

المواد فائق التوصيل (Superconductors)

م. د. شذى هاشم مهدي

shatha.h@ihcoedu.uobaghdad.edu.iq

م. م. رحاب نصر فاضل

rihb.n@ihcoedu.uobaghdad.edu.iq

قسم علوم الفيزياء /كلية التربية للعلوم الصرفة (ابن الهيثم)/ جامعة بغداد

بغداد – العراق 2019



تقسم المواد من حيث قدرتها على توصيل الكهرباء إلى عوازل (Insulators) مثل الخشب، وأشباه الموصلات (Semiconductors) مثل السيليكون، و موصلات (Conductors) مثل النحاس، و لكن هناك نوعاً آخر وهو مايعرف باسم الموصلات فائقة التوصيل (Superconductors). و الموصلات فائقة التوصيل سميت هكذا نظراً لأنها عند درجة حرارة معينة (منخفضة نسبياً) تصبح مقاومتها للكهرباء مساوية للصفر، وتصبح قدرتها على التوصيل فائقة جداً، إذ يسري في هذه المادة تيار كهربائي دون وجود مصدر للجهد الكهربائي. ومن المعلوم ان نقل التيار في الموصلات يتم عادة بواسطة الالكترونات الحرة ، ومصدر المقاومة في الموصلات عادة هو من تصادم تلك الالكترونات مع الكثرونات اخرى ومع الايونات والذرات التي تخرج عادة عن النظام الدوري الشبكي المنتظم للمادة ، وايضاً من التفاعل مع مايسمى بالفوتونات وهي عبارة عن كمات الطاقة الحرارية في داخل الموصلات،

ولم يخطر على بال احد ان تخرج مادة من المواد عن هذا الوضع الذي يسبب حصول مقاومة محدودة مهما كانت صغيرة ، وتم وضع نظريات كثيرة يكمل بعضها بعضاً تصف ظاهرة التوصيلية والمقاومة في الموصلات بجدارة وبكفاءة تامة، الا ان تلك النظريات التقليدية وجدت نفسها وجهاً لوجه أمام ظاهرة لم تستطع تفسيرها على الاطلاق الا وهي ظاهرة التوصيلية الفائقة.

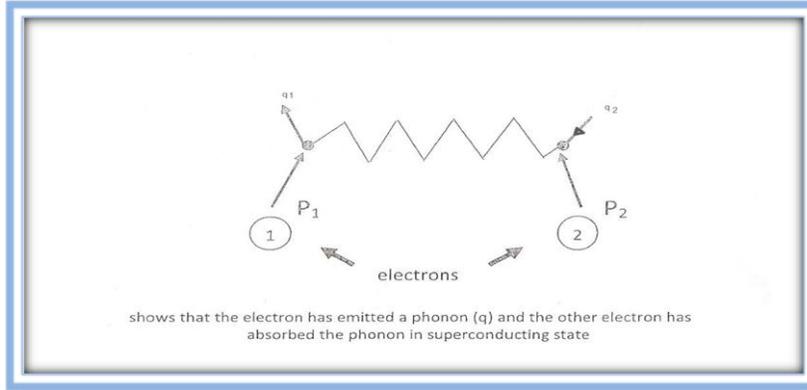
أن معظم العناصر المعدنية والمركبات والسبائك لها خاصية التوصيل المفرط عندما تنخفض درجة الحرارة لتقترب من الصفر المطلق. وان خواص المواد في حالة التوصيل المفرط بسبب التغير الحاصل في سلوك الكترونات التوصيل. ولكي نفهم سبب ظهور خاصية التوصيل المفرط لابد من معرفة الموصلية الكهربائية للمواد عند درجات الحرارة الواطئة. اي دراسة تصادم الالكترونات بالفوتونات وتأثيرها على عملية التوصيل الكهربائي عند درجة حرارة الصفر المطلق . ان هذه الدراسة أدت الى اكتشاف ظاهره انعدام المقاومة النوعية والتي تمثل احدى خواص الموصلات المفرطة ،أد تم دراسة سلوك هذه الموصلات بوجود المجال المغناطيسي لتضيف خاصية اخرى تمتاز بها الموصلات المفرطة هي الدايا مغناطيسية المثالية (perfect diamagnetism)[1]. إن ظاهرة التوصيلية الفائقة مثيرة من جميع جوانبها سواء ما يتعلق بدراستها أو ما يتعلق بتطبيقاتها. فسلوكها الكهربائي (عدم المقاومة للتيار) وسلوكها المغناطيسي (رفض المجال المغناطيسي) وهما السمات البارزتان لها؛ جعلتا منها مواد ذات تطبيقات غير محصورة. فمن المعلوم أن مقاومة التيار الكهربائي في جميع المواد العادية هي السبب في ضياع وفقدان الكثير من الطاقة الكهربائية وهي السبب أيضاً في عطل كثير من الأجهزة الكهربائية وارتفاع حرارتها. ومن جهة ثانية فالمجال المغناطيسي اعتاد على التغلغل في جميع المواد العادية بدون استثناء. وأما المواد الفائقة فمقاومتها للتيار الكهربائي تصل إلى الصفر، وهو صفر غير مبالغ فيه من الناحية العملية، ومن ناحية أخرى فالمجالات المغناطيسية لا تستطيع الدخول إلى جسم الموصل الفائق مادام بصورته الفائقة مما يبشر بتطبيقات كثيرة تعتمد على تلك الخاصية على وجه التحديد. ومن التطبيقات ما يتعلق بالنواحي العسكرية ومنها ما يتعلق بالنواحي المدنية والصحية والمواصلات وغير ذلك . ان الموصلات المفرطة تستخدم في العديد من المجالات منها صناعة الاجهزة الالكترونية ذات القدرة الواطئة ومنها مقياس شدة المجال المغناطيسي (magnetometer) والدوائر الرقمية (digital circuit) وقواطع الدائرة الكهربائية. وفي صناعة الاجهزة ذات القدرة العالية ومنها المغنايط ذات الموصلية المفرطة والتي تستخدم كثيراً في مجال البحوث بدلاً من المغنايط التقليدية وكذلك تستخدم في صناعة المولدات (generator) وفي المحركات الكهربائية[2].

