

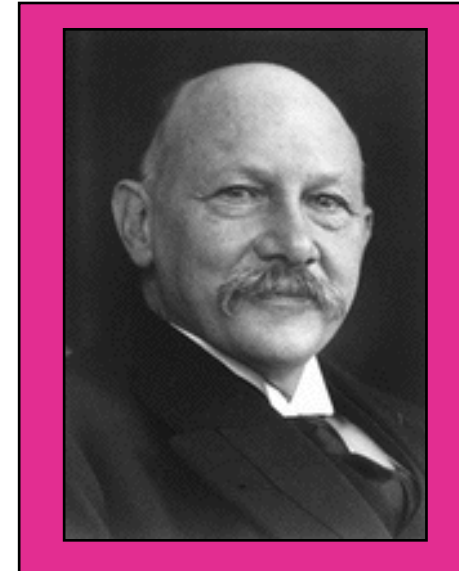
# Supercondutividade

Conceitos básicos

# A descoberta da supercondutividade

## 1911

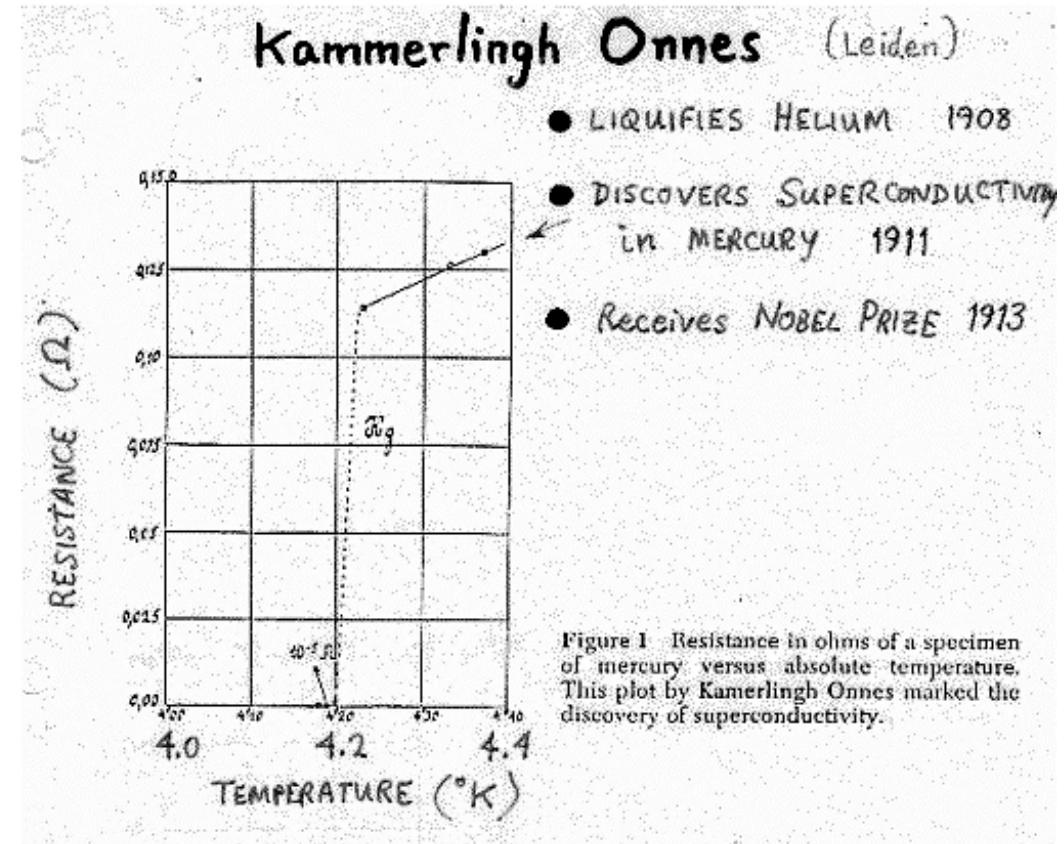
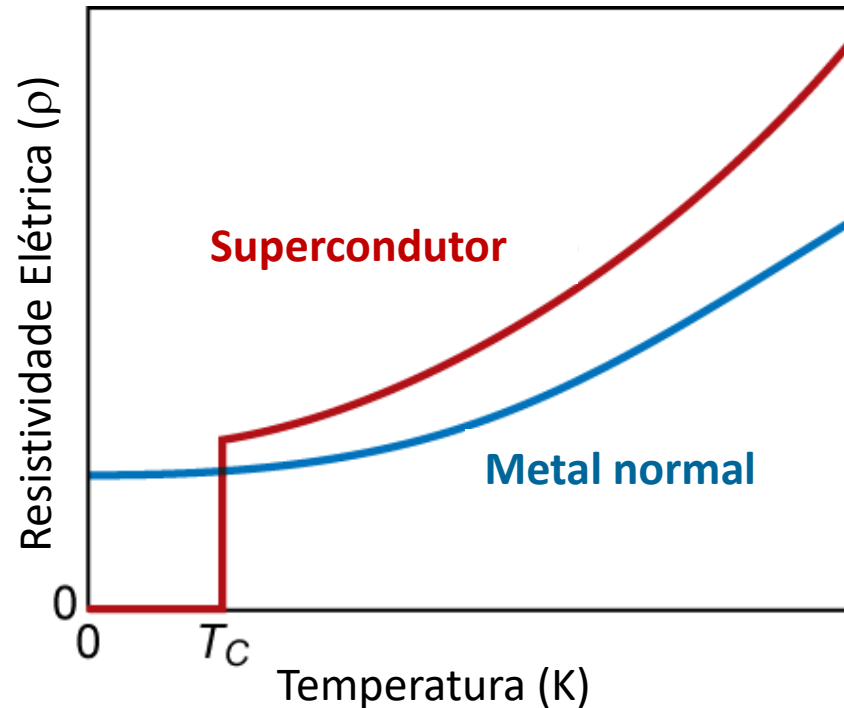
- 1908 – Liquefez o He
- 1911 - Descobriu a supercondutividade em Hg
- 1913 – Recebeu o Prêmio Nobel



Kammerlingh Onnes  
(1853 – 1926)

# Temperatura Crítica - $T_c$

## Resistividade elétrica nula



- $T < T_c$  - estado supercondutor
- $T > T_c$  - estado normal (material paramagnético - PM)

# Campos Magnéticos

- $H$  – intensidade de campo magnético – campo externo (A/m).
- $M$  – magnetização – campo resultante de correntes induzidas que geram campos (A/m). (no caso do material superconductor)
- $B$  – densidade de fluxo magnético – campo interno total (Tesla – T) (depende do material)

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H} + \mu_0 \mathbf{M}$$



# Relações entre os Campos Magnéticos

$$B = \mu_0 H + \mu_0 M \quad \longrightarrow \quad M = \chi H \quad \longrightarrow \quad B = \mu H$$

- $\mu \rightarrow$  permeabilidade magnética
- $\mu_0 \rightarrow$  permeabilidade magnética do vácuo
- $\chi \rightarrow$  susceptibilidade magnética



