



تحليل تأثيرات الحقول المغناطيسية على المواد فائقة التوصيل

عتيقة إبراهيم عمار ارحومه *
كلية التربية، جامعة بني وليد، بني وليد، ليبيا

Analysis of the Effects of Magnetic Fields on Superconducting Materials

Ateeqah Abraheem Ammar Arhoumah *

Faculty of Education, Bani Waleed University, Bani Walid, Libya

*Corresponding author: allhalgwt@gmail.com

تاريخ النشر: 2025-04-13	تاريخ القبول: 2025-04-02	تاريخ الاستلام: 2025-02-05
-------------------------	--------------------------	----------------------------

المخلص

تُعدّ المواد فائقة التوصيل من المواد الفريدة التي تتميز بقدرتها على نقل الكهرباء دون مقاومة عند تبريدها إلى درجات حرارة منخفضة. ومع ذلك، لا تزال تأثيرات الحقول المغناطيسية على هذه المواد محور اهتمام كبير في دراسات فيزياء المواد. فعند تطبيق مجال مغناطيسي على مادة فائقة التوصيل، تظهر ظاهرة تُعرف بـ "تأثير مايسنر"، حيث يتم طرد المجال المغناطيسي من داخل المادة، مما يحافظ على حالتها الفائقة التوصيل. لكن في المقابل، يمكن للمجالات المغناطيسية العالية أن تؤدي إلى دخول المادة في "حالة الدوامة"، وهي حالة فوضوية تؤثر فيها الحقول المغناطيسية على البنية الدقيقة للمادة، مما يهدد استقرار خاصية التوصيل الفائقة. وعندما يتجاوز المجال المغناطيسي حدًا معينًا يُعرف بـ "الحد الحرج"، تفقد المادة قدرتها على التوصيل الفائقة وتعود إلى حالتها الطبيعية. تؤثر هذه الحقول أيضًا على درجة حرارة الانتقال (T_c)، وهي النقطة التي تبدأ فيها المادة بإظهار خصائص التوصيل الفائقة. إن فهم هذه التأثيرات ضروري لتطوير التطبيقات العملية للمواد فائقة التوصيل، سواء في الحوسبة الكمومية أو في الأجهزة الطبية مثل التصوير بالرنين المغناطيسي. وتسهم دراسة هذه الظواهر في تحسين كفاءة استخدام هذه المواد وفتح آفاق جديدة لتطوير تقنيات متقدمة في مجالات علمية وصناعية متعددة.

الكلمات المفتاحية: المواد فائقة التوصيل، الحقول المغناطيسية، تأثير مايسنر، درجة الحرارة الحرجة، حالة الدوامة.

Abstract

Superconducting materials are unique in their ability to conduct electricity without resistance when cooled to very low temperatures. However, the effects of magnetic fields on these materials remain a central focus in materials physics research. When a magnetic field is applied to a superconductor, a phenomenon known as the Meissner effect occurs, in which the magnetic field is expelled from the interior of the material, preserving its superconducting state.

Conversely, strong magnetic fields can induce a disordered state known as the vortex state, where magnetic fields penetrate the material and disrupt its internal structure. If the magnetic field exceeds a specific threshold called the critical field, the material loses its superconducting properties and reverts to a normal conducting state.

Magnetic fields also influence the critical transition temperature (T_c), the point at which a material begins to exhibit superconductivity. Understanding these effects is crucial for advancing the practical applications of superconductors, including quantum computing and medical imaging technologies such as MRI. Studying these phenomena contributes to enhancing the efficiency of superconducting materials and opens new opportunities for developing advanced technologies across various scientific and industrial domains.

Keywords: Superconducting materials, Magnetic fields, Meissner effect, Critical temperature, Vortex state.

المقدمة

تُعدّ المواد فائقة التوصيل من أهم الاكتشافات في علم فيزياء الحالة الصلبة، لما لها من خصائص فريدة في نقل التيار الكهربائي دون أي مقاومة عند تبريدها إلى درجات حرارة منخفضة، وهو ما يفتح آفاقاً واسعة لتطبيقات تقنية وعلمية متقدمة. وقد حظيت هذه المواد باهتمام متزايد في مجالات متعددة، منها أنظمة الطاقة، والتقنيات الطبية، والحوسبة الكمومية، بفضل قدرتها على تقليل الفاقد الكهربائي وتحقيق كفاءة عالية.

ورغم المزايا الكبيرة التي توفرها المواد فائقة التوصيل، فإن تأثيرها بالحقول المغناطيسية يمثل أحد التحديات الرئيسية التي تعيق استخدامها على نطاق واسع. إذ أن تفاعل الحقول المغناطيسية مع هذه المواد قد يؤدي إلى تغييرات جذرية في بنيتها وخواصها الكهربائية، مما يهدد بفقدانها لحالتها الفائقة التوصيل.

ومن أبرز هذه الظواهر الفيزيائية "تأثير مايسنر"، الذي يُشير إلى الطرد الكامل للحقول المغناطيسية من داخل المادة عند دخولها في الحالة الفائقة، بالإضافة إلى "حالة الدوامة"، التي تنشأ نتيجة تغلغل أجزاء من المجال المغناطيسي داخل المادة على شكل دوامات تؤثر على انتظام التوصيل.

تُعد درجة الحرارة الحرجة (T_c) والمجال المغناطيسي الحرج من المعايير الفيزيائية الأساسية التي تتحكم في سلوك المواد فائقة التوصيل، حيث يؤدي تجاوز هذه القيم إلى تدهور خواص المادة ودخولها في الحالة الطبيعية. ومن هنا، يبرز سؤال علمي مهم: كيف تتأثر المواد فائقة التوصيل بزيادة شدة المجال المغناطيسي؟ وما مدى تأثير ذلك على درجة حرارة الانتقال وسلوكها البنوي والكهربائي؟

تهدف هذه الدراسة إلى تسليط الضوء على العلاقة المعقدة بين الحقول المغناطيسية والمواد فائقة التوصيل، من خلال تحليل الظواهر الفيزيائية المصاحبة لهذا التفاعل، وفهم الآثار المترتبة على سلوك المادة، مع استعراض التطبيقات العملية لهذه الظواهر في ميادين متنوعة. كما تسعى الدراسة إلى تقديم حلول وتقنيات تُمكن من الاستفادة المثلى من هذه المواد، والحد من الآثار السلبية للحقول المغناطيسية، بما يُساهم في توسيع نطاق استخدامها وتطوير تقنيات حديثة تعتمد على هذه الخصائص الفريدة.

الإطار النظري

تُصنف المواد إلى موصلات (مثل النحاس)، وأشباه موصلات (مثل السيليكون)، وعوازل (مثل الخشب) بناءً على موصليتها الكهربائية ومع ذلك، هناك أيضاً فئة ثالثة من المواد تسمى الموصلات الفائقة والسبب وراء تسمية الموصلات الفائقة بهذا الاسم هو أنها عند درجة حرارة منخفضة نسبياً، تكون مقاومتها للكهرباء معدومة وموصليتها عالية جداً، مما يعني أنه في حالة اكتشاف تيار كهربائي في حلقة متصلة من هذه المادة، فسوف يتدفق داخل الحلقة دون الحاجة إلى مصدر جهد كهربائي حيث تعتبر الموصلية الفائقة ظاهرة مثيرة للاهتمام من أي زاوية، سواء تم استخدامها أو دراستها حيث إن خاصيتها الرئيسية سلوكها الكهربائي، الذي يعني عدم وجود مقاومة للتيار، وسلوكها المغناطيسي، الذي يعني رفض المجالات المغناطيسية أعطتها مواد ذات عدد لا نهائي من الاستخدامات ومن المعروف أن مقاومة جميع المواد الشائعة للتيار الكهربائي تتسبب في ضياع وإهدار قدر كبير من الطاقة الكهربائية، فضلاً عن عطل وارتفاع درجة حرارة العديد من المعدات الكهربائية ومن ناحية أخرى، فإن المجال المغناطيسي معتاد على المرور عبر جميع المواد الشائعة، أما المواد الفائقة فمقاومتها للتيار الكهربائي تصل إلى الصفر، وهو صفر غير مبالغ فيه من الناحية العملية، مع أن البعض ذكر أنه ربما توجد مقاومة في حدود شكل (1) ولكن طالما أن الموصل الفائق في حالته الفائقة، فإن القوى المغناطيسية لا تستطيع اختراق جسمه، مما يبشر بتطبيقات كثيرة تعتمد على تلك الخاصية على وجه التحديد فهناك تطبيقات عسكرية، وتطبيقات مدنية، وتطبيقات صحية، وتطبيقات نقل وهكذا¹.

نجح العالم الهولندي الشهير هيك كامرلين أونز في ضغط غاز الهيليوم الذي يتحول من الحالة الغازية إلى الحالة السائلة عند درجة حرارة 4.2 كلفن (268) درجة مئوية وتسييله في عام 1908م وبعد ثلاث سنوات، عندما كان يبحث في مقاومة العناصر الأخرى، اكتشف أن الزئبق النقي لا يُظهر أي مقاومة عندما تقترب درجة حرارته من الصفر المطلق وقد نال هذا العالم بفضل هذين الاكتشافين جائزة نوبل في الفيزياء حيث يرمز إلى درجة الحرارة الانتقالية (المعروفة أيضاً بدرجة الحرارة الحرجة)، أو ببساطة درجة حرارة الانتقال، بالرمز T_c وقد تم إنشاء هذه الكلمة بعد ذلك للإشارة إلى درجة الحرارة التي تفقد فيها المادة مقاومتها وتتحول من مادة عادية إلى موصل فائق وقد أُطلق عليها اسم المواد الفائقة التوصيل وبعد هذا الاكتشاف، واصل الباحثون البحث عن مواد ذات درجات حرارة انتقالية أعلى، لكنهم لم يتمكنوا من اختراق حاجز العشر درجات كلفن لفترة طويلة حتى اكتشاف مركب النيوبيوم NbN في أوائل الأربعينيات، عندما كانت درجة حرارة الانتقال حوالي 15 درجة كلفن وحتى عام 1973، عندما تمت إضافة مركب جديد بدرجة حرارة انتقال تبلغ 23 درجة كلفن واستمرت كذلك ولمدة ثلاثين سنة وبالتحديد حتى عام 1973 حيث أضيف مركب جديد ذو درجة تحول تصل إلى 23 كلفن والمركب هو Nb_3Ge ².

