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

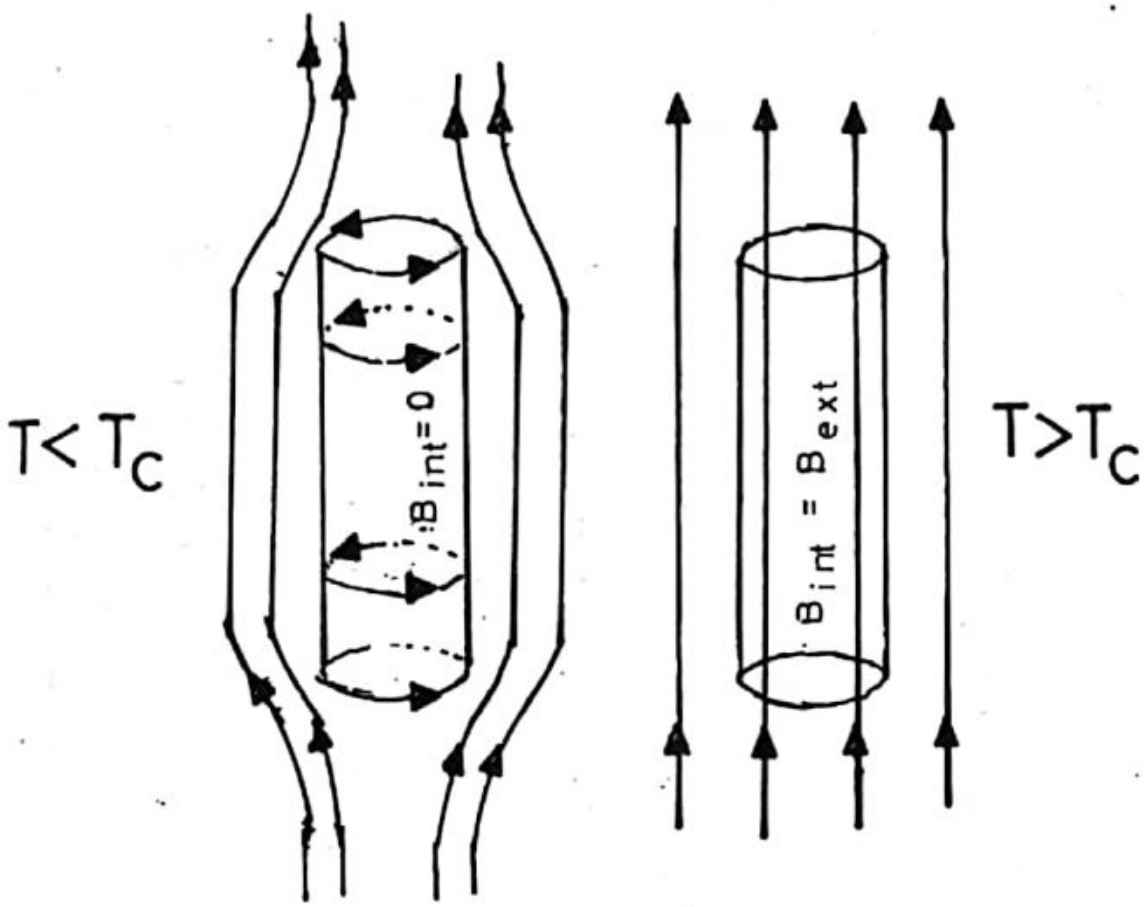
المادة	$B_c \times 10^{-4}$(Tesla)	المادة	$B_c \times 10^{-4}$(Tesla)
W	1.0	Sn	305
Ir	19.0	Hg (β)	339
Cd	30.0	Hg (α)	441
Zr	47	La (α)	798
Ga	51	Pb	803
Zn	53	Ta	830
Os	65	V	1020
Ru	66	La (β)	1096
Mo	98	Tc	1410
Al	99	Nb	1980
Ti	100		
Th	162		
Te	171		
Re	198		
In	293		

1.4 ظاهرة مسينر Messiner effect

لقد وجد العالمان الفيزيائيان الالمانيان مسينر Messiner و أوخينفلد Ochsenfeld انه عند تسليط مجال مغناطيسي على مادة فائقة التوصيل فأن خطوط الفيض المغناطيسي magnetic flux تبتعد 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 اقصاء الفيض المغناطيسي Flux exclusion أو ظاهرة مسينر.