# Material Diamagnético

**M tem sentido contrário a H**



*mas*  $M = \chi H$



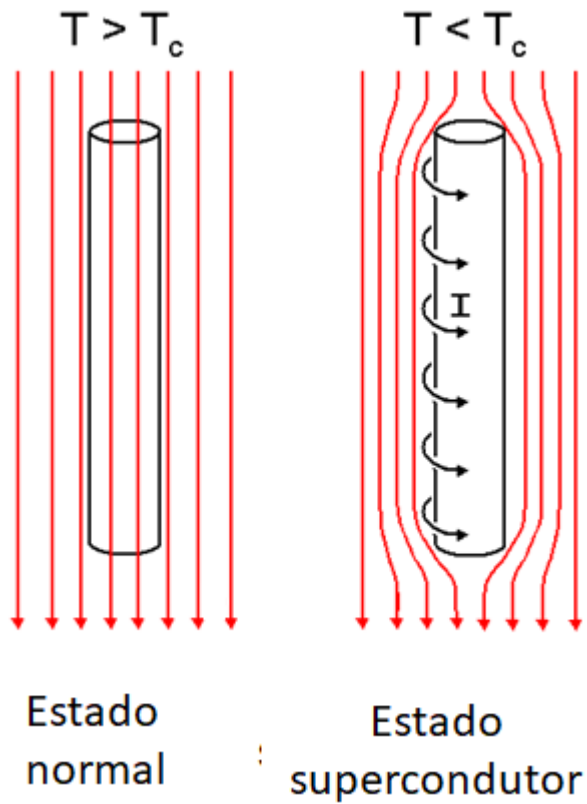
$$-1 \leq \chi < 0$$

Mas os valores são muito pequenos :  $\chi \approx - 10^{-5}$



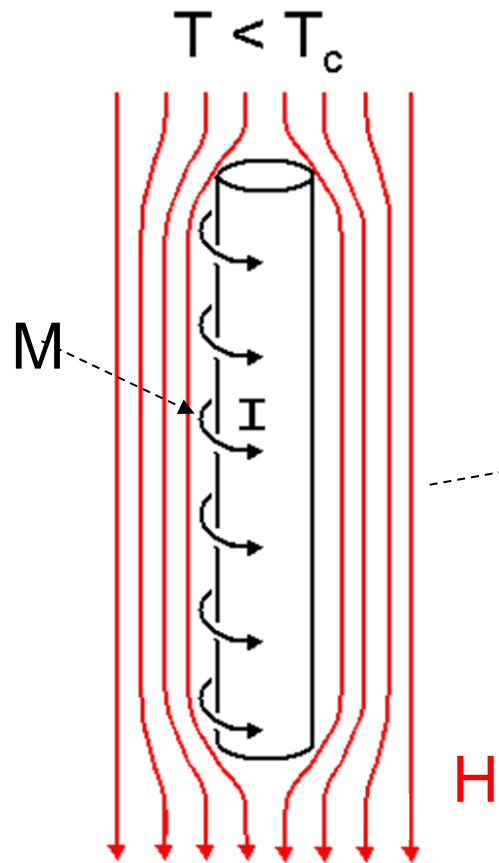
# Efeito Meissner - Ochsenfeld

Supercondutor “expele” o campo magnético do seu interior



# Efeito Meissner - Ochsenfeld

Supercondutor “expele” o campo magnético do seu interior  $\rightarrow B = 0$



Correntes supercondutoras

$$B = \mu_0 H + \mu_0 M$$

$$M = -H \quad -1 \leq \chi < 0$$

$$\chi = -1$$



Efeito Meissner  $\rightarrow$  Diamagnetismo Perfeito



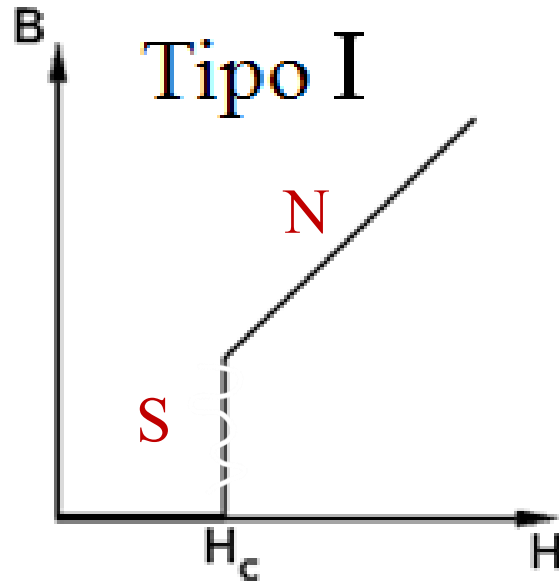
# A magnetização em supercondutores

- A magnetização é devido à **corrente superficial que é induzida** na superfície do material → induz um campo contrário ao campo aplicado, que **não deixa** o campo externo penetrar ( $B=0$ ).
- A **resistência nula** permite que estes **valores de corrente sejam extremamente altos**, mas limitados por um valor chamado de corrente crítica  $I_c$ .



$$T < T_c$$

# Supercondutor Tipo I



$$B = \mu_0 H + \mu_0 M$$

## Tipo I

$$M = -H \text{ para } H < H_c$$

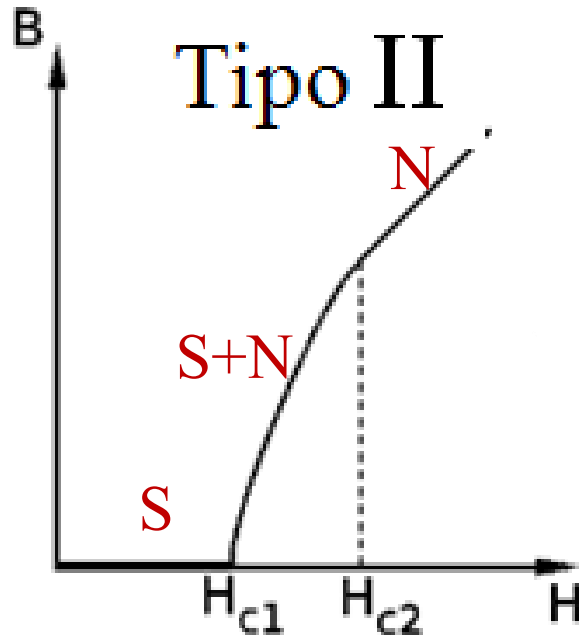
$$M \cong 0 \text{ para } H > H_c$$

$H > H_c$ ;  $M \rightarrow 0 \rightarrow$  cessam as correntes supercondutoras.

Material passa a ser paramagnético.



# $T < T_c$ Supercondutor Tipo II



$$B = \mu_0 H + \mu_0 M$$

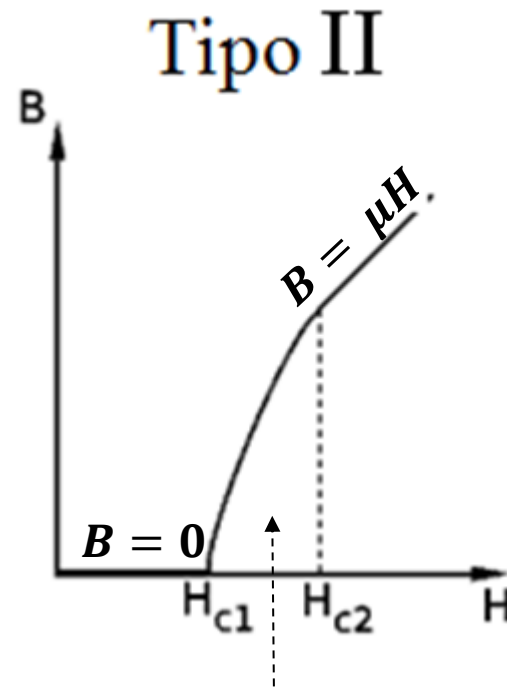
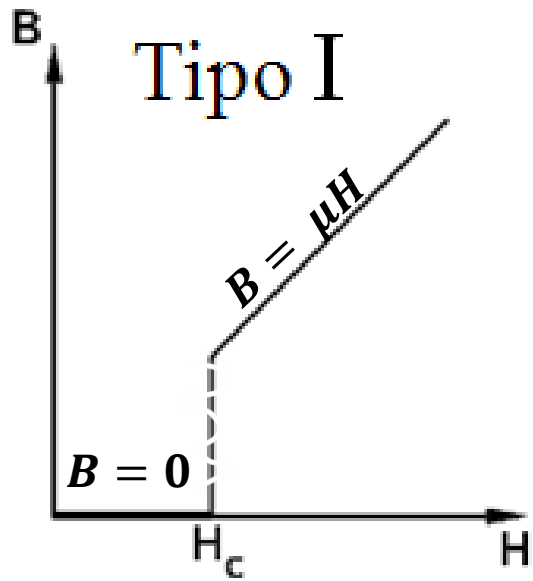
**Tipo II**  
 $M = -H$  para  $H < H_{c1}$   
 $M \cong 0$  para  $H > H_{c2}$

