المواد فائقة التوصيل وتطبيقاتها

مقدمة عامة

إن ظاهرة التوصيلية الفائقة مثيرة من جميع جوانبها سواء ما يتعلق بدراستها أو ما يتعلق بتطبيقاتها. فسلوكها الكهربي (عدم المقاومة للتيار) وسلوكها المغناطيسي (رفض المجال المغناطيسي) وهما السمتان البارزتان لها جعلا منها مواد ذات تطبيقات غير محصورة فمن المعلوم أن مقاومة التيار الكهربي 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 الصفرحيث ان الصفر غير مبالغ فيه من ناحية،ومن ناحية اخرى 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 مما سوف نتطرق إليه في حينه.(1)

تفسير وجود حالة الناقلية الفائقة

إن مصدر المقاومة الكهربائية في المعادن هو تصادم الإلكترونات الحرة سواء مع الشبكة البلورية أم مع العيوب و الشوائب (إذ يؤدي ذلك إلى استقرار المقاومة النوعية على قيمة دنيا لا تتعلق بدرجة الحرارة)، وإن ما يُشعر بوجود المقاومة هو تغيّر متجه اندفاع الإلكترون بعد كل تصادم. أما في حالة الناقلية الفائقة فإن الإلكترونات تترابط فيما بينها لتشكل أزواجاً من الإلكترونات تدعى أزواج كوبر**Cooper pairs** ؛ إذ إن تشكل هذه الأزواج يخفض من طاقة هذه الإلكترونات. قد يبدو غريباً أن يترابط إلكترونان يحملان شحنة كهربائية من النوع نفسه، ولكن بما أن الإلكترونات تسبح ضمن شبكة بلورية فيمكن فهم هذا التزاوج كما يأتي: عند مرور الإلكترون ضمن الشبكة البلورية يولد اضطراباً ضمن هذه الشبكة و يؤدي هذا الاضطراب إلى توليد فونون (كمّ اهتزاز الشبكة) يمتصه إلكترون آخر.

يمكن فهم انعدام المقاومة في إطار هذه النظرية على أنه ناتج من أن الاندفاع الكلي لزوج الإلكترونات يبقى محفوظاً ومن ثم لا يتأثر الزوج بالتصادمات. يحدد اندفاع زوج الإلكترونات بكثافة التيار المار في الجسم، وعندما تتجاوز هذه الكثافة قيمة محددة تدعى كثافة التيار الحرج ينفصل زوج الإلكترونات و يعود الجسم إلى حالته الطبيعية.

وضعت هذه النظرية من قبل جون باردين**John Bardeen** و ليون كوبر**Leon Cooper** و جون شريفر**John Schrieffer** في عام **1957**، وهي تفسر جزءاً كبيراً من خواص المواد في حالة الناقلية الفائقة، ولكنها لم تنجح في تفسير وجود درجة حرارة حرجة أعلى من درجة حرارة الآزوت السائل.(2)

مبدأ أساسي فائقة التوصيل

التوصيل الفائق أو التوصيل المفرط هي ظاهرة تحدث في بعض المواد عند تبريدها إلى درجات حرارة منخفضة جدا تقترب من الصفر المطلق (صفر كلفن) ، حيث تسمح الموصلات الفائقة بمرور الكهرباء خلالها دون أي مقاومة كهربية تقريباً.

عادة تنخفض المقاومة الكهربية للموصلات المعدنية تدريجيا مع انخفاض درجة الحرارة، وفي حالة الموصلات العادية كالنحاس أو الفضة فإن الشوائب الموجودة في المادة تعاكس الوصول إلى حد أدنى من المقاومة في درجات الحرارة المنخفضة. ولذلك فعند الاقتراب إلى درجة حرارة تقارب درجة الصفر المطلق فإن عينة من النحاس مثلا لا يمكن أن توصل لدرجة ممانعة (مقاومة) تساوي الصفر. أما في حالة الموصلات الفائقة فإن الممانعة تنخفض على نحو

مفاجيء إلى الصفر عندما يتم تبريد المادة إلى درجة حرارة أقل من الدرجة الحرجة لهذه المادة، غالبا 20 كلفن أو أقل.

ففي حالة التوصيل المطلق يمكن لتيار كهربائي يمر في حلقة من مادة فائقة التوصيل أن يستمر في السريان إلى وقت غير محدود وبدون وجود مصدر للطاقة بعد إعطاء الدفعة الأولى. وظاهرة التوصيل الفائق ظاهرة تفسرها ميكانيكا الكم، ولا يمكن فهمها على أساس أنها تجسيد لظاهرة الموصل المثالي ضمن إطار الميكانيكا الكلاسيكية.

وتحدث حالة التوصيل الفائق في تشكيلة واسعة من المواد مثل: المواد الخفيفة كالقصدير والألمنيوم، والسيراميك والسبائك الثقيلة، وبعض أشباه الموصلات، ولكن لا يمكن صنع موصلات فائقة من المعادن النبيلة كالذهب والفضة، ولا من المعادن الفرو مغناطيسية (3)

أهمية خاصة للموصلات الفائقة عالية الحرارة(3):

1- أنها سهلة التحضير ويستطيع جميع المهتمين بالحصول عليها بيسر
2-أنها رخيصة الثمن حيث إن أكبر مكوناتها هو النحاس والباريوم والكالسيوم وهي رخيصة ومتوفرة
3- أنها تتحول فوق درجة غليان النيتروجين وهو رخيص الثمن ومتوفر في كل مكان وسهل النقل والحمل ويبقى لفترات طويلة مقارنة بسلفه الهليوم المسال
4- أن الفرق بين درجات تحولها ودرجة الوسيط المبرد (النيتروجين) كبير (في حالة مركبات الزئبق تفوق الخمسين درجة) مما يجعلها أكثر استقراراً، حيث إن ذلك الاستقرار يزيد بتزايد الفرق بين درجة حرارة العمل ودرجة حرارة التحول
5- انه يسهل تشكيلها بأشكال مختلفة مثل الرقائق والأفلام أو المواد المكدسة وكذلك وحيدة التبلور(4)