الخصائص الفيزيائية للمواد فائقة التوصيل

مقاومة هذه المواد للتيار الكهربائي تساوي صفرًا عند درجة حرارة تعرف بدرجة حرارة الانتقال وعند درجة حرارة الانتقال، وجد أيضاً أن هذه المواد شديدة الحساسية للمجال المغناطيسي لأنها ترفض المجال المغناطيسي الخارجي، مما يعني أنها تعكس المجال المغناطيسي بغض النظر عن مدى ضعفه وبما أن هذه المواد (الموصلات الفائقة) سوف تحل في نهاية المطاف محل

¹ المؤلف مصطفى نمر دعبس (2005م) الخصائص الكهربائية والمغناطيسية في الفيزياء، الناشر دار غيداء للنشر رقم تسلسلي عالمي 111-044 ص 120.

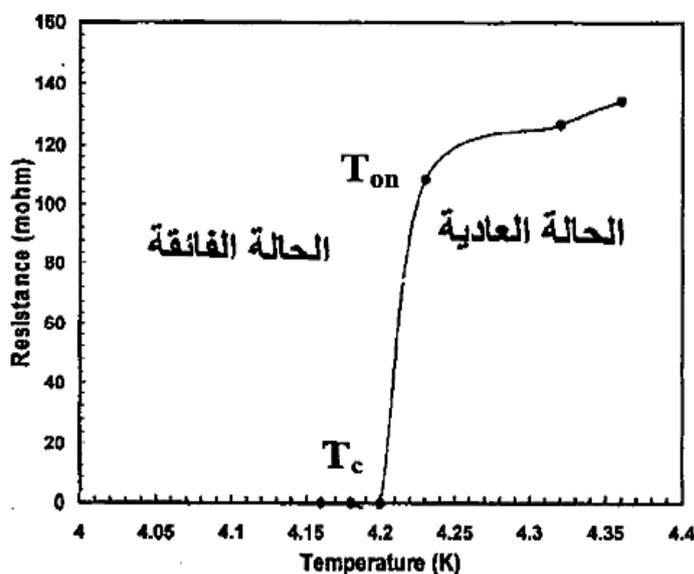
² A.Barone and Paterno, (1982) Physics and Applications of the Josephson Effect, wiley p60.

أشباه الموصلات، التي تستخدم حالياً في إنتاج الترانزستورات والدوائر الإلكترونية المتكاملة، فقد جعلت هاتان الخاصيتان من الممكن للعلماء استخدامها في ابتكارات واختراعات فعالة للغاية تشمل معظم المجالات العلمية والتكنولوجية.

ظاهرة الموصلية الفائقة

من المعروف أن البلورات الحقيقية تنحرف عن الشبكة البلورية المثالية للمواد، مما يساعد في تشتت الإلكترونات أثناء التوصيل الكهربائي ويسبب فقدان جزء كبير من الطاقة الكهربائية على شكل حرارة وهذا الانحراف هو سبب المقاومة الكهربائية للمواد الصلبة ولأنه من المستحيل تحضير بلورات مثالية خالية تماماً من عيوب البلورة، فقد كان من المعتقد على نطاق واسع استحالة انعدام أن تكون المقاومة الكهربائية (التوصيل الكهربائي يساوي اللانهاية) لتلك البلورات مع انخفاض درجة الحرارة حتى عند الصفر المطلق وعندما يتم تجاهل الفوتونات وعيوب الشبكة البلورية، فإن تشتت الإلكترونات على بعضها البعض ينتج كمية ملحوظة من المقاومة الكهربائية تمكن الباحثون من قياس المقاومة الكهربائية للمواد في درجات حرارة منخفضة حتى هذه النقطة في بداية القرن التاسع عشر بعد أن تمكنوا من الحصول على الهيليوم السائل، الذي وصلت درجة حرارته إلى 4.2 درجة مطلقاً، أو 268.8 درجة تحت الصفر مئوية ومن المهم أن نلاحظ أنه حتى نهاية القرن الثامن عشر، كانت المقاومة الكهربائية للمواد تقاس في درجات حرارة منخفضة، وهي درجة حرارة النيتروجين السائل عند 77 درجة مطلقاً، أو 196 درجة تحت الصفر مئوية³.

عندما قام العالم الهولندي هيك كامرلين أونز بقياس المقاومة الكهربائية للزئبق النقي عند درجة حرارة الهيليوم السائل في عام 1911، اكتشف أن المقاومة انهارت إلى أقل من 0.00001 أوم، أو ما يقرب من الصفر، كما يوضح الشكل (1) ولأن الموصلية الكهربائية تقترب من اللانهاية عند هذه الدرجة من الحرارة، أطلق أونز على هذه الظاهرة اسم الموصلية الفائقة حيث تُعرف درجة الحرارة التي تنتقل عندها المادة من حالتها الطبيعية إلى حالتها الفائقة أيضاً بدرجة الحرارة الحرجة T_c وعرض الانتقال هو الفجوة بين درجة الحرارة الحرجة ودرجة الحرارة الأولية، في حين أن درجة حرارة الانتقال T_{on} هي درجة الحرارة التي تبدأ عندها المقاومة الكهربائية في الانخفاض فجأة وبما أن المادة تتصرف كموصل وترتفع المقاومة مع ارتفاع درجة الحرارة، فإن سلوك المقاومة الكهربائية في النطاق بين درجة حرارة الغرفة ودرجة حرارة الانتقال يشار إليه بالحالة الطبيعية أما الحالة الفائقة التوصيل فهي سلوك المادة عند درجة حرارة أقل من أو تساوي درجة الحرارة الحرجة، حيث تنعدم المقاومة الكهربائية للمادة تماماً في تلك المنطقة وبالطبع كان أونيس أول عالم أكتشف هذه الظاهرة وقد حصل علي جائزة نوبل عن استحقاق لهذا الإنجاز العظيم في عام 1913⁴.



الشكل 1. سلوك المقاومة الكهربائية مع درجة الحرارة للزئبق فائق التوصيل.

المجال المغناطيسي الحرج Critical magnetic field

يُعرف المجال المغناطيسي الحرج بأنه المجال الذي تنتقل عنده المادة من حالة فائقة التوصيل إلى حالة موصل عادية عند درجة حرارة معينة حيث تحدد درجة الحرارة ونوع المادة قيمة المجال المغناطيسي الحرج وكما هو موضح في الصورة،

³ - J. Bardeen, L.N. Cooper and J. R. Schrieffer, (1957) Phys. Rev. 106, 162:108,1175.

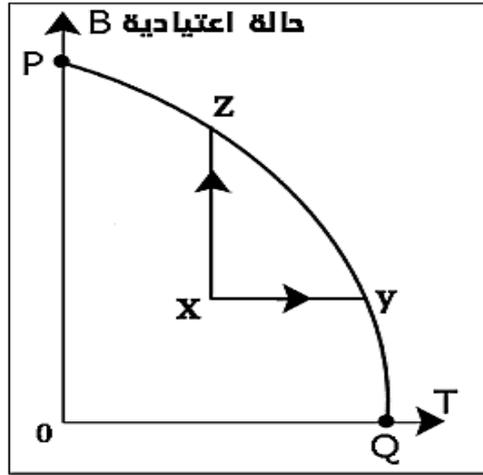
⁴ J.G. Bendnortz and K.A. Muller (1987), Z.Phys. B 64, 189.

وقد وجد تجريبياً أن قيم B عند درجات حرارة مختلفة تشكل منحنى على هيئة قطع مكافئ داخل مخطط المجال المغناطيسي الخارجي ودرجة الحرارة للمادة⁵.
حيث أن هذا المنحنى يخضع للعلاقة الرياضية التالية:

$$B_{c(T)} = B_{c0} \left[1 - \left(\frac{T}{T_c} \right)^2 \right]$$

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

يوضح الشكل (2) أن المجال المغناطيسي الحرج يصبح صفراً عند درجة حرارة مساوية لدرجة الحرارة تدريجياً كلما انخفضت درجة حرارة المادة فانقصة التوصيل عن درجة الحرارة لتلك المادة وتزداد B الحرارة الحرجة وتصل قيمة المجال المغناطيسي الحرج لأقصى قيمة عند درجة حرارة الصفر المطلق⁶.



الشكل 2. خط المجال المغناطيسي الخارجي ودرجة الحرارة.

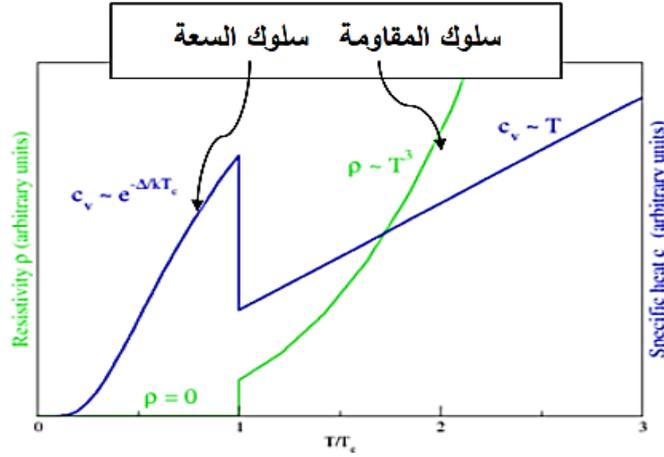
مرحلة الانتقال إلى التوصيل الفائق

عند درجات حرارة منخفضة أقل من درجة الحرارة الحرجة، تظهر خصائص الموصلية الفائقة في المواد الموصلة الفائقة وفي الموصلات الفائقة العادية، يمكن أن تتراوح درجة الحرارة الحرجة من أقل من 1 درجة مئوية إلى حوالي 20 درجة مئوية، اعتماداً على المادة فمثلاً الزئبق الصلب له درجة حرارة حرجة تبلغ 4.2 درجة مئوية وجد أن ثنائي بوريد المغنيسيوم لديه أعلى درجة حرارة حرجة لموصل فائق تقليدي في عام 2009، عند 39 درجة مئوية ويتساءل البعض عما إذا كانت هذه المواد مؤهلة لتكون موصلات فائقة قياسية على الرغم من ميزاتها الفريدة ويمكن أن تكون درجة الحرارة الحرجة للموصلات الفائقة القائمة على النحاس أعلى بكثير، حيث أن أول موصل فائق قائم على النحاس تم اكتشافه على الإطلاق، أكسيد الباريوم والنحاس والإتريوم (III)، حيث أن 92 درجة مئوية هي درجة الحرارة الحرجة وقد اكتُشِف أن درجات الحرارة الحرجة لمادة قائمة على النحاس تحتوي على الزئبق أعلى من 130 درجة مئوية ولا يزال من غير الواضح سبب ارتفاع درجات الحرارة الحرجة إلى هذا الحد حيث لا يمكن تفسير الموصلية الفائقة في الموصلات الفائقة الجديدة ذات درجات الحرارة الحرجة العالية للغاية من خلال أزواج تبادل الإلكترونات والفوتونات، ولكن يمكن تفسيرها في الموصلات الفائقة العادية وعلى نحو مماثل، عندما يتم توفير مجال مغناطيسي خارجي أكبر من المجال المغناطيسي الحرج، تتوقف الموصلية الفائقة في المواد الفائقة التوصيل عند درجة حرارة ثابتة أقل من درجة الحرارة الحرجة للموصلات الفائقة ويرجع هذا إلى حقيقة أن طاقة جيبس الحرة للطور العادي مستقلة تقريباً عن المجال المغناطيسي، لكن الطاقة الحرة للطور الفائق تنمو بشكل تربيعي مع المجال وتكون الطاقة الحرة للطور الفائق التوصيل أقل من الطاقة الحرة للطور العادي حيث إذا سلكت المواد سلوك الموصلية الفائقة في حالة عدم وجود مجال مغناطيسي، عندئذ فإن الطاقة الحرة للمرحلة الفائقة للتوصيل أقل من الطاقة الحرة للمرحلة العادية وكذلك لبعض قيم محدودة للمجال المغناطيسي (متناسبة مع الجذر التربيعي للاختلاف في الطاقات الحرة عند مستوى

⁵ H.Maeda, Y. Tanaka, M. Fukutomi and T. Asano, JPN.J(1988) Appl. Phys. 27, L209 .

