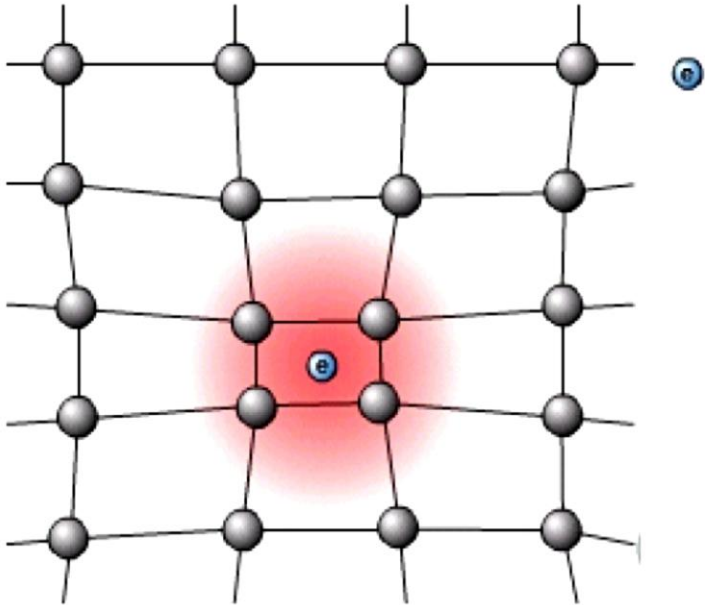


# Supercondutividade

**Origem quântica e consequências**

# Pares de Cooper

## interação elétron-rede (fônon)-elétron



Vibrações da rede criam ondas mecânicas denominadas de fônons, são responsáveis por criar os pares e a resistividade nula!!! (ondas de baixa frequência devido às baixas temperaturas)

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.

No estado normal, em altas temperaturas, os fônons são de altas frequências e são responsáveis por espalhar elétrons individuais no estado normal, aumentando a resistividade.

- **Fônons Acústicos:**

- Referentes ao movimento coletivo dos átomos em um cristal, **onde os átomos se movem em fase uns com os outros**. Eles correspondem a ondas sonoras e têm uma frequência que se aproxima de zero na borda da zona de Brillouin.

- **Fônons Ópticos:**

→ Supercondutividade

- Em sólidos com mais de um átomo na célula unitária, os fônons ópticos surgem quando **os átomos se movem fora de fase uns com os outros**. Esses fônons têm uma frequência diferente de zero na borda da zona de Brillouin e podem interagir com a luz.

**Como os “BCS”s desconfiaram que poderia ser a  
vibração da rede, ou os fônons, responsáveis pela  
supercondutividade?**

# Efeito Isotópico – 1950s

## Manifestação da rede cristalina

- 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), que se organizam em pares. **Partículas com a 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)

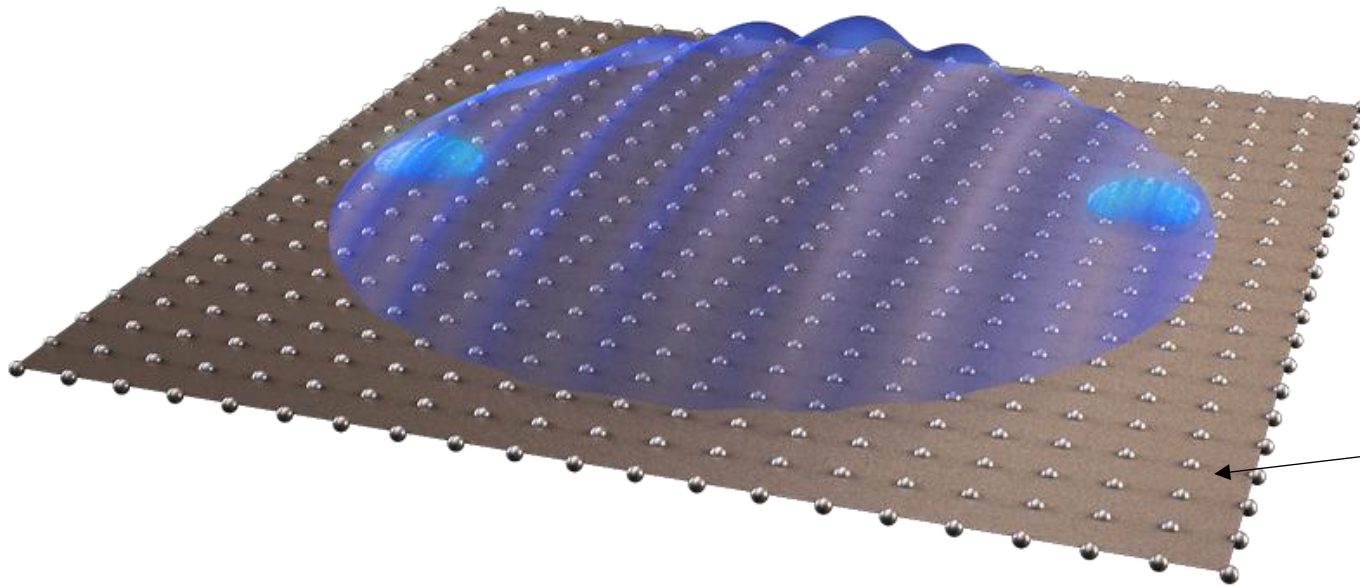
Elétron livre

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



# Estado condensado

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



Rede cristalina

# 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 que representa o par de elétrons na descrição quântica, se espalha através de grandes distâncias – **interação de longo alcance** (comprimento de coerência:  $\xi$ ), 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.

O gap de energia do estado supercondutor é bem pequeno  $\sim k_B T_c \sim 10^{-3}$  eV em 0 K.

