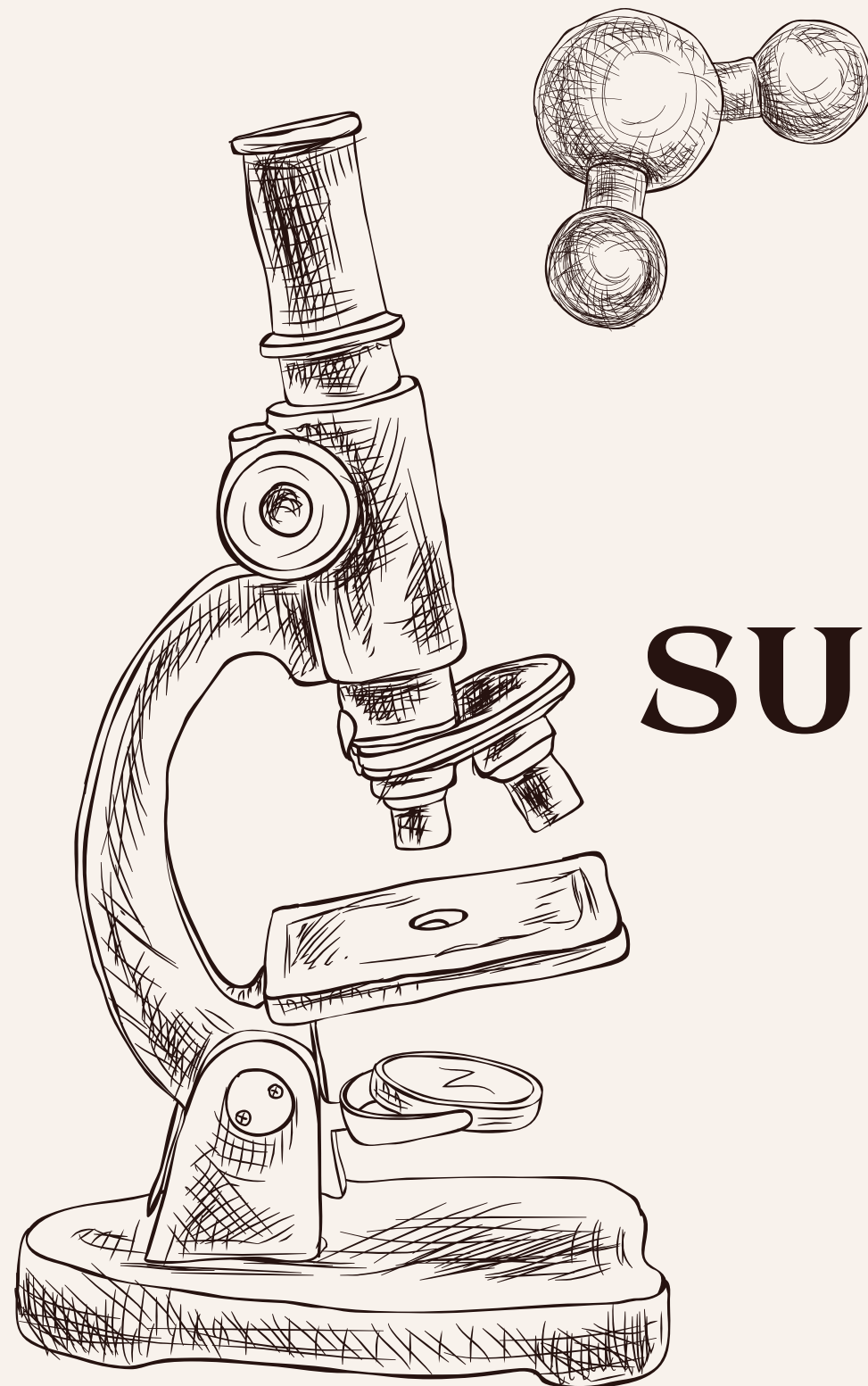




# MATERIAIS SUPERCONDUTORES

Desafios e oportunidades para  
aplicações em larga escala

Gabriel Costa Oliveira

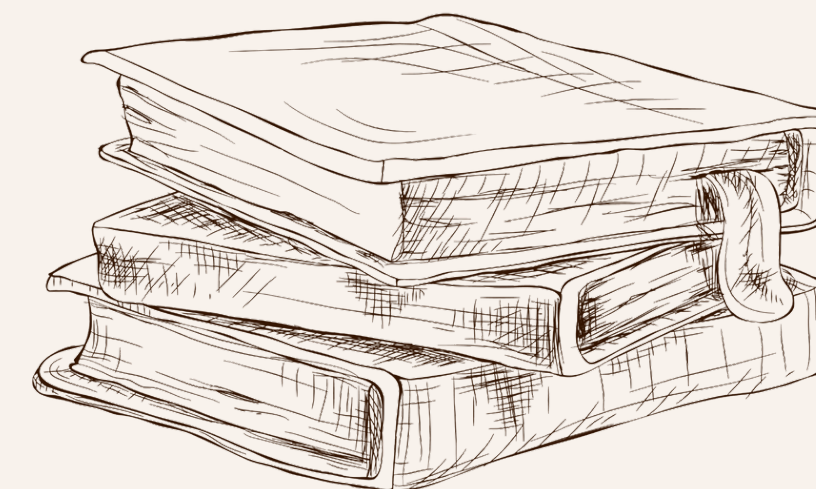
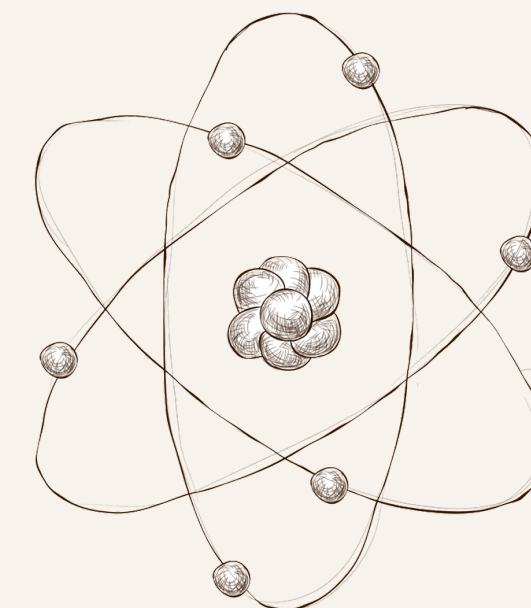
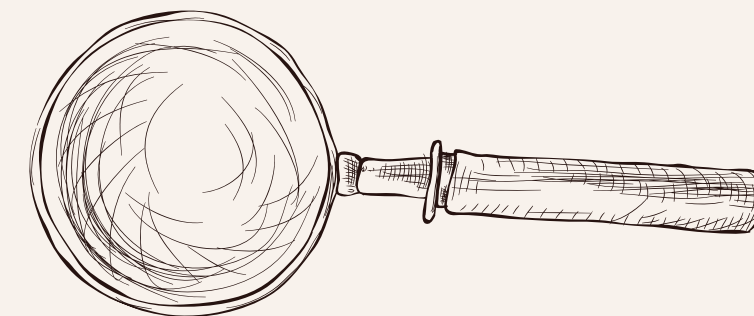
Kauan Ramos

Mario Hideki

Matheus Capelin

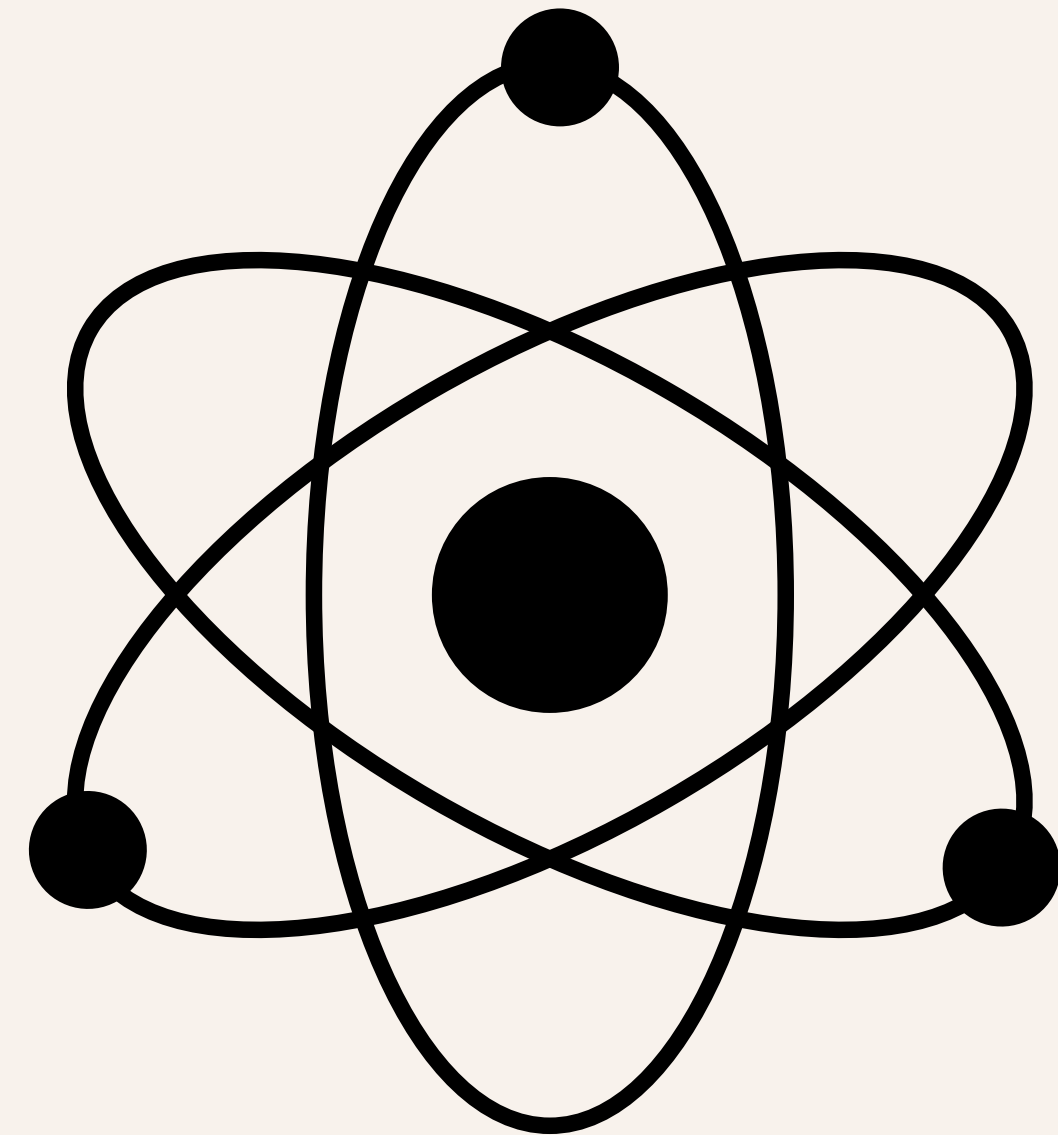
Matheus Venâncio

Pedro Ruiz



# Tópicos

- Histórico
- Fundamentação Teórica
- Materiais relevantes
- Estado da arte
- Aplicações
- Perspectivas Futuras



# História da supercondutividade

**1908 - Liquefação do hélio por Heike Kamerlingh Onnes;**



**Heike Kamerlingh Onnes**

**1911 - Descoberta da supercondutividade com o resfriamento do mercúrio;**



**Heinz London**

**1933 - Observação do efeito Meissner;**

**1935 - Equações de London;**

**1957 - Teoria BCS;**

**1962/1963 - Efeito Josephson;**

**1986 - Supercondutividade acima de 30 K;**



**Walther Meissner**



**Brian David Josephson**

# Supercondutividade – A

**A.1**

Temperatura Crítica e Campo Crítico

**A.2**

Efeito Meissner

**A.3**

Supercondutores Tipo I e II

**A.4**

Gap de energia

# Temperatura Crítica e Campo Crítico

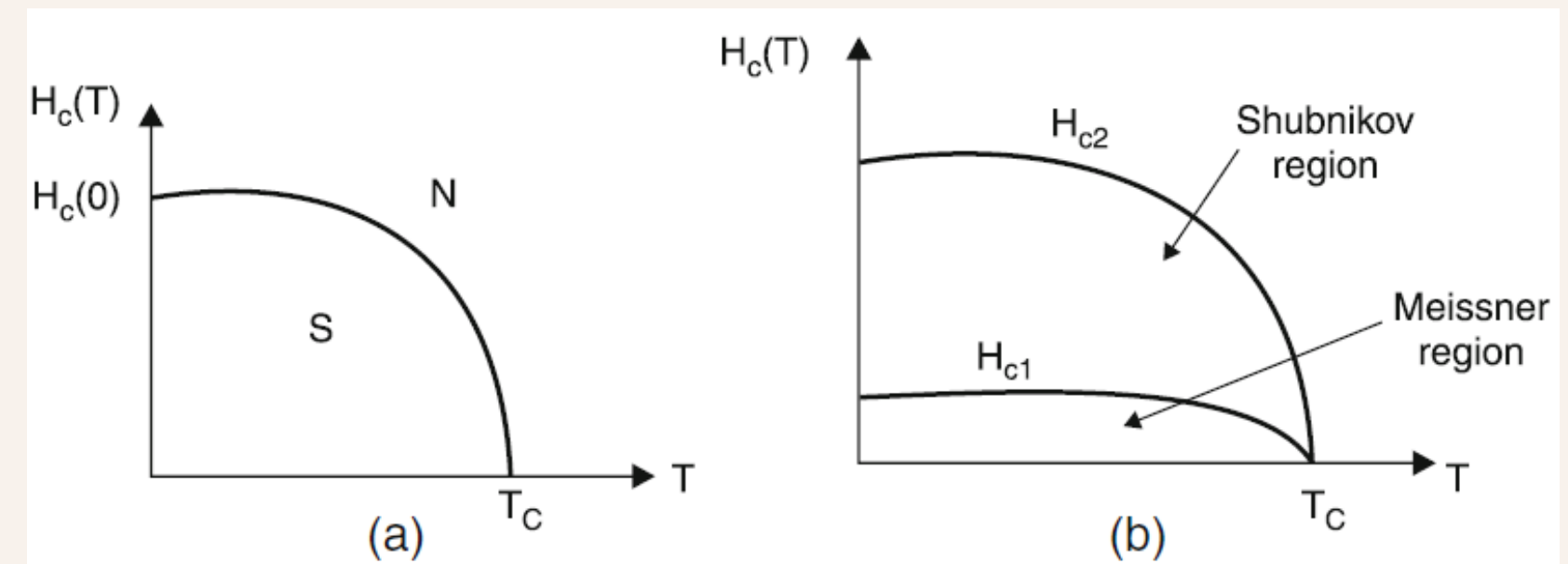
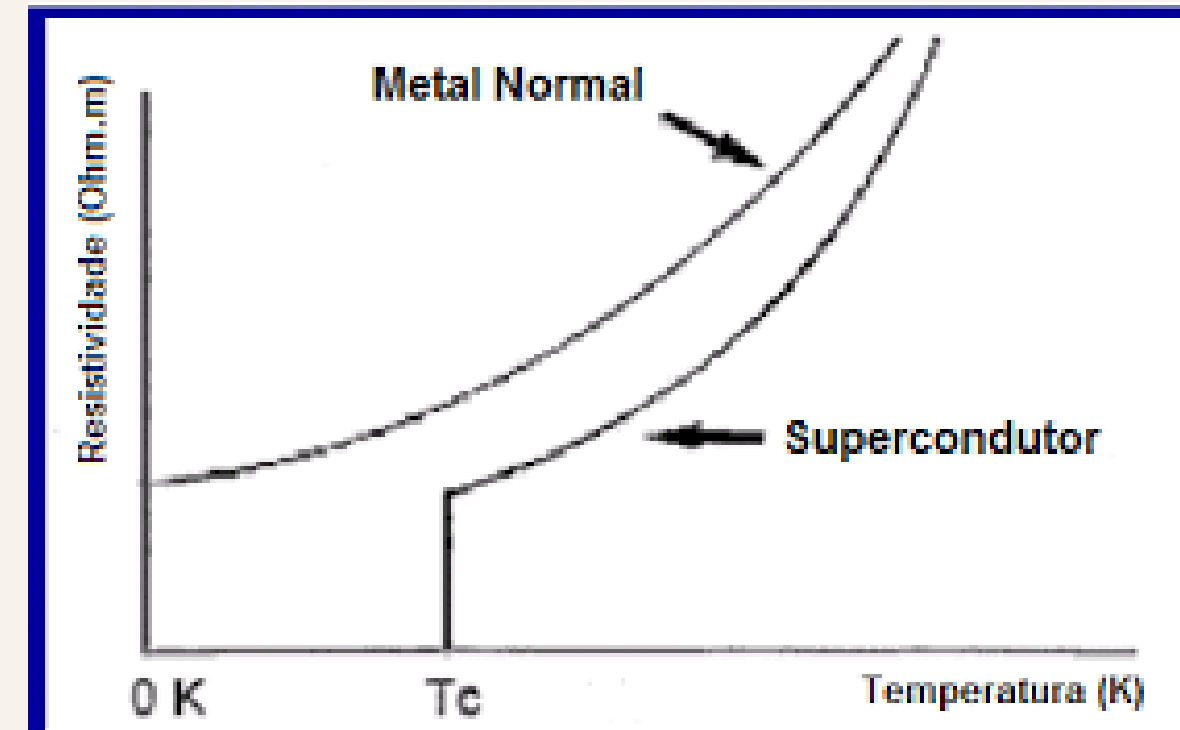
A temperatura crítica  $T_c$  é o ponto em que a resistividade do material passa a ser zero e, conseqüentemente, apresenta diamagnetismo perfeito.

