

Consequências da existência da “super onda” e sua fase única

**Falando mais um pouquinho sobre os
vórtices ou linhas de fluxo**

Comprimentos de coerência e de penetração do campo

Pode-se definir o parâmetro $\kappa = \lambda_s / \xi_s$. Supercondutores com $\kappa > \frac{1}{\sqrt{2}} = 0,71$ são do tipo II e os com $\kappa < \frac{1}{\sqrt{2}}$ são tipo I

$$\xi_s = (\xi_0 \ell_n)^{1/2}$$

$$\lambda_s = \lambda_s^0 \left(\frac{\xi_0}{\ell_n} \right)^{1/2}$$

$$\xi_0 = \frac{\hbar v_F}{\pi \Delta_0}$$

$$\lambda_s^0 = \left(\frac{m_0 c^2}{4\pi n \hat{\mu} e^2} \right)^{1/2}$$

ℓ_n é o livre caminho médio para os portadores de carga no estado normal.

$$\kappa \equiv \frac{\lambda_s}{\xi_s} = \frac{\lambda_s^0}{\ell_n}$$

Quanto menor ℓ_n , maior é a resistividade do estado normal, menor o valor de ξ_s e maior o valor de κ . Logo, em supercondutores reais, $\lambda_s \gg \xi_s \rightarrow$ núcleo do vórtice é pequeno comparado com a região em que a corrente decai.

$$\kappa = \frac{1}{\sqrt{2}} = 0,71$$

Material	λ_s (Å)	ξ_s (Å)	λ_s/ξ_s
Sn	3.400	23 000	0,16
Al	1.600	160 000	0,01
Pb	3.700	8.300	0,45
Cd	11.000	76.000	0,14
Nb	3.900	3.800	1,02
NbTi	2.000	50	40
YBa ₂ Cu ₃ O _{7-x}	170	3,0	56
YBa ₂ Cu ₃ O _{7-x} ⊥	6.400	16,4	390

Tipo I

Tipo II

Vamos pensar no que significam estes números?

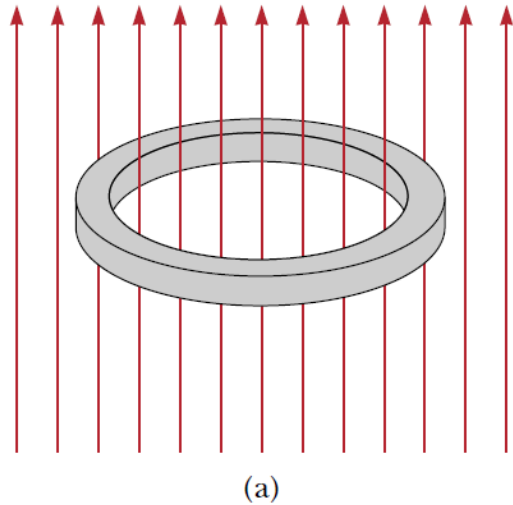
Quantização de fluxo – observado antes da previsão da existência dos vórtices

- O fenômeno de exclusão de fluxo por um supercondutor se aplica apenas a um objeto simplesmente conectado - ou seja, sem buracos ou seu equivalente topológico.
- Percebendo que a supercondutividade é fundamentalmente um fenômeno quântico, Fritz London sugeriu que o fluxo magnético preso deveria ser quantizado em unidades de h/e (A carga eletrônica e no denominador surge porque London assumiu que a corrente persistente é transportada por elétrons individuais).
- Delicadas medições em cilindros ocos supercondutores muito pequenos mostraram que o quantum de fluxo é metade do valor postulado por London. Ou seja, o fluxo magnético é quantizado não em unidades de h/e , mas em unidades de $h/2e$.

Temperatura é reduzida para $T < T_c$.