نظرية الموصلات الفائق

في حين يصح القول بأن نظرية 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 ، أقول في حين يصح القول بأن تلك النظرية التي وضعت في عام 1957 استطاعت أن تفسر معظم جوانب الموصلات الفائقة التقليدية ؛ فإنها 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، بل إنها كانت تتوقع استحالة الحصول على موصلات فائقة عند درجات عالية مثل 135 كالفن في حالة مركبات الزئبق. غير أن تلك الموصلات الجديدة حازت مزيداً من الاهتمام من جانب النظريين من العلماء دون التوصل إلى نظرية مرضية إلى يومنا هذا. ولذلك فإنها مازالت تحمل المزيد من التحدي العلمي و تعطي مثالاً للتخلف الشديد للنظرية عن التطبيق في هذا المجال. ففي حين نجحنا في جعل تلك الموصلات حقيقة قائمة؛ فإننا لم نستطع بعد فك طلاسمها. وكلما عكف العلماء على وضع نموذج جديد؛ أصيبوا بضربة قوية من جانب التجريبيين الذين سرعان ما يعلنون عن مواد جديدة أو خواص جديدة.
في هذه المقدمة المختصرة؛ دعونا نلقي بعض الأضواء على نظرية BCS . إنه من المعلوم بالضرورة أن نقل التيار في الموصلات يتم 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 الشبيكي المنتظم للمادة. وأيضاً بالتفاعل مع ما يسمى بالفونونات وهي عبارة عن كمات الطاقة الحرارية في داخل الموصلات. ولم يخطر على بال أحد 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 وجهاً لوجه أمام ظاهرة لم تستطع تفسيرها على الإطلاق، ألا وهي ظاهرة التوصيلية الفائقة.
أين ذهبت التصادمات بين الإلكترونات بعضها مع بعض؟ أين ذهبت الفونونات؟ بل أين ذهبت الحدود الشبيكية والعيوب التي لا تخلو منها في العادة الموصلات العادية؟ والتي هي السبب وراء حصول المقاومة.
أهم أساس قامت عليه النظرية هو فكرة الأزواج الإلكترونية (Cooper Pairs) أو أزواج كوبر نسبة إلى العالم كوبر أحد المؤسسين. 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 من نفس النوع ولكن تختلف في العدد الذري. 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 لابد وأنها تتفاعل بطريقة أو أخرى مع الشبيكة 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 إلكترونا آخر 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 الفونون الذي هو وجه عملة آخر للقول بأن الإلكترون الأول يؤدي إلى اهتزاز الأيونات لصالح الإلكترون الثاني.
بالطبع الأزواج الإلكترونية تحمل شحنة مساوية إلى ضعف شحنة الإلكترون الفرد –2 eولفاً مغزلياً مساوياً للصفر حيث أن أحد الزوجين لفه إلى أعلى (+2/1) والآخر لفه إلى أسفل (-2/1) 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 الشبيكة لا تؤثر في حركتها على الإطلاق وبالتالي فهي تتحرك دون مقاومة. ومن العجيب أن تلك الشبيكة باهتزازاتها هي المسؤولة عن المقاومة عند درجة حرارة الغرفة لنفس الموصل، فإذا هي تصبح العلة الكامنة وراء حصول ظاهرة التوصيل الفائق بمجرد التبريد إلى درجة حرارة معينة. 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 Eg هي ميزة خاصة بالموصلات الفائقة لا يشاركها فيها غيرها، أنظر الشكل 3. حيث تتكون فجوة في الطاقة بين الحالات المملوءة تماماً بالإلكترونات وبين الحالات الفارغة تماماً قيمتها في حدود 1 meV .وهذه الطاقة تمثل الطاقة اللازمة لكسر الرابطة بين الزوجين الإلكترونيين. وتتنبأ نظرية BCS بالعلاقة التالية التي تربط بين طاقة الفجوة وبين درجة التحول للموصل عند درجة الصفر المطلق:
حيث k ثابت بولتزمان. إن هذه العلاقة من أهم ما جاءتنا به النظرية. إنها تنص على أن طاقة الفجوة مرتبطة مباشرة بدرجة التحول. بمعنى آخر فإنه لكي نحصل على مواد فائقة التوصيل ذات تحول عال فعلينا أن نوفر موصلات بطاقات فجوة كبيرة. وقد اتفقت تلك المعادلة مع النتائج التجريبية للمواد الموصلة الفائقة التقليدية. وهناك علاقة أخرى تتوقع قيمة للمجال المغناطيسي الحرج للموصلات الفائقة التقليدية وهي:
حيث تعبر T عن درجة الحرارة و HC(0) عبارة عن المجال الحرج عند الصفر المطلق. وهي مفيدة في حساب المجال الحرج الجوهري غير المتعلق بالشوائب والأخلاط لأن من شأن تلك الأمور أن تؤثر ظاهرياً في قيمة المجال الحرج.(5)

