



الفصل الدراسي الثاني الإمحاضرة الرابعة عشر) أستاذ المادة: د. غسان عدنان إلهيتي

عنوان المحاضرة:

# عمق الاختراق

# **Penetration depth**

المرحلة الثانية



المحاضرة الرابعة عشر) أستاذ المادة: د. غسان عدنان إلهيتي

الفصل الدراسي الثاني

#### عمق الاختراق (1) Penetration depth

تتضمن ظاهرة مازنر بانعدام الفيض المغناطيسي (B) داخل جسم في حالة التوصيل الفائق عندما يتعرض لمجال مغناطيسي خارجي أو مجال مغناطيسي داخلي ناشئ عن مرور تيارات سطحية ولكن المشاهدات العلمية نصت أن المجال المغناطيسي الخارجي يستطيع النفاذ داخل طبقة رقيقة جدا في القشرة الخارجية للجسم يعبر عن سمكها بما يسمى بثابت عمق الاختراق والذي يرمز له بالرمز ( $\lambda$ ) وقد وجد أن قيمة ( $B_{in}$ )داخل الجسم يقل أسيا مع المسافة (x)على النحو التالي (x) وقد وجد أن قيمة (x) وبالتالي فان الثابت (x) يعبر عن سمك القشرة الخارجية التي يقل عندها الفيض الداخلي إلى مقدار يساوي (x) من الفيض الخارجي المؤثر على الجسم ونظرا لان (x) صغيرة جدا تساوي تقريبا (x) فنجد أن الفيض ينعدم تقريبا عند مسافات صغيرة جدا . لذلك أشار مازنر إلى انعدام الفيض داخل الأجسام في الحالة (x).

#### ظاهرتا الطفو والتعليق المغناطيسيتان

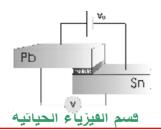
نتج من جراء رفض الموصلات الفائقة للمجالات المغناطيسية وتمغنطها المعاكس ظاهرتا الطفو والتعليق على الترتيب. إن ظاهرة الطفو تحصل عندما يتم محاولة وضع قطعة



مغناطيس في أعلى موصل فائق أو العكس. سوف يظل الجسم العلوي معلقاً في الهواء (طافياً) سواء كان المغناطيس أو الموصل نفسه. أنظر الشكل . وأما في ظاهرة التعليق فيتم تقريب مغناطيس دائم من قطبه الجنوبي إلى الموصل أولاً مع إرغام الأخير على عدم الحركة. يودي ذلك إلى تمغنطه سلباً، ثم يتم إبعاد المغناطيس الدائم بسرعة معينة . أثناء ذلك تنعكس مغناطيسية الموصل الفائق (بسبب المجال المغناطيسي

المحتبس حوله) فتنجذب لقطب المغناطيس الجنوبي. 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 لبعض والتصقهما 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.

### ظاهرة (أو وصلات) جوزيف صن:Josephson Junctions



طلع علينا جوزيف صن بظاهرة صارت تعرف باسمه. لقد تنبأ هذا العالم أنه عندما يتم وضع موصلين فائقين بجانب بعضهما بحيث لا

- Y -

المرحلة الثانية



المحاضرة الرابعة عشر) أستاذ المادة: د. غسان عدنان إلهيتي

الفصل الدراسي الثاني

يفصل بينهما إلا شريحة رقيقة جداً من مادة عازلة؛ فإن بعض الأزواج الإلكترونية تستطيع التنفيق 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 كما سوف نرى .

#### ظاهرة التكميم المغناطيسي

نلاحظ مما سبق إن المواد فانقة التوصيل 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) يتولد التكميم عند تعرض الحلقة فائقة التوصيل 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 تعرضت الحلقة ذات التوصيل الفائق لمجال يقل قليلاً عن عدد صحيح من الكمات بمقدار ضئيل (أقل من نصف كمة) فإنها تتكيف بحيث تكمل النقص من تلقاء نفسها من أجل أن تحافظ 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 ألسكويد

#### $\label{lem:superconducting Quantum Interference Device} \textbf{(SQUID)} \ \ \textbf{.}$

عبارة عن جهاز حساس جداً للمجالات المغناطيسية وبإمكانه أن يميز التغير في المجال المغناطيسي، بمعنى آخر يستطيع قياس مجال شدته تصل إلى:

### $1\times10^{-21}Tesla.m^2$

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 ألسكويد ينقسم إلى نوعين أساسيين حيث يعتمد الأول منهما على التيار المستمر-CO SQUID في حين يعتمد الآخر على التيار ذي التردد الراديوي. والفكرة الأخيرة جعلت من المجس أهمية تطبيقية عالية، فهو لا يقيس المجال العام المتوافر، بل يقيس التغير مهما كان صغيراً.

