma = \frac{\mu_H}{R_H} \quad \dots(10-68)$$

حيث أن

$$\mu_H = \mu_e - \mu_h$$

التوصيل الفائق Superconductivity

Introduction

12.1 المقدمة

إن أحد أهم الظواهر في فيزياء الحالة الصلبة هي أن بعض الفلزات والمركبات تكاد أن تنعدم مقاومتها النوعية عند درجة حرارة معينة واطئة. أو بتعبير آخر ان التيار الكهربائي يسري فيها دون أي تبديد في قيمته. ولقد اطلق على هذه الظاهرة بمصطلح التوصيل الفائق للمادة. لقد اكتشفت هذه الظاهرة عام 1911 من قبل العالم الفيزيائي الهولندي كاميرلنك اونيس Kammerlingh Onnes من خلال دراسة التوصيل الكهربائي للزئبق نقي عند درجات حرارة واطئة جداً. فلقد وجد ان المقاومة النوعية للزئبق تختفي فجأة (أي تكاد ان تكون صفراً) عند تبريده عند درجة حرارة سائل الهيليوم (4.2k).

إن قيمة المقاومة النوعية للزئبق في حالة التوصيل الفائق كما وجدها اونس محدود 10^{-12} من قيمة المقاومة في الحالة الاعتيادية. وحدثياً وجد ان تياراً محتثاً يقدر بعدة مئات من الامبيرات يسري في حلقة من الرصاص في حالة التوصيل الفائق ولم يحدث تغير فيه لفترة تتراوح بمحدود سنة كاملة، وهذا برهان أكيد ان المقاومة النوعية فعلاً تكاد ان تكون صفراً في حالة التوصيل الفائق.

لقد فتحت التجارب في السنوات الآخيرة مجالاً واسعاً للتعرف على أكثر من (30) عنصراً ومئات من المركبات تصلح لتكون فائقة التوصيل عند درجات حرارة حرجة، حتى اعداد هذا الكتاب، تتراوح من 0.1k الى 100k. وتشهد ظاهرة التوصيل الفائق هذه الايام ضجة اعلامية وتنافساً دولياً عجبياً اذ ان تطبيقاتها سيشكل ثورة حقيقية في نهاية القرن العشرين حيث انها ستفتح افاقاً في المجالات واهمها:

- 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 لاناارة المدن مثلاً.
- 4- عمل ملفات عملاقة لكي تخزن الكهربائية
- 5- صناعة الاجهزة ذات التوصيل الفائق والتي تستخدم في مجال البحوث بدلاً من المغنايط التقليدية.
- 6- صناعة اجهزة خاصة لتوليد الطاقة الكهربائية.

