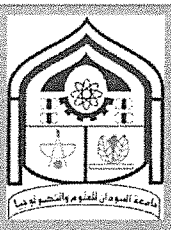
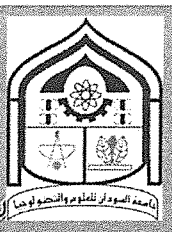



بسم الله الرحمن الرحيم

جامعة السودان للعلوم والتكنولوجيا

كلية العلوم - قسم المختبرات العلمية

بحث تخرج تكميلى لنيل درجة البكالوريوس فى المختبرات العلمية-الفيزياء

بعنوان :

الموصلية الفائقة

Superconductivity

إعـــــداد

الامام الجيلي الامام عبد الرحمن

محمد فتح الرحمن موسى فرحان

معتز محمد الحسن عيسى محمد

إشـــــراف

د.احمد الحسن الفكى عيسى

2016

الآية

قال تعالى:

﴿ وَقُل رَّبِّ زِدْنِي عِلْمًا ﴾

صدق الله العظيم
سورة طه، الآية (114)

اهدي...

نجاحي وباقة ورد معطر الي.....

من ساهم في وصولنا لطريق النهاية .....

الي من علمني شئيا جديد وغذي فكري بالعلم والمعرفة

الي كل من وقف بجانبنا وساعدنا في كل المصاعب

الي كل اساتذتنا ودكاترتنا في الجامعه ..

الي من جرع الكأس فارغا ليسقيني قطرة حب .... الي من كلت أنامله ليقدم لنا لحظة سعادة

الي من حصد الأشواك عن دربي ليمهد طريقي..... الي القلب الكبير

((أبـــــــــــــــــــــــــــــي))

الي من أرضعتني الحب والحنان .. الي رمز الحب وبلسم الشفاء .. الي القلب الناصع بالبياض

((أمـــــــــــــــــــــــــــــي))

الي سندي وقوتي ملاذي بعد الله ..الي من علموني علم الحياة .. الي من أظهرو لي ماهو

أجمل من الحياة

((اخـــــــــــــــوتي))

الي من كانو ملاذي و ملجئ ... الي من تذوقت معهم أجمل اللحظات ...

الي من سافتقدهم ..... واتمني ان يفقدوني

الي من جعلهم الله أخوتي بالله .... ومن احببتهم باللة

((اصـــــــــــــــدقائي و زمـــــــــــــــلائي))

الشكر والعرفان

لابد لنا ونحن نخطو خطواتنا الأخيرة في الحياة الجامعية من وقفة نعود الي اعوام قضيناها في رحاب الجامعة مع أستاذتنا الكرام الذين قدموا لنا الكثير باذلين بذلك مجهود كبيرة في بناء جيل

الغد لتبعث الأمة من جديد.....

وقبل ان نمضي نقدم أسمي أيات الشكر والامتنان والتقدير والمحبة الي الذين حملو أقدس رسالة في الحياة ... الي الذين مهدو لنا طريق العلم والمعرفة ....الي جميع أساتذتنا الأفاضل ....

" كن عالما..... فأن لم تستطع فكن عالما ... فأن لم تستطع فأحب العلماء

فإن لم تستطع فلا تبغضهم "

وأخص بالتقدير والشكر:

الدكتور/احمد الحسن الفكي

لمساعدتنا علي أتمام هذا البحث وقدمو لنا العون ومدو لنا يد المساعدة وذودونا بالمعلومات

اللازمة لأتمام هذا البحث..

فكانوا لنا نورا يضئ الظلمة التي تقف احيانا في طريقنا ...وهم من زرعوا التفاؤل في قلوبنا

وقدمو لنا المساعدات والتسهيلات والافكار

لهم منا كل الشكر والامتنان

المستخلص

في عام 1911م عندما كان العالم اونيس يقبس مقاومة الزئبق المتجمد عند درجة حرارة بالقرب من الصفر المطلق . قد وجد ان المقاومة تنخفض بشكل كبير عند درجة 4.15 ك وتصبح المادة عند درجة الحرارة الاقل من هذه الدرجة الحرجة (T_c) موصلية فائقة . ثم بعد ذلك وجدت مواد اخرى تتمتع بتلك الخاصية . وبالإضافة الى ذلك فقد وجد ان بعض السبائك والمركبات السيراميكية تظهر موصلية فائقة عند درجات حرارة اعلى بكثير من تلك التي تظهر عندها في الفلزات النقية .

تمت الاستفادة من خواص هذه المواد الجديدة في التقنيات الحديثة في المجالين البحثي والصناعي ونأمل ان يكون هناك تطبيقات ملموسة قادم الايام .

Abstract

In 1911 when Onice was measuring the resistance of frozen mercury at temperature that almost reach the zero kelven , he noticed that the resistance is decreasing at 4.15k. And the substance at this degree become superconductivity at critical temperature .latrely they found other substances have the same property in addition to this there many alloys and ceramic compounds behave the same way at higher temperature than the pure metals.

This properties are used in new technology in two fields :

Research and manufacture .and we hope to have great application in the future.

الفهرست

الموضـــــــــوع	رقم الصفحة
الآية	أ
الإهداء	ب
الشكر والعرفان	ج
المستخلص	د
Abstract	هـ
الفهرست	و
الفصل الأول: المقدمة	
1-1 مقدمة	1
1-2 تاريخ الموصلات الفائقة	1
1-3 أهمية خاصة للموصلات الفائقة عالية الحرارة	2
1-4 الهدف من البحث	5
1-5 مشكلة البحث	5
1-6 الدراسات السابقة	5
1-7 ترتيب فصول البحث	5
الفصل الثاني: الموصلية الفائقة	
2-1 مقدمة تاريخية	6
2-2 أنواع الموصلات الفائقة Super Conductor Types:	6
الفصل الثالث: الأسس النظرية للتوصيل الفائق superconductivity Theory	
3-1 تكوين ازواج الالكترونات	9
3-2 معادلة لندن :London's Equation	12
3-3 النظرية الميكروسكوبية المجهرية للتوصيل الفائق	14
الفصل الرابع: تطبيقات الموصلية الفائقة	
4-1 تطبيقات الموصلية الفائقة	17
4-1-1 مجال الطب	18
4-1-2 الكواشف	18
4-2 منع انتشار الأسلحة النووية	23
4-3 تحليل الشوائب الميكروبية	24
المراجع	25

الفصل الأول

المقدمة

الفصل الأول

1-1 مقدمة

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 وفقد 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، مع أن البعض ذكر أنه ربما توجد مقاومة في حدود شكل 1. 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 مما سوف نتطرق إليه في حينه.

2-1 تاريخ الموصلات الفائقة

في عام 1908 م نجح العالم الهولندي الشهير هيك كامرلين أونيس في ضغط ثم إسالة غاز الهليوم الذي يتحول من الحالة الغازية إلى السائلة عند درجة 4.2 كالفن (-268 درجة مئوية) وبعدها بثلاث سنوات وأثناء دراساته على مقاومية بعض العناصر، لاحظ انعدام المقاومة لمادة الزئبق النقي عندما تقترب درجة حرارته من الصفر المطلق .وقد استحق هذا العالم جائزة نوبل في الفيزياء بسبب هذين الاكتشافين. واصطلح بعد ذلك على تسمية درجة الحرارة التي تفقد المادة عندها مقاومتها وتتحول من مادة عادية إلى موصل فائق بدرجة حرارة التحول (Critical Temperature)، أو اختصاراً بدرجة التحول ويرمز لها بالرمز . TC وأطلق على تلك المواد بالمواد فائقة التوصيل. وبعد هذا الاكتشاف استمر العلماء بالبحث عن مواد ذات درجات تحول أعلى. غير أن هذا البحث استمر لفترة طويلة دون كسر حاجز العشر درجات كالفن حتى اكتشف مركب النايوبيوم NbNفي أول الأربعينيات حيث وصلت درجة التحول إلى حوالي 15 درجة كالفن واستمرت كذلك ولمدة ثلاثين سنة وبالتحديد حتى عام 1973 حيث أضيف مركب جديد ذو درجة تحول تصل إلى 23 كالفن. والمركب المقصود هو Nb3G.

وحصلت بعد ذلك قفزة متميزة في سجل المواد فائقة التوصيل عندما قام كل من جورج بدنورز وكارل ميولار (J. George Bednorz and Kark Alex Muller)في عام 1986 بنشر تقرير حول نجاحهما في تحضير مركب سيراميكي هو La-Ba-Cu-Oدرجة تحوله في حدود 30 كالفن تم تحضيره في معامل شركة IBMفي سويسرا وقد استحق العالمان جائزة نوبل بالمشاركة ليس للقفزة في حرارة التحول ولكن لأنهما فتحا المجال لتحضير مواد سيراميكية لأول مرة. وسرعان ما قاد ذلك الاكتشاف مجموعة البحث في جامعة هيوستن بالتعاون مع مجموعة مماثلة في جامعة ألاباما الأمريكيتين إلى استبدال عنصر اللانثانيوم

بعنصر اليتريوم للحصول على السيراميك Y-Ba-Cu-O والذي فاقت حرارة تحوله ولأول مرة في التاريخ درجة الغليان لغاز النيتروجين والبالغة 77 كالفن. لقد وصلت حرارة التحول إلى أكثر من 90 كالفن لذلك المركب الذي اكتشف في يناير من عام 1987 والذي سرعان ما صار أساساً لعدة مركبات تلته على الفور عندما التفت عدد ضخم من الباحثين وعلى طول العالم وعرضه إلى دراسة ذلك الجيل الجديد من المركبات يحدوهم أمل كبير بالحصول على مركبات تتحول عند حرارة الغرفة.

