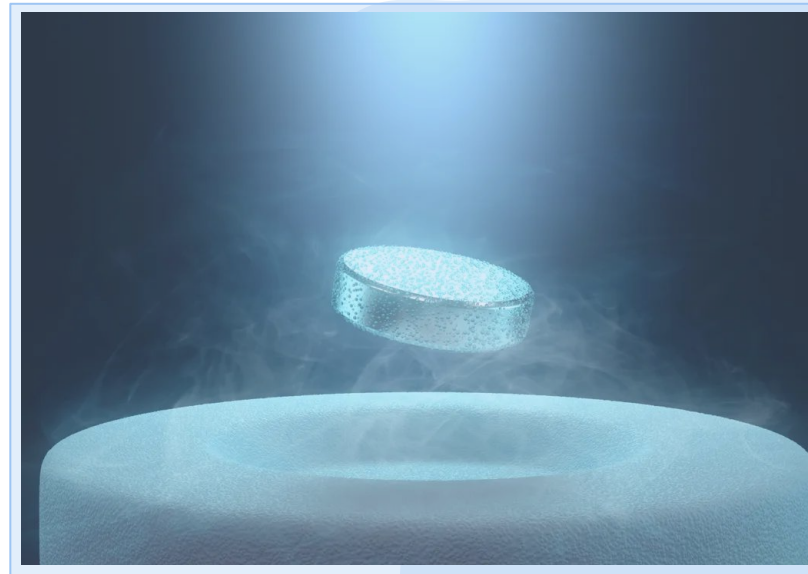


Supercondutividade e Efeito Meissner

PROFESSOR PHILIPPE W. COURTEILLE



M.^a Julia Marcolan

Orientador: Prof. Dr. Alberto Tannús



IFSC UNIVERSIDADE
DE SÃO PAULO
Instituto de Física de São Carlos



**Centro de Imagens e Espectroscopia por
Ressonância Magnética**



HISTÓRIA

CARACTERÍSTICAS DE SUPERCONDUTORES

EFEITO MEISSNER

SUPERCONDUTORES DO TIPO I

SUPERCONDUTORES DO TIPO II

EQUAÇÕES DE LONDON

TEORIA BCS E PARES DE COOPER

APLICAÇÕES: IMAGENS POR RESSONÂNCIA MAGNÉTICA

APLICAÇÕES: MAGNETIC LEVITATION TRANSPORT (Maglev)

APLICAÇÕES: Maglev COBRA

NÃO EXISTEM SUPERCONDUTORES À TEMPERATURA AMBIENTE

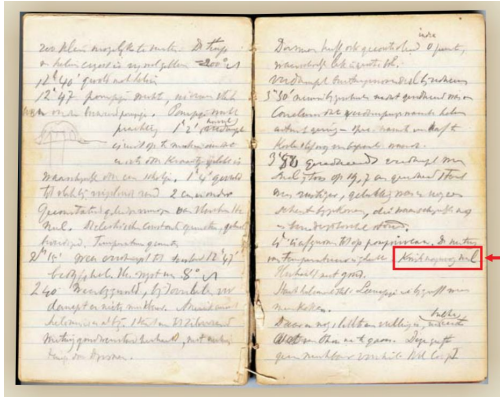
A grande questão no começo da década de 1900: O que acontece com a resistividade de um metal à medida que sua temperatura se aproxima do zero absoluto ??

1908: Kamerlingh Onnes conseguiu liquefazer hélio a 4,2 K.

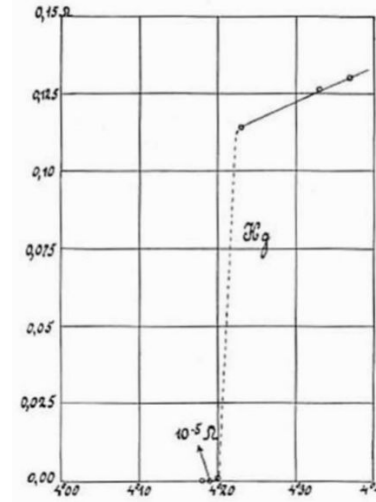
1911: Heike Kamerlingh Onnes refrigerou com sucesso mercúrio a temperaturas críticas abaixo de 4,2 K, estimando a resistência em $10^{-5} \Omega$.



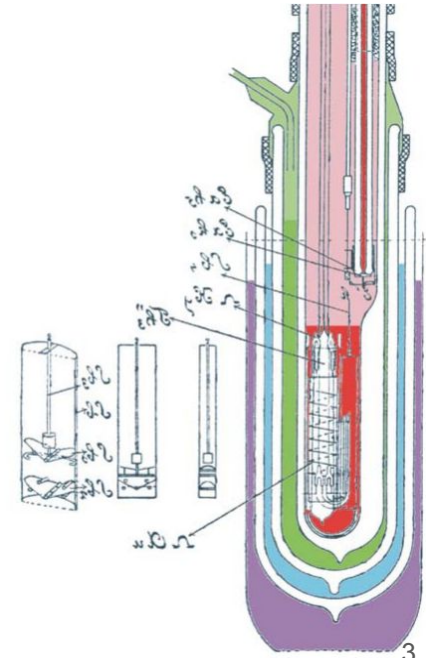
1913: Kamerlingh Onnes ganhou o Nobel da Física.