ظاهرتا الطفو والتعليق المغناطيسيتان

نتج من جراء رفض الموصلات الفائقة للمجالات المغناطيسية وتمغنطها المعاكس ظاهرتا الطفو والتعليق على الترتيب. إن ظاهرة الطفو تحصل عندما يتم محاولة وضع قطعة مغناطيس في أعلى موصل فائق أو العكس. سوف يظل الجسم العلوي معلقاً في الهواء (طافياً) سواء كان المغناطيس أو الموصل نفسه وأما في ظاهرة التعليق فيختلف الأمر في المبدأ الذي يعتمد عليه وهو أصعب كثيراً في شرح فكرته من مسألة الطفو. في هذه الحال يتم تقريب مغناطيس دائم من قطبه الجنوبي إلى الموصل أولاً مع إرغام الأخير على عدم الحركة. يؤدي ذلك إلى تمغنطه سلباً، ثم يتم إبعاد المغناطيس الدائم بسرعة معينة. أثناء ذلك تنعكس مغناطيسية الموصل الفائق (بسبب المجال المغناطيسي المحتبس حوله) فتصبح إيجابية (شمالية) فتنجذب لقطب المغناطيس الجنوبي. إنها قصة حب لم تكتمل! لقد أوقع المغناطيس الموصل في حباله أولاً ثم انسحب فلحق به الموصل راغباً في القرب منه! إن وضع الموصل في هذه الحال مختلف تماماً عن قطعة مغناطيس بقرب مغناطيس آخر حيث يؤدي ذلك – كما هو معروف – إلى انجذاب بعضهما البعض ولصقوهما أخيراً. أما في حالة الموصل والمغناطيس؛ فتقل القوة الجاذبة لدى الموصل كلما اقترب من المغناطيس وتزيد كلما ابتعد! فيظل في مكان محدد لا يتعداه معلقاً في الهواء لا هو قادر على الاقتراب ولا على الفراق.
خاصيتان مميزتان للموصلات الفائقة لا يشاركها فيهما أي مادة أخرى عرفها الإنسان. وسوف نتحدث عن فوائد هاتين الخاصيتين عند الحديث عن التطبيقات.(6)

ظاهرة (أو وصلات) جوزيف صن:Josephson Junctions

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 الالكترونية السريعة جداً كما في الحاسبات الآلية وكذلك في صنع كواشف للمجالات المغناطيسية المتناهية في الصغر(6)

ظاهرة التكميم المغناطيسي

كما سبق فإن المواد الفائقة مثيرة في كل جوانبها. من تلك الأمور المثيرة هي ظاهرة التكميم المغناطيسي وفكرة الظاهرة أنه إذا تم صنع موصل فائق على صورة حلقة (مهما كانت متناهية الصغر) فإن مقدار المجال المغناطيسي الذي يمر من خلال تلك الحلقة يجب أن يكون مساوياً تماماً لعدد صحيح من ألكمات المغناطيسية يطلق على كل منها الرمز ϕo وتسمى أيضاً بالفلاكسويد ومعنى التكميم أنه لو تعرض الموصل إلى مجال يزيد قليلاً عن عدد صحيح من الكمات (بزيادة أقل من نصف كمة) ؛ فإن الزيادة ترفض ولا تمر من خلاله، في حين أنه لو تعرض لمجال يقل قليلاً عن عدد صحيح من الكمات بمقدار ضئيل (أقل من نصف كمة) فإنه يتكيف بحيث يكمل النقص من تلقاء نفسه من أجل أن يحافظ على العدد الصحيح من الكمات. أي لو مر مجال يساوي إلى مائة كمة مضافاً إليها ربع كمة فإن ذلك الربع يرفض ولا يمر من خلاله في حين لو كان بدل الربع نصف أو أكثر ولكن أقل من واحد صحيح؛ فإن الموصل يكمله إلى واحد صحيح! وهذا بالضرورة يقتضي أن التيار الذي يلف يزيد وينقص بمقدار ضئيل متجاوباً مع المجال الخارجي.
لقد تبين أن هذه الظاهرة ذات أهمية بالغة جداً فهي مبدأ ما صار يعرف بمجس السكويد Superconducting Quantum Interference Device (SQUID)إن السكويد (بسكون السين) عبارة عن جهاز حساس جداً للمجالات المغناطيسية وبإمكانه أن يميز التغير في المجال المغناطيسي إذا زاد عن أي بحساسية تفوق ، بمعنى آخر يستطيع قياس مجال شدته تصل إلى والتي تساوي واحد من مليون من وحدة التكميم المغناطيسي نفسها. وهي حساسية مفرطة أكبر بكثير من الإشارات الصادرة عن المخ أو القلب أو سائر الجهاز العصبي في الكائن الحي
ومجس السكويد ينقسم إلى نوعين أساسيين حيث يعتمد الأول منهما على التيار المستمر dc-SQUID في حين يعتمد الآخر على التيار ذي التردد الراديوي . rf-SQUID وفي حين ينتشر استخدام الأول على نطاق واسع بصور أفلام رقيقة من المادة الفائقة يوضع بينها مواد عازلة من أجل توفير التملص الإلكتروني فإن النوع الثاني يعمل أيضاً من الأفلام الرقيقة أو بالاعتماد على فكرة عمل خرق أو أكثر في مادة موصلة فائقة تعمل على صورة قرص مثل حبة الأسبرين. وقد وجد أنه كلما زاد عدد الخروم زادت الحساسية تبعاً لذلك. ووجود خرم واحد يعني قياس المجال المغناطيسي مباشرة في حين أن وجود أكثر من خرم يعني قياس التغير (التدرج) في المجال المغناطيسي. والفكرة الأخيرة جعلت من المجس أهمية تطبيقية عالية، فهو لا يقيس المجال العام المتوافر، بل يقيس التغير مهما كان صغيراً. والأجهزة المعتمدة على مجس السكويد صارت متوفرة تجارياً وبأسعار منافسة ويقدمها عدد من الشركات العالمية.(6)