**− ۳ −** 

المرجلة الثانية



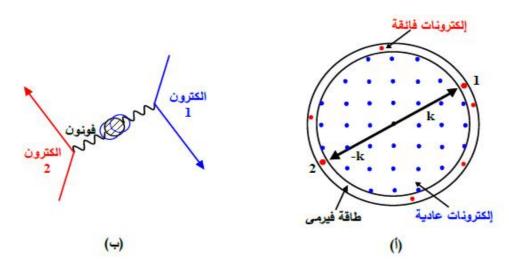
الفصل الدراسي الثاني المحاضرة الرابعة عشر) أستاذ المادة: د. غسان عدنان إلهيتي

#### نظرية الموصلات الفائقة

أن النظرية وضع أسسها ثلاثة من كبار العلماء وهم باردين وكوبر وشريفر . [ Bardeen, L. N. Cooper, and J. R. Schrieffer وعرفت باسمهم: نظرية باردين-كوبر شريفر أو اختصاراً بـ BCS Theory ، 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، وأيضاً بالتفاعل مع ما يسمى بالفونونات وهي عبارة عن كمات الطاقة الحرارية في داخل الموصلات.

أهم أساس قامت عليه النظرية هو فكرة الأزواج الإلكترونية (Cooper Pairs) أو أزواج كوبر. ومن المعلوم أن الإلكترونات تحمل ذات الشَّحنة وبالتالي فحسب قانون كولوم يفترض أن تتنافر عن بعضها قدر المستطاع.

ولإلقاء الضوء على تركيب زوج كوبر، نفترض معدن تقع الكترونات التوصيل فيه داخل كرة فيرمى ونفترض أن الكترونين يقعان بالقرب من سطح فيرمى تماما الشكل (1أ.) حدث تنافر بين هذين الإلكترونين بسبب تشابه الشحنة وبالتالى توجود قوة كولوم وبسبب الحجب الذى تسببه الإلكترونات الاخرى الموجودة بين هذين الإلكترونين فإن قوة تنافر كولوم يمكن أن تتناقص وعند أخذ هذا الحجب في الاعتبار فإن قوة التنافر بين الإلكترونين تختفي تماما بالرغم من صغر حجم كرة فيرمي.



الشكل 1(أ) التفاعل بين الإلكترونين الموجودان بالقرب من سطح فيرمى، (ب) مخطط فاينمان لتبادل الفونون.

أفترض العالم كوبر أن الإلكترونين في زوج كوبر يكونان حالة ارتباط فيما بينهما وهذا الارتباط يكون منهما نظاما واحدا وبالتالى ترتبط حركة أحدهما بالأخر ويتفكك زوج ك وبر فقط عندما يأخذ النظام كمية طاقة تساوى طاقة الربط بين الإلكترونين.

- ٤ -

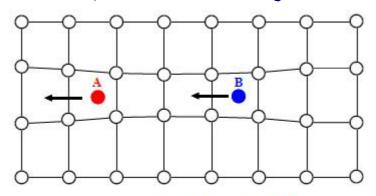
المرجلة الثانية



الفصل الدراسي الثاني المحاضرة الرابعة عشر) أستاذ المادة: د. غسان عدنان إلهيتي

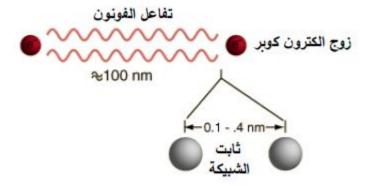
فسر كوبر منشأ قوة الترابط في زوج الإلكترونات على أساس وجود قوة جذب ولفترة وجيزة وتؤثر في إهتزاز الأيون الموجب الذي يمر بالقرب منه الإلكترون ويجذبه نحوه الشكل 19 (١ب) وبالتالى ينتج تجمع (إستقطاب)للأيونات الموجبة بالقرب من الإلكترون المار وهذا الاستقطاب يسبب ظهور جذب إضافي بين الإلكترون والإلكترون الآخر وبالتالى يتولد زوج كوبر، كما هو مبين في الشكل (٢).

تسمى قوة الارتباط بين إلكتروني زوج كوبر بتفاعل الفونون وتكون طاقة الإرتباط في الزوج أكثر قوة عندما تكون عزوم و لف الإلكترونين متعاكسة،بمعنى  $\mathbf{k} \uparrow$  و  $\mathbf{k} \downarrow$  - بناء على ذلك يمكن القول أن كل الإلكترونات الموجودة بالقرب من سطح فيرمى تتكثف في الحالة الأرضية وتكون أنظمة من أزواج كوبر ببين الشكل هذا المفهوم.



الشكل 2 حركة زوج كوبر.

ويوضح الشكل (٣) أيضا كيف أن أزواج كوبر ترتبط معا على مسافة مئات النانومتر أي على مسافة أكبر من ثابت الخلية بألف مرة ويكون سلوكها مثل سلوك البوزونات (bosons) وتتكثف في الحالة الأرضية .في ضوء نظرية كوبر يمكن القول أن المعدن يتحول من الحالة العادية إلى الحالة الفائقة على هيئة تكثيف للإلكترونات في الحالة الأرضية، أي التي يكونوا فيها أسفل فجوة الطاقة.