نظرية التوصيل المفرط:

أن أهم نظريه لتفسير المواد الفائقة التوصيل وضع أسسها ثلاثة من كبار العلماء وهم باردين وكوبر وشريفر J. Bardeen, L. N. Cooper, and J. R. Schrieffer وعرفت باسمهم : نظرية باردين-كوبر-شريفر أو اختصاراً بـ (BCS Theory).من المعلوم أن نظرية الموصلات الفائقة تعمل على نقل التيار في الموصلات ويتم عادة بواسطة الإلكترونات الحرة، ومصدر المقاومة في الموصلات عادة هو من تصادم تلك الإلكترونات مع إلكترونات أخرى ومع الأيونات والذرات التي تخرج عادة عن النظام الدوري الشبكي المنتظم للمادة. وأيضاً بالتفاعل مع ما يسمى بالفوتونات وهي عبارة عن كمات الطاقة الحرارية في داخل الموصلات. ولم يخطر أن تخرج مادة من المواد عن هذا الوضع الذي

يسبب حصول مقاومة محدودة مهما كانت صغيرة. وتم وضع نظريات كثيرة يكمل بعضها بعضاً تصف ظاهرة التوصيلية والمقاومة في الموصلات بجدارة وكفاءة تامة. إلا أن تلك النظريات التقليدية وجدت نفسها أمام ظاهرة لم تستطع تفسيرها على الإطلاق ألا وهي ظاهرة التوصيلية الفائقة. أهم أساس قامت عليه النظرية هو فكرة الأزواج الإلكترونية (Cooper Pairs) أو أزواج كوبر نسبة إلى العالم كوبر أحد المؤسسين.

لقد أشارت النظرية إلى أن هناك قوى ترابط تنشأ بين الإلكترونات في المواد فائقة التوصيل بخلاف ما تمليه النظرية الكلاسيكية من وجود قوى التنافر لكولوم بين الإلكترونات سالبة الشحنة بحيث يحدث تجاذب بين الإلكترون ونظيره لتكوين ما يسمى بأزواج كوبر. هذه العملية تحدث نتيجة تفاعل الإلكترون مع الشبكة البلورية والتي تعمل على جعل أحد الإلكترونات كما لو كان محاط بحاجز من الشحنات الموجبة بحيث تكون أكبر بكثير من الشحنات السالبة التي يمتلكها الإلكترون الثاني. وبذلك تطغى قوى التجاذب على قوى التنافر مما يؤدي إلى تقارب الإلكترونين من بعضهما مكونين أزواج كوبر [3].



