

This file has been cleaned of potential threats.

To view the reconstructed contents, please SCROLL DOWN to next page.

الفصل الأول

الالكترونيات الموصلية الفائقة

١ - ١ النظريات التقليدية

خلال العام ١٩٥٠، تم التوصل الى فهم ظاهرة الموصلية الفائقة "التقليدية"^(١) من خلال نظرية المادة المكثفة^(٢)، لجينسبورج-لاندوا (١٩٥٠) والنظرية المجهرية^(٣) لباردين-كوبر-شريفير^(٤) في العام (١٩٥٧). تم توضيح الظواهر المنطقية لنظرية جينسبورج - لاندوا للموصلية الفائقة والتي تجمع بين نظرية لاندوا من الدرجة الثانية لمرحلة التحولات مع معادلة أشباه الموجات لشروندجر ، حققت هذه الظواهر نجاحا كبيرا في شرح الخصائص الميكروسكوبية للموصلات الفائقة على وجه الخصوص. أوضح أبريكوسوف أن نظرية جينسبورج- لاندوا تقسم الموصلات الفائقة الى فئتين يشار إليها بالنوع الأول والنوع الثاني. التمديد رباعي الأبعاد^(٥) لنظرية جينسبورج - لاندوا، ونموذج كولمان واينبرج^(٦) ، مهمان في نظرية المجال الكمي وعلم الكونيات^(٧) . وجد ماكسويل ورينولدز وآخرون في عام

١ ظاهرة الموصلية الفائقة "التقليدية" (ملحق ١)

٢ نظرية المادة المكثفة (ملحق ٢)

٣ النظرية المجهرية (ملحق ٣)

٤ نظرية باردين-كوبر-شريفير (ملحق ٤) BCS theory (named after John Bardeen, Leon Cooper, and John Robert Schrieffer) is the first microscopic theory of superconductivity since its discovery in 1911. The theory describes superconductivity as a microscopic effect caused by a condensation of Cooper pairs into a boson-like state. The theory is also used in nuclear physics to describe the pairing interaction between nucleons in an atomic nucleus.

٥ التمديد رباعي الأبعاد لنظرية جينسبورج - لاندوا

The four-dimensional extension of the Ginzburg-Landau theory

٦ نموذج كولمان واينبرج The Coleman-Weinberg model represents quantum electro dynamics of a scalar field in four-dimensions.

٧ نظرية المجال الكمي وعلم الكونيات (ملحق ٥)

١٩٥٠ أن درجة الحرارة الحرجة للموصل الفائق تعتمد على كتلة النظائر للعناصر التأسيسية^(٨) وأشار الإكتشاف الى تفاعل الإلكترون - والفونون وهي آلية مجهرية مسئولة عن الموصلية الفائقة. وقد أوضحت النظرية المجهرية الكاملة للموصلية الفائقة أن التيار الكهربائي في الموصلات فائقة التوصيل نتيجة لتدفق أزواج الكترونات كوبر^(٩)، تتفاعل أزواج الإلكترونات من خلال تبادل الفونونات. وقد أوضح بوجوليوبوف أن دالة الموجة في نظرية باردين-كوبر- شريفير، يمكن الحصول عليها بإستخدام التحول المتعارف عليه لهاملتون الإلكترونية^(١٠) التي ساهمت في ظهور نظرية جينسبورج - لاندوا القريبة لدرجة الحرارة الحرجة. شكلت تعميمات نظرية باردين - كوبر - شريفير للموصلات الفائقة التقليدية الأساس لفهم ظاهرة السيولة العالية ، حيث تقع داخل التصنيف المكون لامدا^(١١) ولكن إلى أي مدى يمكن تطبيقها على الموصلات الفائقة الغير تقليدية لا تزال مثيرة للجدل. وقد تم

٨ على كتلة النظائر للعناصر التأسيسية which differ Isotopes are variants of a particular chemical element in neutron number. All isotopes of a given element have the same number of protons in each atom. The term isotope meaning "the same place"; thus, the meaning behind the name is that different isotopes of a single element occupy the same position on the periodic table.

٩ أزواج الكترونات كوبر In condensed matter physics, a Cooper pair or BCS pair is a pair of electrons (or other fermions) bound together at low temperatures in a certain manner. Cooper showed that an arbitrarily small attraction between electrons in a metal can cause a paired state of electrons to have a lower energy than the Fermi energy, which implies that the pair is bound. In conventional superconductors, this attraction is due to the electron-phonon interaction. The Cooper pair state is responsible for superconductivity, as described in the BCS theory developed by John Bardeen, Leon Cooper, and John Schrieffer

١٠ تحول هاملتون الإلكترونية In quantum mechanics, the Hamiltonian is the operator corresponding to the total energy of the system in most of the cases. It is usually denoted by H, also \hat{H} or \hat{H} . Its spectrum is the set of possible outcomes when one measures the total energy of a system. Because of its close relation to the time-evolution of a system, it is importante in most formulations of quantum theory.

١١ المكون لامدا Lambda transition , The λ (lambda) universality class is probably the most important group in condensed matter physics. It regroups several systems possessing strong analogies,

تطوير التطبيق العملي الأول للموصلية الفائقة في عام ١٩٥٤ مع إختراع دادلي ألين باك للكريوترون^(١٢) حيث أنه بتجميع موصلين من مواد الموصلات الفائقة يتكون مجال مغناطيسي حرج مختلف إلى حد كبير ويمكنه تشغيل مفتاح تبديل سريع وبسيط يستخدم كعنصر من العناصر المستخدمة في أجهزة الكمبيوتر. بعد وقت قصير من إكتشاف الموصلية الفائقة في عام ١٩١١، حاول كاميرلنجت تصنيع مغناطيس كهربائي بملفات فائقة التوصيل ولكنه وجد أن المجالات المغناطيسية المنخفضة نسبيا دمرت الموصلية الفائقة في المواد التي إستخدمها . في وقت لاحق في عام ١٩٥٥، نجح الباحث ينتيما في بناء قلب حديدي كهرومغناطيسي ٠,٧ تسلا مع ملفات من سلك فائق التوصيل من النيوبيوم . ثم، في عام ١٩٦١، إكتشف كونزليير وبوهلر، وفيرنيك مركب يتكون من ثلاثة أجزاء النيوبيوم وجزء واحد من القصدير في درجة حرارة ٤,٢ درجة مطلقا ، يمكنه دعم كثافة تيار كهربائي أكثر من ١٠٠ أمبير لكل سنتيمتر مربع في مجال مغناطيسي ٨,٨ تسلا على الرغم من كون لفائف السلك هشة وصعبة التصنيع ، وقد أثبت مركب النيوبيوم والقصدير فائدته في الوحدات المغناطيسية الكبيرة لتوليد مجالات مغناطيسية عالية تصل إلى ٢٠ تسلا. في عام ١٩٦٢ إكتشف بيرلينكورت وهاك أن سبائك النيوبيوم والتيتانيوم مناسبة لتطبيقات تصل إلى ١٠ تسلا. فورا بعد ذلك، بدأ الإنتاج التجاري لأسلاك فائقة التوصيل من النيوبيوم والتيتانيوم على الرغم من أن النيوبيوم والتيتانيوم له خصائص فائقة التوصيل أقل تأثيرا من تلك المصنعة من النيوبيوم والقصدير والنيوبيوم والتيتانيوم، مع ذلك، أصبح الأكثر إستخداما على نطاق واسع للمواد فائقة المغناطيسية إلى حد كبير نتيجة لليونتها العالية وسهولة تصنيعها. ومع ذلك، على حد سواء قد وجدت سبائك النيوبيوم والقصدير والنيوبيوم والتيتانيوم تطبيقات واسعة في

١٢ الكريوترون . The cryotron is a switch that operates using superconductivity.
The cryotron works on the principle that magnetic fields destroy superconductivity. This simple device consists of two superconducting wires (e.g. tantalum and niobium) with different critical temperature (Tc). The cryotron was invented by Dudley Allen Buck of the Massachusetts Institute of Technology Lincoln Laboratory.

التصوير الطبي بالرنين المغناطيسي، والإنحاء، والتركيز المغناطيسي للمعجلات ذات الجسيمات عالية الطاقة، ومجموعة كبيرة من التطبيقات الأخرى. في العام ٢٠١٤، قدر إتحاد الموصلية الفائقة الأوروبي، النشاط الإقتصادي العالمي للموصلية الفائقة التي لا غنى عنها بحوالي خمسة مليارات يورو من أنظمة التصوير بالرنين المغناطيسي وهو ما يمثل حوالي ٨٠٪ من هذا المجموع. في عام ١٩٦٢، وضع جوزيفسون هذا التوقع النظري المهم وهو أن التيار الكهربائي الفائق يمكن أن يتدفق بين طبقتين من مواد الموصلات الفائقة مفصولة بطبقة رقيقة من مادة عازلة. هذه الظاهرة، تسمى الآن تأثير جوزيفسون^(١٣)، وأستغلت لتصنيع عناصر فائقة التوصيل للعديد من الأجهزة مثل جهاز تداخل الكم المغناطيسي فائق التوصيل^(١٤) فهو يستخدم في القياسات الدقيقة المتاحة من تدفق الكم المغناطيسي $(\Phi_0 = h/(2e))$ حيث (h) هو ثابت بلانك إلى جانب مقاومة هال للكم النوعية، والتي تؤدي إلى قياسات دقيقة لثابت بلانك. في عام ٢٠٠٨، تم إقتراح إستخدام نفس الآلية التي تنتج الموصلية الفائقة يمكن أن تنتج حالة العزل الفائق في بعض المواد، مع مقاومة كهربائية لا نهائية تقريبا.

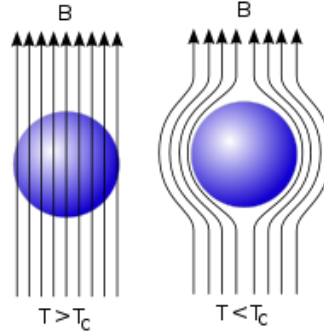
١ - ٢ ظاهرة الموصلية الفائقة

يمكن تعريف الموصلية الفائقة على أنها ظاهرة (المقاومة صفر) الكهربائية وأيضا ظاهرة إبعاد حقول التدفق المغناطيسي التي تحدث في بعض المواد عند تبريدها إلى أقل من درجة

^{١٣} تأثير جوزيفسون i.e. The Josephson effect is the phenomenon of supercurrent—a current that flows indefinitely long without any voltage applied—across a device known as a Josephson junction (JJ), which consists of two superconductors coupled by a weak link. The weak link can consist of a thin insulating barrier (known as a superconductor-insulator-superconductor junction, or S-I-S), a short section of non-superconducting metal (S-N-S), or a physical constriction that weakens the superconductivity at the point of contact (S-s-S).

^{١٤} جهاز تداخل الكم المغناطيسي فائق التوصيل SQUID (superconducting quantum interference device) is a magnetometer used to measure extremely subtle magnetic fields, based on very sensitive superconducting loops containing Josephson junctions.

الحرارة الحرجة مثل الحديد المغناطيسي والخطوط الطيفية الذرية ، كما أنها ظاهرة من ظواهر الكم الميكانيكية وتتميز بتأثير ميسنر^(١٥) ، والطرده الكامل لخطوط المجال المغناطيسي من داخل الموصل عند تحولها الى الحالة فائقة التوصيل(الشكل ١ - ١) .



الشكل (١ - ١) الرسم التخطيطي لتأثير ميسنر. تمثل خطوط المجال المغناطيسي كالمساهم، تستثني من الموصلية الفائقة عندما تكون تحت درجة الحرارة الحرجة.

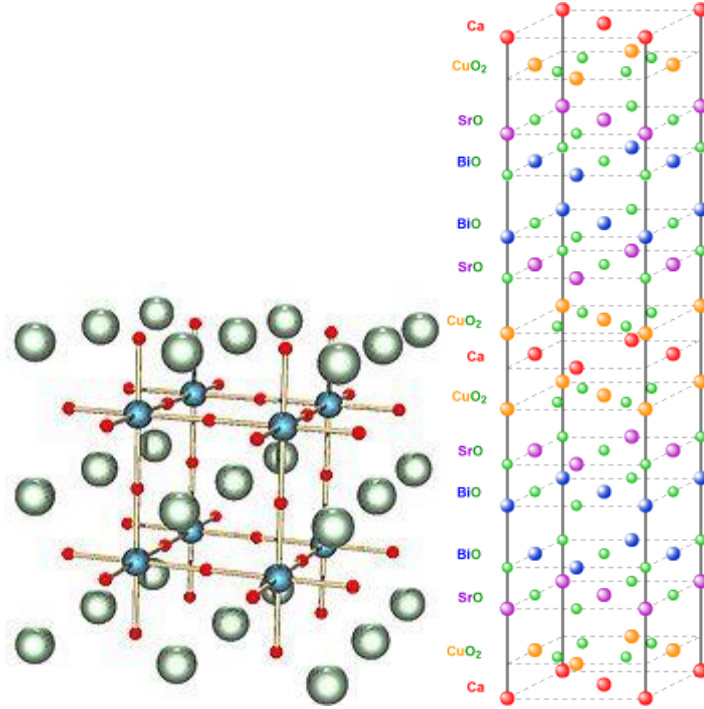
يشير حدوث تأثير ميسنر إلى أن الموصلية الفائقة لا يمكن فهمها ببساطة حيث أنها تعظيم لظاهرة التوصيل المثالي في الفيزياء الكلاسيكية . تنخفض المقاومة النوعية لموصل معدني تدريجيا كلما تناقصت درجة الحرارة بشكل محدود كما في الموصلات العادية، مثل النحاس والفضة بسبب الشوائب والعيوب الأخرى حتى قرب الصفر المطلق . تظهر بعض لموصلات العادية بعض المقاومة أما في الموصلات فائقة التوصيل ، تنخفض المقاومة فجأة إلى الصفر عندما يتم تبريد المواد تحت درجة الحرارة الحرجة . ويتدفق التيار الكهربائي من خلال حلقة من سلك فائق التوصيل ويستمر إلى ما لا نهاية مع عدم وجود مصدر للطاقة. في عام ١٩٨٦ ، تم إكتشاف بعض مواد السيراميك لها تكوين بلوري مشابه للنحاس^(١٦) ولها درجة حرارة حرجة أعلى من ٩٠ درجة حرارة مطلقة أي حوالي ١٨٣

١٥ تأثير ميسنر - The Meissner effect is the expulsion of a magnetic field from a superconductor during its transition to the superconducting state.

١٦ تكوين بلوري مشابه للنحاس - cuprate-perovskite ceramic materials- A perovskite is any material with the same type of crystal structure as calcium titanium oxide (CaTiO₃), known as the perovskite structure, or $X^{II}A^{2+}VB^{4+}X^{2-}_3$ with the oxygen in the face centers

Cuprate loosely refers to a material that can be viewed as containing copper anions.

درجة مئوية. درجة حرارة التحول هي الحد بين ظاهرة التوصيل الى ظاهرة التوصيل الفائق العالية مما أدى إلى تسميتها بموصلات فائقة التوصيل ذات درجات الحرارة العالية. ومن المعروف أن درجة غليان النيتروجين السائل ٧٧ درجة حرارة مطلقة ، الموصلات ذات الموصلية الفائقة في درجات الحرارة العالية الأعلى من درجة غليان النيتروجين السائل لها العديد من التطبيقات التي هي أقل عمليا في درجات الحرارة المنخفضة.



الشكل (١ - ٢) على اليمين وحدة الخلية في درجة الحرارة العالية لمادة كبريتية فائقة التوصيل وعلى الشمال هيكل بيروفسكيبي

١ - ٣ تصنيف المواد فائقة التوصيل

هناك العديد من المعايير التي تصنف المواد فائقة التوصيل الأكثر شيوعا منها:

- الإستجابة للمجال المغناطيسي: تنقسم المواد فائقة التوصيل الى نوعين : النوع الأول ، مواد تشتمل على حقل مغناطيسي حرج واحد ، في حالة شمول المادة الى أكثر من حقل مغناطيسي حرج واحد تفقد كل خواص التوصيل الفائق ، النوع الثاني ، مواد تشتمل على حقلين مغناطيسين حرجين ، بينهما يسمحان لإختراق جزئي لحقل مغناطيسي واحد.

- نظرية التشغيل: تشغيل تقليدي في حالة تفسيره من خلال نظرية باردين - كوبر - شريفير^(١) أو مشتقاتها، أو تشغيل غير تقليدي .
 - درجة الحرارة الحرجة: تعتبر المواد فائقة التوصيل موصلات عالية درجات الحرارة في حالة وصولها لحالة التوصيل الفائق عند تبريدها باستخدام النيتروجين السائل - بمعنى عندما تكون درجة الحرارة أعلى من ٧٧ درجة مطلقة - أو درجة حرارة منخفضة في حالة وجود تقنيات تبريد أكثر تطوراً للوصول إلى درجة الحرارة الحرجة .
 - تنوع المواد: تشمل فئات المواد فائقة التوصيل الكهربائي:
 - العناصر الكيميائية (مثل الزئبق أو الرصاص)
 - سبائك (مثل النيوبيوم والتيتانيوم ، الجرمانيوم والنيوبيوم ، ونيتريد النيوبيوم)
 - السيراميك (أكسيد - الباريوم - النحاس - الأتريوم الثلاثي)^(١٧)
 - ثاني بوريد الماغنسيوم
 - مواد مستندة إلى الحديد المغناطيسي فائق التوصيل^(١٨) (مثل الفلور المطعم)
 - المواد العضوية فائقة التوصيل (الفلورين وأنايب الكربون النانوية)
- ١ - ٤ الخصائص الأساسية للموصلات الفائقة

تختلف معظم الخصائص الفيزيائية للمواد فائقة التوصيل من مادة إلى مادة، مثل السعة الحرارية ودرجة الحرارة الحرجة، المجال الحرج، وكثافة التيار الحرجة التي تدمر الموصلية الفائقة. كما أن هناك مجموعة من الخصائص لا تعتمد على تصنيف المواد، على سبيل المثال، المقاومة النزعية لكل الموصلات الفائقة تساوى صفر بالضبط في حالة تطبيق تيارات

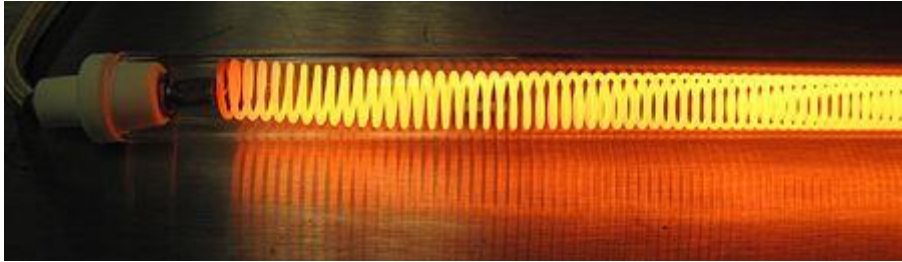
١٧ السيراميك (أكسيد الباريوم النحاس الأتريوم الثلاثي) - Yttrium barium copper oxide (YBCO) is a family of crystalline chemical compounds, famous for displaying "high-temperature superconductivity. It includes first material ever discovered to become superconducting above the boiling point of liquid nitrogen (77 K) at about 90 K.

١٨ مواد مستندة إلى الحديد المغناطيسية فائقة التوصيل - Iron-based superconductors (FeSC) are iron-containing chemical compounds whose superconducting properties (originally known as oxypnictides),

منخفضة في حالة عدم وجود مجال مغناطيسي أو في حالة عدم تجاوز قيمة المجال المستخدم قيمة الحرجة. هذه الخصائص تعنى أن ظهور الموصلية الفائقة هي مرحلة ديناميكية حرارية ، وبالتالي لها بعض الخصائص المميزة التي لا تعتمد إلى حد كبير على التفاصيل المجهرية.

٢ - ١ الصفر الكهربائي لمقاومة التيار المستمر

أبسط طريقة لقياس المقاومة الكهربائية لبعض المواد بوضعها في دائرة كهربائية على التوالي مع مصدر تيار كهربائي وقياس الجهد الناتج عبر العينة وحيث أن المقاومة يمكن إستنتاجها من قانون أوم وتساوى الجهد الواقع على العينة مقسوما على التيار المار فيها فإذا كان الجهد يساوى صفر، فهذا يعني أن المقاومة تساوى صفر. الموصلات الفائقة قادرة على الحفاظ على التيار الكهربائي مع عدم تطبيق جهد على الإطلاق، وهي خاصية في المغناطيسات الكهربائية فائقة التوصيل مثل تلك التي وجدت في تقنيات التصوير بالرنين المغناطيسي . وقد أثبتت التجارب أن التيارات في ملفات فائقة التوصيل يمكن أن تستمر لسنوات دون أي تناقص لتدفق قيم التيار وتشير الأدلة التجريبية لتدفق التيار على مدى مائة عام على الأقل.



الشكل (١ - ٣) عنصر تسخين ملفوف (تدفئة جول)

في الموصلات العادية ، يمكن تصور تدفق التيار الكهربائي كسائل من الإلكترونات يتحرك عبر تكوين بلوري أيوني ثقيل حيث تتصادم الإلكترونات باستمرار مع أيونات في التكوين البلوري ، وخلال كل تصادم تمتص بعض من الطاقة التي يحملها التيار وتتحول إلى حرارة ، والتي تمثل الأساس في ذبذبات الطاقة الحركية للأيونات الشعرية ونتيجة لذلك، يتم فقد الطاقة التي يحملها التيار. هذه هي ظاهرة المقاومة الكهربائية وإنبعاث الحرارة

من موصل يحمل تيار كهربائي وتعرف بإسم تدفئة جول^(١٩). الوضع مختلف في الموصلات الفائقة. حيث، تدفق الإلكترونات لا يمكن النظر إليه كحركة إلكترونات منفردة بدلا من ذلك، فهو يتكون من أزواج من الإلكترونات مقيدة والمعروفة بإسم أزواج كوبر^(٢٠). ويتسبب هذا الإقتران نتيجة لتبادل الفونونات اعتمادا على قوة التجاذب بين الإلكترونات في ميكانيكا الكم ، وتنتج فجوة طاقة نتيجة لعملية تدفق أزواج الإلكترونات ، وهذا يعني وجود حد أدنى من الطاقة يجب توفيره من أجل إثارة التدفق لذلك، إذا كان الحد الأدنى من الطاقة المطلوب توفيره أكبر من الطاقة الحرارية للتكوينات البلورية، (والتي تساوى حاصل ضرب ثابت بولتزمان في درجة الحرارة ، وحيث أن ثابت بولتزمان ثابت) فإن التدفق لا يبعثر بالتكوينات البلورية وبالتالي فإن تدفق أزواج إلكترونات كوبر هي بالتالي تدفقات فائقة ، وهذا يعني أنه يمكنها أن تتدفق دون فقد الطاقة. في أحد مجموعات الموصلات الفائقة المعروفة بإسم النوع الثاني ، والتي تشمل جميع الموصلات الفائقة ذات درجات الحرارة العالية ، تظهر قيمة صغيرة للغاية للمقاومة عند درجة حرارة ليست أقل بكثير من الدرجة الأسمية للانتقال الفائق عند تطبيق تيار كهربائي بالتزامن مع حقل مغناطيسي قوي ناتج عن التيار الكهربائي بسبب حركة الدوامات المغناطيسية^(٢١) للتدفق الإلكتروني الفائق الذي يفقد بعض الطاقة التي يحملها التيار. إذا كانت قيمة التيار صغيرة بما فيه الكفاية، فستكون الدوامات المغناطيسية ثابتة، وتخفي المقاومة نتيجة لهذا التأثير وهي ذات قيمة صغيرة مقارنة مع تلك في المواد

١٩ تدفئة جول Joule heating, also known as ohmic heating and resistive heating is the process by which the passage of an electric current through a conductor releases heat.

٢٠ أزواج كوبر - Cooper pair or BCS pair is a pair of electrons bound together at low temperatures in a certain manner. Cooper showed that an arbitrarily small attraction between electrons in a metal can cause a paired state of electrons to have a lower energy than the Fermi energy, which implies that the pair is bound. In conventional superconductors, this attraction is due to the electron-phonon interaction. The Cooper pair state is responsible for superconductivity,

٢١ الدوامات المغناطيسية In superconductivity, an Abrikosov vortex is a vortex of supercurrent in a type-II superconductor theoretically predicted by Alexei Abrikosov in 1957.

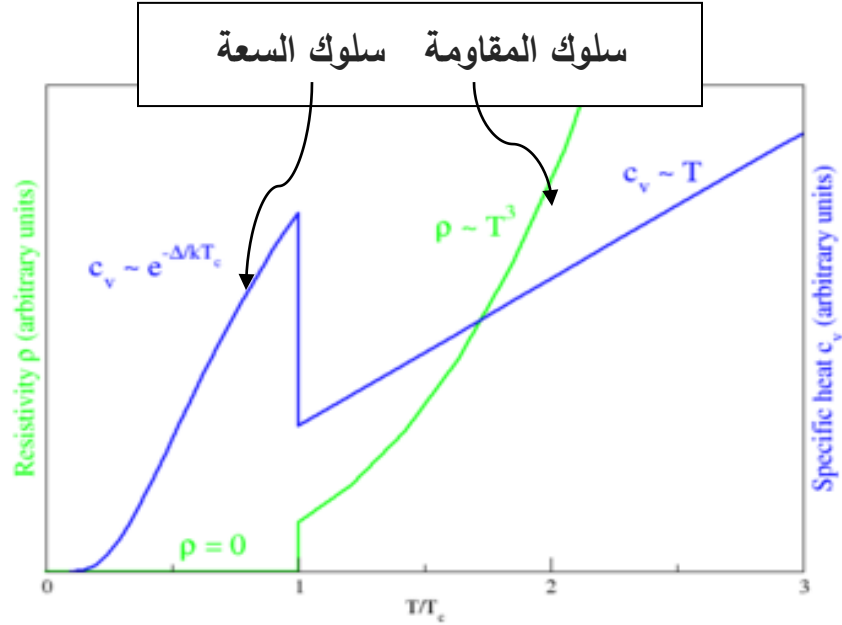
The supercurrent circulates around the normal (i.e. non-superconducting) core of the vortex.

الغير فائقة التوصيل، ولكن يجب أن يؤخذ ذلك بعين الإعتبار في التجارب الحساسة ومع ذلك، كلما تناقصت درجة الحرارة بما فيه الكفاية عن أقل من الدرجة الأسمية للانتقال، يمكن أن تتجمد الدوامات بشكل مضطرب في المرحلة الثابتة والمعروفة بإسم "الدوامات الزجاجية"^(٢٢). في درجة حرارة أقل من درجة حرارة مرحلة الدوامات الزجاجية فإن مقاومة المادة تصبح حقا تساوى الصفر.

٢ - ٢ مرحلة الانتقال الى التوصيل الفائق

في المواد فائقة التوصيل، تظهر خصائص الموصلية الفائقة عند درجات الحرارة منخفضة أقل من درجة الحرارة الحرجة وتختلف قيمة درجة الحرارة الحرجة من مادة إلى مادة وتتراوح في الموصلات الفائقة التقليدية من حوالي ٢٠ درجة حرارة مطلقة إلى أقل من درجة حرارة مطلقة واحدة , على سبيل المثال، درجة الحرارة الحرجة للزئبق الصلب ٤,٢ درجة حرارة مطلقة. في العام ٢٠٠٩، تم تسجيل أعلى درجة حرارة حرجة لموصل تقليدي فائق التوصيل من مادة ثاني بوريد الماغنسيوم ٣٩ درجة حرارة مطلقة. على الرغم من أن هذه المواد لها خصائص غريبة إلا أن هناك بعض الشكوك حول تصنيفها كموصل تقليدي فائق التوصيل. الموصلات الفائقة المستندة الى النحاس^(٢) يمكن أن يكون لها درجات حرارة حرجة أعلى بكثير على سبيل المثال مادة (أكسيد الباريوم-نحاس - الأتريوم الثلاثي)^(٤) وهي أول مادة فائقة التوصيل مستندة الى النحاس يتم إكتشافها لها درجة حرارة حرجة ٩٢ درجة حرارة مطلقة، ولقد تم العثور على مادة مستندة الى النحاس محتوية على الزئبق لها درجات حرارة حرجة تتجاوز ١٣٠ درجة حرارة مطلقة. التفسير لدرجات الحرارة الحرجة العالية ما زال مجهولا. تشرح أزواج الإلكترون نتيجة تبادل الفونون ظاهرة الموصلية الفائقة في الموصلات الفائقة التقليدية، ولكنها لا تفسر ظاهرة الموصلية الفائقة في الموصلات الفائقة الجديدة ذات درجة حرارة حرجة عالية جدا.