الممسوحة ضوئيا بـ CamScanner

لقد اجريت دراسات وتجارب كثيرة من أجل فهم وادراك هذه الظاهرة ، وتبين انه بالامكان تفسيرها على اساس أن عملية التحول (بوجود المجال المغناطيسي) من الحالة الاعتيادية الى حالة التوصيل الفائق تكون مصحوبة بتوليد تيارات سطحية مستمرة كافية لمحو تأثير المجال المغناطيسي داخل المادة وكما هو موضح في الشكل (12.4) .



الشكل (12.4) ظاهر ميسنر. اقصاء خطوط القبض المغناطيسي عن مادة فائقة التوصيل عند $T < T_c$

فمن أجل توضيح ذلك رياضياً ، دعنا نفرض أن المجال المغناطيسي داخل المادة B_{nit} في الحالة الاعتيادية بدلالة المجال المغناطيسي المسلط على المادة (Bext) والذي يكتب على الشكل التالي :

$$B_{int} = \mu_o B + \mu_o M \quad ...(12.2)$$

أو

$$B_{int} = B_{ext} + \mu_o M \quad ...(12.3)$$

الممسوحة ضوئيا بـ CamScanner

حيث أن μ_o تمثل النفاذية .

M تمثل العزم المغناطيسي لوحدة الحجم .

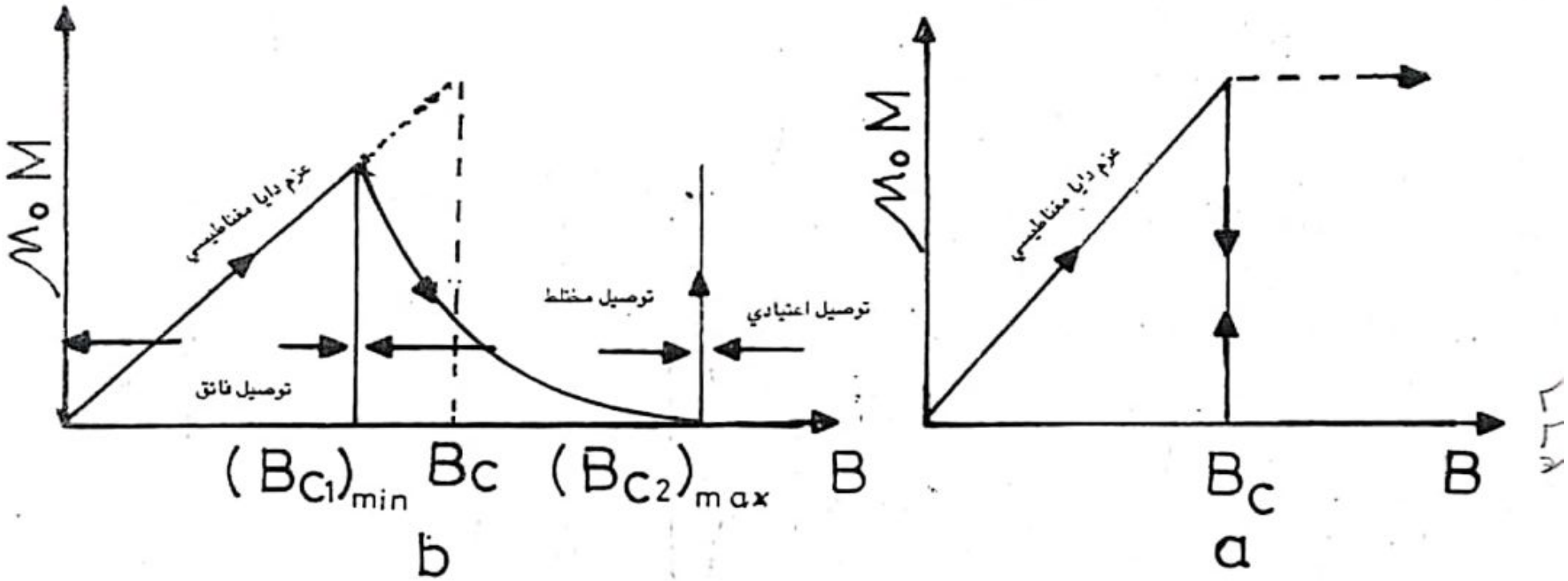
وبما أن B_{int} لمادة فائقة التوصيل تساوي صفراً . فعليه يكون