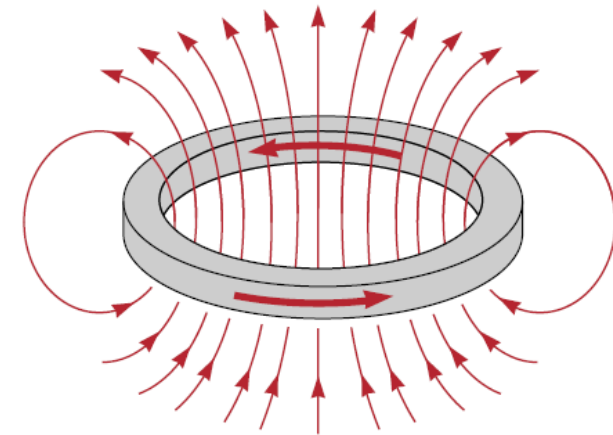
Quantização de fluxo

- O fenômeno de exclusão de fluxo por um supercondutor se aplica apenas a um objeto simplesmente conectado - ou seja, sem buracos ou seu equivalente topológico. Isto foi observado pelo experimento a seguir.



(a) Laço supercondutor no estado normal ($T > T_c$) e com campo magnético aplicado.

Temperatura é reduzida para $T < T_c$ e H diminui a zero.



(b) Depois que o campo externo é removido, o fluxo através do orifício permanece preso, e uma corrente induzida aparece no material que forma o laço.

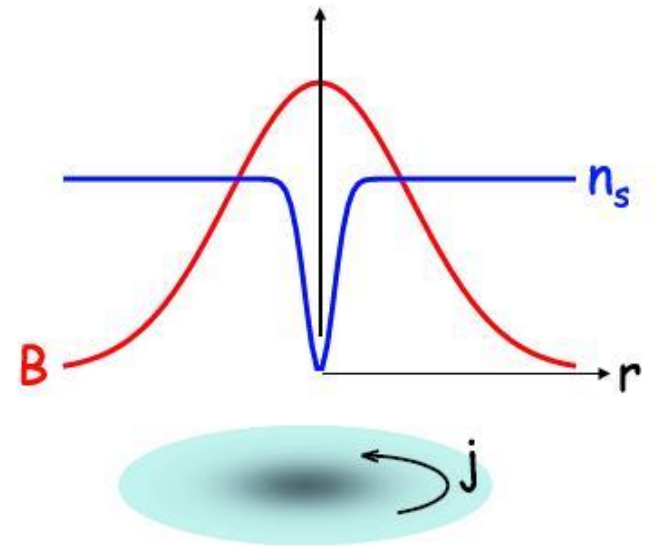
Quantização de fluxo



Estado Misto

- Um quantum de fluxo magnético passa por cada vórtice (linha de fluxo, fluxóide)
- Para qualquer que seja a composição química do supercondutor e seja qual for o valor preciso da temperatura e do campo magnético.

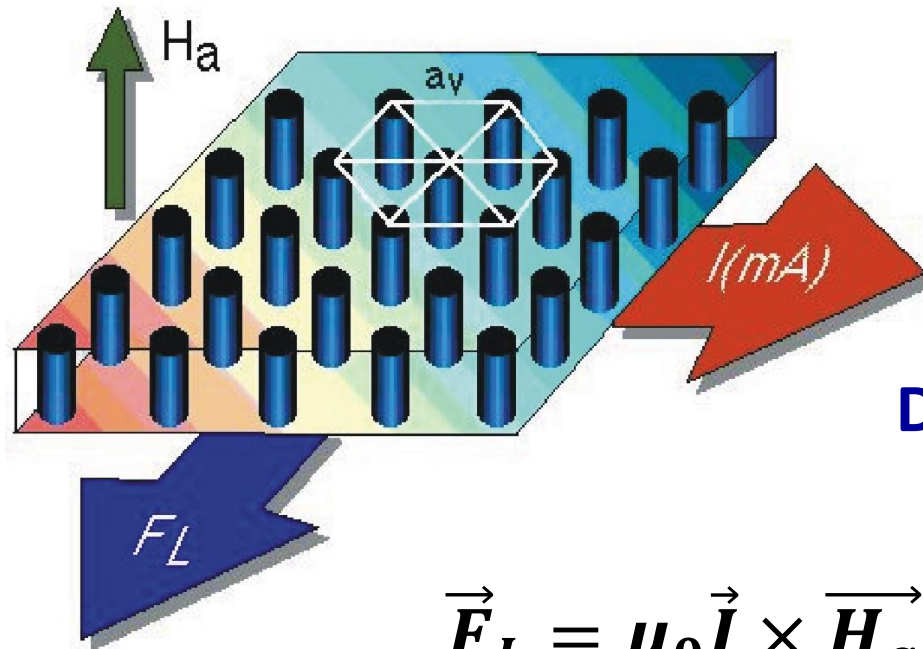
$$\Phi_0 = \frac{h}{2e} = 2.0679 \times 10^{-15} \text{ T} \cdot \text{m}^2$$