$T < T_c$  ~ Estado Supercondutor

$T > T_c$  ~ Estado normal

O campo crítico ( $H_c$ ) é o máximo valor do campo magnético que o supercondutor pode suportar antes de retornar ao estado normal. É possível calcular o campo crítico por meio da equação:

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

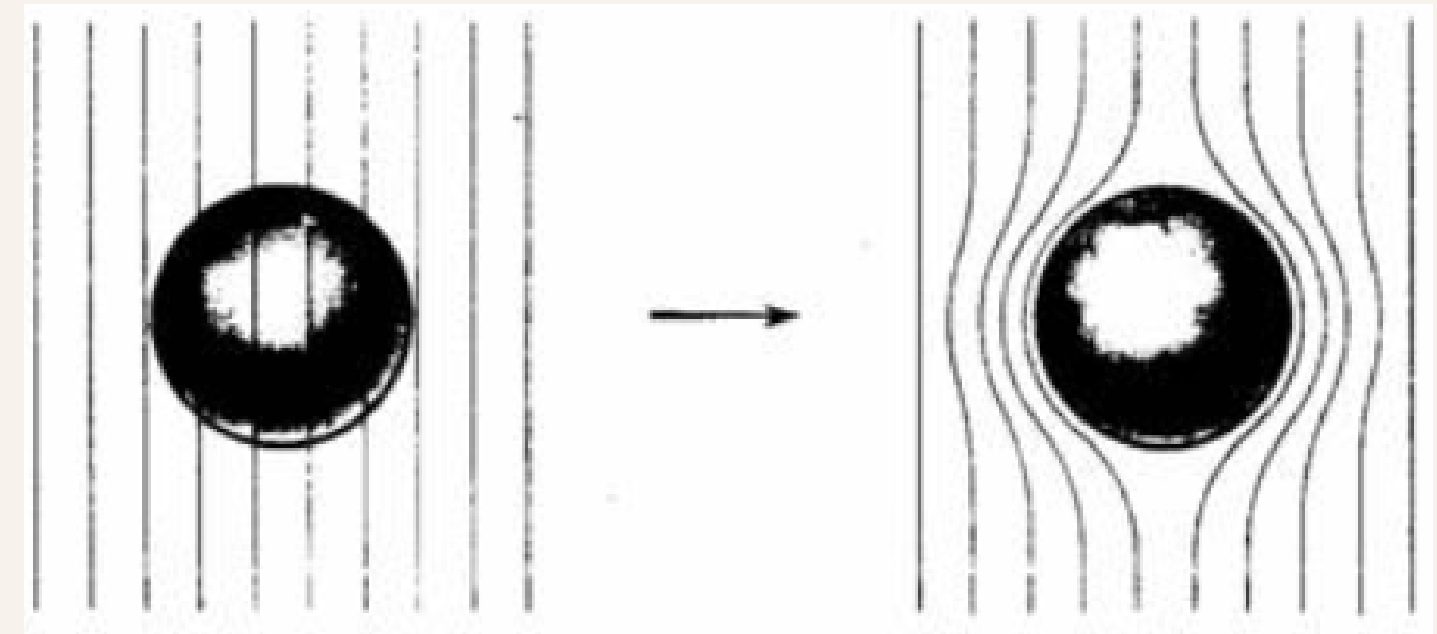


# Efeito Meissner

O efeito Meissner trata-se de como um supercondutor expelle o campo magnético interior, independente se é aplicado um campo externo durante o processo de resfriamento.

Quando há campo magnético externo, é induzido no material correntes superficiais que anulam esse campo aplicado, resultando em  $B = 0$ .

Com isso é possível concluir matematicamente que o estado supercondutor representa o diamagnetismo perfeito



$$B = \mu_o(H + M)$$

$$\textit{considerando } B = 0$$

$$M = -H \quad \textit{mas como } M = \chi H$$

Portanto

$$\chi = -1$$

# Classificação dos supercondutores

Supercondutores podem ser classificados em tipo I e tipo II dependendo de alguns parâmetros como a relação do comprimento de penetração de London e o comprimento de coerência.

$$\kappa = \frac{\lambda}{\xi}$$

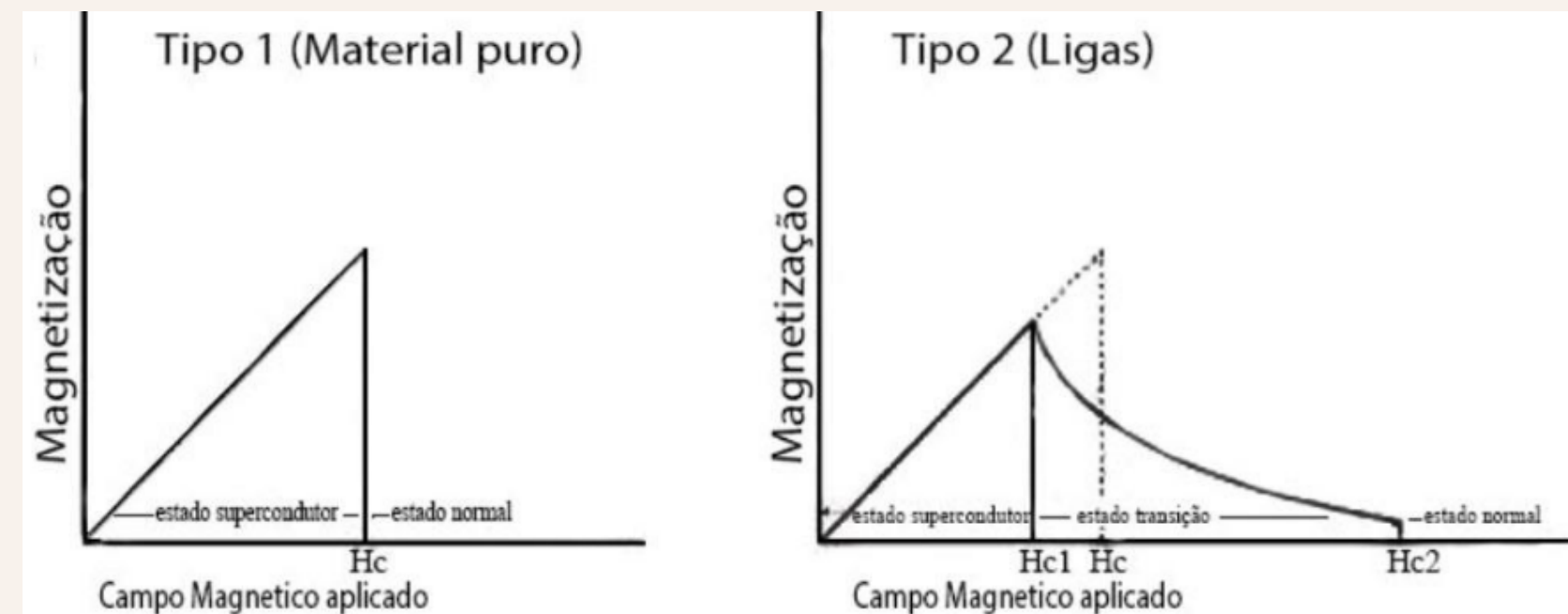
$$\kappa < \frac{1}{\sqrt{2}}$$

Supercondutor tipo I

$$\kappa > \frac{1}{\sqrt{2}}$$

Supercondutor tipo II

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



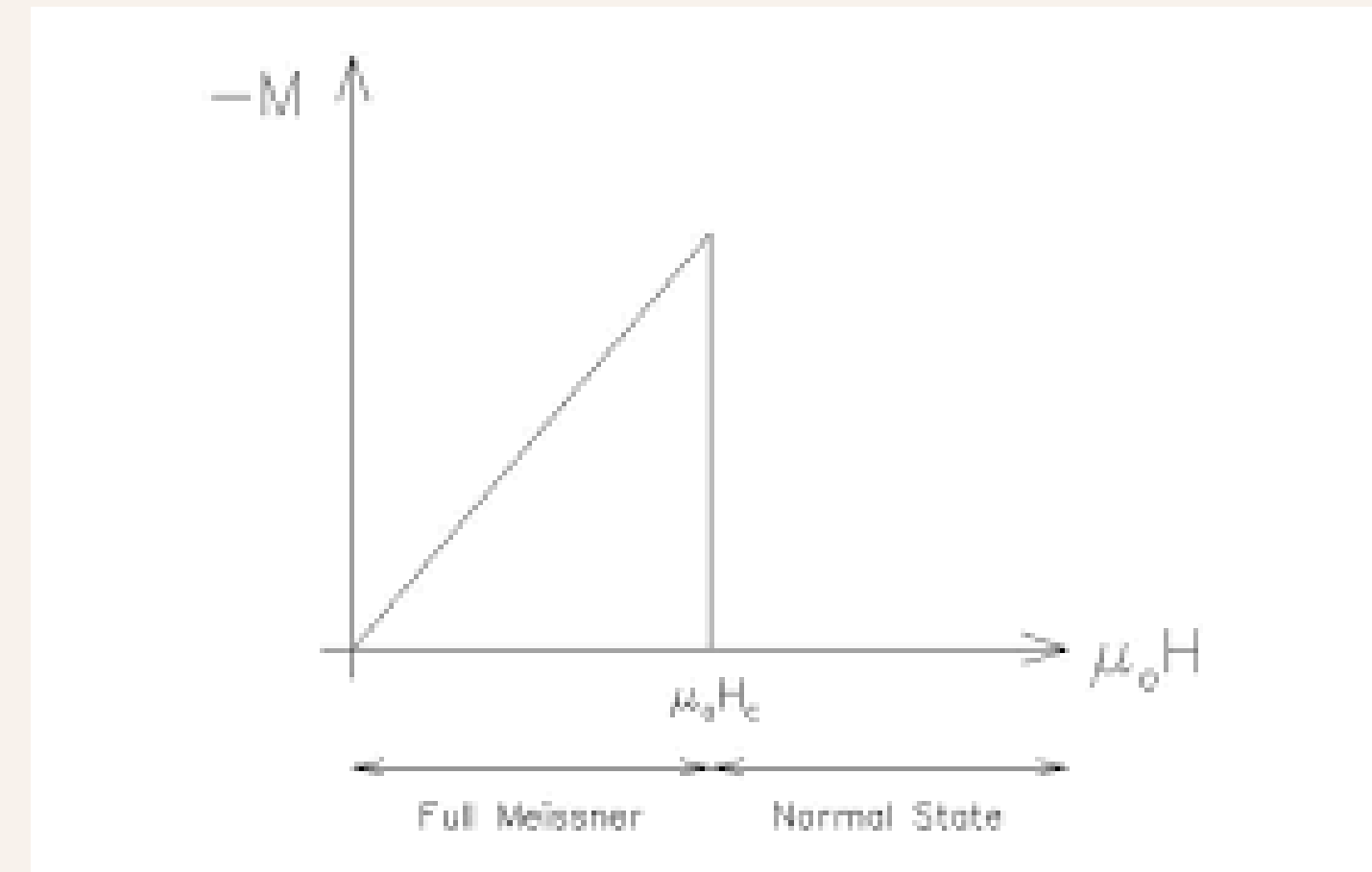
Há também a diferença de pureza entre os tipos de supercondutores, geralmente o tipo I são aqueles com o material puro enquanto o tipo II são ligas ou dopados.

# Supercondutores tipo I

Supercondutores do tipo I são aqueles que não apresentam estado misto, ou seja, apenas o estado Meissner completo.

Em sua grande maioria são materiais puros, com pequenas exceções dependendo do teor da dopagem.

Esse tipo de supercondutor não possui muitas aplicações, pois a temperatura crítica necessária para atingir o estado é em uma faixa de 0,015 mK ~ 10 K



É possível calcular o campo crítico utilizando a seguinte equação:

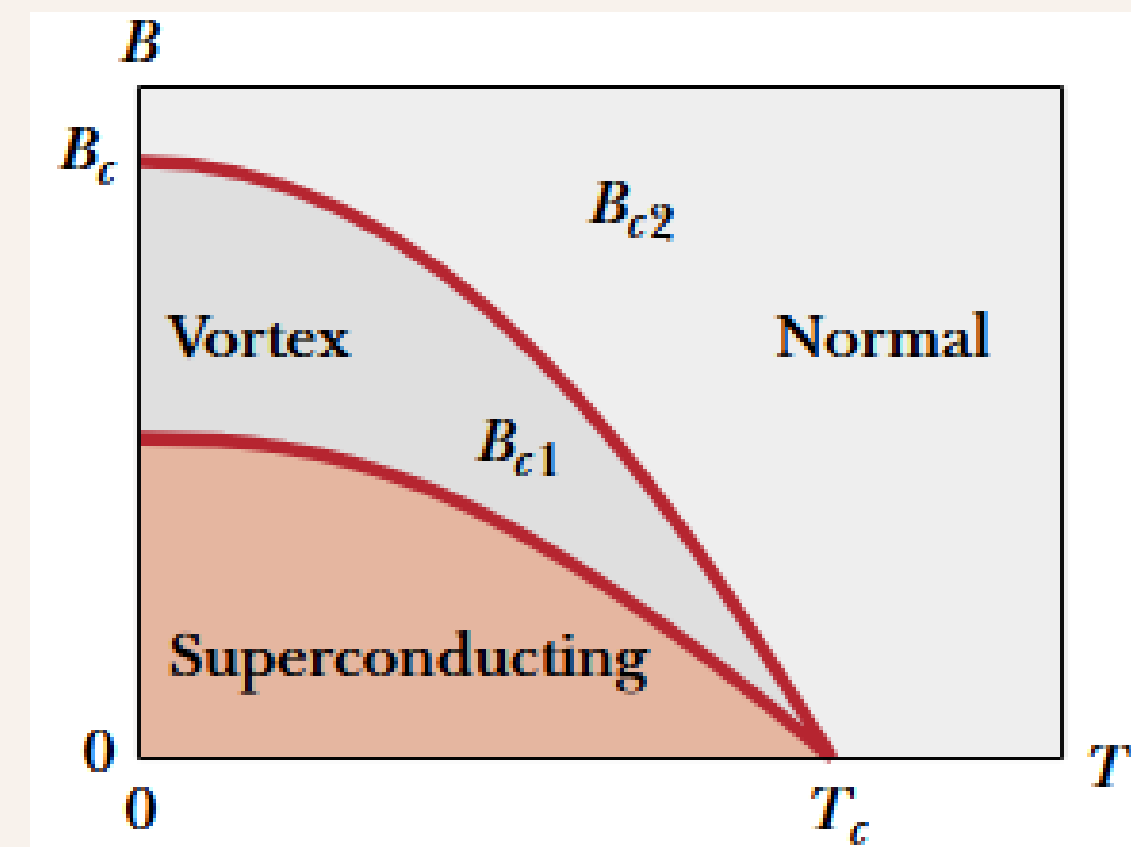
$$H_c(T) = H_c(0) \left[ 1 - \left( \frac{T}{T_c} \right)^2 \right]$$

# Supercondutores tipo II

Supercondutores do tipo II são aqueles que apresentam estado misto além do estado Meissner completo.

Supercondutores tipo II são constituídos principalmente por ligas e compostos dopados.

Esse tipo possui diversas aplicações, pois apresentam maior temperatura crítica em geral que os supercondutores tipo I.