$$M = -\frac{B_{ext}}{\mu_o} \quad \ldots(12.4)$$

توضح المعادلة (12.4) ان التمغنط يكون مساوياً ومعاكساً الى شدة المجال المغناطيسي الخارجي . وعليه فأن المادة فائقة التوصيل لها تأثير كما لو كان لديها عزم مغناطيسي معاكس للمجال المغناطيسي السلط . ولهذا يمكن اعتبار ان المادة ذات دايامغناطيسية مثالية .

هنالك نوعان من المواد ذات التوصيلة الفائقة يعتمدان على الطريقة التي تحدث بها التحول من حالة التوصيلية الفائقة الى الحالة الاعتيادية عندما تكون قيمة المجال المسلط اكبر من قيمة المجال المغناطيسي الحرج . إن النوع الاول يدعى بنوع I (type I) ، فعندما تتجاوز قيمة المجال المغناطيسي المسلط المجال المغناطيسي الحرج فأن المادة تتحول كليا الى الحالة الاعتيادية وبذلك يتمكن المجال الخارجي من اختراق المادة وتصبح قيمة العزم المغناطيسي صفراً، أي أن $B_{int} = B_{ext}$ وكما هو موضح في الشكل(11.5a) . إن معظم الفلزات فائقة التوصيل هي من نوع I . أما النوع الثاني فيدعى بنوع II (type II) . يتميز هذا النوع بوجود قيمتين للمجال المغناطيسي الحرج الاولى أقل قيمة ويرمز لها بـ B_{c1} والقيمة الثانية بأقصى قيمة ويرمز لها بـ B_{c2} . فعندما تتجاوز قيمة المجال المغناطيسي المسلط أعلى قيمة للمجال الحرج B_{c2} $(B_{c2} > B_{c1})$. فأن المادة تتحول كلياً الى الحالة الاعتيادية ، وبذلك يتمكن المجال الخارجي من اختراق المادة . أما اذا كانت قيمة المجال المسلط أعلى من B_{c1} وأقل من B_{c2} فهناك اختراق جزئي للمادة وبذلك تكون المادة في حالة جديدة تسمى بالحالة المختلطة mixed state وكما هو موضح في الشكل (12.5b) . إن معظم المركبات هي من نوع II وكذلك بعض الفلزات مثل النيوبيوم والتكنيتوم والناديوم . إن القيمة النموذجية للمجال المغناطيسي الحرج في مادة من نوع I حوالي $(10^{-2}T)$ بينما قيمة المجال الحرج في مادة من نوع II حوالي (10T) وهذا يجعل استعمال مادة من نوع II منفصلاً في صناعة المغانيط ذات المجال العالي .