⁶ M.K. Wu, J.R. Ashburn, C.J. Torny, F.H. Hor, R.L. Meng, L. Gao,Z. J. Huang, Y.Q. Wang and C.W. Chu, (1987) Phys.Rev. Lett. 58, 908 .

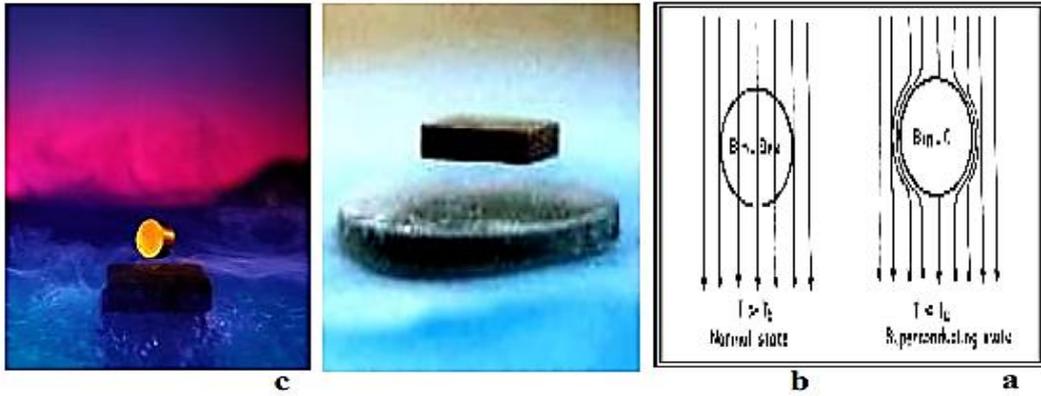
الصفحة للمجال المغناطيسي الطاقين الحريتين سيتساويان وتحدث المرحلة الإنتقالية للمرحلة الطبيعية ، ويؤدي ارتفاع درجة الحرارة منفصلتين بنقطة حرجة ثلاثية وكانت النتائج مدعومة بقوة من المحاكاة الحاسوبية لمونتي كارلو ⁷.



الشكل 3. سلوك السعة الحرارية والمقاومة النوعية في المرحلة الإنتقالية للتوصيل الفائق.

ظاهرة مازنر Massner effect

كما هو مبين في الشكل (2) اكتشف العالمان الألمانيان مايسنر وأوشينفيلد في عام 1933 أنه عندما يتم تبريد المواد الفائقة التوصيل إلى درجة الحرارة الحرجة وفي وجود مجال مغناطيسي، فإن المجال المغناطيسي المطبق عليها يطرد إلى الخارج ونظراً لحدوث هذه الظاهرة فقد صنف ميزنر وأوشنفييلد المواد الفائقة على أنها من عائلة المواد الديامغناطيسية وهذا السلوك مختلف تماماً عن سلوك الموصلات، التي تنتج تيارات حثية عند تعرضها للمجالات المغناطيسية ومع ذلك، فإن هذه التيارات تختفي بسرعة بسبب المقاومة الكهربائية للمادة، مما يسمح للمجال بالمرور ولكن لأن المواد الفائقة التوصيل لا تمتلك مقاومة كهربائية، وهو ما يساعد في خلق عزم مغناطيسي يعاكس ويمنع اختراق المجال المغناطيسي الخارجي، فإن هذه التيارات الحثية دائمة ولا تختفي وقد سُمي تأثير مايسنر بهذا الإسم نسبة إلى العالم مايسنر الذي اكتشف أن قابلية المادة الفائقة للتأثر المغناطيسي تساوي سالب واحد وهذا يشير إلى أن المادة الفائقة تخلق عزمًا مغناطيسيًا معاكسًا ومساويًا للمجال المغناطيسي الخارجي، أي أن المجال لا يستطيع المرور من خلاله، على عكس المواد الديامغناطيسية ⁸.



الشكل 4. ظاهرة مازنر: خطوط المجال المغناطيسي.

- a. مخترقا للمادة في حالة التوصيل الإعتيادي.
- b. عدم اختراق المادة في حالة التوصيل الفائق.
- c. المادة في حالة التوصيلية الفائقة داخل سائل النيتروجين وهي في حلبة الطوف.

⁷ Barone, A.; Paterno, G. (1982). Physics and Applications of the Josephson Effect. New York: John Wiley & Sons. ISBN 0-471-01469-9

⁸ Huang, Y.Q. Wang and C.W. Chu, (1987) Phys.Rev. Lett. 58, 908.

عندما يتم تطبيق مجال مغناطيسي خارجي على مادة في حالتها الطبيعية، يمكن لخطوط المجال المغناطيسي أن تمر من خلالها ومع ذلك، إذا تم خفض درجة حرارة المادة ذات الخصائص الفائقة التوصيل إلى درجة الحرارة الحرجة (T_c)، أو أصبحت المادة فائقة التوصيل، لن تستطيع اختراق المادة بل سوف تسير خطوط المجال المغناطيسي خارج المادة وأطلق على هذه الظاهرة بظاهرة إقصاء الفيض المغناطيسي Flux exclusion أو ظاهرة مازنر ولقد تم استخدام عملية التحول من الحالة الطبيعية إلى الحالة الفائقة التوصيل في وجود مجال مغناطيسي، إلى جانب إنشاء تيارات سطحية ثابتة كافية لإبطال تأثير المجال المغناطيسي داخل المادة، لشرح تأثير ماسنر وكما يمكن أن نرى من الشكل أعلاه⁹.

لا يخترق المجال المغناطيسي المادة ذات التوصيل الفائق S.C

يخترق المجال المغناطيسي المادة ذات التوصيل الإعتيادي N.C

المجال المغناطيسي داخل المادة ذات التوصيل الفائق تساوي صفراً $B_{in}=0$

فمن أجل توضيح ذلك رياضياً دعنا نفرض أن المجال المغناطيسي داخل المادة B_{in} في الحالة الإعتيادية بدلالة المجال المغناطيسي المسلط على المادة B_{ext} والذي يمكن أن يكتب بالشكل التالي:

$$B_{in} = B_{ext} + \mu_0 M \quad (1)$$

$$\begin{aligned} B_{in} &= \mu_0 H + \mu_0 XH \\ &= \mu_0 (H + XH) \end{aligned} \quad (2)$$

$$B_{in} = \mu_0 H (1 + X) \quad (3)$$

μ_0 = Permeability of free space

M = Magnetization Intensity

H = External Magnetic field

X = The susceptibility field for super conduit

$B_{in} = 0$, X = - 1 Then [M = - H]

عندما تكون المواد ذات توصيل فائق $B_{in} = 0$ واعتماداً على المعادلة $X_m = -1$ للمواد الديامغناطيسية فإن

$$B_{ext} = \mu_0 M \quad (4)$$

إن هذه العلاقة تبين أن شدة المغناطيسية تساوي وتعاكس المجال المغناطيسي الخارجي واعتماداً على هذه المعادلة يمكن تقسيم المواد إلى نوعين (Type I, Type II)

النوع الأول للمادة فائقة التوصيل Type I super conductor

يتحول هذا النوع من المواد تماماً إلى حالتها الطبيعية عندما تتجاوز قيمة المجال المغناطيسي المطبق المجال المغناطيسي الحرج ونتيجة لذلك، يمكن للمجال الخارجي أن يمر عبر المادة وتنخفض قيمة العزم المغناطيسي إلى الصفر، أو أن $B_{in} = B_{ext}$ كما هو موضح في الشكل (5)¹⁰.

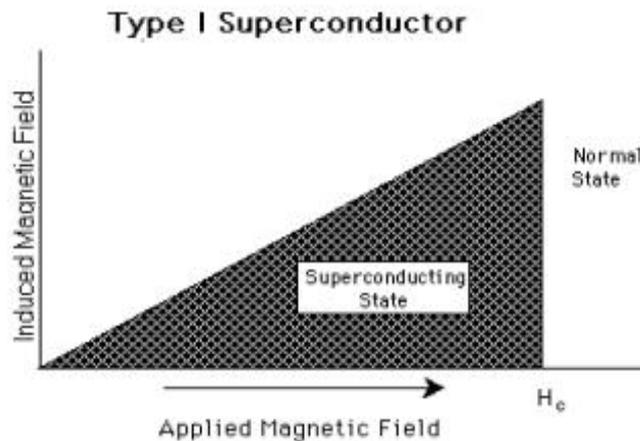


Fig. 10

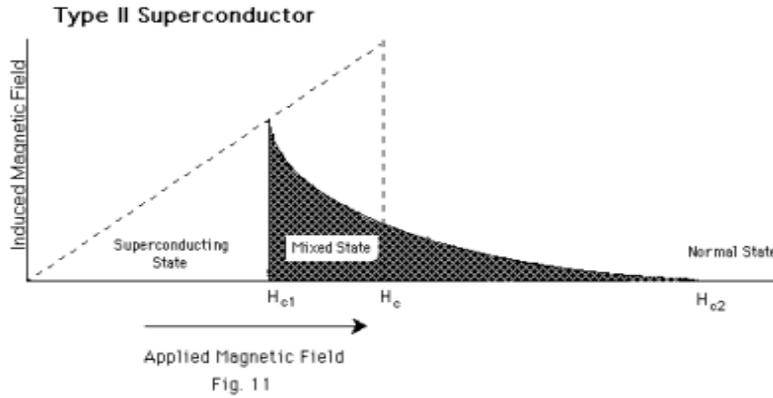
الشكل 5. يبين العلاقة بين شدة المجال المغناطيسي الخارجي وبين المغناطيسية المحتثة.

⁹ H.Maeda, Y. Tanaka, M. Fukutomi and T. Asano, JPN.J. (1988)Appl. Phys27 , L209.

