تاريخ الموصلية الفائقة : *History of superconductivity*

أن ظـاهرة الموصـلية الفائقـة تحـدث عنـدما عنـد تبريـد بعـض المـواد الـى درجـات حـرارة منخفظـه حيـث تصـبح المقاومـة الكهربائيـة للمـواد مسـاوية إلـى الصـفر عنـد درجـه حـرارة معينـه تسـمى بدرجـه الحـرارة ألحرجـه أو الانتقاليـة (critical or transition temperature) وهـي درجـه الحـرارة التـي تحـول فيهـا المـادة مـن الحالـة الطبيعـة إلـى حالـه التوصـيل الفـائق عنـد التبريـد. آن أول اكتشـاف لظـاهرة التوصـيل الفـائق هـو العـالم الفيزيـاء الهولنـدي كاميرلنـك اونـيس (kamerlingh onnes) وذلـك خـلال دراسـة الخصـائص الكهربائيـة للزئبـق(Hg) عنـد درجـات الحـرارة المنخفظـه لاحـظ آن الزئبـق يفقـد مقاومتيـه الكهربائيـة إلـى الصـفر عنـدما تكـون درجـه حرارتـه اقـل مـن(4.15K). فـي عـام(1913) تـم اكتشـاف بـان عنصـر الرصـاص يصـبح مـاده فائقـة التوصـيل عنـد درجـه حـرارة (7.2K) , وفـي عـام 1933اكتشـف كـل مـن العالمـان مـازنر و اوخسـنفيلد (meissner&ochsenfeld) ظـاهره مهمـة تعـد مـن مميـزات المـواد فائقـة التوصـيل حيـث ان المجـال المغناطيسـي الخـارجي لا يختـرق المـواد فائقـة التوصـيل أي أن المـادة تطـرد هـذا المجـال المغناطيسـي الضـعيف عنـد التبريـد إلـى اقـل مـن درجـه حـرارة ألحرجـه و سميت هذه الظاهرة بتأثير مازن (meissner Effect).

خواص فائقة التوصيل : *superconductor properties*

آن حالـة التوصـيل الفائقـة الكهربائيـة يمكـن أن تتميـز بواسـطة عـدة عوامـل هـي : كثافـة التيـار الحـرج (J_C) ، والمجـال المغناطيسـي الحـرج (H_C)، ودرجـة الحـرارة الحرجـة (T_C)، وان هـذه العوامـل يعتمـد احـدها علـى العـاملين الآخـرين , آن فـي حالـة التوصـيل الفـائق تسـتوجب مـن العوامـل الثلاثـة آن تكـون تحـت قيمـة حرجـة معينـة وان آي اخـتلاف آو ارتفـاع فـي قيمـة إي عامـل مـن هـذه العوامـل الحرجـة فـان حالـة التوصـيلية الفائقـة تلغـى وسوف ترجع المادة إلى حالتها الطبيعة .

1- درجة الحرارة الحرجة *Critical Temperature (TC)*

إن للمـواد فائقـة توصـيل درجـة حـرارة حرجـة (Tc) وهـي الدرجـة التـي تـنخفض المقاومـة النوعيـة للمـادة إلـى آن تصـل إلـى الصـفر .أن هـذا الانتقـال عمليـة تحـدث بصـورة مفاجئـة جـدا, ويكتمـل عنـد ظهـور المـادة بطـور جديـد يسـمى(طور فـائق التوصـيل) يوصـف هـذا