$H_{c1} < H < H_{c2}$  – estado misto  
 $H \uparrow \rightarrow B \uparrow \rightarrow |M| \downarrow$   
Penetração parcial do campo magnético

$H > H_{c2} \rightarrow$  o material se torna paramagnético (PM)

São os materiais que de fato são usados em aplicações





estado misto

$$B = \mu_0 H + \mu_0 M$$

$$H \uparrow \rightarrow B \uparrow \rightarrow |M| \downarrow$$



# E como seriam as curvas M vs H?



# Supercondutores Tipo II

**Estado Misto:** Coexistência de regiões normais e supercondutoras



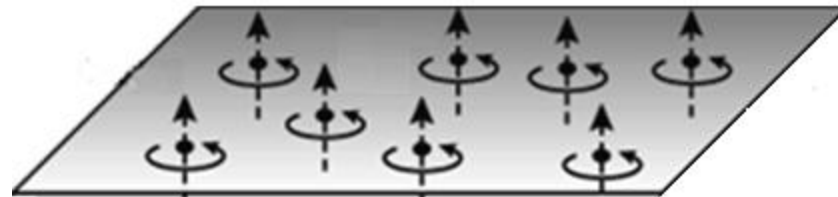
# Penetração parcial de campo

Estado misto  
Tipo II

$$H_{c1} < H < H_{c2}$$

Em duas dimensões

Vórtices  
ou  
Linhas de fluxo

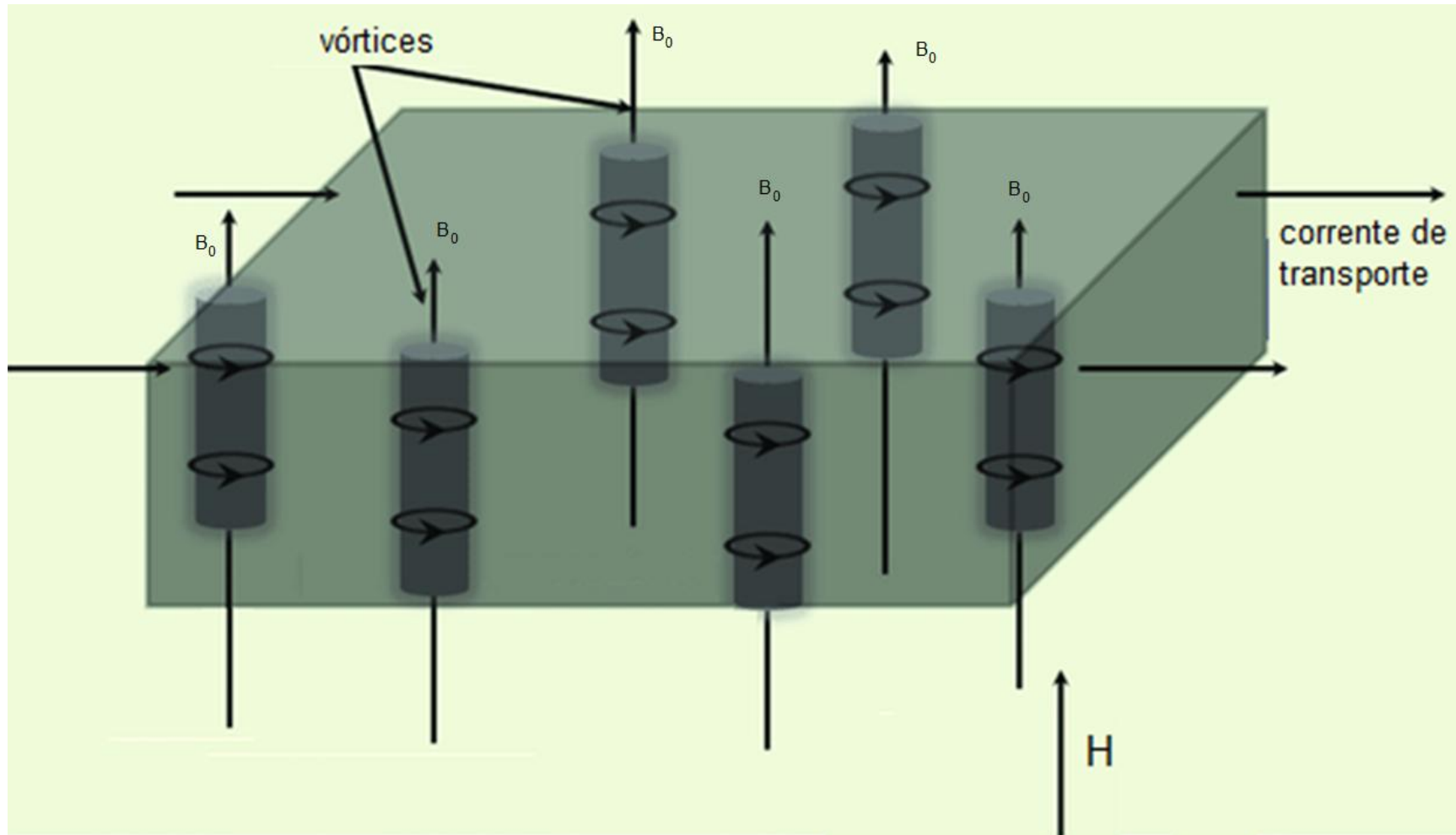


Os vórtices ou linhas de fluxo são regiões normais rodeadas por correntes supercondutoras, que blindam as regiões supercondutoras das regiões normais (não-supercondutoras).