٢٢ "الدوامات الزجاجية (vortex glass)



الشكل (١ - ٤) سلوك السعة الحرارية والمقاومة النوعية في المرحلة الإنتقالية للتوصيل الفائق

وبالمثل، تتوقف ظاهرة الموصلية الفائقة في المواد فائقة التوصيل عند درجة حرارة ثابتة أقل من درجة الحرارة الحرجة للتوصيل الفائق عندما يتم تطبيق مجال مغناطيسي خارجي أكبر من المجال المغناطيسي الحرج وذلك لأن طاقة جيبس الحرة^(٢٣) في مرحلة الموصلية الفائقة تتزايد تربيعياً مع المجال في حين أن الطاقة الحرة للمرحلة الطبيعية لا تعتمد تقريباً على المجال المغناطيسي. إذا سلكت المواد سلوك الموصلية الفائقة في حالة عدم وجود مجال مغناطيسي، عندئذ فإن الطاقة الحرة للمرحلة الفائقة للتوصيل أقل من الطاقة الحرة للمرحلة العادية وكذلك لبعض قيم محدودة للمجال المغناطيسي (متناسبة مع الجذر التربيعي للإختلاف في الطاقات الحرة عند مستوى الصفر للمجال المغناطيسي) الطاقتين الحريتين سيتساويان وتحدث المرحلة الإنتقالية للمرحلة الطبيعية. عموماً، يؤدي إرتفاع درجة الحرارة

^{٢٣} طاقة جيبس الحرة; In thermodynamics, Gibbs free energy or Gibbs function also known as free enthalpy to distinguish it from Helmholtz free energy) is a thermodynamic potential used to calculate the maximum or reversible work that may be performed by a thermodynamic system at a constant temperature and pressure(isothermal , isobaric).

والمجال المغناطيسي القوي لتدفق جزء صغير من الإلكترونات في النطاق الفائق التوصيل، وبالتالي يصبح عمق الإختراق لندن^(٢٤) للمجال المغناطيسي الخارجى والتيارات الكهربائية والتيارات المغناطيسية الخارجية لانهاية في المرحلة الإنتقالية. تظهر فى البداية تغيرات مفاجئة في مختلف الخصائص الفيزيائية، التي تمثل السمة المميزة للمرحلة الإنتقالية، على سبيل المثال، السعة الحرارية الإلكترونية تتناسب مع درجة الحرارة في النظام العادي (الغير فائق التوصيل) أما في حالة الإنتقال الى مرحلة التوصيل الفائق تعاني من قفزة متقطعة، ثم تتوقف عن أن تكون خطية. في درجات الحرارة المنخفضة، تختلف حسابيا بدلا من $(e^{-\alpha/T})$ لثابت (α) هذا السلوك الأسي يمثل أحد الأدلة على وجود فجوة طاقة . ظاهرة الإنتقال الى المرحلة فائقة التوصيل مثار جدل وتشير التجارب إلى أن الإنتقال من الدرجة الثانية، وهذا يعني عدم وجود حرارة كامنة . ومع ذلك، في وجود مجال مغناطيسي خارجي نجد هناك حرارة كامنة، لأن المرحلة فائقة التوصيل لها معامل تكوين (γ) أقل من درجة الحرارة الحرجة بالمقارنة بالمرحلة الطبيعية وقد ثبت بالتجربة، عندما يتم زيادة المجال المغناطيسي الى قيمة أعلى من المجال الحرج، فإن المرحلة الإنتقالية الناتجة تؤدي إلى إنخفاض في درجة حرارة المواد فائقة التوصيل وتشير التطبيقات الى أن الحسابات في الواقع من الدرجة الأولى، ويرجع ذلك إلى تأثير التقلبات بعيدة المدى في المجال الكهرومغناطيسي. تبين من الناحية النظرية مع مساعدة من نظرية اضطراب المجال ، التي تلعب فيها خطوط الدوامة للموصلات الفائقة دورا رئيسيا، حيث يكون التحول من الدرجة الثانية ضمن نظام النوع الثاني ومن الدرجة الأولى ضمن نظام الفئة الأولى (أي الحرارة الكامنة)، وأن المنطقتين

٢٤ عمق الإختراق لندن (usually denoted as λ) characterizes the distance to which a magnetic field penetrates into a superconductor and becomes equal to e^{-1} times that of the magnetic field at the surface of the superconductor. Typical values of λ_L range from 50 to 500 nm

٢٥ معامل تكوين (usual symbol S) is a measure of the number of microscopic configurations that correspond to a thermodynamic system in a state specified by certain macroscopic variables.

منفصلتين بنقطة حرجة ثلاثية^(٢٦) وكانت النتائج مدعومة بقوة من المحاكاة الحاسوبية لمونتي كارلو.

٢ - ٣ تأثير ميسنر^(١)

عندما يتم وضع موصل فائق التوصيل الكهربائي في مجال مغناطيسي ضعيف خارجي (H)، ويتم تبريده تحت درجة حرارة تحوله، يتم طرد المجال المغناطيسي، لا يسبب تأثير ميسنر طرد المجال المغناطيسي تماما ولكن بدلا من ذلك يخترق المجال المغناطيسي الموصل فائق التوصيل الكهربائي ولكن فقط لمسافة صغيرة جدا، تتميز بالمعامل (A)، والذي يسمى عمق الإخترق لندن^(١٢)، الى يتناقص بشكل أسى إلى الصفر في كتلة المادة. تأثير ميسنر هو السمة المميزة للموصلية الفائقة. بالنسبة لمعظم الموصلات الفائقة، عمق الإخترق لندن حوالي ١٠٠ نانومتر. يتم الخلط أحيانا بين تأثير ميسنر مع المواد من النوع دياماجنيتيك^(٢٧) المتوقع في الموصلات الكهربائية المثلى : وفقا لقانون لينز^(٢٨)، عند تطبيق مجال مغناطيسي متغير للموصل، يتدفق تيار كهربائي في الموصل الذي يتعارض مع المجال المغناطيسي وفي الموصلات المثلى، ينتج تيار كهربائي كبير والمجال المغناطيسي الناتج يتسبب في إلغاء المجال المستخدم. يستفيد تأثير ميسنر بالظاهرة فهي عبارة عن طرد تلقائي أثناء الانتقال إلى حالة الموصلية الفائقة. لنفترض أن لدينا مادة

٢٦ بنقطة حرجة ثلاثية In condensed matter physics, dealing with the macroscopic physical properties of matter, a tricritical point is a point in the phase diagram of a system at which three-phase coexistence terminates

٢٧ دياماجنيتيك Diamagnetic materials create an induced magnetic field in a direction opposite to an externally applied magnetic field, and are repelled by the applied magnetic field. In contrast, the opposite behavior is exhibited by paramagnetic materials. Diamagnetism is a quantum mechanical effect that occurs in all materials; when it is the only contribution to the magnetism the material is called a diamagnet.

٢٨ قانون لينز Lenz's law is a common way of understanding how electromagnetic circuits obey Newton's third law and the conservation of energy

في حالتها الطبيعية تشتمل على مجال مغناطيسي داخلي مستمر وعندما يتم تبريدها عند درجة حرارة أقل من درجة الحرارة الحرجة، يمكن ملاحظة الطرد المفاجئ للمجال المغناطيسي الداخلي، الذي لا نتوقعة إستناد إلى قانون لينز. أعطي تأثير ميسنر تفسير لظاهرة الطاقة الحرة الكهرومغناطيسية وهي موصلية فائقة مصغرة

$$\nabla^2 H = \lambda^{-2} H \quad \text{المعادلة (١ - ١)}$$

حيث H هو المجال المغناطيسي و λ هو عمق الإختراق لنذن . تعرف هذه المعادلة، بمعادلة لندن وهي تظهر أن المجال المغناطيسي في الموصلات الفائقة يتناقص أسيا عن أي قيمة له على السطح. يشار الى الموصلات الفائقة التي لا تشتمل على مجال مغناطيسي أو بقيمة ضئيلة أنها في حالة ميسنر وتنهار حالة ميسنر عندما يكون المجال المغناطيسي المطبق كبير جدا. يمكن تقسيم الموصلات الفائقة إلى فئتين وفقا لكيفية حدوث هذا الإنهيار، في النوع الأول من الموصلية الفائقة ، يتم تدمير ظاهرة الموصلية الفائقة فجأة عندما ترتفع شدة المجال المطبق بقيمة أكبر من القيمة الحرجة (H_c) إعتامادا على الشكل الهندسي للعينة، يمكن الحصول على حالة وسط تتكون من نمط الباروك^(٢٩) من مناطق المواد الطبيعية التي تحمل المجال المغناطيسي المختلط مع مناطق من المواد فائقة التوصيل التي لا تحتوي على مجال. في النوع الثاني من المواد فائقة التوصيل ، فإن إرتفاع المجال المطبق السابق الى القيمة الحرجة (H_{c1}) يؤدي إلى حالة مختلطة (المعروفة بإسم حالة الدوامة)^(٣٠) التي ترتفع فيها كمية متزايدة من الفيض المغناطيسي تخترق المواد، ولكن لا

٢٩ نمط الباروك; baroque highly decorated style of the seventeenth century; ornate style of architecture, elaborately A highly ornate and complicated with intricate designs. decorated, and with intricate designs, is baroque. Baroque music is music that is complicated in composition and rather difficult to master. The same applies to baroque painting, that is painting which is highly decorative with intricate curves and intertwining lines and floral patterns. ٣٠ حالة الدوامة - co-existing resistive^[1] and superconducting sub-regions which form cores roughly 300 nm across.^{[2][3]} It is the state transitioned to by Type II superconductors when an external magnetic field first overcomes the Meissner current at the material's boundary.

توجد مقاومة لتدفق تيار كهربائي طالما كانت قيمة التيار ليست كبيرة جدا. في لحظة ترتفع شدة المجال الحرج (H_{c2}) ويتم إتلاف الموصلية الفائقة. وتتسبب الحالة المختلطة من قبل الدوامات في التدفق الإلكتروني، التي تسمى أحيانا فلوكسونس^(٣١) بسبب التدفق المحمول من هذه الدوامات حيث أنه كمى. معظم عناصر الموصلات الفائقة النقية ماعدا النيوبيوم والأنيبيد النانوية الكربونية، هي من النوع الأول، في حين أن معظم الموصلات الفائقة الغير نقية والمركبات هي من النوع الثاني وعلى العكس من ذلك، فإن الموصل الفائق يولد المجال المغناطيسي، وينحاز على وجه التحديد مع محور الدوران. التأثير في لحظة لندن، أظهر حسن إستخدام الظاهرة في مسبار الجاذبية. تقيس هذه التجربة المجالات المغناطيسية لأربعة جيروسكوبات فائقة التوصيل لتحديد محاور دورانهم وكان بالغ الأهمية للتجربة لأنها هي واحدة من عدد قليل من الطرق لتحديد دقيق لمحور دوران المجال.

٢ - ٤ نظرية لندن

كانت نظرية لندن أول نظرية تشرح ظواهر الموصلية في عام ١٩٣٥، بعد وقت قصير من إكتشاف أن المجالات المغناطيسية يتم طردها عند مرحلة ظهور خاصية الموصلية الفائقة بفضل وقدرة معادلات هذه النظرية على شرح تأثير ميسنر، حيث أن المادة تطرد جميع المجالات المغناطيسية الداخلية عند عبورها عتبة الموصلية الفائقة. بإستخدام معادلة لندن، يمكن الحصول على قيم المجال المغناطيسي داخل موصل فائق على مسافة من السطح. هناك نوعان من معادلات لندن:

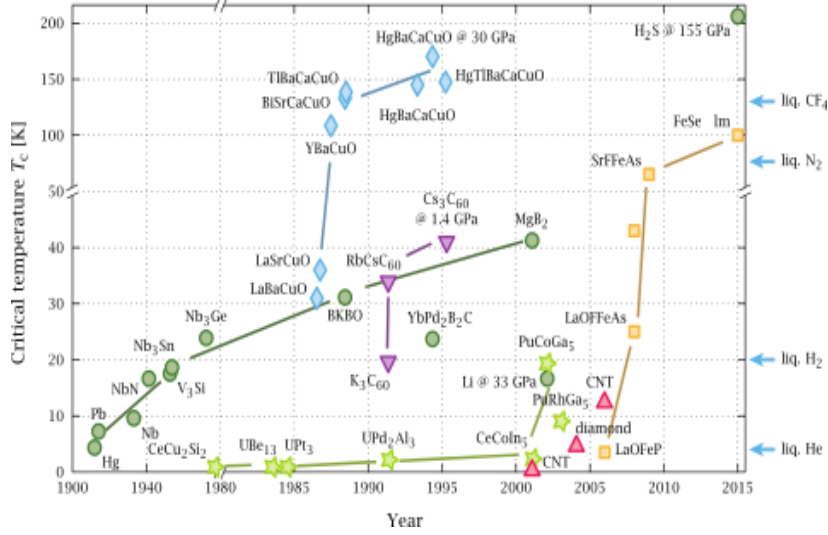
$$\frac{\partial J_s}{\partial t} = \frac{n_s e^2}{m} E \quad \text{المعادلة (١ - ٢)}$$

$$\nabla \times J_s = - \frac{n_s e^2}{m} B \quad \text{المعادلة (١ - ٣)}$$

تتبع المعادلة الأولى قانون نيوتن الثاني للإلكترونات فائقة التوصيل.

٣١ فلوكسونس is a quantum of electromagnetic flux

٣ - ١ مواد الموصلية الفائقة المرتفعة الحرارة (٣٢)



الشكل (١ - ٥) الجدول الزمني للمواد فائقة التوصيل

حتى عام ١٩٨٦، إعتقد الفيزيائيون أن نظرية باردين-كوبر-شريفر أنهت الموصلية الفائقة عند درجة حرارة تزيد عن ٣٠ درجة مطلقة. في تلك السنة، إكتشف بيدنورتز ومولر ظاهرة الموصلية الفائقة في مواد اللانثانوم المستندة الى تكوين بلورى مشابه للنحاس ، عند درجة حرارة التحول من وضع التوصيل الى وضع التوصيل الفائق عند ٣٥ درجة حرارة مطلقة وسرعان ما تبين أنه بإستبدال اللانثانوم بمادة الإيتريوم (أي السيراميك (أكسيد الباريوم النحاس الأتريوم الثلاثي) (٤)) ترتفع درجة الحرارة الحرجة إلى ٩٢ درجة حرارة مطلقة. هذه القفزة لدرجة الحرارة لها أهمية خاصة، لأنها تمكن من إستخدام النيتروجين السائل كمبرد، ليحل محل الهليوم السائل الذى يعتبر قفزة إقتصادية حيث يمكن إنتاج النيتروجين السائل بسعر رخيص نسبيا كما أن إرتفاع درجات الحرارة يساعد على تجنب بعض المشاكل التي تنشأ في درجات حرارة الهليوم السائل، مثل تشكيل مقابس الهواء المتجمد التي يمكن أن يتسبب فى إنسداد خطوط التبريد ويسبب تراكمات ضغط غير متوقعة ويحتمل أن تكون خطيرة. تم إكتشاف العديد من مواد الموصلات الفائقة الأخرى المستندة الى

٣٢ الموصلية الفائقة مرتفعة درجات حرارة (HTS) High-temperature superconductivity

النحاس ، ونظرية التوصيل في هذه المواد هي إحدى التحديات الرئيسية العالقة في نظرية فيزياء المادة المكثفة ويوجد حاليا فرضيتين رئيسيتين - نظرية ربط تكافؤ الصدى^(٣٣) ، وتقلب التذبذب . تقترح الفرضية الثانية إقتران الإلكترون في الموصلات الفائقة ذات درجات الحرارة العالية يتم بواسطة تقلب موجات قصيرة المدى . منذ العام ١٩٩٣ ، إكتشفت مادة السيراميك التي تتكون من الزئبق والباريوم والكالسيوم والنحاس والأكسجين ذات أعلى درجات حرارة لموصلية فائقة بدرجات حرارة حرجة (T_c) في نطاق ١٣٣-١٣٨ درجة مطلقة . في فبراير ٢٠٠٨ ، تم إكتشاف مواد فائقة التوصيل ذات درجات الحرارة العالية مستندة لمجموعة الحديد. التطبيقات التجارية حتى الآن للموصلات الفائقة عالية درجة الحرارة مازالت محدودة. يمكن الحصول على ظاهرة الموصلية الفائقة للموصلات مرتفعة الحرارة عند درجات حرارة أعلى من درجة غليان النيتروجين السائل ، مما يجعلها أرخص لتبريد الموصلات الفائقة المنخفضة الحرارة ومع ذلك، فإن المشكلة مع تكنولوجيا الموصلات الفائقة مرتفعة الحرارة المعروفة حاليا هي السيراميك الهش لإرتفاع التكلفة لتصنيعه وأن تشكيلة في شكل أسلاك أو الأشكال الأخرى المفيدة ليست سهلة. أستخدمت تطبيقات الموصلية الفائقة مرتفعة الحرارة لما لها من مزايا جوهرية على سبيل المثال في:

- إنخفاض الفقد الحراري للتيار أدى لإستخدامها في تطبيقات الموصلية الحرارية المنخفضة.
- مرشحات الترددات اللاسلكية والميكروية حيث تتميز بمقاومة منخفضة لترددات الراديو.
- الإستخدام المتزايد للمغناطيسيات في البحوث العلمية المتخصصة، ولا سيما من حيث الحجم وإستهلاك الكهرباء (في حين أن الأسلاك من مواد الموصلية الفائقة مرتفعة الحرارة

٣٣ نظرية ربط تكافؤ الصدى (RVB) is a theoretical model that attempts to describe high temperature superconductivity, and in particular the superconductivity in cuprate compounds. The theory states that in copper oxide lattices, electrons from neighboring copper atoms interact to form a valence bond, which locks them in place

أعلى بكثير من الموصلات من المواد الفائقة منخفضة الحرارة في هذه التطبيقات، وهذا يمكن أن يقابله التكلفة النسبية والسهولة في التبريد)؛ القابلية لإنحسار المجال مطلوبة (النطاق العالى والواسع في درجة حرارة تشغيل الموصلات الفائقة مرتفعة الحرارة يعني تغييرات أسرع في المجال يمكن مراعاتها).

٣ - ٢ مواد الموصلية الفائقة منخفضة درجات الحرارة

أكبر تطبيق للموصلية الفائقة عندما يتم الإنتاج بكميات كبيرة ومستقرة، وعالية المجالات المغناطيسية اللازمة لأي من التطبيقات التي سترد بعد وعلى وجه الخصوص التصوير بالرنين المغناطيسي والرنين المغناطيسي النووي. ويمثل هذا السوق بمليارات الدولارات لشركات مثل معدات أكسفورد وشركة سيمنز في الولايات المتحدة. يستخدم مغناطيس الموصلية الفائقة منخفضة الحرارة^(٣٤) حيث أن الموصلية الفائقة عالية الحرارة ليست رخيصة بما فيه الكفاية لتحقيق الفعالية من حيث التكاليف لحجم الأعداد المطلوبة العالية والمستقرة ، على الرغم من الحاجة لتبريد أجهزة الموصلية الفائقة منخفضة الحرارة لدرجات حرارة الهيليوم السائل .

٣ - ٣ تطبيقات الموصلات الفائقة

بعد فترة وجيزة من إكتشاف كاميرلنجر لظاهرة الموصلية الفائقة، بدأ العلماء يحلمون بالتطبيقات العملية لهذه الظاهرة الجديدة. يمكن أن تكون شدة المغناطيس فائق التوصيل الجديدة أصغر بكثير من المغناطيس ذو المقاومة، لأن الملفات يمكن أن تحمل تيارات كبيرة مع عدم فقدان الطاقة. مع لفات المولدات الموصلات الفائقة يمكن توليد نفس الكمية من الكهرباء بمعدات أصغر وأقل من الطاقة. بعد توليد الكهرباء يمكن توزيعها من خلال الأسلاك فائقة التوصيل كما يمكن تخزين الطاقة في ملفات فائقة التوصيل لفترات طويلة من الزمن دون فقد كبير وتشمل التطبيقات الحالية للموصلات الفائقة عالية درجة الحرارة:

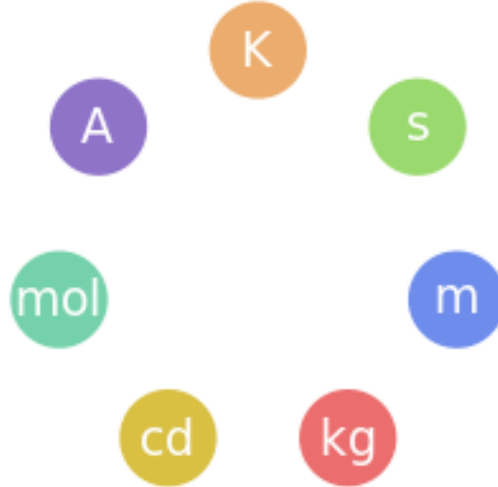
٣٤ المغناطيس الموصلية الفائقة منخفضة الحرارة The magnets typically use low temperature superconductors (LTS)

أجهزة التدريع المغناطيسي - نقل الطاقة الكهربائية حيث يمكن إستغلال قدرة الموصلية الفائقة لتوصيل الكهرباء مع المقاومة الصفر في إستخدام خطوط نقل الطاقة الكهربائية الحالية حيث يتم فقدان جزء كبير من الكهرباء بسبب الحرارة المتولدة من خلال المقاومة المرتبطة بالموصلات التقليدية مثل النحاس أو الألومنيوم ويعتمد التحول على نطاق واسع لتكنولوجيا الموصلية الفائقة على ما إذا يمكن أن تكون الأسلاك المصنعة من السيراميك الهش مستعدة لتحفظ بالموصلية الفائقة في درجة الحرارة ٧٧ درجة مطلقاً وأيضاً تحملها لكثافة التيار المرتفع - أجهزة تخزين الطاقة - المغناطيس فائق التوصيل في المولدات الكهربائية - مصادد النقل - الآلات الدوارة - المحركات الكهربائية (على سبيل المثال تحريك السيارة، كما هو الحال في قطارات ماجليف)، كما تستخدم في أنظمة التصوير الطبي بالرنين المغناطيسي / آلات الرنين المغناطيسي النووي^(٣٥) - أجهزة الإستشعار بالأشعة تحت الحمراء - أجهزة الطيف الشامل - أجهزة معالجة الإشارات التناظرية - أجهزة الموجات الميكروية - أجهزة توجيه الشعاع المغناطيسي المستخدمة في سرعات الجسيمات كما تستخدم في معدات الفصل المغناطيسي، حيث يتم إستخراج الجزيئات المغناطيسية الضعيفة من خلفية الجسيمات الأقل أو غير المغناطيسية، كما هو الحال في صناعة الصبغيات وسوف تصبح الفواصل المغناطيسية أكثر واقعية. في ١٩٥٠ و ١٩٦٠ ، تم إستخدام الموصلات الفائقة لبناء الحواسيب الرقمية التجريبية بإستخدام مفاتيح التبديل كبروترون^(٢٣) وبتزايد مواد الموصلية الفائقة تزايدت التطبيقات وفي الآونة الأخيرة، تم إستخدام الموصلات الفائقة لتصنيع الدوائر الرقمية على أساس تقنية

٣٥ معدات التصوير بالرنين المغناطيسي / آلات الرنين المغناطيسي النووي

Magnetic resonance imaging (MRI), nuclear magnetic resonance imaging (NMRI), or magnetic resonance tomography (MRT) is a medical imaging technique used in radiology to image the anatomy and the physiological processes of the body in both health and disease. MRI scanners use strong magnetic fields, radio waves, and field gradients to form images of the body.

تسريع التدفق الكمي المفرد^(٣٦) والترددات اللاسلكية ومرشحات الموجات الدقيقة والمحطات القاعدية للهواتف المحمولة وتستخدم الموصلات الفائقة لبناء وصلات جوزيفسون لبناء جهاز تدخل الكم المغناطيسي فائق التوصيل (سكويد)^(٢٤) وهو الجهاز الأكثر حساسية للمغناطيسية المعروفة كما يستخدم جهاز (سكويد)^(٢٤) في ميكروسكوبات مسح الدماغ المغناطيسي^(٣٧) ، يعتبر الإكتشاف الأخير من الموصلات الفائقة ذات درجات الحرارة العالية طفرة تكنولوجية. التطبيقات التي يجري البحث فيها حاليا في معظمها ملحقات التكنولوجيا الحالية المستخدمة مع الموصلات الفائقة بدرجات الحرارة المنخفضة وتستخدم سلسلة من عناصر جوزيفسون لتحقيق نموذج مترى جديد يعتمد على طريقة معينة للتشغيل.



الشكل (١ - ٦) سبع وحدات أساسية في "النظام الدولي للوحدات"

^{٣٦} تقنية تسريع الفيض الكمي المفرد (RSFQ) In electronics, rapid single flux quantum (RSFQ) is a digital electronics technology that uses superconducting devices, namely Josephson junctions, to process digital signals. In RSFQ logic, information is stored in the form of magnetic flux quanta and transferred in the form of Single Flux Quantum (SFQ) voltage pulses.

^{٣٧} ميكروسكوبات مسح الدماغ المغناطيسي (MEG) encephalography (MEG) is a functional neuro Magneto imaging technique for mapping brain activity by recording magnetic fields produced by electrical currents occurring naturally in the brain, using very sensitive magnetometers.

يمكن استخدام وصلة جوزيفسون (موصل فائق- العازل- موصل فائق)^(٣٨) كعنصر كاشف للفوتون أو بإعتباره خلاط كما يستخدم التغيير الكبير في المقاومة عند الانتقال من حالة التوصيل العادي الى حالة التوصيل الفائقة لتصنيع العناصر الحرارية في مبردات المسعرات الصغيرة للكشف عن الفوتون ويتم استخدام التقنية في تصنيع أجهزة بولومتر^(٣٩) المصنوعة من مواد فائقة التوصيل. ظهرت تطبيقات أخرى حيث أن من مميزات الأجهزة التي يمكن استخدامها تتسم بالكفاءة النسبية والحجم والوزن والمستندة الى تقنيات الموصلية الفائقة ذات درجات الحرارة العالية تفوق التكاليف الإضافية, على سبيل المثال، في توربينات الرياح فإن إنخفاض الوزن وحجم المولدات فائقة التوصيل يمكن أن يؤدي إلى تحقيق وفر كبير في تكاليف البناء والأبراج ، والتعويض عن إرتفاع تكاليف المولدات وخفض إجمالي التكاليف وتشمل التطبيقات المستقبلية الأداء العالي للشبكات الذكية ، وتعزيز الأجهزة من النوع الإلكتروني الدوراني بالمواد فائقة التوصيل ، والتبريد فائق التوصيل المغناطيسي. ومع ذلك، فإن الموصلية الفائقة حساسة للمجالات المغناطيسية المتحركة حتى في التطبيقات التي تستخدم التيار المتردد (مثل المحولات) ستكون أكثر صعوبة للتطوير عن تلك التي تعتمد على التيار المباشر بالمقارنة مع خطوط

٣٨ وصلة جوزيفسون (موصل فائق- العازل- موصل فائق) (STJ) The superconducting tunnel junction (STJ) also known as a superconductor-insulator-superconductor tunnel junction (SIS) — is an electronic device consisting of two superconductors separated by a very thin layer of insulating material. Current passes through the junction via the process of quantum tunneling. The STJ is a type of Josephson junction, though not all the properties of the STJ are described by the Josephson effect. These devices have a wide range of applications, including high-sensitivity detectors of electromagnetic radiation, magnetometers, high speed digital circuit elements, and quantum computing circuits.

٣٩ أجهزة بولومتر A bolometer is a device for measuring the power of incident electromagnetic radiation via the heating of a material with a temperature-dependent electrical resistance

الكهرباء التقليدية فائقة التوصيل لنقل أكثر كفاءة ، والتي لن تؤدي فقط إلى تحقيق أداء بيئي أفضل ولكن يمكن أيضا تحسين مستوى القبول العام لتوسيع الشبكة الكهربائية.

