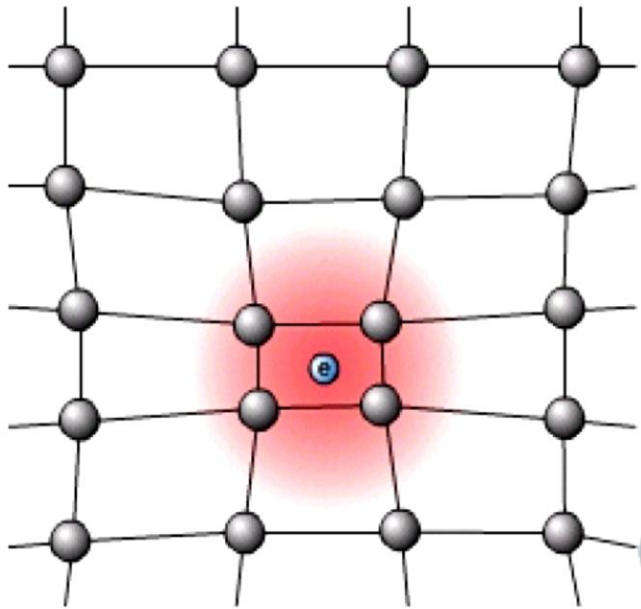


Supercondutividade

Origem quântica e consequências

Pares de Cooper

interação elétron-rede-elétron



Vibrações da rede que espalham elétrons no estado normal são responsáveis por criar a resistividade nula!!!

A estabilidade do estado supercondutor depende criticamente da forte correlação entre os pares supercondutores;

O estado supercondutor é um estado condensado e existe um gap E_g entre o estado fundamental e os estados excitados.

Efeito Isotópico – 1950s

Manifestação da rede

- Mercúrio: isótopos

- $^{199}\text{Hg} \rightarrow T_c = 4.161\text{K}$

- $^{200}\text{Hg} \rightarrow T_c = 4.153\text{K}$

- $^{204}\text{Hg} \rightarrow T_c = 4.126\text{K}$

vibrações da rede
são importantes

- É esperado que a frequência de vibração mude com a massa $M \rightarrow \omega = \left(\frac{k}{M}\right)^{1/2}$

Teoria quântica

- **Supercondutividade: onda quântica coletiva.**
- **É um estado condensado, formado por um grande número de elétrons (pelo menos mil milhões de bilhões de um sólido regular). Partículas com mesma energia.**
- **Regras a serem cumpridas:**
 - **Princípio de exclusão de Pauli: só permite a existência de tal estado condensado se as ondas que o compõem são associadas a partículas chamadas bósons (spin = 0)**
 - **Mas os elétrons são férmions, não bósons!**

Teoria BCS

Bardeen – Cooper - Schrieffer

- Leon Cooper
- **Elétrons** devem formar **pares**.
- Na verdade, um par de elétrons pode formar um **bóson**!
- Em supercondutores convencionais, a criação de pares de elétrons e a formação do **estado condensado acontece instantaneamente**.

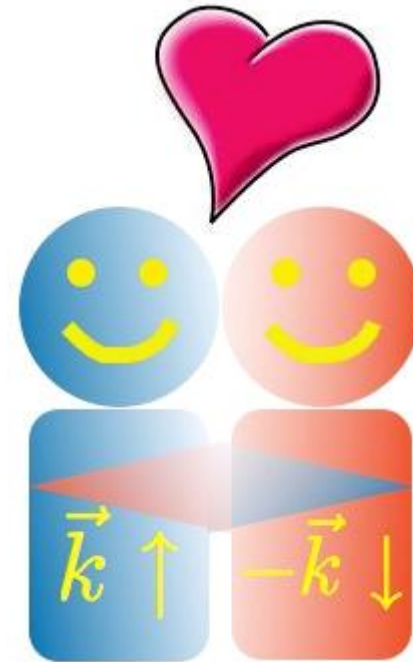
Par de elétrons supercondutor

Par de Cooper

- Formado por dois elétrons ligados
 - Velocidades contrárias (-k,+k)
 - Spins contrários ($\uparrow\downarrow$) (Bóson)