# Vórtices

Em três dimensões



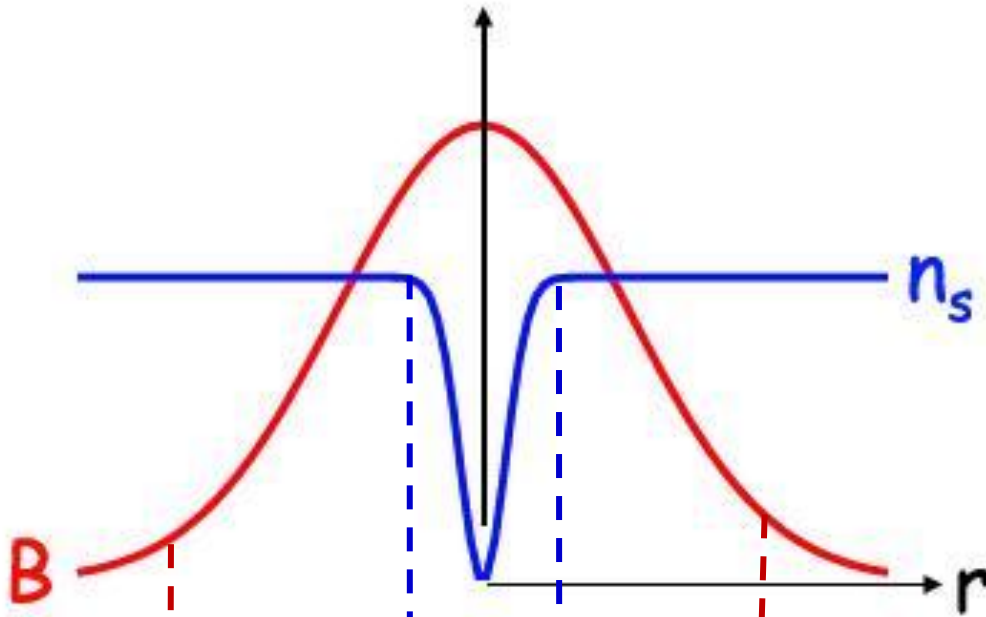
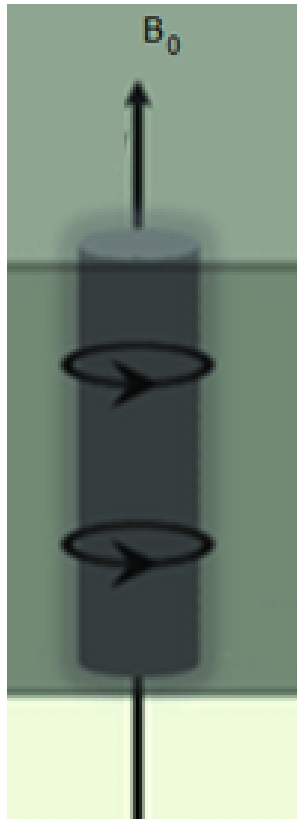


# Vórtices – Linhas de Fluxo

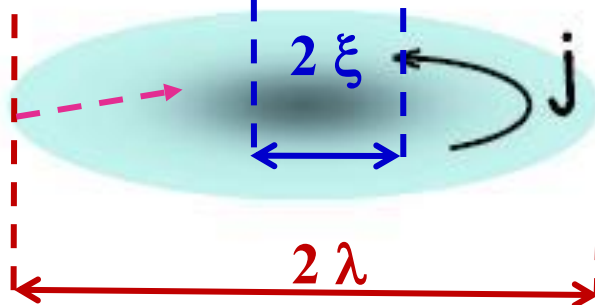
Núcleo no estado “normal”: **diâmetro** =  $2 \xi$