وبعد سنة تقريباً تم اكتشاف مركب Bi-Sr-Ca-Cu-O ذي درجة التحول البالغة 110 درجات كالفن وبعده بقليل اكتشف مركب الثاليوم Tl-Ba-Ca-Cu-O والذي يفقد مقاومته الكهربائية نهائياً عند 125 كالفن وازدادت بذلك القوة الحثية التي كانت قوية من الأصل والتي حولت الأنظار إلى تلك المركبات غير العادية. غير أن إضافة مركبات جديدة لم يتحقق إلا بعد عدة سنوات في حوالي عام 1993 عندما أضيف مركب الزئبق Hg-Ba-Ca-Cu-O :والذي يتحول عند 135 درجة كالفن ولم تتم أية إضافة تذكر حتى يومنا هذا. و قد يصح لي أن أقول: إننا بدأنا بالزئبق وانتهينا به! والحق أن درجة الحرارة التحولية وصلت إلى 160 كالفن لبعض المركبات والتي منها مركبات الزئبق خاصة، غير أنه هذا عندما يتم تسليط ضغوط عالية جداً. أنظر شكل 2.

وباكتشاف المركبات التي تفوق حرارتها 77 درجة كالفن وهي درجة غليان النيتروجين؛ دخلنا عصراً جديداً من الموصلات وهو ما اصطلح على تسميته بالموصلات فائقة التوصيل عالية الحرارة High Temperature Superconductors واختصاراً بـ HTS في حين حملت الفئات السابقة لذلك التاريخ اسم: الموصلات فائقة التوصيل التقليدية Low Temperature Superconductors واختصاراً بـ : LTS. إن لاكتشاف الموصلات الجديدة أهمية خاصة حيث أن استخدام النيتروجين المسال رخيص جداً وغير مكلف في نقله وحفظه مما يبشر بتطبيقات كثيرة. لقد كانت فكرة الحصول على موصلات فائقة عند حرارة الغرفة فكرة سخيفة تنال الضحك من سائر العاملين في مجال المواد حتى عام 1987 عندما صار الحلم أقرب ما يكون إلى الحقيقة!

3-1 أهمية خاصة للموصلات الفائقة عالية الحرارة

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

تحدث الموصلية الفائقة في بعض المواد عند تبريدها الى درجات حرارة منخفضة جدا تقترب من الصفر المطلق حيث لا تتأثر بالمجال الكهربي أو المغنطيسي (أي يمر التيار الكهربي من خلالها دون أي مقاومة كهربية) .

تنخفض المقاومة الكهربية للموصلات المعدنية تدريجيا مع انخفاضات درجات الحرارة .

بعض الظواهر المرتبطة بالتوصيل الفائق:-

1- المقاومة الكهربية

اجراء"اونيس" على الزئبق حيث تنهار المقاومة الكهربية للزئبق عند تبريده الى 10^{-5} ohm والواقع ان تحديد ما اذا كانت المقاومة الكهربية قد وصلت الى الصفر تماما مستحيل عمليا , وقد استعمل الى جانب قياس المنحنيات فرق الجهد , مقدار اضمحلال التيار في عروه مقفلة من المادة حيث استخدم مغنطيس يخلف فيض "تدفق" من خطوط المغناطيسية , ثم قام بتبريد المادة تحت درجة T_c الى ان اصبحت فائقة التوصيل , عند نزع المغنطيسية يتغير الفيض خلال العينة فسجلت تيار بداخلها فإذا كانت العينة مقاومة محدده R فإن التيار يأخذ في التضاؤل طبقا للمعادلة :

$$I_t = I_\circ \, e^{-rt/l} \qquad (1\text{-}1)$$

حيث l هو الحث الذاتي للعينة , بهذه الطريقة وغيرها تم اثبات أمكن اثبات ان المقاومة الكهربية تنخفض مما لا يقل عن اربعة عشر رتبة 14 order, عند التوصيل أي حالة التوصيل الفائق .

2- الخواص المغناطيسية

إن سلوك الخواص المغناطيسية للمواد في طورها فائق التوصيل لا يقل اثارة عن سلوك الخواص الكهربية وان كنا لا نستطيع تفسير وفهم الخواص المغناطيسية بافتراض انه في حالة التوصيل الفائق تكون المقاومة تساوي صفراً , اذا وضعت المادة في مجال مغناطيسي , ثم بردت الى دون درجة التحول لتصبح فائقة التوصيل فإن الفيض المغناطيسي الذي يخترقها يطرد خارجها فيما يعرف بأثر ماسيز .

نفترض ان لدينا موصلاً فائقا عند درجة حرارة اقل من الدرجة الحرجة , وعند بدء تطبيق مجال مغناطيسي عليه , فان قدرا محددا من الطاقة يستقر في انشاء مجال خارجي بالتيارات الكهربية (السائرة) التي تقوم بإلغاء المجال المغناطيسي في باطن الموصل الفائق , فإذا كان المجال المضيف كبيرا بدرجة كافية يصبح من الملائم للمادة ان تعود الى الحالة العادية من دواعي الطاقة بهذا يتمكن المجال من اختراقها .

3- الحرارة النوعية

تتغير الحرارة النوعية مع درجة الحرارة للفلزات العادية C_n عند الدرجات المنخفضة طبقا للعلاقة الاتية :

$$C_n = C_{ne} + C_{nl} = at + bT^3 \qquad (1\text{-}2)$$

حيث :

C_{ne} هو الجزء المتعلق بالإلكترونات و C_{nl} هو الجزء المتعلق باهتزاز الشبيكة , فاذا انتقل الفلز الى حالة التوصيل الفائق تحت الدرجة الحرجة T_c , فان الحرارة النوعية تقفز الى قيم مرتفعة , ثم تتضاءل الى قيم الحالة العادية اذا انخفضت درجة الحرارة بشدة .

4- التسلل النفقي المرفق العادي

يمكن جعل الكترونات التوصيل في موصل فائق وفلز عادي ان تنتظم في اتزان حراري مع بعضها البعض اذا حدث اتصال وثيق بين المادتين بحيث لا يفصل بينهما سوى طبقة عازله رقيقة لا تجد الالكترونات صعوبة في تخطيها من خلال التسلل النفقي الموصوف في ميكانيكا الكم عند حدوث الاتزان الحراري يكون ما يكفي من الالكترونات قد انتقل من احد الفلزين الى الاخر لكي يتساوى الجهد الكيميائي او مستوى فيرمي في الفلزين . وجد ان التيارات "النفقية " التي تخترق وصلات الفلزين العاديين تخضع لقانون اوم .

كلما ارتفعت درجة الحرارة نحو T_c فان قيمة الجهد المبدئي (المشرفي) V^* تأخذ في الانخفاض . مما يشير الى ان فجوة الطاقة نفسها أخذة في التضاؤل مع ارتفاع درجة الحرارة .

5- الاستجابة للموجات الكهرومغناطيسية

تتحدد استجابة فلز للموجات الكهرومغناطيسية "كنفاذ الموجات خلال أغشية رقيقة او انعكاسها من أسطح عينات سميكة يقيم الموصلية الكهربية المعتمدة على تردد تلك الموجات . وتعتمد تلك القيم ايضا على الاليات الفعالة والخاصة بامتصاص الطاقة بواسطة الكترونات التوصيل عند التردد المعين .

حيث ان طيف الاستثارة الالكترونية في حالة التوصيل الفائق يتميز بوجود فجوة للطاقة مقدارها 2Δ فان علينا ان نتوقع اختلافا كبيرا في الموصلية الفائقة للتيار المتردد مقارنة بالموصلية في الحالة العادية عند ترددات منخفضة "بالنسبة للكمية $(2\Delta/h)$ ان تساوي قيم الموصلية في الحالتين العادية وفائقة التوصيل عند ترددات كبيرة بالنسبة الى $(2\Delta/h)$

6- امتصاص الموجات الصوتية

عندما تنتشر موجة صوتية داخل فلز ما , فان المجالات الكهربية الميكروسكوبية الناشئة عن ازاحة الايونات يمكن ان تنقل قدرا من الطاقة الى الالكترونات الواقعة بالقرب من مستوى فيرمي بحيث تقل طاقة الموجة بذلك القدر . عندما تكون درجة الحرارة اقل من T_c , فان معدل امتصاص الموجات الصوتية توهينها , ويكون اقل بشكل ملموس في حالة التوصيل الفائق عنه في الحالة العادية.

1-4 الهدف من البحث

التعرف على ظاهرة الموصلية الفائقة وتسليط الضوء على تطبيقات ا الموصلية الفائقة ونظرياتها.

1-5 مشكلة البحث

1. عدم وجود دراسات سابقة كثيره.
2. صعوبة صنع مواد ذات موصلية فائقة.

1-6 الدراسات السابقة

1. نظرية الإرتباط المغنط لأوكسيد النحاس عالي الحرارة ، بواسطة قوانقوا شين و جين مارك و يوجن قيو و وليام أ قودداررد.
2. التطبيقات العملية للأسلاك فائقة التوصيل ، بواسطة تيوشي أرموشي و تي أكانوري ساوي.
3. حدد كل من دالي هارشمان وانطوني تي فاجوري وجون دي.دو على ماذا تعتمد حرارة عملية التوصيل الفائق

1-7 ترتيب فصول البحث

الفصل الأول يحتوي على تاريخ الموصلات الفائقة وبعض الظواهر المرتبطة بالتوصيل الفائق وفي الفصل الثانى ناقشنا أنواع الموصلات الفائقة على حسب درجة الحرارة اما **الفصل الثالث ناقشنا الأسس النظرية للتوصيل الفائق اما الفصل الرابع ناقشنا تطبيقات الموصلية الفائقة في الحياة اليومية**

الفصل الثاني

الموصلية الفائقة

2- الموصلية الفائقة

2-1 مقدمة تاريخية

قبل عام 1911م كان الاعتقاد السائد ان جميع المواد تصبح فائقة التوصيل للكهرباء فقط عند درجة حرارة الصفر المطلق أي 273.15 . ولكن في تلك السنة لاحظ العالم اونيس ان المقاومة الكهربية للزئبق تقترب من قيمة صغيرة للغاية يصعب قياسها اذا برد لدرجة (4.2 K) وهي درجة حرارة الهيليوم السائل وهذه الظاهرة سميت بظاهرة التوصيل الفائق Super Conductive .