É possível calcular os campos críticos utilizando as seguintes equações:

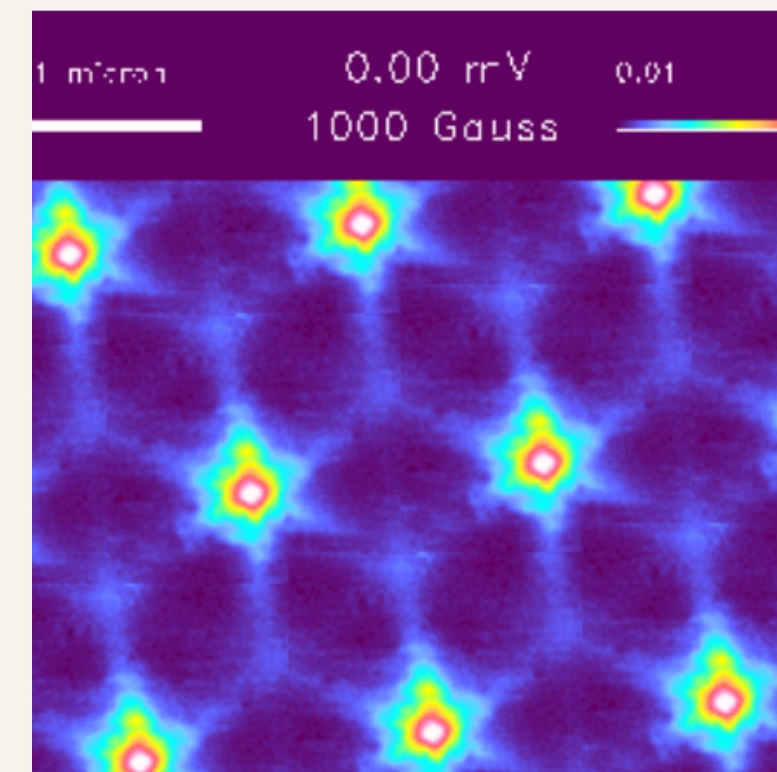
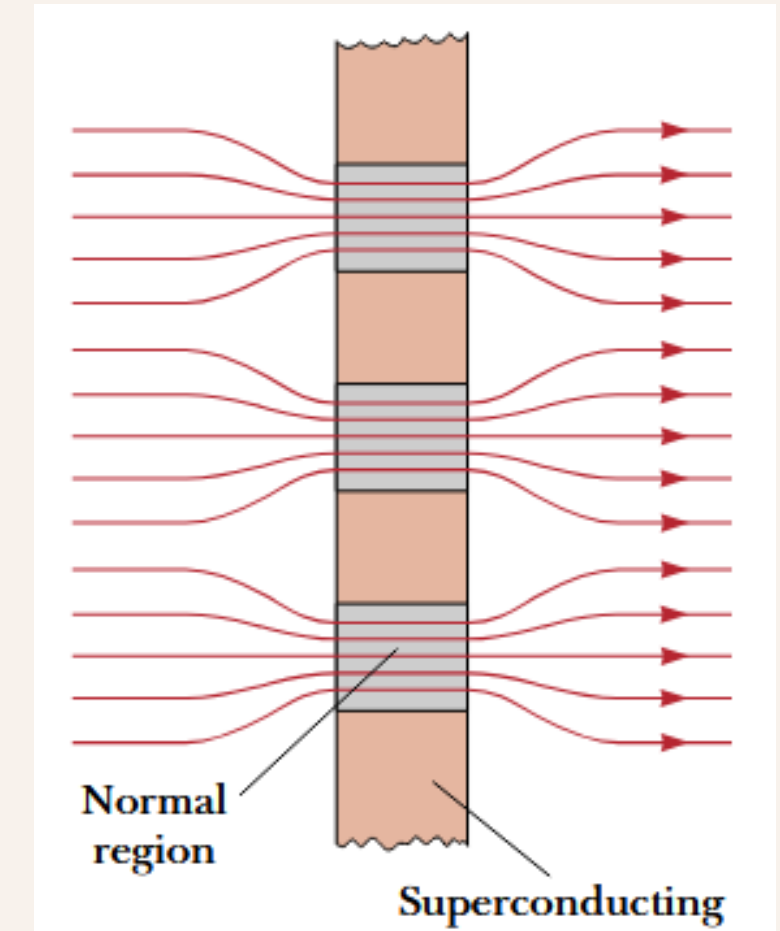
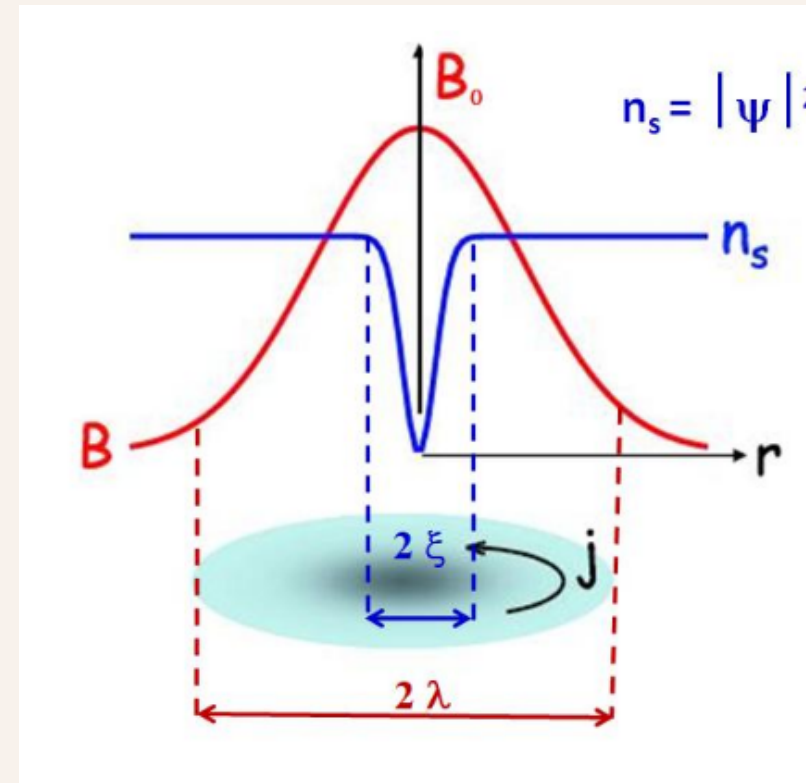
$$H_{c1} = \frac{\phi_o}{4\pi\lambda^2} \ln \kappa \quad H_{c2} = \frac{\phi_o}{2\pi\xi^2}$$

# Estado Misto

O estado misto é quando há coexistência entre o estado supercondutor e o estado normal, isso ocorre devido à presença de vórtices no material que permitem a passagem de campo magnético.

Esse o aumento da passagem de campo ocorre de maneira gradual, atingindo o valor máximo no centro do vórtice, além disso, há o surgimento de correntes supercondutoras nas bordas dos vórtices para proteger as regiões supercondutoras .

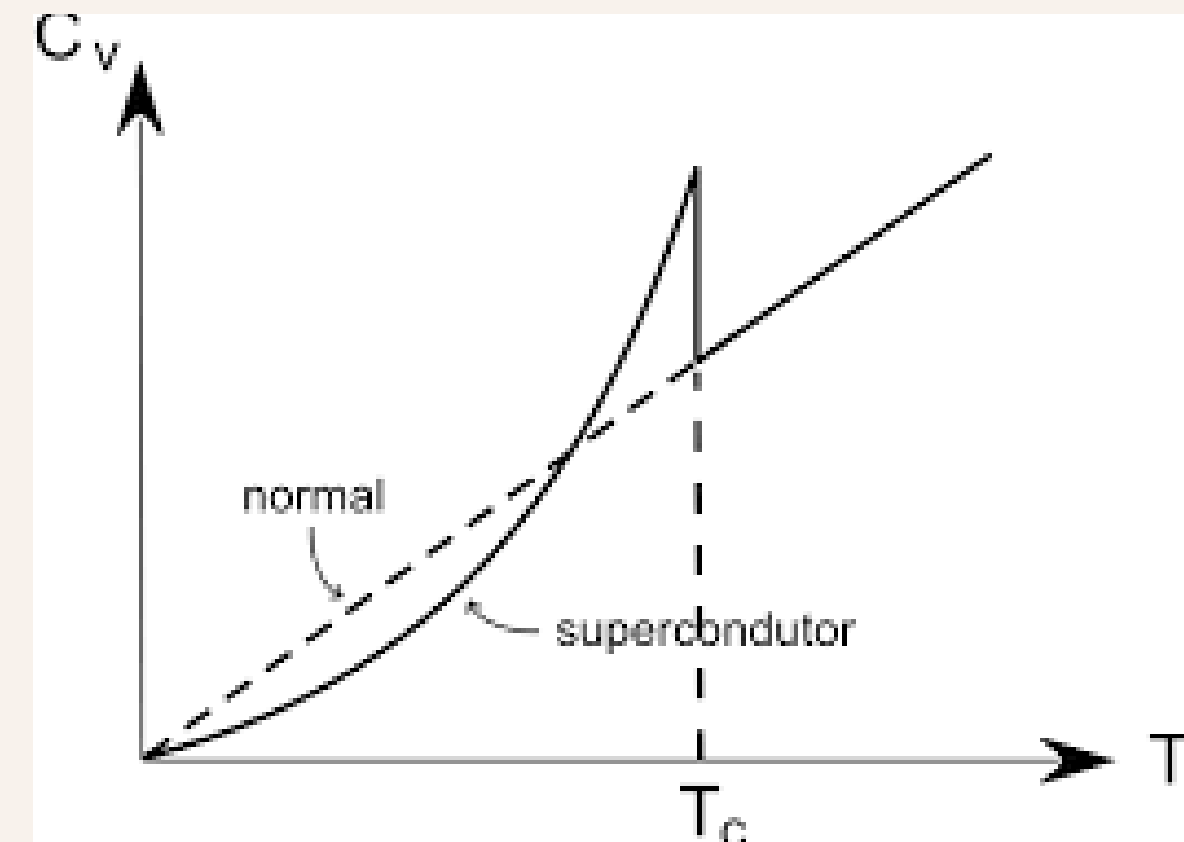
\*Rede de Abrikosov



# Energia de gap

Os supercondutores apresentam um *gap* de energia entre o estado supercondutor e o estado normal. Isso ocorre, pois, com a formação dos pares de Cooper, o material entra no estado condensado (estado de menor energia) assim gerando um gap em torno da camada de Fermi.

Quando é fornecido energia o suficiente para superar esse gap, o material volta ao seu estado normal e os pares de Cooper são quebrados.



Além disso, é possível estudar o comportamento do calor específico do supercondutor, apresentando uma queda exponencial ao atingir a temperatura crítica do material, mostrando a sensibilidade para com a temperatura.

$$c_s \propto e^{\frac{-\Delta}{kT}} \quad \text{com} \quad \Delta = \frac{E_g}{2}$$

# Supercondutividade – B

**B.1**

A equação de London

**B.2**

Teoria Microscópica

**B.3**

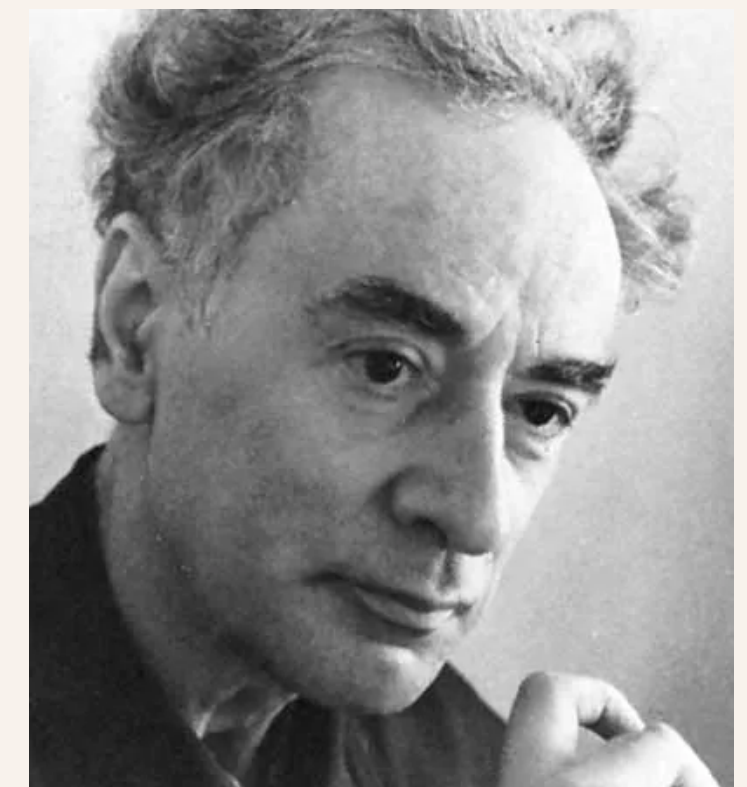
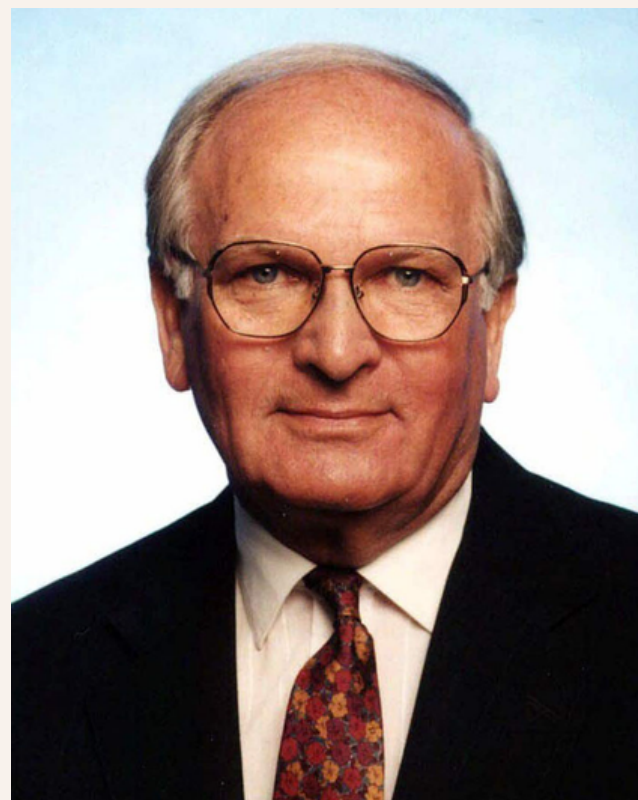
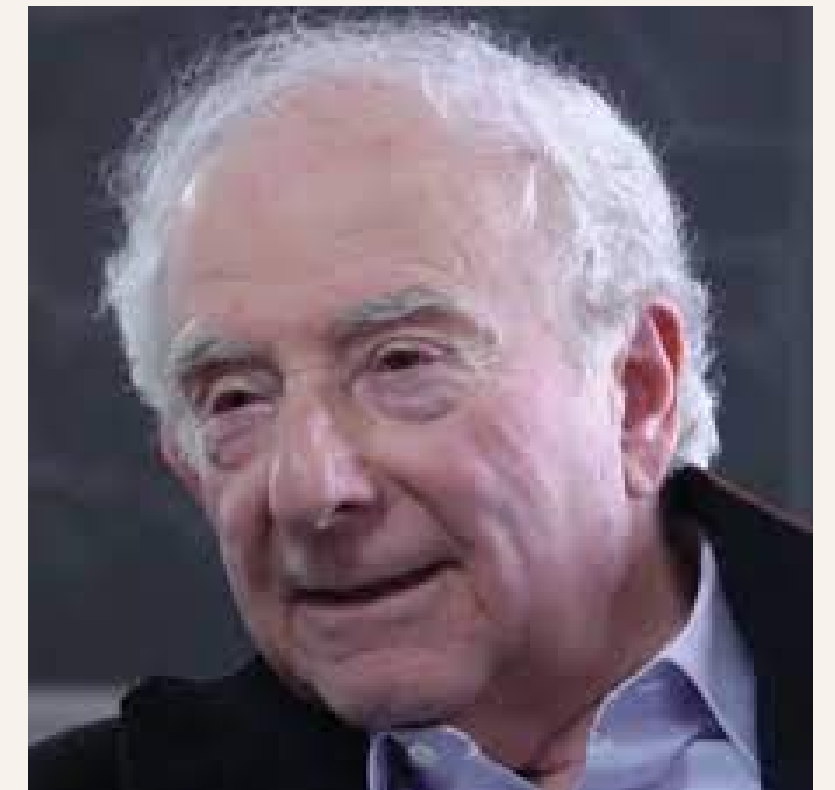
Teoria Fenomenológica