$$n_s = |\psi|^2$$

Parâmetro de ordem =  
densidade de elétrons  
supercondutores



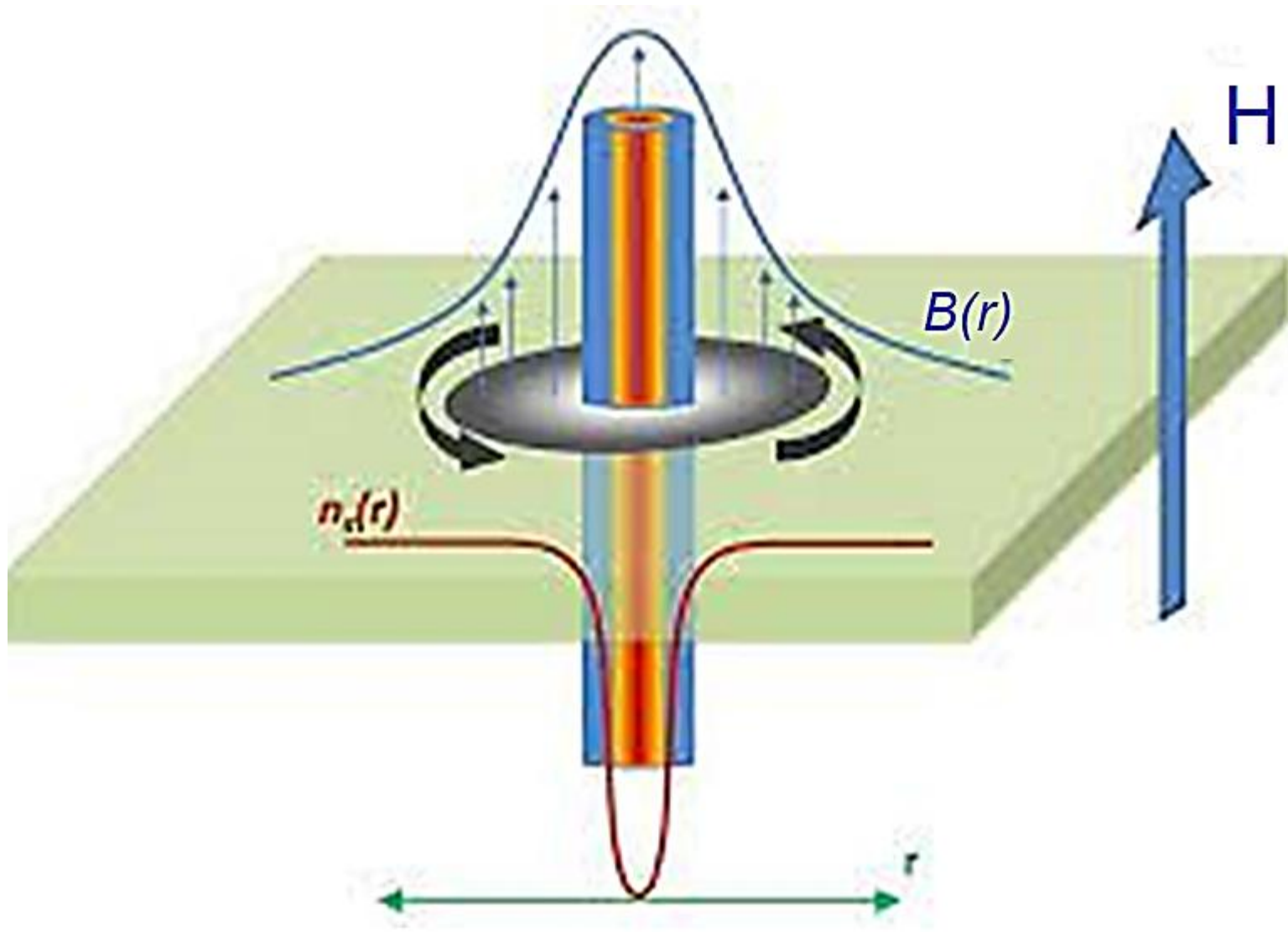
Plano  
perpendicular  
a H



Comprimento de coerência =  $\xi$

Comprimento de penetração (do campo) =  $\lambda$

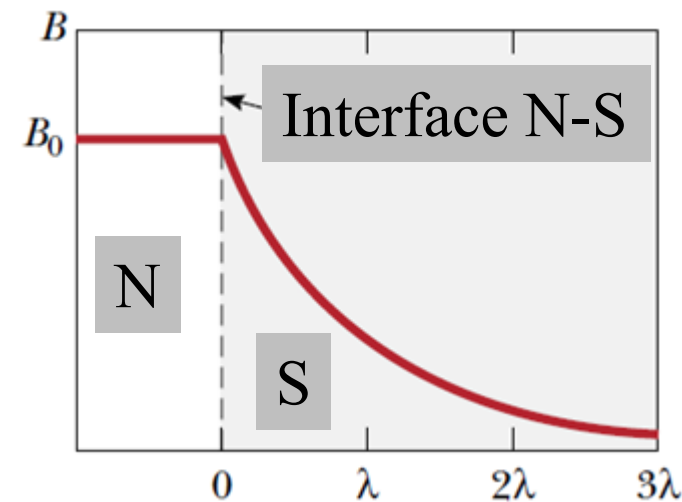




# Parênteses sobre as correntes supercondutoras

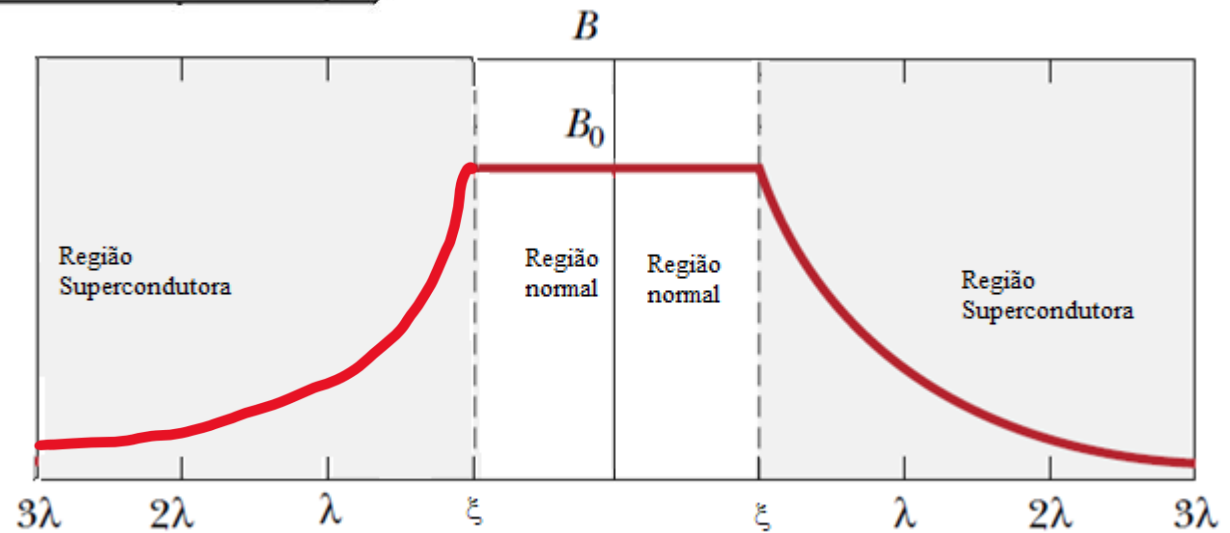
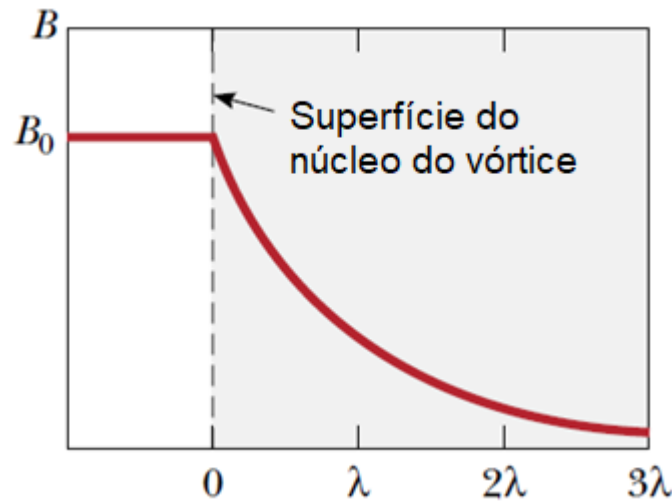
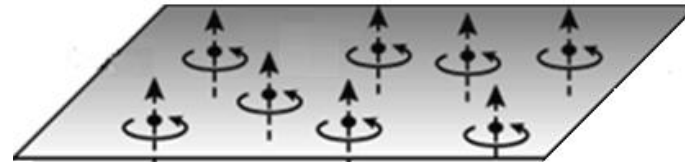
- Como vimos, os campos magnéticos são expelidos do interior de um supercondutor tipo I pela formação de correntes de superfície que blindam o estado supercondutor do material não supercondutor (o que está fora dele).
- Essas correntes são formadas em uma camada na superfície. Dentro dessa camada, de espessura  $\lambda$ , o campo magnético  $B$  decresce exponencialmente de seu valor externo ( $B_0$ ) a zero, conforme a expressão.

$$B(x) = B_0 e^{-x/\lambda}$$



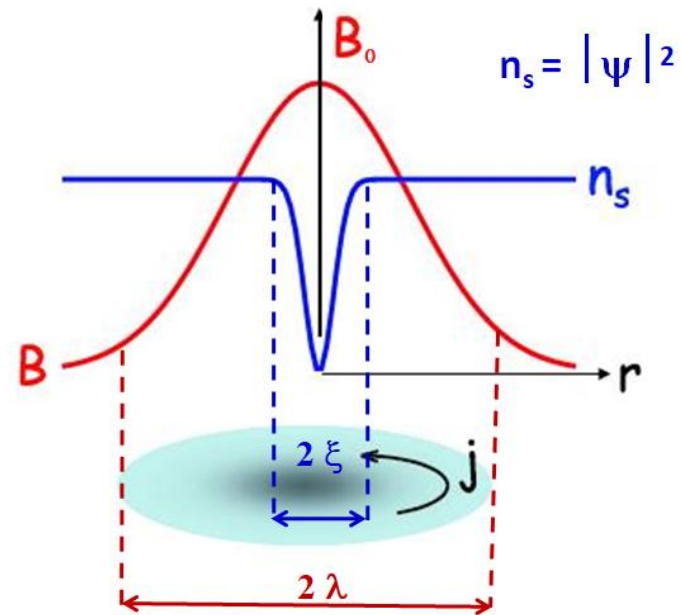
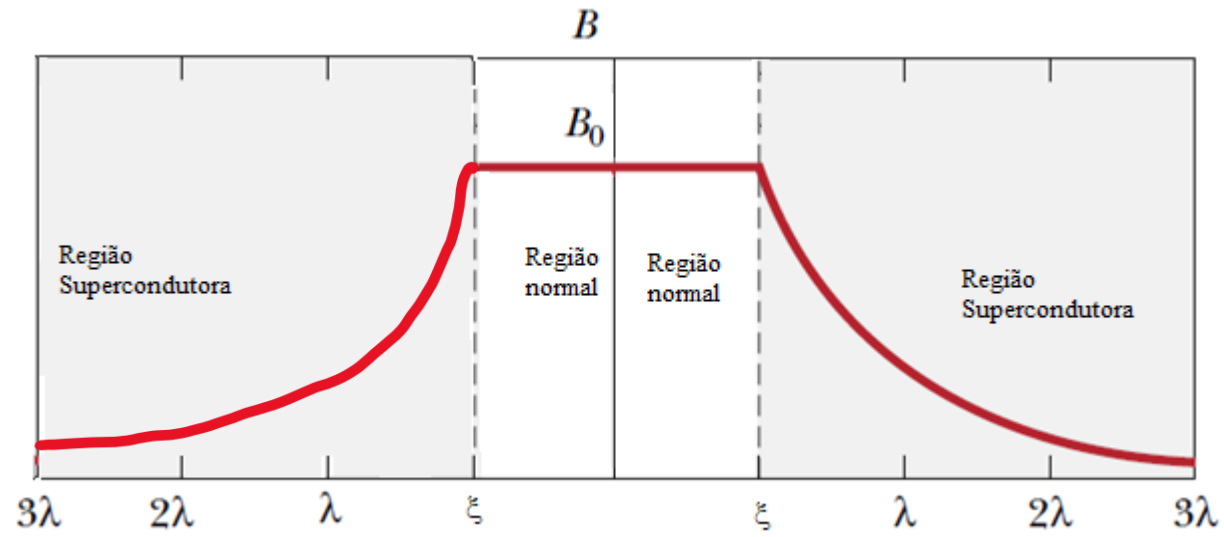
# Correntes supercondutoras e vórtices