طرد المجال المغناطيسي من داخل الموصلات الفائقة

من أهم ميزات الموصلات الفائقة قدرتها على طرد المجالات المغناطيسية من داخلها أو من الوسط الذي تحتويه. والمسألة يمكن النظر إليها بالصورة التالية: عندما يتعرض موصل ما (من النوع الديامغناطيسي) إلى مجال مغناطيسي خارجي فإن ذلك الموصل يحاول التخلص من المجال باستحداث تيارات كهربائية تلف حول سطحه تسمى بالتيارات السطحية. ومن المعلوم أن التيار الكهربي يسبب ظهور مجال مغناطيسي، وهو في حالة الموصل يكون بالضبط بعكس اتجاه المجال الأصلي (الخارجي). غير أن الموصلات العادية –كما هو معلوم – ذات مقاومة للتيار الكهربائي بما في ذلك التيارات المضادة للمجالات المغناطيسية، والنتيجة هي أن المجال المضاد يكون أقل كثيراً من المجال الخارجي، وبالتالي، يدخل الأخير في قلب وبنية الموصل، والصورة تختلف تماماً عند الحديث عن الموصل الفائق. إن التيارات المضادة في هذه الحالة لا تقابل بأية مقاومة كهربية وبالتالي فلديها القدرة على الاستجابة التامة لشدة التيار الخارجي: فتزيد بزيادته وتقل بنقصانه بحيث توجد مجالات تتساوى معه بالضبط وتضاده في اتجاهها فيسلم جرم الموصل من المجال الخارجي حسب المعادلة التالية:

$$M=-H$$

حيث تمثل الـ M التمغنط (المجال المغناطيسي المضاد) وتمثل H المجال الخارجي المطبق. و من إشارة السالب ندرك أن

التمغنط مساوٍ تماماً للمجال الخارجي ومضاد له في الإشارة.
والعجيب في الأمر أنه حتى لو كان هناك مجال مغناطيسي يتعرض له الموصل الفائق قبل تبريده، فإنه بمجرد التبريد تحت درجة التحول سوف يتم طرد المجال المغناطيسي الذي كان في داخله وتعرف الظاهرة بظاهرة مايزنار وهي أكثر وضوحاً في الموصلات من النوع الأول.

وهذا وتنقسم المواد الفائقة من حيث سلوكها مع المجال المغناطيسي الخارجي إلى قسمين رئيسيين: النوع الأول Type-I والنوع الثاني Type-II، ففي النوع الأول (معظم الموصلات التقليدية من هذا النوع) يرفض الموصل المجال الخارجي تماماً حتى الوصول إلى مجال مغناطيسي معين يسمى المجال الحرج Critical Magnetic Field ورمزه HC ، وعند هذا المجال يتم تدمير التوصيلية الفائقة تماماً ويدخل المجال المغناطيسي الخارجي إلى قلب الموصل ولا يعود الموصل بعدها إلى التوصيل الفائق مرة أخرى إلا بعد تسخينه فوق درجة تحوله ثم تبريده ثانية، حيث إن التيار المار في الموصل يحدث مجالاً مغناطيسياً، فإن هذا النوع من المواد غير ملائم لكثير من التطبيقات التي تحتاج إلى تيارات عالية، إذ إن تلك التيارات سوف تعود على الموصل بالتدمير وإنهاء خاصية التوصيل الفائق.

وأما الموصلات من النوع الثاني فهي مختلفة تماماً، إن لديها مجالين مغناطيسيين حرجين. فعند وصول المجال الخارجي إلى المجال الحرج الأول HC1، وهو عادة صغير، فإن التوصيلية الفائقة لا تفقد وإنما يتحول جزء من الموصل إلى موصل عادي. إن ذلك الجزء المتحول يظهر موزعاً بصورة بؤر منتظمة على طول وعرض الموصل بحيث يمر خط مغناطيسي واحد فقط من خلال كل بؤرة. يطلق على البؤرة الواحدة فور تكس(Vortex)، ويطلق على الموصل الذي هو في الحالة الجامعة للتوصيل الفائق والعادي بأنه في الحالة المختلطة .Vortex State إن عدد البؤر الطبيعية تزداد كلما زاد المجال المغناطيسي الخارجي وتستمر في الزيادة حتى يأتي المجال على الموصل بكامله محولاً إياه إلى موصل عادي عند المجال الحرج الثاني .HC2 وهذا المجال الثاني كبير جداً إذا ما قورن بالمجال الحرج للموصلات من النوع الأول ويصل إلى عشرات التسلا، وحيث إن جميع الخواص المميزة للتوصيل الفائق تظل موجودة أثناء الحالة المختلطة، وأن تلك الحالة تستمر إلى حصول مجالات عالية جداً، صار هذا النوع من الموصلات مرشحاً لتطبيقات كثيرة جداً بغض النظر عن شدة التيار اللازمة، ومشكلة بسيطة حصلت بسبب الحالة المختلطة وهي أن تلك البؤر تبدأ في الحركة عندما يمر التيار بقربها بسبب قوة لورانتس محدثة ضياعاً في الطاقة، وبالتالي مدمرة للموصل نفسه. غير أن تلك المشكلة تم التغلب عليها بدراسة خواص الموصلات ووضع إسفينات خاصة تمسك بالبؤر كل إسفين يمسك بواحدة. تلك الإسفينات ويطلق عليها Pinning Centers تقوم بدور مهم وهو منع البؤر من الحركة، وزرع الإسفينات في الموصل يتم عادة بطرق كثيرة منها الإشعاع النيوتروني العمودي ومنها إضافة مواد معدنية على شكل مساحيق تخلط مع المادة الموصلة أثناء التحضير وغير ذلك الكثير من الطرق.
جميع الموصلات الفائقة عالية الحرارة تعد من النوع الثاني، ومن أهم فوائد الطرد المغناطيسي الاستفادة من الموصلات من هذا النوع في صنع دروع مغناطيسية توفر مناخاً خالياً من المجالات المغناطيسية، وبالتحديد فقد أمكن الحصول على دروع تصل قدرتها على العزل إلى

(7)180 db.