مجال الإلكترونيات يحمل وعودا كبيرة للتطبيقات العملية من الموصلات الفائقة منها تصغير حجم المكونات والدوائر والنظم مع زيادة سرعة رقائق الكمبيوتر المحدودة بسبب الحرارة المتولدة وأيضا زمن الشحن للمكثفات بسبب مقاومة الشرائح المعدنية المستخدمة. يؤدي استخدام الشرائح فائقة التوصيل الجديدة إلى رقائق أكثر كثافة والتي يمكن أن تنقل المعلومات بسرعة أكبر بعدة أضعاف. حققت الإلكترونيات فائقة التوصيل الإنجازات الرائعة في مجال الإلكترونيات الرقمية فقد تناقص زمن التأخير إلى ١٣ بيكو ثانية وزمن التحويل إلى ٩ بيكو ثانية باستخدام الوصلات الأساسية لجوزيفسون مما يساهم في تصنيع أجهزة كشف حساسة للموجات الميكروية ، والأجهزة المغناطيسية، وعناصر سكويد ومصادر جهد مستقرة للغاية. لقد ثبت استخدام الموصلات الفائقة للنقل باستخدام الهليوم السائل كمبرد وتم بناء نموذج القطارات السابحة في اليابان باستخدام المغناطيس فائق التوصيل. الجدول الأخير الذي أحاط بالتمويل المستمر لمصادم الموصلية الفائقة (٤٠) يوضح التداعيات السياسية لتطبيقات التكنولوجيات الجديدة.

ستتزايد التطبيقات الجديدة من الموصلات الفائقة مع درجات الحرارة الحرجة. ساهم استخدام النيتروجين السائل لصناعة أكثر مرونة للاستفادة من الموصلية الفائقة بالمقارنة مع الموصلات الفائقة المستخدمة للهليوم السائل. إحتمال إكتشاف الموصلات الفائقة في

٤٠ لمصادم الموصلية الفائقة The Superconducting Super Collider (SSC) (also Desertron) was a particle accelerator complex under construction in the vicinity of Waxahachie, Texas. Its planned ring circumference was 87.1 kilometers (54.1 mi) with an energy of 20 TeV per proton and was set to be the world's largest and most energetic. It would have greatly surpassed the current record held by the Large Hadron Collider which has ring circumference 27 km (17 mi) and energy of 6.5 TeV per proton.

درجة حرارة الغرفة لها القدرة على جلب أجهزة فائقة التوصيل في حياتنا اليومية. الموصلات الفائقة ذات درجات الحرارة العالية هي الابتكارات الحديثة في مختبرات الأبحاث العلمية وتبدأ الابتكارات التجارية الجديدة مع تطورات المعرفة التكنولوجية التي يتم التوصل إليها. إنشاء مراكز تسويق للعمل على تطوير المنتجات الهندسية الجديدة اللازمة لتنفيذ التكنولوجيا الجديدة. تطبيقات الموصلات الفائقة بدرجات الحرارة العالية الجديدة ستكون في المستقبل غير البعيد جدا ومع ذلك فإن الفجوات الزمنية بين الإكتشافات الجديدة والتطبيقات العملية غالبا ما تكون كبيرة زمانيا وقد تم مؤخرا تطبيق التكنولوجيات البصرية بعد ستون عاما من إكتشاف الليزر من خلال التطبيقات مثل الجراحة بالليزر، ليزر الإتصالات البصرية، ومشغلات الأقراص المدمجة. التقدم السريع في مجال الموصلية الفائقة يؤدي الى الاعتقاد بأن التطبيقات فائقة التوصيل يقتصر فقط على خيال الإنسان وزمن تحقيقه، يبين الجدول (١ - ١) كل من التطبيقات الحالية والمحتملة من الموصلات الفائقة ويمكن تلخيص تطبيقات الموصلية الفائقة التكنولوجية على النحو التالي:

- إنتاج العناصر المغناطيسية الحساسة على أساس تداخل الكم المغناطيسي فائق التوصيل (سكويدا)^(٥)
- الدوائر الرقمية السريعة (بما في ذلك تلك المستندة على وصلة جوزيفسون وتكنولوجيا التدفق الكمي السريع المفرد).
- الكهرومغناطيسية العملاقة فائقة التوصيل المستخدمة في قطارات ماجليف^(٤١) فائق السرعة ، التصوير بالرنين المغناطيسي والرنين النووي المغناطيسي ومفاعلات الإنصهار والحبس المغناطيسي على سبيل المثال (توكاماك) وهو عنصر للحصول على التوازن.
- محددات التيار الخطأ السريعة

٤١ قطارات ماجليف (Maglev (derived from *magnetic levitation*) is a transport method that uses magnetic levitation to move vehicles without touching the ground. With maglev, a vehicle travels along a guideway using magnets to create both lift and propulsion, thereby reducing friction by a great extent and allowing very high speeds.

- الترددات اللاسلكية ومرشحات الموجات الدقيقة (على سبيل المثال، المحطات القاعدية للهاتف المحمول، وكذلك أجهزة الإستقبال العسكرية فائقة الحساسية).
- الكابلات الكهربائية منخفضة الفقد.

الجدول (١ - ١) التطبيقات فائقة التوصيل

المستقبلية	الحالية	التطبيقات
X	X	التطبيقات الطبية التصوير بالرنين المغناطيسي الهندسة البيوتكنولوجية
X	X	التطبيقات الإلكترونية تداخل الكم المغناطيسي فائقة التوصيل (سكويدا) ^(٥) الترانزستورات وصلات جوزيفسون
X	X	اتصالات الدوائر مسرعات الجسيمات
X	X	أجهزة الاستشعار
X	X	التطبيقات الصناعية الفصل مغناطيس أجهزة الاستشعار ومحولات الطاقة
X		التدريب المغناطيسي
X		تطبيقات توليد الطاقة محركات مولدات طاقة التخزين انتقال الانصهار

X		المحولات والمحاثات
X		تطبيقات وسائل النقل:
X		الماجليف سيارات
X		الدفع البحري

- التوازن المستقر للبلازما (٤٢)، وشعاع التوجيه والتركيز المغناطيسي المستخدم في مسرعات الجسيمات.
- للكشف عن الجسيمات عالية الحساسية ، بما في ذلك أجهزة إستشعار حافة الإنتقال ، مقياس قوة ضربات القلب فائق التوصيل ، كاشف تقاطع نفق المغناطيسية فائقة التوصيل، كاشف المحاثة الحركية ، كاشف فوتون مفرد بأسلاك متناهية الصغر فائقة التوصيل.
- المحركات الكهربائية والمولدات.
- تصغير حجم المكونات والدوائر والنظم مع زيادة سرعة رقائق الكمبيوتر المحدودة بسبب الحرارة المتولدة وأيضا زمن وقت الشحن للمكثفات بسبب مقاومة الشرائح المعدنية المستخدمة.

٤٢ (توكاماك) عنصر للحصول على التوازن المستقر البلازما

A tokamak is a device that uses a powerful magnetic field to confine plasma in the shape of a torus. Achieving a stable plasma equilibrium requires magnetic field lines that move around the torus in a helical shape. Such a helical field can be generated by adding a toroidal field (traveling around the torus in circles) and a poloidal field (traveling in circles orthogonal to the toroidal field). In a tokamak, the toroidal field is produced by electromagnets that surround the torus, and the poloidal field is the result of a toroidal electric current that flows inside the plasma. This current is induced inside the plasma with a second set of electromagnets

٣ - ٤ النظم القائمة للموصلية الفائقة مرتفعة درجات الحرارة

لها تطبيقات في المغناطيسيات العلمية والصناعية، بما في ذلك إستخدامها في أنظمة الرنين المغناطيسي النووي والتصوير بالرنين المغناطيسي. الأنظمة التجارية متوفرة الآن في كل من الفئتين، أحد السمات الجوهرية للموصلية الفائقة مرتفعة درجات الحرارة صمودها أمام المجالات المغناطيسية العالية بالمقارنة بالموصلية الفائقة منخفضة درجات الحرارة ، بحيث تظهر خاصية التوصيل الفائق في مواد الموصلية الفائقة مرتفعة درجات الحرارة عند درجات حرارة الهيليوم السائل لإدراج مجال عالي جداً داخل مغناطيس الموصلية الفائقة منخفضة درجات الحرارة. وتشمل التطبيقات مستقبل واعد لمواد الموصلية الفائقة مرتفعة درجات الحرارة في الإستخدامات الصناعية والتجارية. ستكون التطبيقات الأولية منصبة على تصغير الحجم وتقليل الأوزان والقدرة على سرعة التحويل (محددات التيار الخطأ) تفوق التكلفة الإضافية. يقع في المدى الطويل إنخفاض السعر التنافسي للموصل في نظم الموصلية الفائقة مرتفعة درجات الحرارة في نطاق أوسع بكثير من التطبيقات على أساس كفاءة الطاقة وحدها (للحصول على وجهة النظر الفنية نسبياً والتي تركز على الحالة الراهنة للتكنولوجيا الموصلية الفائقة مرتفعة درجات الحرارة في أنظمة الطاقة ووضع تطوير الجيل الثانى للموصلات).

❖ مشروع هولبروك للموصلية الفائقة

هو مشروع لتصميم وبناء أول إنتاج في العالم لكابلات نقل الكهرباء فائقة التوصيل في أواخر يونيو ٢٠٠٨. تم تغذية ضواحي لونغ آيلاند بمحطة كهرباء فرعية بنظام كابل تحت الأرض يتكون من أكثر من ١٠٠ كم من الكابلات الموصلية الفائقة المصنعة مرتفعة درجات الحرارة المصنعة وضعت تحت الأرض ويتم تبريدها بالنتروجين السائل مما ساهم في تخفيض التكاليف بالصورة الكبيرة المطلوبة لتقديم طاقة إضافية.

❖ مشروع تريس أميجاس (٤٣)

تم إختيار الشركة الأمريكية للموصلية الفائقة لتنفيذ مشروع تريس أميجاس، أول مركز تسويق للطاقة المتجددة في الولايات المتحدة، محور سوق الطاقة المتجددة تريس أميجاس ستكون متعددة المسافات، مسار الكهرباء الثلاثي من خطوط أنابيب من الموصلات فائقة التوصيل قادرة على نقل وتحقيق التوازن بين طاقة كهربائية تقدر بالجيجاوات بين ثلاثة شبكات كهربائية في الولايات المتحدة (وربط الشبكة الشرقية بالشبكة الغربية والوصلة الفرعية الى تكساس). وخلافا لخطوط الطاقة التقليدية، فإنه سيتم نقل الطاقة بالتيار المستمر بدلا من التيار المتردد وسيقام المشروع في كلوفيس، في نيو مكسيكو.

❖ موصل ثاني بوريد المغنيسيوم

ثاني بوريد المغنيسيوم هو موصل فائق الموصلية أرخص بكثير من مادة أكسيد الكالسيوم - النحاس - السترونشيوم - البزموت^(٤٤) أو مادة أكسيد الباريوم - النحاس - الأتريوم الثلاثي^(٤٥) من حيث التكلفة والتيار والقدرة على حمل التيار لكل مسافة طويلة (التكلفة / كيلو أمبير لكل متر) ، مثل الموصلية الفائقة منخفضة درجة الحرارة ، وعلى هذا الأساس فإن العديد من الأسلاك المصنوعة أرخص بالفعل من النحاس وعلاوة على ذلك، فإن الموصلات الفائقة المصنوعة من ماغنسيوم - باريوم في درجات حرارة أعلى من الموصلية الفائقة منخفضة درجة الحرارة (درجة الحرارة الحرجة هي ٣٩ درجة مطلقا، مقارنة مع أقل

٤٣ مشروع تريس أميجاس North The Tres Amigas SuperStation is a planned project to unite America's two major power grids (the Eastern Interconnection and the Western Interconnection) and one minor grid (the Texas Interconnection), with the goal to enable faster adoption of renewable energy and increase the reliability of the U.S. grid. The project will use superconducting wires from Massachusetts-based American Superconductor Corp for electrical distribution and to interconvert alternating current (AC) and direct current (DC) power.

٤٤ مادة أكسيد الكالسيوم النحاس السترونشيوم البزموت Bismuth strontium calcium copper oxide, or BSCCO

٤٥ مادة أكسيد الباريوم النحاس الأتريوم الثلاثي Yttrium barium copper oxide (YBCO) is a family of crystalline chemical compounds, famous for displaying "high-temperature superconductivity".

من ١٠ درجات مطلقة لكابلات النيوبيوم - تيتانيوم و ١٨,٣ درجة مطلقة لمادة تيتانيوم - القصدير)، وإمكانية إستخدامها عند ١٠-٢٠ درجة مطلقة في المغناطيس الخالي من الكريوجين أو ربما في نهاية المطاف في الهيدروجين السائل ومع ذلك كابلات المغنسيوم - باريوم محدودة المجال المغناطيسي الذي يمكن التغاضي عنه عند درجات الحرارة العالية ، هناك حاجة إلى مزيد من البحث لإثبات قدرتها التنافسية في التطبيقات الميدانية العالية.

❖ المصادم السوبر المغناطيسي فائق التوصيل ^(٤٦) والمعروف بإسم ديسيرترون



حلقات التخزين المتقاطعة	كيرن ^(١٠) ١٩٧١ الى ١٩٨٤
السنكروترون ^(٤٧) سوبر بروتون	كيرن ١٩٨١ الى ١٩٨٤
إيزابيل	(ب ن ل) تم إلغائه في ١٩٨٣
تيفاترون	معمل فيرمي ١٩٨٧ الى ٢٠١١
مصادم أيون ثقيل نسبي ^(٤٨)	(ب ن ل) من العام ٢٠٠٠ حتى الآن
مصادم سوبر فائقة التوصيل	تم إلغائه في العام ١٩٩٣
مصادم هادرون الكبير ^(٤٩)	كيرن ٢٠٠٩ الى الآن
مصادم هادرون الكبير جداً ^(٥٠)	نظريا

٤٦ المصادم السوبر المغناطيسي فائق التوصيل (SSC) The Superconducting Super Collider

٤٧ السنكروترون سوبر بروتون (SPS) The Super Proton Synchrotron is a particle accelerator of the synchrotron type at CERN. It is housed in a circular tunnel, 6.9 kilometers in circumference, in the border of France and Switzerland near Geneva, Switzerland.

٤٨ مصادم أيون ثقيل نسبي (RHIC) The Relativistic Heavy Ion Collider is one of only two operating heavy-ion colliders, and the only spin-polarized proton collider ever built. Located at Brookhaven National Laboratory (BNL) in Upton, New York, and used by an international team of researchers, it is the only operating particle collider in the US

٤٩ مصادم هادرون الكبير (LHC) The Large Hadron Collider is the world's largest and most powerful particle collider, the largest, most complex experimental facility ever built, and the largest single machine in the world

٥٠ مصادم هادرون الكبير جداً (VLHC) The Very Large Hadron Collider is a hypothetical future hadron collider with performance significantly beyond the Large Hadron Collider. There is no detailed plan or schedule for the VLHC; the name is used only to discuss the technological feasibility of such a collider and ways that it might be designed. The Future Circular Collider concept would qualify as such a collider.

كان مجمع مسرع الجسيمات^(٥١) قيد الإنشاء بالقرب من واكسهايتشي ، تكساس وتم تخطيطه في دائرة محيطها ٨٧ كيلومتر بطاقة ٢٠ تيرا إلكترون فولت لكل بروتون وكان من المقرر أن يكون الأكبر في دول العالم والأكثر طاقة ، كان يمكن أن يتجاوز كثيرا مصادم هادرون الكبير المصمم في دائرة محيطها ٢٧ كم وطاقته تيرا إلكترون فولت لكل بروتون وتم إلغاء المشروع في عام ١٩٩٣ بسبب مشاكل في الميزانية.



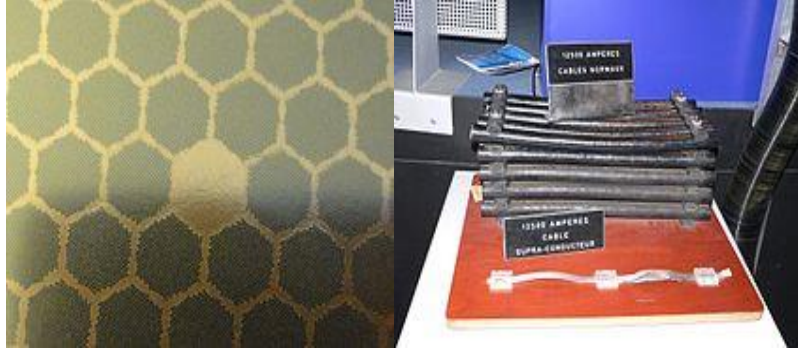
الشكل (١ - ٧) على الشمال النفق القديم لمصادم إلكترون- بوزيترون الكبير في المنظمة الأوروبية للبحوث النووية (سيرن) المملوء بالوحدات المغناطيسية - على اليمين قطاع لمصادم هادرون الكبير يمكن أن تشمل مسرعات الجسيمات مثل مصادم هادرون الكبير العديد من المغناطيسات الكهربائية عالية المجال التي تحتاج إلى كميات كبيرة من الموصلات الفائقة منخفضة الحرارة على سبيل المثال لبناء مغناطيس مصادم هادرون الكبير^(٥٢) في حاجة لأكثر من ٢٨ في المئة من المخزون العالمي لمواد النيوبيوم - التيتانيوم لإنتاج الأسلاك لمدة خمس سنوات ، مع كميات كبيرة من نفس المادة لتستخدم في المغناطيسات للتجارب الضخمة في تشغيل مصادم هادرون الكبير وهناك عدد قليل من أجهزة الاندماج المغناطيسي (ومعظمها توكاماك) عناصر التوازن المستقر للبلازما التي تستخدم لفائف مفردة^(٥٣) . البناء الحالي للمفاعل يتطلب كميات غير مسبوقه من الموصلات الفائقة منخفضة الحرارة (على سبيل المثال ٥٠٠ طن، مما تسبب في زيادة بنسبة ٧ أضعاف الإنتاج السنوي العالمي من الكابلات الكهربائية للمسرعات في منظمة البحوث النووية (سيرن) . الكابلات الضخمة

٥١ مسرع الجسيمات A particle accelerator is a machine that uses electromagnetic fields to propel charged particles to nearly light speed and to contain them in well-defined beams

٥٢ مصادم هادرون الكبير (LHC) Large Hadron Collider

٥٣ لفائف مفردة (SC) single coil

والرفيعة ١٢،٥٠٠ أمبير: الكابلات العليا التقليدية لمصادم إلكترون- بوزيترون الكبير (٥٤) ،
والكابلات فائقة التوصيل الأساسية السفلية لمصادم هادرون الكبير (٥٥).



الشكل (١ - ٨) المقطع العرضي لقضيب موصل مصادم عالي المغناطيسية فائقة التوصيل

٤ - ١ تأثير جوزيفسون

تأثير جوزيفسون هو ظاهرة سريان تيار فائق يتدفق إلى ما لا نهاية دون أي تطبيق للجهد عبر العنصر المعروف بإسم وصلة جوزيفسون، التي تتكون من جزئين من الموصلات الفائقة مقترنة بحلقة ضعيفة. يمكن أن تتكون الحلقة الضعيفة من عائق كهربائي من طبقة عازلة رقيقة والمعروفة بوصلة من (موصل فائق - عازل - موصل فائق) (٥٦) ، وجزء قصير من المعدن الغير فائق التوصيل لإضعاف الموصلية الفائقة عند نقطة الإتصال (٥٧).
تأثير جوزيفسون مثال لظاهرة الكم الميكروسكوبية وسميت بإسم الفيزيائي البريطاني بريان

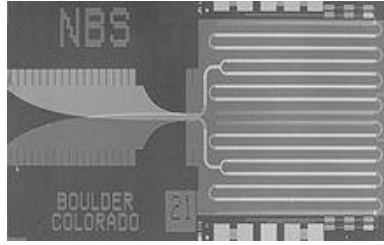
٥٤ مصادم إلكترون- بوزيترون الكبير- (LEP) Large Electron-Positron Collider
was one of the largest particle accelerators ever constructed

٥٥ مصادم هادرون الكبير - Large Hadron Collider (LHC) is the world's largest and most powerful particle collider, the largest, most complex experimental facility ever built, and the largest single machine in the world

٥٦ الحلقة الضعيفة من جدار عازل رقيق المعروف بوصلة من (موصل فائق - عازل - موصل فائق)
The weak link can consist of a thin insulating barrier (known as (superconductor-insulator-superconductor junction, or (S-I-S),

٥٧ مقطع قصير من المعدن الغير فائق التوصيل أو إنقباض مادي يضعف الموصلية الفائقة عند نقطة الإتصال.
short section of non-superconducting metal (S-N-S), or a physical constriction that weakens the superconductivity at the point of contact (S-s-S).

ديفيد جوزيفسون، الذي توقع في عام ١٩٦٢ العلاقات الرياضية للتيار والجهد عبر الحلقة الضعيفة. لوحظ تأثير " جوزيفسون في التجارب قبل عام ١٩٦٢، ولكن قد نسبت إلى "القصر الفائقة" أو الخرق في المنطقة العازلة المؤدية إلى التوصيل المباشر للإلكترونات بين منطقتي الموصلات الفائقة. قبل تنبؤ جوزيفسون.



الشكل (١ - ٩) رقاقة مصفوفات وصلة جوزيفسون

كانت هذه الظاهرة معروفة فقط على أنها ظاهرة عادية بمعنى يمكن تدفق الإلكترونات في الموصلات الغير فائقة من خلال طبقة عازل عائق عن طريق نفق كمى وكان جوزيفسون أول من تنبئ بنفق أزواج كوبر^(١٥) الفائقة التوصيل. وصلات جوزيفسون لها تطبيقات هامة في دوائر الكم الميكانيكية، مثل تداخل الكم المغناطيسي فائق التوصيل (سكويد)^(٥) ، الموصلية الفائقة المكسدة^(٥٨) وإلكترونات تسريع التدفق الكمى المفرد الرقمية^(٢٧) ويمكن الحصول على الوحدة القياسية الجديدة للفولت الواحد بمصفوفة من ١٩٠٠٠ وصلة جوزيفسون على التوالي.



الشكل (١ - ١٠) الرمز الكهربائي لوصلة جوزيفسون

٥٨ الموصلية الفائقة المكسدة Superconducting quantum computing, Superconducting qubits is a promising implementation of quantum information technology that involves nanofabricated coupled through Josephson junctions. As in a superconducting electrodes superconducting electrode, the phase and the charge are conjugate variables. There exist three families of superconducting qubits, depending on whether the charge, the phase, or neither of the two is good quantum numbers. These are respectively termed charge qubits, flux qubits, and hybrid qubits.

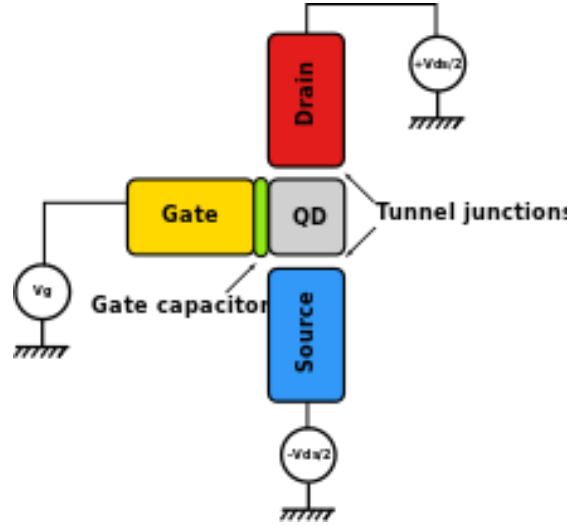
تشمل أنواع وصلات جوزيفسون مجموعة من الأشكال منها وصلة π ، وصلة فارفي، وصلة طويلة ووصلة نفق الموصلية الفائقة. قنطرة دايم هي غشاء رقيق بديل لوصلة جوزيفسون - يتكون الارتباط الضعيف في الوصلات من أسلاك توصيل بأبعاد قليلة بالميكرومتر أو أقل وتستخدم عدد من وصلات جوزيفسون لتصميم جهاز يستخدم كنقطة مرجعية في الدوائر وقد وجد تأثير جوزيفسون الاستخدام على نطاق واسع، على سبيل المثال في المجالات التالية:

- إلكترونيات تسريع التدفق الكمي المفرد الرقمية المستندة على وصلة جوزيفسون على التوازي وفي هذه الحالة، ترتبط ظاهرة التبديل في الوصلة إلى إنبعاث حقل مغناطيسي كمي واحد ($h/2e$) يحمل المعلومات الرقمية: نظراً لغياب التبديل بما يعادل الوضع الصفر، بينما يحدث التبديل للوضع واحد.
- أجهزة تدخل الكم فائقة التوصيل (سكويد) وهي أجهزة قياس مغناطيسية حساسة تعمل عن طريق تأثير جوزيفسون وتستخدم على نطاق واسع في العلوم والهندسة.
- توفر وصلة جوزيفسون دقة القياس في تحويل الإستنساخ بالضبط بين التردد والجهد الكهربائي حيث تم تعريف التردد بدقة وعملياً بتقنية السيزيوم القياسية^(٥٩)، يتم استخدام وصلة جوزيفسون، لمعظم الأغراض العملية، لإعطاء تمثيل للجهد القياسي (الفولت) لجوزيفسون ومع ذلك، لم تغير منظمة المعايير الدولية^(٦٠) وحدة التعريف الرسمية.

٥٩ تقنية السيزيوم القياسية A caesium standard or caesium atomic clock is a primary frequency standard in which electronic transitions between the two hyperfine ground states of caesium-133 atoms are used to control the output frequency. The first caesium clock was built by Louis Essen in 1955 at the National Physical Laboratory in the UK

٦٠ منظمة المعايير الدولية , The International Bureau of Weights and Measures is an international standards organisation, one of three such organisations established to maintain the International System of Units (SI) under the terms of the Metre Convention The organisation is usually referred to by its French initialism, BIPM.

- غالباً ما يتم تكوين الترانزستور أحادي الإلكترون^(٦١) من مواد الموصلية الفائقة التي تسمح باستخدام تأثير جوزيفسون لتحقيق تأثيرات جديدة كما يستخدم للقياسات الأكثر دقة للشحنات الأولية في ثابت جوزيفسون وثابت فون كليتزنج التي تتصل بتأثير هول الكمي.

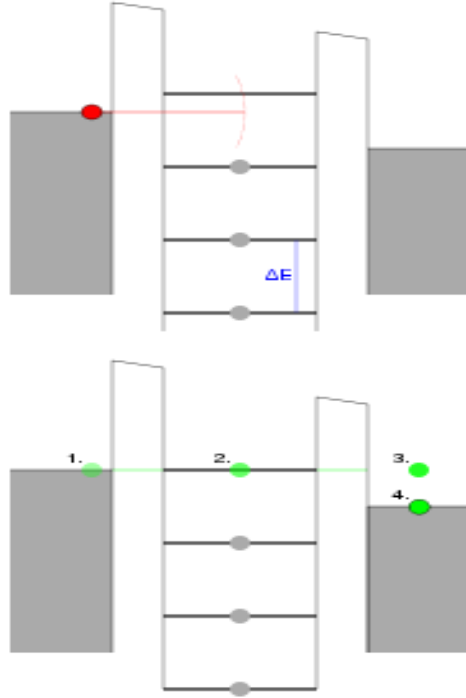


الشكل (١ - ١١) تخطيط لترانزستور أحادي الإلكترون

- قد تصبح وصلات جوزيفسون بديلاً صالحاً لعناصر الشحنات المقترنة^(٦٢) للإستخدام في علم الفلك والفيزياء الفلكية في السنوات القليلة القادمة. هذه العناصر فعالة خلال طيف واسع من الأشعة فوق البنفسجية إلى الأشعة تحت الحمراء، وأيضاً في الأشعة السينية وقد تمت تجربتها تقنياً في تلسكوب ويليام.

٦١ الترانزستور أحادي الإلكترون single-electron transistor is The simplest device in which the effect of Coulomb blockade can be observed It consists of two electrodes known as the *drain* and the *source*, connected through tunnel junctions to one common electrode with a low self-capacitance, known as the *island*. The electrical potential of the island can be tuned by a third electrode, known as the *gate*, which is capacitively coupled to the island.