الممسوحة ضوئيا بـ CamScanner



الشكل (12.5) a– منحني التمغنط لموصل نوع I

b– التمغنط الموصل نوع II

الممسوحة ضوئيا بـ CamScanner

12.5 نظرية التوصيل الفائق Superconductivity Theory

يعرف التوصيل الكهربائي الاعتيادي في المواد الصلبة على انه قابلية انتقال الكترونات التكافؤ او التوصيل من موقع الى آخر. وبما أن المواد الصلبة عبارة عن رص من القلوب الايونية الموجبة فعند حركة هذهِ الالكترونات داخل البلورة فسوف تعاني استطارات حين تصادمها العشوائي بالقلوب الايونية الموجبة وينتج عن ذلك اعاقة للحركة الانتقالية للالكترونات وهذهِ الاعاقة تدعى بالمقاومة الكهربائي . تعتمد المقاومة الكهربائية على عدة عوامل ومن أهمها درجة الحرارة التي تعمل على اهتزاز شبيكة البلورة حيث تستطار الكترونات التوصيل بالفونونات الناتجة عن اهتزاز شبيكة البلورة . فعليه يجب أن لاتختفي المقاومة الكهربائية أبداً مهما ادى ذلك من انخفاض في درجة الحرارة . ولكن في واقع الحال وجد ان قيمة المقاومة الكهربائية تكاد ان تكون صفراً عند درجات الحرارة الواطئة وهذا مايتطلب توضيحه هنا .

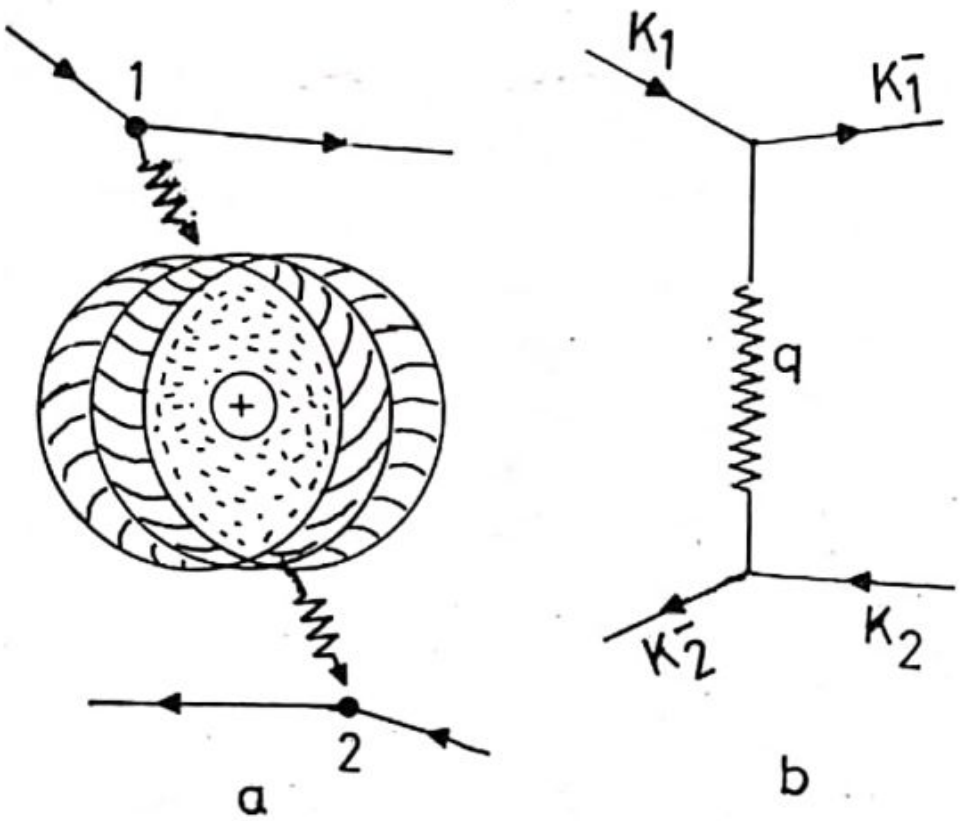
لقد اجريت دراسات عديدة للظاهرة المذكورة ووضعت نظريات مختلفة لتفسير هذهِ الظاهرة . إن آخر هذهِ النظريات التي اصبحت مقبولة ومقنعة هي النظرية التي وضعها كل من الفيزيائين باردن Bardeen وكوبر Cooper وشريفر Schrieffer عام (1957)والذي حصلوا بموجبها على جائزة نوبل في الفيزياء سنة 1972 . ولقد اطلق على هذه النظرية بنظرية (BCS) نسبة الى الحروف الاولى من أسماء هؤلاء العلماء .