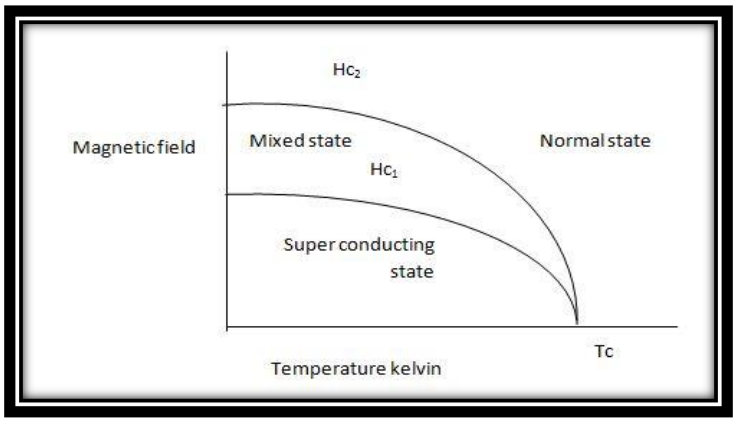
الطـور بواسـطة نظريـة (BCS)، آن عـدد مـن المـواد تنتقـل للطـور فـائق التوصـيل عنـد درجـات الحـرارة المنخفضـة وان درجـة حـرارة الانتقـال الأعلـى كانـت بحـدود (23k)الـى حـين اكتشـفت المـواد الفائقـة التوصـيل ذات درجـات حـرارة حرجـة عاليـة فـي عـام 1986, حيــث ان المــواد ذات درجــات الحــرارة الحرجــة العاليــة المــدى (120K) ذات أهميــة واسـعة, حيـث إنهـا تبقـى فـي حالـة فائقـة التوصـيل فـي درجـات حـرارة أعلـى مـن نقـاط غليـان النيتروجين السائل (77k). .

2- كثافة التيار الجرج (Jc) Critical current density

أن التيـار الـذي ينتقـل خـلال المـواد الفائقـة التوصـيل لـه قيمـة قصـوى وفـوق هـذه القيمـة فـان التوصـيلة الفائقـة سـوف تتوقـف , آن انـدفاع تيـار كبيـر جـداً خـلال المـواد الفائقـة التوصـيل فأنهـا سـوف ترجـع إلـى حالتهـا الطبيعيـة ،حتـى أذا كانـت تحـت درجـة حرارتهـا الحرجـة . حيـث أن هنـاك علاقـة بـين كثافـة ألتيـار الحـرج(Jc) مـع درجـة ألحـرارة انـه عنـد انخفـاض درجة حرارة الموصل الفائق ألتوصيل فان ألتيار المنساب يكون أكبر .

3- المجال المغناطيسي الحرج (Hc) *Citrical magnetic field*

آن للمواد فائقة التوصيل درجة حرارة حرجة (Tc) عندما تنخفض درجة حرارة المواد الفائقة التوصيل تحت تلك الدرجة (Tc) المجال ألمغناطيسي يزاد ليصل إلى أعظم قيمة تسمى بالمجال المغناطيسي الحرج (Hc) ، أن الزيادة في المجال المغناطيسي أعلى من الحرج يجعل المواد الفائقة التوصيل سوف تذهب الى الحالة الطبيعية للمقاومة ، وفي المواد فائقة التوصيل هنالك منطقة من المجال المغناطيسي ودرجة الحرارة ضمن المادة هي التي تجعلها فائقة التوصيل وخارج هذه ألمنطقة فان المادة تكون طبيعية.ومن الشكل (1) نلاحظ ان هنالك منطقة مختلطة(Mixed state) تفصل بين الحالة الطبيعية الى الحالة الفائقة وهذة الظاهرة تلاحظ في المواد غير المعدنية (السيراميكية).



الشكل (1) يوضح العلاقة بين المجال المغناطيسي ودرجة الحرارة

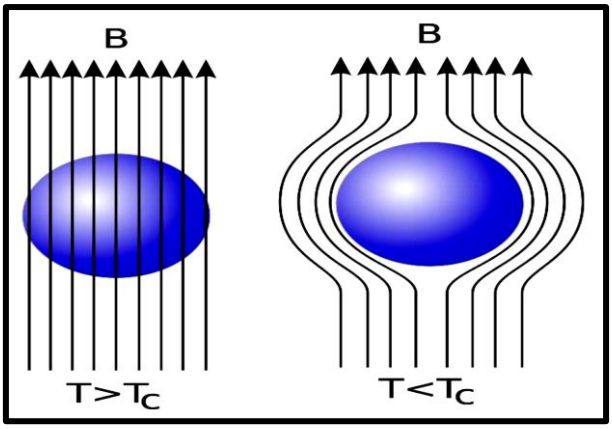
وقد بينت التجارب ان المجال المغناطيسي الحرج يعتمد على درجة الحرارة وذلك من خلال الصيغة الرياضية الاتية:

$$Hc(T) = Hc(0)\,[1 - (T/Tc)^2]$$

حيث ان $H_c(0)$ يمثل المجال المغناطيسي عندما تكون درجة الحرارة (T=0 K)