Anotações originais nos cadernos de Kamerlingh Onnes sobre o resfriamento do mercúrio.



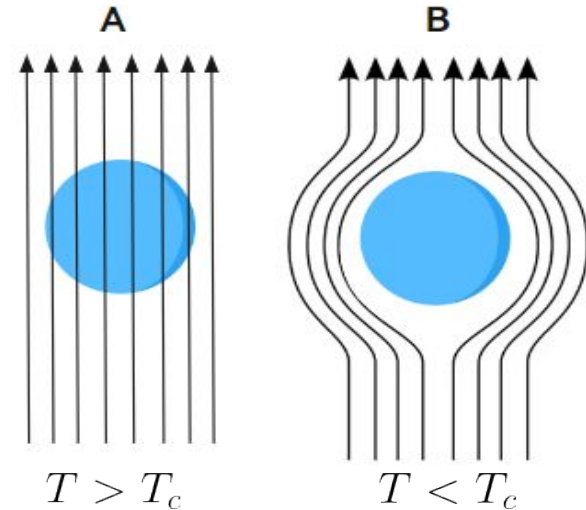
A resistência do mercúrio em baixas temperaturas é 10^{-12} vezes a resistência do mercúrio em temperaturas normais.



O fundo do criostato, onde Kamerlingh Onnes e seus colegas conduziram o experimento que inicialmente revelou a supercondutividade. As diferentes cores representam diferentes fluidos criogênicos dentro do dewar.

- Uma vez estabelecida uma corrente elétrica contínua em um supercondutor, ela permanece sem a necessidade de qualquer fonte de energia, desde que a temperatura permaneça abaixo da temperatura crítica.
- Dado que o supercondutor não apresenta resistência elétrica mensurável, ele opera como um condutor ideal com condutividade infinita ou resistividade zero, e os supercondutores não perdem energia na forma de calor pelo efeito Joule.
- No entanto, essa condição pode mudar com o aumento da temperatura acima de T_c , onde o material deixa o estado supercondutor.
- Existe um campo crítico H_c acima do qual o supercondutor volta do estado de supercondutividade para o estado normal.
- Existem dois tipos de supercondutores, Tipo I e Tipo II.
- Efeito Meissner.

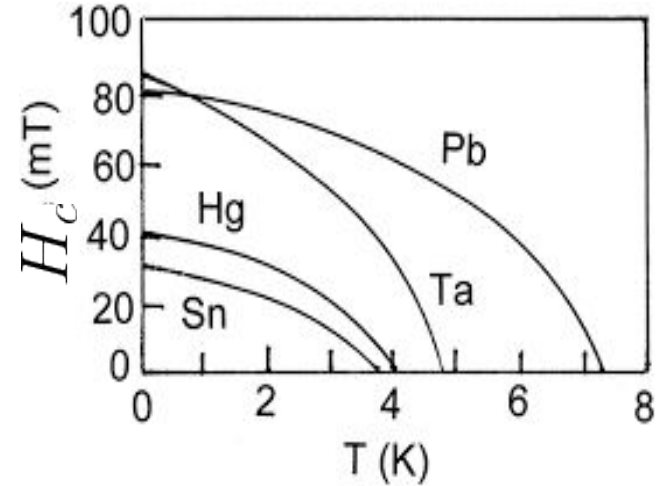
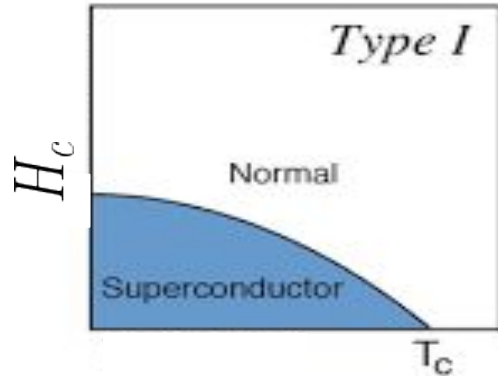
1933: Walther Meissner and Robert Ochsenfeld descobriram o efeito Meissner.



No estado supercondutor o material se comporta como um **diamagneto perfeito**, expulsando o campo magnético de seu interior.