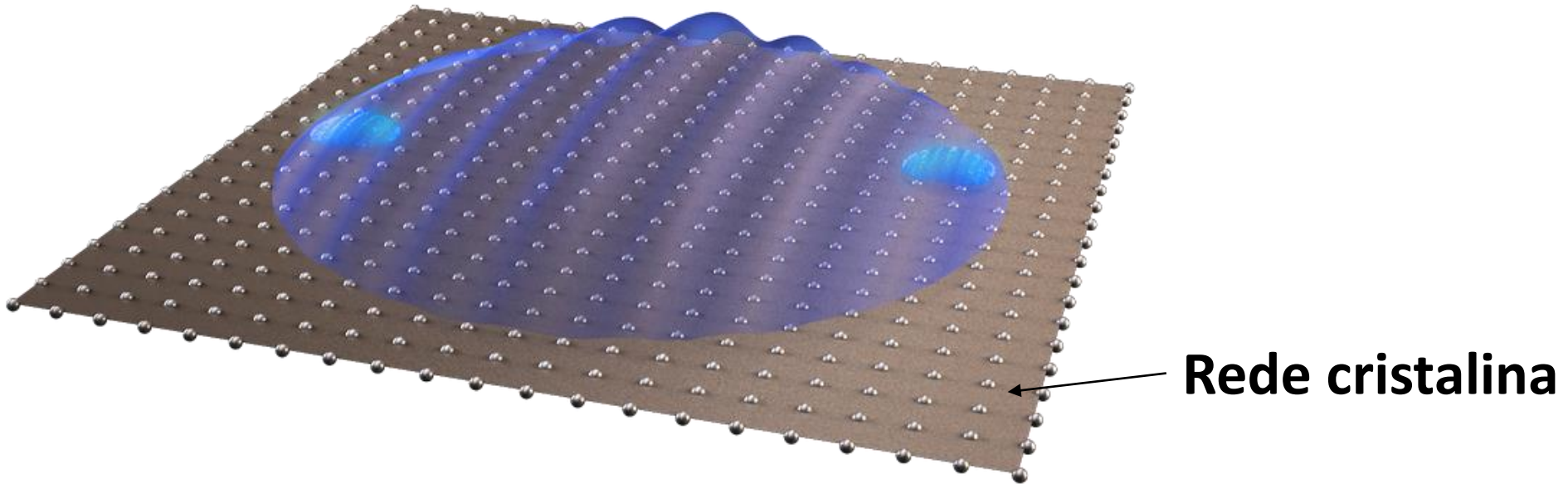
Elétron livre

$$E = \frac{\hbar k^2}{2m} \quad v = \frac{\hbar k}{m}$$



Estado condensado

- Os pares de Cooper se fundem para formar uma onda quântica coletiva ou um condensado (nuvem).



Estado condensado

- Os elétrons **NÃO** se reagrupam no **mesmo local**, mas os pares de elétrons adotam a **mesma fase** como uma onda única e a **mesma energia**.
- Esta onda se espalha através de grandes distâncias – interação de longo alcance (comprimento de coerência: ξ), da ordem de 10 X maior que a distância entre átomos.

Uma analogia

- *Elétrons como cardume de peixes no mar*
- *O condensado seria milhares de peixes que formam um grupo, com um movimento coletivo e harmonioso.*



Gap de Energia

Existe um gap de energia entre o estado condensado (supercondutor) e o estado normal