¹⁰B.A. Hunter, J.D. Jorgensen, J.L. Wanger, R.L. Hitterman and R.B. Von Dreele, (1994) Physica C 221, 1 .

النوع الثاني من المواد الفائقة التوصيل Type II super conductor

التدفق المغناطيسي يبدأ في الإخترق عند المجال المغناطيسي الحرج B_{c1} والذي يكون أقل من المجال المغناطيسي B_c ، فإن هذا النوع من المواد والمركبات الفائقة التوصيل (الموصلات الفائقة) يكون عرضة تماماً لتأثير ماسنر ومع ذلك، تبدأ المادة في التغير من الحالة الفائقة التوصيل (S.C) إلى الحالة الطبيعية (N.C) عندما ترتفع قيمة المجال المغناطيسي المسلط إلى B_{c2} أو أعلى حيث أن حالة الدوامية هي الحالة التي تقع فيها المادتان بين B_{c1} و B_{c2} وكما هو موضح في الشكل (6)، يخترق المجال المغناطيسي المادة ويتغير إلى حالتها الطبيعية عندما تتجاوز قوة المجال B_{c2} .¹¹



الشكل 6. يوضح شدة المجال المغناطيسي الحرج من النوع الثاني Type II

نظرية لندن

كانت نظرية لندن أول نظرية تشرح ظواهر الموصلية في عام 1935، بعد وقت قصير من اكتشاف أن المجالات المغناطيسية يتم طردها عند مرحلة ظهور خاصية الموصلية الفائقة بفضل وقدرة معادلات هذه النظرية على شرح تأثير مايسنر حيث تطرد المادة جميع المجالات المغناطيسية الداخلية عندما تعبر عتبة الموصلية الفائقة ويمكن إيجاد قيم المجال المغناطيسي داخل الموصل الفائق على مسافة من السطح باستخدام معادلة لندن. ويمكن تقسيم معادلات لندن إلى فئتين وهما:

$$\frac{\partial j_s}{\partial t} = \frac{n_s e^2}{m} E \quad (4)$$

$$\nabla \times j_s = -\frac{n_s e^2}{m} B \quad (5)$$

حيث تتبع المعادلة الرابعة قانون نيوتن الثاني للإلكترونات فائقة التوصيل

أنواع الموصلات فائقة التوصيل

تنقسم الموصلات الفائقة حسب درجة حرارتها الحرجة إلى

- 1- المواد فائقة التوصيل منخفضة الحرارة (Low temperature superconductor) واختصاراً (LTC) وتسمى أيضاً المواد فائقة التوصيل التقليدية مثل الزئبق وتمتاز بانخفاض درجة حرارتها الحرجة.
- 2- المواد فائقة التوصيل عالية الحرارة (High temperature superconductor) واختصاراً (HTC) وتمتاز بارتفاع درجة حرارتها الحرجة.

المواد فائقة التوصيل عالية الحرارة High temperature superconductor

حتى عام 1986، كان العلماء يعتقدون أن الموصلية الفائقة عند درجات حرارة أعلى من 30 درجة كلفن تنتهي بفرضية بارددين-كوبر-شرايفر واستناداً إلى بنية بلورية مثل بنية النحاس، وجد بيدنورتز ومولر الموصلية الفائقة في مواد اللانثانوم في ذلك العام وكانت درجة حرارة الانتقال من حالة التوصيل إلى حالة الموصلية الفائقة 35 درجة مئوية وسرعان ما ثبت أنه يمكن زيادة درجة الحرارة الحرجة إلى 92 درجة مئوية عن طريق استبدال اللانثانوم بالإيتريوم في السيراميك (أكسيد الباريوم النحاسي والإيتريوم) وهذه القفزة في درجة الحرارة مهمة بشكل خاص لأنها تجعل من الممكن استبدال الهيليوم السائل بالنيوتروجين السائل كمبرد وهذه قفزة فعالة من حيث التكلفة لأن النيوتروجين السائل يمكن تصنيعه بسعر معقول كما يتم تجنب بعض المشكلات التي تحدث عند درجات حرارة الهيليوم السائل، بما في ذلك تطور سدادات الهواء المجمدة التي

¹¹ Rohlf, James William, (1994) Modern Physics from A to Z, wiley p150.

يمكن أن تسد خطوط التبريد وتؤدي إلى تراكمات ضغط غير متوقعة وربما خطيرة، حيث أن إحدى القضايا الرئيسية التي لم يتم حلها في نظرية فيزياء المادة المكثفة هي نظرية التوصيل في العديد من المواد الفائقة التوصيل القائمة على النحاس والتي تم العثور عليها حالياً، ونظرية التوصيل في هذه المواد هي إحدى التحديات الرئيسية العالقة في نظرية فيزياء المادة المكثفة ويوجد حالياً فرضيتين رئيسيتين - نظرية ربط تكافؤ الصدى، وتقلب التذبذب ووفقاً للنظرية الثانية، فإن تذبذب الموجة قصيرة المدى هو كيفية حدوث اقتران الإلكترون في الموصلات الفائقة عالية الحرارة. منذ عام 1993، تم استخدام المواد الخزفية المحتوية على الزنبق وقد تبين أن العناصر ذات أعلى درجات الحرارة الموصلة الفائقة - الباريوم والكالسيوم والنحاس والأكسجين - لها درجات حرارة حرجة (T) تتراوح بين 133 و138 درجة كلفن وفي فبراير/شباط 2008، اكتشفت مواد موصلة فائقة عالية الحرارة قائمة على مجموعة الحديد وهناك حالياً عدد قليل من الاستخدامات التجارية للموصلات الفائقة عالية الحرارة حيث يمكن تبريد الموصلات الفائقة منخفضة الحرارة بتكلفة أقل باستخدام الموصلات الفائقة عالية الحرارة، التي يمكنها إنتاج الموصلية الفائقة عند درجات حرارة أعلى من نقطة غليان النيتروجين السائل ولكن المشكلة في تكنولوجيا الموصلات الفائقة عالية الحرارة المتاحة الآن هي أن السيراميك يصعب تشكيله على شكل أسلاك أو أشكال مفيدة أخرى، كما أنه هش بسبب تكاليف تصنيعه المرتفعة¹².

لقد تم استخدام تطبيقات الموصلية الفائقة عالية الحرارة بسبب فوائدها الأساسية، كما هو الحال حيث يتم استخدامها في تطبيقات الموصلية منخفضة الحرارة بسبب انخفاض فقدان التيار الحراري، إن المقاومة المنخفضة للترددات الراديوية هي سمة من سمات مرشحات الراديو والميكروويف، الإستخدام المتزايد للمغناطيسيات في البحوث العلمية المتخصصة، ولا سيما من حيث الحجم واستهلاك الكهرباء في حين أن الأسلاك من مواد الموصلية الفائقة مرتفعة الحرارة أعلى بكثير من الموصلات من المواد الفائقة منخفضة الحرارة في هذه التطبيقات وتكون الموصلات المصنوعة من مواد فائقة التوصيل منخفضة الحرارة أقل تكلفة بشكل ملحوظ من الأسلاك المصنوعة من مواد فائقة التوصيل عالية الحرارة حيث إن التكلفة النسبية وسهولة التبريد يمكن أن تعاكس هذا ومن الضروري أن نتذكر من التراجع عن المجال ويمكن ملاحظة التغيرات الأسرع في المجال لأن الموصلات الفائقة عالية الحرارة تتمتع بنطاق واسع ومتنوع من درجات الحرارة العاملة¹³.

المواد فائقة التوصيل منخفضة الحرارة Low temperature superconductor

أكبر تطبيق للموصلية الفائقة عندما يتم الإنتاج بكميات كبيرة ومستقرة، وعالية المجالات المغناطيسية اللازمة لأي من التطبيقات التي سترد بعد وأبرزها التصوير بالرنين المغناطيسي والرنين المغناطيسي النووي وهو أكبر استخدام للموصلية الفائقة وبالنسبة للشركات الأمريكية مثل سيمنز وأكسفورد إكويمنت، فإن هذه صناعة بمليارات الدولارات على الرغم من أن الأجهزة الفائقة التوصيل منخفضة الحرارة يجب تبريدها إلى درجات حرارة الهيليوم السائل، إلا أن المغناطيسات الفائقة التوصيل منخفضة الحرارة تُستخدم (34) لأن الموصلية الفائقة عالية الحرارة ليست رخيصة بما فيه الكفاية لتحقيق الفعالية من حيث التكاليف لحجم الأعداد المطلوبة العالية والمستقرة، على الرغم من الحاجة لتبريد أجهزة الموصلية الفائقة منخفضة الحرارة لدرجات حرارة الهيليوم السائل¹⁴.

ظاهرة التكميم المغناطيسي

لا تزال المواد الفائقة مثيرة للاهتمام من جميع النواحي حيث إن الفكرة القائلة بأنه إذا تم تصنيع موصل فائق على شكل حلقة، مهما كانت صغيرة، فإن مقدار المجال المغناطيسي الذي يمر عبر تلك الحلقة يجب أن يكون مساوياً تماماً لعدد صحيح من الكمات المغناطيسية، والتي يُشار إلى كل منها بالرمز f_0 ، ويبلغ مقدار الكمة الواحدة وتسمى أيضاً باسم بالفلاكسويد، وهي واحدة من الظواهر المثيرة للاهتمام عندما يتعرض موصل لحقل أكبر قليلاً من عدد صحيح من الكمات (بزيادة أقل من نصف الكم)، يُعرف هذا بالتكميم حيث إذا صادف حقلًا أقل قليلاً من عدد صحيح من الكمات بأقل من نصف الكمات فإنه يتكيف لملء الفجوة من تلقاء نفسه من أجل الحفاظ على العدد الصحيح من الكمات فمثلاً إذا مر حقل يساوي مائة كمات زائد ربع كمات، فإن هذا الربع يُرفض ولا يمر من خلاله، وإذا كان نصفه أو أكثر ولكن أقل من عدد صحيح واحد بدلاً من الربع، حيث يجب أن ينمو التيار وينخفض حتماً بمقدار ضئيل كرد فعل للمجال الخارجي حتى يتمكن الموصل من إكماله إلى عدد صحيح واحد وقد ثبت أن هذه الظاهرة مهمة للغاية لأنها أساس ما يُشار إليه حالياً باسم مستشعر SQUID ومن الممكن قياس قوة المجال حتى مليون من الوحدة الكمومية المغناطيسية نفسها لأن SQUID هو جهاز حساس للغاية للمجالات المغناطيسية ويمكنه اكتشاف التغيرات في المجال المغناطيسي إذا ارتفعت الحساسية حيث إن هذه الحساسية أعلى كثيراً من الإشارات التي يرسلها القلب والدماغ وأجزاء أخرى من الجهاز العصبي للكائن الحي وهناك نوعان من أجهزة استشعار SQUID - dc، الذي يعتمد على التيار المباشر، و rf-SQUID، الذي يعتمد على تيار التردد اللاسلكي ومن أجل تمكين التهرب الإلكتروني، يتم استخدام النوع الأول بشكل متكرر كصفائح رقيقة فائقة المواد مع مواد عازلة محصورة بينها¹⁵.