شكل (1)

ومن المعلوم أن الإلكترونات تحمل ذات الشحنة وبالتالي فحسب قانون كولوم يفترض أن تتنافر عن بعضها قدر المستطاع. إلا أن الظروف المواتية تعكس نتيجة القانون بميكانيكية خاصة لوحظت بسبب اعتماد التوصيلية الفائقة على أثر النظائر. والنظائر هي مواد لها نفس العدد الذري ولكن تختلف بالعدد الكتلي. فقد وجد أنه كلما زاد العدد الذري لنظير كلما قلت (اقتربت من الصفر المطلق) درجة تحوله. وكان في هذا دليل كاف بأن الإلكترونات المسؤولة عن التوصيلية الفائقة لا بد وأنها تتفاعل بطريقة أو أخرى مع الشبكة بحيث تكون المحصلة لصالح الإلكترونات نفسها. فجاءت فكرة الأزواج لتفسر الأمر. فعندما يمر الإلكترون الأول بين الأيونات فإنه ولزمن قصير جداً يؤدي إلى انجذابها إليه ولكنه يمر بسرعة فيتركها وهي مازالت متقاربة من بعضها مما يؤدي إلى زيادة تركيز الشحنة الموجبة لحظياً في المنطقة. تلك الشحنة المركزة بدورها تجذب إلكترونات أخرى إليها. وبهذه الطريقة يظل الجو مهيئاً لإلكترون آخر بحيث يكون الاثنان في وضع ارتباط دائم بصورة زوج. وهذا ما يطلق عليه حسب النظرية الكمية بمبدأ تبادل التفاعل من خلال الفوتون ويمكن القول بأن الإلكترون الأول يؤدي إلى اهتزاز الأيونات لصالح الإلكترون الثاني.

بالطبع الأزواج الإلكترونية تحمل شحنة مساوية إلى ضعف شحنة الإلكترون الفرد $-2e$ ولذا مغزلياً مساوياً للصفر حيث أن أحد الزوجين لفة إلى أعلى $(1/2+)$ والآخر لفة إلى أسفل $(1/2-)$ ولهما اندفاعان متضادان فيلغي بعضهما

بعضاً. وكما هو معلوم في الفيزياء الإحصائية فإن الجسيمات الأولية في تجمعها في حالة واحدة ذات ظروف متشابهة تخضع للتوزيع الإحصائي بحسب لفها المغزلي. فإذا كان اللف كسرياً فإنه يستحيل – حسب مبدأ باولي – أن يجتمع أكثر من جسيمين في حالة واحدة وتسمى الجسيمات من هذا النوع فرميونات. أما عندما يكون اللف رقماً صحيحاً بما في ذلك الصفر؛ فإنه يجوز أن يجتمع عدد غير محدود من تلك الجسيمات في نفس الحالة كما في الفوتونات التي تجتمع فتشكل أشعة الليزر. وتسمى الجسيمات من هذا النوع بالبوزونات. وبالتالي فقد توصلنا إلى أن عدداً غير محدود من الأزواج الإلكترونية يجوز أن يتكثف في حالة كمية واحدة. إن وضع الأزواج الإلكترونية جعل الشبكة لا تؤثر في حركتها على الإطلاق وبالتالي فهي تتحرك دون مقاومة. وأن تلك الشبكة باهتزازاتها هي المسؤولة عن المقاومة عند درجة حرارة الغرفة لنفس الموصل، فأذاً هي تصبح العله الكامنه وراء حصول ظاهرة التوصيل الفائق، بمجرد التبريد الى درجة حراره معينه .

وكان من جراء فكرة الأزواج الإلكترونية أن تنقسم الإلكترونات إلى جزء فائق وآخر عادي حيث يقوم الأول بجميع الأعباء الكهربائية ويمنح الموصل جميع الصفات. وتتكون فجوة في طاقة الموصل بين الحالات الحاوية للأزواج وتلك الحاوية للإلكترونات العادية. وهذه الفجوة E_g هي ميزة خاصة بالموصلات الفائقة لا يشاركها فيها غيرها. حيث تتكون فجوة في الطاقة بين الحالات المملوءة تماماً بالإلكترونات وبين الحالات الفارغة تماماً قيمتها في حدود (1meV). وهذه الطاقة تمثل الطاقة اللازمة لكسر الرابطة بين الزوج الإلكتروني. وتتنبأ نظرية BCS بالعلاقة التالية التي تربط بين طاقة الفجوة وبين درجة التحول للموصل عند درجة الصفر المطلق.