وبعد هذا بأعوام تم اكتشاف المزيد من المواد التي يمكن ان تتميز بظاهرة التوصيل الفائق مثل (البلاتين ، الالمونيوم ، الخارصين ، الرصاص ، وبعض المركبات المعدنية) وكذلك بعض المركبات الخاصة التي تتصف بهذه الصفة ، وذلك عند التبريد الى درجات حرارة معينة تسمى بالدرجة الحرجة (Critical Temperature) ويرمز لها بالرمز (T_c).

من هنا يمكن ان نعرف الموصلية الفائقة بانها هي حالة التوصيل التي عندها تكون المقاومة الكهربية معدومة وتعتبر هذه من خواص الموصلات الفائقة بالإضافة الى انه لا تسمح الموصلات الفائقة للمجال المغنطيسي بالتواجد في داخلها (أي تقوم بطرد خطوط المجال المغنطيسي). ويتصرف كمادة غير قابلة للمغنطة . ولكن حالة الموصلية الفائقة تحكمها بعض الظروف مثل درجة الحرارة والضغط والتركيب البلوري للمادة .

2-2 أنواع الموصلات الفائقة Super Conductor Types:

هناك تقسيمان للموصلات الفائقة :

يتم تقسيم حسب درجة الحرارة التي يظهر عندها ظاهرة التوصيل الفائق :-

1- المواد فائقة التوصيل منخفضة الحرارة :Low Temperature Superconductor ويرمز لها بالرمز (LTC) وتسمى ايضا المواد فائقة التوصيل التقليدية مثل الزئبق وتمتاز بانخفاض درجة حرارتها الحرجة.

2- المواد فاسئقة التوصيل عالية الحرارة : High Temperature Superconductor ويرمز لها بالرمز (HTC) وتمتاز بارتفاع درجة حرارتها الحرجة .

وهناك تقسيم اخر يكون حسب المجال الحرج وعلى حسب هذه الدرجة نجد ان النوعين هما :-

1- الموصلات الفائقة من النوع الاول Type 1 superconductors: في عام 1923م وجد ميسيفل الستفيد Messveral Oshsefeld ان المعادن عندما تصبح فائقة التوصيل في وجود مجال مغنطيسي ضعيف $B < B_c$ فان خطوط المجال لا تخترق المعدن وتصبح شدته صفر داخل

الجسم B = 0 أي ان خطوط المجال تنحرف بحيث لا تمر داخل المعدن عندما تكون درجة حرارته اقل من الدرجة الحرجة , لكن عند زيادة المجال المغناطيسي فان المادة تعود مرة اخرى الى حالة الموصلية العادية .

2- الموصلات الفائقة من النوع الثاني Type 2 superconductors :في عام 1950 ظهر نوع اخر من الموصلات الفائقة لها مجالين مغناطيسين حرجين يرمز لهما B_{c1} و B_{c2} فعندما تكون شدة المجال المغناطيسي اقل من B_{c1} تظل المادة فائقة التوصيل ولا تمر بها خطوط المجال , واذا ما زادت شدة المجال عن B_{c2} تخترق خطوط المجال سطح المادة وتصبح مادة غير فائقة التوصيل اما اذا كان المجالين بين B_{c1} و B_{c2} تظل المادة فائقة التوصيل الا ان خطوط المجال تخترق بعض المناطق وهذه الحالة تسمى الحالة الدوامية والمناطق التي تخترقها تسمى المناطق الدوامية Vortex regions وكلما ازدادت شدة المجال زادت المساحة الدوامية التي تمر من خلالها خطوط المجال المغناطيسية حتى تشمل المادة كلها ، عندما تصل قوة المجال المغناطيسي الى B_{c2} تفقد المادة صفة الموصلية الفائقة ، ويلاحظ ان قيم B_{c2} كبيرة جدا اذا ما قورنت بقيم B_c للنوع الاول كما يلاحظ ان مركبات النوع الثاني تتكون من عناصر من المجموعة الانتقالية واللاكتنيدية ، ونظرا لان موصلات النوع الثاني تظل فائقة التوصيل وهي تحت تأثير مجال قوي فقد امكن استخدامها في صناعة المغناطيس فائقة التوصيل فمثلا يمكن تصنيع ملفات من مادة NbTi في عمل مغناطيسات تصل شدتها من 5 – 10 Tesla دون فقد في الطاقة .

اسم العنصر	الرمز الكيميائي	درجة الحرارة الحرجة T_c بالكلفن K
Mercury	Hg	4.15
Lanthanum	La	4.9
Carbon	C	15
Indium	In	3.40
Rhenium	Re	1.697
Thorium	Th	1.38
Gallium	Ga	1.10
Zinc	Zn	0.85
Zirconium	Zr	0.66
Cadmium	Cd	0.517
Titanium	Ti	0.40
Hafnium	Hf	0.128
Lutetium	Lu	0.100
Tungesten	W	0.0154
Rhodium	Rh	0.000325

جدول (1 – 1) يوضح بعض العناصر ودرجة الحرارة الحرجة (T_c) .

المركب	درجة الحرارة الحرجة T_c بالكلفن K
$AuIn_3$	0.00005
Fe_3Re_2	6.55
$Nb_{0.6}Ti_{0.4}$	9.8
Nb_3Ge	23.2
MgB_2	39
SrNdCuO	40
$Pb_2Sr_2YCu_3O_8$	70
$[Ba,Sr]CuO_2$	90
$YBa_2Cu_3O_7$	93
$GdBa_2Cu_3O_7$	94
$TmBa_2Cu_3O_7$	101
$Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_9$	110
$Bi_2Sr_2Ca_2Cu_3O_{10}$	110
$Bi_{1.6}Pb_{0.5}Sr_2Ca_2Sb_{0.1}Cu_3O_y$	115
$Tl_{0.5}Pb_{0.5}Sr_2Ca_2Cu_3O_9$	120
$TlBa_2Ca_2Cu_3O_{9+}$	123
$Tl_{1.6}Hg_{0.4}Ba_2Ca_2Cu_3O_{10+}$	126
$Tl_2Ba_2Ca_2Cu_3O_{10}$	127
$HgBa_2CuO_{4+}$	94 – 98
$HgBa_2Ca_{1-x}Sr_xCu_2O_6^+$	123 – 15
$HgBa_2Ca_3Cu_4O_{10}^+$	125 – 126
$HgBa_2Ca_2Cu_3O_8$	133 – 135
$Hg_{0.8}Tl_{0.2}Ba_2Ca_2Cu_3O_{8.33}$	138

الجدول (2 – 1) يوضح بعض المركبات ودرجة حرارتها الحرجة (T_c) .

الفصل الثالث

الأسس النظرية للتوصيل الفائق

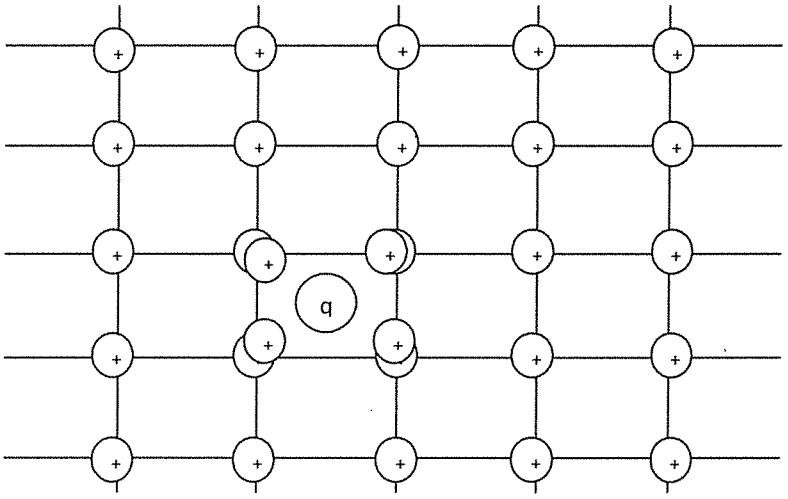
superconductivity Theory

الفصل الثالث

3- الأسس النظرية للتوصيل الفائق (superconductivity Theory)

3-1 تكوين ازواج الالكترونات

تكوين النطاقات الممنوعة في الطيف الطاقي لاشباه الموصلات يرجع الى التأثير المتبادل بين الالكترونات والمجال الدوري للشبيكة البلورية ويكون طبيعيا اذا ما افترضنا ان فجوة الطاقة (E_g Energy gap) في نطاق التوصيل للفلز في حالة التوصيل الفائق يرجع ايضا الى بعض التفاعلات المتبادلة الاضافية للإلكترونات التي يظهر تأثيرها عندما يدخل الفلز الى تلك الحالة ، وهنا يتفاعل الالكترون الحر الذي يتحرك خلال الشبيكة مع الايونات الموجبة التي تجذبها بعيدا عن اماكن اتزانها (الشكل 1-2) مولدة مزيد من الشحنات الموجبة التي يمكن ان تجذب الكترونات اخرى ، ولهذا السبب وبعيدا عن قوى تنافر كولوم المعتادة تنشا قوة تجاذب بين الالكترونات نظرا لوجود الايونات الموجبة في الشبيكة .