تأثير مازنر : *Meissner Effect*

أن تأثير مازنر يعرف على انه طرد لأي تدفق مغناطيسي في داخل الموصل الفائق اكتشف هذا التأثير عام سنة 1933 م على يد العالمان والتر ميسنر و روبرت أوجنفيلد (Robert ochsenfeld& Walter meissner). أن الشكل (4) يبين خطوط المجال المغناطيسي في الحالة فائقة إلتوصيل وإلحالة الطبيعية للمادة، حيث يلاحظ من هذا الشكل بان خطوط المجال المغناطيسي تخترق المادة عندما تكون في حالتها الطبيعية كما موضح في الشكل (4ب).



(أ) (ب)

آن الشكل (4) يمثل خطوط المجال المغناطيسي في الحالة فائقة التوصيل والحالة الطبيعية للمادة.

عندما يحصل تحول المادة من الحالة الطبيعية الى فائقة التوصيل فأنها تقوم بشكل فعال ونشيط على دفع المجال المغناطيسي وطرده من الداخل كما موضح في الشكل(4ب).

ومن هذا يتضح ان:

$$B_{in} = B_{ext} + B_{induced}$$

$$\mathrm{Bin} = \mu_o H + \mu_o M$$

$$\mathrm{Bin} = \mu_o(1 + X)$$

B_{in}هو المجال إلمغناطيسي داخل فائق التوصيل

B_{ext}المجال إلمغناطيسي الخارجي

$B_{induced}$المجال إلمغناطيسي الداخلي

وكذلك يتمثل كل من(H)شدة المجال المغناطيسي الخارجي , (X) هي التأثيرية المغناطيسية ,(M) تمغنط الوسط ،(μ_o)هي نفاذية الفراغ.

وعندما تكون المادة في حالة فائق التوصيل فأن:

$$B_{in} = 0$$

$M=-H$

$X = -1$

أن هـذا المبـدأ الـذي حـدث للموصـل الفـائق حيـث جعـل المجـال المغناطيسـي فـي داخلـه يسـاوي صـفرا" وهـذه الصـفة مميـزة عنـد المـواد الـدايا مغناطيسـية والتـي تنشـأ عنـدما تكـون المقاومية الكهربائية لها تساوي صفرا.

إن أهـم المعـادلات النظريـة لتـأثير مـازنر كانـت مـن خـلال معادلـة لنـدن حيـث أوضـحت آن المجـال المغناطيسـي يتلاشـى داخـل إلموصـل الفـائق عنـد مسـافة (20-40 nm) وهـذا مـا يصـف معنـى عمـق الاختـراق لنـدن (Depth London penetration) . حيـث آن تأثير مازنر يعد من المميزات المهمة للتوصيلية الفائقة وهو مايسمى بانتقال الطور .

نظريات التوصيل الفائق ذات درجات الحرارة الواطئة

Theories of Superconductor at low Temperature

أن اكتشـاف ظـاهرة التوصـيل الفـائق فـي النصـف الأول مـن القـرن العشـرين ظهـرت مشـكلة التقلبـات المشوشـة للانتقـال إلـى التوصـيلية الفائقـة التـي لـم تأخـذ بنظـر الاعتبـار العينـات المحضـرة بشـكل كتـل(Bulk) , حيـث أن الدرجـة التـي تفصـل بـين الطـور الطبيعـي والطـور الفـائق التوصـيل للمـادة هـي درجـة الحـرارة الحرجـة ، ومـن الجـدير بالـذكر آن مثـل السـلوك للخصـائص الفيزيائيـة فـي الموصـلات الفائقـة تتوافـق مـع النظريـة التـي جـاء بهـا كـل مـن (Ginzburg-landau) والنظريـة المهجريـة (BCS) واللتـان توضحان ظاهرة التوصيل الفائق.