لقد لاقت نظرية BCS نجاحاً متميزاً عن باقي النظريات في تفسير الكثير من الظواهر الفيزيائية التي تتميز بها المواد فائقة التوصيل مثل ظاهرة ميسنر . إن الخوض في مناقشات هذه النظرية يتطلب منا معلومات كافية في ميكانيك الكم المتقدم وفي الرياضيات المتقدمة العالية الذين يقعا خارج نطاق معلومات هذا الكتاب ولذلك سوف نكتفي في دراستنا بذكر الشرح المبسط لنظرية BCS .

لقد فسرت نظرية BCS انعدام المقاومة الكهربائية في المواد فائقة التوصيل ناتج عن الحالة الخاصة لترتيب الكترونات التوصيل من التأثير المتبادل بين الالكترونات واهتزازات الشبيكة . لقد تم فرض أنه بدلاً من التنافر بين زوج من الالكترونات نتيجة القوى الكهروستاتيكية ، فأن الكترونات التوصيل تتجمع في طبقة رقيقة جداً بالقرب من سطح فيرمي وتكون قادرة على التجاذب . ولقد وضحت ذلك على أساس استجابة القلوب

الممسوحة ضوئيا بـ CamScanner

الايونية الموجبة في البلورة للالكترونات المارة بالقرب منها حيث تقوم في نفس اللحظة على حجب الكترونين الواحد عن الآخر وكما هو مبين في الشكل (12.6a) وينشأ قوة جذب لفترة قليلة جداً بين القلب الايوني الموجب والكترون الاول بالقرب منه (انظر الشكل (12.6a) والذي ربما يُحدث عنه تغيير بسيط في اهتزاز القلب الايوني الموجب. ويمكن ان يؤثر القلب الايوني الموجب ايضاً عن الالكترون الثاني المار بالقرب منه من الطرف الآخر (انظر الشكل (12.6b)) ونتيجة لحدوث التأثير المتبادل الفعال تترتب الالكترونات على شكل ازواج. ويعد كل زوج من الالكترونات منظومة منفردة اي ترتبط حركة أحد الالكترونين بحركة الالكترون الآخر. ويدعى الزوج المتكون من الالكترونات بزوج كوبر cooper pair. إن زوج كوبر ($k_1 \uparrow - k_1 \downarrow$) يستطيع (بواسطة فونون حقيقي مناسب) أن ينتقل الى أي زوج آخر غير مشغول ذي مواقع ($k_1 \uparrow - k_1 \downarrow$) وكما هو مبين في الشكل (12.6b).



الشكل (12.6) a – التأثير المتبادل بين الكترونين

b – تكون زوج من الالكترونات (زوج كوبر)

الممسوحة ضوئيا بـ CamScanner

فلقد فسرت نظرية BCS ظاهرة انعدام المقاومة الكهربائية عند درجات حرارة واطئة بأنها تنتج عن تكوين ازواج من الالكترونات (ازواج كوبر) والتي تسير بحرية داخل المادة الصلبة من دون تصادم أو استطارة مع القلوب الايونية الموجبة أو مع ذرات الشوائب التي لابد أن تحويها المادة الصلبة.. وان عملية تكوين ازواج الالكترونات يعمل على تقليل الكترونات التوصيل في المادة الى حد كبير.

إن تأثير درجة الحرارة على المواد فائقة التوصيل واضح جداً. فعند هبوط درجة الحرارة الى حد معين فأن الكترونات التوصيل تشكل فيما بينها ازواج من الالكترونات. أما اذا ازدادت درجة الحرارة عن الحد المعين فأن الطاقة الحرارية سوف تزداد تبعاً لذلك حتى تصبح كافية لفصل الازواج وتوليد الكترونات منفردة وبهذا تتحول المادة من حالة فائقة التوصيل الى الحالة الاعتيادية.