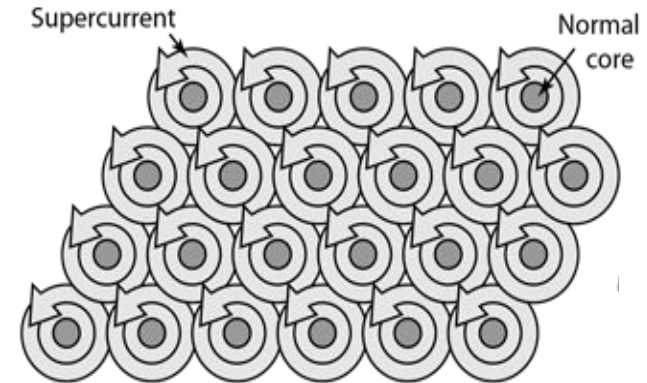
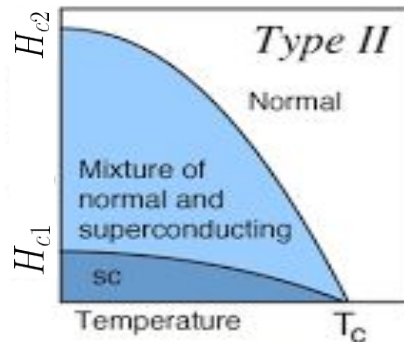
SUPERCONDUTORES DO TIPO I

- Os supercondutores do **Tipo I** são predominantemente compostos por metais e ligas metálicas, com temperaturas críticas atingindo valores extremamente baixos da ordem de **10 K**.
- Supercondutores do **Tipo I** passam por uma transição para o estado normal quando o campo magnético atinge um valor crítico
- Expulsam totalmente o campo magnético de seu interior com o efeito Meissner.



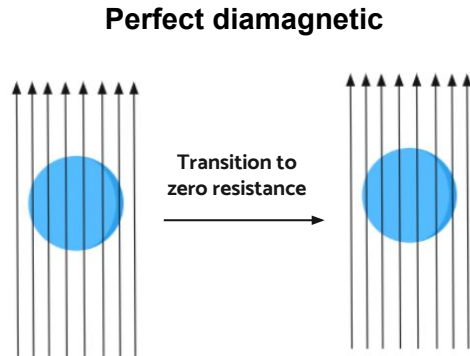
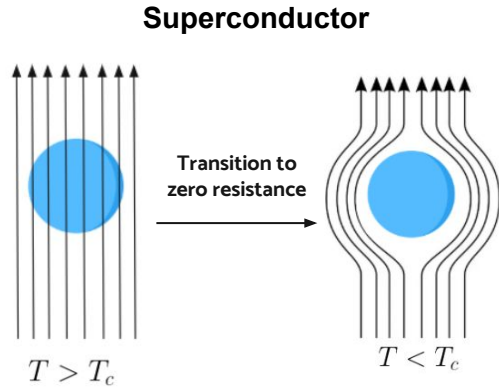
SUPERCONDUTORES DO TIPO II

- Os supercondutores do **Tipo II** são compostos por ligas metálicas e outros materiais, como cerâmicas. Suas temperaturas críticas são mais elevadas, mas ainda se situam na faixa de baixas temperaturas, da ordem de **100 K**.
- Supercondutores do **Tipo II** possuem dois campos críticos.
- Abaixo do campo crítico H_{c1} , eles se comportam como um supercondutor do Tipo I, enquanto acima do campo crítico H_{c2} , se comportam como um material normal sem supercondutividade. Entre H_{c1} e H_{c2} há uma penetração parcial do fluxo magnético, formando regiões supercondutoras e regiões no estado normal que permitem a penetração do campo magnético.



Esse comportamento dos supercondutores do Tipo II ainda não foi totalmente explicado.

O DIAMAGNETISMO NÃO EXPLICA O EFEITO MEISSNER

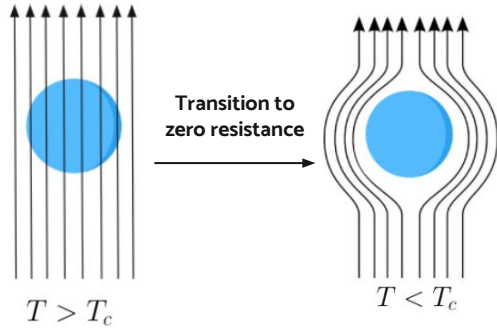


O diamagnetismo **não consegue explicar o efeito Meissner**, apesar de eles serem correlacionados.

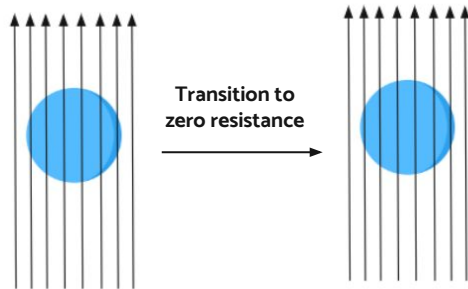
- Se algum material diamagnético, que não seja um supercondutor, estiver em uma região onde há um campo magnético constante e for de alguma forma possível reduzir sua resistência elétrica para zero sem alterar o campo magnético, o campo permanecerá dentro do material. Isso ocorre porque, de acordo com a lei de Faraday, é necessário um campo magnético variável para induzir as correntes usadas para cancelar o campo magnético dentro da amostra.
- A existência do efeito Meissner implica que é possível induzir correntes em um supercondutor mesmo que o campo magnético aplicado seja constante; para isso, é suficiente reduzir a temperatura para um valor inferior à temperatura crítica e, consequentemente, reduzir a resistência para zero. **Em um supercondutor, não importa a ordem na qual o campo magnético é aplicado antes ou depois da redução da temperatura e consequentemente da resistência.**

O DIAMAGNETISMO NÃO EXPLICA O EFEITO MEISSNER

Superconductor



Perfect diamagnetic



O diamagnetismo **não consegue explicar o efeito Meissner**, apesar de eles serem correlacionados.