٦٢ لعناصر الشحنات المقترنة A charge-coupled device (CCD) is a device for the movement of electrical charge, usually from within the device to an area where the charge can be manipulated, for example conversion into a digital value.



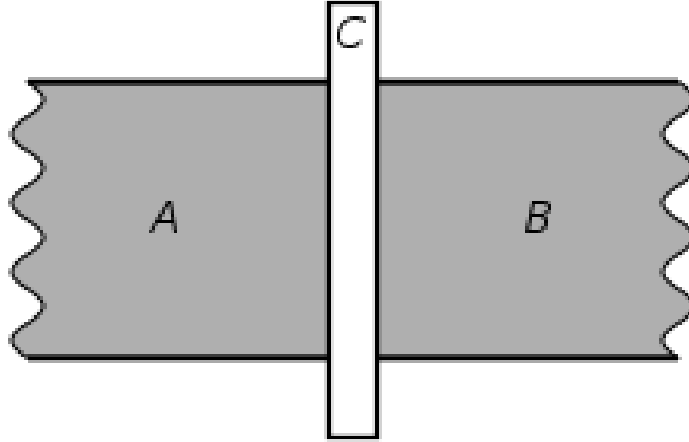
الشكل (١ - ١٢) من اليسار إلى اليمين: مستويات الطاقة المنبع، الجزيرة والمستنزف لترانزستور أحادي الإلكترون

- وصلات جوزيفسون لا تتجزأ عن حوسبة الكم فائقة التوصيل (٦٣) المكدسة (٦٤) مثل تكديس المجال حيث مرحلة الوجه والشحنة يعملان كمتغيرات متقارنة.

٦٣ حوسبة الكم فائقة التوصيل Superconducting quantum computing is a promising implementation of quantum information technology that involves nanofabricated superconducting electrodes coupled through Josephson junctions. As in a superconducting electrode, the phase and the charge are conjugate variables. There exist three families of superconducting qubits, depending on whether the charge, the phase, or neither of the two is good quantum numbers. These are respectively termed charge qubits, flux qubits, and hybrid qubits.

٦٤ المكدسة In quantum computing, a qubit or quantum bit (sometimes qbit) is a unit of quantum information—the quantum analogue of the classical bit. A qubit is a two-state quantum-mechanical system, such as the polarization of a single photon: here the two states are vertical polarization and horizontal polarization

- عنصر تبديل كويتيرون^(٦٥) وأجهزة التبديل المماثلة فائقة التوصيل.
- وقد لوحظ أيضا تأثير جوزيفسون في الهليوم فائق السيولة^(٦٦) التناظري لوحدة التيار المباشر بجهاز تداخل الكم المغناطيسي فائقة التوصيل.



الشكل (١ - ١٣) الرسم التخطيطي لوصلة جوزفين واحدة . المفطعان (أ) و (ب) تمثلان مادتين فائقة التوصيل والمقطع (ج) يمثل الحلقة الضعيفة بين المفطعان (أ) و (ب)

المعادلات الأساسية التي تحكم ديناميكيات تأثير جوزيفسون هي:

$$U(t) = \frac{\hbar}{2e} \frac{\partial \phi}{\partial t} \quad (\text{superconducting phase evolution equation}) \quad (\text{المعادلة } ٤ - ١)$$

$$I(t) = I_c \sin(\phi\{t\}) \quad (\text{Josephson or weak - link current - phase relation}) \quad (\text{المعادلة } ٥ - ١)$$

٦٥ عنصر تبديل كويتيرون The quiteron is a superconducting three-terminal, three layer switching device similar to transistor. . Quiteron's characteristics are very low switching energy requirements and extremely fast switching times on the order of 10^{-12} s. It works on principles of quantum tunneling by injecting quasiparticles through the two thin insulator layers separating the three superconducting layers.

٦٦ الهليوم السائل السويبر Superfluidity is a state of matter in which the matter behaves like a fluid with zero viscosity; where it appears to exhibit the ability to self-propel and travel in a way that defies the forces of gravity and surface tension.

حيث: $U(t)$ و $I(t)$ يمثلان الجهد والتيار في وصلة جوزيفسون و $\phi\{t\}$ الفرق في مرحلة الوجه " (أي الفرق في معامل مرحلة الوجه، أو المكافئ، الوسيط، بين معامل غينزبورغ - لاندائو لمقطعين من مادتي الموصلية الفائقة اللذان يؤلفان الوصلة والتيار I_c) ثابت ويمثل التيار الحرج للوصلة. التيار الحرج معامل للظواهر الهامة للعنصر الذي يمكن أن يتأثر بدرجة الحرارة فضلا عن الحقل المغناطيسي التطبيقي. الثابت المادي $\frac{h}{2e}$ هو مقدار التدفق المغناطيسي، مقلوبه يمثل ثابت جوزفين ويمكن إتباع توقعات جوزيفسون بالعوامل الرئيسية الثلاثة بالعلاقات التالية:

١ - تأثير جوزيفسون على التيار المستمر:

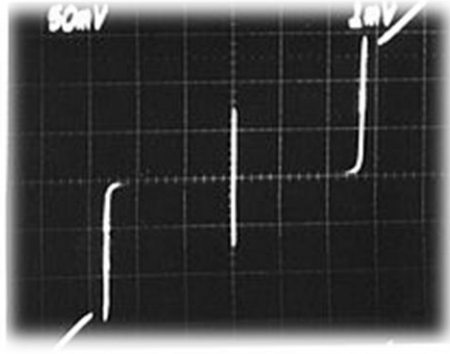
عبارة عن تيار مستمر يخترق الطبقة العازلة في عدم وجود أي مجال كهرومغناطيسي خارجي نظراً للإتصال النفقي والتيار جوزيفسون المستمر يتناسب مع جيب فرق مرحلة الوجه عبر الطبقة العازلة، وتساوى القيم بين I_c و $-I_c$.

٢ - تأثير جوزيفسون على التيار المتردد:

مع جهد ثابت (V_{DC}) خلال الوصلة ستتغير مرحلة الوجه خطياً مع الزمن وسيكون التيار المار تيار متردد قيمته I_c بتردد $(\frac{V_{DC} 2e}{h})$ ويصبح التعبير الكامل للتيار (I_{ext}) يساوى:

$$I_{ext} = C_J \frac{\partial v}{\partial t} + I_J \sin \phi + \frac{V}{R} \quad \text{المعادلة (٦ - ١)}$$

.. وهذا يعني أن وصلة جوزيفسون يمكن أن تعمل كمحول للجهد الكهربائي الترددي وهو نوع شائع من وصلة جوزيفسون . قياس المحور العمودي ٥٠ ميكرو أمبير والمحور الأفقي ١ ميلي فولت . العمود عند جهد يساوى صفر يمثل تأثير جوزيفسون للتيار المستمر بينما التيار عند قيم جهد كبيرة فهو نتيجة قيمة الفجوة الطاقية للموصلية الفائقة ولا يستند الى المعادلات أعلاه .



الشكل (١٤ - ١) خصائص الجهد - التيار لوصلة النفق ذات موصلية فائقة ،

٣ - معكوس تأثير جوزيفسون للتيار المتردد

إذا كانت مرحلة الوجه على الشكل $\phi(t) = \phi_0 + n \omega t + a \sin(\omega t)$

ستكون معادلتى الجهد والتيار كما يلي:

$$U(t) = \frac{h}{2e} \omega \{n + a \cos(\omega t)\} \quad \text{المعادلة (٧ - ١)}$$

$$I(t) = I_c \sum_{m=-\infty}^{\infty} J_m(a) \sin\{\phi_0 + (n+m)\omega t\} \quad \text{المعادلة (٨ - ١)}$$

وسوف تكون مكونات التيار المستمر

$$U_{DC} = n \frac{h}{2e} \omega \quad \text{المعادلة (٩ - ١)}$$

$$I(t) = I_c J_{-n}(a) \sin \phi_0 \quad \text{المعادلة (١٠ - ١)}$$

ومن ثم لقيمة متميزة للجهد المتردد، يمكن للوصلة تحمل وتعمل كمحول مثالى للتردد إلى

الجهد.

❖ مرحلة الوجه لجوزيفسون

هى الفرق بين مرحلتى الوجه لدالة موجة الكم الميكانيكية فى القطبين فائقى التوصيل

الذان يشكلان وصلة جوزيفسون. إذا كانت دالة الموجة ψ_1 و ψ_2 فى المنطقتين فائقى

التوصيل على النحو التالى:

$$\psi_j = \sqrt{n_s} e^{i\theta_j} \quad \text{المعادلة (١١ - ١)}$$

إذا تحددت مرحلة الوجه لجوزيفسون كالاتى:

$$\phi \stackrel{def}{=} \theta_2 - \theta_1 \quad \text{المعادلة (١٢ - ١)}$$

❖ طاقة جوزيفسون

هي الطاقة الكامنة التي تراكمت في وصلة جوزيفسون عندما يسرى التيار الفائق من خلالها ويمكن إعتبار وصلة جوزيفسون محاثة غير خطية تتراكم الطاقة فيها (المجال المغناطيسي) عندما يمر تيار من خلالها وعلى النقيض من المحاثة الحقيقية، لا ينشأ مجال مغناطيسي بواسطة التيار الفائق في وصلة جوزيفسون - الطاقة المتراكمة هي طاقة جوزيفسون. تستنبط أبسط الحالات للعلاقة بين التيار ومرحلة الوجه ^(٦٧) المعروفة بإسم علاقة جوزيفسون الأولى على النحو التالي:

$$I_s = I_c \sin(\phi) \quad \text{المعادلة (١ - ١٣)}$$

حيث (I_s) التيار الفائق في الوصلة، (I_c) هو التيار الحرج، و(ϕ) مرحلة الوجه جوزيفسون. في البداية عند زمن ($t = 0$) كانت الوصلة متصلة بفولتية الأرض ($\phi = 0$) وأخيراً يصبح للوصلة مرحلة الوجه (ϕ) عند الزمن (t) ويمثل الشغل المنجز وبالتالي تتزايد طاقة الوصلة

$$U = \int_0^t I_s V dt = \frac{\phi_0}{2\pi} \int_0^t I_s \frac{d\phi}{dt} dt \quad \text{المعادلة (١ - ١٤)}$$

$$= \frac{\phi_0}{2\pi} \int_0^\phi I_c \sin(\phi) d\phi = \frac{\phi_0 I_c}{2\pi} (1 - \cos \phi)$$

حيث تستخدم طاقة جوزيفسون ($E_J = \frac{\phi_0 I_c}{2\pi}$) لتعيين خواص الأبعاد و ($1 - \cos \phi$) التي تحدد اعتمادها على مرحلة الوجه (ϕ) و $U \phi$ تمثل الطاقة المتراكمة داخل الوصلة وتعتمد على التيار في الوصلة فقط وليس على السرعات بمعنى الطاقة الكامنة مع ملاحظة $U \phi$ لها حد أدنى يساوي الصفر بالنسبة لفولتية الأرض ($\phi = 2\pi n$) و (n) تمثل أي عدد صحيح.

❖ محاثة جوزيفسون

إذا كانت مرحلة الوجه جوزيفسون عبر الوصلة هي (ϕ_0) والتيار الفائق السارى من خلال الوصلة يساوى:

٦٧ للعلاقة بين التيار ومرحلة الوجه (CPR) current-phase relation

$$I_0 = I_c \sin(\phi_0) \quad \text{المعادلة (١٥ - ١)}$$

وهي نفس المعادلة كما ذكر أعلاه، ما عدا الاختلافات الصغيرة في I_s و (ϕ) حول القيم (I_0) و (ϕ_0) وفي حالة زيادة التيار زيادة طفيفة (مستمر أو متردد) $\delta I \ll I_c$ في وصلة جوزيفسون فإن مرحلة الوجه تتغير في الوصلة لتصبح $(\phi = \phi_0 + \delta\phi)$ وبالتالي:

$$I_0 + \delta I = I_c \sin(\phi_0 + \delta\phi) \quad \text{المعادلة (١٦ - ١)}$$

على إفتراض أن $(\delta\phi)$ قيمة صغيرة، وتمدد تايلور في الجانب الأيمن من المعادلة ليصل عند الجهد في الوصلة

$$\delta I = I_c \cos(\phi_0) \delta\phi \quad \text{المعادلة (١٧ - ١)}$$

باستخدام علاقة جوزيفسون الثانية

$$V = \frac{\phi_0}{2\pi} \dot{\phi} = \frac{\phi_0}{2\pi} \left(\underbrace{\dot{\phi}_0}_{=0} + \delta\dot{\phi} \right) = \frac{\phi_0}{2\pi} \frac{\delta I}{I_c \cos(\phi_0)} \quad \text{المعادلة (١٨ - ١)}$$

بمقارنة هذه المعادلة مع معادلة الجهد عبر المحاثة التقليدية $V = L \frac{\partial I}{\partial t}$ يمكن تحديد

محاثة جوزيفسون

$$L_J(\phi_0) = \frac{\phi_0}{2\pi I_c \cos(\phi_0)} = \frac{L_J(0)}{\cos(\phi_0)} \quad \text{المعادلة (١٩ - ١)}$$

يلاحظ أن هذه المحاثة ليست ثابتة، لكنها تعتمد على مرحلة الوجه (ϕ_0) في الوصلة ويمكن الحصول على القيمة النموذجية بالمحاثة $L_J(0)$ وتتحدد فقط بواسطة التيار الحرج I_c مع ملاحظة، وفقا للتعريف، محاثة جوزيفسون يمكن أن تصبح لانهاية أو سالبة لو

$\cos \phi_0 \leq 0$ ويمكن أيضا حساب التغير في الطاقة جوزيفسون بالمعادلة

$$\begin{aligned} U(\phi_0) &= U(\phi) - U(\phi_0) \quad \text{المعادلة (٢٠ - ١)} \\ &= E_J \{ \cos(\phi_0) - \cos(\phi_0 + \delta\phi) \} \end{aligned}$$

بتناقص تمدد تايلور لقيمة صغيرة $\delta\phi$ يمكن الحصول على:

$$\approx E_J \sin(\phi_0) \delta\phi = \frac{E_J \sin(\phi_0)}{I_c \cos \phi_0} \delta I \quad \text{المعادلة (٢١ - ١)}$$

بالمقارنة مع زيادة محاثة الطاقة $d E_L = L I \delta I$ يمكن الحصول مرة أخرى على نفس القيم للمحاثة (L). ملاحظة، أنه على الرغم من أن وصلة جوزيفسون تسلك سلوك المحاثة، فلا يوجد مجال مغناطيسي مرتبط بها والطاقة المقابلة مخبأة داخل الوصلة. محاثة جوزيفسون كما هو معروف "محاثة حركية" - سلوكها مشتق من الطاقة الحركية لحاملات الشحنات، وليس من الطاقة في المجال المغناطيسي.

❖ إختراق جوزيفسون

عمق الإختراق جوزيفسون يميز الطول النموذجي الذي يخترق الحقل المغناطيسي في وصلة جوزيفسون الطويلة ويمكن حسابه بالمعادلة التالية:

$$\lambda_J = \sqrt{\frac{\phi_0}{2 \pi \mu_0 d' j_c}} \quad \text{المعادلة (٢٢ - ١)}$$

حيث (ϕ_0) هو مقدار التدفق المغناطيسي، و j_c هو كثافة التيار الحرج بالأمبير لكل متر مربع، و (d') تصف محاثة الأقطاب المغناطيسية فائقة التوصيل،

$$d' = d_I + \lambda_1 \coth \left(\frac{d_1}{\lambda_1} \right) + \lambda_2 \coth \left(\frac{d_2}{\lambda_2} \right) \quad \text{المعادلة (٢٣ - ١)}$$

حيث (d_I) هو سمك الطبقة جوزيفسون عادة ما تكون مادة عازلة، $d_{1,2}$ سمك الأقطاب المغناطيسية فائقة التوصيل، و $\lambda_{1,2}$ سمك عمق لندن.

٤ - ٢ تكنولوجيا تسريع التدفق الكمي المفرد

إلكترونيات تسريع التدفق الكمي المفرد (ت ت ك م) ^(٦٨) هي أحدث تقنية لجيل من دوائر الموصلات الفائقة عالية الأداء إستناداً إلى العناصر المستندة على وصلة جوزيفسون ويمكن أن يعمل عنصر التبديل الأساسي من الموصلات الفائقة، في وضعين مميزين:

٦٨ تقنية تدفق الكم المفرد السريع (ت ت ك م) Rapid single flux quantum (RSFQ) superconducting logic was developed in Russia in the 1980s

❖ الوضع الأول: وضع (جهد الغلق) حيث يتم تغذية وصلات التبديل من حالة الوضع (الجهد يساوى صفر) إلى حالة (الجهد - حوالي ٢,٥ ميلي فولت) - إستخدم أسلوب (جهد الغلق) في وقت مبكر (١٩٧٠ - ١٩٨٠) من قبل مؤسسة (أي بي أم) وكذلك مشاريع الكمبيوتر الياباني جوزيفسون ويتطلب هذا الوضع تغذية الوصلة بتيار متردد لإعادة الوصلة لوضع (الجهد يساوى صفر) .

❖ الوضع الثانى: وضع (عدم الغلق) حيث أن التبديل في الوصلة يولد نبضة تدفق مغناطيسي كمى مفرد حيث أن عناصر تسريع التدفق الكمى المفرد (ت ت ك م) يمكنها توليد وحفظ وإرسال نبضات التدفق الكمى المفرد المغناطيسي المتطابق عند ترددات تقترب من ١٠٠٠ جيجا هرتز ويتم تغذية دوائر تسريع التدفق الكمى المفرد بتيار مستمر.

في الإلكترونيات، تسريع التدفق الكمى المفرد هى تقنية إلكترونيات رقمية تستخدم عناصر مغناطيسية فائقة التوصيل، (وصلات جوزيفسون) لمعالجة الإشارات الرقمية. تنتقل المعلومات فى تقنية تسريع التدفق الكمى المفرد فى وجود أو عدم وجود تدفق كمى واحد. فى حالة التبديل تعود وصلة جوزيفسون إلى مرحلة التوازن، فى أسرع وقت ممكن، وذلك بإضافة مقاومة على التوازي كتحويلة بحجم مناسب، لتعمل كمفتاح تبديل دون تباطؤ. يتم تطبيق إشارات الدخل إلى بوابات الدوائر المنطقية فى توزيع منفصل لنبضات جهد التدفق الكمى المفرد وتحسب الطاقة من خلال قيم تيارات التحيز الموزعة بإستخدام المقاومات التي يمكن أن تستهلك أكثر من ١٠ إضعاف القدرة الإستاتيكية أو الثابتة بالمقارنة بالطاقة الديناميكية المستخدمة للحسابات وبساطة إستخدام المقاومات لتوزيع التيارات يمكن أن تكون ميزة فى الدوائر الصغيرة. تستخدم دوائر تسريع التدفق الكمى المفرد فى العديد من التطبيقات حيث أن كفاءة إستخدام الطاقة ليست ذات أهمية حاسمة. كما أستخدمت لبناء الدوائر المتخصصة للتطبيقات الفائقة والعديدية المكثفة، مثل أجهزة الإتصالات ومعالجة الإشارات الرقمية. يتم تغذية وصلات جوزيفسون فى دوائر تسريع التدفق الكمى المفرد على التوازي ولذلك، فإن تيار التحيز الكلى يتزايد خطيا مع عدد وصلات جوزيفسون وهذا يمثل

حاليا القيد الرئيسي على مقياس التكامل في دوائر تسريع التدفق الكمي المفرد، التي لا تتجاوز بضع عشرات من آلاف من وصلات جوزيفسون في كل دائرة. في تقنية تسريع التدفق الكمي المفرد المنطقية، يتم تخزين المعلومات في شكل كمات تدفق مغناطيسي ونقلها في شكل نبضات جهد التدفق الكمي المفرد (٦٩).

➤ في دوائر التدفق الكمي المفرد في حالة السكون (٧٠) دون تشغيل، يتم تمرير المعلومات في شكل تدفق تيار مستمر (أو تيار فائق). هذه الأجهزة بالأهمية الأساسية العالية بسبب قدرتها على تنفيذ معالجة عكسية للمعلومات الرقمية ومع ذلك، في الدوائر الثابتة في حالة السكون فإن المسافة داخل البوابة محدودة جداً (عمليا، إلى أقرب العناصر) بواسطة المحاثات للوصلات الداخلية. عيب ثاني لهذا النهج هو الحاجة لمصدر تردد عالي على مدار الساعة، مع القيود الناتجة على السرعة المماثلة للحاجة الى الجهد في الدوائر المنطقية وأخيراً، يوضح التحليل المفصل أن ثابت التسامح في دوائر التدفق الكمي المفرد ذو قيم منخفضة.

➤ في دوائر التدفق الكمي المفرد في الحالة الديناميكية (التشغيل) يتم تمرير المعلومات بين الأجهزة المنطقية بسرعة كبيرة، على طول الخطوط الشريطية السلبية أو خطوط جوزيفسون للنقل النشطة في شكل نبضات جهد لألثة $(V(t))$ قصيرة جداً (بيكو ثانية) بمساحة ثابتة.

$$(\Phi_0 = h/2e = 2.07 \times 10^{-15} \text{Wb}), \text{Int } V(t) dt = \Phi_0 = 2.07 \text{ mV-ps.}$$

وجوهر هذه الفكرة أن نبضات التدفق الكمي المفرد يمكن أن تتولد بشكل طبيعي تماما، مستنسخة، مكبرة، محفوظة، مجهزة بالدوائر الأساسية المؤلفة من وصلات جوزيفسون

٦٩ جهد تدفق كم مفرد "flux-state" (or "Single-Flux-Quantum", or "SFQ") logic which uses coding of the binary information, not by the dc voltage, but by single quanta of magnetic flux ($\Phi_0 = h/2e = 2.07 \times 10^{-15} \text{Wb}$). SFQ devices can be divided into two big groups, defined by the method used to pass the information between logic circuits.

٧٠ دوائر تدفق كم مفرد في حالة السكون In static SFQ circuits

المتزنة وهذه القدرة الفريدة، تتحقق بالكامل في بعض الأجهزة التناظرية المستندة إلى تأثير جوزيفسون، والتي أهملت تقريبا في دوائر الإغلاق المنطقية؛ وعلاوة على ذلك، في دوائر الإغلاق المنطقية فإن توليد نبضات التدفق الكمي المفرد هو أحد الأسباب الكامنة لتأثير جهد الإنهيار الذي يحد من سرعة التشغيل. ظاهرة تسريع التدفق الكمي المفرد تمثل مجموعة من دوائر المغناطيسية فائقة التوصيل أو التدفق الكمي المفرد المنطقي^(٧١). يشير مصطلح المغناطيسية فائقة التوصيل المنطقية إلى مجموعة من دوائر المنطق أو بوابات المنطق التي تستخدم الخصائص الفريدة للموصلية الفائقة، بما في ذلك الأسلاك بدون مقاومة أو (مقاومة تساوى صفر)، مفاتيح التبديل بوصلات جوزيفسون فائقة السرعة، وتكميم للتدفق المغناطيسي (أحد الخيوط المجهرية من التدفق المغناطيسي التي تخترق النوع الثاني من الموصلية الفائقة في الحالة المختلطة)^(٧٢). دوائر المنطق الرقمية المغناطيسية فائقة التوصيل التي تستخدم التدفق الكمي المفرد (س ف كيو) ، والمعروفة بمصطلح كمات التدفق المغناطيسي تقوم بعملية الترميز، والتشغيل، ونقل البيانات . دوائر التدفق الكمي المفرد تتكون من وصلات جوزيفسون النشطة وعناصر سلبية مثل الملفات والمقاومات والمحولات وخطوط النقل بينما الجهود والمكثفات مهمان في الدوائر المنطقية في تكنولوجيا أشباه الموصلات مثل دوائر (سى موسى)، التيارات والملفات الأكثر أهمية في دوائر المنطق للتدفق الكمي المفرد يمكنها تزويد الطاقة بأى من التيار المباشر أو التيار المتردد، اعتماداً على نوع منطق التدفق الكمي المفرد كما تشمل ظاهرة تسريع التدفق الكمي المفرد مجموعات أخرى هي منطق الكم المتبادل^(٧٣) . تطورت تقنية منطق الكم المتبادل لإصلاح بعض المشاكل في منطق تسريع التدفق الكمي المفرد . تستخدم تقنية تدفق الكم المفرد أزواج متبادلة من

٧١ تدفق الكم المفرد ال منطقي Superconducting logic refers to a class of logic circuits or gates

٧٢ تكميم لتدفق مغناطيسي (أحد الخيوط المجهرية من التدفق المغناطيسي تخترق النوع الثاني من الموصلية الفائقة في

الحالة المختلطة) quantization of magnetic flux (fluxoid) One of the microscopic filaments

of magnetic flux that penetrates a type II superconductor in the mixed state

٧٣ منطق الكم المتبادلة . Reciprocal Quantum Logic (RQL) to fix some problems of RSFQ logic.

نبضات تدفق الكم المفرد لترميز وضع المنطق '١' ويتم تطبيق الطاقة والتردد على مدار الساعة بواسطة إشارات التيار المتردد متعدد المراحل. بوابات دوائر تدفق الكم المفرد لا تستخدم المقاومات لتوزيع الطاقة وهكذا تتبدد الطاقة الثابتة وأصبحت لا يعتد بها ومجموعة كفاءة الطاقة التي لا تستخدم مقاومات تحيز، إلخ. وصلات جوزيفسون هي العناصر النشطة لإلكترونيات سرعة تدفق الكم المفرد، مثل الترانزستورات هي العناصر النشطة لإلكترونيات أشباه الموصلات. تقنية تسريع التدفق الكمي المفرد هي تقنية رقمية كلاسيكية، وليست تكنولوجيا حوسبة الكم وهي مختلفة تماما عن تكنولوجيا الترانزستور المتأثر بالمجال (م أ س) المستخدم في أجهزة الكومبيوتر التقليدية.

الجدول (١-٢) مقارنة بين تكنولوجيات إلكترونيات أشباه الموصلات (الترانزستور سي

موس) وإلكترونيات تسريع التدفق الكمي المفرد (ت ت ك م)

الدالة	(الترانزستور سي موس)	تسريع التدفق الكمي المفرد
التبديل الأساسي	الترانزستور	وصلة نفق جوزيفسون (طرفين)
تنسيق البيانات	مستويات الجهد الكهربي	نبضات تيار بيكو ثانية متطابقة
اختبار السرعة	مذبذب	التقلب المفاجيء الغير متزامن يتحقق ٧٧٠ جيجا هرتز المتوقع ١٠٠٠ جيجا هرتز
نقل البيانات	ناقل البيانات التأخير دائرة مقاومة ومكثف وتبديد طاقة	تفريبا دون فقد طاقة خطوط نقل الموصلات الفائقة خالية من التشتت التي تدعم نقل التدفق عند ~ ١٠٠ م/بيكو ثانية
التوزيع على مدار الساعة	مسارات على مدار الساعة	- إعادة توليد نبضات ساعة باستخدام الوصلات تسريع التدفق الكمي المفرد - خطوط نقل الموصلات الفائقة خالية من التشتت
منطق التبديل	زوج من الترانزستورات المكتملة	وصلتين المقارنة
تخزين بت الطاقة	الشحن من مكثف مستويات فولت	التيار في محث الطاقة مستويات ميلي فولت
مروحتين للدخول والخروج	كبيرة	صغيرة

توزيع الطاقة	مسارات الطاقة سلبية (أومية)	الأسلاك فائقة التوصيل بدون فقد
الضوضاء	> من ٣٠٠ كيلو ضوضاء حرارية	ضوضاء حرارية ٤ درجات مطلقه التي تمكن من تشغيل الطاقة المنخفضة

❖ تستخدم نبضات جهد التدفق الكمي المفرد التي تنتجها وصلات جوزيفسون فترة زمنية بالبيكو ثانية للترميز، والمعاجة، ونقل المعلومات الرقمية بدلاً من مستويات الجهد التي تنتجها الترانزستورات في إلكترونيات أشباه الموصلات.

❖ تنتقل نبضات جهد تدفق الكم المفرد من خلال خطوط نقل فائقة التوصيل التي تشتمل على قيم تشتت صغيرة جداً، وعادة ما تكون ضئيلة، في حالة عدم وجود المكونات الطيفية للنبضة أعلى من تردد الفجوة الطاقية للموصل الفائق.