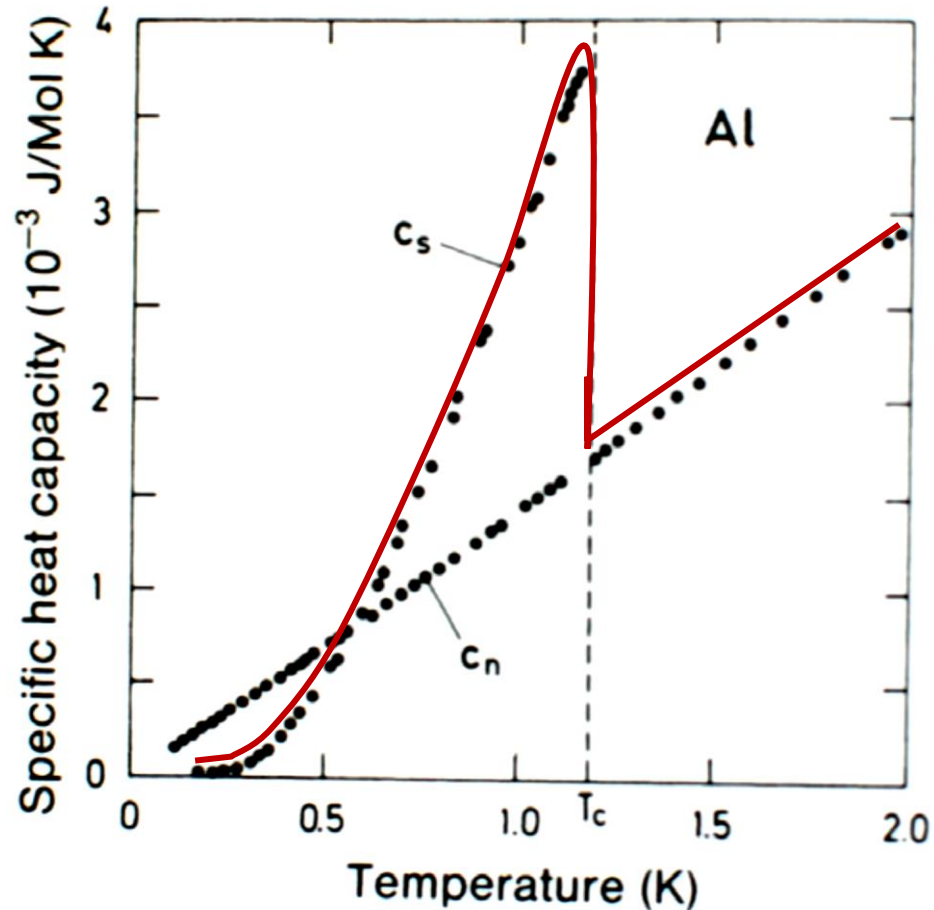
- **Semicondutor $E_g \sim 1 - 2 \text{ eV}$**
- **A energia de Fermi que é a energia máxima ocupada pelos elétrons normais em 0 K é da ordem de 5 eV.**
- **O gap de energia do estado supercondutor é bem pequeno $\sim k_B T_c \sim 10^{-3} \text{ eV}$ em 0 K.**
- **Teoria BCS prevê : $E_g \approx 3.53 k_B T_c$**

Calor Específico

Depende da Energia do Gap

Elemento	T_c (K)
----------	-----------

Al	1.18
----	------



Salto para $T = T_c$ e depois decai exponencialmente com o decréscimo da temperatura

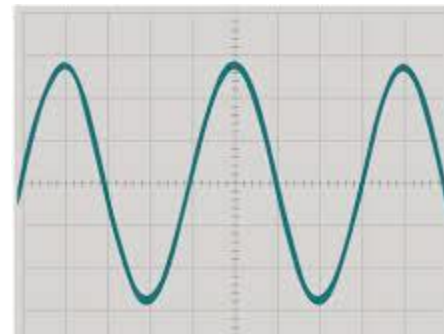
Muda muito abaixo de T_c

$$c_s \propto \exp\left(-\frac{\Delta}{kT}\right)$$

$$\Delta = \frac{E_g}{2}$$

Fase da “super” onda

- ❖ Quando um material se torna supercondutor, a onda quântica que descreve as propriedades de elétrons cobre todo o material.
- ❖ Uma **única onda** corresponde a todos os elétrons no sistema.
- ❖ Esta onda supercondutora tem uma **"fase"**.
 - ❖ A fase de uma onda, consiste em saber se estamos na calha ou na crista da onda.