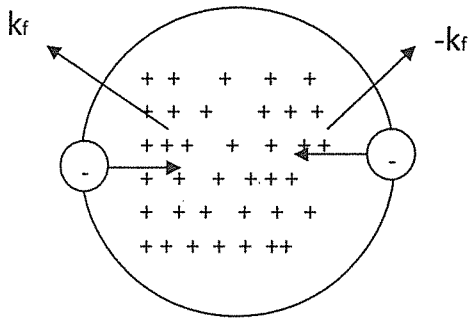
الشكل (1-3) يوضح حركة الالكترون الحر داخل الشبيكة

اذا زادت قوة التجاذب هذه قوى التنافر فان هذا يتيح للإلكترونات الانضمام لبعضها البعض مكونة ازواج من الالكترونات المعروفة باسم زوج كوبر(Cooper pair) متضادان، وينتج عن تكوين زوج كوبر انخفاض في طاقة الإلكترونين بمقدار يساوي طاقة الترابط بين الالكترونات في الزوج(E_b) كميتا تحرك الالكترونين في زوج الالكترونات وهذا يعني ان طاقة النهاية العظمى لإلكترون التوصيل في الفلز العادي هي (E_f) عند الصفر المطلق ، وتكون طاقته في حالة التوصيل المعتادة الفائق هي($E_f/2$) نظرا لان الطاقة التي تبذل لفك ارتباط هذا الزوج وتعيد الالكترونات الي حالتها المعتادة . لهذا فان طيف الإلكترون الاحادي يتطلب وجود فجوة طاقة (E_g) تساوي ($2E_b$) بين المنسوب الاعلى لزوج الالكترونات والمنسوب الادنى المناظر للحالة العادية.

زوج كوبر يتكون من الكترونين يتذبذبان حول الشحنة الموجبة المستحثة التي تشبه في بعض الاحيان ذرة الهيليوم ، كل الكترون في الزوج يمكن ان تكون له كمية تحرك كبيرة (P_f) ومتجه موجي كبير (K_f) ، ويمكن لهذا الزوج من الالكترونات ككل ان يظل مستقرا وتكون سرعته الانتقالية مساوية صفرا ، ويفسر هذا صفة التناقص للإلكترونات التي تشغل المناسيب العليا لنطاق التوصيل في وجود فجوة الطاقة ، مثل هذه الالكترونات لها كمية تحرك كبيرة ولها متجمعات موجبة كبيرة ($p \approx p_f$) , ($k \approx k_f$) ، ويكون لها سرعة انتقالية :

$$V\alpha \frac{dE}{dK}=0 \qquad (3\text{-}1)$$

رسم 2



الشكل (2-3) يوضح التمثيل البياني لزوج كوبر

ونظرا لان الشحنة الموجبة المركزية تستحث عملية بواسطة الالكترونات المتحركة ذاتها فان زوج كوبر الذي يتأثر بمجال خارجي يمكن ان ينزاح بحرية في البلورة وكذلك الفجوة المتحركة مع توزيع الالكترونات ، بهذا تتحقق ظروف التوصيل الفائق من وجهة النظر هذه. ومع ذلك لا يمكن لكل الكترونات التوصيل ان تكون ازواج كوبر ، ذلك لان هذه العملية تتطلب تغيرا في الطاقة . فتلك الالكترونات التي يمكنها ان تغير طاقاتها هي فقط التي يمكنها تكوين الازواج .والالكترونات التي

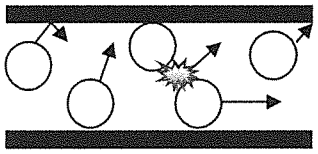
تشغل شريطا ضيقا قريبا من منسوب فيرمي لا تخضع لهذه العملية . والميزة الملحوظة لمثل هذه الازواج تظهر في ترتيب كميات التحرك لها ، مراكز الثقل لكل الازواج لها كميات تحرك متماثلة وتساوي صفر عندما تكون الازواج ساكنة ولا تساوي صفر عندما تكون الازواج متحركة في البلورة . وتكون هذه النتيجة بمثابة ارتباط قوي بين حركة كل الكترون مفرد وحركة الالكترونات الاخرى المرتبطة في ازواج . وتتحرك الإلكترونات كما يتحرك متسلقو الجبال الذين يربطون بعضهم ببعض ، فاذا ترك احد الالكترونات موضعه بسبب فوضى المنطقة الناتجة عن الاهتزازات الحرارية لذرات الشبيكة ، فان جيرانه سيجذبونه ليعود الى مكانه .هذه الخاصية تجعل منظومة ازواج كوبر ذات قابلية استطارة صغيرة .وتبعا لذلك، اذا تحركت الازواج تحت تاثير قوة خارجية ، سوف يستمر سريان التيار في الموصل الفائق الى ما لا نهاية حتي بعد توقف العامل المسبب له .

ونظرا لان المجال الكهربي (E) وحده يمكن ان يكون له دور في مثل هذا العامل ، فان تيارا كهربيا سيظل ثابتا دون تغير حتى بعد تلاشي المجال اي ان :

$$E=0 \ , \ J= \text{constant}$$

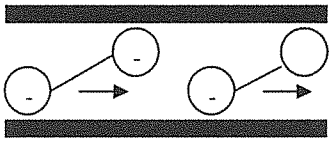
وهذا يوضح ان الفلز يصبح في حالة توصيل فائق وتكون موصلية مثالية . مثل هذه الحالة للإلكترونات يمكن مقارنتها بحالة جسم يتحرك دون احتكاك ، يكتسب كمية تحرك ثابتة .يمكن ان تحركه الى ما لا نهاية وتظل كمية تحركه ثابتة .

موصل عادي



المقاومة أثناء اصطدام الإلكترونات

موصل فائق



الألكترونات من نفس الطور و تتحرك في نفس الإتجاه

الشكل (2-3) يوضح سريان التيار في موصل عادي وموصل فائق

سبق وان قارنا زوج كوبر بذرة هيليوم وهذه المعالجة تبقى معاملتها بحذر شديد اذ ان الشحنة الموجبة ليست ثابتة تماما كما انها ليست ساكنة تماما كما في ذرة الهيليوم ، لكنها ستستحث

بالإلكترونات المتحركة ذاتها فتتحرك معها ،وزيادة على فان طاقة ترابط الالكترونات في زوج كوبر تكون اقل كثيرا في المقدار عن طاقة الترابط في ذرة الهيليوم ، ولهذا السبب تكون ابعاد زوج كوبر اكبر من ابعاد ذرة الهيليوم .

وتوضح الحسابات ان القطر الفعال لزوج كوبر يكون في حدود($10^{-6} \rightarrow 10^{-7}$) ≈L ويطلق عليه اسم طول الترابط coherence length .

ولهذا السبب لا يمكن النظر الي هذه الازواج كأشباه جزيئات توجد منفصلة بعضها عن بعض ومن ناحية اخرى تدعم تراكبات الدوالي الموجبة الضخمة للعديد من الازواج ظاهرة تزاوج الالكترونات بحيث يكون لها وجود في الاجزاء الميكروسكوبية , لذلك تعد ظاهرة تزاوج الالكترونات بمثابة ظاهرة تراكمية نموذجية.

ولا توجد قوى تجاذب تؤثر على الكترونين معزولين عن بعضهما تجعل تزاوجهما ممكنا , ففي الواقع تشارك كل منظومة الكترونات فيرمي مع ذرات الشبيكة في تكوين ازواج كوبر , وبسبب ذلك فان طاقة الترابط تتوقف ايضا على حالة منظومة (الالكترون – ذرة) ككل وعند درجة الصفر المطلق تنتظم جميع الكترونات فيرمي في ازواج يبلغ اتساع فجوة الطاقة في نهايتها العظمى , ويصاحب الارتفاع في درجة الحرارة توليد فوتونات قادرة على عملية استطارة طاقة الانتقال الى الالكترونات وتكون كافية لفك رابط الزوج ولا يكون فك رابطة الزوج حدثا نادرا . ولا يمكن لاختفاء بعض الازواج ان تؤدي الى اختفاء الفجوة من منسوب فيرمي , ومع الاستمرار في رفع درجة الحرارة يزداد نمو تركيز الفوتونات بسرعة كبيرة حينما يزداد متوسط طاقتها . يظهر هذا في ارتفاع حاد يقترب من معدل الازواج , وتبعا لذلك يحث انخفاض ملحوظ في قيمة اتساع فجوة الطاقة للأزواج المتبقية ويختفي فجوة عند درجة حرارة الحرارة (T_c) يترتب على هذا ان تكون درجة حرارة انتقال فلز الى حالة التوصيل الفائق اعلى كلما كان اتساع فجوة الطاقة عند الصفر المطلق .

2-3 معادلة لندن: London's Equation

في حالة التوصيل الفائق لفلز ما فانه لا يسمح لخطوط اي مجال مغناطيسي ان يتواجد بداخله وهذا دافع كل من (F.London & H.London) ان يعالجا الامر رياضيا .

قد استخدما في هذه المعالجة نموذجا يقوم على انه في حالة الموصل الفائق وعندما تكون درجة حرارته الحرجة اكبر من درجة الحرارة المطلقة أي ($T<T_c$) فان كسر مقداره $n_s(T)/n$ من العدد الكلي لإلكترونات التوصيل تتمكن من المشاركة في تيار الفائق والكمية $n_s(T)$ هي عبارة عن كثافة الكترونات التوصيل الفائق , وهي تقترب من الكثافة الكلية للإلكترونات (n) مع انخفاض درجة الحرارة تحت (T_c)بدرجة كافية ، ولكنها تؤول الى الصفر عند ارتفاع درجة الحرارة لتصل الى (T_c).

اما ما تبقى من الكترونات فيفترض ان يكون مائعا Fluid عاديا ذا كثافة بمقدارها ($n-n_s$) ولا يمكنه ان يحمل تيار كهربي دون احداث تبديد عادي للطاقة ، ولكن هنالك افتراض اخر هو ان التيار الفائق والتيار العادي يسيران متوازيين ، وبما ان التيار الفائق يسري دون مقاومة تذكر فانه قادر على حمل التيار الكهربي كله الناشئ عن تطبيق اي مجال كهربي انتقالي ضئيل في حين ان الالكترونات العادية تبقى خاملة بحيث يمكن تجاهل دورها تماما في المناقشة التالية .