**B.4**

Quantização de fluxo

**B.5**

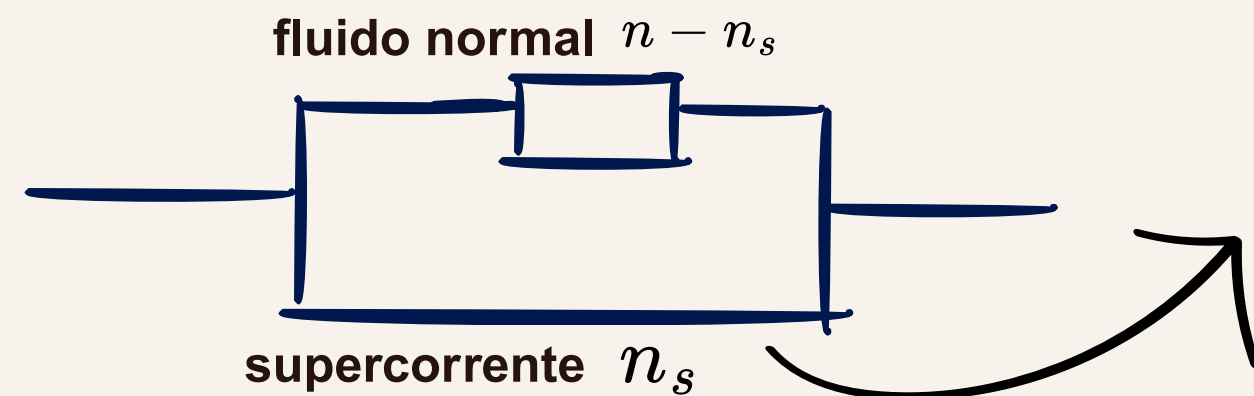
Outras conclusões



# A equação de London

F. London e H. London examinam de forma quantitativa o fato que um supercondutor não permite nenhum campo magnético em seu interior

- Eles partem do modelo de dois fluídos de Gorter e Casimir



carrega toda **corrente**  
**induzida** por qualquer campo  
elétrico transitório pequeno

## Consideração

Apenas uma fração dos  
elétrons (condução)  $\frac{n_s(T)}{n}$   
participa da supercorrente

$$T \ll T_c \quad , \quad n_s(T) \rightarrow n$$

$$T \geq T_c \quad , \quad n_s(T) = 0$$

Supondo um campo elétrico originado momentaneamente em um supercondutor. Descrevendo o modelo do elétron livre, das equação do modelo de Drude e da lei de indução de Faraday:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \nabla \times \vec{j} + \frac{n_s e^2}{mc} \vec{B} \right) = 0$$

$\vec{j}$  é a corrente microscópica média que flui no supercondutor. Da lei de Maxwell:

$$\nabla \times \vec{H} = 0 \quad \rightarrow \quad \nabla \times \vec{B} = \frac{4\pi}{c} \vec{j}$$

O sistema determina  $\vec{B}$  e  $\vec{j}$  que podem existir em um condutor perfeito.

Mas dessa forma, as duas equações são consistentes com um campo magnético estático arbitrário! ...

# A equação de London

Restringindo o conjunto de solução da equação, temos a equação de London:

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

caracteriza meios que conduzem **sem dissipação**

Assim, comprova o efeito Meissner com o comprimento de penetração de London:

$$\begin{cases} \nabla \times \vec{B} = \frac{4\pi}{c} \vec{j} \\ \nabla \times \vec{j} = -\frac{n_s e^2}{mc} \vec{B} \end{cases} \quad \longrightarrow \quad \begin{cases} \nabla^2 \vec{B} = \frac{4\pi n_s e^2}{mc^2} \vec{B} \\ \nabla^2 \vec{j} = \frac{4\pi n_s e^2}{mc^2} \vec{j} \end{cases}$$

$$\lambda = \left( \frac{mc^2}{4\pi n_s e^2} \right)^{\frac{1}{2}} \approx 10^2 \sim 10^3 \text{ \AA}$$

Nessa fina camada de superfície ocorrem as correntes que **blindam o campo aplicado**.

Essas previsões se confirmam já que em filmes finos de ordens de grandezas do comprimento de penetração de London não permitem penetração completa do campo!

# Ideias gerais da teoria BCS

- Aspectos qualitativos da interação efetiva elétron-elétron

H. Frohlick diz que: **1** - Quando a energia de dois elétrons **difere em muito mais que**  $\hbar\omega_D$ , a correção de fônon para sua interação efetiva é **extremamente pequena**. **2** - Quando essa diferença de energia é **muito menor que**  $\hbar\omega_D$ , a contribuição de fônon tem **sinal oposto** da interação eletronicamente blindada, e é maior magnitude, ou seja, **o sinal da interação efetiva elétron-elétron é invertida**.

$$\vec{V}_{\vec{k},\vec{k'}}^{eff} = \frac{4\pi e^2}{q^2 + k_0^2} \left[ 1 + \frac{\omega(\vec{q})^2}{\omega^2 - \omega(\vec{q})^2} \right] \quad \Bigg| \quad \vec{q} = \vec{k} - \vec{k'}, \quad \omega = \frac{\epsilon_k - \epsilon_{k'}}{\hbar}$$

**Ou seja, a blindagem pelo movimento iônico pode produzir interação líquida atrativa entre elétrons com energias suficientemente próximas entre si.**

Qualquer mecanismo que leva a interação líquida atrativa entre elétrons próximos à superfície de Fermi também levaria ao estado de supercondução em uma temperatura baixa.

- Aspectos primordiais da BCS

A teoria de Bardeen, Cooper e Schrieffer **constrói um estado fundamental** no qual todos os elétrons formam pares ligantes. Considera-se então um grupo de N elétrons de condução em N/2 pares. Pares esses descritos por uma função de onda de estado ligado  $\phi$ . Assim, a função de onda de N elétrons é dada:

$$\vec{\Psi}(\vec{r}_1 s_1, \dots, \vec{r}_N s_N) = \phi(\vec{r}_1 s_1, \vec{r}_2 s_2) \dots \phi(\vec{r}_{N-1} s_{N-1}, \vec{r}_N s_N)$$

# Ideias gerais da teoria BCS

$$\vec{\Psi}(\vec{r}_1 s_1, \dots, \vec{r}_N s_N) = \phi(\vec{r}_1 s_1, \vec{r}_2 s_2) \dots \phi(\vec{r}_{N-1} s_{N-1}, \vec{r}_N s_N) \rightarrow \Psi_{BCS} = \alpha \Psi$$

O princípio de exclusão de Pauli requer uma certa simetria. Ao **antissimetrizar** o estado a cima, tem-se o estado fundamental BCS. Apesar de todas funções de **onda pares**  $\phi$  **serem idênticas**, o estado satisfaz o princípio pois um par de férmions se comporta estatisticamente como um bóson.

## Comportamento estatístico

férmions

bóson

$$\begin{array}{c} \vec{\Psi}(\vec{r}s) \\ \vec{\Psi}(\vec{r}'s') \end{array}$$



$$\phi(\vec{r}s, \vec{r}'s')$$

Do cálculo variacional tira-se que a **faixa espacial** da função de onda par é  **muito grande** em comparação ao **espaçamento entre elétrons**:

$$H\Psi = \Lambda\Psi$$

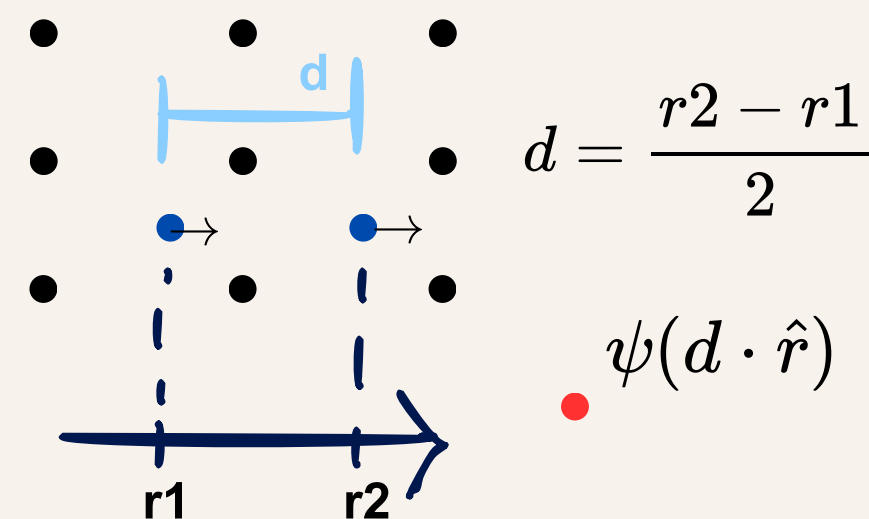
$$\xi_0 \approx 10^3 \text{ \AA}$$

Logo, na região ocupado por determinado par serão encontrados os **centros** de muitos pares.

# A teoria de Ginzburg-Landau

Estado de supercondução caracterizado pelo **parâmetro de ordem**:  $\psi(\vec{r}) \sim$  mede o grau de ordem de supercondução na posição  $\vec{r}$  abaixo de  $T_c$  (desaparece acima de  $T_c$ )

$\psi(\vec{r})$ : pela perspectiva da teoria BCS



- Uma única onda é suficiente! Já que todos os pares de Cooper estão no **mesmo estado** de dois elétrons.

A teoria prevê a equação que descreve a corrente para uma partícula de carga **-2e** e massa **2m** descrito pela função de onda e um vetor potencial da presença de um campo magnético

$$\vec{j} = -\frac{2e}{m} \left[ \langle \psi | \left( \frac{\hbar}{i} \nabla + \frac{2e}{c} \vec{A} \right) | \psi \rangle + \left( \frac{\hbar}{i} \nabla + \frac{2e}{c} \vec{A} \right) |\psi|^2 \right] \quad \left| \quad \psi = |\psi| e^{i\phi} \right.$$

Para fenômenos em que o par de Cooper podem fluir, porém não se acumular ou serem destruídos:

$$\vec{j} = - \left[ \frac{2e}{mc} \vec{A} + \frac{e\hbar}{m} \nabla \phi \right] |\psi|^2$$

$$\nabla \times \vec{j} = - \frac{n_s e^2}{mc} \vec{B}$$

## Considerações

O parâmetro de ordem não se refere à coordenada relativa dos dois elétrons no par. A descrição de um supercondutor em termos de  $\psi(\vec{r})$  apenas é válida para fenômenos bem abaixo de  $T_c$ , na escala de  $\xi_0$ , da teoria BCS.

Cada par está em um estado translacionalmente invariante.

O conjunto completo de **equações de Ginzburg-Landau** é necessário para descrever vórtices em supercondutores do **tipo II** → Fluxo magnético significativo no **interior do vórtice** pois

$$|\psi| \rightarrow 0$$

# Quantização de fluxo

Considerando um anel supercondutor, é possível integrar sobre um caminho dentro do material de supercondução que é fechado sobre o orifício do anel. Já que correntes significativas podem fluir apenas próximo à superfície do supercondutor:

$$\vec{j} = - \left[ \frac{2e}{mc} \vec{A} + \frac{e\hbar}{m} \nabla \phi \right] |\psi|^2 = 0$$

$$\oint \vec{j} \cdot d\vec{l} = \oint \left[ \frac{2e}{mc} \vec{A} + \frac{e\hbar}{m} \nabla \phi \right] \cdot d\vec{l} = 0$$

Pelo teorema de Stokes:

$$\oint \vec{A} \cdot d\vec{l} = \int \nabla \times \vec{A} \cdot d\vec{S} = \int \vec{B} \cdot d\vec{S} = \vec{\Phi}$$

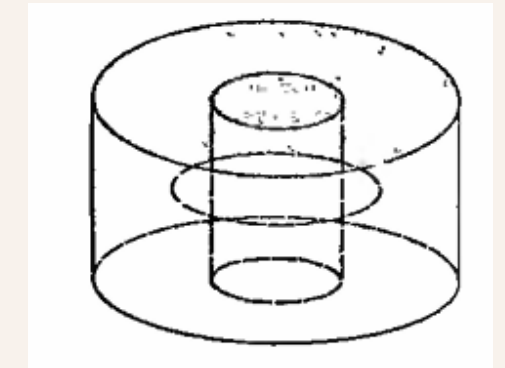
Enquanto o caminho estiver no interior do anel, o fluxo incluso pelo anel não dependerá do caminho.

Combinando esses resultados, o fluxo magnético incluso pelo anel deve ser quantizado:

$$|\Phi| = \frac{n\hbar c}{2e} = n\Phi_0$$

**Cada vórtice de um supercondutor do tipo II contém um único quantum de fluxo magnético** (não só previsto pela teoria, mas também provado experimental por Deaver B. S. e Fairbank W. M. em 1961). O fluxo quantizado é dado por:

$$\Phi_0 = 2,0679 \times 10^{-15} \text{ T.m}^2$$



Lembrando que  $\phi$  representa a **fase do parâmetro de ordem**. Como vimos nas aulas de MDMS, **a fase não pode ser descontínua**, logo, para o anel, deve ser de  $2\pi$  multiplicado de um número inteiro n:

$$\oint \nabla \phi \cdot d\vec{l} = \Delta \phi = 2\pi n$$

# Corrente persistentes e tunelamento de supercorrente

Decaimento da corrente em metais normais



pode reduzir o momento total eletrônico por **espalhamento**

Decaimento da corrente em metais supercondutores

degradada por colisão análoga } entretanto dentro do raio de um par, são encontrados diversos pares (relembrando)  $\psi(\vec{r}) \sim$  Funções de onda de pares idênticas (mudar a função = desemparelhar)

• → •    • ← •

Para se destruir o par emparelhado, o custo de energia livre é enorme. Logo, a vida útil da supercorrente é infinita em escalas práticas de tempo

PHYSICAL REVIEW

VOLUME 164, NUMBER 2

10 DECEMBER 1967

## Intrinsic Resistive Transition in Narrow Superconducting Channels\*

J. S. LANGER† AND VINAY AMBEGAOKAR

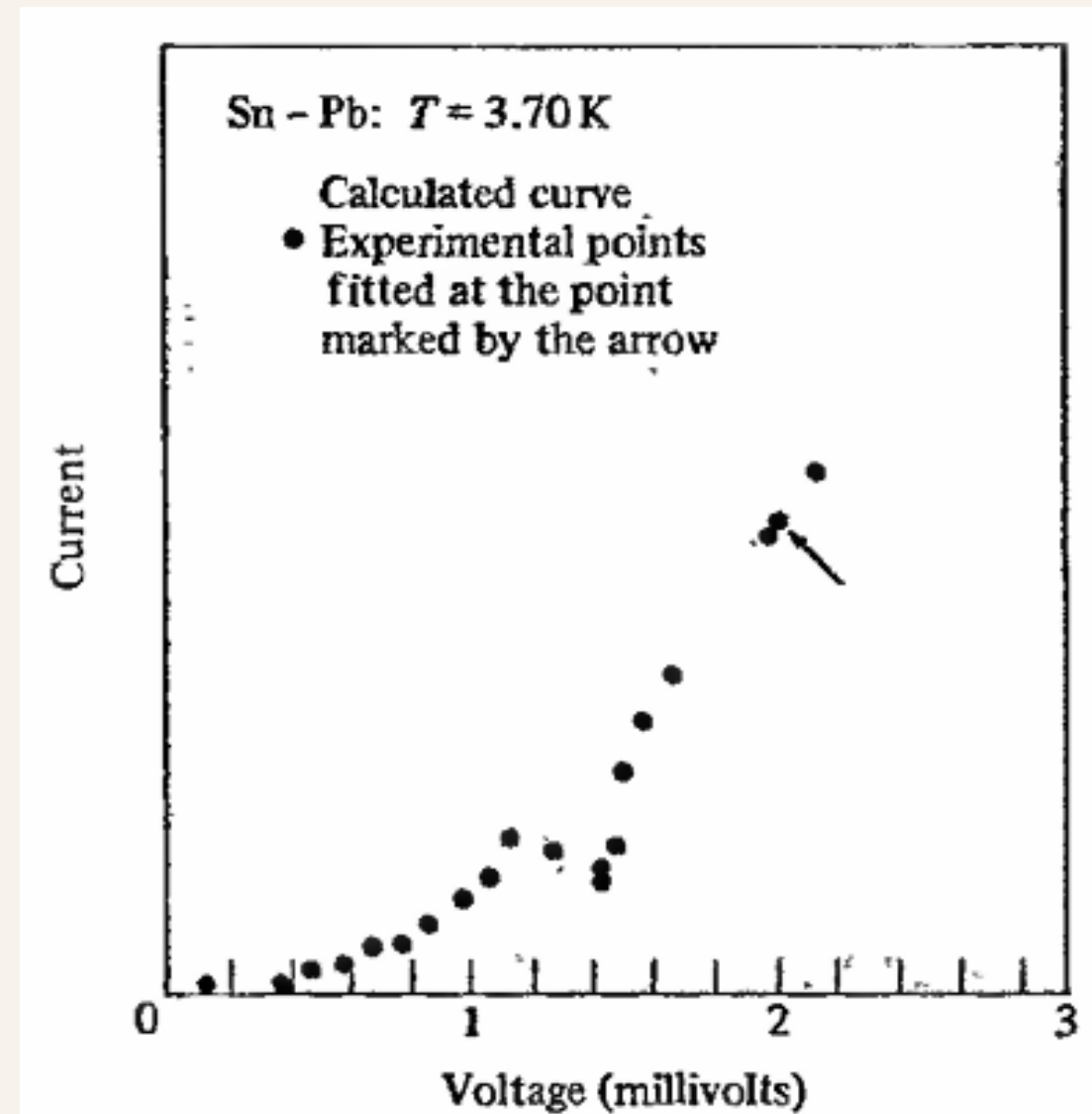
*Laboratory of Atomic and Solid State Physics, Cornell University, Ithaca, New York*

(Received 19 June 1967)

We present a theory of current-reducing fluctuations in narrow superconducting channels. The theory is based on the Ginzburg-Landau equation, and is constructed in analogy with the droplet model of the condensation of a supersaturated vapor. Our theory suggests that large and improbable fluctuations are important, and cause measurable departures from the mean-field critical current. The calculation leads to a concrete result for the intrinsic resistive transition. This transition is predicted to occur at a temperature slightly lower than the bulk transition temperature, and to have a width which is observable but smaller than those measured in recent experiments.