¹² Steven Strogatz, (2003) Sync: The Emerging Science of Spontaneous Order, Hyperion.

¹³ V. Semenov, Yu. Polyakov, and D.F. Schneider, in: CPEN'96(1996) Conference Digest Supplement (PTB, Braunschweig, p. 15, and to be published.

¹⁴ K. Likharev, in: (1993) The New Superconductor Electronics, ed. by H. Weinstock and R.W. Ralston (Kluwer, Dordrecht), p. 423.

¹⁵ B.A. Hunter, J.D. Jorgensen, J.L. Wanger, R.L. Hitterman and R.B. Von Dreele, (1994) Physica C 221, 1.

أما النوع الثاني، والذي يعمل كقرص يشبه حبة الأسبرين، فيستخدم أيضاً أغشية رقيقة أو فكرة إنشاء ثقب واحد أو أكثر في مادة فائقة التوصيل وقد اكتشف أن الحساسية تزداد مع عدد الثقوب فعندما يكون هناك ثقب واحد فقط، يمكن قياس المجال المغناطيسي على الفور؛ وعندما يكون هناك عدة ثقوب، يمكن تغيير المجال المغناطيسي تدريجياً والمفهوم الأخير يجعل المستشعر مفيداً للغاية لأنه يقيس أي تغيير، مهما كان صغيراً، بدلاً من قياس المساحة الإجمالية المتاحة حيث أصبحت الأجهزة المبنية على مستشعر SQUID متاحة تجارياً من العديد من الشركات المتعددة الجنسيات بأسعار معقولة¹⁶.

ظاهرة الطفو

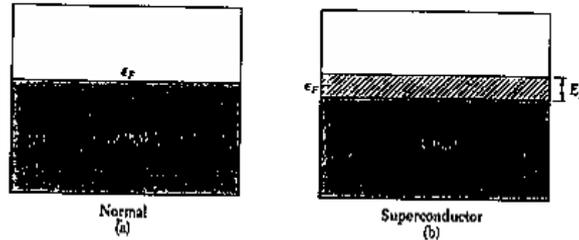
من المعروف أن الموصل الفائق يكون عند درجة الحرارة الحرجة خالياً من المقاومة الكهربائية، وهو موصل مثالي وطالما أن السلك يحتفظ بموصلية الفائقة، فإن التيار الكهربائي سوف يستمر إلى الأبد إذا تم إدخاله في حلقة من السلك الفائق التوصيل وفي إحدى التجارب، كان هناك تيار كهربائي مستمر في حلقة من السلك الفائق التوصيل لمدة عامين ونصف العام دون أي انخفاض ملحوظ في الكثافة أو مصدر كهربائي خارجي يغذي الحلقة حيث إن ظاهرة الطفو المثيرة التي نراها في الشكل (7) ناجمة عن التيارات الدائمة، وهي التيارات التي تتدفق عبر الموصل الفائق دون مواجهة أي مقاومة وتحدث هذه التيارات في مجالات مغناطيسية متغيرة حيث يؤدي وضع مغناطيس صغير فوق موصل فائق إلى توليد قوى تنافر مع المغناطيس بسبب التيارات الدائمة التي يولدها المجال المغناطيسي على سطح الموصل الفائق بحيث تقوي وتشتد كثيراً باقتراب المغناطيس من الموصل الفائق حتى يتم رفع المغناطيس في الهواء فيظهر وكأنه عائم في الهواء¹⁷.



الشكل 7. ظاهرة الطفو في المواد فائقة التوصيل.

طاقة الفجوة

في الموصلات تنعدم تقريباً طاقة الفجوة ويكون شريط التكافؤ ملاصق لشريط التوصيل وعلى النقيض من الموصلات، كان يُعتقد أن المواد الفائقة التوصيل ليس لديها طاقة فجوة وكما هو موضح في الشكل (8)، تم اكتشاف العكس، وتم اكتشاف وجود طاقة فجوة تنتج عن تفاعل الإلكترونات لإنشاء ما يُعرف بأزواج كوبر ويؤدي هذا إلى وضع الإلكترون في مستوى فارغ بالنسبة لموقعه في مستوى فيرمي للغازات¹⁸.



الشكل 8. شريط التوصيل للحالة العادية وطاقة الفجوة للحالة الفائقة.

أزواج كوبر Cooper pair

حقق العالمان الأمريكيان باردين تقدمًا كبيراً في مجال الموصلية الفائقة في عام 1957 فيما يتعلق بموصلية BCS حيث طور هؤلاء العلماء الثلاثة نظرية كوبر وشرافير BCS، التي تصف الموصلية الفائقة للمواد عند درجات حرارة قريبة من الصفر المطلق استناداً إلى مفهوم أزواج كوبر المسمى على اسم الفيزيائي كوبر، أحد مؤسسي النظرية حيث كشفت النظرية طريقة

¹⁶ J. Bardeen, L.N. Cooper and J. R. Schrieffer, (1957) Phys. Rev. 106, 162 (1957); 108, 1175.

¹⁷ - W. Meissner and R. Ochsenfeld, (1933) Naturwissenschaften, 21, 787.

¹⁸ J.G. Bendnortz and K.A. Muller, (1987) Z.Phys. B 64, 189.

لشرح آلية التوصيل الكهربائي في المواد الفائقة التوصيل ووفقاً للفكرة، فإن المواد الفائقة التوصيل لها تفاعلات رابطة بين إلكتروناتها وعلى النقيض من النظرية الكلاسيكية التي تنص على أن الإلكترونات المشحونة سلباً لها قوى تنافر كولومبية، فإن الجذب بين الإلكترون ونظيره يخلق ما يعرف بأزواج كوبر ويتسبب التفاعل بين الإلكترون والشبكة البلورية في حدوث هذه العملية، مما يجعل أحد الإلكترونات يبدو محاطاً بحاجز من الشحنات الموجبة التي تكون أكبر بكثير من الشحنات السالبة للإلكترون الثاني وتتكون أزواج كوبر عندما يقترب الإلكترونان من بعضهما البعض لأن قوى الجذب تفوق قوى التنافر¹⁹.

المواد الفائقة ذو الحرارة العالية High Tc superconductors

أهمية خاصة للموصلات الفائقة عالية الحرارة

إن كل الأطراف المهتمة يمكنها الحصول عليه بسهولة، وهو سهل التصنيع ولأن مكوناته الرئيسية - الكالسيوم والباريوم والنحاس متوفرة بسهولة وبأسعار معقولة، فإنه في المتناول وعلى النقيض من سلفه، الهيليوم المسال، فإنه يتم تحويله إلى درجة أعلى من نقطة غليان النيتروجين، وهو غير مكلف، ويمكن الوصول إليه على نطاق واسع، ويمكن حمله، ويدوم لفترات طويلة من الزمن. في حالة مركبات الزئبق، يكون الفارق الحراري بين درجة تحولها ودرجة حرارة وسط التبريد، النيتروجين (كبير) أكبر من خمسين درجة، مما يجعلها أكثر استقراراً ويرتفع هذا الاستقرار مع اتساع الفجوة بين درجة تحولها ودرجة حرارة التشغيل²⁰.

الجدول (1) درجة الحرارة الحرجة لكل من أنظمة المواد الفائقة التوصيلة الأكثر أهمية التي تم تحديدها منذ اكتشافها²¹

سنة الاكتشاف	اسم المكتشف	النظام	الدرجة الحرجة بالكلفن
1986	and Muller Bednorz	La _{2-x} Ba _x CuO ₄	35
1987	M.Tarascon et.al.	La _{2-x} Sr _x CuO ₄ (La: 214)	38
1987	M.K.Wu et.al.	YBa ₂ Cu ₃ O ₇ (Y: 123)	90
1988	M.Maeda et.al.	Bi ₂ Sr ₂ Ca ₂ Cu ₃ O ₁₀ (Bi: 2223)	110
1989	Z.Z. Sheng et.al	Tl ₂ Ba ₂ Ca ₂ Cu ₃ O ₈ (Tl: 2223)	127
1993	A. Shilling et.al.	HgBa ₂ Ca ₂ Cu ₃ O ₈ (Hg: 1223)	134
1994	B.A. Hunter et.al.	(Hg: 1223) under pressure	164
2001	J.Akimitsu et.al.	Mg B ₂	39

تطبيقات المواد فائقة التوصيل Superconducting application

جهاز سكويد

تتكون حلقة الموصل الفائق التي تشكل مقياس المغناطيسية SQUID من تقاطعين فائقي التوصيل يُعرفان باسم تقاطعات جوزيف صن حيث يتسبب التحول الطوري بين أزواج كوبر عبر التقاطعين في حدوث تغيير في التدفق المغناطيسي في ضوء الجهد المتناوب، والذي يمكن لجهاز SQUID اكتشافه ويمكن لجهاز SQUID قياس التدفق المغناطيسي بحساسية تتراوح بين 10⁻¹⁴ تسلا، وهي حساسية عالية جداً حيث أن المجال المغناطيسي للأرض أقوى بما لا يقل عن 10¹¹ مرة من هذه المجالات.

وبالتالي، تمكن العلماء من تحديد المجالات المغناطيسية التي تنتجها أعضاء الإنسان مثل القلب باستخدام جهاز SQUID وبسبب المجال المغناطيسي المحدود الذي ينتجه الدماغ والجهاز العصبي، والذي يتطلب دقة وحساسية كبيرتين في القياس، كان من الصعب اكتشاف هذه الأعضاء بالأدوات التقليدية، فمثلاً يتراوح المجال المغناطيسي للدماغ بين 10⁻¹³ تسلا، في حين يتراوح المجال المغناطيسي للقلب بين 10⁻¹⁰ تسلا²².

أجهزة الميكروويف Microwaves

تتميز المواد الفائقة بصغر قيم المقاومة الكهربائية عند درجات حرارة الغرفة ومن المعروف أيضاً أن المقاومة الكهربائية تسبب انخفاضاً في شدة الموجات الميكروويف بالقرب من أسطح المواد، وبالتالي إضعاف شدة الموجات الميكروويف في محيط هذه الأسطح وقد اكتُشف أن المقاومة النوعية للمواد الفائقة التوصيل أقل بكثير من مقاومة المعادن مثل النحاس عند مقارنتها

¹⁹J.M. Tarascon, L.H. Greene, W.R. Mckinnon, G.W. Hull and T.H. Geballe, (1987) Science 235, 1373.