1- **معادلة لندن** ***(london Equation)***

تـم وصـف الالكترونـات الموصـلة فـي الحالـة الطبيعيـة للمعـدن بواسـطة قـانون اوم (ohm's low) يعبـر عنـه بالصـيغة الرياضـية ($j=\sigma E$)ولكـن بعـد تعـديل هـذا الوصـف وتـأثير مـازنر فـي حالـة التوصـيلية الفائقـة فانـه افتـرض ان كثافـة التيـار فـي حالـة فائقـة التوصـيل تتناسب طردياً مع متجه الجهد (A) في المجال المغناطيسي الموقعي ،حيث ان

$$B=\nabla\times A$$

ان قيمة التناسب $(-1/\mu_o\lambda^2_L)$.

$$j=(-1/\mu_o\lambda^2_L)A$$

حيث ان λ_L تمثل ثابت الابعاد من الطول , وهذة هي معادلة لندن. ويأخذ (curl) لكلا الطرفين فنحصل على ما يلي:

$$\nabla \times j = (-1\backslash \mu_o\lambda^2_L)B$$

والان بأستخدام معادلات ماكسويل:

$$\nabla xB= \mu_o j$$

$$\nabla\nabla\times B= \mu_o\nabla\times j\times$$

$$\nabla\nabla\times B= \text{grad div}B-\nabla^2 B\times$$

$$\nabla x\nabla\times B=-\nabla B \qquad \text{(because divB=0)}$$

$$-\nabla^2 B= \mu_o\nabla^* j$$

$$-\nabla^2 B= -[n_s e^2\mu_o /m^*]B = -B/\lambda^2$$

$$\lambda^2= (m^*/n_s e^2\mu_o).$$

حيث أن (λ) تمثل عمق الاختراق للندن (حيث يرتبط مع مقدار العمق الذي يخترقه ألمجال المغناطيسي عند سطح ألموصل الفائق) , ان هذا التعريف عند جمعه مع صيغ كورتر وكاسمير(GC) في كثافة الالكترونات للمواد الفائقة التوصيل ينتج عنه اعتماد درجة الحرارة على عمق الاختراق .

$$\lambda\,(T)=\lambda(0)/\sqrt{1+t4}$$

رغم آن هذه المعادلة لا تمتلك تبريراً آو تفسير مجهري عند درجات الحرارة الواطئة لذلك فهي تأخذ الصيغة الآتية:

$$\lambda_{(T)}=\lambda_{(0)}\,[(1+t^4/2)+0(t^8)]$$

$\lambda_{(T)}=\lambda_{(0)}\ [1-(T/Tc)^4]^{-1\backslash 2}$

حيث أن $\lambda(0)$ هي عمق الاختراق في درجة حرارة (T=0k)

ان المعادلة الأخيرة تفسر ان عمق الاختراق يحتوي على قيمة في المدى من (10-100nm) حيث ينخفض المجال المغناطيسي بشكل كبير من السطح الى الموصل الفائق مما يعني ان هنالك منطقة صغيرة ذات سمك معين بالقرب من السطح الذي يوجد فيه حقل مغناطيسي ملموس, وتعرف هذه المنطقة باسم عمق لندن للاختراق.

عمق الاختراق (λ)(pentration Depth)

من المميزات المهمة للتوصيل الفائق ،أن المجال المغناطيسي الموجود في داخل الموصل الفائق ينخفض آسيا من القيمة العظمى إلى أن يصل إلى الصفر حسب العلاقة التالية :

$B_X=B_0\ e^{-x/\lambda}$

حيث تمثل:

B_0المجال المغناطيسي عند السطح .

X هي السافة من السطح الى اي نقطة معينة داخل المادة .

λ هو عمق الاختراق وهو عامل لديه قيمة مثالية تتراوح بين (10-100 nm).

ان عمق الاختراق(λ) يتغير مع درجات الحرارة حسب العلاقة التجريبية التالية:

$$\lambda_{(T)} = \lambda_0[1 - (\frac{T}{T_c})^4]^{-\frac{1}{2}}$$

عندما تكون(T→Tc) فان النموذج يكون في حالة التوصيل الفائق ، وان المجال المغناطيسي عندما يخترق بعمق إلى داخل العينة فان العينة تكون في الحالة الطبيعية أي عندما ($\lambda\rightarrow\infty$) .