- Quando um vórtice é nucleado, correntes supercondutoras são criadas ao redor dele para blindar a região normal (PM) da região supercondutora

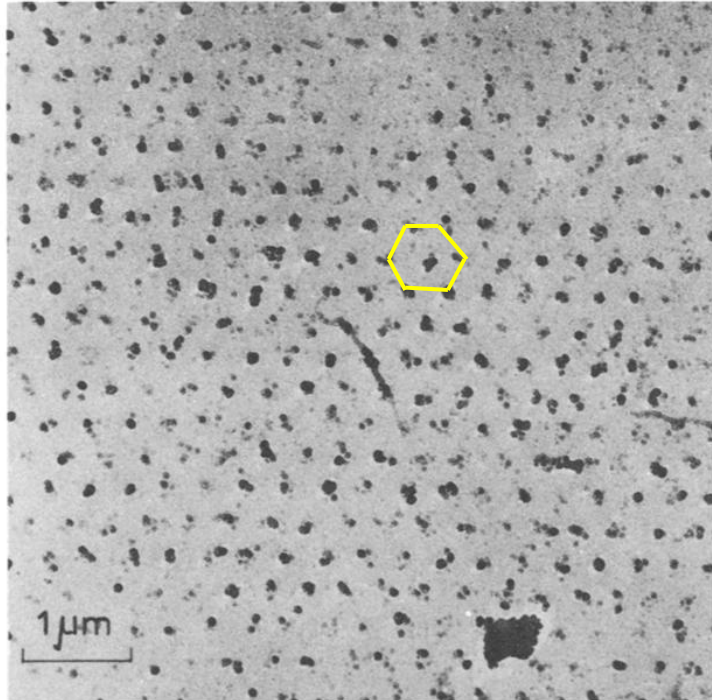


$$B(x) = B_0 e^{-x/\lambda}$$





# Vórtices - Comprovação Experimental



Rede triangular “perfeita” de linhas de fluxo na superfície de uma haste de Pb-4%In em 1,10 K. Os pontos pretos consistem em pequenas partículas de cobalto. (1967, Essmann and Träuble)

Rede bidimensional hexagonal

0.1 micron =  $1 \times 10^{-4}$  mm

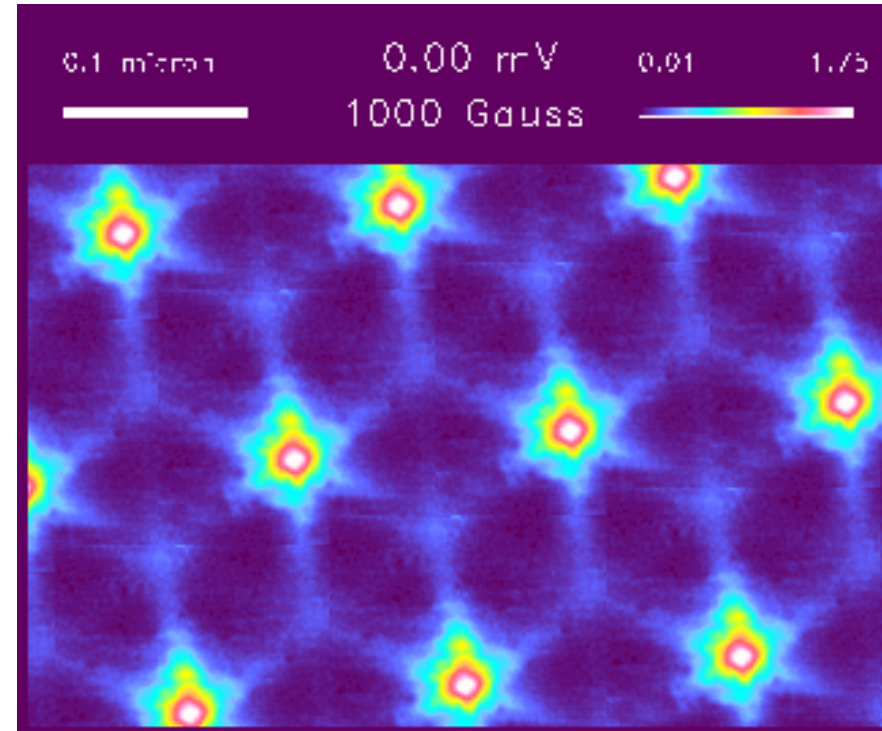


Imagem magnética

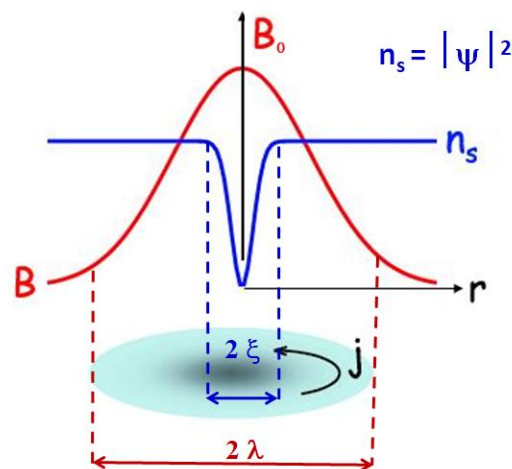
# Vórtices

- São linhas de fluxo de penetram no material supercondutor do tipo II.
- Elas penetram de maneira quantizada, formando uma rede bidimensional no plano normal à direção do campo aplicado.
- Na região onde as linhas de fluxo penetram, o material está no estado normal e tem raio =  $\xi$ .
- Cada linha de fluxo tem o mesmo valor de fluxo magnético  $\phi_0 = 2,07 \times 10^{-15} \text{ A.m}^2$
- O comprimento de penetração do campo magnético é  $\lambda$ .



## Campo Crítico $H_{c2}$ (tipo II)

- O campo crítico  $H_{c2}$  é o maior valor de campo para o qual o material está no estado supercondutor.
- O valor dele é o  $B_0$  que aparece no gráfico:



» Da relação entre o fluxo magnético temos que:

$$B = \frac{\phi_M}{A}$$

$$B_{c2} = \frac{\phi_0}{\pi \xi^2}$$

- Ou seja, a indução magnética máxima que o material pode ter é o valor do campo crítico  $B_0 = B_{c2} = \mu_0 H_{c2}$  ( $M \sim 0$ ).