12.6 عمق الاختراق Pentration depth

لقد ناقشنا في البند (12.4) ظاهرة إقصاء الفيض أو ظاهرة مسيز على أسس مثالية في توضيح المادة فائقة التوصيل. فلقد استطاعت هذه الظاهرة من ايضاح البعض من الظواهر التي يمكن ملاحظتها للتوصيل الفائق ولكنها فشلت في تفسير بعض التفاصيل الدقيقة لبعض آخر من الظواهر يمكن ملاحظتها في داخل المادة. فمثلاً استثناء المجال المغناطيسي B من باطن المادة فائقة التوصيل لا يصح دائماً لجميع الظواهر ولجميع مواصفات البلورة وكذلك نجد أن المجال المغناطيسي يستطيع إختراق منطقة صغيرة بالقرب من سطح المادة فائقة التوصيل الى عمق محدد (λ) يدعى بعمق الاختراق والذي يتراوح قيمته بحدود m (10^{-7}-10^{-8}) :

لقد استطاع الاخوين لندن H and F. London في عام (1935) لتفسير ظاهرة وكذلك ايجاد علاقة رياضية تعطي عمق الاختراق. لقد اعتمدا في تحليلهم النظري على نموذج ذو المائعين Two-fluid model الذي وضع من قبل جورتر Gorter وكاسيمير Casimir في عام (1934). لقد فرض لندن عند ($T<T_c$) أن جزءً مقدارة (n_s/n) من العدد الكلي (n) لالكترونات التوصيل يمكن أن تساهم في التيار الفائق super current داخل المادة. إن المقدار n_s يدعى بكثافة الكترونات التوصيل الفائق. إن قيمة مقدار (n_s) يقترب من قيمة الكثافة الالكترونية الكلية (n) وعندما تنخفض درجة الحرارة لتصبح أقل من درجة الحرارة الحرجة (T_c) وتنخفض قيمة المقدار n_s الى الصفر عندما ترتفع درجة الحرارة لتساوي T_c.

الممسوحة ضوئيا بـ CamScanner

لقد فرض لندن عند تسليط مجال كهربائي شدته E لفترة لحظة واحدة على مادة فائقة التوصيل فعلية فأن الكترونات التوصيل الفائق سوف تتحرك وفقاً للمعادلة التالية :

$$m \frac{dV_s}{dt} = - e E \qquad ...(12.5)$$

حيث أن V_s سرعة الكترونات التوصيل الفائقة

m كتلة الالكترون

نلاحظ في المعادلة (12.5) أن القوة الوحيدة التي تؤثر على هذا النوع من الالكترونات هي القوة الناتجة عن المجال الكهربائي . أما قوة الاستطارة أو التصادم فليست موجودة في المعادلة وذلك لأن الكترونات التوصيل الفائق لا تستطير أو تتصادم . إن كثافة التيار الناتجة عن الكترونات التوصيل الفائق يكتب على النحو التالي :

$$J_s = - e V_s n_s \qquad ...(12.6)$$

$$\frac{dJ}{dt} = - e \left(\frac{dV_s}{dt} \right) n_s \qquad ...(12.7)$$

فبتعويض المعادلة (12.5) في (12.7) نحصل على :

$$\frac{dJ_s}{dt} = \frac{n_s e}{m} E$$

أو

$$j_s = \frac{n_s e}{m} E \qquad ...(12.8)$$

فلأجل حساب مقدار اختراق المجال للمادة الموصلة . دعنا نفرض أن الحالة مستقرة (ثابتة) أي $0 = j$ وهذا يعني أن المجال الكهربائي في المعادلة (12.8) يساوي صفراً . ففي هذه الحالة لا يستطيع التيار الاعتيادي أن يمر عبر الموصل الفائق وأن التيار المار هو فقط ناتج من ميل من الكترونات التوصيل الفائق . فعند تعويض قيمتي $j_s = 0$ و $E = 0$ في أحد معادلات ماكسويل المعروفة :