2- **نظرية كيزينبرك-لانداو :** ***Ginzburg-landau theory***

قام كل من كيزينبرك -لانداو باستعمال النظرة الظاهرية لعملية وصف انتقال المادة من حالتها الطبيعية إلى الحالة الفائقة التوصيل, وفق الأساس الثرموديناميكي للتحول ألطوري في المرتبة الثانية , (second order phase transition).

وقد قدمت هذه النظرية (Ψ) هو العامل للالكترونات فائقة التوصيل أما (n_s) فهو الكثافة الموضعية للالكترونات فائقة التوصيل وحسب العلاقة ($n_s=|\Psi|^2$) وطبقاً للنظرية فان التغير في مقدار الطاقة الحرة (F) ممكن أن يتطور إلى قوى المتسلسلة (Ψ) ومن هذه الحالة فان عمق الاختراق المغناطيسي(λ) والمسافة بين الالكترونات أزواج كوبر وطول التشاكه الفائق التوصيل (ξ) ممكن أن يحسب بواسطة العلاقات التالية:

$$\xi^2(T) = \hbar^2 / 4m\alpha$$

$$\lambda^2 (T)=mc^2/4\pi n_s e^2$$

حيث ان α تمثل عامل متغير في التجربة ويكون معتمداً على التقلبات الثرموداينامية في الطور فائق التوصيل.

وان كل من العاملين (ξ),(λ) يتباعدان بالطريقة نفسها عندما يكون (T=Tc) ، وعندما تكون ($T \to Tc$) فان النسبة بين (ξ),(λ) تعطي عاملاً محدداً يسمى بعامل كينزينبرك -لانداو ويرمز له(K) وهو يمثل الخاصية التي تميز آو تفرق بين أنواع مواد فائقة التوصيل سواء كانت المواد الفائقة التوصيل من النوع الأول أو إلنوع الثاني ويمكن آن تمثل بالعلاقة التالية لتعين نوع الموصل الفائق :

$$K = \frac{\lambda}{\xi}$$

حيث آن :

K يمثل عامل كينزينبرك-لانداو

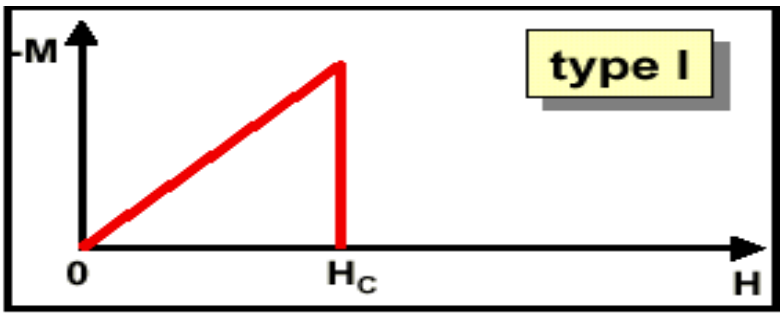
وهو يكون في حالتين هما أذا كان($K < 1/\sqrt{2}$) فان المادة الفائقة التوصيل هي من النوع الاول (Type-I)، أما أذا كانت ($K > 1\backslash\sqrt{2}$) فان المادة الفائقة التوصيل هي من النوع الثاني (Type–II).

أنواع المواد الفائقة التوصيل *Type of superconductor*

تصنف المواد التوصيلية الفائقة إلى فئتين آو نوعين اعتماداً على استجابتها للحقول المغناطيسية ويشمل هذا التصنيف النوع الأول للمعادن فائقة التوصيل (Type-I superconductors) و الذي يسمى بالموصلات الفائقة الرخوة (soft-superconuctors),أما النوع الثاني للمعادن الفائقة التوصيل(Type-II) والتي تسمى بالمواصلات الصلبة (Hard-superconductors)، ان معامل كينزينبرك- لانداو (k) يلعب دورا مهما في المقارنة بين هذين النوعين من الموصلات الفائقة فإذا كانت قيمة ($k<1/\sqrt{2}$)فأن الموصل الفائق من النوع الأول، أما أذا كانت قيمة ($K>1/\sqrt{2}$) فأن الموصل الفائق من النوع الثاني .