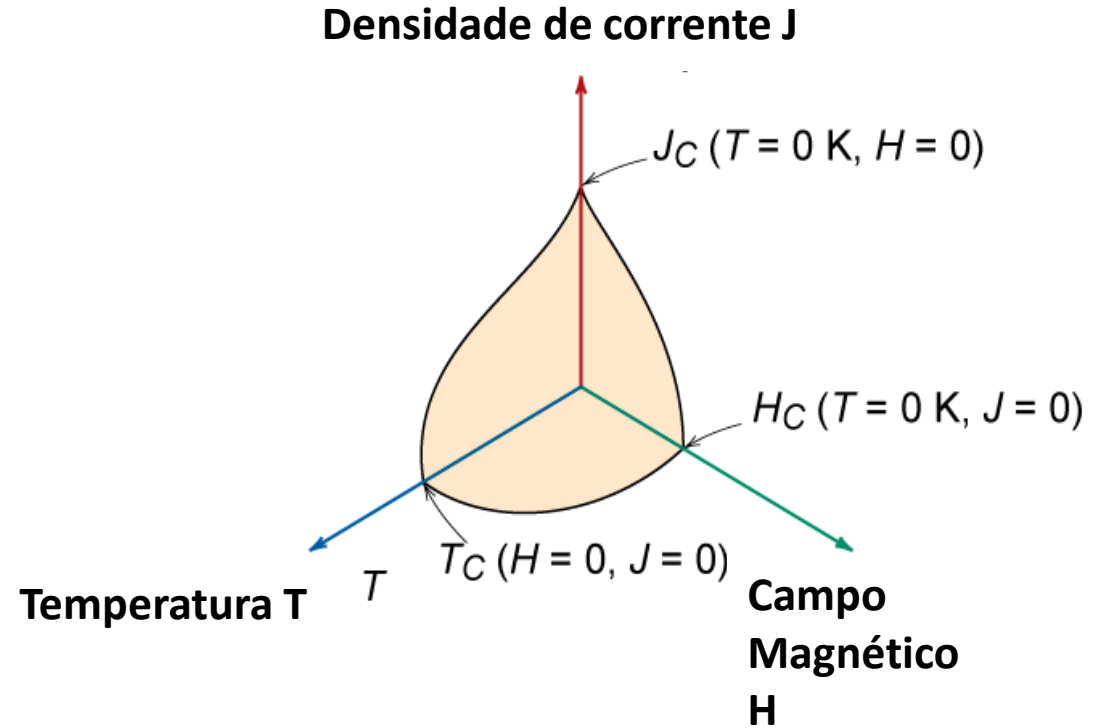




# Limites da Supercondutividade

- **Parâmetros Críticos**

- **Temperatura Crítica:  $T_c$**
- **Campo Crítico:  $H_c$  (tipo I),  $H_{c1}$  e  $H_{c2}$  (tipo II)**
- **Densidade de Corrente Crítica:  $J_c$**

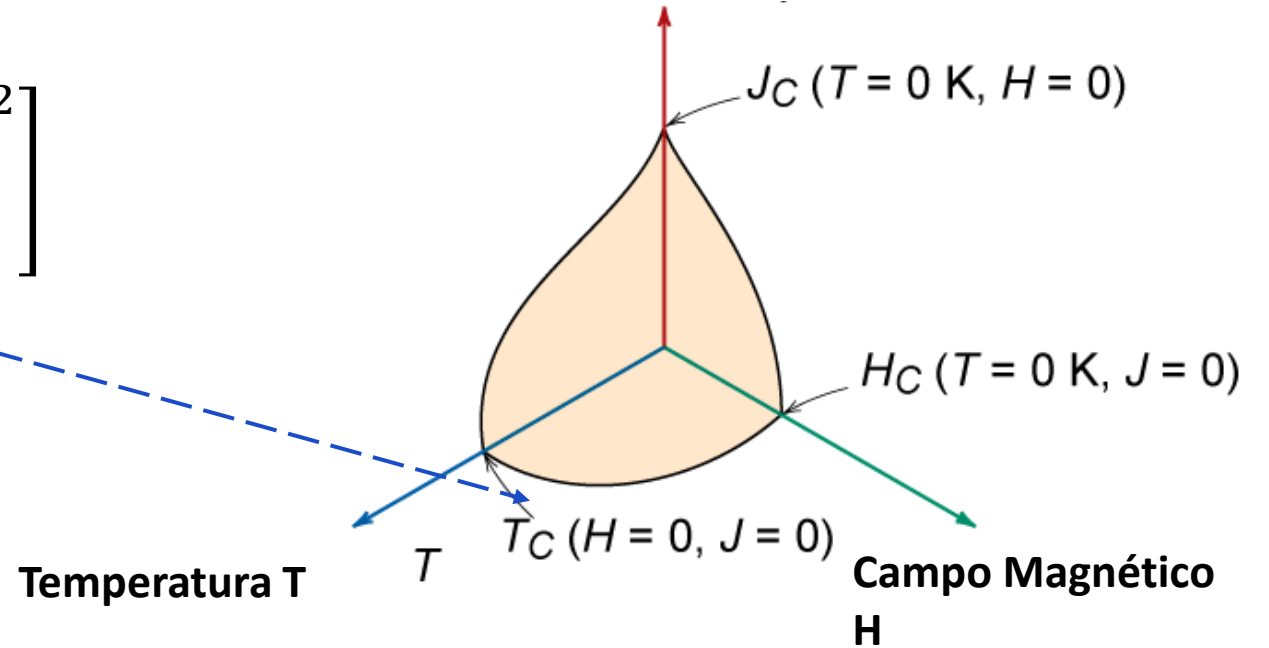


Observe que a existência de uma densidade de corrente crítica ( $J_c$ ), ou seja, uma densidade de corrente máxima que pode passar no material, está diretamente relacionada à existência do campo crítico (um campo máximo).