- Se algum material diamagnético, que não seja um supercondutor, estiver em uma região onde há um campo magnético constante e for de alguma forma possível reduzir sua resistência elétrica para zero sem alterar o campo magnético, o campo permanecerá dentro do material. Isso ocorre porque, de acordo com a lei de Faraday, é necessário um campo magnético variável para induzir as correntes usadas para cancelar o campo magnético dentro da amostra.
- A existência do efeito Meissner implica que é possível induzir correntes em um supercondutor mesmo que o campo magnético aplicado seja constante; para isso, é suficiente reduzir a temperatura para um valor inferior à temperatura crítica e, consequentemente, reduzir a resistência para zero. **Em um supercondutor, não importa a ordem na qual o campo magnético é aplicado antes ou depois da redução da temperatura e consequentemente da resistência.**

Como explicar esse efeito ??



EQUAÇÕES DE LONDON

Em **1935**, os irmãos Fritz e Heinz **London** desenvolveram uma explicação fenomenológica capaz de elucidar o efeito Meissner com base em observações do comportamento dos supercondutores. Eles incorporaram condições específicas para supercondutores em uma descrição baseada nas equações de Maxwell.

Quando elétrons supercondutores se movem, eles não enfrentam resistência e seu movimento é descrito por:

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = e\vec{\varepsilon}$$

A densidade de corrente para os elétrons supercondutores será:

$$\vec{j} = en_s \vec{v}$$

Substituindo na equação de movimento, temos a **primeira equação de London**:

$$\boxed{\frac{\partial \vec{J}}{\partial t} = \frac{n_s e^2}{m} \vec{\varepsilon}} \longrightarrow \vec{\varepsilon} = \frac{m}{e^2 n_s} \frac{d\vec{J}}{dt}$$

Usando a Lei de Faraday:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\nabla \times \vec{J} + \frac{e^2 n_s}{m} \vec{B} \right) = 0 \longrightarrow \boxed{\nabla \times \vec{J} = -\frac{e^2 n_s}{m} \vec{B}}$$

↓
Constante = 0

segunda equação de London

Usando a Lei de Ampère:

$$\nabla^2 \vec{B} = \frac{1}{\lambda_L^2} \vec{B}$$

Fazendo procedimentos parecidos encontramos:

$$\nabla^2 \vec{J} = \frac{1}{\lambda_L^2} \vec{J}$$

$$\nabla^2 \vec{B} = \frac{1}{\lambda_L^2} \vec{B}$$

Profundidade de penetração de London

$$\lambda_L = \sqrt{\frac{m}{\mu_0 e^2 n_s}}$$

$$\nabla^2 \vec{J} = \frac{1}{\lambda_L^2} \vec{J}$$

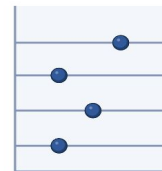
- Tanto o campo magnético quanto a densidade de corrente decaem exponencialmente dentro da amostra, sendo apreciável apenas em um volume muito pequeno dentro do supercondutor definido pela profundidade de penetração London.
- Fazendo uma análise dimensional, conclui-se que a profundidade de penetração London é da ordem de até 1000 Angstrom.

Para chegar a essas conclusões, os irmãos London partiram da mesma ideia usada para elucidar o modelo de **dois fluidos**.

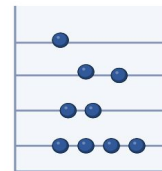
- O modelo de dois fluidos é composto por bósons. De acordo com esse modelo, em baixas temperaturas, um número macroscópico de bósons tende a ocupar o nível de energia mais baixo, formando um condensado onde não há agitação térmica.



- Elétrons são Férmions e obedecem o princípio de exclusão de Pauli.



Férmions



Bósons

$$\nabla^2 \vec{B} = \frac{1}{\lambda_L^2} \vec{B}$$

Profundidade de penetração de London

$$\lambda_L = \sqrt{\frac{m}{\mu_0 e^2 n_s}}$$

$$\nabla^2 \vec{J} = \frac{1}{\lambda_L^2} \vec{J}$$

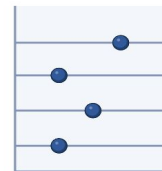
- Tanto o campo magnético quanto a densidade de corrente decaem exponencialmente dentro da amostra, sendo apreciável apenas em um volume muito pequeno dentro do supercondutor definido pela profundidade de penetração London.
- Fazendo uma análise dimensional, conclui-se que a profundidade de penetração London é da ordem de até 1000 Angstrom.

Para chegar a essas conclusões, os irmãos London partiram da mesma ideia usada para elucidar o modelo de **dois fluidos**.

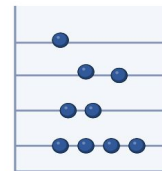
- O modelo de dois fluidos é composto por bósons. De acordo com esse modelo, em baixas temperaturas, um número macroscópico de bósons tende a ocupar o nível de energia mais baixo, formando um condensado onde não há agitação térmica.