MOVIMENTO DOS VÓRTICES

- A passagem de corrente por um supercondutor tipo II pode causar a movimentação dos vórtices e a degradação da corrente crítica do material.

$$\Phi = \frac{nh}{2e} = n\Phi_0$$



$$\vec{F}_L = \mu_0 \vec{J} \times \vec{H}_a$$

F_L
Movimento do vórtice

Dissipação de energia (núcleo normal) $\rightarrow \uparrow T$

$T > T_c \Rightarrow$ estado normal

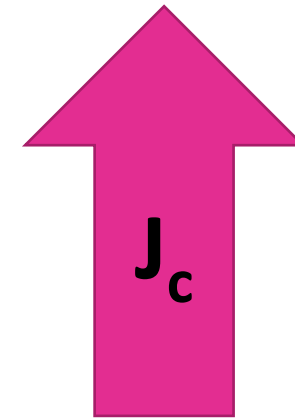
Como parar o movimento do vórtice?

Aprisionando-o com a introdução de “defeitos” no material.

$$F_p > F_L$$

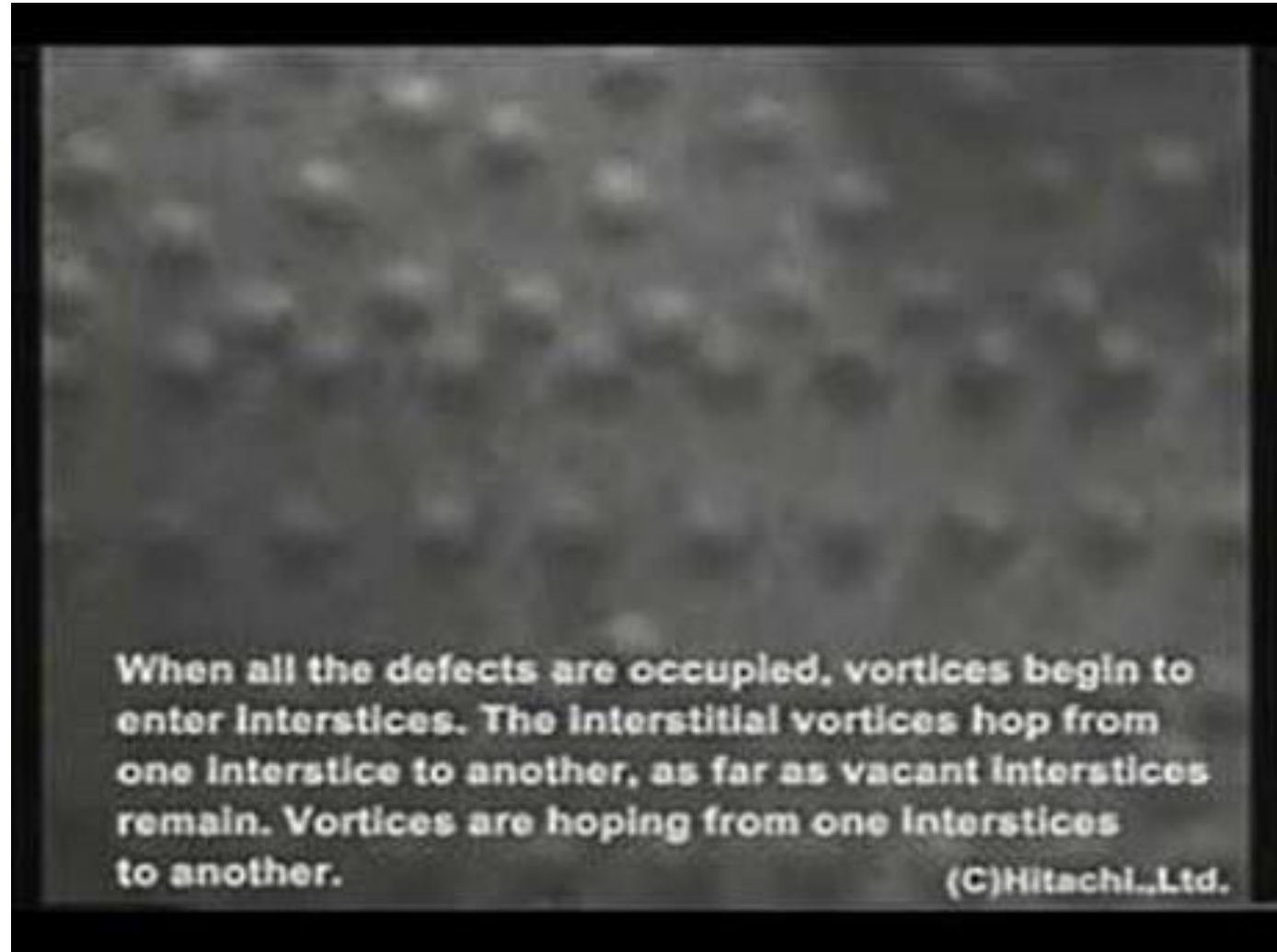
F_p é a força de aprisionamento

$$\vec{F}_L = \mu_0 \vec{J} \times \vec{H}_a = \vec{F}_p$$



- Fases não supercondutoras
- Contornos de grãos
- Fases supercondutoras com propriedades diferentes da matriz
- Vacâncias e intersticiais
- Fases artificiais

Video –
Vortices em
Nb



https://youtu.be/7_ZgiumS41Q

Questão conceitual

1) Quanticamente, o estado supercondutor:

- a) É composto por elétrons individuais com spin $S = 0$, que constituem um estado que se comporta como um superfluido, ou seja, um estado condensado.
- b) É um estado condensado de partículas que são bósons, mas sendo formado por elétrons precisam respeitar o Princípio de exclusão de Pauli, o que não ocorre.
- c) Tem uma função de onda supercondutora que é não oscilante; a fase da onda tem um valor determinado, que pode ser constante ou pode variar, mas a fase não pode ser descontínua.
- d) Corresponde a pares de elétrons com spins contrários, que se comportam como um material que possui ordenamento antiferromagnético.
- e) nenhuma das alternativas.

Questão conceitual