1- النوع الاول الفائق التوصيل: *Type-I superconductor*

في هذا النوع من المواد الفائقة التوصيل تسلك سلوك مواد دايا مغناطيسية عندما تكون قيمة المجال المغناطيسي لها اقل من قيمه المجال المغناطيسي الحرج (Hc) فان المادة تكون فائقة التوصيل , واعلى من هذه القيمة تكون في حالتها الطبيعية. كما انها تظهر استجابة كامل لتأثير مازنر. وهذا النوع له قيمه مجال مغناطيسي حرج (Hc) و هناك الكثير من العناصر المصنفة من النوع الاول الرصاص والالمنيوم والزئبق كما في الشكل ادناه الذي يمثل النوع الأول من فائق التوصيل.

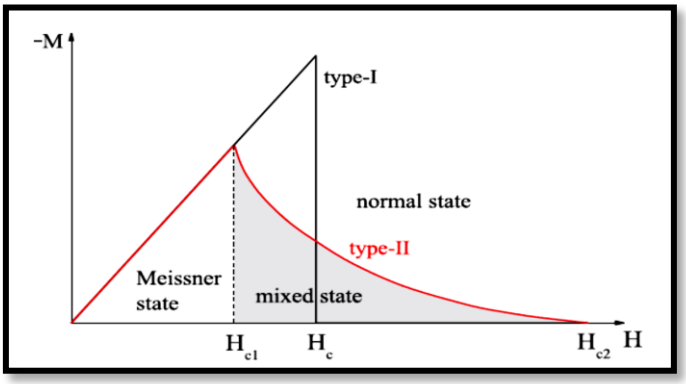


.

الشكل (3) يمثل النوع الاول من فائق التوصيل

2- النوع الثاني الفائق التوصيل: *Type-II superconductor*

آن هذا النوع توجد له قيمتان للمجال المغناطيسي الحرج (Hc1,Hc2)حيث تكون قيمة (Hc1) اقل من قيمة (Hc2) و يمكن أن تصل قيمه المجال المغناطيسي الحرج للنوع الثاني بحدود (100) مره اكبر من مجال مغناطيسي الحرج النوع الأول , كما آن هذا النوع لا تظهر فيه استجابة كاملة لتأثير مازنر . كما الشكل(4) يمثل منحني التمغنط للنوع الأول و الثاني للمواد الفائقة التوصيل.



الشكل(4) يمثل منحني التمغنط للنوع الأول و الثاني للمواد الفائقة التوصيل

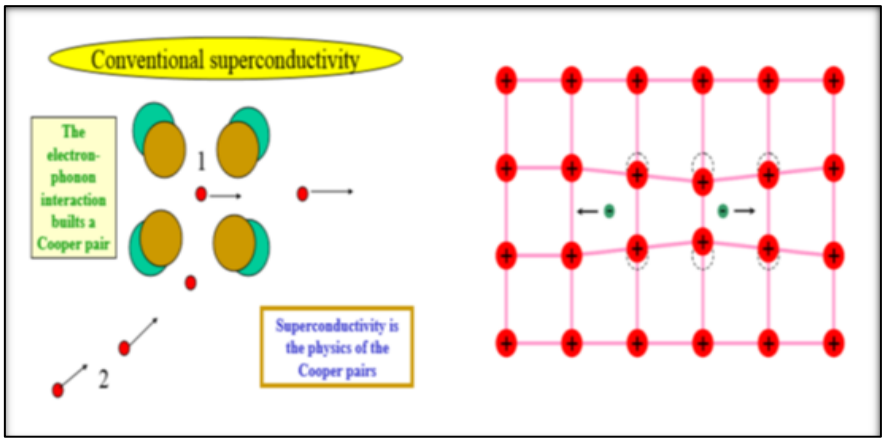
كما آن في النوع الثاني من المواد الفائقة التوصيل عندما يكون المجال المغناطيسي بين المجالين(Hc1,Hc2) فان الموصل الفائق يقع في الحالة المختلطة (mixed state) آي بين الحالة الطبيعية و الحالة فائقة التوصيل.