²⁰ C. Francke, M. Offiner, A. Kramer, L. Mex and J.Muller, Supercond. (1998) Sci. Technol. 11, 1311 .

²¹ A.Shilling, M.Cantoni, J.D. Guo and H.R. Ott, Nature 363, 56 (1993); S.N. Putiling , E.V. Antipov, Chmaissen and M. Marezio, Nature 362, 226.

²²M.F. Crommie, L.C. Bourne, A.Zetti and A.Stacy, (1987) Phys. Rev. B 35, 8853.

بالمعادن عند ترددات الموجات الميكروويف العالية ولمنع فقدان شدة الموجات الميكروويف عند الترددات العالية، يمكن تطبيق المواد الفائقة التوصيل على أسطح أجهزة الموجات الميكروويف²³.

كابلات القدرة Power cables

لقد وجد أن المواد الفائقة تتحمل تيارات كهربية عالية، فإن الكابلات المصنوعة منها قادرة الآن على نقل تيارات كهربائية تصل إلى خمسة أضعاف التيارات التي يمكن أن ينقلها كابل نحاسي بنفس الحجم والموصفات. وبالتالي، إذا تم تقديم المساعدة المطلوبة، فقد تتمكن هذه الكابلات من نقل الطاقة من مكان إلى آخر مع القليل من الخسارة أو بدونها، مما سيساعد في نقل خطوط الكهرباء بين الدول²⁴.

المغناطيس الفائق Superconducting magnets

تستخدم المواد فائقة التوصيل في تصميم المغناطيس الفائق بحيث يتم تبريد المغناطيس الفائق في الهيليوم السائل بحيث تكون المقاومة الكهربائية للملفات مساوية للصفر، مما يؤدي إلى فقدان الطاقة وتكون صفرًا حتى عند تسخين الأسلاك لذلك، طالما تم الحفاظ على درجة حرارة الهيليوم السائل، يمكن لمصدر التيار المنخفض تسهيل تدفق التيار ونتيجة لذلك، يمكن إنتاج مجالات مغناطيسية أقوى بعشرات المرات من تلك الموجودة في المغناطيسيات القائمة على الموصلات²⁵.

أجهزة الرادار Radar apparatus

قد ترى هذه المشكلة من خلال رؤية ما يحدث لجهاز التلفاز عندما يتم تشغيل جهاز كهربائي بجواره ستشوه المجالات المغناطيسية المحيطة الصورة من خلال التأثير على حركة الإلكترونات التي تخلقها، تقوم أجهزة الرادار بنفس الشيء، ولكن نظرًا لتأثرها بالحقول الخارجية، فهي أكثر حساسية وللتغلب على هذا، تم استخدام الدروع المغناطيسية وهي أسطوانات بأقطار مختلفة مكونة من مواد فائقة حيث تعمل هذه الدروع على حجب مصدر الإلكترون عن المجالات الخارجية وتوفر صورة رادارية واضحة للغاية.

القطار الفائق Superconducting train

لكي تطفو عجلات القطار المكونة من مواد فائقة التوصيل على مغناطيس قوي للغاية، فإن تصميم هذه القطارات يعتمد على ظاهرة التناظر المغناطيسي ويشار إليها باسم القطارات العائمة أو الفائقة لأنه لا يوجد احتكاك بين عجلات القطار والمسارات، مما يمكن القطارات من التحرك بسرعة أكبر وفي عام 1986، تم اختبار قطار فائق مكون من ثلاث عربات وحقق سرعة قصوى بلغت 352.4 كم/ساعة. وفي عام 1990، كانت مبادرة ممولة وطنياً في اليابان تسمى ماجليف بمثابة بداية الاستخدام التجاري حيث تم افتتاح أول خط قطار فائق المادة واختباره في أبريل 1997 عندما كانت وزارة النقل مستعدة لتبني المفهوم ثم تم تقديم عجلات القطار الفائقة المغناطيسية، المعروفة باسم MLX01، في ديسمبر 1997 حيث وصل القطار، الذي كان به ثلاث عربات، إلى سرعة 531 كم / ساعة وتم إنتاج قطار فائق بخمس عربات بسرعة قصوى تبلغ 548 كم / ساعة في مارس 1999 حيث حقق القطار الفائق سرعة قصوى تبلغ 581 كم / ساعة في ديسمبر 2003 ويمكن أن يصل قطار فائق في سيول، كوريا الجنوبية، إلى 300 كم / ساعة ومن المتوقع أن يصل إلى 412 كم / ساعة في عام 2008 حيث تبلغ سرعة هذا القطار 400 كم / ساعة. 388، الذي يحتوي على 18 عربة، وزن 771 طناً، ويكفي لـ 935 شخصاً²⁶.

التطبيقات الطبية

هناك العديد من الاستخدامات الطبية لنفس الدروع التي ناقشناها سابقاً وبشكل عام، من الأفضل إنشاء بيئة خالية من المجالات المغناطيسية الخارجية، والتي غالباً ما تكون أكبر بكثير من النبضات الكهربائية والمغناطيسية الصغيرة التي ينتجها المخ أو القلب أو الجهاز العصبي وقد تم تطبيق قدرة الدروع المغناطيسية على قراءة الإشارات الصغيرة المذكورة بشكل فعال في بعض الأماكن، بما في ذلك اليابان، مما يسمح بتشخيص إضافي للأعضاء الدقيقة للكائن الحي حيث إذا تمت الاستفادة من قدرة كاشف السكويد الهائلة لقراءة المجالات المغناطيسية المتناهية في الصغر مع استخدام الدروع المغناطيسية، نكون بذلك وفرنا جهازاً متكاملًا يمكن أن يحل محل الأجهزة المستخدمة حالياً ويفوقها من حيث الدقة فعندما تم وضع مجموعة كبيرة منها فوق رأس المريض في شكل نصف كروي، حيث كان جهاز الكشف يعمل بالفعل وفي العديد من التجارب، ووصل عددها السكويدات في المجموعة الواحدة إلى 64 في بعض التجارب²⁷.

²³ A.Bourdillon and N.X. Tan Bourdillon, (1994) High Temperature Superconductors, New York p 158.

²⁴ B.A. Hunter, J.D. Jorgensen, J.L. Wanger, R.L. Hitterman and R.B. Von Dreele, (1994) Physica C 221, 1.

²⁵ M.F. Crommie, L.C. Bourne, A.Zetti and A.Stacy, (1987) Phys. Rev. B 35, 8853.

²⁶ Charles Kittel, (1986) Introduction to Solid state Physics, John Wiley & Sons, Inc p69

²⁷ - Z.Z. Sheng and A.M. Hermann, (1988) Nature 332, 138.

عجلات الطاقة

يُعتقد أن القرص الضخم يمتلك طاقة حركية أثناء دورانه حول محوره، وهو مستعد للتضحية بهذه الطاقة من أجل طاقة أخرى عند الحاجة وقد تم تخزين كميات كبيرة من الطاقة باستخدام هذا المفهوم في عجلات ضخمة تدور بسرعات عالية للغاية ويتم وضعها داخل كبسولات فريدة من نوعها؛ ومع ذلك، فإن المشكلة التي كانت موجودة دائماً هي أن الإحتكاك الداخلي يستنزف الطاقة الحركية تدريجياً ولكننا قد نتمكن من صنع عجلات دوارة في بيئة خالية من الإحتكاك من خلال الإستفادة من ظاهرة الطفو المغناطيسي، وهو ما يسمح لها بالإحتفاظ بطاقتها إلى أجل غير مسمى وبسبب هذا، قد تستفيد كافة الآلات والحركات من ظاهرة انعدام الإحتكاك، وهو ما يزيد من عمرها الافتراضي ويقلل الحاجة إلى الصيانة المتكررة والأعطال.

التطبيقات العسكرية

لقد تم النظر في استخدام الموصلات الفائقة في الرادارات العسكرية بسبب قدرتها على رفض المجالات المغناطيسية ومن المعروف أن قدرة الرادار على تفسير البيانات تحدد مدى دقة الصور التي ينتجها، إلا أن المجالات المغناطيسية القريبة الأرضية أو غير الأرضية لها تأثير ضار على هذه القدرة وقد شاهد ما يحدث لجهاز التلفزيون عندما يتم تشغيل جهاز كهربائي يستخدم التيار المتردد للحصول على فكرة عن المشكلة حيث إن الصورة سوف تصاب بالتشوش والسبب هو المجالات المغناطيسية المجاورة والتي أفسدت الجو على حركة الإلكترونات المهبطية التي هي المسؤولة عن الصورة حيث يعمل الرادار بطريقة مماثلة، إلا أنه أكثر حساسية بكثير وقد تم اقتراح الدروع المغناطيسية كحل لهذه المشكلة ويتم وضع مصدر الإلكترون الكاثودي داخل أسطوانات بأقطار مختلفة مكونة من مواد فائقة التوصيل، والتي تحمي الإلكترونات من المجالات الخارجية وتوفر صورة رادارية واضحة للغاية كما يستخدم كاشف SQUID في الجيش للعثور على أصغر العيوب، بما في ذلك الكسور والشقوق، في هياكل الطائرات العسكرية والتجارية حيث أن الإختبار غير المدمر (NDT) هو اسم التقنية حتى لو تم اختراقها بشكل خطير بمقدار يزيد عن عشرة سنتيمترات، فإن جهاز الكشف يمكنه تحديد العيوب الفنية أو الشقوق داخل هياكل الطائرات بشكل كامل²⁸.

استخدامات المواد فائقة التوصيل

يستخدم التوصيل الفائق في المجال الكهرومغناطيسي وقد تمكن الباحثون من تطوير مغناط فائقة التوصيل، حيث تستخدم كهرباء أقل من المغناط الكهربيائية العادية وقد مكنت مغناط التوصيل الفائق علماء الفيزياء من إنشاء معجل جسيمات أكثر فاعلية، وهي أجهزة تزيد سرعة جسيمات الذرة حيث يبحث الباحثون في التطبيقات المحتملة للمواد الجديدة التي تظهر الموصلية الفائقة في درجات الحرارة العالية، كما يجري اختبار مفتاح موصل فائق ينظم الدوائر الكهربيائية للكمبيوتر وعلى الرغم من تشغيله بسرعات عالية للغاية، فإن هذه الأدوات لا تبعث منها أي حرارة تقريباً حيث تمنع المقاومة الكهربيائية خطوط الطاقة المكونة من مواد فائقة التوصيل من فقدان الطاقة على مسافات طويلة وقد يتم إنتاج الكثير من الطاقة بواسطة كابلات الطاقة هذه كما أنها تجعل من الأسهل اختيار مواقع محطات الطاقة بحيث تكون آثارها السلبية على البيئة والبشر ضئيلة قدر الإمكان وقيل استخدام الموصلات الفائقة تجارياً في درجات حرارة عالية، يجب حل عدد من القضايا حيث أن غالبية الموصلات الفائقة الخزفية صعبة الإنتاج وبالرغم من كون السيراميك هشاً، فمن الصعب تحويله إلى أسلاك ومع ذلك، نجح العلماء في إنشاء أشرطة مرنة ورقيقة تتمتع بقدرة عالية على حمل التيار وعلى الرغم من أن الموصلية الفائقة في المواد السيراميكية يمكن تفسيرها بنظرية BCS، إلا أنه لم يتم طرح تفسير شامل لهذه الظاهرة حتى الآن²⁹.