Critical temperature

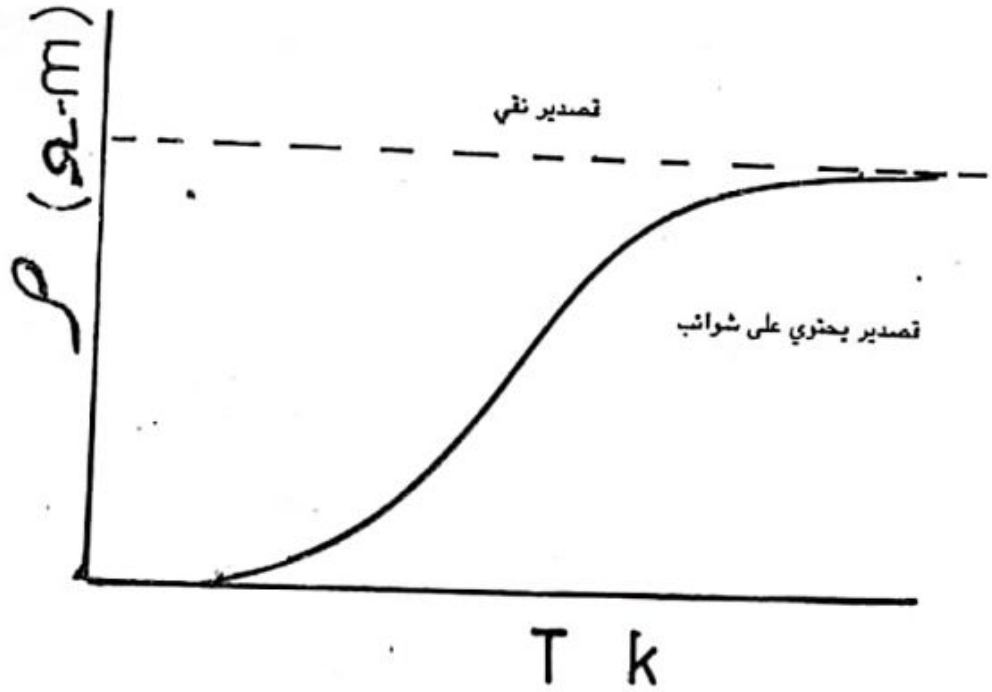
12.2 درجة الحرارة الحرجة

تعرف درجة الحرارة الحرجة (أو درجة الحرارة الانتقالية Transition temperature) بالدرجة الحرارية التي عندها يتم فيها التحول من الحالة الاعتيادية للمادة الى حالة التوصيل الفائق اي ان قيمة المقاومة النوعية للمادة تكاد ان تكون صفراً عندها. ولقد وجد ان درجة الحرارة الحرجة تعتمد على العوامل التالية :

- 1- نقاوة المادة
- 2- الضغط المسلط على المادة
- 3- سمك المادة
- 4- الشحنة الكهروستاتيكية على المادة

يوضح الشكل (12.1) العلاقة بين المقاومة النوعية ودرجات الحرارة لعنصر القصدير S_n . فإذا كان الفلز نقياً فترى ان مدى درجات الحرارة التي عندها تقل قيمة المقاومة النوعية الى الصفر تكون صغيراً جداً بينما اذا احتوى معدن القصدير على شوائب فتلاحظ ان مدى درجات الحرارة التي عندها تقل قيمة المقاومة تكون كبيرة نوعاً ما.

إن درجة الحرارة الحرجة للمادة تعتمد على الضغط المسلط عليها . فكلما وجد ان زيادة الضغط يحدث انخفاضاً في الدرجة الحرجة T_c . اما تأثير سمك المادة على الدرجة الحرجة ، فإنه كلما كانت المادة على هيئة غشاء رقيق نجد ان T_c تقل بشكل كبير عند مقارنتها بعينة من نفس المادة ذات سمك كبير ، Bulk. إن لهذين العاملين دور كبير على تحويل بعض اشباه الموصلات من الحالة الاعتيادية الى حالة فائقة التوصيل . اما بالنسبة وجود الشحنة



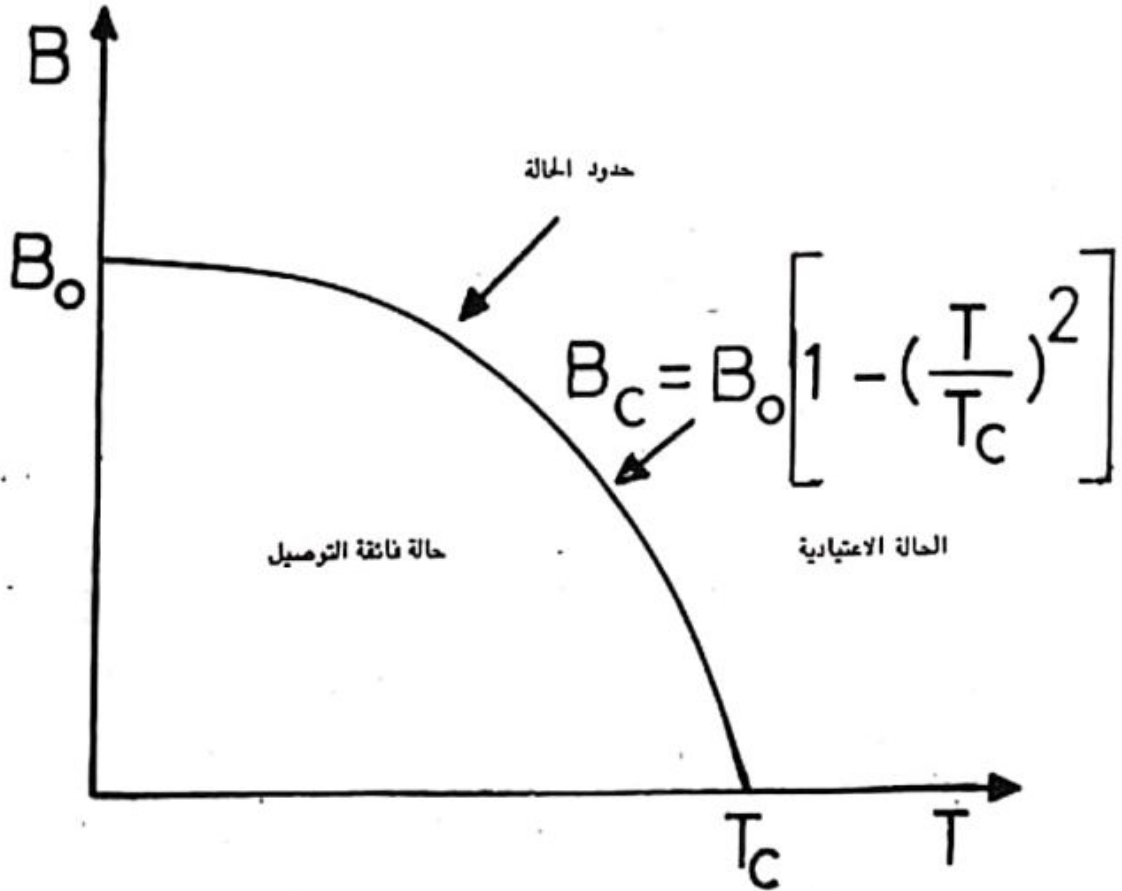
الشكل (12.1) تأثير الشوائب على درجة الحرارة الحرجة في عنصر التصدير