$$E_g = AT_c$$

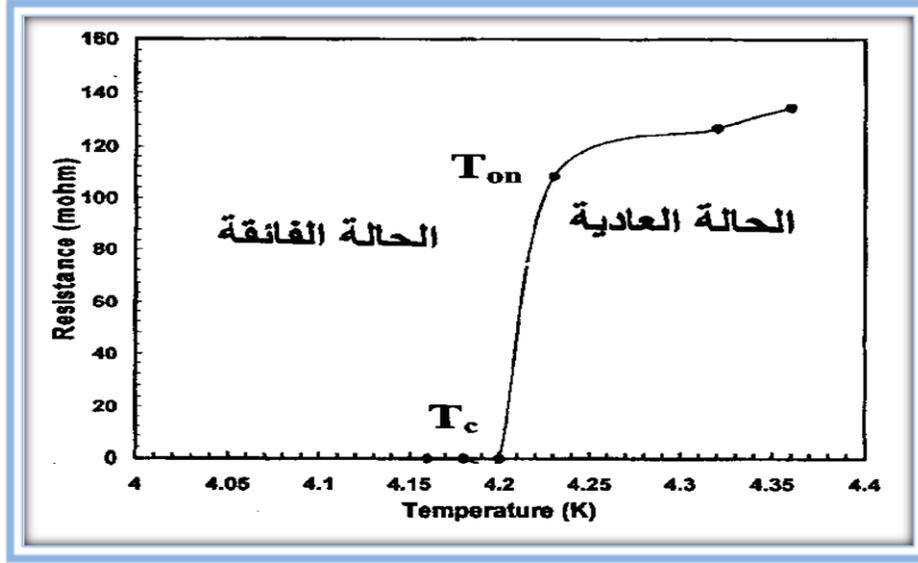
أن هذه العلاقة من اهم ما جاءتنا به النظرية انها تنص على أن فجوة الطاقه مرتبطه مباشرةً بدرجة التحول، بمعنى آخر فانه لكي نحصل على مواد فائقة التوصيل ذات تحول عالٍ فعلينا أن نوفر موصلات بطاقات فجوه كبيره، وقد أتفقت تلك المعادله مع النتائج التجريبيه للمواد الموصله الفائقة التقليديه، وهناك علاقه أخرى تتوقع قيمة للمجال المغناطيسي الحرج للموصلات الفائقة التقليديه وهي :

$$B_c(T) = B_c(0) [1 - (T/T_c)^2]$$

حيث تعبر T عن درجة الحراره و $B_c(0)$ عباره عن المجال الحرج عند الصفر المطلق، وهي مفيدة في حساب المجال الحرج الجوهري غير المتعلق بالشوائب والاخلال لان من شأن تلك الامور أن تؤثر ظاهرياً في قيمة المجال الحرج [4]. ان تلك النظريات التي وضعت في عام 1957م أستطاعت أن تفسر معظم جوانب الموصلات الفائقة التقليدية (الموصلات الفائقة واطئة الحراره) ؛ ولكنها بالتأكيد لم تستطع التغلب على الصعوبات التي واجهتها فيما يتعلق بالموصلات من الجيل الجديد (الموصلات الفائقة عالية الحرارة). لقد عجزت عن تفسير الظاهرة من أساسها، حيث كانت تتوقع استحالة الحصول على موصلات فائقة عند درجات عالية مثل 135 كلفن في حالة مركبات الزئبق. غير أن تلك الموصلات الجديدة حازت مزيداً من الاهتمام من جانب النظريين من العلماء دون التوصل الى نظريه مرضيه الى يومنا هذا . ولذلك فأنها مازالت تحمل المزيد من التحدي العلمي في هذا المجال . ففي حين نجح العلماء في جعل تلك الموصلات حقيقه قائمه، فأنهم لم يستطيعوا بعد فك رموزها . وكلما عكف العلماء على وضع نموذج جديد أصيبوا بضربه قويه من جانب التجريبيين الذين سرعان ما يعلنون عن مواد جديده أو خواص جديده

درجة الحرارة الحرجة :

ان من اهم مزايا الموصل المفرط هو تلاشي المقاومة النوعية لتصبح قيمتها صفراً عند درجة حرارية معينة T_c تدعى درجة الحرارة الحرجة (critical temperature) وهذه تختلف من معدن الى اخر [5] .