خواص الموصلات الفائقة

1ـدرجة الحرارة الحرجة

عند درجة حرارة معينة تعرف بدرجة حرارة التحول (الدرجة الحرجة) تصبح مقاومة هذه المواد للتيار الكهربى مساوية للصفر. وقد كان الإعتقاد السائد أن الدرجة الحرجة لجميع المواد فائقة التوصيل هي درجة حرارة موحدة تقدر بـ 273-م ولكن بعد إجراء التجارب اتضح أن درجة التحول تختلف باختلاف المادة الموصلة كيميائيا فمثلا الزئبق يصل الى المقاومة الصفرية في درجة حرارة -269م وهو ما غير المفهوم العام للموصلات وفتح المجال للبحث عن مواد يمكن أن تصل الى مقاومتها الصفرية في درجة حرارة الغرفة 25م مما يمكننا في استخدامها في مجالات كثيرة

2ـظاهرة تأثير ميسنر (التنافر المغناطيسي)

تم اكتشاف هذه الظاهر عن طريق الصدفة من قبل عالمين ألمانيين عندما كانا يقومان بقياس انتشار التيّار الكهربائي في عينة صغيرة مبردة من الرصاص ومعرضة لحقل مغنطيسي.

المبدأ الفيزيائي للظاهرة

اكتشف أن هذه المواد عند درجة حرارة التحول حساسة جداً للمجال المغناطيسى، حيث تنفر المجال المغناطسيى الخارجى حيث تعكس المجال المغناطيسى مهما ضعفت شدته.

وتفسير ذلك أنه اثناء إنتقال المادة من الحالة العادية الى حالة المقاومة الصفرية (التوصيل الفائق) فإنها تنشأ خلال العملية تيارات سطحية بسب التغييرات المفاجئه للروابط الذرية والجزيئية في المادة الموصلة تؤدي هذه التيارات الى إلغاء المجال المغناطيسي داخل الموصل وعليه ينشأ تأثير مغناطيسي عكسي على أي جسم معناطيسي يقترب من الموصل .

هاتان الخاصيتان فتحت الأبواب أمام العلماء لاستغلالها فى ابتكارات واختراعات ذات كفاءة عالية تدخل فى معظم مجالات العلوم والتكنولوجيا، حيث أن هذه المواد سوف تحل محل أنصاف الموصلات التى تدخل الأن فى صناعة الترانزيستور و الدوائر الالكترونية المتكاملة.(8)

التطبيقات فائقة التوصيل(APPLICATIONS OF SUPERCONDUCTORS)

1- المواصلات: وفي القطارات على وجه الخصوص

هل تستطيع تصور قطار يطير في الهواء كما تفعل الطائرة ويسير بسرعة كسرعتها؟ نعم إنه القطار الطافي. إن من شأن الاستفادة من ظاهرة الطفو المغناطيسي أو التعليق أن توفر قطارات معلقة في الهواء، وبالتالي فهي تسير بدون احتكاك مما يعطي توفيراً هائلاً في الطاقة من جهة ويوفر سرعات كبيرة إلى جانب التخلص من الضوضاء. ثم إن تلك القطارات سوف تكون مريحة جداً وخالية من المطبات لأنها تسير على وسادة هوائية، حيث يرتفع القطار حوالي عشرة سنتيمترات عن المسار. والقطار يحوي المواد فائقة التوصيل في حين تتوفر المغناطيسات الكبيرة على الطريق. وفي داخل القطار يتوفر جهاز تبريد، وهذا الجهاز هو كل ما يلزم حيث يستفاد من قوة التنافر مع المغناطيسات نفسها في دفع القطار وتسييره بسرعات تزيد على 500 كم في الساعة.

2- عجلات الطاقة

عندما يدور قرص ضخم الكتلة حول محوره فإنه يقال إن لديه طاقة حركية، ولديه الاستعداد للتخلي عن تلك الطاقة لصالح شيء آخر متى ما لزم الأمر. لقد تمت الاستفادة من هذه الفكرة في تخزين كمية كبيرة من الطاقة في عجلات ضخمة الكتلة تدور بسرعات عالية جداً وتحفظ في داخل كبسولات خاصة، أستفيد منها ولوقت طويل في تحريك القطارات خاصة. غير أن المشكلة التي كانت تقابل دائماً هي أن الاحتكاك الداخلي يستمر في استنزاف الطاقة الحركية مع مرور الزمن، غير أن الاستفادة من ظاهرة الطفو المغناطيسي يجوز أن تمكنا من صنع عجلات دوارة في جو خال من الاحتكاك تماماً مما يجعلها تحتفظ بطاقتها إلى الأبد، وهكذا جميع الحركات والآلات يمكن أن تستفيد من الظاهرة في أن تكون لا احتكاكية مما يقلل الحاجة إلى كثير من الصيانة والأعطال ويجعل عمرها يتضاعف إلى عدة مرات.

3-التطبيقات العسكرية

إن قدرة الموصلات الفائقة على طرد المجالات المغناطيسية جعلت منها مرشحة لاستعمالها في الرادارات العسكرية. فمن المعلوم أن دقة الصور التي يوفرها الرادار تعتمد على قدرته على التحليل غير أن تلك القدرة تتأثر سلباً بالمجالات المغناطيسية المجاورة سواء الأرضية أو غيرها. وحتى تتصور المشكلة راقب ما يحصل لجهاز التلفاز عندما يتم تشغيل جهاز كهربائي يعتمد على التيار المتردد، إن الصورة سوف تصاب بالتشوش والسبب هو المجالات المغناطيسية المجاورة والتي أفسدت الجو على حركة الإلكترونات المهبطية التي هي المسؤولة عن الصورة. وهذا هو ما يحصل مع الرادار بالضبط غير أن الأخير أكثر حساسية بشكل كبير، وقد تم الاقتراح باستعمال الدروع المغناطيسية لحل هذه المشكلة. والدروع المشار إليها عبارة عن اسطوانات ذات مقاسات مختلفة مصنوعة من المواد فائقة التوصيل، يوضع بداخلها مصدر الإلكترونات المهبطية فيحميها من المجالات الخارجية ويجعل الصورة الرادارية غاية في الوضوح.