# Corrente persistentes e tunelamento de supercorrente

## Correntes de tunelamento

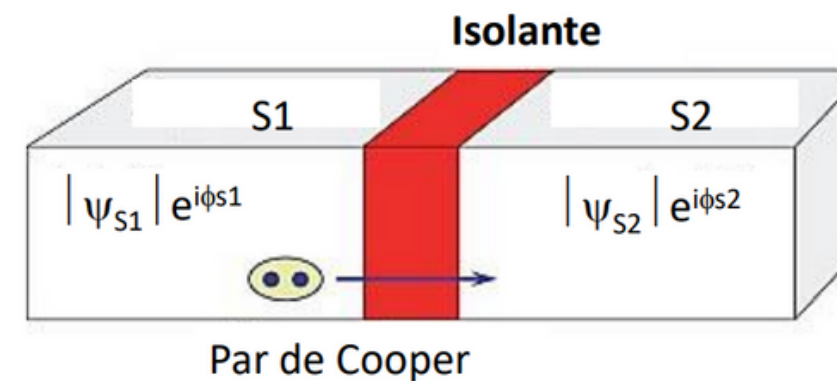


Fonte: S. Shapiro et al., IBM J. Res. Develop. 6, 34 (1962)

## Efeitos Josephson

**Para  $V > 0$  aparece uma corrente alternada na junção**

A diferença de fase  $\delta$  através da junção deve estar mudando com o tempo  $\frac{d\delta}{dt} = \omega = 2\pi f$ , e pode ser mostrado que uma tensão  $V$  é desenvolvida através dela, relacionada à taxa de mudança da diferença de fase por:



$$E = qV = (2e) \cdot V = hf = \frac{h2\pi f}{2\pi} = \hbar \frac{d\delta}{dt}$$

$$(2e) \cdot V = \frac{h}{2\pi} \frac{d\delta}{dt}$$

$$d\delta / dt = 2\pi V / \phi_0 \quad \phi_0 = \frac{h}{2e}$$

$$f = \frac{V}{\phi_0}$$

[http://www.nature.com/nature/journal/v474/n7353/box/nature10122\\_BX1.html](http://www.nature.com/nature/journal/v474/n7353/box/nature10122_BX1.html)

# Materiais Relevantes

Após a descoberta da supercondutividade do mercúrio em 1911, diversos outros materiais supercondutores foram descobertos. De acordo com seus constituintes e estruturas, eles podem ser divididos em diversas categorias:

- **MATERIAIS METÁLICOS** (incluindo materiais puros como mercúrio, chumbo e nióbio, ligas como Nb-Ti e Nb-Ge e compostos intermetálicos como  $\text{Nb}_3\text{Sn}$ ,  $\text{Nb}_3\text{Al}$  e  $\text{MgB}_2$ )
- **COMPOSTOS CERÂMICOS**
- **ÓXIDOS A BASE DE COBRE E RUTÊNIO**
- **PICNOTÓGENOS E CALCOGENETOS À BASE DE FERRO**
- **MATERIAIS ORGÂNICOS**
- **SEMICONDUCTORES, SEMI-METAIS E ISOLADORES**

Apesar da imensa quantidade de supercondutores descobertos, aqueles que possuem valor prático são limitados a Nb-Ti,  $\text{Nb}_3\text{Sn}$ , óxidos a base de cobre,  $\text{MgB}_2$  e supercondutores a base de aço, como mostra a imagem a seguir...

# Materiais Relevantes

Parâmetros relevantes sobre materiais básicos e densidade de corrente crítica para supercondutores práticos e sua tecnologia de fabricação de fios e formas típicas atuais

| Material           | $T_{c, \max}$<br>(K) | $H_{c2, 4.2 \text{ K}}$<br>(T) | $J_{c, 4.2 \text{ K}}$<br>(A/cm <sup>2</sup> ) | Coherence<br>length $\xi_{ab}$ (nm) | Anisotropy<br>$\gamma_H$ | Wire<br>technology                                      | Typical<br>wire forms |
|--------------------|----------------------|--------------------------------|------------------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------|---------------------------------------------------------|-----------------------|
| Nb-Ti              | 9.5                  | 11.5                           | $4 \times 10^5$ (5 T)                          | 4                                   | Negligible               | \                                                       | round wire            |
| Nb <sub>3</sub> Sn | 18                   | 25                             | $\sim 10^6$                                    | 3                                   | Negligible               | bronze process<br>internal Sn process<br>powder-in-tube | round wire            |
| MgB <sub>2</sub>   | 39                   | 18                             | $\sim 10^6$                                    | 6.5                                 | 2–2.7                    | powder-in-tube<br>internal Mg diffusion                 | wire or tape          |
| REBCO              | 92                   | >100                           | $\sim 10^7$                                    | 1.5                                 | 5–7                      | coated conductor                                        | flat tape             |
| Bi-2223            | 108                  | >100                           | $\sim 10^6$                                    | 1.5                                 | 50–90                    | powder-in-tube                                          | flat tape             |
| Bi-2212            | 90                   |                                |                                                |                                     |                          | powder-in-tube                                          | wire or tape          |
| 1111 IBS           | 55                   | >100                           | $\sim 10^6$                                    | 1.8–2.3                             | 4–5                      | powder-in-tube                                          | wire or tape          |
| 122 IBS            | 38                   | >80                            | $\sim 10^6$                                    | 1.5–2.4                             | 1.5–2                    | powder-in-tube                                          | wire or tape          |
| 11 IBS             | 16                   | >40                            | $\sim 10^5$                                    | 1.2                                 | 1.1–1.9                  | powder-in-tube                                          | wire or tape          |

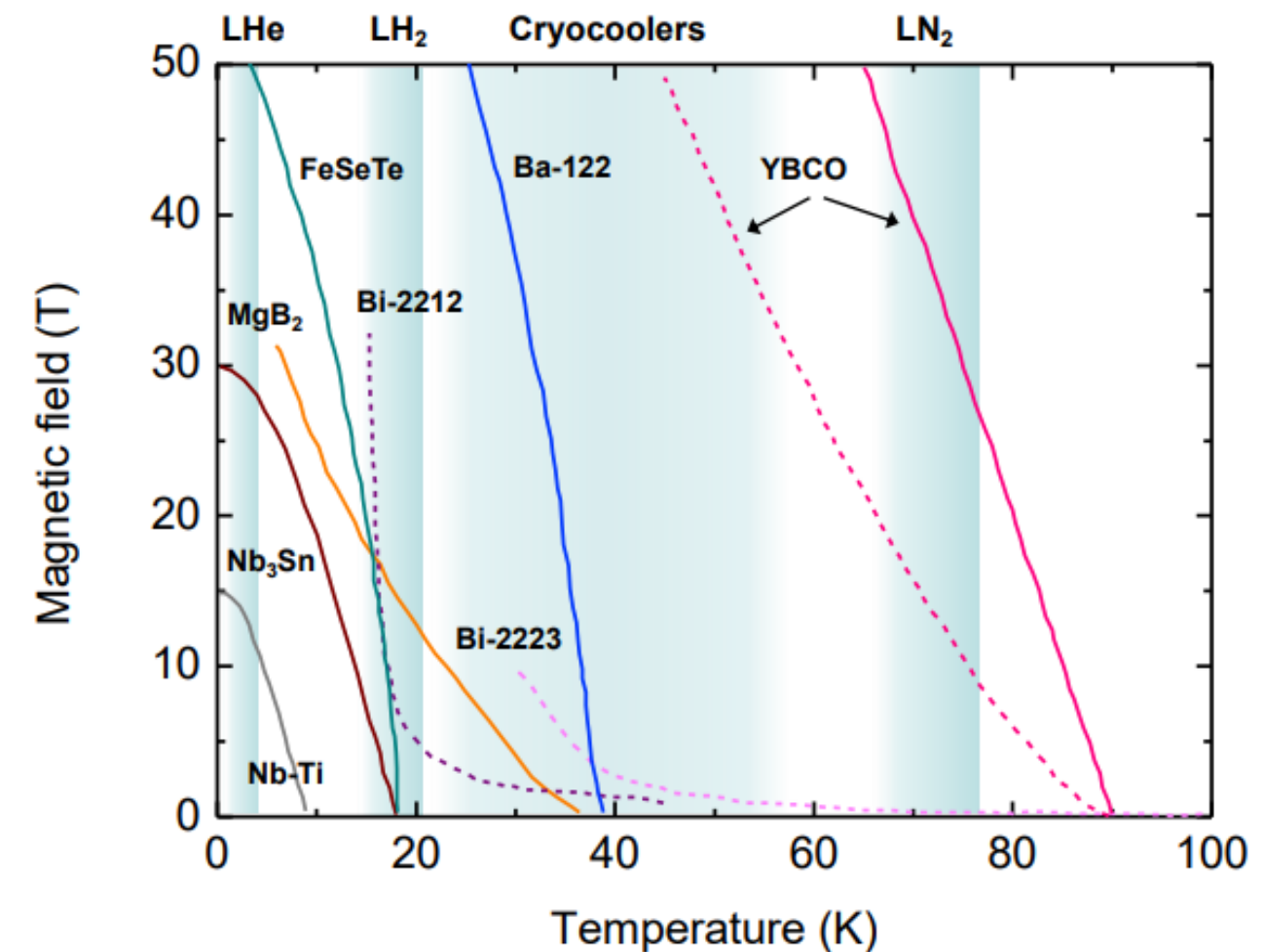
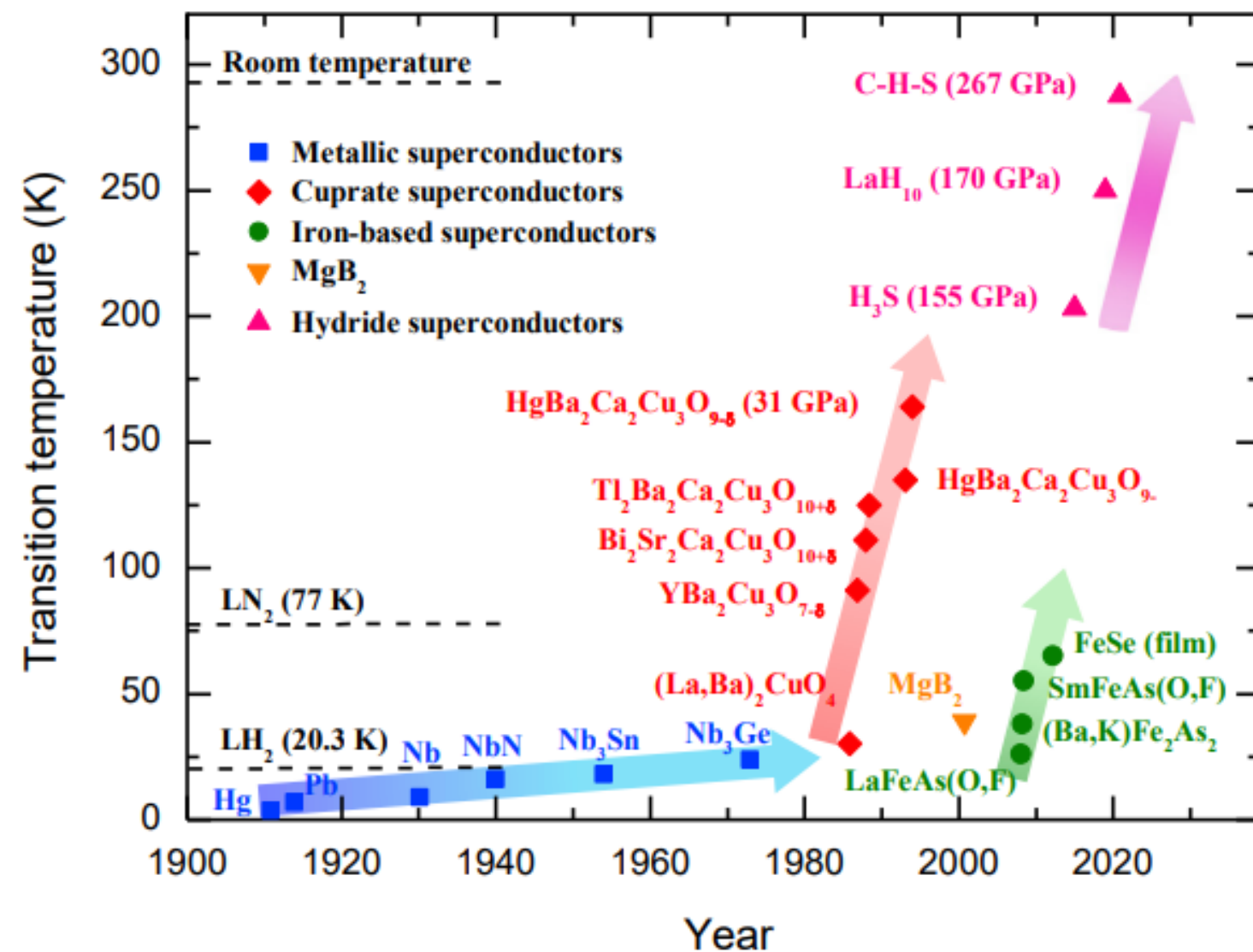
# Materiais Relevantes

- 1911 - 1932 → Low Temperature Superconductors (LTS). Ni (9.2 K).
- 1954 / 1961 →  $\text{Nb}_2\text{Sn}$  e Nb-Ti (Imagem X). Imãs supercondutores com geração de altos campos magnéticos quando comparados com imãs convencionais.
- 1986 → LaBaCuO, High Temperature Superconductors (HTS).
- 1987 →  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$  (YBCO ou REBCO, RE = Rare Earth). BSCCO,  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{10}$  (Bi-2212) e  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$  (Bi-2223). Grandes supercorrentes em 30-50 K e 77 K. Imãs de altos campos em operação de regiões de baixa e moderada temperatura.
- 2001 →  $\text{MgB}_2$  (39 K). Materiais de produção em abundância e baixo peso. Aplicação em larga escala.
- 2008 → Iron-Based Superconductors (IBS). Baixo comprimento de coerência, altos campos críticos superiores e anisotropia.
- Recentemente → Supercondutores a temperatura ambiente (287.7 K) de hidreto de enxofre carbonáceo sob pressão extrema (267 GPa).

# Materiais Relevantes

Gráfico da temperatura de transição dos supercondutores descoberto ao longo dos anos (a).

Diagrama de fases comparativo H-T de supercondutores (b)



# Materiais Relevantes

## Aplicações Práticas

Para aplicação e alta corrente ou campo magnético, supercondutores devem ser produzidos como fios compósitos, possuindo alta capacidade de transporte de corrente, alta resistência mecânica, filamentos supercondutores finos em matriz metálica e comprimento suficiente.