❖ تتطلب الأجهزة المغناطيسية فائقة التوصيل الى التبريد لحالة التثلج^(٧٤).

❖ في حالة تدفق نبضات الكم المفرد بمعدل ١ بيكو ثانية، فمن الممكن ضبط الدوائر عند ترددات تناهز ١٠٠ جيجا هرتز (نبضة واحدة كل ١٠ بيكو ثانية).

يتم إنتاج نبضات الكم المفرد عندما يكون التدفق المغناطيسي خلال حلقة مغناطيسية فائقة التوصيل التي تحتوي على وصلة جوزيفسون تتغير بكم تدفق واحد (Φ_0) كنتيجة التبديل في الوصلة. تشتمل نبضات الكم المفرد على منطقة لألثة بسبب تكميم التدفق المغناطيسي^(٧٥) وهي خاصية أساسية للموصلات الفائقة.

٧٤ التثلج In physics, cryogenics is the study of the production and behavior of materials at very low temperatures. It is not well-defined at what point on the temperature scale refrigeration ends and cryogenics begins, assume it starts at or below $-150\text{ }^\circ\text{C}$ (123 K; $-238\text{ }^\circ\text{F}$)

٧٥ تكميم التدفق المغناطيسي The magnetic flux, represented by the symbol Φ , threading some contour or loop defined magnetic field B multiplied by the loop area S , i.e. $\Phi = B \cdot S$. Obviously, both B and S can be arbitrary and so is Φ . However, if one deals with the superconducting loop or a hole in a bulk superconductor, it turns out the magnetic flux threading such a hole/loop is quantized. The (superconducting) magnetic flux quantum $\Phi_0 = h/(2e) \approx 2.067833758(46) \times 10^{-15}\text{ Wb}$ is a combination of fundamental physical constants: the Planck constant h and the electron charge e . Its value is, therefore, the same for any superconductor.

$$\int V(t) dt = \Phi_0 \approx 2.07 \cdot 10^{-15} \text{ Wb} = 2.07 \text{ mV ps} = 2.07 \text{ mA pH}$$

إستناداً إلى معاملات وصلات جوزيفسون، يمكن أن يكون معدل تدفق النبضات في حدود واحد بيكو ثانية مع سعة لحوالي ٢ ميلي فولت، أو أوسع نطاقاً (مثلاً من ٥ - ١٠ بيكو ثانية) بالمقابل إنخفاض السعة. القيمة النموذجية لسعة النبضة تقريبا $(2I_c R_n)$ حيث $(I_c R_n)$ هو نتاج لتيار الوصلة الحرج (I_c) ، ومقاومة ثبات الوصلة (R_n) لتكنولوجيا الوصلات المستندة لمادة النيوبيوم فإن $(I_c R_n)$ فيما يقارب ١ ميلي فولت. ومن المزايا:

- تردد التشغيل سريع للغاية: من عشرات الجيجا هرتز إلى مئات الجيجا هرتز.
- قابلة للتشغيل المتداخل مع تكنولوجيا دوائر (سى موسى) والموجات الميكرووية والأشعة تحت الحمراء.
- إنخفاض إستهلاك الطاقة: نحو ١٠٠,٠٠٠ مرة أقل من دوائر أشباه الموصلات (سى موسى)، دون الأخذ في الإعتبار حساب التبريد.
- يمكن تصنيع دوائر تسريع التدفق الكمي المفرد بنفس تقنية تصنيع الرقاقة الحالية
- قيمة التسامح جيدة مع إختلاف تقنيات التصنيع.
- لتصنيع دوائر تسريع التدفق الكمي المفرد أساساً ذاتية الترميز ^(٧٦)، مما تسبب في جعل الدوائر الغير متزامنة ^(٧٧) عملية أكثر بكثير.

ومن العيوب:

^{٧٦} ذاتية الترميز In telecommunications and electronics, a self-clocking signal is one that can be decoded without the need for a separate clock signal or other source of synchronization. This is usually done by including embedded synchronization information within the signal, and adding constraints on the coding of the data payload such that false synchronization can easily be detected.

^{٧٧} الدوائر الغير متزامنة An asynchronous circuit, or self-timed circuit, is a sequential digital logic circuit which is not governed by a clock circuit or global clock signal. Instead they often use signals that indicate completion of instructions and operations, specified by simple data transfer protocols.

■ يتطلب التبريد درجة التلج ويتحقق ذلك باستخدام السوائل الثلجة مثل النتروجين السائل والهيليوم السائل. في الآونة الأخيرة، تم تطوير دورة تلج مغلقة، مثل أنبوب نبضات الثلجات التي إكتسبت شعبية كبيرة كما أنها تلغي تلج السوائل المكلفة وتتطلب إعادة الملء الدوري، التبريد لدرجة التلج ميزة حيث أنه يقلل من الضوضاء الحرارية في بيئة العمل.

■ يمكن أن تخفف شروط التبريد عن طريق استخدام الموصلات الفائقة مرتفعة درجات الحرارة ومع ذلك، دوائر تسريع التدفق الكمي المفرد الأقل تعقيد فقط قد تحققت حتى الآن باستخدام الموصلات الفائقة ذات درجات الحرارة الحرجة العالية (T_c) ويعتقد أن التكنولوجيات الرقمية المستندة إلى تقنية تدفق الكم المفرد أصبحت غير عملية في درجات حرارة أعلى من ~ 20 إلى 25 درجة حرارة مطلقة بسبب الخطأ في معدل زيادة البايث أضعافاً مضاعفة (وصلات التبدل المستحثة حرارياً) وتتسبب بإنخفاض المعامل ($E_J/k_B T$) مع إرتفاع درجة الحرارة (T)، حيث ($E_J = I_c \Phi_0 / 2\pi$) هي طاقة جوزيفسون

■ تبديد الطاقة الإستاتيكية التي تقدر عادة بأكثر من $10-100$ مرة من الطاقة الديناميكية المطلوبة للقيام بالعمليات المنطقية تمثل أحد العوائق ومع ذلك، تم إلغاء تبديد الطاقة الإستاتيكية تماماً في دوائر تكنولوجيا التدفق الكمي المفرد ذو كفاءة الطاقة باستخدام ملفات مغناطيسية فائقة التوصيل ووصلات جوزيفسون بدلاً من مقاومات التحيز التي تعتبر مصدراً لتبديد الطاقة الثابتة. دوائر كفاءة التدفق الكمي المفرد المنطقية هي أيضاً مدعومة بالتيار المباشر، لكنها تختلف في حجم محث تيار التحيز وكيفية تنظيم الحد من وصلات جوزيفسون كما أن تقنية تسريع التدفق الكمي المفرد هي تكنولوجيا مخلة بالنظام^(٧٨) إلا أنها ما تزال من الدرجات التعليمية المخصصة وتنفيذ برمجيات تجارية محددة.

٧٨ تكنولوجيا مخلة بالنظام

A disruptive innovation is an innovation that creates a new market and value network and eventually disrupts an existing market and value network, displacing established market leaders and alliances. The term was defined and phenomenon analyzed by Clayton M. Christensen beginning in 1995. More recent sources also include "significant societal impact" as an aspect of disruptive innovation

تطبيقات:

- العناصر الضوئية والأخرى عالية السرعة فى شبكة التبديل بين الأجهزة.
- معالجة الإشارات الرقمية، حتى نطاق إشارات مستوى إكس^(٧٩) وما بعدها
- أجهزة التوجيه فائقة السرعة
- إذاعة برامج محددة^(٨٠)
- المحولات التناظرية إلى رقمية عالية السرعة
- أجهزة الكمبيوتر المثلجة عالية الأداء
- دوائر المراقبة المغناطيسية فائقة التوصيل المكدسة ودوائر الكم

٤ - ٢ - ١ الأسس الفيزيائية لتقنية تسريع التدفق الكمى المفرد

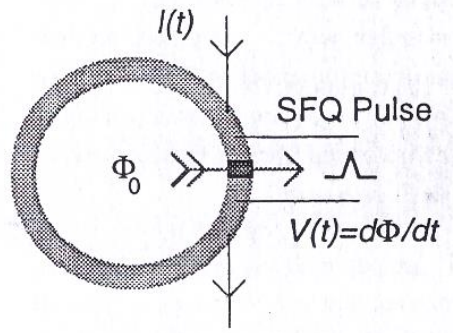
فى دوائر تسريع التدفق الكمى المفرد، يتم تخزين البايث الرقمية فى شكل كمى مفرد من فيض مغناطيسى محاصر فى الحلقات فائقة التوصيل. يفصل تجانب الحلقات، بواحد أو عدة وصلات جوزيفسون قد تتسبب إلى تداخل الكم فى الحلقات، الذى يحد من عدد حالات الفيض المغناطيسى المستقر إلى حالتين، مع إختلاف الفيض

$$\Delta \phi = \phi_0 = h/2e = 2 \times 10^{-15} \text{ Wb} \quad (\text{المعادلة } 1 - 24)$$

٧٩ نطاق إشارات مستوى إكس, high-speed network switching devices Digital signal processing, up to X-band signals and beyond Ultrafast Routers Software-Defined Radio (SDR) 7 KB (895 words X-rays and so on, and each of these ranges can in turn be divided into smaller ranges. A radio communications signal must occupy a range of frequencies 2KB (222 words) .

٨٠ إذاعة برامج محددة (SDR) is a radio communication system where components that have been typically implemented in hardware e.g. mixers, filters, amplifiers, modulators/demodulators, detectors, etc.) are instead implemented by means of software on a personal computer or embedded system.¹ While the concept of SDR is not new, the rapidly evolving capabilities of digital electronics render practical many processes which used to be only theoretically possible.

كما تسمح الوصلات التبدل السريع بين هاتين الحالتين، أي الإدراج أو إستخراج فيض كمي واحد لتشكل الحلقة. سرعة هذا التحويل محدودة بحجم الفجوة الطاقية للموصل الفائق. المشكلة الآن، كيفية تمرير المعلومات حول حالة الفيض في حلقة واحدة إلى خلايا أخرى مماثلة والفكرة الأساسية لتقنية تسريع التدفق الكمي المفرد هو إستخدام الحركة الديناميكية للتدفق العابر ووفقا لقانون فاراداي $V = d\phi/dt$ تتكون نبضة جهد قصيرة خلال وصلة جوزيفسون أثناء التبدل بين حالتى الفيض (الشكل ١) بقيمة سعة تقريبية



الشكل (١ - ١٥) عنصر وصلة جوزفين بسيط (تداخل الكم المغناطيسي فائق التوصيل) التي يمكن أن تستخدم لتحويل التيار المباشر الى التدفق الكمي المفرد أى توليد نبضة تدفق كمي $V(t)$ من داخل نبضة منحدره $I(t)$

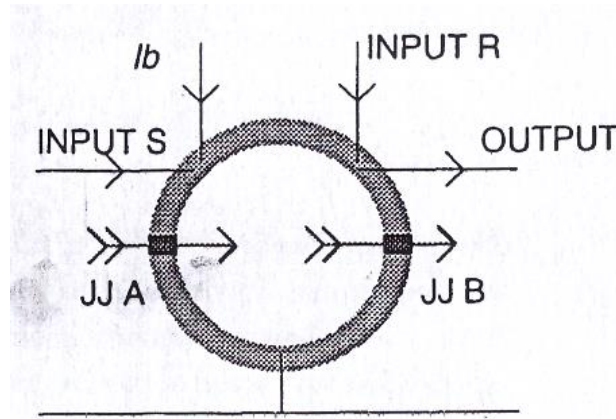
$$\tau = \frac{\phi_0}{2 I_c R_n} \quad \text{المعادلة (٢٤ - ١)}$$

ومساحة للأه

$$\int V(t) dt = \phi_0 = 2 m V xps. \quad \text{المعادلة (٢٥ - ١)}$$

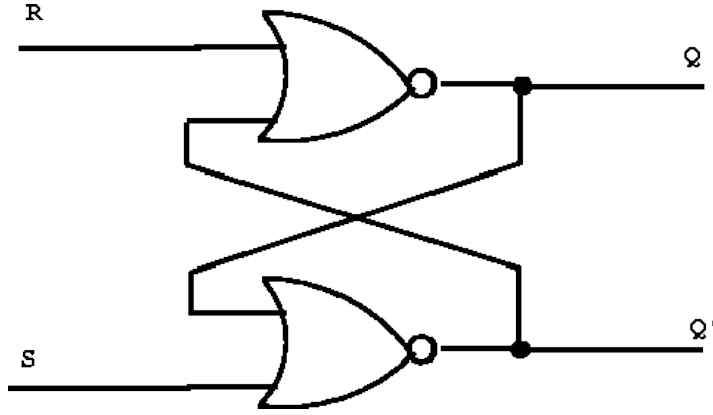
في دوائر تسريع التدفق الكمي المفرد ، يتم تمرير نبضات التدفق إلى العناصر الأخرى على طول الخطوط الشريطية السلبية (الأومية) أو في حالة الحاجة الى كسب التيار أو الطاقة تستخدم خطوط نقل جوزيفسون النشطة الموجودة في آخر حلقة مماثلة ، يمكن أن توفر نبضات التدفق الكمي المفرد التبدل بين حالتى التدفق على سبيل المثال يوضح الشكل (١ - ١٦) عنصر إستقرار ثنائى بسيط المحتمل تبديله بين حالتى التدفق فى الوضع "٠"

(مع إستمرار تدفق التيار الفائق في إتجاه عقارب الساعة) إلى الوضع " ١ " (مع إستمرار تدفق التيار في إتجاه عقارب الساعة) بنبضة من التدفق الكمي المفرد التي تصل من مصدر الدخل (S) ومرور كمية واحدة من التدفق من خلال وصلة جوزيفسون (A) وبالمثل، نبضة من التدفق الكمي المفرد التي تصل من مصدر الدخل (R) توفر إعادة عدم تشغيل العنصر (أي التبديل من الوضع ١ الى الوضع صفر). في الوقت نفسه تطور هذه العملية نبضة خرج من التدفق الكمي المفرد عبر الوصلة (B)، لأن كمات التدفق تترك الحلقة عبر هذه الوصلات، هذه النبضة قد تنتقل الآن إلى عنصر تسريع تدفق كمي مفرد آخر وبملاحظة الذاكرة الذاتية الطبيعية لبوابة منطقية وتيار التغذية (I_b) (تيار مستمر) الذي يتوسط وضعي التدفق " ٠ " و " ١ ". في الوقت نفسه، يوفر هذا التيار التضخيم لنبضات التدفق الكمي المفرد اللازمة، ومن ثم التعويض عن فقدان الطاقة التي لا مفر منها في خطوط النقل السلبية (الأومية) وتحويل موصلية الوصلات جوزيفسون على التوازي.

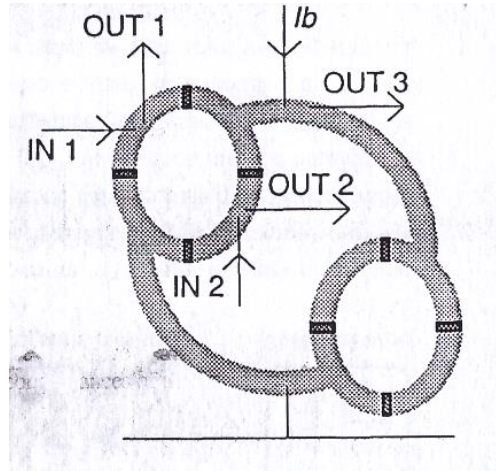


الشكل (١ - ١٦) خلية تسريع التدفق الكمي المفرد بسيطة: عنصر ذاكرة للتبديل ^(٨١)

٨١ عنصر ذاكرة للتبديل. A RS-flipflop is the simplest possible memory element. It is constructed by feeding the outputs of two NOR gates back to the other NOR gates input. The inputs R and S are referred to as the Reset and Set inputs



الشكل (١ - ١٧) عنصر ذاكرة للتبديل^(٤) يتكون من بوابتين

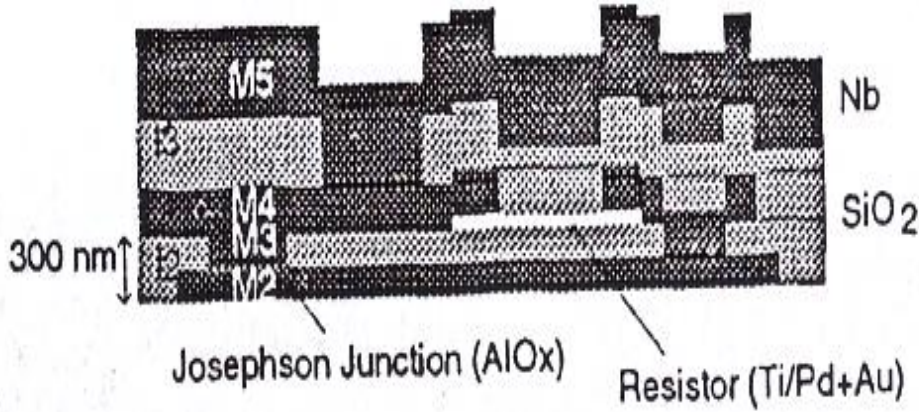


الشكل (١ - ١٨) خلية منطق تسريع التدفق الكمي المفرد لعنصر ذاكرة للتبديل (B) الحلقة الكبيرة ذات محاطة كافية ليكون لها وضعين مستقرين

٤ - ٢ - ٢ تحديد درجة الحرارة الحرجة (Tc) المنخفضة

تحدد السرعة الجوهرية لدوائر تسريع التدفق الكمي المفرد بالفترة الزمنية (τ) لنبضة التدفق الكمي المفرد على سبيل المثال أبسط دائرة لمقسمات التردد يمكن أن تعمل عند ترددات أعلى من ($f_{max} = 1/2\tau = I_c R_n / \phi_0$) وفي حين أنه في الدوائر المتكاملة المعقدة فإن الحد الأقصى للتردد أقل من ٤ إلى ٧ مرات بينما فترة النبضة الزمنية (τ) محدودة بقيمة الفجوة الطاقية لمواد التوصيل الفائق المستخدمة , ويمكن أن تنخفض

بالرنين الطفيلي، قيمة المعامل كومبير - ستوارت (β_c) أقل من ١ إلا إذا كانت قيمة السعة مرتفعة عندئذ تصبح ($\beta_c > 1$) وستعمل الوصلة على تخفيض قيمة المعامل (β_c) وهذا السحب يقلل المقاومة الفعالة العادية (R_n) ومن ثم فإن ناتج ($I_c R_n$) والحد الأقصى للسرعة لدوائر تسريع التدفق الكمي المفرد وهذا هو بالضبط حالة الموصلات الفائقة منخفضة درجة الحرارة (T_c) - (الشكل ١ - ١٩)، حيث تستند هذه التكنولوجيا الأكثر موثوقية على وصلات النفق "النيوبيوم-تريلايير" (Nb/Al/AlOx/Nb) الجوهريّة إذا كانت كثافة التيار الحرج (J_c) أقل من حوالي ٥٠ كيلو أمبير/سم^٢.



الشكل (١ - ١٩) مقطع عرضي لدائرة متكاملة منخفضة الحرارة

في الممارسة العملية، تحدّ اعتبارات دوائر تسريع التدفق الكمي المفرد التيار الحرج الكلي للوصلة (I_c) إلى مستويات أقل من بضعة مئات ميكرو أمبير (وهذا سبب حالة التكميم $I_c L \sim \phi_0$ حيث L) هي محاثة الحلقة. بسبب القيود المفروضة على تخطيط الدوائر، من الصعب عمل محاثات كم أقل من ١٠ محاثات لكل مربع $L_{\square} = \mu_0 d$ حيث d هي سمك طبقة العزل الفعالة بما في ذلك عمق إختراق لندن وعادة ما تكون قيمة d بضعة مئات من النانومتر و (L_{\square}) بضعة أعشار (pH) و (L) بضعة (pH) وهذا هو سبب الحد الأقصى من كثافة التيار جوزيفسون $J_c = I_c/A$ التي تتحدد في الواقع بالحد الأدنى

للمساحة الممكنة للوصلة في كل من العملية التكنولوجية المستخدمة وفي المقابل، (j_c) جنباً إلى جنب مع السعة المحددة للوصلة تحدد زمن نبضة التدفق الكمي المفرد.

$$\tau = \left(\frac{\pi \phi_0 C_0}{2 j_c} \right)^{1/2} \quad \text{المعادلة (١ - ٢٦)}$$

ومن ثم سرعة دائرة تسريع التدفق الكمي المفرد.

الجدول (١ - ٣) مقاييس دوائر تسريع التدفق الكمي المفرد المصنعة من نيوبيوم ثلاثي طبقات

معاملات التقنية	تقنية هايبرس ^(٨٢)	تقنية صني ^(٨٣)	تقنية أجزاء من الميرون
حجم وصلة جونسون (ميكرومتر)	٣٥٥	١٥٥	٥٥
ذاكرة منطقية (كثافة الدائرة كيلو خلية/م ^٢)	١٠-	٣٠ -	١ -
سعة محددة (aF/μm ²)	٤٥٥	٦	٧٥٥
كثافة تيار جونسون (كيلو أمبير/سم ^٢)	١	٦٥٥	٥٠
منتجات $I_c R_n$ (ميلي فولت)	٠.٣	٠.٦	١٥٥
زمن تردد نبضة التدفق الكمي المفرد τ (بيكوثانية)	٤	٢	٠.٨
أقصى تردد f_{max} (جيجاهرتز)	١٥٠	٣٠٠	٧٠٠
سرعة الدوائر المتكاملة الكبيرة LSI (جيجاهرتز)	- ٢٠	- ٤٠	- ١٠٠
	٤٠	٨٠	٢٠٠
أقل طاقة (ميكرورات/الخلية)	٠.٣	٠.٦	٠.١٥

٨٢ تقنية هايبرس HYPRES' foundry features a complete niobium-based superconducting integrated circuit fabrication line. The niobium process has been in operation since 1983 with proven reliability as demonstrated by circuit operations through 7000 thermal cycles without failure and no changes in device characteristics after five years of shelf life.

٨٣ تقنية صني Department of Physics, SUNY, Stony Brook, NY

يوضح الجدول (١ - ٣) المعالم الأساسية لتصنيع دوائر تسريع التدفق الكمي المفرد لعدة مستويات لتكنولوجيا منخفضة الحرارة (T_c) ويمكن للمرء أن يرى أن سرعة دوائر تسريع التدفق الكمي المفرد عالية جداً حتى بالنسبة للحفاظ على التكنولوجيا المتاحة تجارياً (٣٥٥ ميكرومتر)، هذا القياس تم تأكيده مرارا في التجارب الأخيرة مع مختلف دوائر تسريع التدفق الكمي المفرد. العديد من الدوائر المتكاملة المعقدة نسبياً (مئات الخلايا) باستخدام وصلات (٣٥٥ ميكرومتر) قد تم إختبارها عند ترددات من ٢٠-٣٠ جيجا هرتز، بينما دائره بسيطة تستخدم تقنية (١٥٥ ميكرومتر) قد أظهرت صلاحيتها عند ترددات تصل إلى ٣٧٠ جيجا هرتز ويوضح القياس أن نقل تكنولوجيا الميكرورية (أجزاء من الميكرون) مع قواعد التصميم ~ ٥٠ ميكرومتر ينبغي أن تسمح للدوائر المتكاملة المعقدة مع الترددات على مدار الساعة لتصل إلى ٢٠٠ جيجا هرتز.

▪ وهناك ميزة أخرى مثيرة للإعجاب في دوائر تسريع التدفق الكمي المفرد هو إستهلاكها للطاقة المنخفضة. الطاقة الأساسية التي تفقد يمكن حسابها $E_0 = I_b \phi_0$ لكل نقل تدفق، حيث يمثل $I_b \sim 0.7 I_c$ التيار المستمر لتيار التغذية وعادة متوسط التيار (I_c) حوالي ٢٠٠ ميكرو أمبير، وينطوي البايث الواحد لعملية المنطق على ٣ الى ٤ مرات نقل تدفقات وإستهلاك الطاقة الأساسية ما يقرب من 10^{-1} جول/بايث.

▪ تستخدم دوائر تسريع التدفق الكمي المفرد في تقاطعات وصلات التغذية المقاومة، مثل هذه التغذية (مماثلة لتلك المستخدمة في دوائر الترانزستور المتأثر بالمجال (م أ س) الذي يؤدي إلى إستهلاك الطاقة الثابتة التي قد تنخفض إلى نحو ١٠ إضعاف المستوى الأساسي كنتيجة لذلك، قد تكون قيم تبديد الطاقة في دوائر ٣٠ جيجا هرتز قريبة من ٣٠٠ ميكرووات لكل "بوابة" (الخلية) ، مع زيادة متناسبة مع هذا العدد مع التردد على مدار الساعة، إستهلاك الطاقة في دوائر تسريع التدفق الكمي المفرد من إثنين إلى ثلاثة أضعاف

الحجم أقل بالمقارنة بدوائر الترانزستور المتأثر بالمجال (م أ س) لحالية التي تعمل بترددات أقل بكثير.

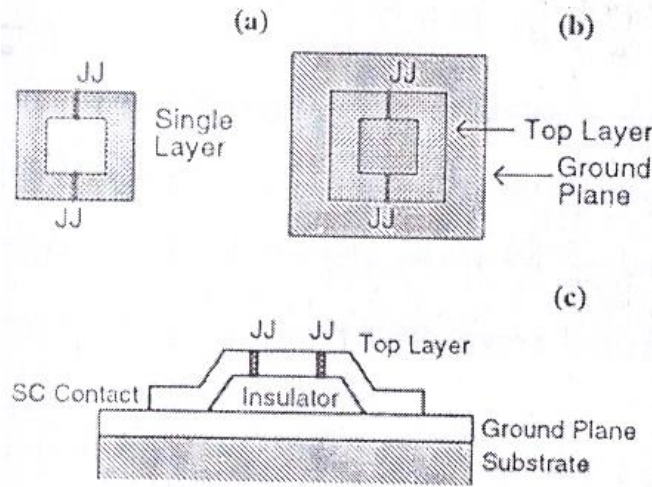
■ من حيث التعقيد والكثافة، دوائر تسريع التدفق الكمي المفرد قابلة للمقارنة للترانزستور في دوائر أشباه الموصلات التي لها نفس الوظيفة، إذا كانت مصنعة بقواعد تصميم مماثلة وعلاوة على ذلك، النقل بتقنية أجزاء من الميكرون، جوهرية الوصلات التي لا تحتاج إلى التوصيل على التوازي الخارجية قد تسمح لجعل كثافة دوائر الترانزستور المتأثر بالمجال (م أ س) أعلى من دوائر الترانزستور المتأثر بالمجال (م أ س) القابلة للمقارنة - انظر الصف الثاني من الجدول رقم (١ - ٣). العيب الرئيسي العملي لدوائر تسريع التدفق الكمي المفرد منخفضة الحرارة (Tc) هو ضرورة تبريدها إلى ٤ - ٥ درجة حرارة مطلقة. في الوقت الحاضر، تكلفة الثلجات مغلقة الدورة لنطاق درجة حرارة الهيليوم باهظة التكاليف ويصل وزنها الى حوالي ٥٠ كجم. غير أن التقدم السريع الأخير في تكنولوجيا التبريد يعطي كل الأسباب للإعتقاد بأنه يمكن تخفيض تكلفة الوحدة كثيرا عندما يتم إنتاجها بالجملة.