Ainda sobre a “super” onda

- ❖ Uma onda quântica não é um objeto oscilante.
- ❖ A fase tem um valor determinado, que pode ser constante ou pode variar, mas não pode ser descontínua.
- ❖ No caso de um anel (abaixo):
 - ❖ Dada uma volta completa do anel, o valor da fase precisa voltar para o mesmo valor, **porque a fase não pode ser descontínua.**
 - ❖ Somente um **número inteiro** de fases é permitido.



Lembrando da quantização do átomo de Bohr

Equivalente à super onda

Um das suposições de Bohr no seu modelo para o átomo de hidrogênio foi de que o momento angular de elétron em um estado estacionário era $n\hbar$.

Isto mostrou ser equivalente a dizer que a órbita do elétron podia ser escrita como um número inteiro de comprimentos de onda de De Broglie:

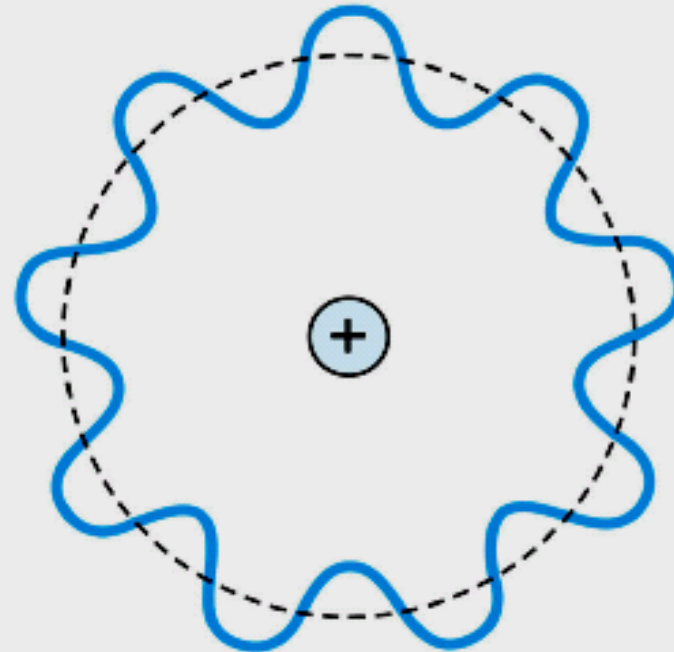
$$2\pi r = n\lambda = n \frac{h}{p}$$

Circunferência

Comprimento de onda de De Broglie para o elétron

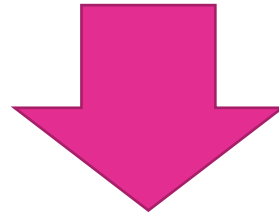
Multiplicando por $p/2\pi$, encontramos o momento angular:

$$L = mrv = rp = \frac{nh}{2\pi} = n\hbar$$



Mudança de fase (anel)

Campo magnético é aplicado ao anel



Modifica a fase da onda **ao longo do anel.**

Quantização de fluxo (anel)

CAMPO MAGNÉTICO → MUDANÇA DE FASE

❖ **A fase precisa voltar ao seu valor inicial após uma volta completa**



❖ **Apenas determinados valores de fluxo magnético são “autorizados” a passar pelo anel.**

Somente um número inteiro de comprimentos de onda.

Quantização de fluxo (anel)

SOMENTE UM NÚMERO INTEIRO DE COMPRIMENTOS DE ONDA É PERMITIDO PARA QUE A FASE FIQUE CONSTANTE.

Ou seja, o fluxo é "quantizado" → somente ocorre em valores múltiplos inteiros de um valor mínimo chamado quantum de fluxo, $\phi_0 = 2,07 \cdot 10^{-15} \text{ Tm}^2$ (ou Weber).

Características da onda quântica do estado supercondutor



Quantização do fluxo campo magnético (vórtices, linhas de fluxo)