- LTS → Amplamente comercializados e utilizados na indústria de energia elétrica.
- HTS (Bi-2223 e Bi-2212) → Comercialização de médio prazo
- HTS (REBCO) → Comercialização inicial.
- IBS → Pesquisa e desenvolvimento laboratorial.

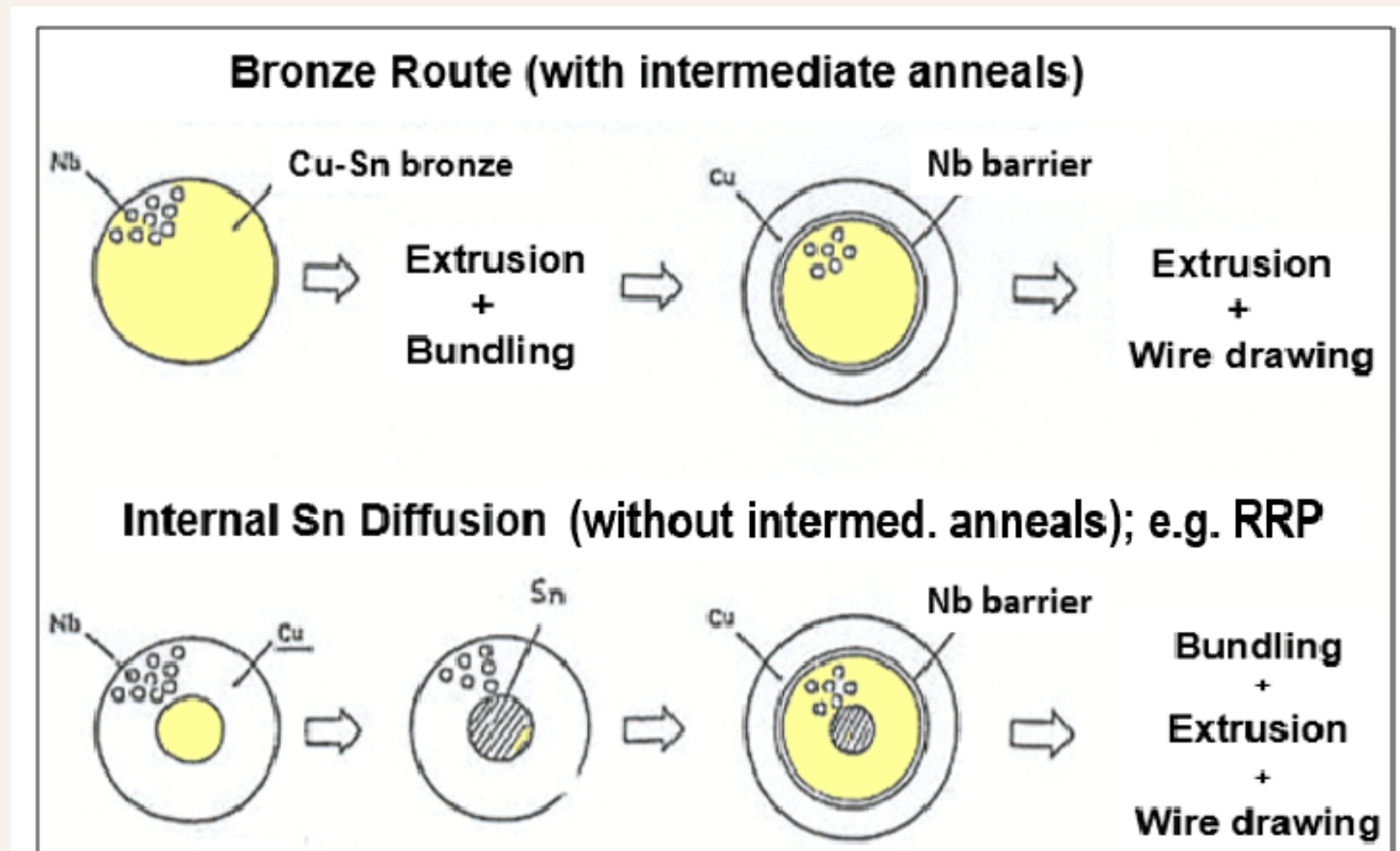
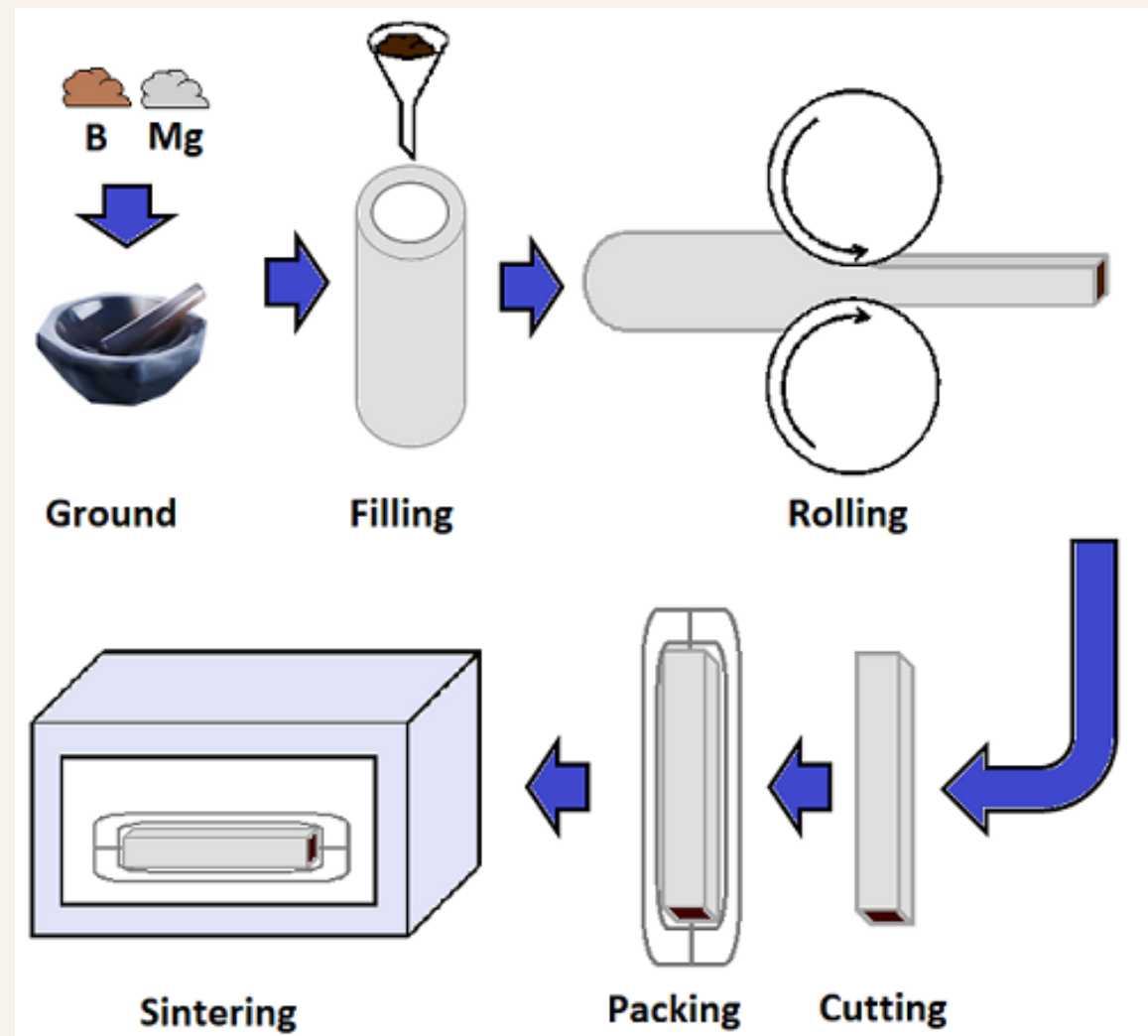
# Nb-Ti / Nb<sub>2</sub>Sn

- Nb-Ti → Alta ductibilidade. Baixo custo para aplicações em temperatura de hélio líquido. Usado em imãs supercondutores (9 T a 4.2 K ou 11 T a 1.8 K), MRI, imãs de laboratório e trens de levitação magnética.
- Nb<sub>2</sub>Sn → Alta fragilidade. “bronze process”, “internal Sn process” “PIT process”. Refinamento de grãos e criação de fixação artificiais. Preço mais alto. Aplicações de alto campo (~23 T). MRI, RMN, aceleradores de partículas, entre outros.

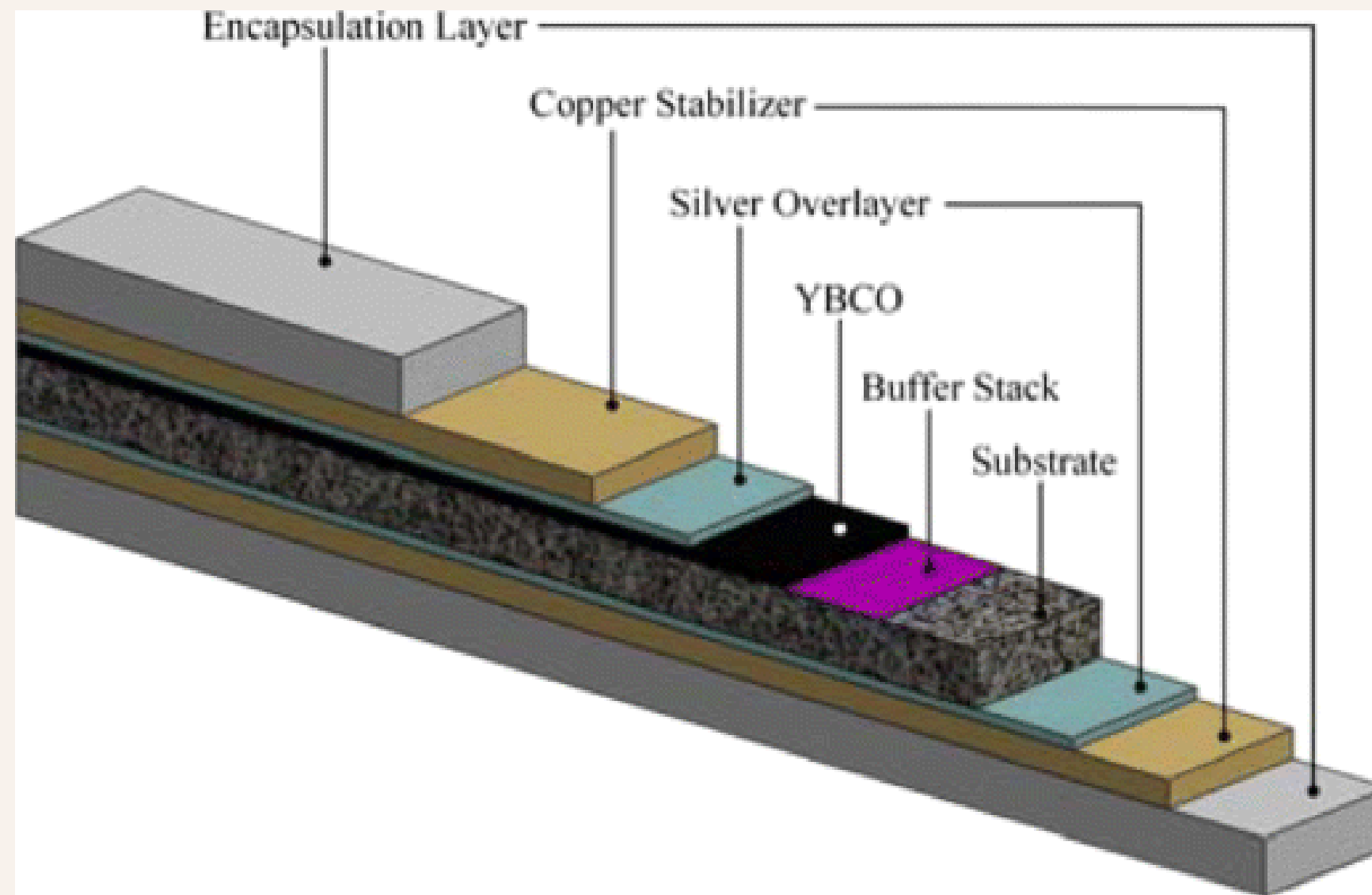
## Supercondutores de Óxido de Cobre

- Cupratos (Bi-2223, Bi-2212 e REBCO) → Temperaturas críticas acima da temperatura do nitrogênio líquido e até mesmo do gás natural liquefeito. Menor custo de refrigeração, possibilitando aplicações industriais em larga escala. Fragilidade cerâmica. Tratamento térmico → controle do conteúdo de oxigênio para otimizar a fase supercondutora.
- Bi-2223 → Alta anisotropia. “processo PIT” para produção de fios ou fitas.
- REBCO → “processo PIT” não é aplicável. Exige amostras de fita altamente texturizadas biaxialmente.

# Processos de Fabricação



# Processos de Fabricação



# MgB<sub>2</sub>

- T<sub>c</sub>=39K (recorde para intermetálicos). Super correntes pouco sensíveis a fronteiras de grão (vantagem sobre cupratos). J<sub>c</sub> cai rapidamente em campos magnéticos altos (limitação).
- T<sub>c</sub> relativamente alto, baixo custo de matéria-prima, composição simples, leveza. Imãs de MRI (1-2 T e 10-20 K).
- PIT (Powder-in-Tube): In situ (pós não reagidos) ou ex situ (pó de MgB<sub>2</sub> reagido). Bainhas: Fe, aço inoxidável, aço carbono, ou compósitas (Ag e Cu reagem). IMD (Internal Mg Diffusion): Bastão de Mg central, pó de B ao redor. Mg funde e difunde.
- Dopagem com Carbono: Mais eficaz para aumentar J<sub>c</sub> em campos fortes.
- Nano-SiC e nano-C são os dopantes ideais.

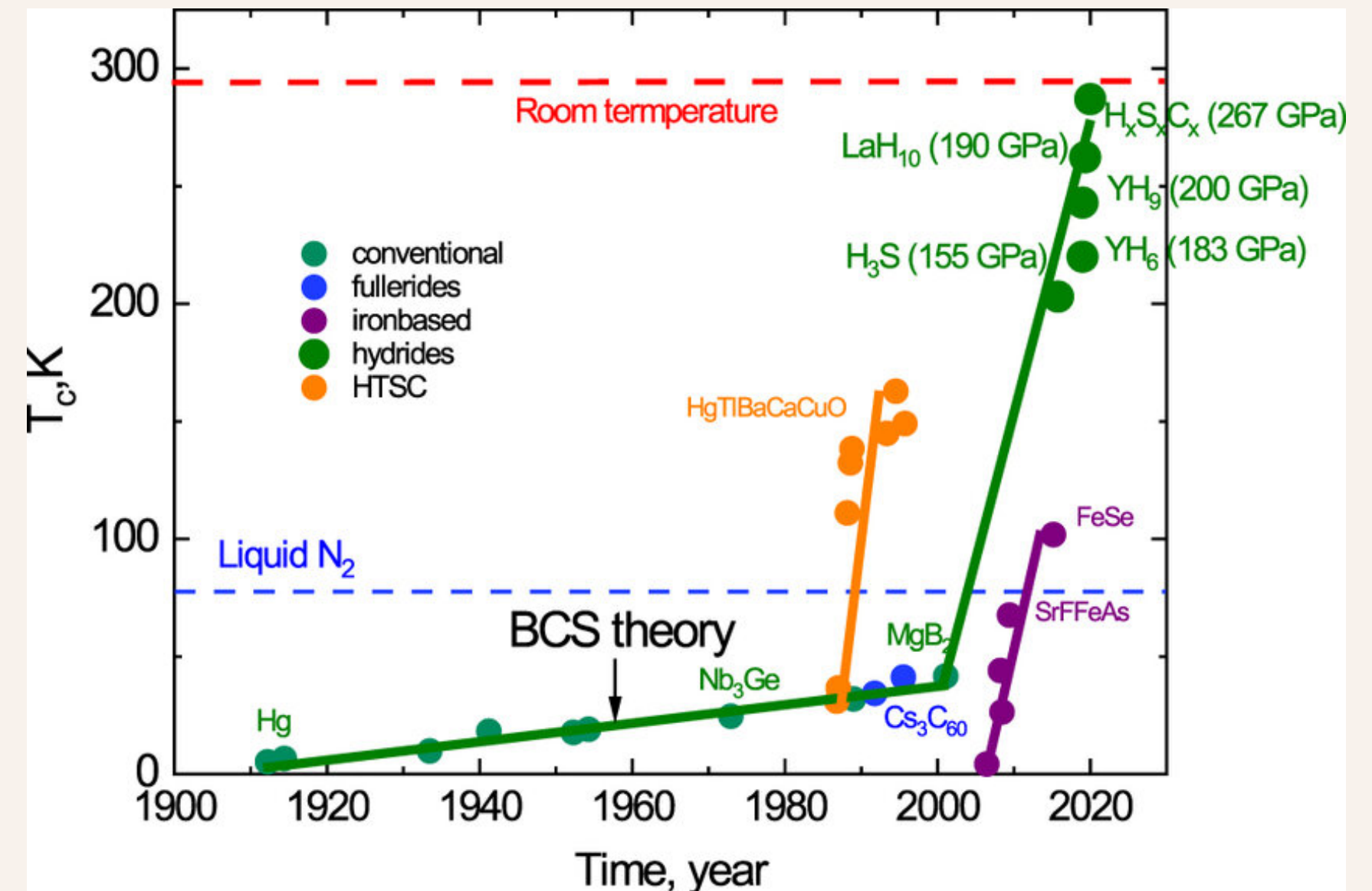
# IBS

- Correntes intergrãos menos deterioradas que REBCO. Método PIT promissor para fabricação de fios. Bainhas: Ag amplamente usada. Mais opções de materiais (incluindo compósitas com metais mais baratos/rígidos e Ag interna) para reduzir custos e aumentar resistência.
- Deformação mecânica (laminação, prensagem): Aumenta  $J_c$  em IBS tipo 122.
- Altos  $J_c$  alcançados com prensagem uniaxial e laminação (acima de  $105\text{A/cm}^2$  a 4.2 K e 10 T).
- Fitas Ba-122 com  $J_c$  alto e muito fraca dependência de campo até 33 T.
- Fitas Ba-122 (Cu/Ag) com  $J_c$  de  $1.1 \times 105\text{A/cm}^2$  (4.2 K, 10 T) via laminação + HIP (Hot Isostatic Pressing).
- Fitas IBS de 100 metros de comprimento produzidas, demonstrando potencial para fabricação em larga escala.
- Candidato promissor para ímãs de alto campo, especialmente em aceleradores de partículas de alta energia (estudos para ímãs dipolares de 12 T em andamento).