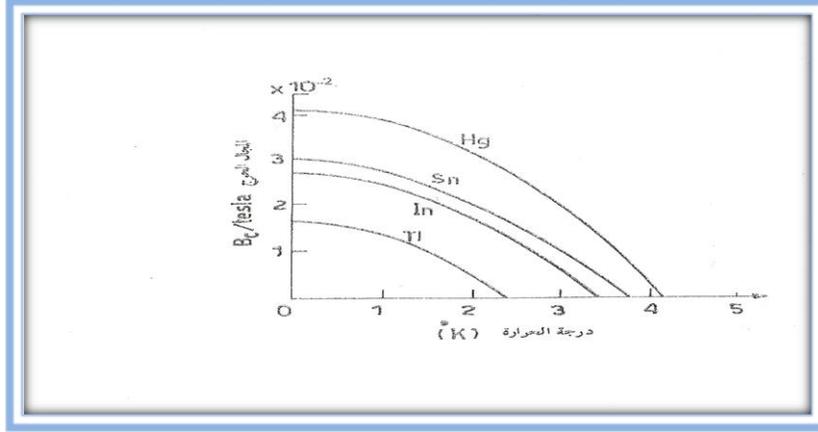
شكل (2): سلوك المقاومة الكهربائية مع درجة الحرارة للزئبق فائق التوصيل.

المجال الحرج :

يتميز الموصل المفرط بخصائصه اخرى، أضافه الى كون مقاومته تساوي صفراً بالنسبة للتيار المستمر، هي تحوله من حاله التوصيل المفرط الى حاله الاعتياديه وذلك بتسليط مجال مغناطيسي عالي يسمى المجال الحرج (critical field). ان المجال الحرج B_c يعتمد على نوعية الماده المصنوع منها الموصل ودرجة الحرارة. ان قيمة المجال الحرج B_c تصبح صفراً عند درجة الحرارة الحرجه T_c وتزداد قيمته بأنخفاض درجة الحرارة [6] .
لقد وجد عملياً ان تغير B_c مع درجات الحرارة يتبع العلاقة التاليه [7]:

$$B_c = B_0 [1 - (T/T_c)^2]$$

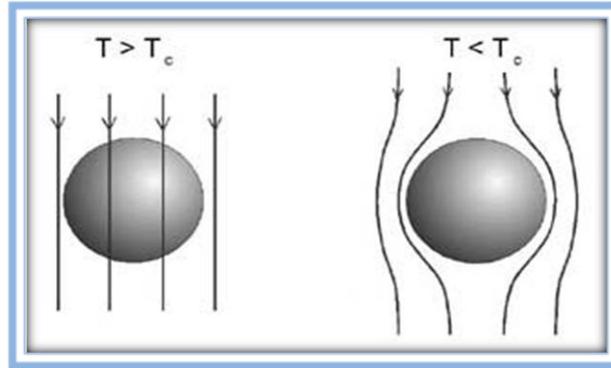
ان قيمة المجال الحرج B_c تزداد لتصبح قيمه ثابتة وتساوي B_0 عندما تصل درجة الحرارة الى الصفر المطلق $T=0K$ كما هو موضح بالشكل (3) :



شكل (3): يوضح العلاقة بين المجال الحرج B_c ودرجة الحرارة لبعض العناصر.

ظاهرة مازنر:

في عام 1933، لاحظ الفيزيائيان الألمانيان مازنر (Meissner) واوشنفيلد (Ochsenfeld) عند تسليط مجال مغناطيسي خارجي على مادة مفرطة التوصيل وتبريدها الى درجة حراره أوطأ من درجة حرارتها الحرجه T_c ان خطوط الفيض المغناطيسي B (magnetic flux) عند انتقال المادة من حالتها الاعتياديه الى حاله فرط التوصيل، لاتستطيع اختراق سمك المادة والتغلغل في داخلها ($B=0$) وينشأ رفض متبادل بين المجال المغناطيسي الخارجي والموصل المفرط التوصيل كما موضح في الشكل (4):



شكل رقم (4) : سلوك المجال المغناطيسي للمواد في الحاله العاديه والحاله الفائقه.