يفرض ان مجالا كهربيا طبق لحظيا داخل موصل فائق ، مما يجعل الكترونات التوصيل الفائق تتسارع بحرية وبدون تبديد للطاقة ، بحيث يكون متوسط سرعتها محققا للعلاقة :

$$m\,\frac{\overrightarrow{d\,v_s}}{dt} = -e\,\vec{E} \qquad (3\text{-}2)$$

وكثافة التيار الذي تحمله هذه الالكترونات هي :

$$j = -e\,v_s\,n \qquad (3\text{-}3)$$

فان المعادلة (3-3) تكون بالصورة :

$$\frac{dj}{dt} = \frac{n_s\,e^2\,\vec{E}}{m} \qquad (3\text{-}4)$$

بالتعويض من المعادلة (3-4) في قانون فراداي للحث الذاتي فان :

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\overrightarrow{\delta B}}{\delta t} \qquad (3\text{-}5)$$

هذه المعادلة تقود الى علاقة بين كثافة التيار والمجال المغناطيسي :

$$\frac{\delta}{\delta t}\left(\nabla \times j + \left(n_s \frac{e^2}{m_c}\right) B\right) = 0 \qquad (3\text{-}6)$$

وعند دمج هذه المعادلة مع معادلة ماكسويل (Maxwell) فانه يصبح لدينا علاقة تحدد المجالات المغناطيسية ، وكثافة التيار القادرة على التواجد في موصل نموذجي ان اي مجال استاتيكي يحدد كثافة التيار الاستاتيكي من خلا المعادلة

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = \left(\frac{4\pi}{c}\right)\vec{j} \qquad (3\text{-}7)$$

وحيث ان قيم (3-6) غير المعتمدة على الزمن (الاستاتيكية) هي حلول بديهية للمعادلة (3-7) فان المعادلتين تصبحان متوافقتين مع اي مجال مغناطيسي استاتيكي .

وهذا الامر ليس متقاطعا مع السلوك المشاهد عمليا للموصلات الفائقة , والتي لا تسمح بوجود فيض مغناطيسي في باطنها , وقد اكتشف لندن ان هذا السلوك المميز للموصلات الفائقة يمكن فهمه اذا اقتصر تطبيق مجموعة كاملة من الحلول للمعادلة (2-6) على القيم التي تخضع للمعادلة :

$$\vec{\nabla} \times \vec{v} = -\left(\frac{n_s e^2}{mc}\right)\vec{B} \qquad (3\text{-}8)$$

والمعادلة (3-8) تعرف باسم معادلة لندن .

تتطلب المعادلة (3-5) والتي تميز أي وسط يوصل التيار الكهربي دون أي تبديد للطاقة , ان يكون المقدار ($\vec{\nabla} \times \vec{E}$) غير معتمد على الزمن اما معادلة لندن الاكثر تحديداً والتي تصف بشكل محدد الموصلات الفائقة وتميزها من مجرد (الموصلات النموذجية) الكاملة ، فإنها تتطلب ان يكون المقدار غير المعتمد على الزمن صفرا .

$$\nabla^2 \times \vec{B} = (4\pi n_s e^2 \vec{B}/mc^2)$$

$$\nabla^2 \times \vec{j} = (4\pi n_s e^2 \vec{j}/mc^2)$$

وتتنبأ المعادلتان أعلاه بدورهما أن التيارات والمجالات المغنطيسية في الموصلات الفائقة لا تتواجد إلا داخل طبقة سمكها (L) من السطح وتعرف بعمق اختراق لندن

London penetration depth وتعطى بالمعادلة :

$$\hat{L} = \left(\frac{mc^2}{4\pi n_s e^2}\right)^{\frac{1}{2}} = 41.9 \left(\frac{r_s}{a_\circ}\right)^{\frac{3}{2}} \left(\frac{n}{n_s}\right)^{\frac{1}{2}} A^\circ \qquad (3\text{-}9)$$

حيث r_s المسافة بين الالكترونين و a_o معامل الشبيكة

3-3 النظرية الميكروسكوبية المجهرية للتوصيل الفائق

نظرية باردين – كوبر – شريفر (BCS) :

إنه من المعلوم بالضرورة أن نقل التيار في الموصلات يتم عادة بواسطة الالكترونات الحرة ، ومصدر المقاومة في الموصلات عادة هو تصادم تلك الالكترونات مع إلكترونات اخرى ومع الأيونات والذرات التي تخرج عادة عن النظام الدوري الشبيكي المنتظم للمادة . وايضاً" 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 بعضا" تصف ظاهرة التوصيلية والمقاومة في الموصلات بجدارة وكفاءة تامة . إلا أن تلك النظريات التقليدية وجدت نفسها وجها" لوجه امام ظاهرة لم تستطع تفسيرها إطلاقا" ، 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 مقاومة ؟

أهم أساس قامت عليه النظرية هو فكرة الازواج 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 الزري . فقد وجد أنه كلما زاد العدد الزري 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 بأخرى مع الشبيكة بحيث تكون المحصلة لصالح الإلكترونات نفسها . فجاءت فكرة الأزواج لتفسر الأمر . فعندما يمر الإلكترون الأول بين الأيونات فإنه ولزمن قصير جدا" يؤدي الى انجذابها اليه ولكنه يمر بسرعة فيتركها وهي ما زالت متقاربة من بعضها مما يؤدي الى زيادة تركيز الشحنة الموجبة لحظيا" في المنطقة . تلك الشحنة المركزة بدورها تجذب إلكترون اخر اليها . وبهذه الطريقة يظل الجو مهيئ لإلكترون اخر بحيث يكون الأثنان في وضع ارتباط دائم بصورة زوج . وهذا ما يطلق عليه حسب النظرية الكمية بمبدأ تبادل التفاعل من خلال الفونون الذي هو وجه عمله اخر للقول بأن الإلكترون الأول يؤدي الى اهتزاز الأيونات لصالح الإلكترون الثاني.

بالطبع فإن الأزواج الإلكترونية تحمل شحنة مساوية الى ضعف شحنة الإلكترون الفرد 2 e ولفا" مغزليا" مساويا" للصفر حيث أن أحد الزوجين لفه إلى اعلى (1/2+) والاخر لفه الى اسفل (1/2-) ولهما اندفاعان متضادان فيلغي بعضهما بعضا" . وكما هو معلوم في الفيزياء الاحصائية فإن الجسيمات الأولية في تجمعها في حالة واحدة ذات ظروف متشابهة تخضع للتوزيع الإحصائي بحسب لفها المغزلي . فإذا كان اللف كسري فإنه يستحيل – حسب مبدأ باولي – ان يجتمع أكثر من جسيمين في حالة واحدة ، وتسمى الجسيمات من هذا النوع فرميونات .

أما عندما يكون اللف رقم صحيح 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 عدد غير محدود من الأزواج الإلكترونية يجوز ان يتكثف في حالة كمية واحده.

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 الى درجة حرارة معينة . وكان من جراء فكرة الأزواج الإلكترونية أن تنقسم الإلكترونات إلى جزء فائق واخر عادي حيث يقو 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 ، حيث تتكون فجوة في الطاقة بين الحالات المملؤة تماما بالإلكترونات وبين الحالات الفارغة تماما قيمتها في حدود 1 meV، وهذه الطاقة تمثل الطاقة اللازمة لكسر الطاقة بين الزوجين الإلكترونيين ، وتتنبأ نظرية BCS بالعلاقة التالية التي تربط بين طاقة الفجوة وبين درجة التحول للموصل عند درجة الصفر المطلق:

E=3.35KT

حيث K ثابت بولتزمان . إن هذه العلاقة من أهم ما جاءتنا به النظرية . إنها تنص على ان طاقة الفجوة مرتبطة مباشرة بدرجة التحول . بمعنى اخر فإنه لكي نحصل على مواد فائقة التوصيل ذات تحول عالي فعلينا ان نوفر موصلات بطاقة فجوة كبيرة . وقد اتفقت تلك المعادلة مع النتائج التجريبية للمواد الوصلة الفائقة التقليدية . وهناك علاقة اخرى تتوقع قيمة للمجال المغناطيسي الحرج للموصلات الفائقة التقليدية وهي:

$$HT = HO(1 - a(\left({}^{T}/_{T_c}\right)2)$$

حيث تعبر T عن درجة الحرارة و Ho 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 ظاهريا في قيمة المجال الحرج

الفصل الرابع

تطبيقات الموصلية الفائقة

الفصل الرابع

4- تطبيقات الموصلية الفائقة

4-1 تطبيقات الموصلية الفائقة

تستعمل الموصلات الفائقة في صنع مغناطيسيات كهربائية قوية جدا كتلك المستخدمة في أجهزة التصوير بالرنين المغناطيسي وتلك المستخدمة في مسرعات الجسيمات ومسرعات الأيونات ، كما تستخدم الموصلات الفائقة في صنع الدارات الكهربائية الرقمية وفلاتر المايكروويف في محطات الإرسال للهواتف النقالة حيث توجد أماكن مناسبة لإحتواء أجهزة التبريد الثقيلة، وفي الكثير من التطبيقات الكهربائية والعلمية.

في عام 1911 م عندما كان العالم Onnes يقيس مقاومة الزئبق المتجمد عند درجة حرارة بالقرب من الصفر المطلق .قد وجد ان المقاومة تنخفض بشكل كبير عند درجة 4.15 K وتصبح المادة عند درجات الحرارة الأقل من هذه الدرجة الحرجة Tc موصلية فائقة . ثم بعد ذلك وجدت مواد أخري تتمتع بتلك الخاصية . وبالإضافة إلي ذلك فقد وجد أن بعض السبائك والمركبات السيراميكية تظهر موصلية فائقة عند درجات حرارة أعلي بكثير من تلك التي تظهر عندها في الفلزات النقية.

خصائص هذه المواد عند درجة حرارة معينة تعرف بدرجة حرارة التحول تصبح مقاومة هذه المواد للتيار الكهربي مساوية للصفر اكتشف كذلك أن هذه المواد عند درجة حرارة التحول حساسة جدا للمجال المغناطيسي ، حيث تنفر المجال الخارجي أي أنها تعكس المجال المغناطيسي مهما كانت شدته.