# Estado da arte – hidretos supercondutores

Supercondutor em condições ambiente ?

- Hidretos supercondutores;
  - H<sub>3</sub>S desenvolvido em 2015, T<sub>c</sub> de 203 K (-70°C), sob pressões a cima de 150 GPa;
  - LaH<sub>10</sub> desenvolvido em 2019, T<sub>c</sub> de 250 K (-23 °C) sob pressão de cerca de 170 GPa
  - YH<sub>9</sub>, desenvolvido em 2021, T<sub>c</sub> de 243K (-30°C) sob pressões acima de 201 GPa



# Estado da arte – hidretos supercondutores

Motivação:

- materiais com elementos leves são favoráveis para fônons com alta frequência, por isso a atenção sobre o hidrogênio;
  - maior vibração está relacionado com maior temperatura crítica;
- Usando elementos pesados, pode contribuir para frequências mais baixas,
  - viabiliza o acoplamento elétron-fônon;
- Além de diminuir a pressão para metalizar os hidretos;
- maior  $T_c$  relacionado com forte ligação covalente (como indicado pelo MgB2).

$$T_c = \frac{\omega_{log}}{1.2} \exp \left[ - \frac{1.04(1 + \lambda)}{\lambda - \mu^*(1 + 0.62\lambda)} \right]$$

$\lambda$ : parâmetro de acoplamento elétron fônon  
 $\mu^*$ : parâmetro do potencial de Coloumb efetivo

$$\lambda = 2 \int \frac{\alpha^2 F(\omega)}{\omega} d\omega$$

$\alpha F(\omega)$ : função espectral do acoplamento elétron-fônon

# Estado da arte – hidretos supercondutores

## Conventional superconductivity at 203 kelvin at high pressures in the sulfur hydride system

A. P. Drozdov<sup>1\*</sup>, M. I. Erements<sup>1\*</sup>, I. A. Troyan<sup>1</sup>, V. Ksenofontov<sup>2</sup> & S. I. Shylin<sup>2</sup>

- Base nos cálculos de Ashcroft que prevê alta  $T_c$  para vários hidretos;
- H<sub>3</sub>S supercondutor na temperatura de 203K e na pressão de 150GPa.
- Entusiasmo para pesquisa de supercondutores na temperatura e pressão ambiente

# Métodos para descoberta de novos materiais supercondutores

Uso de métodos computacionais como DFT e Machine Learning para desenvolver novos materiais supercondutores

- Por exemplo, nesse artigo de Daniel Wines, ele usa uma rede neural em 900 hidretos, filtrando 122 que tinham potencial em ter uma  $T_c$  acima de 39k (MgB<sub>2</sub>)
- Depois utiliza DFT e DFPT para confirmar as temperaturas críticas dos compostos sugeridos pela Deep Learning

## Data-driven Design of High Pressure Hydride Superconductors using DFT and Deep Learning

Daniel Wines\* and Kamal Choudhary

*Material Measurement Laboratory, National Institute of Standards and Technology,  
Gaithersburg, MD 20899, USA*

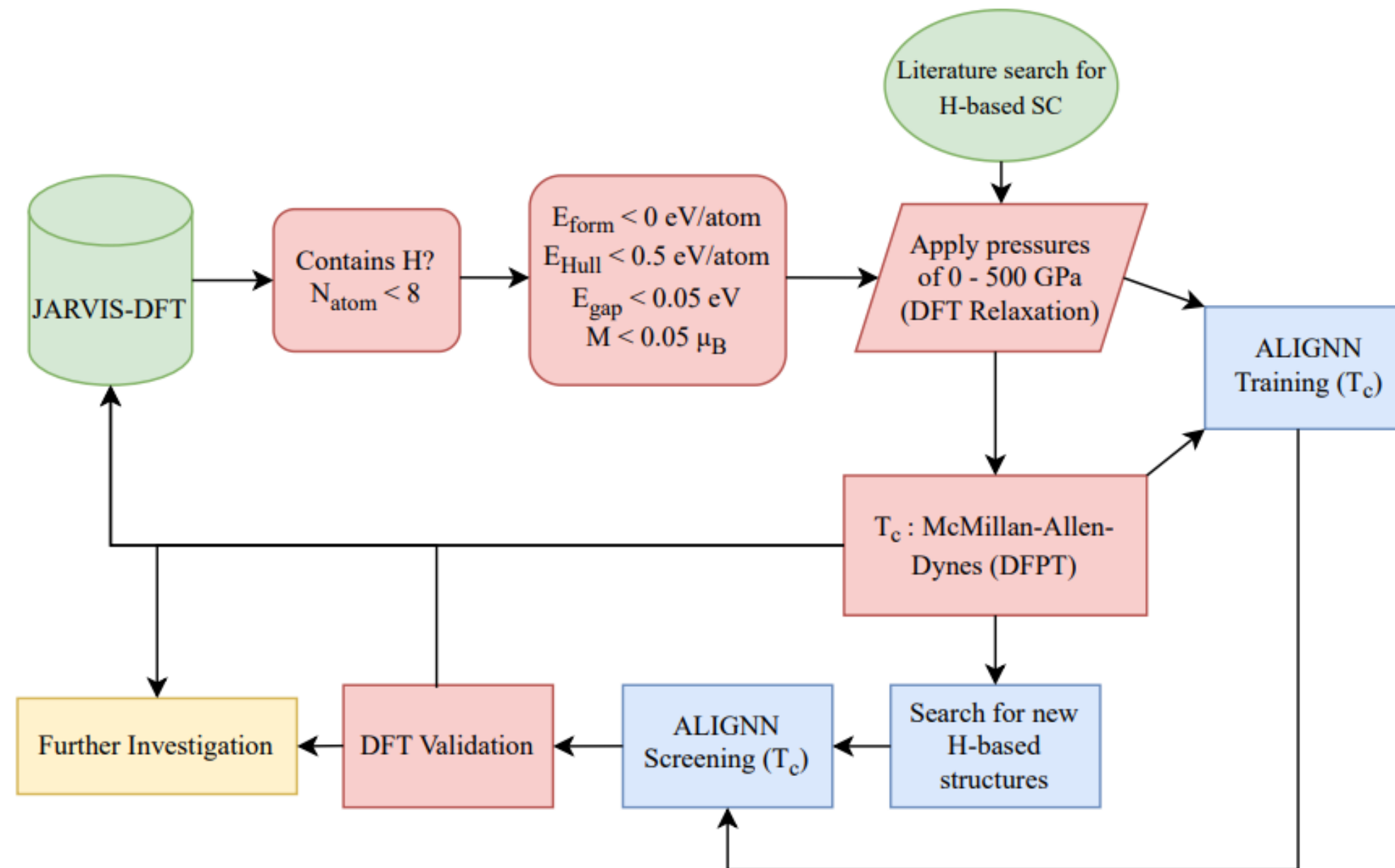
E-mail: daniel.wines@nist.gov

### Abstract

The observation of superconductivity in hydride-based materials under ultrahigh pressures (for example, H<sub>3</sub>S and LaH<sub>10</sub>) has fueled the interest in a more data-driven approach to discovering new high-pressure hydride superconductors. In this work, we performed density functional theory (DFT) calculations to predict the critical temperature ( $T_c$ ) of over 900 hydride materials under a pressure range of (0 to 500) GPa, where we found 122 dynamically stable structures with a  $T_c$  above MgB<sub>2</sub> (39 K). To accelerate screening, we trained a graph neural network (GNN) model to predict  $T_c$  and demonstrated that a universal machine learned force-field can be used to relax hydride structures under arbitrary pressures, with significantly reduced cost. By combining DFT and GNNs, we can establish a more complete map of hydrides under pressure.

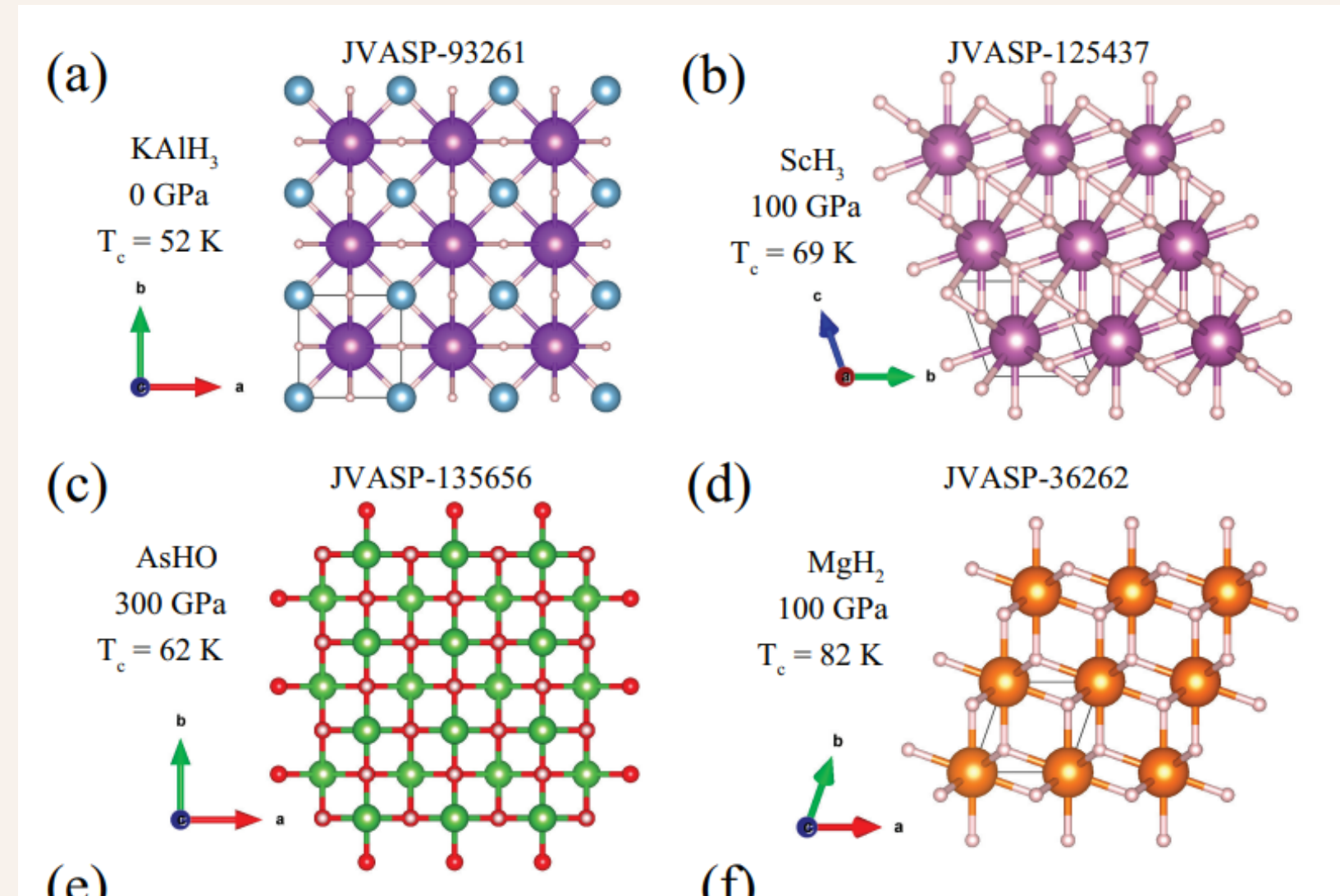
**Keywords:** Superconductivity; density functional theory; high-throughput; materials discovery; hydrides

# Métodos para descoberta de novos materiais supercondutores



# Métodos para descoberta de novos materiais supercondutores

- “Approximately 7 % of the computational time was devoted to relaxing the structures under pressure while the remaining 93 % of the computational time was devoted to DFPT calculations of the EPC.”
- Estruturas do Dataset JARVIS reveladas como supercondutoras “MgH<sub>2</sub> (82 K at 100 GPa), AsHO (62 to 78 K at 200 to 300 GPa), ScH<sub>3</sub> (69 K at 100 GPa), and KAlH<sub>3</sub> (52 K at 0 GPa)”



# Métodos para descoberta de novos materiais supercondutores

Strategies for improving the superconductivity of hydrides under high pressure

To cite this article: Pengye Liu *et al* 2024 *J. Phys.: Condens. Matter* **36** 353001

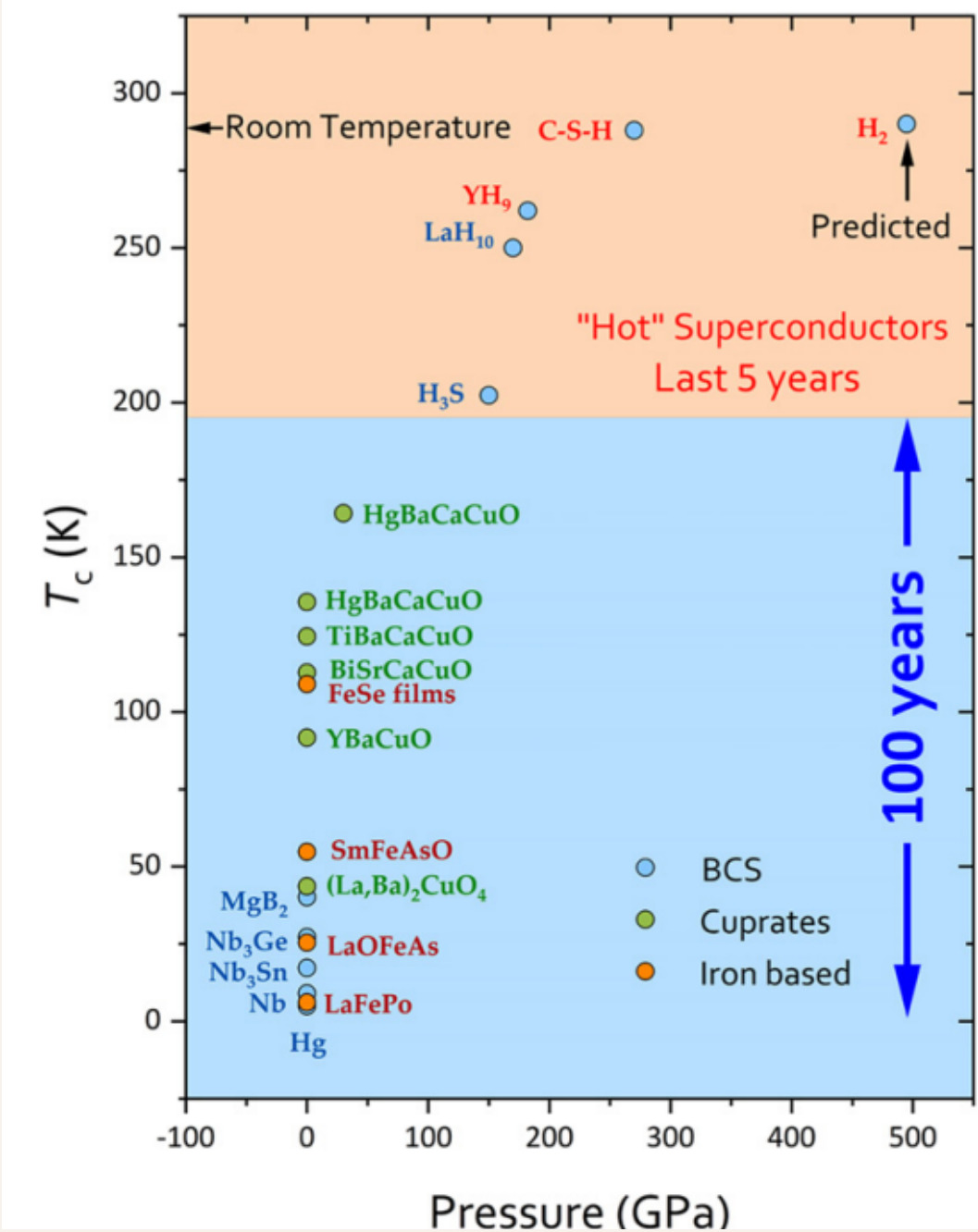
- Uso do método computacional na procura de materiais mais complexos:
  - hidretos ternários que podem estabilizar a estrutura em pressões menores;
    - CaYH12 com T<sub>c</sub> de 258K, à 200Gpa

# Corrida para a descoberta de hidretos supercondutores

NEWS FEATURE | 08 March 2024

## Superconductivity scandal: the inside story of deception in a rising star's physics lab

Ranga Dias claimed to have discovered the first room-temperature superconductors, but the work was later retracted. An investigation by *Nature's* news team reveals new details about what happened – and how institutions missed red flags.