# Dependência e $H_{c2}$ com a temperatura

$$H_{c2}(T) = H_{c2}(0) \left[ 1 - \left( \frac{T}{T_c} \right)^2 \right]$$

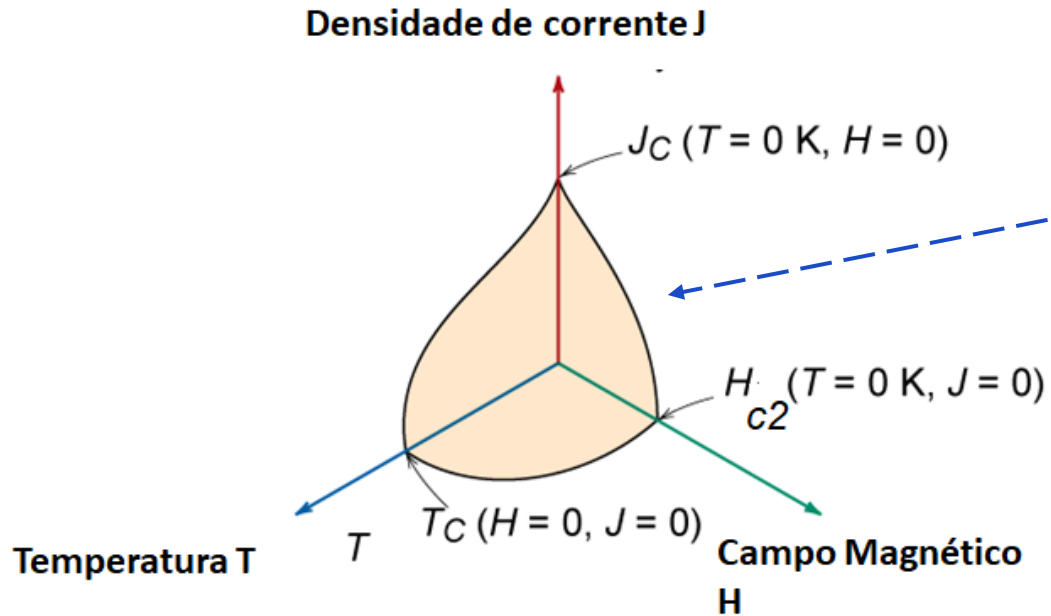
Densidade de corrente J



$$B_{c2}(T) = B_{c2}(0) \left[ 1 - \left( \frac{T}{T_c} \right)^2 \right]$$

Pois em  $H_{c2}$  o material é paramagnético e  $M \approx 0$

# Dependência da densidade de corrente $J$ com o campo magnético $H$



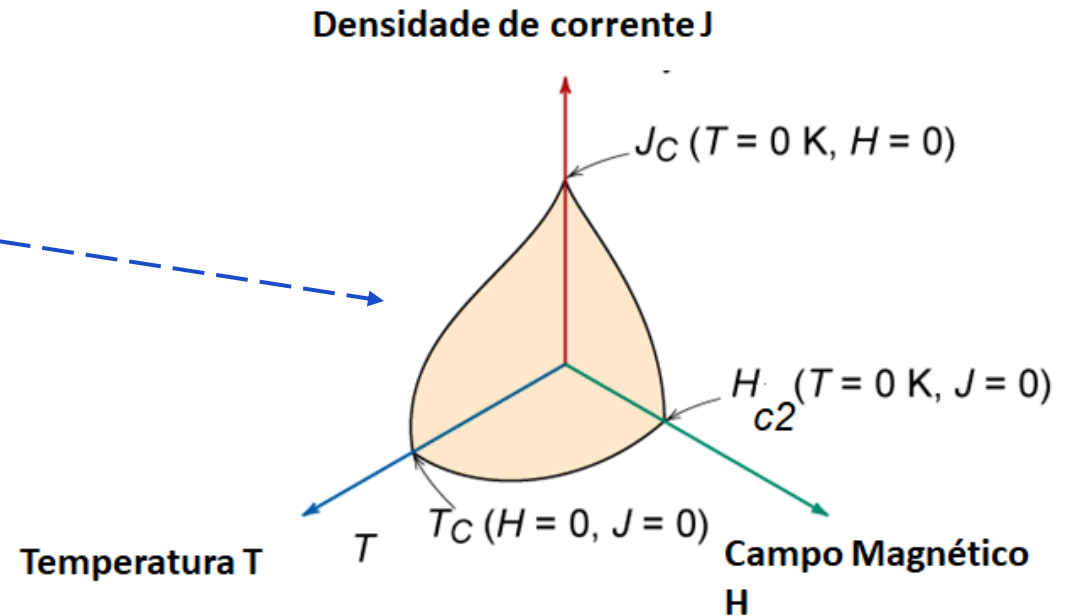
$$J_c = C \frac{H_{c2}^{5/2}}{\kappa^2} \frac{\delta H_{c2}}{H_{c2}} \left( \frac{H}{H_{c2}} \right)^{1/2} \frac{1}{H} \left( 1 - \frac{H}{H_{c2}} \right)$$

Depende do material e tipos de defeitos que têm nele. Não é uma propriedade intrínseca como  $T_c$  e  $H_{c2}$

# Dependência da densidade de corrente $J$ com a temperatura $T$

$$J_c = C \frac{H_{c2}^{5/2}}{\kappa^2} \frac{\delta H_{c2}}{H_{c2}} \left( \frac{H_i}{H_{c2}} \right)^{1/2} \frac{1}{H_i} \left( 1 - \frac{H_i}{H_{c2}} \right)$$

$$H_{c2}(T) = H_{c2}(0) \left[ 1 - \left( \frac{T}{T_c} \right)^2 \right]$$



# Origem Quântica da Supercondutividade

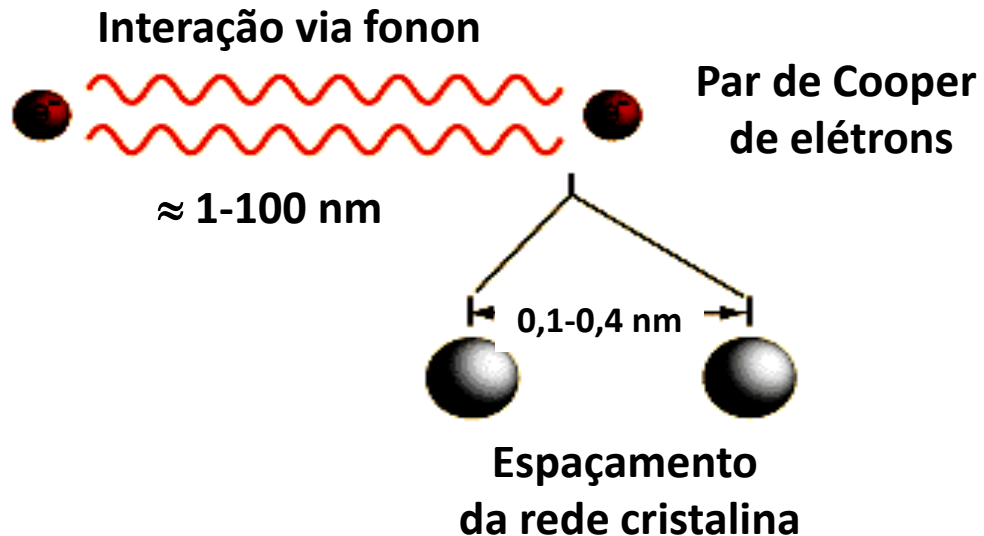
- Teoria BCS (1957)



**J. Bardeen L. Cooper R. Schrieffer**

# Origem Quântica da Supercondutividade

- Interação **atrativa** elétron-elétron mediada por fônons
- Pares de Cooper – 1956, previsto teoricamente por **Leon Cooper**



PHYSICAL REVIEW  
VOLUME 104, NUMBER 4  
NOVEMBER 15, 1956

## Bound Electron Pairs in a Degenerate Fermi Gas\*

LEON N. COOPER

*Physics Department, University of Illinois, Urbana, Illinois*

(Received September 21, 1956)

Supercondutividade existe enquanto a Interação atrativa não é “quebrada” pela energia térmica de vibração dos átomos.



Elemento (Tipo I)	$T_c$ (K)
-------------------	-----------

Ga	1.09
Hg	4.15
In	3.4
La	5.9
Mo	0.92
Nb	9.2
Pb	7.2
Ru	0.49
Sn	3.7
Ta	4.39
Ti	0.39
V	5.3
Zn	0.85
Zr	0.55



### Tipo II

Material	$T_c$ [K]
Nb-Ti alloys	~ 9.6
Nb <sub>3</sub> Sn	18.1
Nb <sub>3</sub> Ge	23.2
Y <sub>1</sub> Ba <sub>2</sub> Cu <sub>3</sub> O <sub>7-x</sub> (YBCO)	90
Bi <sub>2</sub> Sr <sub>2</sub> Ca <sub>1</sub> Cu <sub>2</sub> O (Bi2212)	80
Bi <sub>2</sub> Sr <sub>2</sub> Ca <sub>2</sub> Cu <sub>3</sub> O (Bi2223)	125

**High  $T_c$  superconductors**

Material	$T_c$ (K)
RFeAs(O, F) (R=Nd, Sm)	47–55
(Ba, K)Fe <sub>2</sub> As <sub>2</sub>	37–38
Ba(Fe, Co) <sub>2</sub> As <sub>2</sub>	22–25
BaFe <sub>2</sub> (As, P) <sub>2</sub>	30–31
Fe(Se, Te)	14–16

**Nb pode ser tipo I ou Tipo II, dependendo da pureza.**



BCS prevê máximas  $T_c \approx 30 - 40\text{K}$

Para  $T > 30 - 40\text{K}$  a energia térmica bloquearia a interação elétron-fônon.

Qual o mecanismo que resulta em supercondutividade nos High  $T_c$ ??

Ainda há muita controvérsia

$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  e  $\text{La}_{(2-x)}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$  ( $T > 40\text{K}$ )  $\rightarrow$  Excesso de cargas positivas  $\rightarrow$  *supercondutor tipo-p*;

$\text{La}_2\text{CuO}_{(4+x)}$   $\rightarrow$  excesso de elétrons  $\rightarrow$  *supercondutor tipo-n*.





# Teorias relacionadas com Supercondutores High $T_c$

1. Resonating valence bonds
2. Spin fluctuations
3. Stripes
4. Anisotropic phonons
5. Bipolarons
6. Excitons
7. Kinetic Energy lowering
8. d-density wave
9. Charge fluctuations
10. Flux phases
11. Gossamer  
superconductivity
12. Spin bags
13. SO(5)
14. BCS/BEC crossover
15. Plasmons
16. Spin liquids

Para não citar ...

Interlayer tunneling

Marginal Fermi liquid

van Hove singularities

Quantum critical points

Anyon superconductivity

Slave bosons

Dynamical mean field theory