معجلات الجسيمات

في النصف الأول من القرن العشرين، بدأ العلماء في دراسة خصائص الجسيمات دون الذرية بمزيد من التفصيل بفضل ظهور مسرعات الجسيمات وكان جهاز بيتاترون، الذي طوره دونالد كريست في عام 1942، أول محاولة ناجحة لاستخدام الحث الكهرومغناطيسي لتسريع الإلكترونات وكانت طاقته الأولية 2.3 ميغا إلكترون فولت، في حين كانت طاقة بيتاترون التالي 300 ميغا إلكترون فولت ثم في عام 1947، تم اكتشاف إشعاع سنكروتروني بطاقة 70 MeV في شركة جنرال إلكتريك وقد ظهر هذا الإشعاع نتيجة لانتقال الإلكترونات عبر مجال مغناطيسي بسرعة تساوي تقريباً سرعة الضوء وكان أول مصادم جسيمات بحزمة طاقة عالية تبلغ 1.5 جيجا إلكترون فولت قيد الإنشاء في عام 1968 ويضعاف هذا الجهاز الطاقة الفعالة للإصطدام بين الإلكترونات والبوزيترونات عن طريق تسريعها في اتجاهين متعاكسين وقد أنتج مصادم الإلكترونات والبوزيترونات (LEP) في سيرن حزمة طاقة تبلغ 209 جيجا إلكترون فولت بين عامي 1989 و2000، وقد أحدث ملاحظات مهمة للنموذج القياسي لفيزياء الجسيمات³⁰.

²⁸ Charles Kittel, (1986) Introduction to Solid state Physics, John Wiley & Sons, Inc p89

²⁹ J. Nagamatsu, N. Nakagawa, T. Muranaka, Y. Zenitani and J. Akimitsu, (2001) Nature 410, 63.

³⁰ A. Shilling, M. Cantoni, J.D. Guo and H.R. Ott, (1993) Nature 363, 56.

فوائد المواد فائقة التوصيل

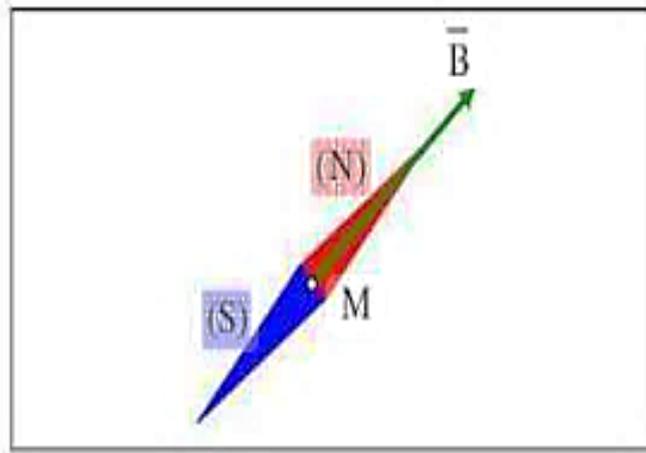
إن المادة تفقد كل مقاومتها الداخلية للتيار الكهربائي، فعندما يمر تيار كهربائي بين نقطتين نحتاج إلى فرق جهد للتغلب على مقاومة المادة الموصلة، وإذا قلنا أن المقاومة الداخلية للمادة غير موجودة بالكامل فإننا نستنتج أن التيار الكهربائي سيستمر في المرور لعقود من الزمن إذا أزلنا فرق الجهد الخارجي وهذا يشبه ظاهرة "ما هو مخفي"، والتي تحدث عندما يتم تقريب مغناطيس دائم من حلقة معدنية فائقة التوصيل وستقطع المادة خطوط التدفق المغناطيسي للمغناطيس الدائم، مما يتسبب في توليد تيار كهربائي نتيجة للحث حيث يرتفع المغناطيس مع تدفق التيار الكهربائي عبر الحلقة لأنه يخلق مجالاً مغناطيسياً معاكساً للمجال الفعال، والذي يتنافر مع بعضه البعض وطالما أن القطعة المعدنية في حالة من الموصلية الفائقة، سيبقى المغناطيس معلقاً ولقد تم التغلب بشكل دائم على وزن المغناطيس السفلي بواسطة قوة صاعدة جديدة أنتجناها³¹.

معوقات المواد فائقة التوصيل

حتى مع هذا التقدم المذهل في مجال الموصلية الفائقة، لا تزال هناك العديد من المشاكل المتعلقة بالمواد الفائقة، مثل مدى صعوبة تشكيلها في شكل أسلاك أو دوائر كهربائية يمكنها نقل تيارات كهربائية كبيرة محظورة في الموصلات العادية ومن أجل إنشاء أجهزة تتضمن دوائر كهربائية مصنوعة من مواد فائقة دون القلق بشأن التأثيرات الضارة لدرجات الحرارة المرتفعة أو التأثيرات الأخرى التي تختفي نتيجة لاستخدام هذه المواد، فإن الأبحاث جارية لإنشاء مواد فائقة في درجة حرارة الغرفة مع تشكيلها أيضاً وسوف تساعد هذه المجالات المغناطيسية في خلق مجالات مغناطيسية قوية للغاية قادرة على احتواء بلازما الاندماج النووي عالية الحرارة، وهو أمر يصعب اكتشاف مواد قادرة على تحمل هذه الحرارة العالية في هذا الوقت ومع ذلك، من خلال استخدام الرنين المغناطيسي النووي، الذي يسمح لنا بالحصول على صور تشريحية دقيقة ومتعمقة لأي عضو في جسم الإنسان، يمكن الاستفادة من هذه المجالات المغناطيسية في تطوير معدات التشخيص الطبي كما يمكن الاستفادة منها لتوفير خيارات النقل، مثل القطارات العائمة منخفضة التكلفة التي قيد الإنشاء الآن وفي الواقع، ستكون ظاهرة علمية لم يسبق رؤيتها أو وصفها من قبل ورغم أن هدف إنشاء بنية تحقق الموصلية الفائقة في درجة حرارة الغرفة لم يتحقق بعد، فإن التقدم بطيء، ولكن نسبة النجاح تتحقق في كل مرة ولكن إذا تم تحقيق هذا الهدف، فإن الصناعة الحديثة سوف تشرع في ثورة تكنولوجية لا مثيل لها في التاريخ، حيث تعمل الموصلية الفائقة كأساس لتقنيات جديدة في مختلف المجالات ولكن الآن، لا بد من توفير الأدوات للباحثين حتى يتمكنوا من إنتاج هذه المواد وتشكيلها حسب الحاجة ويمكن لهذه المواد أن تتخذ شكل الكابلات أو الأسلاك، وأن تُدرج في تركيب الرقائق الإلكترونية، وأن تلعب دوراً كبيراً في محركات الطيران، وأكثر من ذلك³².

الحقل المغناطيسي

هو حيز من الفراغ عندما يوضع جسم ممغنط، مثل إبرة مغناطيسية، أو جسم قابل للمغناطيسية، مثل برادة الحديد، في مجال مغناطيسي، فإنه يتعرض لتأثير ميكانيكي أو قوة حيث هناك ثلاثة مصادر أساسية للمجال المغناطيسي وهما مغناطيس موجود بشكل طبيعي، التيار الكهربائي، الأرض حيث تسمح لنا الإبرة المغناطيسية، التي تتخذ موضعاً ثابتاً محددًا، باكتشاف وجود مجال مغناطيسي في موقع معين وبعبارة أخرى، لو نحرك إبرة مغناطيسية في حالة توازن ثم تعود إلى وضع توازنها الأصلي المستقر نقول أنها موجودة ضمن حقل مغناطيسي حيث يتميز الحقل المغناطيسي في كل نقطة M من نقاطه بشعاع يسمى شعاع الحقل المغناطيسي يرمز له بـ B ، وحدة طويلته تدعى التسلا يرمز لها بـ 7 وتقاس بجهاز يدعى التسلا متر كما إن الخصائص التالية تحدد شعاع المجال المغناطيسي وهما النقطة المعتبرة M هي نقطة تطبيقه، حامله يكون منطبق على حامل إبرة مغناطيسية موضوعة في النقطة، جهته تكون من جنوب الإبرة المغناطيسية نحو شمالها $S \rightarrow N$



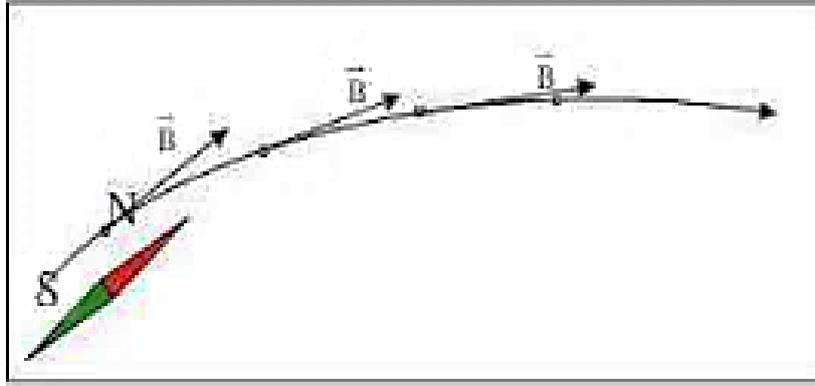
الشكل 9. الحقل المغناطيسي.

³¹ Putiling , E.V. Antipov, Chmaissen and M. Marezio, (1993) Nature 362, 226

³² J. Nagamatsu, N. Nakagawa, T. Muranaka, Y. Zenitani and J. Akimitsu, (2001) Nature 410, 63 .

خطوط الحقل المغناطيسي

خطوط وهمية موجهة تشترك في نفس اتجاه شعاع المجال والتي يكون شعاع المجال المغناطيسي مماساً لها في جميع الأماكن من خلال ترسيب برادة الحديد على ورقة بيضاء في هذا المجال المغناطيسي، أو تحريك الورقة قليلاً، أو النقر عليها، يمكن للمرء أن يرى خطوط المجال المغناطيسي حيث يتم توجيه خطوط المجال المغناطيسي بحيث تدخل المغناطيس من قطبه الجنوبي وتهرب من قطبه الشمالي؛ أي أنها موجهة من القطب الجنوبي للمغناطيس (S) إلى قطبه الشمالي (N).³³



الشكل 10. خطوط الحقل المغناطيسي.