هاتان الخاصيتان فتحت الأبواب أمام العلماء لإستغلالها في إبتكارات وإختراعات ذات كفاءة عالية تدخل في معظم مجالات العلوم والتكنولوجيا ، حيث أن هذه المواد (Superconductors) سوف تحل محل اشباه الموصلات (Semiconductors) التي تدخل في صناعة الترانسيستور والدوائر الإلكترونية المتكاملة . اكتشاف مواد فائقة التوصيل للكهرباء عند درجات حرارة مرتفعة نسبيا سوف يجعلها تدخل في تركيب كل جهاز ممكن تصوره . أول هذه التطبيقات هو الحصول علي وسيلة غير مكلفة لنقل التيار الكهربي ، لأن التكاليف المادية لنقل التيار عبر أسلاك النحاس مرتفعة نظرا للفقد الكبير في الطاقة علي شكل حرارة متبددة نتيجة مقاومة السلك النحاسي كذلك إذا ما قارنا قيمة التيار الذي يمكن نقله عبر السلك النحاسي حيث تبلغ شدته $100\ A\backslash cm^2$ بينما في السلك المصنوع من مركب $Ba_2YCu_3O_7$ تبلغ شدته. $100000A\backslash cm^2$

كذلك فإن هذه المواد لها تطبيقات عديدة في مجال الإلكترونيات لما تمتاز به من قدرة عالية في فتح وإغلاق الدائرة الكهربية لتمرير التيار ومنعه ، وهذا يشكل العنصر الأساسي في بنية الكمبيوتر والبحث جاري الآن لإدخال هذه المواد في صناعة السوبركمبيوتر ، وإذا ما توصل إلي ذلك فإن هذا سوف يؤدي إلي تطور كبير في مجال الكمبيوتر

4-1-1 مجال الطب

فقد تم صناعة أجهزة ذات حساسية عالية جدا للمجالات المغناطيسية المنخفضة الشدة ، وتستخدم الآن كبديل للمواد المشعة المستخدمة في تشخيص الأمراض التي قد تصيب الدماغ ، حيث يتم الكشف عن التغير في المجال المغناطيسي المنبعث من الدماغ والتي تبلغ شدته 13Tesla -10 ، وهذا مقدار صغير جدا لكن تلك الأجهزة قادرة علي قياسه ، كذلك يمكن بدقة تحديد مصدر الإشارات العصبية الصادرة من الدماغ.

وأيضا يمكن أن تستخدم في البحث عن المعادن الدفينة في باطن الأرض وعن مصادر المياه والنفط لأنها تحدث تغيرا طفيفا في المجال المغناطيسي للأرض وهذا يمكن إلتقاطه بواسطه هذه الأجهزة.

4-1-2 الكواشف

أجهزة صغيرة جدا مصنوعة من مادة فائقة الموصلية ، تعمل عمل محسات للفوتونات ولجسيمات أخري ، تحدث صورة في العديد من حقول البحث والتقانة.

كواشف الفوتونات ، العلمية منها والصناعية ، تعمل في المجالات الكهرومغناطيسية التي تقع خارج مدي الضوء المرئي – فهي تكشف عالم الأشعة تحت الحمراء وموجات المايكروويف ، حيث الترددات منخفضة) الأطوال الموجية عالية ، الطاقة منخفضة (، وفي عالم الأشعة السينية وأشعة جاما حيث الترددات عالية ، ولكنها محدودة في قدرتها . ويفتقر العلماء بصورة خاصة ألي كاشف قادر علي رؤية فوتون منفرد وعلي تمييز تردده ، ومن ثم طاقته بأي دقة كانت ، لذلك إن تعيين تردد الفوتونات يفتح الباب أمام ثروة من المعلومات حول المادة التي أصدرت الفوتونات.

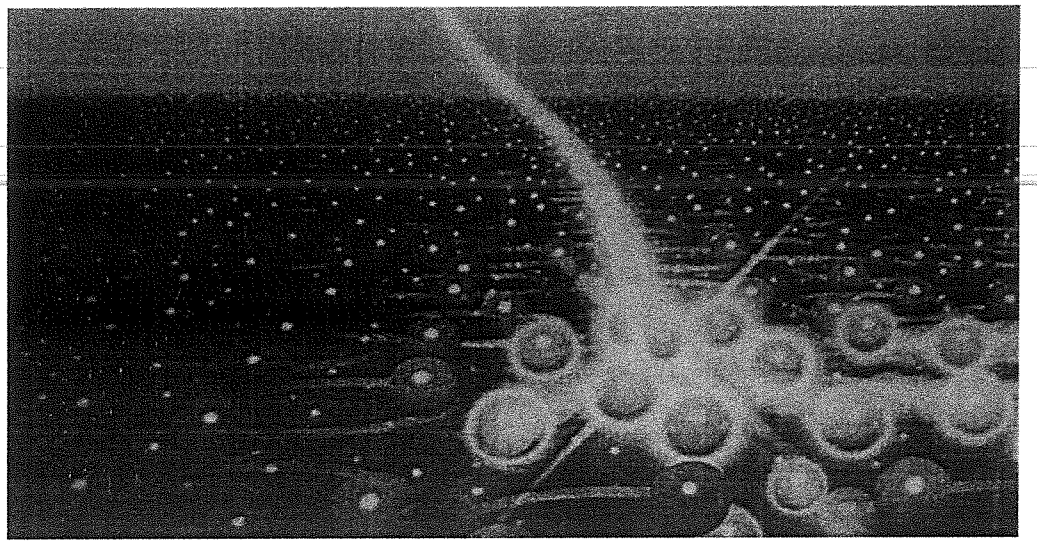
تنطلق حاليا ثورة في كشف الفوتونات بإبتكار كواشف أساسها الموصلية الفائقة ، بإمكانها القيام بمثل تلك القياسات الدقيقة وبأمور أخري غير عادية ، إذ أن هذه الأدوات الجديدة تحسن حساسية القياسات علي مدي الطيف الكهرومغناطيسي ، من الموجات الراديوية إلي الضوء المرئي إلي أشعة جاما ، والكواشف القادرة علي عد فوتونات مرئية وحيدة تحسن أمن الإتصالات الكمومية.

صار هناك كواشف فائقة الموصلية للأشعة السينية تستخدم لدراسة التركيب الكيميائي للمواد . ويطور الباحثون كاشف أشعة متكامل بإمكانه القيام بعمل أكثر تميزا لتحديد هوية المواد النووية بغية منع سرقتها أو تهريبها عبر الحدود الدولية ، كذلك تتحسس الأجهزة الفائقة الموصلية البوليميرات البيولوجية وتتقصي الجسيمات المتأثرة تأثرا ضعيفا التي تشكل المادة الخفية الغامضة المؤلفة خمسة أسداس المادة في الكون . فالكواشف الفائقة الموصلية لا تزال في بداية تحقيق إمكاناتها العلمية والتجارية.

وتعتمد كواشف الفوتونات الفائقة الموصلية علي مقدرة طاقة فوتون منفرد علي تمزيق الألاف من أزواج كوبر . عندئذ يمكن قياس التغير في حالة الموصلية الفائقة بعدة طرق بغية الكشف عن الطاقة التي أعطاها الفوتون . ولما كانت طاقة الفوتون متناسبة مع تردده ، فإن هذا القياس يدل كذلك علي تردد الفوتون ، وهذا هو المفتاح للحصول علي معلومات عن الجسم الذي أتي الفوتون منه.

إن الكواشف شبه الموصلة العاملة عند درجة الحرارة العادية ، مثل الأجهزة ذات الشحنات المقترنة (Charge Coupled Devices) (CCD)الموجودة في آلة تصوير رقمية ، تعمل هي الأخري بواسطة تشويش حالة كمومية في المادة . ففي حال الجهاز CCD يصدم فوتون الضوء المرئي إلكترونا فيخرجه من نطاق طاقة في بلورة شبه موصلة . ولكن الإلكترونات مرتبطة إرتباطا قويا في هذه

النطاقات ، لدرجة أن كل فوتون لا يحرر عادة سوي إلكترونا واحد . وهذا التحرير قليل جدا لدرجة أنه لا يكفي لتحديد تردد الفوتون ، ونتيجة لذلك لا يستطيع الجهاز CCD تعيين لون الفوتون مباشرة . أما آلات التصوير الرقمية فتشكل صورا ملونة بإستخدامها جملة مرشحات ، أحدها أحمر والآخر أخضر والثالث أزرق ، لا تمرر سوي الفوتونات التي تقع ترددا تها في هذه المجالات . وعلي النقيض من ذلك ، فإن بإمكان فوتون مرئي واحد فصل الآلاف من أزواج كوبر في الموصل الفائق . ويتيح تكوين آلاف الإثارات قياس الطاقة قياسا دقيقا.



الشكل(4-1) يوضح تفاعل الفوتون مع أزواج كوبر وكيفية تمزيقها.

وتصنف الكواشف التي تعمل علي تحسس تمزق الموصلية الفائقة في صنفين رئيسيين:

- **الكاشف الحراري:**

الذي يبرد حتي درجة حرارته الإنتقالية بالضبط ، وعندها لا يكون إلا جزئيا في حالة الموصلية الفائقة وتكون الإثارات الحرارية علي وشك أن تخرب الموصلية الفائقة كليا . وأي طاقة تودع في الموصل الفائق ترفع درجة حرارته وتسبب إرتفاع مقاومته الكهربائية إرتفاعا ملموسا.

- **الكاشف الفاصل للأزواج Pair Breaking :**

فهو علي العكس من ذلك ، إذ يبرد إلي درجة حرارة أخفض كثيرا من درجة حرارة الإنتقال ويكون في حالة الموصلية الفائقة كليا . ويقيس هذا المكشاف عدد أزواج كوبر التي تحطمت عند إيداع الطاقة فيه.