٤ - ٢ - ٣ تحديد درجات الحرارة العالية

يمكن تخفيض العيب المذكور لدوائر تسريع التدفق الكمي المفرد باستخدام مكونات ذات درجات حرارة (Tc) عالية، بما في ذلك وصلات جوزيفسون، وتعمل في درجات حرارة النتروجين السائل أكبر من ٦٥ درجة حرارة مطلقة. من حيث المبدأ، هذه الوصلات، مناسبة جداً لتسريع التدفق الكمي المفرد، لأنها أصلاً لا تحتاج إلى السحب الخارجي. يصل خرجها $I_c R_n$ إلى حوالي ٢٠ ميلي فولت، من الناحية النظرية مقابلة لترددات الدوائر المتكاملة الكبيرة لتسريع التدفق الكمي المفرد أكبر على مدار الساعة ليصل الى تيرا هرتز. مستوى درجة الحرارة الحرجة (Tc) العالية للنتروجين لتكنولوجيا تسريع التدفق الكمي المفرد تواجه

مشكلتين رئيسيتين: المشكلة الأولى ناتجة عن التقلبات الحرارية العالية مما قد يؤدي إلى ارتفاع معدل الإنتقالات المستحثة حرارياً، والتي تعتبر أخطاء رقمية ومن أجل منع هذه الأخطاء، ينبغي أن يكون التيار الحرج في الوصلات أكبر من ذلك في دوائر تبريد الهليوم. على سبيل المثال للتشغيل عند ٦٥ درجة حرارة مطلقة فإن الحد الأدنى للتيار (I_c) يجب أن يكون أعلى من ٦٠٠ ميكرو أمبير ونتيجة لذلك ينبغي تقليص جميع المحاثات بمعامل خمسة مرات على الأقل من قيمها المعاصرة وفي نفس الوقت، نظراً لعمق الإختراق الكبير، فإن سمك الحد الأدنى للطبقة العازلة الفعالة يجب أن يكون أكبر في المواد عالية درجات الحرارة الحرجة (T_c) (عند درجة حرارة ٦٥ درجة مطلقة فإن عمق الإختراق الأدنى حوالي ١ ميكرو متر) مما يؤدي إلى محاثات كبيرة لكل مربع حوالى

$$At 65^{\circ}K, d_{min} \sim 1\mu m \rightarrow L_{\square} \sim 1 pH$$



الشكل (١ - ٢٠) مجموعة أمثلة اتخطيط حلقات التدفق الكمي المفرد عند حرارة النيتروجين - الشكلين (أ) و (ب) لهم محاثة كبيرة غير مقبولة - الشكل (ج) شكل هندسى مقبول

نتيجة لذلك يصبح عدد مربعات الفيلم الرقيق المتاح لتخطيط حلقة منخفضة جداً (~ ٢ إلى ٤) وهذا يؤدي الى مشاكل صعبة بالنسبة لتخطيط هذا القيد ويفرض قيوداً شديدة على

هندسة الدائرة (الشكل ١ - ٢٠). تحديا رئيسيا آخر هو إمكانية تكرار إنتاج وصلات جوزيفسون عالية درجة الحرارة الحرجة (T_c). تعمل دوائر تسريع التدفق الكمي المفرد في إطار محدود من معاملات الدائرة، مع هامش حرج عادة قريب من $\pm 30\%$ بعد تحسين شامل. تتسبب التقلبات الحرارية في تضيق النافذة كنتيجة لذلك، ينبغي أن يكون لدوائر تسريع التدفق الكمي المفرد مقياس تكامل مفيد كحد أدنى (-2000 وصلة جوزفين في كل رقاقة) ولها قيمة الجذر التربيعي للانحراف النسبي للتيار الحرج أقل من 4% من قيمته الإسمية وفي حين أن أفضل التكنولوجيات منخفضة درجة الحرارة الحرجة (T_c) المعاصرة ينطبق عليها هذا المعيار، التكنولوجيات مرتفعة درجة الحرارة الحرجة (T_c) ليس لها ذات المعيار وفي ضوء ما سبق نشره لا توجد قيمة أقل من 10% . حتى في ظل أفضل الظروف، سوف يستغرق جلب التكنولوجيا عالية درجة حرارة حرجة (T_c) لتسريع التدفق الكمي المفرد سيحتاج على الأقل ١٠ سنوات أخرى وخلال هذه الفترة يجب الإبقاء على التكنولوجيا منخفضة درجة حرارة حرجة ($+T$) لتسريع التدفق الكمي المفرد لتزدهر بمفردها، على الرغم من مشكلة التبريد.

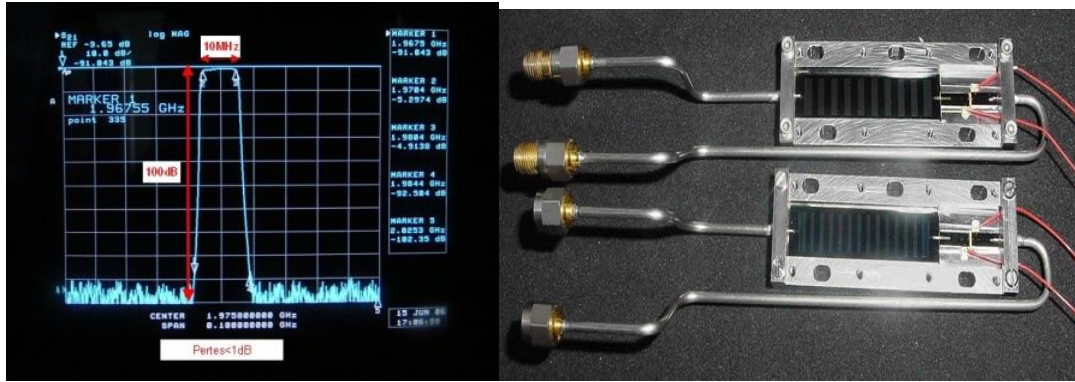
٥ - ١ إلكترونيات الموصلات الفائقة

" إلكترونيات فائقة التوصيل " هو مصطلح واسع جدا، مع تطبيقات كثيرة ومتنوعة جدا منها:

- جهاز قياس تدخل الكم المغناطيسي فائق التوصيل (سكويد)^(٥) لقياسات المجال المغناطيسي بدقة.

- محددات التيار لبناء الدوائر فائقة التوصيل للعديد من النظم لحمايتها على سبيل المثال حماية محطة كهرباء من الحوادث العارضة الناتجة عن إرتفاع الجهد العالي، أو قصر في الدائرة الكهربائية. تتفاعل هذه المحددات بسرعة كبيرة، وتضمن الحماية المثلى للنظم وتلقائيا تعود الى العمل عند إنتهاء العطل.

• المرشحات الإلكترونية هي دوائر إلكترونية تسمح بمرور نطاق من الترددات وتمنع نطاقات الترددات الأخرى ويستخدم هذا النوع من الدوائر في أجهزة الراديو، على سبيل المثال، لإختيار محطة إذاعية للإستماع إليها؛ على سبيل المثال فإن أجهزة الإستقبال المصممة لإستقبال إشارات الراديو من جميع المحطات الإذاعية تسمح فقط بتمرير تردد المحطة المحددة. تعتبر المرشحات من المكونات الشائعة الإستخدام في الدوائر الإلكترونية ومع ذلك، لا تميل المرشحات دائما لمنع نطاق صغير من الإشارات الغير المحددة، خاصة إذا كانت الإشارات الغير المحددة تستخدم الترددات التي لا تختلف كثيرا عن تلك الترددات المختارة وهذا هو ما يسبب الإزعاج عندما يلتقط جهاز الراديو تردد محطتين في نفس الوقت حيث يجد صعوبة في التمييز بين الأشارتين.



الشكل (١ - ٢١) يمثل اثنين من المرشحات، ١٠ أقطاب، و ١٤ قطب، (التردد المركزي = ١٩٧٥ ميجاهيرتز، عرض النطاق = ١٠ ميجاهيرتز)

مع تطور الإتصالات السلكية واللاسلكية على مدى العامين الماضيين، تطلبت مرشحات أكثر كفاءة حيث أن المقاومة الكهربائية للعناصر المستخدمة لبناء هذه الدوائر تحدد نوعية المرشحات: يعتبر إستخدام الموصلات الفائقة بالتحل للتغلب على هذه العقبة ومع ذلك، فإن مقاومة الموصلات الفائقة لا تساوى الصفر بدقة عند تصميم وتصنيع مرشح. فى الواقع أن المقاومة الكهربائية للموصل الفائقة فقط قيمة الصفر عند إستخدام التيار المباشر الثابت. تستخدم التيارات المترددة فى تطبيقات الإتصالات السلكية واللاسلكية، أي التيارات (أو الفولتية) التى تتذبذب بسرعة كبيرة (حوالي ١ جيجاهيرتز للهواتف المحمولة، أو مليار

ذبذبة في الثانية الواحدة على سبيل المثال عندما يتذبذب التيار بهذه السرعة في الموصلات الفائقة تظهر مقاومة كهربائية ضعيفة جدا بالمقارنة مع مقاومة المعادن التي تستخدم عادة في الدوائر الإلكترونية العادية. المرشحات المصنوعة من مواد فائقة التوصيل هي بالتالي أكثر كفاءة من المرشحات العادية وهي تستخدم في عناصر هوائيات التتابع للهواتف المحمولة وتمكن من التقاط الإشارة من مسافات أبعد من الهوائي، وبالتالي زيادة نطاق كفاءة الهوائي. تستخدم عدة آلاف من هوائيات التتابع مرشحات فائقة التوصيل في الولايات المتحدة الأمريكية وأقترح مشروع مشترك أمريكي مع شركة صينية لدراسة إمكانية تطوير هذه التكنولوجيا في البلدان الأخرى ويمكن أيضا أن تستخدم هذه المرشحات في الاتصالات بالأقمار الصناعية.

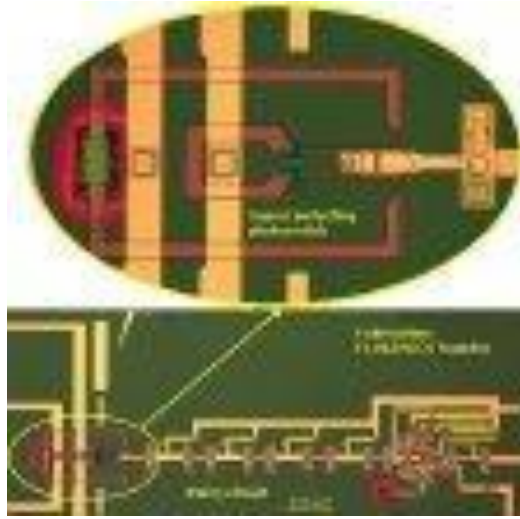
إلكترونيات (تدفق الكم السريع المفرد) حاليا قيد التطوير وهو عنصر ثنائي يستخدم الصفر والواحد (خلافًا للإلكترونيات الكم)، حيث لا تستخدم ترانزستورات السيليكون كعنصر أساسي ، ولكن تقنية إلكترونيات (تدفق الكم السريع المفرد) تستخدم وصلات جوزيفسون لمعالجة تدفق الكم المغناطيسي لترميز البايث (0 أو 1) وميزة هذا الأسلوب هو أن وصلات جوزيفسون تتيح استخدام سرعة كبيرة جدا، تصل إلى 100 جيجاهرتز، وأن هذه الدوائر تبذل طاقة أقل بكثير من متوسطات الطاقة في الدوائر. تمثل إلكترونيات (تدفق الكم السريع المفرد) فجوة ضخمة محتملة للإلكترونيات ولكن، إلى جانب انخفاض درجات الحرارة، كما أنه يتطلب تغييرا جذريا للتكنولوجيا، الذي يؤخر بشكل ملموس أية إمكانية للتطوير والتسويق. تستند معظم الأنشطة البحثية في إلكترونيات الموصلية فائقة التوصيل على الإلكترونيات الرقمية بتقنية تسريع الفيض الكمي المنفرد (27) الرقمية باستخدام الدوائر الرقمية المرتبطة بوصلة نفق جوزيفسون كميون أساسي للإلكترونيات فائقة التوصيل المكافئ للترانزستور في تكنولوجيا أشباه الموصلات. تستخدم دوائر تقنية تسريع الفيض الكمي المنفرد وصلات جوزيفسون المقاومة المتصلة على التوازي بطريقة متأنية من أجل أن تكون قادرة على توليد، وإنتشار وتخزين المعلومات الثنائية من خلال كمات من حقل

مغناطيسي ($h/2e$) حيث (h) ثابت بلانك و (e) هي (الشحنة الابتدائية) المقابلة الى 10.710 و 15 - ويبر. تنتشر المعلومات الثنائية من خلال الدائرة كنبضات الجهد مساحته 207 و 2 ميلى فولت باسكال. زمن النبضة فى حدود البيكو ثانية، معدل تكرار النبضات، هو تردد إهتزاز ساعة كحد أقصى لدوائر تسريع الفيض الكمي المنفرد، فى حدود عدة عشرات إلى عدة مئات جيجاهرتز ويجرى إنتشار النبضات دون خسائر فى دوائر الموصلية الفائقة بسرعة ما يقرب من نصف سرعة الضوء. وجود نبض اللثة فى فاصل زمني معين يتم ترميزه رقمياً بالرقم '1'، وفى حين يتم ترميز عدم وجود النبضة بالرقم '0'. يتم تخزين المعلومات الثنائية فى الدوائر كتيار دائم يتدفق فى حلقة فائقة التوصيل. يمثل الفيض المرتبط لهذا التيار مع مقدار تدفق الفيض المغناطيسي: ويساوى ($L I = 2,07 \text{ pH}$) حيث (L) هى محاثة حلقة التخزين. إلكترونيات فائقة التوصيل ذات أهمية كبيرة للعديد من التطبيقات المتخصصة، مثل أجهزة التوجيه فائق السرعة لشبكات الإتصالات، محولات تناظرية إلى رقمية تعمل فى مجال الموجات الدقيقة، والإستقبال الرقمي ذات الحساسية القصوى الذي ليس له نظير فى عالم أشباه الموصلات.

❖ الخبرة الفنية

بدأت الأنشطة فى تقنيات تسريع الفيض الكمي المنفرد^(٢٧) فى العام ١٩٩٧؛ وهذا ساعد على توفير خبرة فريدة من نوعها فى فرنسا وقد أنشئت مجموعة برمجيات لتصميم دوائر تسريع الفيض الكمي المنفرد، جنباً إلى جنب مع القياسات المخبرية التي تسمح بإجراء الفحوص المخبرية الروتينية فى دوائر تسريع التدفق الكمي المفرد كما تم إختبار دوائر تسريع التدفق الكمي المفرد فى منطقة منخفضة تحت الأرض قليلة الضوضاء فى إطار أنشطة تداخل الكم المغناطيسي فائق التوصيل^(٥) الرقمية.

❖ واجهة تقنية تسريع الفيض الكمي المنفرد البصرية



الشكل (١ - ٢٢) واجهة تقنية تسريع الفيض الكمي المنفرد البصرية

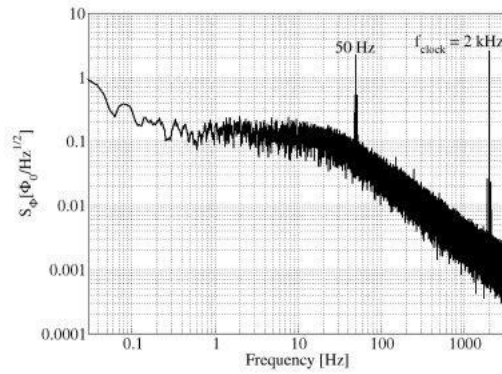
جهاز بصري مزامن للدائرة المتكاملة لتسريع الفيض الكمي المنفرد يسمح لمزامنة دوائر تسريع التدفق الكمي المفرد البصرية مع إشارات ضوئية خارجية، وبالتالي التقليل من الضوضاء في دوائر تسريع التدفق الكمي المفرد. مفاتيح التحويل البصرية المتكاملة فائقة التوصيل مع دائرة تسريع التدفق الكمي المفرد الرقمية فائقة التوصيل مصنوعة من خط نقل جوزيفسون والتدفق الكمي المفرد والخرج تيار مستمر.

❖ جهاز قياس تداخل الكم المغناطيسي فائق التوصيل (٥) الرقمي



الشكل (١ - ٢٣) جهاز قياس تداخل الكم المغناطيسي فائق التوصيل (٥)

أجهزة التبريد المستمر^(٨٤) المبنية على تقنية تداخل الكم المغناطيسي فائق التوصيل الرقمية تشتمل على مجموعتين من لفائف هلمهولتز لأداء أغراض المعايرة. تشتمل الشريحة بأبعاد ٥ مم^٢ على تقنية تداخل الكم المغناطيسي فائق التوصيل الرقمية مثبتة في الحامل تحت جهاز التبريد. الكثافة الطيفية لفيض الضوضاء في جهاز قياس المغناطيسية بتقنية تداخل الكم المغناطيسي فائق التوصيل الرقمية. هذا الجهاز هو مقياس المغناطيسية الكل رقمية الأول إستناداً إلى تداخل الكم المغناطيسية فائقة التوصيل ، وهو يتيح قمع الضوضاء البيئية مباشرة على مستوى أجهزة الإستشعار مع الحفاظ على دقة تدفق الكم المغناطيسي ٠,٢٢ ميليكونتوم من تدفق الفيض المغناطيسي، الناتج مع إشارة التكامل. النطاق الديناميكي أعلى من ٧٥ ديسبل (١٤٨٠٠ كمات التدفق المغناطيسي). في بيئة الظروف الحقيقية للكشف عن توقعات الزلازل في أحد المختبرات في فرنسا.



الشكل (١ - ٢٤) الكثافة الطيفية للضوضاء من فيض مغناطيسي من جهاز الاستشعار المغناطيسي بتقنية تداخل الكم المغناطيسي فائق التوصيل الرقمية .

٨٤ أجهزة التبريد المستمر cryogenic device that provides continuous cooling to temperatures as low as 2 mK, with no moving parts in the low-temperature

❖ تصميم محول تناظري - رقمي لتسريع الفيض الكمي المنفرد

معدل النبض في تقنية تسريع الفيض الكمي المنفرد لخرج محول تناظري إلى رقمي أعلى من ١٠٠ جيجا بايت/ثانية، من الضروري للتشغيل أن تكون الإشارة على الشريحة بطريقة رقمية من أجل تداخلها مع الإلكترونيات في درجة حرارة الغرفة على سبيل المثال، فهي مفيدة لمرشحات القسمة العشرية. يجري إنشاء مكتبة مؤلفة من عدة خلايا متنوعة لبناء الدوائر تسريع التدفق الكمي المفرد التي يمكنها تحقيق السلوك الوظيفي المطلوب.

٥ - ٢ إلكترونيات رقمية فائقة التوصيل والسرعة بتكنولوجيا تسريع التدفق الكمي المفرد الدوائر المتكاملة التي تستخدم الموصلية الفائقة لها العديد من الخصائص التي تجعلها مناسبة وفريدة لمعالجة المعلومات الرقمية فائقة السرعة وتتضمن هذه الميزات:

❖ الوصلات الداخلية السلبية أو الأومية (الخطوط الشريطية فائقة التوصيل التي تسمح بنقل الموجات في زمن قصير حوالي البيكو ثانية عبر مسافات) داخل رقاقة (تصل إلى بضعة سنتيمترات) بدون توهين وقيم تشتت ضئيلة مع عدم تداخل الإشارات وبسرعة تقترب من سرعة الضوء.

❖ العناصر النشطة (وصلات جوزفين) لتوليد موجات البيكو ثانية حيث لها معاوقة خرج فعالة وصغيرة بحيث تكون معاوقتها مطابقة أو متقاربة مع معاوقة الخطوط الشريطية وحتى مع هذه المعاوقة المنخفضة، فإن إستهلاك الطاقة في وصلات جوزيفسون منخفضة للغاية بسبب قيم إشارة الجهد المنخفضة جداً التي تتراوح في حدود ١ ميلي فولت وهذا يعني أن تكامل العناصر في الرقاقة ذات كثافة عالية كما أن آلية تغليف الرقاقة يمكن أن يقلل زمن تأخير إنتشار الإشارة.

❖ تصنيع التكنولوجيا (باستخدام الوصلات النيوبيوم الثلاث طبقات) ^(٨٥) وهي أبسط بكثير من تكنولوجيا أشباه الموصلات القائمة على السليكون لهذه الأسباب، في أواخر الستينات، جرت محاولات عدة لتطوير تكنولوجيا رقمية فائقة التوصيل.

تم إنهاء مشاريع التطوير دون تسويق التكنولوجيا، حيث أمكن الحصول على ترددات أعلى من واحد جيجاهرتز باستخدام تكنولوجيا الترانزستور المتأثر بالمجال (م أ س) أو بدوائر الترانزستور ثنائي القطب، ويمكن تبرير إنهاء مشاريع التطوير لعدم إمكانية استخدام تقنية تبريد الهليوم اللازمة وكان العامل الرئيسي الذي حد من سرعة التطوير إختيار دوائر "الإغلاق" أو المزلاج ^(٨٦) التي حاولت أن تحاكي دوائر ترانزستور أشباه الموصلات بترميز بايت رقمية لمستويات الجهد. مثل هذا التمثيل كان الخيار الوحيد المتاح في تكنولوجيا أشباه الموصلات، ولكن في دوائر وصلات جوزيفسون مع إفتقارها إلى ترانزستورات فعالة فإن هذا النهج تسبب في مشاكل صعبة مثل جهد الإنهيار الديناميكي ^(٨٧) ونحن حالياً في خضم الجيل الثالث (وربما الأخير) لمحاولة تطوير تكنولوجيا رقمية فائقة التوصيل تنافسية. هذا الجهد إستناداً على الدوائر المنطقية لوصلات جوزيفسون فائقة السرعة الجديدة المقترحة في ١٩٨٥ والمعروفة بإسم تقنية تسريع التدفق الكمي المنفرد ^(٢٧).

٨٥ الوصلات النيوبيوم تريلايبر niobium tri-layer junctions

A Nb-AlO_x-Nb trilayer process was developed that consistently produces junctions with $V_m > 40$ mV. Critical current density was controlled reproducibly from 200 to 7000 A/cm² by controlling the oxygen pressure in the process chamber during thermal oxidation of the aluminum. A multilayer AlO_x barrier was used to produce junctions for Josephson circuit applications requiring low critical currents (<50 A/cm²).

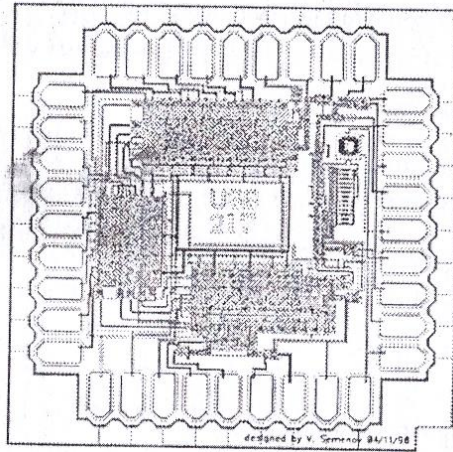
٨٦ دوائر "الإغلاق" أو المزلاج *latch* is an electronic logic circuit has two inputs and one output. One of the inputs is called the *SET input*; the other is called the *RESET input*. - Latch circuits can be either active-high or active-low. The difference is determined by whether the operation of the latch circuit is triggered by HIGH or LOW signals on the inputs.

٨٧ جهد الإنهيار الديناميكي dynamic punchthrough

٥ - ٣ التطبيقات القادمة

فى العديد من التطبيقات العسكرية والتجارية الهامة تم تعويض هذا العيب فى دوائر تسريع التدفق الكمي المفرد أكثر من التعويض بأداء الأجهزة هذه التطبيقات تشمل ولكن لا تقتصر على ما يلي:

❖ المحولات التناظرية - إلى الرقمية (لأنظمة الرادار والاتصالات)، أول نموذج من هذه المحولات الشكل (١ - ٢٥) مع معدل إفراط يصل إلى ٧ جيجا هرتز وإجمالي إستهلاك طاقة أقل من ٠.٥ و٠ ميلى وات بإستخدام تكنولوجيا هيبرس (٥). أقترح العديد من دلائل التحسينات الواضحة لهذه الدائرة، حيث أن هناك فرصة جيدة لتنفيذ محول تناظرى الى رقمى على شريحة ١٦ بايت مع نطاق ترددي لإشارة تماثلية ٢٠ ميغا هرتز دون تغيير تكنولوجيا التصنيع ومع إستخدام قواعد التصميم لشريحة ١ ميكرومتر، يصبح ممكنا تنفيذ محول تناظرى الى رقمى على شريحة ٢٠ بايت مع نطاق ترددي لإشارة تماثلية ٢٠ ميغا هرتز وعرض النطاق الترددي هذا أكبر ١٠٠ مرة ~ من أفضل المحولات التناظرية الى رقمية المصنعة بتكنولوجيا أشباه الموصلات وبنفس الدقة.



الشكل (١ - ٢٥) تخطيط كامل لأول نظام تسريع التدفق الكمي المفرد ٠ (محول تناظرى إلى رقمى) الذى تم إختباره بنجاح عند تردد على مدار الساعة متعددة الجيجا هرتز ٠ حجم الرقاقة الخارجية هو ٥ × ٥ مم؛ تشتمل على ١١٧ خلية منطق ، بما فى ذلك ١٧٧٨ وصلة جوزفين

❖ المحولات الرقمية - الى - تناظرية

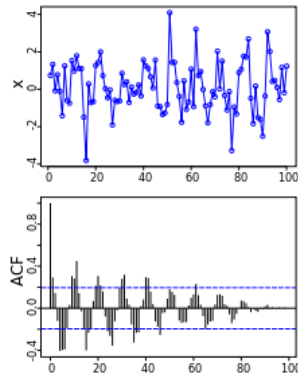
لتوليد شكل موجي خاص بالرادارات فائقة الإتساع، وتطبيقات الأرصاد الجوية وهناك فرصة جيدة لتنفيذ شريحة واحدة ٢٠ بايت لمحول رقمي - الى - تناظري مع زمن أقل من ١ نانو ثانية، ودقة متناهية أفضل من ٠,٠٠١ جزء في المليون، وأكبر جهد خرج حوالي ٢٥ ميلي فولت وبدء تكنولوجيا التصنيع مع قواعد تصميم أكثر تقدما، بإستخدام نظام شرائح يسمح برفع جهد الخرج الى ١ فولت وأكثر.

❖ تقنية تداخل الكم المغناطيسي فائق التوصيل ^(٥) الرقمية (للتطبيقات الحيوية المغناطيسية، التقييم الغير تدميري، والعديد من التطبيقات العلمية) وعلى النقيض من تقنية تداخل الكم المغناطيسي فائق التوصيل التناظرية الحالية، سيتم إستخدام تقنيات مماثلة رقمية فائقة السرعة على شريحة تغذية عكسية لتقديم معدلات تتجاوز ١٠١٠ تدفق كمة في الثانية الواحدة. هذه الميزة تسمح لعملية الطرح الإلكتروني من التدخلات، وكنتيجة عملية تشغيل تقنية تداخل الكم المغناطيسي فائق التوصيل بدون الدروع المغناطيسية الخارجية التي توفر الآن العنصر الرئيسي في التكلفة. أول جهاز من هذا النوع يجري إختباره وإذا أكدت التجارب نجاح تقنية تداخل الكم المغناطيسي فائق التوصيل ^(٥) الرقمية قد تستخدم بدلا من تلك التناظرية في معظم التطبيقات، وتساعد على التوجه للتطبيقات الطبية الحيوية من مراكز البحوث إلى العيادات العادية.

عناصر الترابط التلقائي ^(٨٨) الرقمية (لعلم الفلك الراديوي والتطبيقات الأخرى) يمكن الجمع بين عرض النطاق الترددي الغير مسبوق بحجم صغير جدا وإستهلاك طاقة صغيرة. أول

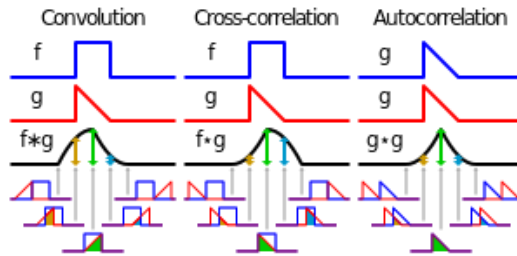
٨٨ ناصر الترابط التلقائي - Autocorrelation, also known as serial correlation or cross-autocorrelation is the cross-correlation of a signal with itself at different points in time (that is what the cross stands for). Informally, it is the similarity between

نموذج تجريبي لجهاز إرتباط ذاتي رقمي يشتمل على ثمانى قنوات قد تمت تجربته بالفعل عند الترددات المنخفضة ويتم التخطيط لإختبار شريحة إرتباط ذاتي رقمي تشتمل على ٦٤ قناة من أجل زيادة عدد القنوات لتجنب القيم عمليا المثيرة للإهتمام مثل ١٠٢٤ وما بعدها، وسوف نحتاج إلى تطوير وحدات متعددة الرقاقات فائقة التوصيل مع معدلات نقل البيانات لما لا يقل عن ١٦ جيجابت لكل قناة.