- Elétrons são Férmions e obedecem o princípio de exclusão de Pauli.



Férmions



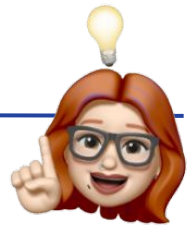
Bósons

Como então esse modelo pode explicar a supercondutividade?



1957: John Bardeen, Leon Cooper, and Robert Schrieffer introduziram um modelo teórico para a supercondutividade que concordava com as observações experimentais.

A Teoria BCS se baseia na formação de pares de Cooper, propostos por Leon Cooper em 1956 e sugerem um **estado ligado** entre dois elétrons.



1972: Ganharam o Nobel da Física pela Teoria BCS.

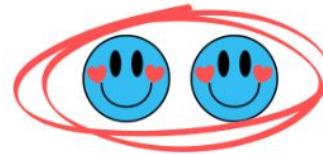
1957: John Bardeen, Leon Cooper, and Robert Schrieffer introduziram um modelo teórico para a supercondutividade que concordava com as observações experimentais.

A Teoria BCS se baseia na formação de pares de Cooper, propostos por Leon Cooper em 1956 e sugerem um **estado ligado** entre dois elétrons.

Normalmente os elétrons se repelem através da repulsão Coulombiana



Como então seria possível a existência de um estado ligado ?



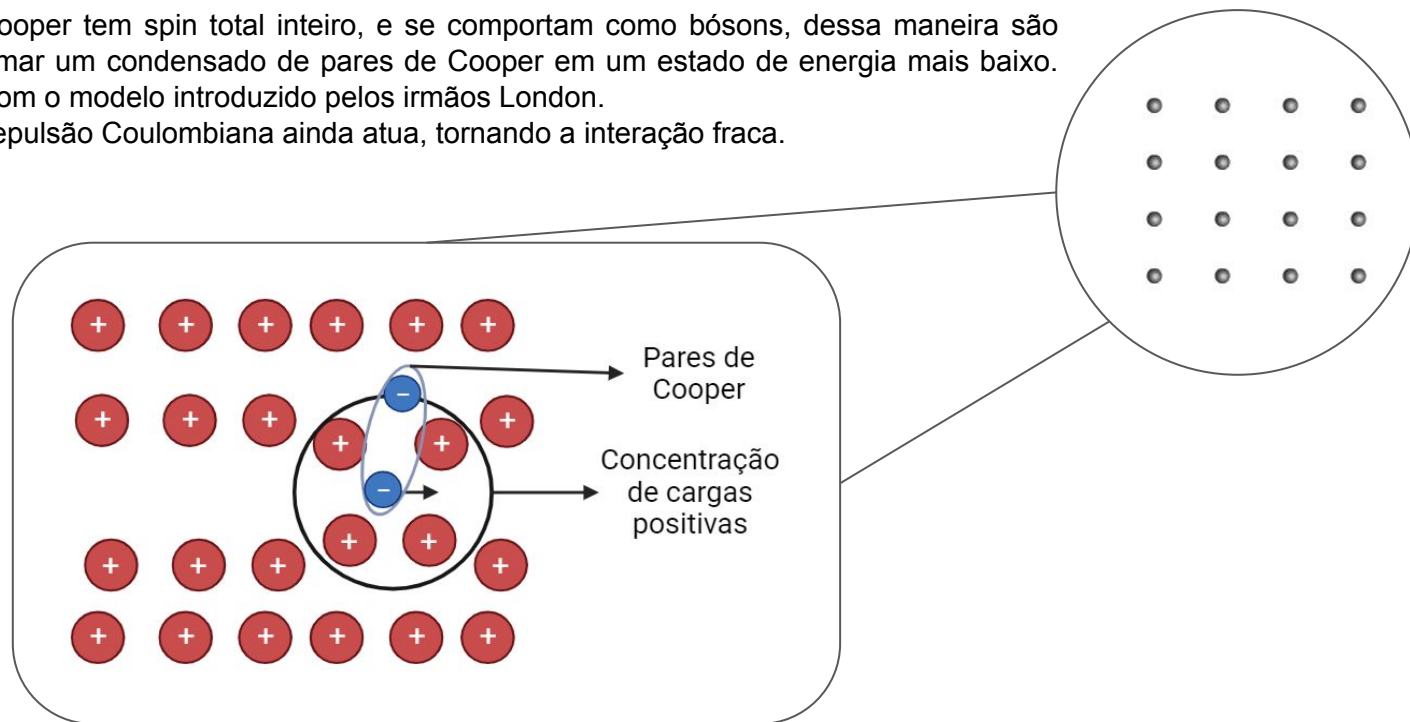
1972: Ganharam o Nobel da Física pela Teoria BSC.



PARES DE COOPER

Os elétrons podem interagir de **maneira positiva** formando um estado ligado fraco interagindo através do intermédio de uma rede de íons positivos e de um fônon.