الكهروستاتيكية على سطح المادة فالدراسة لازالت مستمرة للتعرف بعمق على دورها على انخفاض وارتفاع درجة الحرارة الحرجة .
ويبين الجدول (12.1) قيماً لدرجة الحرارة الحرجة T_c لبعض العناصر والمركبات التي عندها تتحول المادة من الحالة الاعتيادية الى حالة فائقة التوصيل .
ويتضح من الجدول ان المركبات بصورة عامة لها درجة حرارة حرجة اعلى من درجة الحرارة الحرجة للعناصر .

الجدول (12.1) قيم درجة الحرارة الحرجة T_c لبعض العناصر والمركبات

المادة	T_c k درجة الحرارة الحرجة	المادة	T_c k درجة الحرارة الحرجة	المادة	T_c k درجة الحرارة الحرجة
W	0.01	V	5.3	Nb ₃ Ge	20.3
Hf	0.09	La(B)	6.06	L ₂ -Ba-Cu-O	40.
Ir	0.14	Pb	7.2	Tl-Ba-Ca-Cu	77
Ti	0.4	Tc	7.8	Sr-TiO ₃	78
Ru	0.5	Nb	9.6	Er-Ba-Cu-O	90
Cd	0.5	AgF ₂	0.07	Yb-Ba-Cu	95
Zr	0.65	CuAl ₂	1.00	Y-B-Cu-O	96
U(&)	0.68	ReYO ₃	2.0	Ti-Ba-Ca-Cu-O	100
Os	0.7	Ti ₂ Co	3.4	Bi-Sr-Ca-Cu-O	102
Zn	0.9	LuRh ₁₂ Sn ₄	4.1		
Mo	0.9	NiBi	4.3		
Ga	1.1	Pd ₂ Sn	4.55		
Al	1.2	La ₃ O ₄	8.3		
Th	1.37	GPa	10		
Pa	1.4	MoRe ₃	10		
Re	1.7	La ₃ In	10.4		
U(α)	1.8	Nb ₃ Au	11.5		
Tc	2.4	MoN	12		
In	3.4	Moc	13		
Sn	3.7	NbN	16		
Hg(β)	3.95	V ₃ Ga	16.5		
Hg(γ)	4.2	V ₃ Si	17.1		
Ta	4.5	Nb ₃ Sn	18.3		
La(α)	4.9	Nb ₃ Al _{0.8} Ge _{0.2}	20.1		

يعرف المجال المغناطيسي الحرج B_c بالمجال الذي يتم عنده تحول المادة من حالة فائقة التوصيل الى الحالة الاعتيادية عند درجة حرارة معينة. إن مقدار المجال المغناطيسي الحرج يعتمد على نوعية المادة وعلى درجة الحرارة. فلقد وجد تجريبياً إن قيم B_c عند درجات حرارة مختلفة تشكل منحنى على هيئة قطعاً مكافئاً Parabolic داخل مخطط المجال المغناطيسي الخارجي ودرجة الحرارة للمادة وكما هو مبين في الشكل (12.2) ان هذا المنحنى يخضع للعلاقة الرياضية التالية :