الممسوحة ضوئيا بـ CamScanner

$$\dot{B} = -\nabla \times E \quad \ldots(12.9)$$

نحصل على :

$$\dot{B} = 0 \quad \ldots(12.10)$$

إن المعادلة (12.10) تؤكد بأن المجال المغناطيسي للحالة المستقرة يكون ثابتاً وهذا يناقض ظاهرة ميسنر. إن المعادلة (12.10) تبين على B ان تكون ثابتة بغض النظر عن درجة الحرارة بينما تبين ظاهرة ميسنر انه عند ارتفاع درجة الحرارة فأن المجال المغناطيسي يخترق بظن المادة عند $T = T_c$. وعليه لابد لنا من ادخال بعض التعديلات على المعادلات المذكورة اعلاه لنحصل على النتيجة المطلوبة. فعند تعويض المعادلة (12.8) في المعادلة (12.9) نحصل على :

$$\dot{B} = -\frac{m}{n_s e^2}\nabla \times \dot{J}_s \quad \ldots(12.11)$$

ويطلق على هذه المعادلة بمعادلة لندن.

وكما يمكن ايضاً كتابة احد معادلات ماكسويل بدلالة J_s فقط وعلى النحو التالي :

$$\nabla \times B = \mu_o J_s \quad \ldots(12.12)$$

حيث أن μ_o تمثل النفاذية المغناطيسية.

وعند أخذ curl طرفي المعادلة (12.12) نحصل على

$$\nabla \times \nabla \times B = -\nabla^2 B = \mu_o \nabla \times J_s \quad \ldots(12.13)$$

وبتعويض المعادلة (12.11) في المعادلة (12.13) نحصل على :

$$\nabla^2 B = \frac{\mu_o n_s e^2}{m} B \quad \ldots(12.14)$$

وبنفس الطريقة نحصل على :

$$\nabla^2 J_s = \frac{\mu_o n_s e^2}{m} J_s \quad \ldots(12.15)$$

ولحل المعادلتين (12.14) و(12.15) نفرض شكلاً هندسياً بسيطاً غير محدود يمتد على الجانب الموجب للمحور السيني. فعند تسليط المجال المغناطيسي الخارجي Besct يوازي سطح هذا الشكل الهندسي وباتجاه المحور Z ، فأن حل المعادلة (12.14) عندما تكون $x>0$ هو:

$$B = B_{ext} \exp\left(-\frac{x^2}{\lambda}\right) \quad \ldots(12.16)$$

حيث أن

$$\lambda = \left(\frac{m}{\mu_o n_s e^2}\right)^{\frac{1}{2}} \quad \ldots(12.17)$$