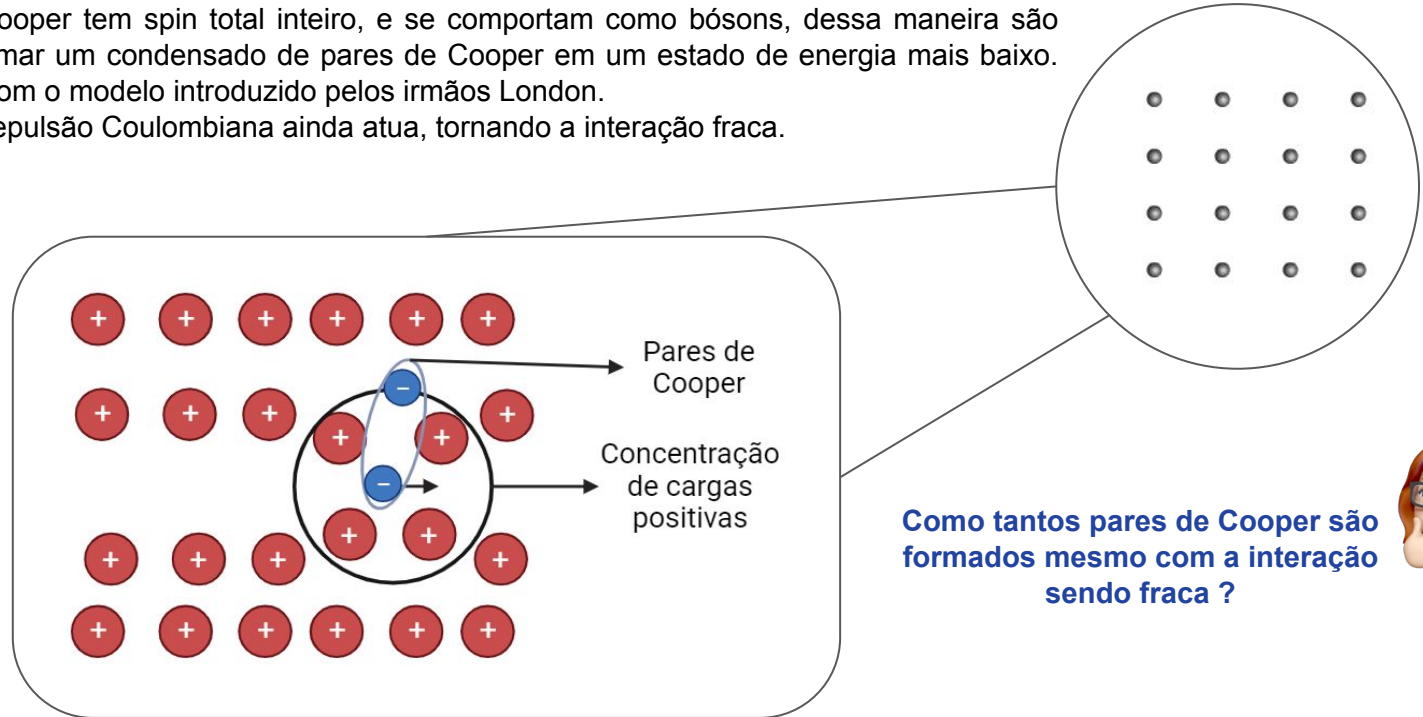
- Os pares de Cooper são formados em temperaturas mais baixas onde a agitação térmica é menor.
- Os pares de Cooper tem spin total inteiro, e se comportam como bósons, dessa maneira são capazes de formar um condensado de pares de Cooper em um estado de energia mais baixo. Concordando com o modelo introduzido pelos irmãos London.
- No entanto, a repulsão Coulombiana ainda atua, tornando a interação fraca.



PARES DE COOPER

Os elétrons podem interagir de **maneira positiva** formando um estado ligado fraco interagindo através do intermédio de uma rede de íons positivos e de um fônon.

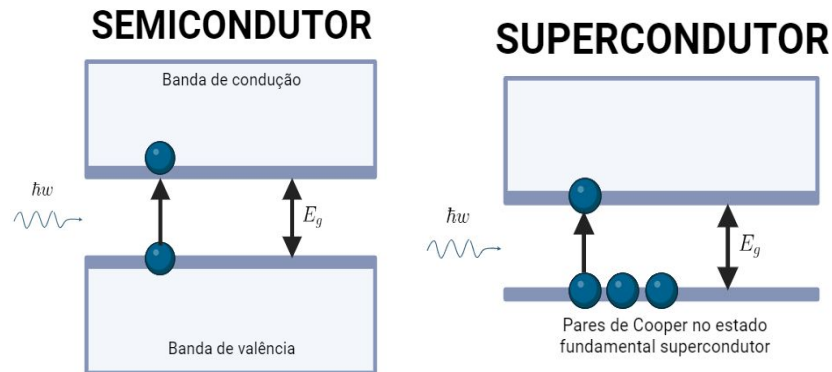
- Os pares de Cooper são formados em temperaturas mais baixas onde a agitação térmica é menor.
- Os pares de Cooper tem spin total inteiro, e se comportam como bósons, dessa maneira são capazes de formar um condensado de pares de Cooper em um estado de energia mais baixo. Concordando com o modelo introduzido pelos irmãos London.
- No entanto, a repulsão Coulombiana ainda atua, tornando a interação fraca.