نتائج الدراسة

الحقول المغناطيسية تؤثر بشكل كبير على المواد فائقة التوصيل، حيث تحدث هذه التأثيرات عدة ظواهر تؤثر على خصائص المواد وتساهم في تحديد سلوكها في درجات حرارة منخفضة ويعد تأثير مايسنر أحد أكثر هذه الظواهر شهرة حيث تطرد المواد الفائقة التوصيل المجال المغناطيسي عند درجات حرارة أقل من درجة الحرارة الحرجة (T_c)، وبسبب هذه الظاهرة، يتلاشى المجال المغناطيسي الداخلي للمادة الفائقة التوصيل، مما يسمح لها بحمل الكهرباء دون مواجهة أي مقاومة ونتيجة لذلك، فإن إحدى خصائص المواد الفائقة التوصيل هي أنها تطرد مجالاً مغناطيسياً عند تعرضها له.

توضح النتائج أن الحقول المغناطيسية تؤثر بشكل كبير على المواد فائقة التوصيل من خلال ظواهر مثل تأثير مايسنر، الذي يطرد المجال المغناطيسي عند درجات حرارة أقل من الحرجة، مما يسمح للمواد بحمل التيار دون مقاومة. كما تُظهر النتائج أن الحقول المغناطيسية العالية تؤدي إلى خفض درجة الحرارة الحرجة وتغيير خصائص المواد، مثل ظهور الحقول المغناطيسية المحبوسة والانتقال بين الحالات الفائقة والعادية عند تجاوز الحدود الحرجة. هذه التأثيرات تؤكد أهمية التحكم في الحقول المغناطيسية لضمان استقرار وأداء المواد فائقة التوصيل في التطبيقات المختلفة.

المعادلة	الظاهرة	التأثير
$J = \sigma E$ حيث هو J كثافة التيار و σ الموصلية الكهربائية.	عندما يتعرض الجسم ذو التوصيل الفائق لحقل مغناطيسي، يمكن أن يؤدي هذا إلى تغير في الخصائص مثل التيار الكهربائي أو المقاومة.	تأثير الحقل المغناطيسي على التوصيل الفائق
$B=0$ داخل المادة الفائقة التوصيل عند درجات حرارة أقل من درجة الحرارة الحرجة.	تؤدي الحقول المغناطيسية الكبيرة إلى فرض قيد ميكلين (Meissner effect)، الذي يؤدي إلى طرد المجال المغناطيسي من المواد فائقة التوصيل.	قيد ميكلين
$T_c(B) = T_c(0) \left(1 - \frac{B}{B_{c2}}\right)$ T_c درجة الحرارة الحرجة عند المجال المغناطيسي B ، B_{c2} الحد الأعلى للمجال المغناطيسي الذي يمكن للمادة أن تبقى فيها فائقة التوصيل.	زيادة الحقل المغناطيسي يمكن أن يخفض درجة الحرارة الحرجة للمواد فائقة التوصيل.	التأثير على درجة الحرارة الحرجة
$B_{c2} > \beta > B_{c1}$ B_{c1} هو الحد الأدنى الذي تبدأ عنده المادة في فقدان التوصيل الفائق، B_{c2} هو الحد الأقصى	يمكن للمواد فائقة التوصيل أن تتحول من حالة فائقة التوصيل إلى حالة عادية عندما يتجاوز الحقل المغناطيسي الحد الحرج.	الانتقال بين الحالات
$\beta_{trap} = M + \mu_0 H$ حيث M هو المغناطيسية المترتبة على المادة و H هو الحقل المغناطيسي الداخلي	زيادة المجال المغناطيسي يمكن أن يؤدي إلى ظاهرة الحقل المغناطيسي المحبوس داخل المادة.	التأثير على سعة المجال المغناطيسي

³³ L.Paawowski.dépôts physiques(2003), techniques microstructures et propriétés Presse polytechniques, universitaires romandes, p158

التوصيات

يُوصى بتوسيع نطاق الدراسات حول تأثيرات الحقول المغناطيسية ورغم أن المجالات المغناطيسية المعتدلة تشكل موضوع أغلب الأبحاث، فمن الأهمية بمكان دراسة كيفية تأثير المجالات المغناطيسية العالية على المواد الفائقة التوصيل، وخاصة في البيئات التي يتعين فيها استخدام هذه المواد في ظل ظروف غير عادية وقد يؤدي اكتساب نظرة ثاقبة حول كيفية تأثير المجالات المغناطيسية العالية على استقرار المواد الفائقة التوصيل إلى زيادة فعاليتها في البيئات الصناعية.

من الضروري أن ننظر إلى كيفية تأثير المجالات المغناطيسية المتغيرة مع الزمن على المواد الفائقة التوصيل حيث يتغير المجال المغناطيسي باستمرار في العديد من التطبيقات التكنولوجية، مثل أنظمة الطاقة أو النقل، والتي قد يكون لها تأثير على خصائص المواد الفائقة التوصيل لذلك فإن البحث في تأثيرات المجالات المغناطيسية المتقلبة على هذه المواد أمر ضروري، وخاصة في البيئات التي تتطلب تغييرات مفاجئة في المجالات المغناطيسية.

يُنصح بتطوير مواد فائقة التوصيل ذات درجات حرارة تشغيل أعلى وأحد العوائق الرئيسية في مجال المواد الفائقة التوصيل هو تحقيق هذا الهدف وخفض تكاليف التبريد اللازمة للمواد التقليدية، فإن تطوير المواد التي تحتفظ بخصائصها الفائقة التوصيل عند درجات حرارة أعلى من شأنه أن يزيد بشكل كبير من فائدتها في مجموعة متنوعة من التطبيقات الصناعية.

من الأهمية بمكان دراسة كيفية تأثير المجالات المغناطيسية على الموصلية الفائقة في التطبيقات المعقدة ينبغي أن تركز الدراسات المستقبلية على كيفية تأثير المجالات المغناطيسية على التطبيقات الصناعية المعقدة، مثل الأنظمة الكهربائية القائمة على المواد الفائقة التوصيل وشبكات الطاقة عالية الكفاءة ويمكن تحسين أداء وكفاءة هذه المواد من خلال فهم كيفية تفاعلها مع المجالات المغناطيسية في البيئات الصناعية المعقدة.

المراجع:

- [1] دعيبس، م. ن. (2005). *الخصائص الكهربائية والمغناطيسية في الفيزياء*. عمان: دار غيداء للنشر. ص. 120. الرقم التسلسلي العالمي: 111-044.
- [2] حزيز، ب. (2014). *دراسة الخصائص المغناطيسية البنوية والضوئية والكهربائية لأكسيد القصدير المطعم بالفلور المتوضع بتقنية الأمواج الصوتية* (مذكرة ماجستير غير منشورة). جامعة الوادي. ص. 120.
- [3] سليم، أ. ز. م. (2005). *الرسم الهندسي*. القاهرة: مجموعة النيل العربية. ص. 187.
- [4] Barone, A., & Paterno, G. (1982). *Physics and applications of the Josephson effect*. Wiley, p. 60.
- [5] Bardeen, J., Cooper, L. N., & Schrieffer, J. R. (1957). Theory of superconductivity. *Physical Review*, 106(162), 108–1175.
- [6] Bednorz, J. G., & Müller, K. A. (1987). Possible high T_c superconductivity in the Ba-La-Cu-O system. *Zeitschrift für Physik B*, 64, 189.
- [7] Maeda, H., Tanaka, Y., Fukutomi, M., & Asano, T. (1988). A new high-T_c oxide superconductor without a rare earth element. *Japanese Journal of Applied Physics*, 27, L209.
- [8] Wu, M. K., Ashburn, J. R., Torng, C. J., Hor, P. H., Meng, R. L., Gao, L., ... & Chu, C. W. (1987). Superconductivity at 93 K in a new mixed-phase Y-Ba-Cu-O compound system at ambient pressure. *Physical Review Letters*, 58, 908.
- [9] Huang, Y. Q., Chu, C. W., et al. (1987). High-temperature superconductivity. *Physical Review Letters*, 58, 908.
- [10] Hunter, B. A., Jorgensen, J. D., Wanger, J. L., Hitterman, R. L., & Von Dreele, R. B. (1994). Structure and superconductivity. *Physica C*, 221, 1.
- [11] Rohlf, J. W. (1994). *Modern physics from A to Z*. Wiley, p. 150.
- [12] Meissner, W., & Ochsenfeld, R. (1933). Ein neuer Effekt bei Eintritt der Supraleitfähigkeit. *Naturwissenschaften*, 21, 787.
- [13] Tarascon, J. M., Greene, L. H., McKinnon, W. R., Hull, G. W., & Geballe, T. H. (1987). Superconductivity at 40 K in the oxygen-defect perovskite Ba₂YCu₃O_{9-δ}. *Science*, 235, 1373.
- [14] Francke, C., Offiner, M., Kramer, A., Mex, L., & Muller, J. (1998). Superconducting thin films. *Superconductor Science and Technology*, 11, 1311.
- [15] Schilling, A., Cantoni, M., Guo, J. D., & Ott, H. R. (1993). Superconductivity above 130 K in the Hg-Ba-Ca-Cu-O system. *Nature*, 363, 56.
- [16] Putilin, S. N., Antipov, E. V., Chmaissem, O., & Marezio, M. (1993). Superconductivity in the Bi-Sr-Ca-Cu-O system. *Nature*, 362, 226.

- [17] Crommie, M. F., Bourne, L. C., Zettl, A., & Stacy, A. M. (1987). Solid-state structures. *Physical Review B*, 35, 8853.
- [18] Bourdillon, A., & Bourdillon, N. X. T. (1994). *High temperature superconductors*. New York, p. 158.
- [19] Kittel, C. (1986). *Introduction to solid state physics* (6th ed.). John Wiley & Sons, Inc., p. 69.
- [20] Sheng, Z. Z., & Hermann, A. M. (1988). Superconductivity in the La–Ba–Cu–O compound system. *Nature*, 332, 138.
- [21] Kittel, C. (1986). *Introduction to solid state physics* (6th ed.). John Wiley & Sons, Inc., p. 89.
- [22] Nagamatsu, J., Nakagawa, N., Muranaka, T., Zenitani, Y., & Akimitsu, J. (2001). Superconductivity at 39 K in magnesium diboride. *Nature*, 410, 63.
- [23] Paawlowski, L. (2003). *Dépôts physiques: techniques, microstructures et propriétés*. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, p. 158.
- [24] Omer, M. A. (1972). *Elementary of solid state*. Addison-Wesley Publishing Co., p. 180.
- [25] Hass, G., & Thun, R. E. (1966). *Physics of thin films*. Academic Press, New York, p. 190.