الشكل 3 التفاعل البيني في زوج كوبر ومقارنة مسافة الارتباط مع ثابت الشبيكة. نظرا لاختلاف اتجاه اللف لإلكتروني كوبر وحيث أن كمية تحرك كليهما متساوية في المقدار ومضادة في الاتجاه فإن كمية التحرك الكلية لزوج كوبر تساوى الصفر ويكون اللف الكلي

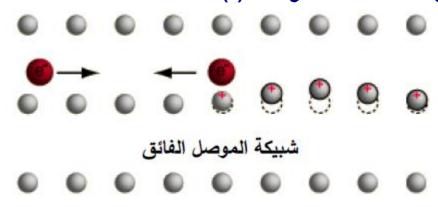
المرجلة الثانية قسم الفيزياء الحياتية



الفصل الدراسي الثاني المحاضرة الرابعة عشر) أستاذ المادة: د. غسان عدنان إلهيتي

للزوج يساوى صفر أيضا وبذلك يعمل الزوج عمل البوزونات وليس كالإلكترونات العادية التي يكون لها لف  $\pm 1/2$  والتي تعمل كفرميونات وبالتالي يمكن تمثيل الإلكترونات في جميع أزواج كوبر بدالة موجية واحدة لها تماثل كروى واحادية الطور وتشمل كل اجزاء الموصل الفائق كما يمكن اعتبار إلكتروني زوج كوبر على انهما موجتان متساويتان في السعة ومختلفتان في الطور بمقدار ٦ ولذلك فهما يكونان موجة واقفة .

يجب ملاحظة أن زوج كوبر لا يحدث له تشتت كما يحدث للإلكترونات العادية وذلك لأنه إذا أثرت الشبيكة على أحد الإلكترونات وتغيرت كمية تحركه بمقدار معين فإن الشبيكة ذاتها تغير كمية تحرك الإلكترون الآخر في الاتجاه المعاكس بنفس المقدار، أي أن التغير الكلي لكمية تحرك الزوج تكون صفرا، كما يوضح الشكل (4).



### الشكل 4 ارتباط وتحرك زوج كوبر في الشبيكة.

ومما سبق نستخلص، وكما ذكرنا من قبل، أنه ليس للشبيكة أي تأثير على زوج كوبر وبذلك يكون حر الحركة تماما ولا يعاني أي مقاومة عند تحركه في الموصل الفائق يمكن تخيل حركة الإلكترونات الفائقة مثل حركة متسلقوا الجبال الذين يربطان بعضهم ببعض بحبل، فإذا ترك أحد الإلكترونات موضعه بسبب فوضى المنطقة الناتجة عن اضطراب ذرات الشبيكة فإن جيرانه ستجذبه ليعود إلى مكانه .تجعل هذه الخاصية منظومة أزواج كوبر ذات قابلية صغيرة للتشتت ( وربما تنعدم )وتبعا لذلك تكون مقاومته معدومة، بحيث إذا تحرك الأزواج تحت تأثير قوة خارجية سوف يستمر سريان التيار في الموصل الفائق إلى مالا نهاية حتى يتوقف العامل المسبب له ( التبريد حتى الدرجة الحرجة) .

ومن جراء فكرة الأزواج الإلكترونية يمكن أن تنقسم الإلكترونات إلى جزء فائق وآخر عادى حيث يقوم الأول بجميع الأعباء الكهربائية ويمنح الموصل جميع الصفات. وتتكون فجوة في طاقة الموصل بين الحالات الحاوية للأزواج وتلك الحاوية للإلكترونات العادية. 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:

 $E_g = 3.53kT_C$ 

قسم الفيزياء الحياتية

المرجلة الثانية



المحاضرة الرابعة عشر) أستاذ المادة: د. غسان عدنان إلهيتي

الفصل الدراسي الثاني

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.

#### بعض تطبيقات المواد فائقة التوصيل

•المواصلت: وفسي القطسارات علمي وجسه الخصوص: من 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. في اليابان تم تجريب هذه الفكرة عملياً شكل لا، 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 كل ما يلزم حيث يستفاد من قوة التنافر مع حيث يستفاد من قوة التنافر مع المغناطيسات نفسها في دفع على ٥٠٠ كم في الساعة.

#### 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 ، إن الصورة سوف تصاب بالتشويش والسبب هو المجالات المغناطيسية المجاورة والتي أثرت على حركة الإلكترونات المهبطية التي هي المسؤولة عن الصورة 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

- v -

المرجلة الثانية



الفصل الدراسي الثاني المحاضرة الرابعة عشر) أستاذ المادة: د. غسان عدنان إلهيتي

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 الفحوصات اللا اتلافية (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.

#### 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 جدأ المتولدة من المخ أو القلب أو الجهاز العصبي، فإنه يفضل توفير جو خال 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 مجوعة كبيرة منها بشكل نصف كروى تغلف رأس المريض. وصل عددها السكويدات في المجوعة الواحدة إلى ٢٤ في بعض التجارب.

المرجلة الثانية