نظرية (BSC) : *(BSC) theory*

أصبح فهم ظاهرة التوصيل الفائق أكثر وضوحا" من خلال النظرية (BSC) التي اعتمدت من قبل الفيزيائيين الثلاثة. (J.Bardeen , L.Cooper, J.Schriffer) التي سميت بأسمائهم أن نظرية (BSC) بينت التوصيلية الفائقة عند درجات حرارة قريبة من درجة حرارة الصفر المطلق وكذلك أظهرت التوصيل الفائق التقليدي عند درجة حرارة الهليوم السائل والتي هي قدرة معادن معينة على توصيل الكهربائية في درجات حرارة واطئة دون أي مقاومة كهربائية , كما افترضت ان الإلكترونات التي لها برم وزخم معاكس يمكن لن تزدوج لتكون ازواج تدعى ازواج كوبر (cooper Pairs) حيث آن هذه الأزواج من الالكترونات ممكن يكون لها سلوك مختلف عن الالكترون

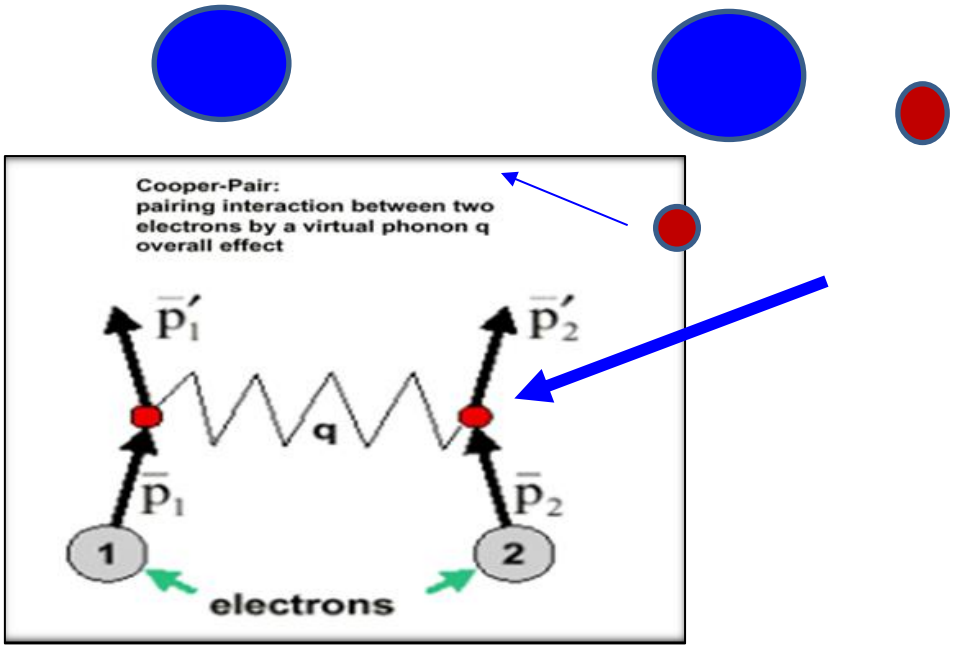
المنفردة , وقد تخضع لمبدأ باولي للا ستبعاد (Pauli exclusion principle) كما أن الأزواج الالكترونية وهي ممكن ان تتجمع في المستوى نفسه من الطاقة , آن الأزواج الالكترونية تمتلك مستوى واطئ تقريبا من الطاقة وهي التي تترك فجوة طاقة اقل من طاقة آي منهم تقارب (1mev) والتي تمنع تفاعل التصادم الذي يسبب المقاومة الكهربائية العادية وذلك عند درجات الحرارة التي تكون فيها الطاقة الحرارية للمادة اقل من فجوة الطاقة لذلك فأن المادة تظهر مقاوميه كهربائية تساوي صفراً. فقد ادرك كوبر ان الاهتزازات في الشبكية هي المسؤلة المباشرة على كامل التيار وهي التي تحث الالكترونات على الازدواج كفريق يستطيع تجاوز كل العقبات التي تسبب مقاومة الموصل ,وان هذه التشكيلات او الفرق من الالكترونات تدعى ازواج كوبر (cooper pairs).