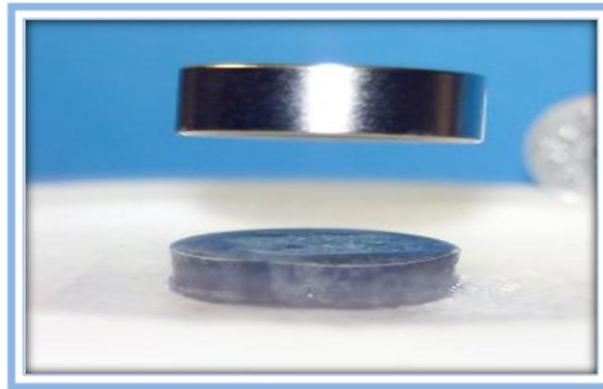
ان هذا يعني ان الموصل المفرط التوصيل يطرد الفيض المغناطيسي ويتصرف مثل ماده دايا مغناطيسييه مثاليه ذات نفاذيه مغناطيسييه (magnetic permeability) تساوي صفراً تقريباً. وتعرف هذه الظاهره بتأثير مازنر (Meissner effect). تصح هذه الظاهره فقط اذا كان المجال المغناطيسي الخارجي لايمثل القيمه الحرجه B_c ولكن عندما تزيد قيمة المجال المغناطيسي عن قيمته الحرجه أو عند ارتفاع درجة الحراره فوق درجة الحراره الحرجه T_c تزول حاله فرط التوصيل ويخترق المجال المغناطيسي ماده وتتجدد المقاوميه الكهربائيه. ان هذا يعني ان تأثير مازنر هو تأثير قابل للانعكاس (reversible) [7].

ظاهرة (أو وصلات) جوزيفه صن:

جوزيف صن أحد التلاميذ الإنجليز النابهين وكان طالباً في مرحلة الدراسات العليا عندما طلب الأستاذ من الطلاب القيام بمشاريع بحثية صغيرة. فخرج علينا هذا الطالب الذي صار بعد ذلك من أشهر العلماء وفاز بالمشاركة في جائزة نوبل في الفيزياء لعام 1973، طلع علينا بظاهرة صارت تعرف باسمه. لقد تنبأ هذا العالم أنه عندما يتم وضع موصلين فائقين بجانب بعضهما بحيث لا يفصل بينهما إلا شريحة رقيقة جداً من مادة عازلة، فإن بعض الأزواج الإلكترونية تستطيع التملص Tunneling من خلال تلك الشريحة غير الموصلة. وقد تم تأكيد تنبؤاته بعد فترة وجيزة من خلال التجربة، وبالطبع فهذه الظاهرة الكمية يمكن الاستفادة منها في عمل كثير من الدوائر الإلكترونية السريعة جداً كما في الحاسبات الآلية وكذلك في صنع كواشف للمجالات المغناطيسية المتناهية في الصغر [2].

ظاهرة الطفو (الرفع) :

من المعلوم أن الموصل الفائق هو موصل تام التوصيل و تنعدم مقاومته الكهربائية عند درجة الحرارة الحرجة. ولذا فإننا إذا أدخلنا تياراً كهربياً في حلقة من سلك فائق التوصيل فإن هذا التيار سوف يستمر في السريان لفترة طويلة طالما أن السلك يظل محتفظاً بموصلتيه الفائقة. في احدي التجارب استمر سريان التيار بدون انقطاع في حلقة من سلك فائق التوصيل لمدة عامين ونصف دون أي نقص في شدته و دون تغذية الحلقة بأي مصدر كهربائي خارجي . و لقد تم تسمية التيارات التي لا تجد أية مقاومة لسريانه في موصل فائق بالتيارات الدائمة والتي تحدث عند مجالات مغناطيسية متغيرة مما ينشأ ظاهرة الطفو المثيرة الموضحة بالشكل (5) . عند وضع مغناطيس صغير فوق موصل فائق فإن المجال المغناطيسي علي سطح الموصل الفائق يسبب تيارات دائمة تُنشئ قوي تنافر مع المغناطيس بحيث تقوي وتشتد كثيراً باقتراب المغناطيس من الموصل الفائق حتى يتم رفع المغناطيس في الهواء فيظهر وكأنه عائم في الهواء .