ويجب كذلك ذكر نوع آخر من أجهزة الموصلية الفائقة بغية استكمال الموضوع : يعمل المازج الفائق الموصلية Superconducting Mixer مثل مضخم للإرشادات المغناطيسية المنخفضة التردد مثل موجات المايكرويف.

الكاشف الحراري:

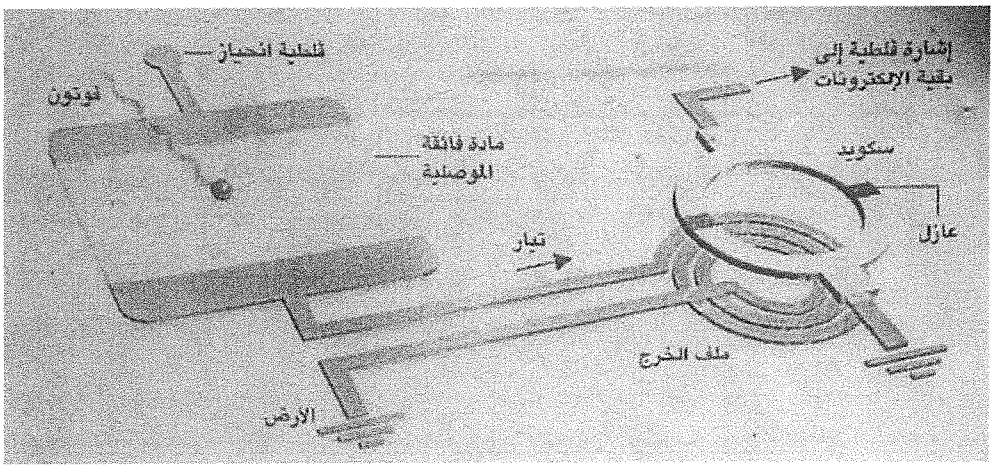
يعتمد النوع الحراري من الكواشف علي حقيقة أن المقاومة الكهربائية للموصل الفائق ترتفع بشكل حاد من الصفر إلي قيمتها الإعتيادية في المدي الضيق جدا من درجة الحرارة الذي تتحول فيه المادة من حالتها الفائقة الموصلية إلي حالتها العادية . ويتيح التغير الفجائي في المقاومة للموصل الفائق أن يعمل عمل ميزان حرارة بالغ الحساسية . ويدعي الكاشف الذي يستخدم الإنتقال الطوري محسا ذا انتقالية (Transition Edge Sensor) (TES)فحين يمتص المحس TES فوتونا تتحول طاقة الفوتون إلي طاقة حرارية ترفع درجة الحرارة ومن ثم تزيد مقاومة المادة بصورة متناسبة مع الطاقة المودعة . ويمكن تبعا للمادة التي تمتص الفوتونات ، أن يستخدم المحس TES مثل مقياس طيف لقياس طاقة الأشعة السينية وأشعة جاما او مثل عداد فوتونات عند الأطوال الموجية تحت الحمراء حتي تحت المرئية أو مثل كاشف قدرة إجمالية للإشعاع عند نطاق الموجات تحت الحمراء والمايكروويف.

تم تطوير أوائل الكواشف TES في الأربعينيات لكنها لم تكن عملية علي مدار سنين عديدة وكانت المشكلة في أن مدي الإنتقال إلي الموصلية الفائقة غالبا ما يكون أقل من جزء من ألف من درجة ، ولذلك كان من العسير جدا إبقاء درجة الجهاز ضمن هذا المدي التغيرات الضئيلة في درجة حرارة الإنتقال لمختلف المحسات جعلت تشغيل عدد منها عند درجة حرارة زاتها أمرا مستحيلا.

وفي عام 1993 م ، تم تطبيق حيلة بسيطة يمكن أن تحل هذه المشكلة – هي تطبيق فولطية ثابته علي الكواشف ، وهي تقنية تدعي انحياز الفولطية.

تؤدي الفولطية المطبقة إلي مرور تيار كهربي عبر الكواشف TES ، وهذا يسخنها.

وعند بلوغ درجة حرارة الإنتقال ترتفع المقاومة ، وهذا ينقص التيار ويوقف التسخين . وهكذا يعمل التسخين الذاتي عمل إرتجاع Feedback سالب يعمل علي إبقاء درجة حرارة الغشاء ضمن مجاله الإنتقالي . ففي عدد من المحسات المنحازة فولطيا يسخن كل محس ذاتيا حتي بلوغ درجة حرارته الإنتقالية ، عن بعضها قليلا . كما أن الإرتجاع السلبي يسرع إستجابة الكواشف ، وقد أدي إدخال انحياز الفولطية إلي نمو هائل في تطوير كواشف TES في العالك كله.

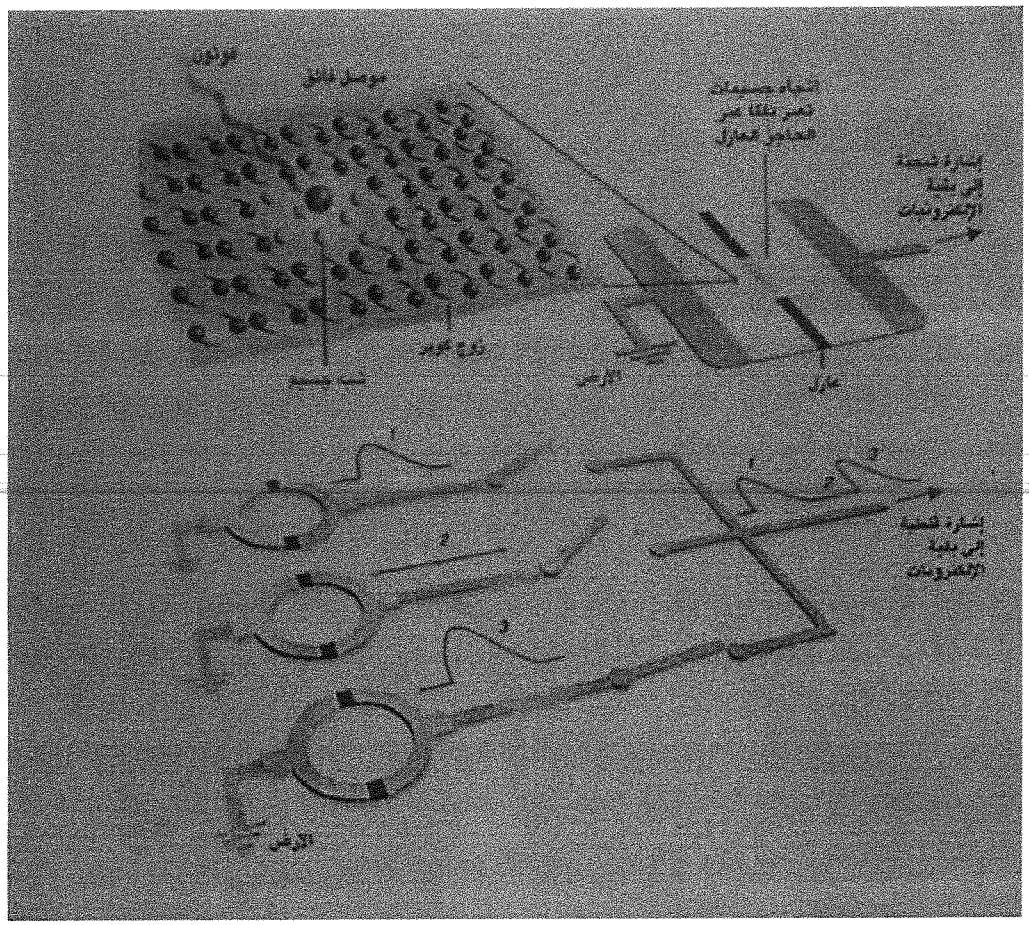


الشكل(4-2) يوضح تكوين الكاشف الحراري.

الكاشف الفاصل للأزواج: Pair Breaking

لا يمكن للكاشف الفاصل للأزواج أن يعتمد علي التغير في المقاومة الكهربائية لكي يعطي إشارة امتصاص فوتون ، بخلاف المحس الحراري . فالفوتون الساقط يحطم أزواج كوبر ويكون أشباه جسيمات يمكن اعتبارها بمثابة إلكترونات حرة أخري فائقة الموصلية . ويكون عدد أشباه الجسيمات المستحدثة متناسبا مع طاقة الفوتون ولكن لما كان الكاشف مبردا إلي ما دون درجة حرارته الانتقالية بكثير ، فلا يزال ثمة بحر من أزواج كوبر السالمة ، وبذلك تبقي المقاومة الكهربائية معدومة . ولذا ينبغي أن يكون الكاشف الفاصل للأزواج قادرا علي التمييز بين أزواج كوبر وأشباه الجسيمات . إن أحد الأجهزة القادرة علي القيام بهذه المهمة الوصلة النفقية الفائقة الموصلية Superconducting Tunnel Junction، المؤلفة من غشاءين فائقين الموصلية تفصلهما طبقة رقيقة من مادة عازلة . فإذا كان العازل رقيقا لدرجة كافية (2nm) ، أمكن للإلكترونات أن تعبر من أحد جانبي الحاجز إلي الجانب الآخر يعرف بالعبور النفقي الكمومي . Quantum Mechanical Tunneling ويؤدي تطبيق مجال مغناطيسي صغير إلي منع أزواج كوبر من العبور النفقي عبر الوصلة ، فلا يستطيع العبور إلا أشباه الجسيمات . بعد ذلك يمكن تطبيق فولطية علي الجهاز ، فلا يمر تيار إلا حين يمتص أحد الغشائين الفائقي الموصلية فوتونا يولد أشباه جسيمات . وتكون نبضة التيار الناتجة متناسبة مع عدد أشباه الجسيمات المستحدثة وإذا مع طاقة الفوتون وتردده.