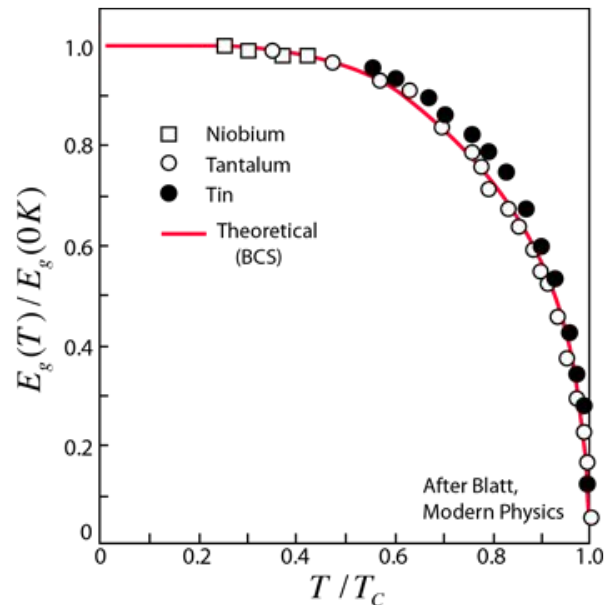
Como tantos pares de Cooper são formados mesmo com a interação sendo fraca ?



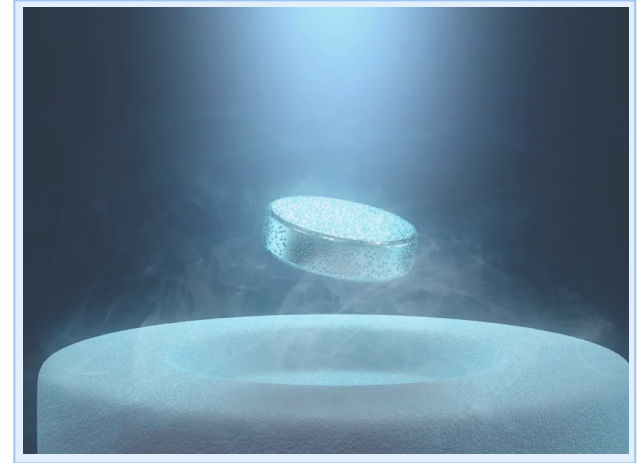
Supercondutores possuem uma **banda de energia** proibida (E_g) ao redor do nível de energia de Fermi.



- O valor de E_g para uma dada temperatura, é igual à energia de ligação do par de Cooper para essa temperatura.
- Para temperaturas da ordem das temperaturas críticas dos supercondutores, o valor de E_g é muito maior do que a energia térmica disponível para os átomos. Assim, os pares de Cooper persistem apesar da ligação fraca sendo capazes de formar um condensado de pares de Cooper.



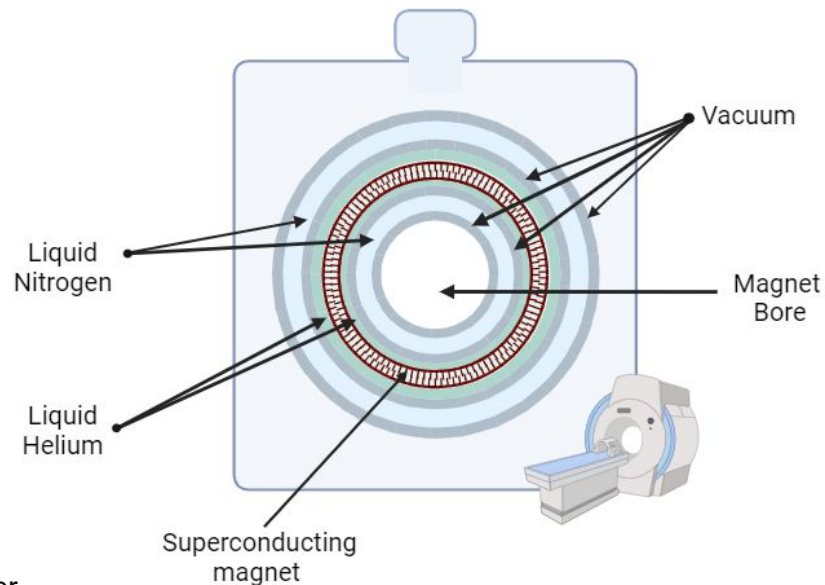
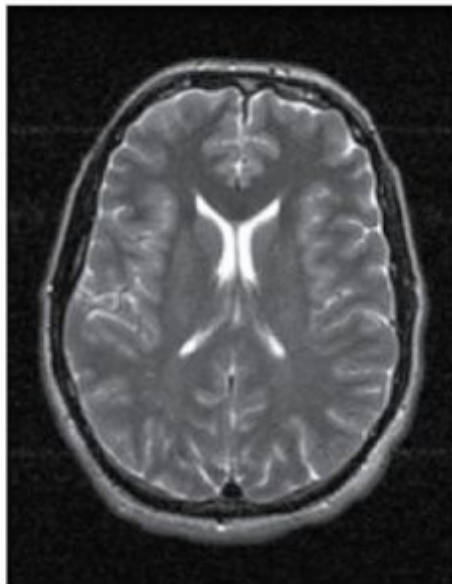
- A Teoria BCS é capaz de fornecer uma explicação física para todas as características observadas empiricamente a respeito da supercondutividade para supercondutores do Tipo I.
- O condensado dos pares de Cooper formam uma estrutura ordenada, de maneira que os elétrons ao se movimentarem não enfrentam as irregularidades do material que geram a resistência elétrica.
- O comportamento dos supercondutores do Tipo II formando regiões supercondutoras e regiões no estado normal que permitem a penetração do campo magnético, não é explicado pela teoria BCS.
- Existem inúmeras aplicações práticas da supercondutividade, apesar das baixas temperaturas requeridas apresentarem uma dificuldade a sua aplicação.