شكل(5): يوضح ظاهرة الطفو في المواد فائقة التوصيل.

بعض التطبيقات الهامة :

ان اكتشاف مواد فائقة التوصيل للكهرباء عند درجات حرارة مرتفعة نسبياً سوف يجعلها تدخل في تركيب جهاز ممكن تصوره .

اول هذه التطبيقات هو الحصول على وسيلة غير مكلفة لنقل التيار الكهربائي ، لان التكاليف المادية لنقل التيار عبر اسلاك النحاس مرتفعة نظراً للفقد الكبير في الطاقة على شكل حرارة متبددة نتيجة مقاومة السلك النحاسي ، كذلك اذا ماقارنا قيمة التيار الذي يمكن نقله عبر السلك النحاسي حيث تبلغ شدته 100 امبير لكل سم² بينما في السلك المصنوع من مركب ال $YBa_2 Cu_3 O_7$ تبلغ 100000 امبير لكل سم² .

كذلك فان هذه المواد لها تطبيقات عديدة في مجال الالكترونيات لما تمتاز به من قدرة عالية في فتح واغلاق الدائرة الكهربائي لتمرير التيار ومنعه . وهذا يشكل العنصر اساسي في بنية الكمبيوتر والبحث جاري الان لادخال هذه المواد في صناعة السوبركمبيوتر ، واذا ما توصل الى ذلك فان هذا سوف يؤدي الى تطوير كبير في مجال الكمبيوتر .

اما في مجال الطب فقد تم صناعة اجهزة ذات حساسية عالية للمجالات المغناطيسية المنخفضة الشدة، وتستخدم الان كبديل للمواد المشعة المستخدمة في تشخيص الامراض التي قد تصيب الدماغ والتي تبلغ شدته 10-13 تسلا ، وهذا مقدار صغير جدا لكن تلك الاجهزة قادرة على قياسه ، كذلك يمكن بدقة تحديد مصدر الاشارات العصبية الصادرة من الدماغ وايضا يمكن ان تستخدم في البحث عن المعادن الدفينة في باطن الارض وعن مصادر المياه والنفط لانها تحدث تغيرا طفيفا في المجال المغناطيسي للارض وهذا التغير يمكن التقاطه بواسطة هذه الاجهزة .

لقد فتحت التجارب في السنوات الاخيره مجالاً واسعاً للتعرف على أكثر من (30) عنصراً ومئات من المركبات تصلح لان تكون فائقة التوصيل عند درجات حراره حرجه. وتشهد ظاهرة التوصيل الفائق هذه الأيام ضجه اعلاميه وتنافساً دولياً اذ أن تطبيقاتها ستشكل ثوره حقيقيه في نهاية القرن العشرين حيث انها ستفتح افاقاً في المجالات وأهمها:

- 1- صنع قطارات تسير بسرعه هائله على وساده من المغناطيس.
- 2- صناعة الاجهزه الالكترونيه المختلفه وخاصة صناعة اجهزة حاسوب صغيره الحجم وسريعه الأداء.
- 3- صناعة أسلاك ضخمة فائقة التوصيل لنقل الكهرباء لانارة المدن مثلاً.
- 4- عمل ملفات عملاقه لكي تخزن الكهرباء.
- 5- صناعة الاجهزه ذات التوصيل الفائق والتي تستخدم في مجال البحوث بدلاً من المغناطيس التقليديه.
- 6- صناعة اجهزة خاصه لتوليد الطاقه الكهربائيه [1] .

المصادر

1. Charles P. Poole , Jr, Horacio A . Farach , Richard J. Creswick , Ruslan Prozorov , " superconductivity" , second edition , p 24 , 2007.
2. Paul A . Tipler , Ralph A. Llewly " Modren physics " fpurth edition p 488 , 2003
3. Laurent and patrick Levy " Magnetism of superconductivity " , springor , p 41 , 2000 .

4. Richard Turton " The physics of solids " , oxford , pp 249 - 250 , 2005.
5. N. B. Kopnin "Introduction to The Theory of Superconductivity"
Helsinki University of Technology, P 5 ,(2009).
6. Yuri M . Galperin " Introduction to Modern Solid State Physics " pp 306 , 395 ,
396 , 2002 .
7. Solymar L and Walsh D , " Electrical properties of Materials " , Ch . 14 , oxford
university press (1998) .