وأيضاً فمن التطبيقات العسكرية استخدام كاشف السكويد للكشف عن أدق الأعطال المتمثلة في الشقوق والشروخ في أجسام الطائرات العسكرية والمدنية على حد سواء، والطريقة تسمى بأسلوب الكشف غير الضار (Non Destructive Testing NDT) وللكاشف القدرة التامة للكشف عن عيوب فنية أو شروخ في داخل أجسام الطائرات ولو كانت متوغلة في عمق يزيد كثيراً عن عشرة سنتيمترات.

4- التطبيقات الطبية

يمكن الاستفادة من نفس الدروع التي سبقت الإشارة إليها في تطبيقات طبية كثيرة، وبصورة عامة فإنه عندما يراد دراسة الإشارات الكهربائية والمغناطيسية الصغيرة جداً المتولدة من المخ أو القلب أو الجهاز العصبي، فإنه يفضل توفير جو خالٍ من المجالات المغناطيسية الخارجية التي تكون عادة أكبر كثيراً من تلك الإشارات. وقد تم الاستفادة بنجاح في بعض المناطق كما في اليابان من خاصية الدروع المغناطيسية، مما وفر قدرات فائقة على قراءة الإشارات الصغيرة المشار إليها مما يوفر مزيداً من التشخيص لتلك الأعضاء الحساسة من جسم الكائن الحي

إذا تمت الاستفادة من قدرة كاشف السكويد الهائلة لقراءة المجالات المغناطيسية المتناهية في الصغر مع استخدام الدروع المغناطيسية، نكون بذلك وفرنا جهازاً متكاملاً يمكن أن يحل محل الأجهزة المستخدمة حالياً ويفوقها من حيث الدقة. وقد تم بالفعل استخدام الكاشف عندما وضعت مجموعة كبيرة منها بشكل نصف كروي تغلف رأس المريض، وصل عدد السكويدات في المجوعة الواحدة إلى 64 في بعض التجارب.(9)

الاستخدامات

ويستخدم التوصيل الفائق في المجال الكهرومغناطيسي. وقد تمكن الباحثون من تطوير مغانط فائقة التوصيل، تستخدم كهرباء أقل من المغانط الكهربائية العادية. وقد مكَّنت مغانط التوصيل الفائق علماء الفيزياء من إنشاء معجِّل جسيمات أكثر فاعلية، وهي أجهزة تزيد سرعة جُسَيمات الذرة. انظر معجل الجسيمات.

ويبحث العُلماء اليوم الاستخدامات الممكنة للمواد الجديدة فائقة التوصيل عند درجة حرارة عالية. فهم مثلاً يجرون اختبارًا على جهاز مفتاح فائق التوصيل يضبط الدوائر الكهربائية في الحاسوب. وتعمل هذه الأجهزة بسرعة فائقة ولا تُنْتِج أي حرارة تقريبًا. وقد يكون التوصيل الفائق مفيدًا لتوصيل الكهرباء. فخطوط القدرة المصنوعة من المواد فائقة التوصيل يمكن أن تحمل تيارًا عبر مسافات بعيدة دون فقدان أي قدرة بسبب المقاومة الكهربائية. وخطوط القدرة هذه يمكن أن توفِّر كميات كبيرة من الطاقة. وإضافة إلى ذلك، فهي تسهل اختيار مناطق لمحطات القدرة بحيث يكون تأثير تلك المحطات على الناس وعلى البيئة قليلاً.

وهنالك العديد من المشاكل التي يجب حلها قبل الاستخدام التجاري للموصلات الفائقة عند درجات الحرارة العالية. ويصعب تصنيع معظم الموصِّلات الفائقة الخزفية. ونجد الخزف أيضًا مادة سريعة الانكسار وليس من السهل تصنيعها في هيئة أسلاك. ولكن طور الباحثون أشرطة رفيعة مرنة تستطيع حمل تيارات كبيرة.

وتشرح نظرية ((BCS كيفية حدوث التوصيل الفائق في المواد الخزفية، إلا أنه لم يُقترح بعد نظرية كاملة حول هذه الظاهرة. (10)

معجلات الجسيمات

مع تطور معجل الجسيمات خلال النصف الأول من القرن العشرين، بدأ الفيزيائيون في الخوض وبعمق في خصائص الجسيمات دون الذرية .وأول محاولة ناجحة لتسريع الالكترونات باستخدام الحث الكهرومغناطيسي كانت عن طريق جهاز بيتاترون الذي أنشأه دونالد كريست سنة 1942. ووصلت طاقته الأولية حوالي 2.3 MeV في حين وصلت طاقة البيتاترون التالية إلى 300 MeV. ثم اكتشف الإشعاع السنكروترونى سنة 1947 بطاقة 70 MeV في شركة جنرال إلكتريك. وكانت عملية تسريع الإلكترونات والتي قاربت سرعتها من سرعة الضوء خلال مجال مغناطيسي هي السبب في ظهور هذا الإشعاع