الشكل (١ - ٢٦) رسم سلسلة من ١٠٠ رقم عشوائى لإخفاء دالة جيب الزاوية . فى الأسفل : كشف

دالة الجيب فى جهاز رسم الإرتباط الناتج عن الترابط التلقائى.



الشكل (١ - ٢٧) مقارنة بصرية لنبضة الالتواء، وعبر علاقة وترابط تلقائى.

observations as a function of the time lag between them. It is a mathematical tool for finding repeating patterns, such as the presence of a periodic signal obscured by noise, or identifying the missing fundamental frequency in a signal implied by its harmonic frequencies. It is often used in signal processing for analyzing functions or series of values, such as time domain signals.

❖ دوائر إشارة عشوائية زائفة^(٨٩) (إنتشار الطيف في نظم الإتصالات) بعض الدوائر لهذه الفئة، بما في ذلك المولدات الكهربائية، المضمنات، قد تكون بسيطة نسبياً (مئات الخلايا الابتدائية) والمصنعة باستخدام التكنولوجيا الحالية النيوبيوم- تريلايير، بينما توفر ميزة سرعة حاسمة بالمقارنة مع أشباه الموصلات المنافسة وقد تم الإعلان عن نجاح أول مولد للإشارة العشوائية الزائفة بتقنية تسريع الفيض الكمي المنفرد.

التطبيقات المستقبلية المحتملة:

▪ التبديل الرقمي فائق السرعة

يمكن استخدام دوائر تسريع التدفق الكمي المفرد للتبديل بسرعة لم يسبق لها مثيل في الأداء مع إستهلاك منخفض جداً للطاقة وكنتيجة لذلك يمكن تنفيذ دائرة عالية الكثافة على سبيل المثال، 128×128 قناة ذاتية التوجيه على أسس التبديل (باتشر بانيان) لعدد ٤٢٤ بايت على سبيل المثال حزم أجهزة الصراف الآلي نفذت بتكنولوجيا ٠,٨ ميكرومتر، ويمكن أن توفر سرعة نقل ما يقرب من ١٠٠ جيجابت لكل قناة، بفقد طاقة منخفضة حوالي ١٠ ميلي وات ويمكن تنفيذها على شريحة بمساحة ١ سم^٢ لبكسل واحد والتي يصعب تنفيذها بدوائر أشباه الموصلات.

▪ حوسبة مقياس بيتافلوبس^(٩٠)

٨٩ دوائر إشارة عشوائية زائفة pseudorandom generator In theoretical computer science , a (PRG) for a class of statistical tests is a deterministic procedure that maps a random seed to a longer pseudorandom string such that no statistical test in the class can distinguish between the output of the generator and the uniform distribution. The random seed is typically a short binary string drawn from the uniform distribution.

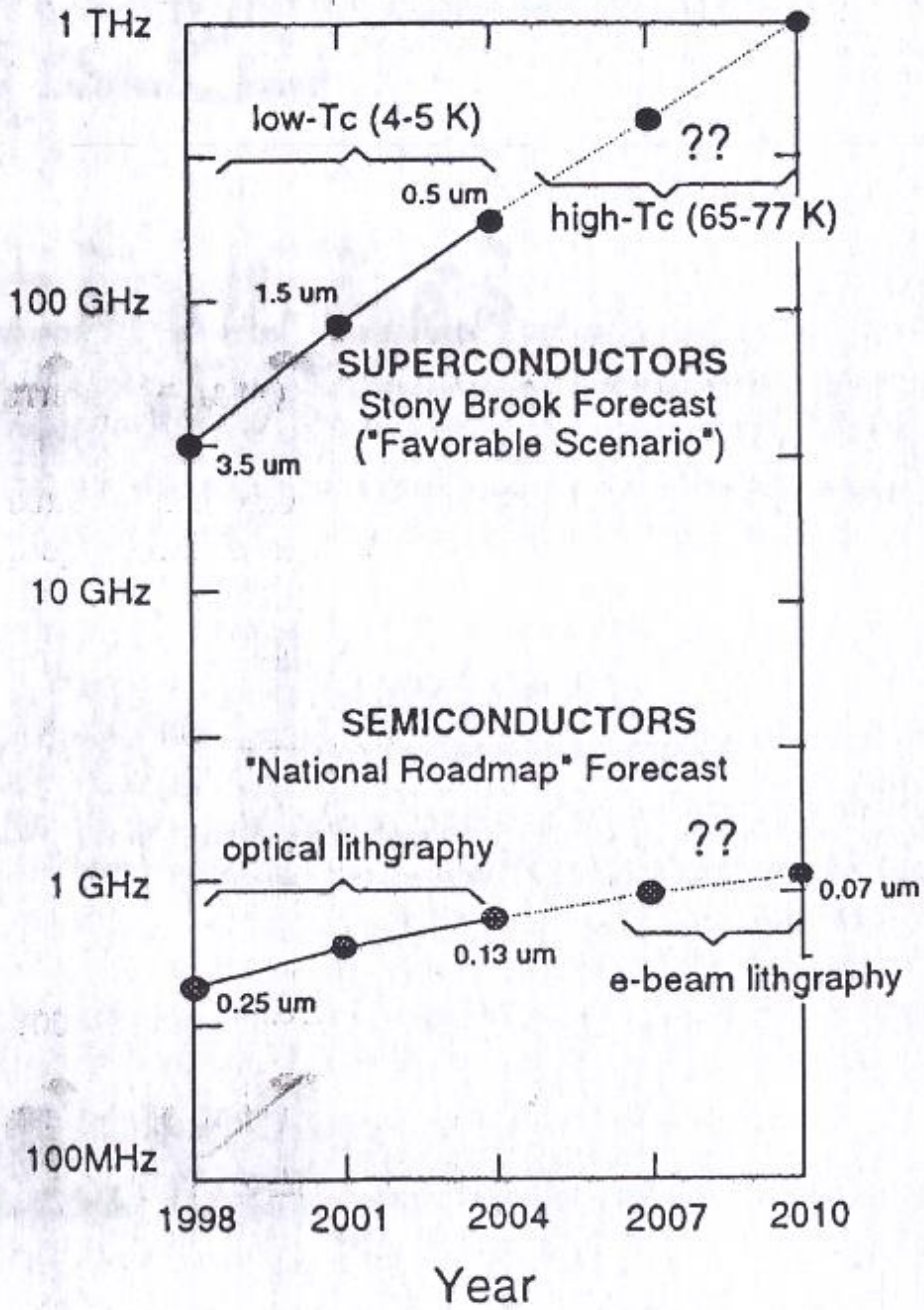
٩٠ حوسبة مقياس بيتافلوبس In computing, petascale refers to a computer system capable of reaching performance in excess of one petaflops, i.e. one quadrillion floating point operations per second. The standard benchmark tool is LINPACK and Top500.org is the organization which tracks the fastest supercomputers. Some uniquely specialized petascale computers do not rank on the Top500 list since they

كمبيوتر فون نيومان-نوع عالمي هو على الأرجح أسوأ حالة لاكتساب سرعة الأداء من التكنولوجيا الرقمية لتسريع التدفق الكمي المفرد (أو أي نظام آخر فائق السرعة) والسبب أن هذا نظام يعتمد على تبادل البيانات المتكررة بين المعالج والذاكرة، بمعدل تغيير زمني محدود لإنتشار إشارة بسرعة الضوء.

■ معالجة الإشارات الرقمية

تبدو تكنولوجيا تسريع التدفق الكمي المفرد مناسبة وفريدة لعدة أنواع من الإشارات الرقمية ومعالجة الصور بما في ذلك تقدير الحركة، تحويلات فورييه وجيب التمام الرقمية، إلخ، لتطبيقات في نظم الإتصالات والتلفزيون الرقمي وكمثال على السرعة الممكنة لمثل هذه المعالجة، ضرب معاملين ٣٢ بايت باستخدام ٥٥ ميكرومتر ، ٤٠ ك وصلة جوزفين في دوائر تسريع التدفق الكمي المفرد سوف تحتاج حوالى ٢ نانو ثانية مقارنة بدائرة مثيلاتها بتكنولوجيا الترانزستور (م أ س) تحتاج ١٥٠ نانو ثانية لشريحة ١ ميكرومتر. وقد تم عرض عدة نماذج لتسريع التدفق الكمي المفرد لمثل هذه الدوائر الهامة. يتوقع فى المستقبل أن أقصى تردد لدوائر المنطق بتكنولوجيا أشباه الموصلات فى الدوائر المتكاملة الكبيرة قابل للزيادة بأقل من ٤ أضعاف، من ٣٠٠ ميجا هرتز عام ١٩٩٨ الى ١ او جيجا هرتز عام ٢٠١٠ الشكل (١- ٢٨) . كما نوقش أعلاه، سرعة دوائر تسريع التدفق الكمي المفرد أعلى بكثير (انظر الجدول ١-٣).

cannot run LINPACK. This makes comparisons to ordinary supercomputers hard. Petascale can also refer to very large storage systems where the capacity exceeds one petabyte (PB).



الشكل (١ - ٢٨) التقدم المتوقع للتردد لأسرع الدوائر المتكاملة الكبيرة بتكنولوجيا أشباه الموصلات والدوائر بتكنولوجيا الموصلية الفائقة. الأرقام بالقرب من النقاط توضح الحد الأدنى للحجم.

الملحق الأول

ظاهرة الموصلية الفائقة "التقليدية"

الموصلية الفائقة في الفيزياء هي ظاهرة تحدث في بعض المواد عند تبريدها إلى درجات حرارة منخفضة جدا تقترب من الصفر المطلق ، حيث تسمح الموصلات الفائقة بمرور الكهرباء خلالها دون أي مقاومة كهربية تقريباً. عادة تنخفض المقاومة الكهربائية للموصلات المعدنية تدريجياً مع انخفاض درجة الحرارة، وفي حالة الموصلات العادية كالنحاس أو الفضة فإن الشوائب الموجودة في المادة تمنع 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 تحقق درجة ممانعة (مقاومة) تساوي الصفر. أما في حالة الموصلات الفائقة فإن الممانعة تنخفض على نحو مفاجئ إلى الصفر عندما يتم تبريد المادة إلى درجة حرارة أقل من الدرجة الحرجة لهذه المادة، غالبا ٢٠ درجة مطلقة أو أقل. ففي حالة التوصيل المطلق يسرى تيار كهربائي في حلقة من مادة فائقة التوصيل ويستمر في السريان إلى وقت غير محدود وبدون وجود مصدر للطاقة بعد إعطاء الدفعة الأولى. وظاهرة التوصيل الفائقة ظاهرة تفسرها ميكانيكا الكم، ولا يمكن فهمها على أساس أنها تجسيد لظاهرة الموصل المثالي ضمن إطار الميكانيكا الكلاسيكية. وتحدث حالة التوصيل الفائقة في تشكيلة واسعة من المواد مثل: المعادن الخفيفة كالتصدير والألمنيوم، والسيراميك والسبائك الثقيلة، وبعض أشباه الموصلات، ولكن لا يمكن صنع موصلات فائقة من المعادن النبيلة كالذهب والفضة، ولا من المعادن ذات مغناطيسية حديدية. تعتبر المغناطيسات فائقة التوصيل من أقوى المغناطيسات الكهربائية المعروفة، وهي تستخدم في أجهزة التصوير بالرنين المغناطيسي الطبية ، وفي القياس بواسطة مطياف الكتلة ، ومغناطيسات توجيه حزم الجسيمات المشحونة معجلات الجسيمات^(٩١) مثل المعجل التي

٩١ معجلات الجسيمات - مسرع الجسيم هو جهاز يستخدم المجالات الكهربائية لتعجيل جسيمات الشحنات الكهربائية إلى سرعات عالية وتحديدها في أشعة موجهة. يوجد نوعان من مسرعات السرعة: المسرعات الخطية أو المستقيمة والمسرعات الدائرية. ويشار إلى المسرعات المستخدمة كمصادمات للجسيمات بمحطامات الذرة.

تديره المنظمة الأوروبية للبحث النووي سيرن^(٩٢). كما يمكن استخدامها أيضا في الفصل المغناطيسي، حيث يتم استخلاص الجزيئات ضعيفة المغنطة من مخلوط جزيئات أقل مغنطة أو عديمة المغنطة كما في صناعة الدهانات. تستخدم الموصلات الفائقة أيضا في صنع الدوائر الرقمية مثلاً بناء عناصر تستخدم تقنية الفيض الكمي المفرد السريع ومرشحات ترددات الراديو لمحطات الهواتف المحمولة والميكروويف. تستخدم الموصلات الفائقة في صنع وصلات جوزيفسون، التي تعتبر لبنات صنع جهاز تداخل الكم المغناطيسي فائق التوصيل، وهو أكثر مقاييس المغناطيسية حساسية على الإطلاق. وتستخدم أجهزة تداخل الكم المغناطيسي فائق التوصيل في المجهر الإلكتروني الماسح. كما يستخدم عدد من وصلات جوزيفسون " المتصلة على التوالي لتعريف وحدة قياس الجهد الكهربائي (الفولت). وحسب طريقة التشغيل يمكن استخدام وصلات جوزيفسون ككاشف للفوتونات أو كخلاط لها. كما أن التغير الكبير في المقاومة الحادث عند الانتقال من الحالة العادية إلى حالة التوصيل الفائق يستخدم في صنع موازين الحرارة [الترمومترات] في كواشف الفوتونات التجميدية. وهناك أسواق أخرى تنشأ تتغلب فيها الكفاءة النسبية وميزة الحجم والوزن التي تتمتع بها الأجهزة القائمة على التوصيل الفائق عالي الحرارة على اعتبارات التكلفة الإضافية. ومن التطبيقات المستقبلية الواعدة أيضا نقل الطاقة الكهربائية في الشبكات الذكية، والمحولات الكهربائية، وأجهزة تخزين الطاقة، والمحركات الكهربائية (في دفع المركبات كما في قطارات الخلخلة أو قطارات الرفع المغناطيسي مثلا) وأجهزة الرفع المغناطيسي، والمواد النانو مجهرية مثل: أنابيب النانو، والمواد المركبة، والتبريد المغناطيسي فائق التوصيل. غير أن التوصيل الفائق حساس للحقول المغناطيسية المتحركة، وهكذا فإن التطبيقات التي تستخدم التيار المتردد (مثل المحولات) ستصبح أشد صعوبة في تطويرها عن تلك التي تعتمد على التيار المستمر. لكن العثور على موصل فائق في درجة حرارة الغرفة يتمتع بكفاءة التكاليف هو

٩٢ المنظمة الأوروبية للبحث النووي سيرن تعتبر أضخم مختبر في العالم في فيزياء الجسيمات كما يستخدم المصطلح سيرن للإشارة إلى المختبر نفسه. يستعمل الاختصار "سرن" للتعبير عن المنظمة نفسها التي تقوم بتشغيل عدة مختبرات عالمية كبيرة أشهرها حاليا مصادم الهادرونات الكبير واختصاره LHCC

حلم راود علماء التوصيل الفائق طوال أجيال. فإذا أمكن التوصل إلى مواد كهذه في المستقبل، ستكون النتيجة ثورة في فهمنا واستخدامنا لكل ما هو كهربى تقريباً. تقسم الموصلات الفائقة حسب درجة حرارتها الحرجة إلى:

١. المواد فائقة التوصيل منخفضة الحرارة واختصاراً (LTC) وتسمى أيضاً المواد فائقة التوصيل التقليدية مثل الزئبق وتمتاز بانخفاض درجة حرارتها الحرجة.

٢. المواد فائقة التوصيل عالية الحرارة واختصاراً (HTC) وتمتاز بارتفاع درجة حرارتها الحرجة.

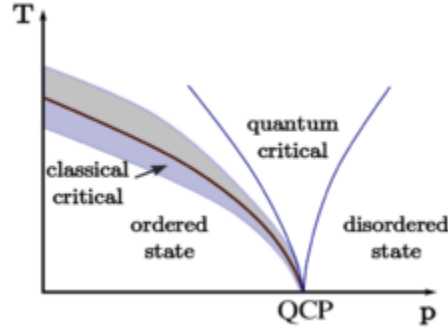
وتقسم المواد الفائقة التوصيل حسب مجالها الحرج إلى:

١. موصل فائق من النوع الأول: من خصائص هذا النوع أنه عندما تتجاوز قيمة المجال المسلط المجال الحرج فإن الموصل يتحول كلياً إلى الحالة الاعتيادية وتصبح قيمة العزم المغناطيسي صفراً وبهذا يتمكن المجال الخارجي من اختراق الموصل بصورة كلية.

٢. موصل فائق من النوع الثاني: يتميز بوجود قيمتان للمجال الحرج، القيمة الأولى وهي أقل قيمة لنرمز لها B^1 ، والقيمة الثانية وهي أعلى قيمة ونرمز لها B^2 . فإذا تجاوزت قيمة المجال المسلط B^1 ولم تتجاوز B^2 سيكون الاختراق جزئياً للموصل ولن يتحول الموصل إلى الحالة الاعتيادية بل سيصل إلى حالة جديدة تسمى الحالة المختلطة، أما إذا تجاوزت قيمة المجال المسلط القيمة B^2 فسيتحول الموصل إلى الحالة الاعتيادية لأن المجال سيخرقه بصورة كلية.

الملحق الثاني

فيزياء المادة المكثفة



فيزياء المادة المكثفة هو فرع من فروع الفيزياء التي تتعامل مع الخواص الفيزيائية لمراحل تكثيف المادة ، حيث تلتصق الجزئيات مع بعضها البعض. يسعى علماء الفيزياء إلى فهم سلوك هذه المراحل باستخدام القوانين الفيزيائية على وجه الخصوص التي تشمل قوانين ميكانيكا الكم ، الكهرومغناطيسية والميكانيكا الإحصائية . تمثل مراحل تكثيف المادة الشائعة المواد الصلبة والسائلة في حين أنها أيضا تشمل مراحل تكثيف أكثر غرابة وتشمل المرحلة فائقة التوصيل التي أظهرتها بعض المواد في درجة الحرارة المنخفضة، تدور مراحل مغناطيسية الفلزات ومراحل الانجذاب المغنطيسي المضاد حول التكوين الذري ، كما أن حالة كثافة بوز-آينشتاين وجدت في نظم لتكوين الذري الباردة . وتتضمن دراسة فيزياء المادة المكثفة قياس خصائص المواد المختلفة عن طريق التحقيقات المعملية جنبا إلى جنب مع استخدام تقنيات الفيزياء النظرية لتطوير النماذج الرياضية التي تساعد في فهم السلوك المادي. تنوع النظم والظواهر المتاحة للدراسة جعل من فيزياء المادة المكثفة المجال الأكثر نشاطا في الفيزياء المعاصرة: حيث يعتبر ثلث الفيزيائيين الأمريكيين أنفسهم كعلماء فيزياء المادة المكثفة، كما وان شعبة فيزياء المواد المكثفة هي أكبر الأقسام في الجمعية الفيزيائية الأمريكية . يتداخل مجال فيزياء المادة المكثفة مع الكيمياء ، علوم المواد ، وتكنولوجيا النانو ويرتبط ارتباطا وثيقا بالفيزياء النووية والفيزياء الحيوية . تساهم فيزياء المادة المكثفة المفاهيم والتقنيات النظرية الهامة مع الجسيمات والفيزياء النووية . تم التعامل مع

مجموعة متنوعة من المواضيع في مثل الفيزياء البلورات ، المعادن ، المرونة ، المغناطيسية على أنها مناطق متميزة وتم إضافة دراسة الخصائص الفيزيائية للسوائل ، والتي شكلت أساسا للتخصص الجديد، ذات الصلة بفيزياء المادة المكثفة ، ومن ثم اعيد صياغة المصطلح من "نظرية الحالة الصلبة" إلى "نظرية المادة المكثفة" الذي شدد على القواسم المشتركة من المشاكل العلمية من قبل علماء الفيزياء العاملين في بحوث المواد الصلبة والسوائل، البلازما، وغيرها من المواد المعقدة، وأهمها "فيزياء الحالة الصلبة"، والتي ترتبط مع التطبيقات الصناعية للمعادن وأشباه الموصلات.

أحد أول الدراسات الحالة المكثفة للمادة في العقود الأولى من القرن التاسع عشر. لوحظ ستة وعشرين عنصر من أربعين عنصر المعروفة في ذلك الوقت، كان لها الخصائص المعدنية مثل اللعان ، والليونة والموصلية الكهربائية والحرارية العالية. مما يشير الى ان الذرات في النظرية الذرية لدالتون كانت لا تتجزأ ، ولكن كان لها هيكل الداخلي. وان عناصر الغازات، مثل النيتروجين و الهيدروجين يمكن تحويلها الى الحالة السائلة في ظل الظروف المناسبة، وبالتالي لها سلوك المعادن. في عام ١٨٢٣ تم بنجاح تسييل جميع العناصر الغازية المعروفة، باستثناء النيتروجين، الهيدروجين والأكسجين. بعد فترة وجيزة، في عام ١٨٦٩ ، تم دراسة المرحلة الانتقالية من الحالة السائلة إلى الحالة الغازية واستحدث مصطلح النقطة الحرجة لوصف الحالة حيث كان لا يمكن تمييز الغاز والسائل كمراحل، مما سمح للتنبؤ بالسلوك الحرج على أساس القياسات في درجات حرارة أعلى من ذلك بكثير. وفي العام ١٩٠٨، تم بنجاح تسييل الهيدروجين ثم حديثا الهيليوم ، على التوالي. في عام ١٩٠٠ تم اقتراح أول نموذج نظري لحركة الإلكترون الكلاسيكي خلال المعادن الصلبة. تم وضع نموذج لخصائص المعادن كغاز من الإلكترونات الحرة، وكان أول نموذج مجهري لشرح الملاحظات التجريبية مثل قانون فيدمان-فرانز . ومع ذلك، على الرغم من نجاح نموذج الإلكترون الحر، كان هناك مشكلة لشرح المساهمة الإلكترونية بالنسبة إلى الحرارة النوعية والخصائص المغناطيسية للمعادن، وكذلك اعتماد المقاومة النوعية في

درجات الحرارة المنخفضة. في عام ١٩١١، بعد تسهيل غاز الهليوم بثلاث سنوات اكتشفت الموصلية الفائقة في الزئبق ، عندما لوحظ أن المقاومة الكهربائية للزئبق تتلاشى في درجات حرارة أقل من قيمة معينة ، وظلت غير مبررة لعدة عقود.

ظهور ميكانيكا الكم

باستخدام فكرة وجوب أن تطيع الإلكترونات الحرة في المعادن إحصاء فيرمي-ديراك ، وضعت نظرية بارا مغناطيسية في عام ١٩٢٦. وبعد فترة وجيزة، دمج إحصاء فيرمي-ديراك في نموذج الإلكترون الحر وجعلها أكثر قدرة على شرح السعة الحرارية. واستخدمت ميكانيكا الكم لوصف حركة الإلكترون في سلسلة التكوين البلوري. ووضعت نماذج لرياضيات هياكل الكريستال لتصنيف البلورات التي لها مجموعة التماثل ، استخدم لأول مرة حسابات تكوين هيكل الطاقة في عام ١٩٣٠ للتنبؤ بخصائص المواد الجديدة، وعام ١٩٤٧ ظهرت أول أشباه الموصلات المستندة الترانزستور والتي بشرت بثورة في مجال الالكترونيات.



نسخة طبق الأصل من الترانزستور نقطة الاتصال الأولى في مختبرات بيل

في عام ١٨٧٩، لوحظ نشوء الجهد عبر مرور تيار كهربائي في موصل عمودي على مجال مغناطيسي. وعرفت هذه الظاهرة الناشئة باسم تأثير هول ، لكنها لم تفسر بشكل صحيح في ذلك الوقت، منذ أن تم اكتشاف الإلكترون تجريبيا بعد ١٨ عاما. بعد ظهور ميكانيكا الكم، في عام ١٩٣٠ وضعت نظرية تكميم لانداو التي وضعت الأساس للمشرح

النظري الكمي. وقد عرفت المغناطيسية كخاصية للمادة في الصين منذ ٤٠٠٠ قبل الميلاد. ومع ذلك، فإن الدراسات الحديثة الأولى للمغناطيسية لم تبدأ إلا مع تطور الديناميكا الكهربائية في القرن التاسع عشر، والتي تضمنت تصنيف المواد الفلزات المغناطيسية، بارا مغناطيسية ودايا مغناطيسية بناء على استجابة المواد للمغطة. تم دراسة اعتماد المغطة على درجة الحرارة واكتشفت نقطة المرحلة الانتقالية في المواد المغناطيسية. في عام ١٩٠٦ عرض مفهوم المجالات المغناطيسية لشرح الخصائص الرئيسية للفلزات المغناطيسية. المحاولة الأولى في وصف المجهرية المغناطيسية من خلال نموذج إيسينج التي وصفت المواد المغناطيسية أنها تتكون من شعريات بلورية. تم حل نموذج إيسينج لإظهار أن المغطة العفوية لا يمكن أن تحدث في بعد واحد ولكن من الممكن في تكوين عالي الأبعاد. مزيد من البحوث مثل دوران الموجات والمغناطيسية الفلزية المضادة أدت إلى تطوير المواد المغناطيسية الجديدة مع تطبيقات لأجهزة تخزين المغناطيسية.

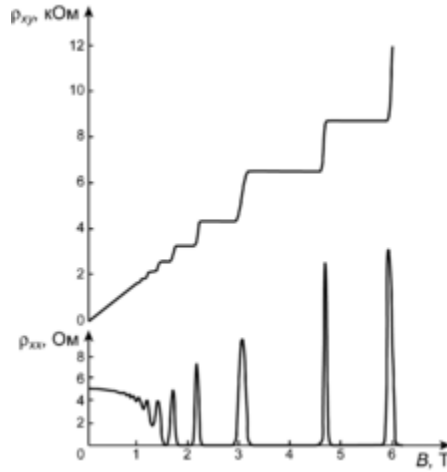
الفيزياء الحديثة للعديد من الأجسام



مغناطيس الرفع أعلى موصل فائق عالي الحرارة. يعمل بعض الفيزيائيين لفهم الموصلية الفائقة في الحرارة العالية

أظهر نموذج سمرفلد ونماذج الدوران لمغناطيسية الفلزات التطبيق الناجح لميكانيكا الكم لمشاكل المادة المكثفة في ١٩٣٠. ومع ذلك، هناك العديد من المشاكل التي لم تحل في هذه الفترة، وأبرزها وصف الموصلية الفائقة وتأثير كوندو. تم تطبيق العديد من الأفكار لنظرية المجال الكمي لمشاكل المواد المكثفة. والأشكال الجماعية من الإثارة في المواد

الصلبة والتنويه العام لأشباه الجزيئات. كما استخدمت فكرة نظرية فيرمي للسوائل في دراسة خصائص تفاعلات الطاقة المنخفضة في أنظمة فرميون لأشباه الجسيمات. كما وضعت نظرية المجال المتوسط لمرحلة التحولات المستمرة، التي وصفت المراحل على انها انهيارات عفوية التماثل. عرضت النظرية أيضا فكرة وجود المعاملات الحاكمة من اجل التمييز بين المراحل المطلوبة. في نهاية المطاف في عام ١٩٦٥، وضعت ما يسمى نظرية باردين - كوبر للموصلية الفائقة، استنادا إلى اكتشاف انجذاب صغير بشكل تعسفي بين اثنين من الالكترونات تدور في اتجاه معاكس بوساطة الفونونات في التكوين البلوري يمكن أن تؤدي إلى ارتفاع لحدود الحالة التي تعرف باسم زوج كوبر.