APLICAÇÕES: IMAGENS POR RESSONÂNCIA MAGNÉTICA

As Imagens por Ressonância Magnética (MRI) são utilizadas em diversos campos, incluindo indústria, agricultura, ciência de materiais e, **principalmente, na medicina como um método diagnóstico importante.**

Técnicas de ressonância magnética utilizam um ímã estático e homogêneo combinado com uma série de pulsos de radiofrequência para excitar as amostras e processar os sinais. No caso da imagem, os sinais são espacialmente codificados pelo uso de campos de gradiente linear.



- Um campo magnético ultra estável é empregado para fornecer imagens de alta resolução sem artefatos.
- O campo magnético é gerado por uma corrente constante em uma bobina feita **de fio de material supercondutor** que forma o ímã.

APLICAÇÕES: MAGNETIC LEVITATION TRANSPORT (Maglev)

Efeito Meissner: está estritamente relacionado com a levitação magnética.

A levitação magnética é causada pela interação repulsiva entre o supercondutor e o ímã, a força repulsiva que equilibra o peso do ímã, permitindo que ele levite sobre o supercondutor.



- Um trem de levitação magnética, ou Maglev (Transporte de Levitação Magnética), é semelhante a um trem que percorre uma via elevada acima do solo por meio do uso de supercondutores.
- Devido ao seu alto custo de produção, atualmente existe apenas uma linha comercial, o Transrapid de Xangai.
- Essa linha cobre uma distância de 30 km até o Aeroporto Internacional de Pudong em apenas 8 minutos.
- A construção começou em março de 2001, e entrou em operação em 1º de janeiro de 2004.

O **Maglev Cobra**, desenvolvido pela Universidade Federal do Rio de Janeiro no Brasil, é um exemplo de um trem Maglev que está na fase de testes e utiliza supercondutores do tipo II.

- Supercondutores do Tipo II podem ser resfriados utilizando Nitrogênio líquido, o que torna o custo menor do que o resfriamento com Hélio.
- O Nitrogênio é mais barato que o Hélio por conta de sua abundância na natureza. (Para comparação o metro cúbico do Nitrogênio pode ser comprado por cerca de R\$1,80 enquanto o do Hélio pode custar atualmente até R\$ 1400,00).



 > cond-mat > arXiv:2307.12008

Search... All fields Search

Help | Advanced Search

Condensed Matter > Superconductivity

[Submitted on 22 Jul 2023]

The First Room-Temperature Ambient-Pressure Superconductor

Sukbae Lee, Ji-Hoon Kim, Young-Wan Kwon

For the first time in the world, we succeeded in synthesizing the room-temperature superconductor ($T_c \geq 400$ K, 127° C) working at ambient pressure with a modified lead-apatite (LK-99) structure. The superconductivity of LK-99 is proved with the Critical temperature (T_c), Zero-resistivity, Critical current (I_c), Critical magnetic field (H_c), and the Meissner effect. The superconductivity of LK-99 originates from minute structural distortion by a slight volume shrinkage (0.48 %), not by external factors such as temperature and pressure. The shrinkage is caused by Cu^{2+} substitution of Pb^{2+} (2) ions in the insulating network of Pb(2)-phosphate and it generates the stress. It concurrently transfers to Pb(1) of the cylindrical column resulting in distortion of the cylindrical column interface, which creates superconducting quantum wells (SQWs) in the interface. The heat capacity results indicated that the new model is suitable for explaining the superconductivity of LK-99. The unique structure of LK-99 that allows the minute distorted structure to be maintained in the interfaces is the most important factor that LK-99 maintains and exhibits superconductivity at room temperatures and ambient pressure.

Access Paper:

- Download PDF



Current browse context:
cond-mat.supr-con
< prev | next >
new | recent | 2307
Change to browse by:
cond-mat

References & Citations

- NASA ADS
- Google Scholar
- Semantic Scholar

30 blog links (what is this?)

Export BibTeX Citation

Bookmark



AINDA NÃO TEMOS SKATES VOADORES, INFELIZMENTE





OBRIGADA!

juliamarcolan@usp.br