ومن جانب اخر قيم كوبر وزملاؤه ان الالكترونات في الحالة الطبيعية للمادة هي عادة ما تتنافر احداهما مع الاخر يجب ان يظهر عليها التجاذب الشديد كما في حالة الموصلات الفائقة, وبذلك وجدوا حل لهذه المشكلة تكمن في الفوتونات وفي رزم من الموجات الصوتية تؤدي الى حدوث اهتزازات في الشبكية البلورية وان هذه الاهتزازات لا يمكن سماعها إلا آن دورها مهم كوسيط ولا يمكن الاستغناء عنه وفقاً للنظرية أن حركة الألكترونات كشحنه سالبه في الشبيكة تحدث بواسطة الايونات الموجبة للمواد فائقة التوصيل وبالتالي فأن الشبكية سوف تضطرب. وان هذا الاضطراب يسبب انبعاث مستمر للفوتونات والتي تشكل قاعدة من الشحنات الموجبة تحيط بالألكترونات وان الشكل (5) يوضح موجة الاضطراب للشبكية سببة الانجذاب نحو الالكترون المتحرك .



الشكل (5) يوضح اضطراب الشبكية وتشكيل زوج كوبر عند حركة

أن النظريـــة (BSC) نجحـــت فـــي وصـــف أن الإلكترونـــات ممكـــن ان تتجـــاذب خـــلا ل تفاعلـه مـع االشـبكية البلوريـة، وهـذا يحصـل بـالرغم مـن أن الالكترونـات لـديها نفـس الشـحنة حيـث أنـــه عنـــدما تتذبـــذب الـــذرات فـــي الشـــبكية كمنـــاطق ســـالبه وموجبـــه قـــان الـــزوج الالكترونـــي يتنـــاوب فـــي الـــدفع والســـحب معـــا مـــن دون تصـــادم وعنـــد ارتبـــاط الإلكترونـــات مع بعضها كأزواج فأنها تتحرك في المادة فائقة التوصيل في شكل منتظم.



الشكل (6)يبين انبعاث الفوتون (q) وامتصاصه بين الازواج كوبر الالكتروني في الموصل الفائق.

فـــي نظريـــة (BCS) إن أعلـــى درجـــة حـــرارة حرجـــة (Tc) توقعـــت أن تصـــل بحـدود (30 – 40k) كمـا أن الطاقـة الحراريـة تسـبب تفـاعلات(الكترون- فوتـون) التـي تســـمح بتشـــكيل ازواج كـــوبر. أن النظريـــة (BCS) اســـتنتجت العديـــد مـــن التنبـــؤات والتوقعات المهمة التي تعتمد على تفاصيل التفاعل حيث بينت في العلاقة التالية:

$$Tc=1.14\hbar w_D/k_B exp\text{-}(1/N(F)V\ )$$

حيث ان ؛

(K_B)هوثابت بولترمان

(WD) تردد ديباي

N(F) كثافة الحالة عند المستوى فيرمي

Vهو معدل تفاعل (الكترون- فوتون)

تطبيقات المواد الفائقة التوصيل :

Applications of superconductors

من اهم التطبيقات والاستخدامات لظاهره التوصيل الفائق :

١_ تدخل في صناعه المولدات التي تحتوي على اسلاك فائقة التوصيل حيث تكون اكثر كفاءه من المولدات ذات اسلاك النحاس كما ان هنالك مولدات ذات كفاءه على الحدود (99%) وحجمها اصغر من حجم المولدات العادية .

٢_في صناعه القطارات الحديثة باستخدام التقنية الطفو المغناطيسي المعتمدة على الموصلات الفائقة حيث تصنع مغانط فائقة التوصيل و قويه جدا و هي تعمل بإزاله الاحتكاك بين القطار و السكك الحديدية .

٣_ التطبيقات الإلكترونية : حيث تعمل على صنع مرشحات عالية الاداء تبنى من سلك فائق التوصيل ذو مقاومه كهربائية قريبه من الصفر حيث تعمل على تحرير الترددات المرغوبة و رفض الترددات الغير مرغوب مثل الترددات الراديوية (RF) كما في نظام الهواتف النقالة كذلك يستخدم في تطبيقات علميه مثل تطوير اجهزه الأشعة السينية (X_Ray detectors) و تطوير كاميرات بصريه عالية الحساسية تسمى scamera)