عناصر المقاومة هال كدالة للمجال المغناطيسي الخارجي

تشمل فيزياء المادة المكثفة استخدام النماذج النظرية لفهم خصائص المواد. وتشمل هذه النماذج دراسة الخصائص الإلكترونية للمواد الصلبة، مثل نموذج درود، وهيكل نطاقات الطاقة و النظرية الوظيفية للكثافة. كما تم تطوير نماذج نظرية لدراسة فيزياء مرحلة التحولات، مثل نظرية جينسبورج - لاندوا، الأسس الحرجة واستخدام التقنيات الرياضية لنظرية المجال الكمي ومجموعة إعادة التطبيع. وتشمل الدراسات النظرية الحديثة استخدام الحساب العددي للتكوينات الإلكترونية وأدوات رياضية لفهم الظواهر مثل الموصلية الفائقة لدرجات الحرارة العالية، المراحل الطبوغرافية وقياس التماثلات. يرتبط الفهم

النظري لفيزياء المادة المكثفة ارتباطا وثيقا بمفهوم الظهور^(٩٣)، حيث تتصرف التجمعات المعقدة من الجسيمات بطرق مختلفة بشكل كبير من تكويناتها الفردية. على سبيل المثال، مجموعة من الظواهر المتعلقة بالموصلية الفائقة عالية درجة الحرارة ليست مفهومة جيدا، على الرغم من أن الفيزياء المجهرية للإلكترونات الفردية والتركيب البلوري معروف. وبالمثل، وقد تم دراسة نماذج من نظم المادة المكثفة حيث تتصرف الإشارات الجماعية مثل الفوتونات والإلكترونات، وبالتالي تصف الكهرومغناطيسية كظاهرة طارئة. يمكن أيضا أن تحدث الخصائص الناشئة في مجال التفاعل بين المواد: مثال واحد هو واجهة اللانثانوم-ألومينات-السترونتيوم تيتانات، حيث يتم ربط اثنين من العوازل غير المغناطيسية لخلق الموصلية، الموصلية الفائقة، ومغناطيسية الفلزات. كانت المعادن تاريخيا لبنة هامة لدراسة خصائص المواد الصلبة. أول وصف نظري للمعادن في عام ١٩٠٠ مع نموذج درود، الذي أوضح الخواص الكهربائية والحرارية بوصف المعادن باعتبارها غاز مثالي من ثم حديثا اكتشف-الإلكترونات. وكان قادرا على تحليل قانون فيدمان-فرانز والحصول على النتائج التي اكدتها التجارب. تم تحسين النموذج الكلاسيكي بواسطة أرنولد سومرفيلد الذي أدرج إحصاء فيرمي-ديراك للإلكترونات وكان قادرا على تفسير السلوك الشاذ للحرارة النوعية للمعادن في قانون فيدمان-فرانز. في عام ١٩١٢، تم دراسة بنية المواد الصلبة البلورية عندما لوحظ حيود نمط الأشعة السينية في البلورات، وخلص إلى أن البلورات تحصل على هيكلها من التكوين الدوري للذرات. في عام ١٩٢٨، أمكن حل دالة الموجة لمعادلة شرودنجر مع الجهد الدوري والتي عرفت بمصطلح موجة بلوخ. تم حساب الخصائص الإلكترونية للمعادن من خلال حل دالة موجة الجسم المتعدد الذي غالبا ما تكون من الصعب حسابيا، وبالتالي، تطلبت تقنيات تقريبية ضرورية للحصول على تنبؤات ذات مغزى. استخدمت نظرية توماس فيرمي، لتقدير طاقة النظام والكثافة الإلكترونية عن طريق

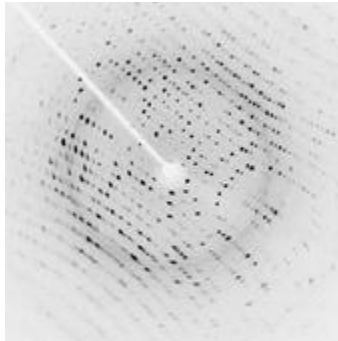
٩٣ الظهور - emergence is a phenomenon whereby larger entities arise through interactions among smaller or simpler entities such that the larger entities exhibit properties the smaller/simpler entities do not exhibit.

معالجة كثافة الإلكترونات باعتبارها معامل التغيير . في وقت لاحق وضع ما يسمى دالة الموجة هارتري-فوك باعتبارها تطوير بالمقارنة مع نموذج توماس فيرمي وشكلت طريقة لتبادل إحصائي لدالة موجة جسيم الإلكترون الواحد. بشكل عام، فإنه من الصعب جدا حل المعادلة هارتري-فوك. وأخيرا في ١٩٦٤-١٩٦٥ تم توصيف واقعي لخصائص المعادن. استخدمت نظرية دالة الكثافة على نطاق واسع منذ ١٩٧٠ لحسابات هيكل الطاقة لمجموعة متنوعة من المواد الصلبة. تتعرض بعض الحالات الخاصة لكسر التماثل، حيث تمتلك القوانين الفيزياء ذات الصلة بعض التماثل التي تتعرض للتغيير. ومن الأمثلة الشائعة هي بلورات المواد الصلبة، التي تتعرض للكسر المستمر لنقل التماثل . ومن الأمثلة الأخرى مغنطة الفلزات، التي تكسر التناظر الدوراني ، والحالات الأكثر غرابة مثل حالة الموصلية الفائقة التي تكسر مرحلة التماثل الدوراني. تنص نظرية غولدستون في نظرية المجال الكمي على أنه في نظام كسر التماثل المستمر ، تتواجد بعض الآثار مع انخفاض الطاقة بشكل تعسفي، والمعروفة بمصطلح بوزونات غولدستون . على سبيل المثال، في المواد الصلبة البلورية، تتوافق مع الفونونات ، والتي تمثل تحولات الكم من الاهتزازات الشعرية.

المرحلة الانتقالية

تشير المرحلة الانتقالية لتغيير المرحلة في النظام الناجمة عن التغيير في المعاملات الخارجية مثل الحرارة . تحدث المرحلة الانتقالية الكلاسيكية في درجة حرارة متناهية عندما يدمر ترتيب النظام. على سبيل المثال، عندما يذوب الجليد ويصبح الماء، ودمرت البنية البلورية للجليد في الانتقال من مرحلة الكم ، وضبط درجة الحرارة إلى الصفر المطلق، والتحكم في المعاملات غير الحرارية، مثل الضغط أو المجال المغناطيسي، يتسبب في مرحلة التحولات عندما يتم تدمير النظام من قبل التقلبات الكمومية التي تنشأ من مبدأ الارتباب لهايزنبرج . هنا، في مراحل مختلفة من الكم في النظام تشير إلى الحالات الأولى من هاملتون . فهم سلوك مرحلة انتقالية الكم مهم في المسائل الصعبة لشرح خصائص العوازل الأرضية المغناطيسية النادرة، الموصلات الفائقة ذات درجات الحرارة العالية

والمواد الأخرى. هناك نوعان من تحولات المرحلة: التحولات من الدرجة الأولى والتحويلات المستمرة. للتحويلات المستمرة، فإن المرحلتين المعنيين لا يتعاشيان في درجة حرارة التحول، كما تسمى النقطة الحرجة. بالقرب من النقطة الحرجة، تخضع أنظمة السلوك الحرج، حيث العديد من خصائصها مثل طول العلاقة، الحرارة النوعية والحساسية تختلف بشكل كبير. هذه الظواهر الحرجة تطرح تحديات خطيرة للفيزيائيين لأن القوانين المجهرية العادية لم تعد صالحة في المنطقة والأفكار جديدة وأساليب قد تكون اخترعت للعثور على القوانين الجديدة التي يمكن أن تصف النظام. أبسط نظرية التي يمكن أن تصف مرحلة التحولات المستمرة هي نظرية غينسبورغ - لاندائو، التي تعمل في ما يسمى تقريب الحقل. ومع ذلك، يمكن أن تفسر فقط ما يقرب من المرحلة الانتقالية المستمرة للفلزات الكهربائية والنوع الأول من الموصلات الفائقة التي تنطوي على التفاعلات المجهرية طويلة المدى. أنواع أخرى من الأنظمة التي تنطوي على تفاعلات قصيرة المدى بالقرب من النقطة الحرجة، هناك حاجة إلى نظرية أفضل. بالقرب من نقطة حرجة، حيث تحدث التقلبات على نطاق واسع في جداول حجم النظام في حين أن سلوك النظام كله ثابت النطاق. تتوسط تقنيات مجموعة إعادة التطبيع تقلبات أقصر طول موجي في المراحل مع الحفاظ على آثارها في المرحلة المقبلة. وهكذا، ينظر إلى التغيرات في نظام فيزيائي على أنها على مستويات مختلفة الحجم يمكن تحقيقها بشكل منهجي. التقنيات، جنبا إلى جنب مع جهاز محاكاة حاسوبي قوي، تسهم إلى حد كبير في تفسير الظواهر المرتبطة بالمرحلة الانتقالية المستمرة.

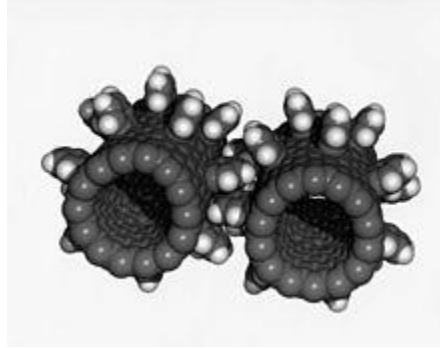


صورة الأشعة السينية لحيود نمط من بلورة بروتين

تشمل تجارب فيزياء المادة المكثفة استخدام التحقيقات التجريبية في محاولة لاكتشاف خصائص جديدة للمواد. وتشمل التحقيقات التجريبية تأثير المجالات المغناطيسية والكهربائية وقياس وظائف الاستجابة ، خصائص النقل وقياس الحرارة . والتحليل الطيفي ، الأشعة السينية ، الأشعة تحت الحمراء وتشنت النيوترونات الغير مرن. دراسة الاستجابة الحرارية، مثل الحرارة النوعية وقياس النقل عبر الحرارة والتوصيل الحرارى .

الحقول المغناطيسية الخارجية

في فيزياء المادة المكثفة، المجالات المغناطيسية الخارجية بمثابة المتغيرات الحرارية التي تتحكم في الحالة، وتحولات المرحلة وخصائص النظم المادية. الرنين المغناطيسي النووي هي تقنية التي يمكن استخدام المجالات المغناطيسية الخارجية لإيجاد وسائط الصدى من الإلكترونات الفردية، وبالتالي إعطاء معلومات حول، التركيب الذري الجزيئي وتشكيل الروابط بين الذرات. تجارب الرنين المغناطيسي النووي يمكن أن يتم في الحقول المغناطيسية بقوة تصل إلى ٦٠ تسلا . الحقول المغناطيسية العالية يمكن أن تحسن نوعية البيانات قياسات الرنين المغناطيسي. تذبذبات الكم هي تقنية تجريبية أخرى حيث تستخدم المجالات المغناطيسية العالية لدراسة خصائص المواد مثل هندسة سطح فيرمي . الحقول المغناطيسية العالية مفيدة في اختبار تجريبي لمختلف التنبؤات النظرية مثل التأثير الكهرومغناطيسي الكمي ، وأحادي القطب المغناطيسي ، ونصف عدد الكم الصحيح لتأثير هول .



المحاكاة الحاسوبية لترس نانو مصنوع من جزيئات الفوليرين. من المأمول أن تؤدي أوجه التقدم في علم النانو لتصنيع آلات تعمل بالمقياس الجزيئي.

أدت الأبحاث في فيزياء المادة المكثفة إلى العديد من التطبيقات ، مثل تطوير أشباه الموصلات والترانزستور ، وتكنولوجيا الليزر. والعديد من الظواهر المدروسة في سياق تكنولوجيا النانو تأتي في إطار اختصاص فيزياء المادة المكثفة. تقنيات مثل المجهر النفقي يمكن استخدامه للسيطرة على العمليات في نطاق النانومتر ، وأدت إلى دراسة تقنيات النانو. في الحوسبة الكمومية ، يتم تمثيل المعلومات من قبل بت الكم، أو البت المكس . تتلصق المعلومات المكسدة بسرعة قبل اكتمال العمليات الحسابية. يجب أن تحل هذه المشكلة الخطيرة قبل ان تحقق حساب الكم. وصلات جوزيفسون فائقة التوصيل مكسدة المعلومات، والنوع الإلكتروني الدوراني المكس باستخدام التوجه الدوران للمواد المغناطيسية، فيزياء المادة المكثفة أيضا لها تطبيقات هامة في الفيزياء الحيوية ، على سبيل المثال، تقنية تجريبية من التصوير بالرنين المغناطيسي ، والذي يستخدم على نطاق واسع في التشخيص الطبي.

References

1. "Condensed Matter Physics Jobs: Careers in Condensed Matter Physics". Physics Today Jobs. Archived from the original on 2009-03-27. Retrieved 2010-11-01.
2. "History of Condensed Matter Physics". American Physical Society. Retrieved 27 March 2012.
3. Cohen, Marvin L. (2008). "Essay: Fifty Years of Condensed Matter Physics". Physical Review Letters.
4. "Physics of Condensed Matter". Retrieved 20 April 2015.
5. Martin, Joseph D. (2015). "What's in a Name Change? Solid State Physics, Condensed Matter Physics, and Materials Science". Physics in Perspective. 17 (1): 3– Retrieved 20 April 2015.
6. van Delft, Dirk; Kes, Peter (September 2010). "The discovery of superconductivity"(PDF). Physics Today. 63 (9): 38–43. Retrieved 7 April 2012.
7. Slichter, Charles. "Introduction to the History of Superconductivity". Moments of Discovery. American Institute of Physics. Retrieved 13 June 2012.
8. Schmalian, Joerg (2010). "Failed theories of superconductivity". Modern Physics Letters B. 24 (27): 2679–2691.

الملحق الثالث

المواد الصلبة باعتبارها الكم لنظم متعددة الجسم - نظرية المجهرية الموصلية الفائقة الفيزياء كعلم جامع يميل إلى تتبع كل الظواهر التجريبية لعدد قليل من المبادئ الأساسية. النظرية المجهرية للموصلية الفائقة هي مثال ممتاز للتقدم المطرد خلال السبعون عام الأخيرة نحو هذا الهدف الذي لا يزال يتطور. وهذه محاولة في وصف موجزا لما تم إنجازه حتى الآن في هذا الاتجاه لفهم ظاهرة الإلكترونات- الفونون في الموصلية الفائقة. ونؤخذ نقطة بداية نظرية هاملتون غير النسبية مع تفاعلات كولوم للإلكترونات والنواة على الرغم من المعنى الدقيق للكلمة، والذي يعتبر بالفعل نموذجا. ومع ذلك، يؤدي علم الكينماتيكا النسبية إلى تصحيحات جماعية منها، علاقة داروين، واقتران الدوران في المدار ودوران التفاعل ثنائي القطب (بما في ذلك التفاعل فائق الدقة مع الزيادة والنقصان النووي) والذي يمكن اضافته في وقت لاحق كشرط للتصحيح، واستبدال تفاعل كولوم بتبادل الفوتونات النسبية أو النظر في الدرجات النووية الداخلية للحركة الحرة الذي من شأنه عمليا ألا يتسبب في تغيير أي من النتائج المأخوذة في الاعتبار. كانت أول معاملة مرضية تماما للنظرية بدءا من هاملتون:

١ - في عام ١٩٨٦، في نفس السنة من اكتشاف الموصلية الفائقة مرتفعة درجة الحرارة، التي وضعت أخيرا كأساس وهي جديدة تماما وحتى الآن لم تجد حل لمثل هذا النوع من المشاكل من الناحية النظرية.

٢ - قادت النظرية المجهرية في وقت مبكر الرجوع لاستخدام ظاهرة هاملتون للإلكترونات والفونونات، ويعتبر نموذج هاملتون الذي لا يمكن أن يستمد من نظرية تعدد الجسم والتي يجب أن يكون استخدامها بحذر عن طريق اتباع بعض نماذج الوصفات وفي وقت لاحق، كان نظام الإلكترون - أيون يعالج المشكلة بشكل صحيح نظريا،

٣ - لا يزال انفصال نطاق الطاقة المنخفض لم يستكمل بعد تماما.

الملحق الرابع

نظرية باردين-كوبر - شريفير

هي أول نظرية مجهرية للموصلية الفائقة منذ اكتشافها في عام ١٩١١. وتصف النظرية التوصيل كأثر مجهري الناجم عن التكثيف من أزواج كوبر^(٩٤) في بوسون تشبه الحالة. يتم استخدام نظرية أيضا في الفيزياء النووية لوصف اقتران التفاعل بين نويات في نواة الذرة .

نظرة عامة

في درجات الحرارة المنخفضة ، تصبح الإلكترونات القريبة من سطح فيرمي غير مستقرة عكس تشكيل أزواج كوبر . أظهرت كوبر حدوث هذه الظاهرة في وجود إمكانات تجاذب مهما كان ضعيفا في الموصلات الفائقة التقليدية، ويعزى عموما عامل الجذب إلى تفاعل الإلكترونات الشعرية. تتطلب نظرية باردين-كوبر - شريفير، فقط احتمال أن يكون الجهد جاذب، بغض النظر عن مصدره. في إطار نظرية باردين-كوبر - شريفير ، فإن الموصلية

٩٤ أزواج كوبر - هو زوج من الإلكترونات مرتبطة معا في درجات الحرارة المنخفضة بطريقة معينة صنفت لأول مرة في عام ١٩٥٦ من قبل الفيزيائي الأمريكي ليون كوبر . أظهرت كوبر أن عامل جذب صغيرة بشكل تعسفي بين الإلكترونات في معدن يمكن أن يسبب حالة الاقتران من الإلكترونات لديها طاقة أقل من طاقة فيرمي ، مما يعني أن لا بد للزوج في التقليدية فائقة التوصيل ، ويرجع ذلك إلى جذب هذا الإلكترون - الطاقة الصوتية للتفاعل. حالة زوج كوبر مسؤولة عن الموصلية الفائقة، كما هو موضح في نظرية BCS . على الرغم من أن اقتران كوبر هو تأثير الكم، والسبب في الاقتران يمكن أن ينظر إليه من التفسير الكلاسيكي البسيط. يتصرف الإلكترون في معدن عادة على أنها جسيم حر. يتنافر الإلكترون مع الإلكترونات الأخرى، لكنه يجذب أيضا الأيونات الموجبة التي تشكل شعرية جامدة من المعدن. هذا الجذب يشوه شعرية الأيون، والانتقال من الأيونات قليلا نحو الإلكترون، وزيادة كثافة الشحنة الإيجابية للشعرية في المنطقة المجاورة. هذه الحالة الإيجابية الذي يمكن أن تجذب الإلكترونات الأخرى. على مسافات طويلة، وهذا التجاذب بين الإلكترونات بسبب الأيونات النازحة يمكنها التغلب على تنافر الإلكترونات بسبب الشحنة السالبة، يظهر تفسير ميكانيكا الكم الدقيق أن التأثير يرجع إلى الإلكترون - الطاقة الصوتية التفاعلات، مع فونون يجري في الحركة الجماعية للشعرية موجبة الشحنة. الطاقة من تفاعل الاقتران ضعيفة جدا، حوالي ١٠^{-٣} فولت ، ويمكن للطاقة الحرارية كسر الأزواج بسهولة. وذلك فقط عند درجات حرارة منخفضة، في المعادن وركائز أخرى، عددا كبيرا من الإلكترونات في أزواج كوبر .

الفائقة هي تأثير مجهري ينتج من التكثيف من أزواج كوبر ولها بعض الخصائص الصوتية ، والبوزونات، في درجات الحرارة المنخفضة ، يمكن أن تشكل ظاهرة تكثيف بوز-آينشتاين وأوضح ظهور الموصلية الفائقة في وقت واحد عن طريق التحولات . في العديد من الموصلات الفائقة، تفاعل التجاذب بين الإلكترونات (اللازم للاقتزان) يتحقق بصفة غير مباشرة بالتفاعل بين الإلكترونات وتذبذب شعريية البلورات (الفونونات). تحدث تقريبا كما يلي:

يجذب الإلكترون المار في موصل الشحنات الموجبة القريبة في البلورة. هذا التشويه في البلورة يسبب ظهور إلكترون آخر، مع زيادة ونقصان الآخر، للانتقال إلى المنطقة ذات كثافة الشحنة موجبة الأعلى. ثم تتربط الإلكترونان لأن هناك الكثير من مثل أزواج الإلكترونات في موصل الفائق للكهرباء، تتداخل أزواج الإلكترونات بقوة وتشكل تكثيف جماعي. في حالة "التكثيف"، فإن كسر زوج واحد سيغير الطاقة في كل المكثفات (٩٥) - وليس مجرد إلكترون واحد، أو زوج واحد. وهكذا، ترتبط الطاقة اللازمة لكسر أي زوج واحد إلى الطاقة اللازمة لكسر كل أزواج الإلكترونات (أو أكثر من الكترونين فقط). لأن الاقتزان يزيد حاجز الطاقة، والتصادم الناتج من تأرجح الذرات في الموصل (وهي صغيرة عند درجات الحرارة المنخفضة بما فيه الكفاية) ليست كافية للتأثير على المكثفات ككل، أو أي زوج أعضاء " فردية داخل المكثفات. وهكذا تظل الإلكترونات مقترنة معا، وتقاوم كل التصادمات، وسوف تتدفق الإلكترونات ككل خلال الموصل الفائق للكهرباء) بدون أي مقاومة. وهكذا، فإن السلوك الجماعي من المكثفات هو عنصر حاسم ضروري للموصلية الفائقة.

تبدأ نظرية باردين-كوبر - شريفير من افتراض أن هناك بعض التجاذب بين الإلكترونات، والتي يمكنها التغلب على تنافر كولوم . في معظم المواد (في الموصلات الفائقة ذات درجات الحرارة المنخفضة)، ينشأ هذا التجاذب بشكل غير مباشر باقتزان الإلكترونات إلى شعريية البلورة . ومع ذلك، فإن نتائج نظرية باردين-كوبر - شريفير لا تعتمد على أصل

التفاعل. على سبيل المثال، لوحظ أزواج كوبر في الغازات شديدة البرودة من الفرميونات حيث المجال المغناطيسي المتجانس تم ضبطه لصدى فيشباخ^(٩٦). تصف النتائج الأصلية لنظرية باردن-كوبر - شريفير الحالة فائقة التوصيل للنطاق إس^(٩٧)، والتي تعتبر القاعدة بين الموصلات الفائقة ذات درجات الحرارة المنخفضة ولكن لا تتحقق في العديد من الموصلات الفائقة الغير تقليدية مثل موجة النطاق **د** للموصلات الفائقة ذات درجات الحرارة العالية. وجود امتدادات لنظرية باردن-كوبر - شريفير لوصف الحالات الأخرى، على الرغم من أنها ليست كافية لوصف كامل لكل الميزات التي لوحظت في الموصلية الفائقة ذات درجات الحرارة العالية. نظرية باردن-كوبر -

٩٦ صدى فيشباخ

In the field of physics, a Feshbach resonance, named after Herman Feshbach, is a feature of many-body systems in which a bound state is achieved if the coupling(s) between at least one internal degree of freedom and the reaction coordinates, which lead to dissociation, vanish. The opposite situation, when a bound state is not formed, is a shape resonance. Feshbach resonances have become important in the study of the cold atoms systems, both the Fermi gases as well as the Bose-Einstein condensates (BECs). In the context of scattering processes in many-body systems, the Feshbach resonance occurs when the energy of a bound state of an interatomic potential is equal to the kinetic energy of a colliding pair of atoms, which have hyperfine structure coupled via Coulomb or exchange interactions. In experimental settings, the Feshbach resonances provide a way to vary interaction strength between atoms in the cloud by changing scattering length, a_{sc} , of elastic collisions

٩٧ الحالة فائقة التوصيل للنطاق إس

In quantum mechanics, an atomic orbital is a mathematical function that describes the wave-like behavior of either one electron or a pair of electrons in an atom.^[1] This function can be used to calculate the probability of finding any electron of an atom in any specific region around the atom's nucleus. The term, atomic orbital, may also refer to the physical region or space where the electron can be calculated to be present, as defined by the mathematical form of the orbital

شريفير قادرة على إعطاء تقريبي لحالة العديد من الجسم في ميكانيكا الكم للنظام لتفاعل الإلكترونات داخل المعدن. وهذه الحالة التي تعرف الآن باسم بارددين-كوبر - شريفير. في الحالة الطبيعية للمعدن، تتحرك الإلكترونات بشكل مستقل، في حين أنه في حالة بارددين-كوبر - شريفير فهي مرتبطة، في أزواج كوبر نتيجة للتفاعل. ويستند تشكيل بارددين-كوبر - شريفير على خفض الجهد لجذب الإلكترونات. ضمن هذا الجهد، يقترح التغيير المقترح لدالة الموجة. وقد تبين في وقت لاحق ان هذا التغيير على وجه الدقة للحد من كثافة أزواج. لاحظ أن التعارض المستمر بين الأنظمة المخففة والمكثفة من تجاذب أزواج من الفرميونات لا تزال مشكلة مفتوحة للدراسة، والتي باتت تستقطب الكثير من الاهتمام في مجال الغازات شديدة البرودة.

الملحق الخامس

نظرية الحقول الكمومية وعلم الكونيات

تشير الأدلة التجريبية مع زيادة الثقة من أي وقت مضى نحو علم الكونيات التطوري. الإطار القياسي المستخدم في مواجهة هذا الظرف هو نظرية " الانفجار الكبير الساخنة ": الانفرد الكلاسيكي الأول، أنتج التوزيع الحراري لكمات مجال المادة النظر في درجة حرارة قريبة من درجة حرارة بلانك ($TP \simeq 10^{19}$ جيجا إلكترون فولت). هذه الحالة أدت إلى توسع حر ثابت الحرارة بشكل تقريبي. يوضح النموذج الخلفية ٢,٧ ° درجة حرارة مطلقة ملاحظة الإشعاع في الكون الآخذ في الاتساع في الوقت الحاضر. ويتنبأ، عندما يقترن بالتفاعل الفيزيائي الضعيف، وفرة الهليوم البدائية في اتفاق ملحوظ مع البيانات التجريبية. وفي الآونة الأخيرة، أدى التضمين من كبرى نظريات القياس الموحدة في علم الكونيات الدوي الكبير لفهم نوعي معقول من الباريون الصغير لنسبة الفوتون في عالمنا.

References

1. Steven Strogatz, *Sync: The Emerging Science of Spontaneous Order*, Hyperion, 2003.
2. Anderson, P. W., and Dayem, A. H., "Radio-frequency effects in superconducting thin film bridges," *Physical Review Letters* 13, 195 (1964), doi:10.1103/PhysRevLett.13.195
3. Practical realization of units for electrical quantities (SI brochure, Appendix 2). BIPM, [updated: 20 February 2007], accessed 22 June 2015.
4. Physics Today, *Superfluid helium interferometers*, Y. Sato and R. Packard, October 2012, page 31
5. Barone, A.; Paterno, G. (1982). *Physics and Applications of the Josephson Effect*. New York: John Wiley & Sons. ISBN 0-471-01469-9.
6. Bunyk, Paul, Mikhail Dorojevets, K. Likharev, and Dmitry Zinoviev. "RSFQ subsystem for HTMT petaFLOPS computing." Stony Brook HTMT Technical Report 3 (1997).
7. K. Likharev, in: *The New Superconductor Electronics*, ed. by H. Weinstock and R.W. Ralston (Kluwer, Dordrecht, 1993), p. 423.
8. D.F. Schneider et al IEEE Trans. on Appl. Supercond. 5 (1995) 3152.
9. HYPRES Niobium Process and Design Rules, available from HYPRES, Inc., 175 Clearbrook Rd., Elmsford, NY 10523, U.S.A., phone 914-592-1190. [10] P. Bunyk et al Appl. Phys. Lett. 66 (1995) 646.
10. Proceedings of the 5K Cryocooler Workshop, July 24-25, 1995, Elmsford, NY, available from HYPRES, Inc., phone 914-592-1190.
11. V. Semenov, Yu. Polyakov, and D.F. Schneider, in: CPEM'96 Conference Digest Supplement (PTB, Braunschweig, 1996), p. 15, and to be published.
12. V.K. Semenov and Yu.A. Polyakov, Fully Integrated Digital RSFQ SQUID, Report at the 1996 Applied Superconductivity Conference (Pittsburgh, PA, August 1996), and to be published.
13. Rylyakov, Single-bit All-digital RSFQ Autocorrelator, Report at the 1996 Applied Superconductivity Conference (Pittsburgh, PA, August 1996), and to be published.
14. S.V. Polonsky and D.F. Schneider, Report at the 1996 Applied Superconductivity Conference (Pittsburgh, PA, August 1996), and to be published.
15. Kidiyarova-Shevchenko and D. Zinoviev, IEEE Trans. on Appl. Supercond. 5 (1995) 2820; J. Kang, A.H. Warshmn, and J. Przybysz, IEEE Trans. on Appl. Supercond. 5 (1995) 2827.