2) A teoria BCS diz que a temperatura crítica máxima possível de um supercondutor é $\sim 40\text{K}$. Esta é uma limitação, pois não explica os supercondutores de alta temperatura (HTS), já que esses têm $T_c > 40\text{ K}$ (92K para o YBaCaCuO). Qual a limitação imposta nesta teoria?

Questões numéricas

- 1) O chumbo é um supercondutor do tipo I e tem temperatura crítica de 7,2K. O campo crítico em 4,2K é de 530 Oe. Qual o valor do campo magnético crítico calculado em 3K e 10 K.
- 2) No estado Meissner, no material supercondutor, quais são os valores das propriedades magnéticas: Magnetização M ; Indução magnética B e Permeabilidade magnética relativa μ_r ?

Como se comporta o supercondutor diante da energia eletromagnética (absorção de fótons)?

- Nos supercondutores, os fótons podem ser absorvidos pelo material quando sua energia é maior que a energia do gap.
- De maneira semelhante aos semicondutores, os supercondutores absorvem fótons se a energia do fóton exceder a energia do gap, 2Δ . Se a energia do fóton for menor que 2Δ , não ocorre absorção.
- Quando os fótons são absorvidos pelo supercondutor, os pares de Cooper são separados. A absorção de fótons em supercondutores ocorre tipicamente na faixa entre as frequências de microondas e infravermelho.

Absorção de Radiação por Chumbo

- Encontre a **frequência mínima** de um fóton que pode ser absorvido pelo chumbo em $T = 0 \text{ K}$ para separar um par de Cooper.
- 2Δ para chumbo é $2,73 \times 10^{-3} \text{ eV}$. Lembrando que a energia do fóton é e observando que $1 \text{ eV} = 1,60 \times 10^{-19} \text{ J}$, encontramos:

$$hf = 2\Delta = 2.73 \times 10^{-3} \text{ eV} = 4.37 \times 10^{-22} \text{ J}$$

**Comprimento de
onda máximo**

$$f = \frac{4.37 \times 10^{-22} \text{ J}}{6.626 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}} = 6.60 \times 10^{11} \text{ Hz}$$

$$\lambda = c/f = 0.455 \text{ mm}$$