وفي سنة 1968 بدأ العمل بأدون وهو أول مصادم جسيمات ذو شعاع طاقة عالي تساوي 1.5 GeV . وهو أداة لتسريع الإلكترونات والبوزيترونات بإتجاهين متضادين، وذلك لمضاعفة الطاقة الفعالة من اصطدامهما عند مقارنة ضرب إلكترون بهدف ثابت .وخلال الفترة من 1989-2000 أعطى مصادم الكترون-بوزيترون الكبير (EN) ((LEPفي سرن طاقة شعاع 209 GeV وصنع قياسات مهمة للنموذج القياسي لفيزياء الجسيمات.(10)

المواد ذات الناقلية الفائقة

يمكن التمييز بين نوعين من المواد ذات الناقلية الفائقة، وذلك بحسب سلوكها عند تعرضها لحقل مغنطيسي

يتميز النوع الأول type I superconductor بأنه عند تعرضه لحقل مغنطيسي يطرده إلى الخارج إلى أن تبلغ شدة هذا الحقل قيمة تدعى الحقل الحرج Hc، يسمح عندها بدخول الحقل إلى داخل المادة دفعة واحدة.

أما النوع الثاني type II superconductor فإنه يطرد الحقل المغنطيسي حتى تبلغ شدته قيمة تدعى الحقل الحرج السفلي Hc1، يبدأ عندها الحقل بولوج المادة جزئياً، وذلك على شكل كمّات من التدفق تدعى الدوامات المغنطيسية vortex. ويزداد عدد هذه الكمّات ضمن المادة كلما ارتفعت شدة الحقل إلى أن تبلغ قيمة الحقل الحرج العلوي Hc2 الذي تفقد المادة عنده حالة الناقلية الفائقة لتعود إلى الحالة الطبيعية

عند مرور تيار ضمن ناقل فائق من النوع الثاني فإن هذه الدوامات تتحرك باتجاه معامد لاتجاه التيار، وتولد هذه الحركة حقلاً كهربائياً باتجاه التيار المار يشعر بوجود مقاومة كهربائية ضعيفة. في الحالة العملية تكون الدوامات ملتصقة بعيوب ضمن المادة، ومن المعروف في علم المواد أنه يمكن تقليل كمية العيوب ضمن مادة معينة ولكن لا يمكن تحضير مادة من دون عيوب، ومنه فإن الدوامات تجد دائماً ما تلتصق به(11)

أنواع الموصلات الفائقة

تقسم الموصلات الفائقة حسب درجة حرارتها الحرجة إلى
1-المواد فائقة التوصيل منخفضة الحرارة (Low temperature superconductor) واختصارا (LTC) وتسمى أيضا المواد فائقة التوصيل التقليدية مثل الزئبق وتمتاز بانخفاض درجة حرارتها الحرجة.
2-المواد فائقة التوصيل عالية الحرارة (High temperature superconductor) واختصارا (HTC) وتمتاز بارتفاع درجة حرارتها الحرجة.
وتقسم المواد الفائقة التوصيل حسب مجالها الحرج إلى:
1-موصل فائق من النوع الاول :(Type I) من خصائص هذا النوع عندما تتجاوز قيمة المجال المسلط المجال الحرج فأن الموصل يتحول كليا إلى الحالة الاعتيادية و تصبح قيمة العزم المغناطيسي صفرا وبهذا يتمكن المجال الخارجي من اختراق الموصل بصورة كلية.
2-موصل فائق من النوع الثاني :(Type II) يتميز بوجود قيمتين للمجال الحرج القيمة الأولى و هي اقل قيمة لنرمز لها B^1 و القيمة الثانية وهي أعلى قيمة لنرمز لها B^2 فإذا تجاوزت قيمة المجال المسلط B^1 ولم تتجاوز B^2 سيكون الاختراق جزئي للموصل وسوف لن يتحول الموصل إلى الحالة الاعتيادية بل سيكون في حالة جديدة تسمى الحالة المختلطة ، أما إذا تجاوزت قيمة المجال المسلط القيمة B^2 فسيتحول الموصل إلى الحالة الاعتيادية لان المجال سيخترقه بصورة كلية.(12)

مزايا فائقة التوصيل (Advantages of Superconductors):

هناك عدد من المزايا لاستخدام أكثر من الموصلات فائقة التوصيل العادية

الميزة الأولى والأكثر وضوحا هو الخسائر ضئيلة الطاقة التي تحدث في الموصلات الفائقة على عكس الموصلات العادية. فإنه يصبح أكثر تكلفة وكفاءة في استهلاك الطاقة للغاية إذا يمكن تشغيلها الأجهزة الكهربائية مع عدم وجود مقاومة لتدفق الإلكترونات. وهم بالتالي قادرا على تحمل تيارات كبيرة لفترة طويلة مع خسائر ضئيلة الطاقة في شكل حرارة. في جميع التجارب التي أجريت حتى الآن ، قامت التيارات فائقة لسنوات مع عدم وجود خسائر للتسجيل. لديهم أيضا القدرة على السماح للأجهزة الإلكترونية لتعمل بشكل أسرع بكثير ، ومركبات النقل ، مثل القطارات ، لتصل إلى سرعات تصل إلى 581 كلم

الميزة الثانية هو قدرتها على العمل في درجة حرارة أعلى بكثير من الحرج موصل جيد للكهرباء نتيجة لهذه الميزة ، وكثير غيرها على تدفق منه. وكان وكيل التبريد المستخدمة قبل عام 1986 الهليوم السائل ، وهي مكلفة ولكن المبرد الخيار الواقعي الوحيد نظرا لدرجات حرارة منخفضة الحرجة من الموصلات الفائقة من النوع 1. أصبحت فائقة ومع ذلك ، عندما تم اكتشاف أول نوع موصل جيد للكهرباء التي كان لها و أن درجة الحرارة الحرجة من النيتروجين السائل (77 ك) ،. النيتروجين السائل هو حوالي 20 مرة أكثر فعالية كمبرد من الهليوم السائل وحوالي 1 / 10 ومكلفة ، مما يجعل الموصلات الفائقة من النوع 2 أكثر فعالية من حيث التكلفة من الموصلات الفائقة التقليدية. ويبين الجدول 1 قائمة على كل من النوع 1 والنوع 2 ودرجات حرارة فائقة التوصيل انتقاداتهم منها. كما تم اكتشاف أنه يمكن جعل

بعض الموصلات الفائقة من النوع 2 من العناصر الأرضية النادرة. هذه الخصائص لا يكون لها عدد من المزايا في المستقبل المنظور لشبكات الكهرباء ، والمحركات والمولدات وأجهزة الكمبيوتر التي سيتم التعامل معها أدناه

الجدول 1 -- درجة الحرارة الحرجة من مختلف الموصلات الفائقة.