إن الكواشف الفائقة الموصلية المنفردة مفيدة لبعض التطبيقات ، مثل تحليل المواد ، لكن التصوير العملي يتطلب عدد كبيرا من الكواشف شبيها بصفيف الأجهزة CCD في آلة التصوير الرقمية . وتبرز مشكلة عند توصيل الكواشف البالغة البرودة بالإلكترونيات المرفقة معها الواقعة في درجة الحرارة العادية . لو مرر المرء ببساطة سلكا من كل الكواشف لتدفقت كمية كبيرة من الحرارة في الأسلاك . وهذا يخرب الموصلية الفائقة للكاشف . والطريقة الأفضل هي استخدام توصيلات داخل الجزء البالغ البرودة من الجهاز تتحد أو تنضم Multiplexed فيها الإشارات الآتية من العديد من الكواشف فتسري في عدد قليل من الأسلاك تصل بين الجزء البارد والإلكترونات الدافئة.



- الشكل يوضح تكوين الكاشف الفاصل للأزواج.

وأكثر الأجهزة المتاحة تقدما التي تستخدم الموصلية الفائقة أساسها الكاشف . TES وكما بينا آنفا حين يمتص الكاشف TES فوتونا يتغير التيار عبر الكاشف . لكن التيار صغير جدا ولذلك يقاس بواسطة جهاز تداخل كمومي فائق الموصلية Superconducting Quantum Interference Device (SQUID)لا يحد من حساسيته سوي الميكانيك الكمومي يحول الأسكويد نبضة التيار الصغيرة جدا إلي أشاره فولطية كبيرة لدرجة تكفي لأن تقاس بواسطة الإلكترونات العادية ويمكن مضاعفة قنوات إشارات الخرج من العديد من الإسكويدات بجمع فولطياتها وإرسال المحصلة في سلك واحد ، إلا أن هناك ما ينبغي القيام به بعد ذلك لكي يكون بالإمكان تمييز الإشارات الآتية من كل كاشف علي حدة ففي مضاعفة القنوات ذات التقسيم الزمني Time Division Multiplexing تشغل الإسكويدات واحدا واحدا ، في حين في مضاعفة القنوات ذات التقسيم الترددي Frequency Division Multiplexingتعمل الإسكويدات عند ترددات مختلفة ، وهذا يتيح فصل) تحليل (إشارتها لاحقا.

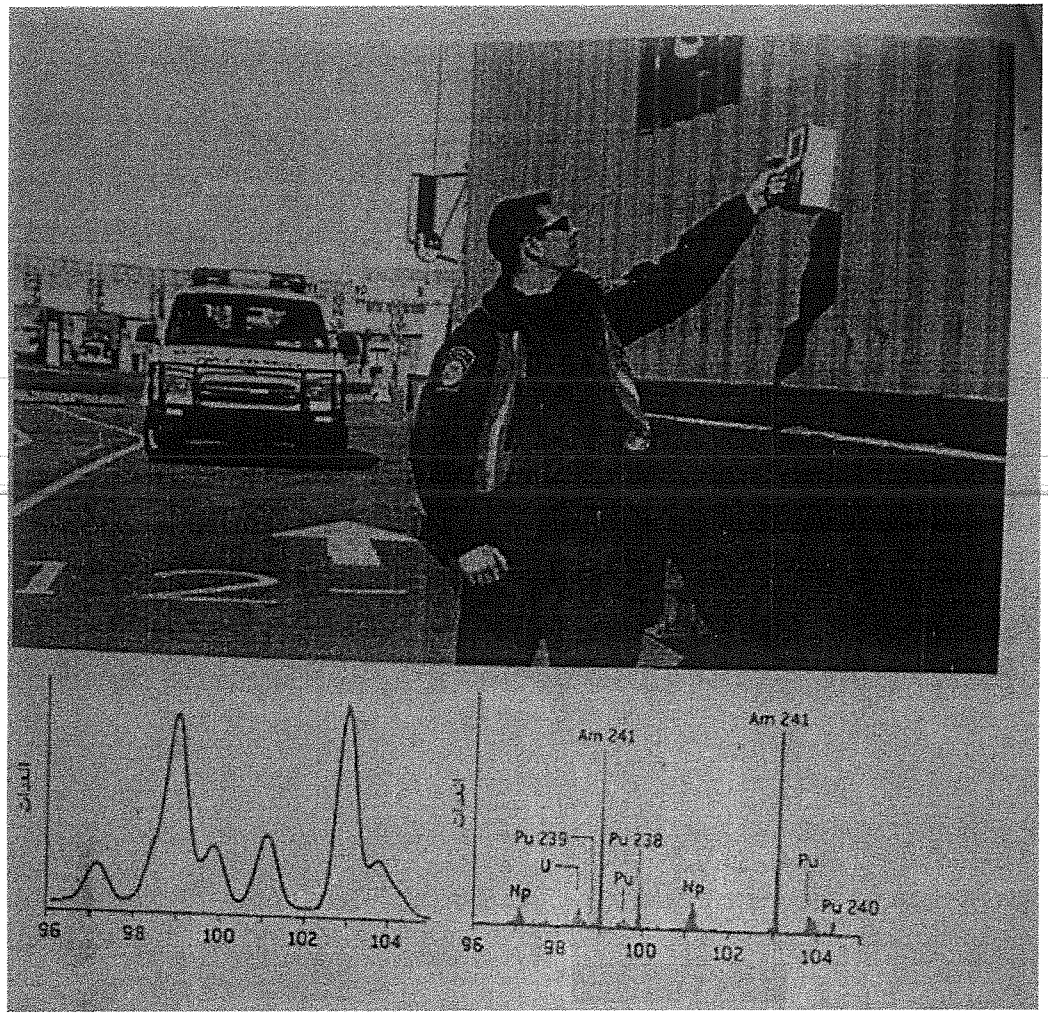
2-4 منع انتشار الأسلحة النووية

إن الكواشف الفائقة الموصلية المتاحة اليوم أكثر حساسية 100 إلي 1000 مرة من الكواشف العادية التي تعمل عند درجة حرارة الغرفة . وهذه الأجهزة تحسن القياسات في مدي واسع من المجالات.

منع انتشار الأسلحة النووية والدفاع الوطني . إن إحدى الأولويات الدولية المستعجلة هي مراقبة انتشار المواد النووية التي يمكن أن تستخدم في هجوم يقوم به إرهابيون أو دول مارقة ، تحتوي المواد النووية علي نظائر غير مستقرة تصدر الأشعة السينية وأشعة جاما وتوافر الطاقات المميزة لهذه الفوتونات بصمة تكشف عن ماهية النظائر المشعة الموجودة ولكن لسوء الحظ تصدر بعض النظائر الموجودة في تطبيقات حميدة أشعة جاما ذات طاقات شبيهة جدا بتلك التي تصدرها مواد تستخدم في الأسلحة . وهذا يؤدي إلي تحذيرات زائفة.

كانت هذه المشكلة تربك الولايات المتحدة التي تركب آلاف أجهزة مراقبة الإشعاع عن المداخل الحدودية لكشف أشعة جاما التي تصدرها المواد النووية المحمولة في عربات تعبر الحدود الكندية والمكسيكية.

وقد قام فريق يقوده > رابين) < من مختبر لوس ألاموس الوطني (و > أولوم) < من المعهد الوطني للمعايير والتقانة (NIST) في بولدر بكولورادو (وفريق آخر) في مختبر ليفرمور الوطني (بتطوير كواشف أشعة جاما مبنية علي أساس التقانة وتتمتع بقدرة تمييز طاقة تفوق أكثر من عشرة مرات تلك التي للكواشف العادية إذ تستطيع هذه الكواشف فصل عدد أكبر من الخطوط في طيوف أشعة جاما المعقدة للمواد النووية ، مثل مزائج نظائر اليورانيوم والبلوتونيوم . وقد طورت هذه الأجهزة خصوصا للمساعدة علي التحقق من المعاهدات الدولية حول عدم الانتشار ، وذلك بواسطة تعيين المحتوي من البلوتونيوم في الوقود النووي المستهلك . ولكن بإمكانها أن تميز كذلك بين الراديوم ^{226}Ra في حاويات القطط واليورانيوم ^{235}U في اليورانيوم العالي التخصيب . فلو أن كاشفا عاديا محمولا باليد أو جهاز مراقبة المداخل كشف إشارة أشعة جاما لكان بالإمكان استخدام أحد الأجهزة الفائقة الموصلية أداة لمتابعة التمييز بصورة لا لبس فيها بين هذين النظيرين ، وينتهي بذلك العديد من التحذيرات الزائفة.



الشكل (4-3) يوضح طريقة الكشف عن الإشعاعات ورسم بياني يوضح المواد المشعة والعلاقة بين طاقتها وكمية الإشعاعات الخارجة منها.

3-4 تحليل الشوائب الميكروبية

أحد التطبيقات المهمة في صناعة أشباه الموصلات هو التحليل المايكروي) الدقيق (بواسطة المجس الإلكتروني . في حين يشكل مجهر إلكتروني ماسح Scanning Electron Microscope صورة لعينة ما ، فإن حزمة الإلكترونات تجعل العينة تصدر أشعة سينية . فيمكن إذا تعيين تركيب العينة الكيميائي في النطاق النانومتر للحزمة بواسطة قياس طاقات مختلف الأشعة السينية الصادرة . وحين تمسح الحزمة كامل العينة تظهر الصورة الحاصلة أين توجد مختلف المركبات الكيميائية ، فتعطي خريطة للبني التي تحدد كيفية عمل الشائبة المايكروية.

تستخدم صناعة أشباه الموصلات حاليا كواشف شبه موصلة للأشعة السينية بغية دراسة البني والعيوب الموجودة علي الشوائب المايكروية . هذا مكنها من فصل العديد من قمم الأشعة السينية الطبقية المهمة ومثل هذه المنظومات للتحليل المايكروي صارت حاليا متاحة تجاريا.

المراجع

فيزياء الجوامد (1و2) عبد الفتاح الشاذلي

فيزياء الجوامد الجزء الأول والثاني احمد خوجلي

www.physics .com