٣٧١

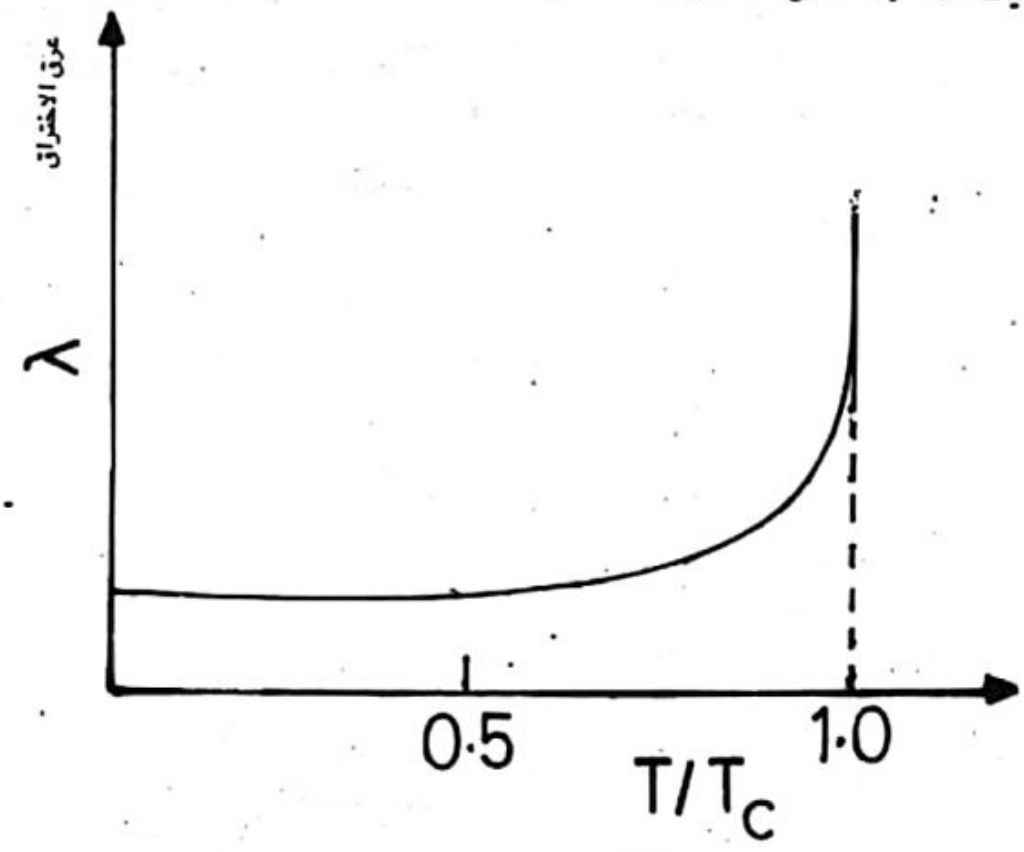
الممسوحة ضوئيا بـ CamScanner

والتي تمثل المسافة التي عندها ينخفض B_z لوغارتمياً $\left(\frac{1}{e}\right)$ من قيمة المجال المغناطيسي الخارجي Bext ، ويطلق على هذه المسافة λ بعمق الاختراق.

إن أول من قام بقياس عمق الاختراق في المواد فائقة التوصيل تجريبياً هو العالم شوينبرك D. Schoenberg حيث اجرى أول تجاربه على قطرات صغيرة من الزئبق. وجد أن المجال المغناطيسي المسلط يخترق قطرة الزئبق بعمق صغير جداً بحدود $(10^2\text{-}10^3)$ انكستروم. لقد وجد ايضاً أن عمق الاختراق λ يتغير مع درجات الحرارة حيث تزداد قيمة λ بارتفاع درجة الحرارة لتصبح مالا نهاية عندما $T = T_c$ وذلك لأن المادة التي هي في حالة التوصيل الفائق تتحول الى حالتها الاعتيادية ، وعليه فأن المجال المغناطيسي الخارجي يخترق المادة كلياً وكما هو موضح في الشكل (12.7). ولقد وجد عملياً بأن عمق الاختراق λ يتغير مع درجة الحرارة وفقاً للعلاقة التالية :

$$\lambda = \frac{\lambda_o}{\sqrt{1 - \left(\frac{T}{T_c}\right)^4}} \qquad \ldots(12.18)$$

حيث ان λ_o عمق الاختراق عند درجة الصفر المطلق.



الشكل(12.7)تغير λ مع درجات الحرارة.

الممسوحة ضوئيا بـ CamScanner

اسئلة الفصل الثاني عشر

12.1 اذا علمت أن عمق الاختراق λ للزئبق يساوي 75nm عند درجة حرارة 3.5 k جد

(أ) عمق لاختراق عندما تقترب درجة الحرارة من الصفر المطلق.

(ب) كثافة الكترونات التوصيل (n_s) عندما تقترب درجة الحرارة من الصفر المطلق.

12.2 اذا علمت أن عمق الاختراق لعنصر النيوبيوم عند درجة حرارة 5 k تساوي 4890 $\mathring{A}$ احسب :

(أ) عمق الاختراق عندما تقترب درجة الحرارة من الصفر المطلق.

(ب) كثافة الكترونات فائقة التوصيل (n_s) عندما تقترب درجة الحرارة من الصفر المطلق.

(حـ) نسبة تركيز الكترونات فائقة التوصيل الى تركيز الكترونات التوصيل $\left(\frac{n_s}{n}\right)$.

12.3 ارسم العلاقة بين B_c و T_c لبعض المواد فائقة التوصيل. ثم اشرح ذلك بالتفصيل؟

12.4 وضح لماذا تتلاشى خاصية التوصيل الفائقة عند تسليط مجال مغناطيسي خارجي.

12.5 اشرح ظاهرة مسينر.

الممسوحة ضوئيا بـ CamScanner