مادة	نوع	Tc(K)
الروديوم	1	3.25×10^{-4}
زنك	1	0.88
الالمنيوم	1	1.20
قصدير	1	3.72
زئبق	1	4.15
قيادة	1	7.20
النيوبيوم-الجرمانيوم	1	23.2
YBCO ($YBa_2Cu_3O_7$)	2	92
الثاليوم-الباريوموالنحاس اوكسيد الكالسيوم	2	125
$HgBa_2Ca_2Cu_3O_8$	2	133

ويمكن اختصار هذه المزايا بأنها :

1-سهلة التحضير.
2-رخيصة الثمن نسبيا"
3-تتحول فوق درجة غليان النيتروجين وهو رخيص الثمن وسهل الحمل والنقل والحفظ.
4-الفرق بين درجات تحولها ودرجة الوسيط المبرد(النيتروجين)كبير مما يجعلها أكثر إستقرارا".
5-يسهل تشكيلها بأشكال مختلفة مثل الرقائق والأفلام أو المواد المكدسة.(13)

فوائد الموصلات الفائقة

الفائدة أولا من ناحية الطاقة ، ثانيا من ناحية تطبيقات عظيمة ،فإذا وصلنا إلى مادة جديدة لها خاصية الفائقية فى التوصيل الكهربي و ذلك عند درجة حرارة الغرفة ؛فنحن بذلك نوفر كثيرا من الطاقة والجهد المبذولين من أجل التبريد والانتقال بالمادة إلى هذه الحالة،، بداية من خواص المادة فائقة التوصيل أنها تفقد كامل مقاومتها الداخلية للتيار الكهربي ، وعند مرور تيار كهربي بين نقطتين نحن نحتاج لوجود فرق فى الجهد ؛حتى نتغلب على مقاومة المادة الموصلة ، و حين نقول أن كامل مقاومتها الداخلية غير موجودة .ستستنتج أننا إذا قمنا بإزالة فرق الجهد الخارجى سيستمر مرور التيار الكهربى لعشرات السنين،حيث ان فى ظاهرة مايسنر :عندما تقرب مغناطيسا دائما من حلقة معدنية فى حالة التوصيل الفائق ،ستقطع المادة خطوط الفيض المغناطيسى للمغناطيس الدائم ، ويتولد بها بالحث تيار كهربى ، وعند مرور هذا التيار الكهربى فى الحلقة سيولد بدوره مجالا مغناطيسيا معاكسا للمجال المؤثر فيتنافران ؛ وبالتالى يرتفع المغناطيس ، وطالما ظلت القطعة المعدنية فى حالة التوصيل الفائق سيظل المغناطيس معلقا..متخيل؟!..الآن ماذا

فعلنا نحن ؟؟نحن أنشأنا قوة جديدة لأعلى تغلبت على وزن المغناطيس الأسفل بشكل دائم..أطلق لخيالك العنان ..ألا يمكننا أن نرفع قطارا ونتغلب على قوة الاحتكاك كما حدث فى اليابان ، لكننا بالمادة الجديدة سنوفر كثيرا من الطاقة اللازمة للتبريد، ثم ألا يمكننا أن نرفع روبوت مثلا ونجعله يسير على الماء أى أننا سنلغى قوة وزنه إلى أسفل بهذه الظاهرة، فتصبح قوة الطفو هى المسيطرة ، ثم ألا يمكنك أن ترفع الحاسوب الذى تعمل عليه الآن بدون وجود للمكتب ، ألا تتوقع أن خاصية مثل هذه لو توفرت فى درجات الحرارة العادية سوف تصبح ملهمة لاختراعات واختراقات عديدة ؟...الشىء الثانى أن المادة الفائقة التوصيل لها خواص أخرى مذهلة ،وهي قدرتها على التقاط أضعف الإشارات الكهرومغناطيسية (تستخدم فعليا فى الأقمار الصناعية) ..تخيل أيها الفيزيائى العربى أننا طورنا هذه التقنية ليصبح جوالك أو مستقبل القنوات الفضائية يعمل بهذه المادة ..أما عن تأثير ارتفاع درجة الحرارة على هذه المادة فأقول بأنه من المفترض أن يُحدد المدى الطبيعى لانخفاض وارتفاع درجة الحرارة و يوضع فى الاعتبار اثناء محاولة الوصول إلى التركيب الكيميائى لهذه المادة الجديدة ، بمعنى أنها إذا وجدت هذه المادة فلن تتأثر تأثرا ملموسا حتى إذا بلغ الارتفاع فى درجة الحرارة المدى الأقصى لها ،كما أننا يمكننا ان نحمى المادة من الارتفاع الطفيف فى درجة الحراة باستخدام عوازل حرارية مناسبة ..كما أعتقد أن الفرق بين 25 درجة سليزية إلى درجة تفوقها بخمس أو عشر أو عشرين درجة ليست مشكلة ..المهم أولا أن نبدأ العمل فى المنطقة الموجبة لدرجات الحرارة السليزية .(14)