Teoria BCS prevê :  $E_g \approx 3.53 k_B T_c$

Para comparação:

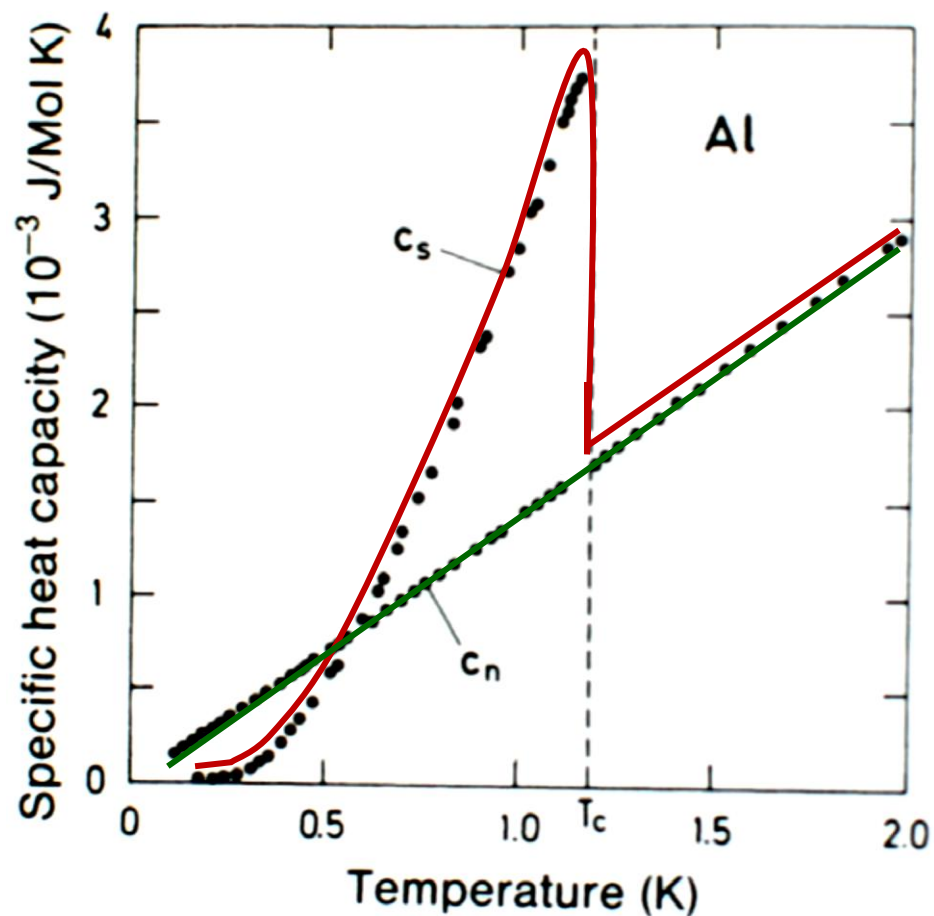
- Semicondutor  $E_g \sim 1 - 2$  eV
- A energia de Fermi que é a energia máxima ocupada pelos elétrons normais em 0 K é da ordem de 5 eV.

# Calor Específico

Elemento  $T_c$  (K)

Depende da Energia do Gap

Al 1.18



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

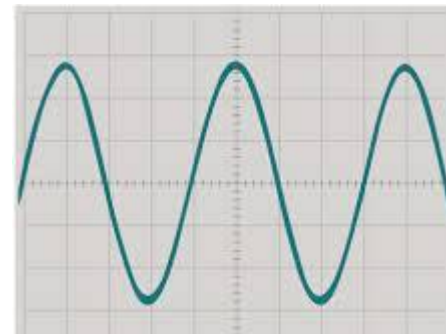
Muda muito abaixo de  $T_c$

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

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

# 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

- ❖ 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:

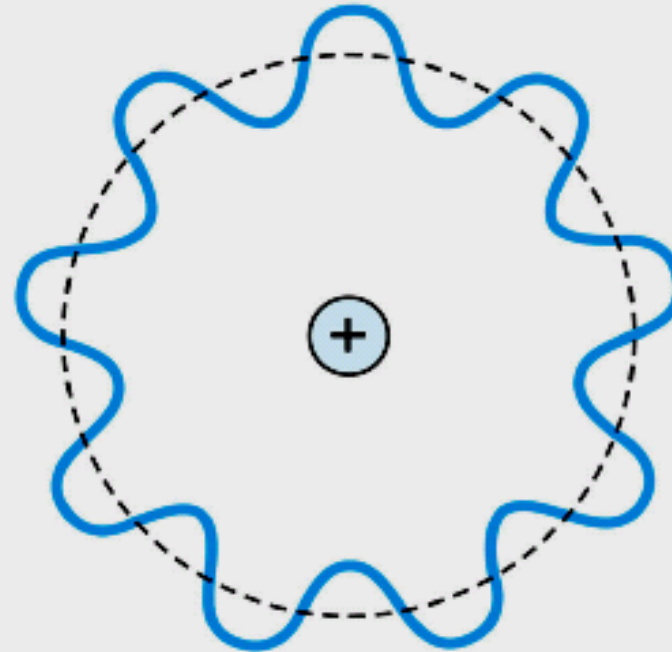
$$2\pi r = n \lambda$$

← Comprimento de onda de De Broglie para o elétron

Circunferência

Multiplicando por  $p/2\pi$ , ( $p = mv = \frac{h}{\lambda}$ ) 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,  $\phi_0 = 2,07 \times 10^{-15} \text{ Tm}^2$  (ou Weber).**

**Características da onda quântica do estado  
supercondutor**



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