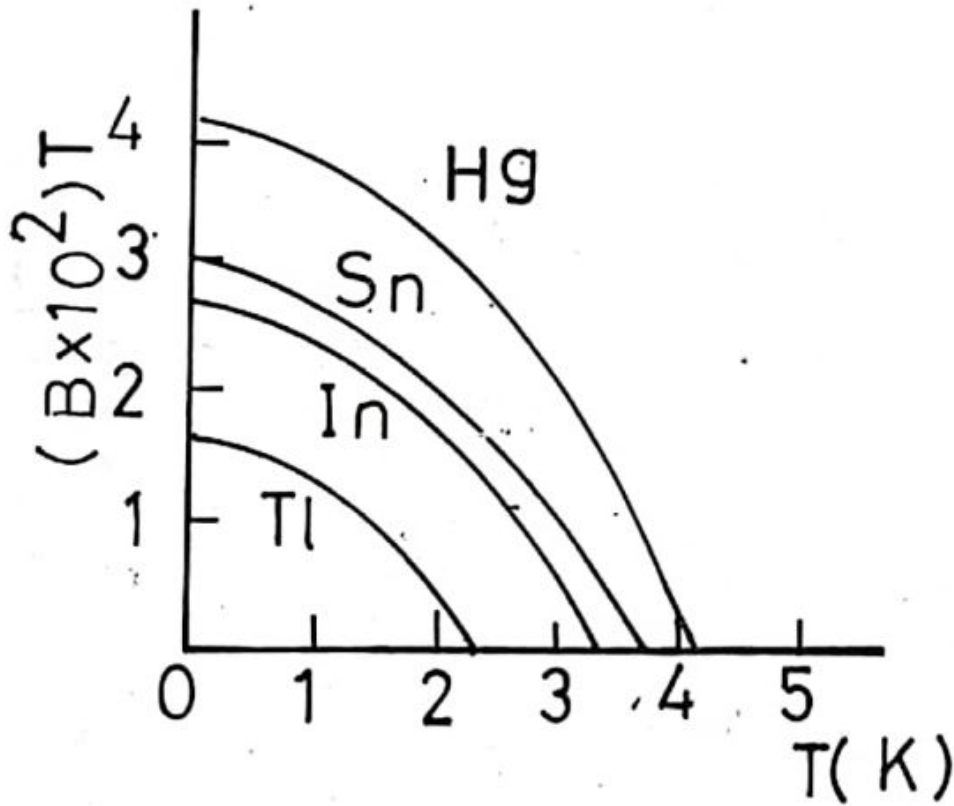


الشكل 12.2 مخطط المجال المغناطيسي الخارجي ودرجة الحرارة

$$B_c = B_0 \left[1 - \left(\frac{T}{T_c} \right)^2 \right] \quad \dots(12.1)$$

حيث أن B_0 أقصى قيمة للمجال المغناطيسي الحرج عند درجة حرارة الصفر المطلق .
 T درجة الحرارة .
 T_c درجة الحرارة الحرجة .

يلاحظ من الشكل (12.2) أن قيمة المجال المغناطيسي الحرج B_c يصبح صفراً عند درجة حرارة مساوية لدرجة الحرارة الحرجة T_c لتلك المادة وتزداد B_c تدريجياً كلما انخفضت درجة حرارة المادة فائقة التوصيل عن درجة الحرارة الحرجة. وعند درجة حرارة الصفر المطلق تصل قيمة المجال المغناطيسي الحرج أقصى قيمة له. ولقد أجريت العديد من التجارب على العديد من المواد فائقة التوصيل للحصول على أقصى قيم للمجال المغناطيسي الحرج (B_c) من خلال رسم العلاقة بين B_c و T_c . يبين الشكل 11.3 العلاقة بين T_c و B_c لبعض المواد فائقة التوصيل مثل الزئبق Hg والقصدير S_n والاندسيوم In والتاليوم Te. وكذلك يبين الجدول (12.2) أقصى قيم للمجال المغناطيسي الحرج (B_c) لبعض المواد فائقة التوصيل.



الشكل (12.3) مخطط المجال المغناطيسي الخارجي ودرجة الحرارة لبعض العناصر

الجدول (12.2) أقصى قيم للمجال المغناطيسي الحرج لبعض المواد فائقة التوصيل

المادة	$B_c \times 10^{-4} (\text{Tesla})$	المادة	$B_c \times 10^{-4} (\text{Tesla})$
W	1.0	Sn	305
Ir	19.0	Hg (β)	339
Cd	30.0	Hg (α)	441
Zr	47	La (α)	798
Ga	51	Pb	803
Zn	53	Ta	830
Os	65	V	1020
Ru	66	La (β)	1096
Mo	98	Tc	1410
Al	99	Nb	1980
Ti	100		
Th	162		
Te	171		
Re	198		
In	293		

Messiner effect

1.4 ظاهرة مسينر

لقد وجد العالمان الفيزيائيان الالمانيان مسينر Messiner وأوخينفيلد Ochsenfeld انه عند تسليط مجال مغناطيسي على مادة فائقة التوصيل فإن خطوط الفيض المغناطيسي magnetic flux تبعد كلياً عن المادة عند تبريدها الى درجة حرارة اقل من الدرجة الحرجة. أي ان الحث المغناطيسي للمادة فائقة التوصيل تساوي صفراً. يطلق على هذه الظاهرة بظاهرة اقضاء الفيض المغناطيسي Flux exclusion أو ظاهرة مسينر.