# Corrida para a descoberta de hidretos supercondutores

## Search for ambient superconductivity in the Lu-NH system

Autores Pedro P Ferreira, Lewis J Conway, Alessio Cucciari, Simone Di Cataldo, Federico Giannessi, Eva Kogler, Luiz TF Eleno, Chris J Pickard, Christoph Heil, Lilia Boeri

Data de publicação 2023/9/4  
Publicações Nature Communications

Volume 14

Edição 1

Páginas 5367

Editora Nature Publishing Group UK

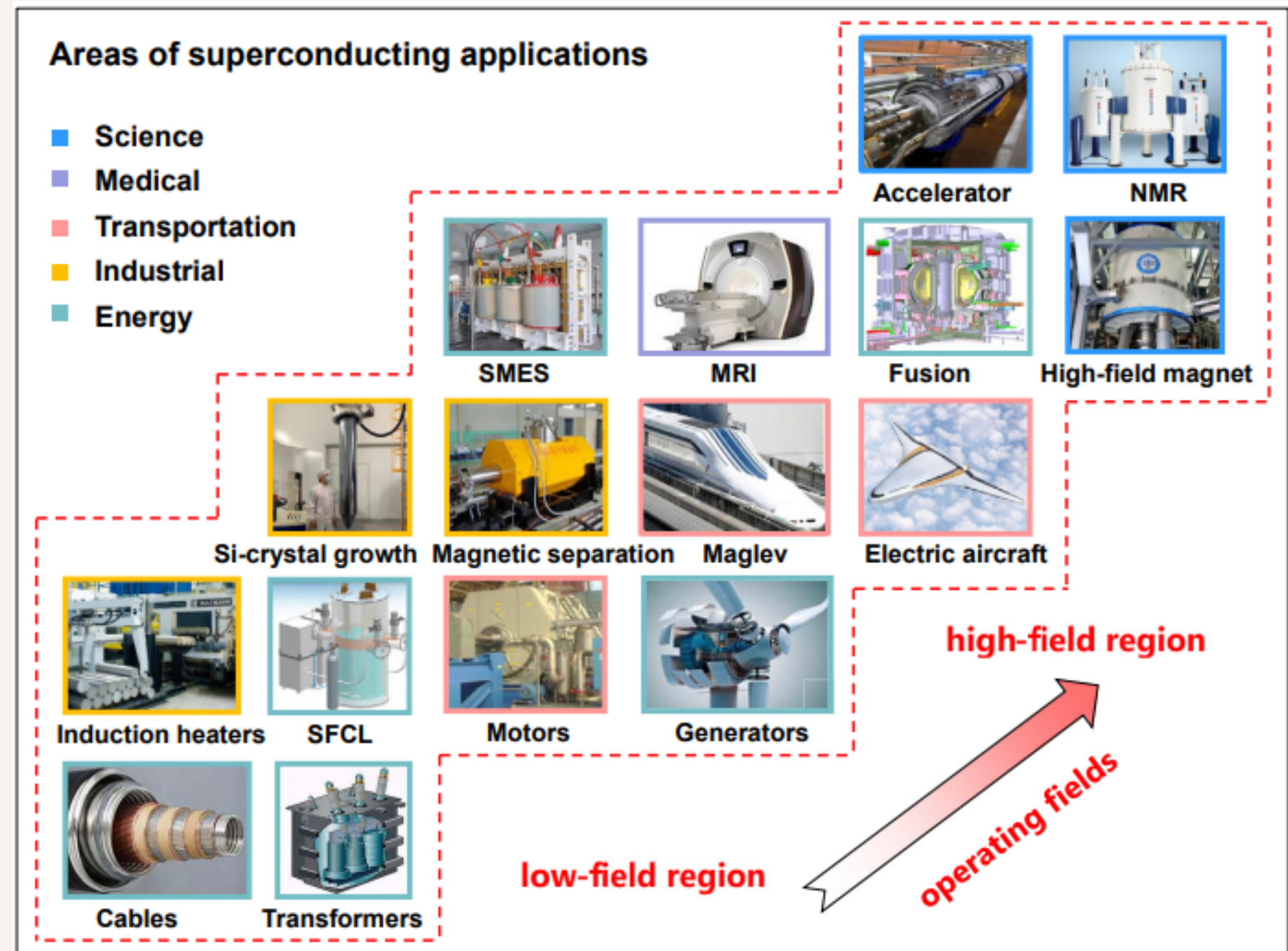
Descrição Motivated by the recent report of room-temperature superconductivity at near-ambient pressure in N-doped lutetium hydride, we performed a comprehensive, detailed study of the phase diagram of the Lu–N–H system, looking for superconducting phases. We combined ab initio crystal structure prediction with ephemeral data-derived interatomic potentials to sample over 200,000 different structures. Out of the more than 150 structures predicted to be metastable within ~50 meV from the convex hull we identify 52 viable candidates for conventional superconductivity, for which we computed their superconducting properties from Density Functional Perturbation Theory. Although for some of these structures we do predict a finite superconducting  $T_c$ , none is even remotely compatible with room-temperature superconductivity as reported by Dasenbrock et al. Our work joins the broader community effort that has followed...

Total de citações Citado por 69

- Foi anunciado, supostamente, um material supercondutor do hidreto de Lutécio dopado com nitrogênio;
- Uso de previsões computacionais para desvendar materiais supercondutores - no caso, Teoria de Perturbação do Funcional da Densidade.

# Aplicações

- Diferentes área de aplicação de materiais e dispositivos supercondutores, algumas óbvias outras nem tanto.
- Interesses científico, médico, industrial, energético e médico.



Fonte: Chao Yao and Yanwei Ma, Superconducting materials: Challenges and opportunities for large-scale applications. iScience 24, 102541, June 25, 2021.

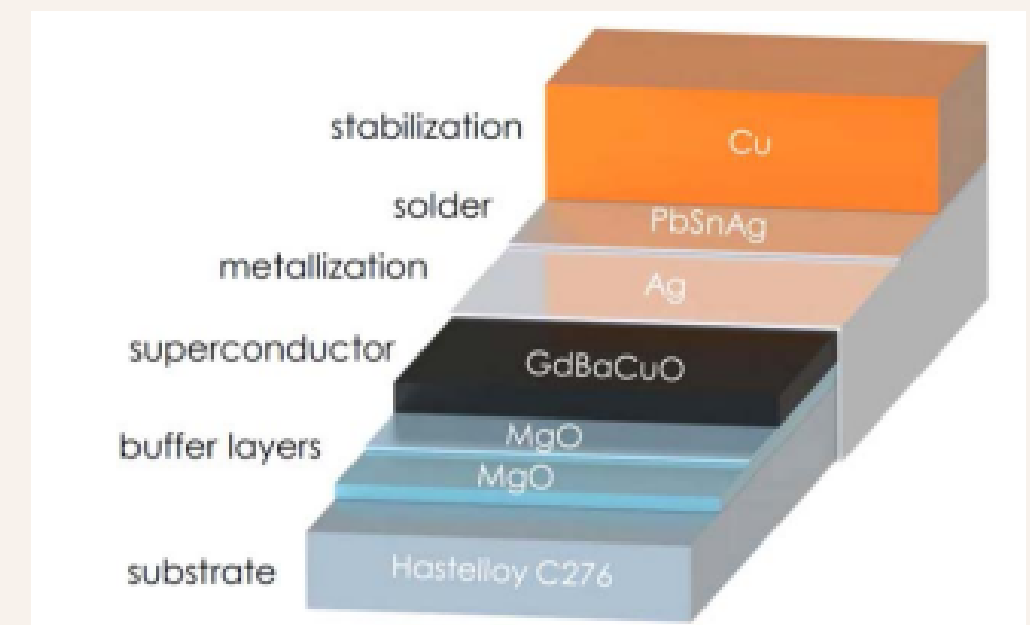
# Aplicações

- Grande parte das aplicações envolve a produção de altos campos magnéticos acima do limite economicamente viável para materiais condutores convencionais. Essa aplicação está relacionada a produção de fios, cabos e fitas supercondutoras.
- Outras aplicações mais específicas fazem uso de efeitos relacionados a supercondutividade discutidos anteriormente, como efeito Josephson.

- Monofilamentares
- Multifilamentares
- Fitas
- Cabos



<https://www.supercon-wire.com/content/nb3sn-superconducting-wires>



Anne Bergen et al 2019 Supercond. Sci. Technol. 32 125006

# Aplicações na ciência

$$\chi = \frac{p}{0.3 \cdot q \cdot B_1}$$

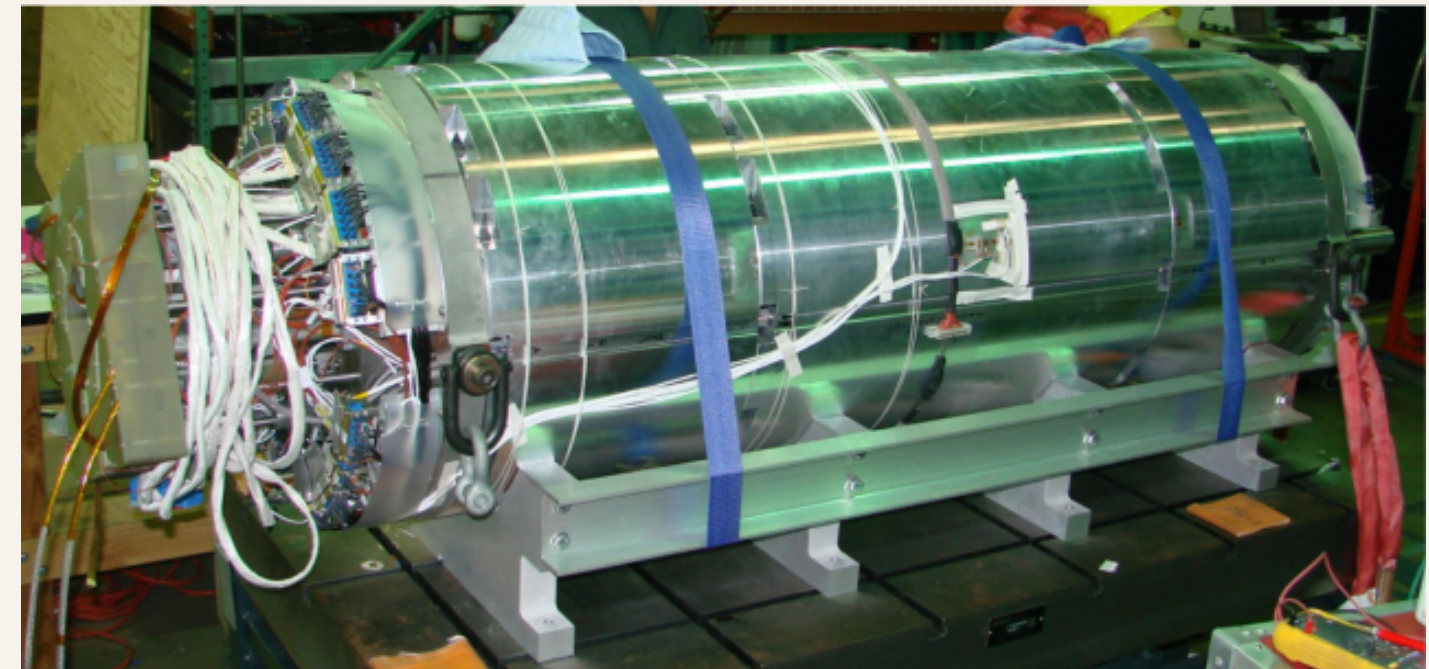
DEVRED, A. "Review of superconducting storage-ring dipole and quadrupole magnets", 1 ago. 1998. DOI: 10.5170/CERN-1998-005.43. Disponível em: <http://cds.cern.ch/record/367388/files/p43.pdf>.

- Ressonância Magnética Nuclear (NMR)
- Aceleradores de partícula
- Magnetos de alto campo

Magnetos de Nb<sub>3</sub>Sn



S. Izquierdo Bermudez et al., "Magnetic Analysis of the MQXF Quadrupole for the High-Luminosity LHC," in IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 29, no. 5, pp. 1-5, Aug. 2019, Art no. 4901705, doi: 10.1109/TASC.2019.2897848.



MQXF1 quadrupole at Fermilab before testing. Courtesy of : G. Ambrosio (US-LARP and Fermilab), P. Ferracin and E. Todesco (CERN TE-MS).

# Aplicações em medicina

- Imagem por ressonância magnética (MRI)
- Campos de  $> 2$  T gerados por magnetos de NbTi →
- O que é NMR?

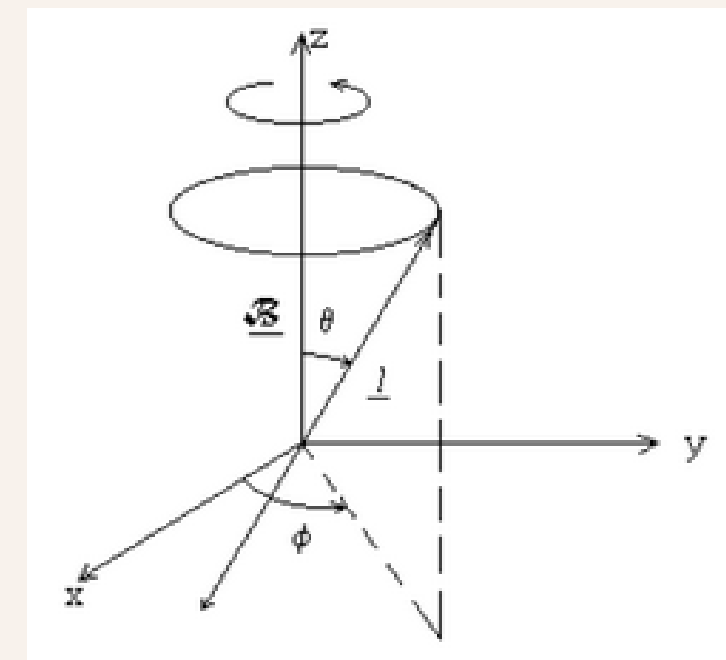
S.S. Ali and M. Zulqarnain, Superconductors for Medical Applications, Materials Research Foundations, Vol. 132, pp 211-229, 2022



Equipamento MRI



Imagem MRI



Efeito Zeeman

- Níveis Zeeman ( $\Delta E = \gamma \cdot B_0 \cdot \hbar$ )
- Frequência de Larmor ( $\omega_0 = \gamma \cdot B_0$ )
- FID (*Free Induction Decay*)

# Aplicações em transportes

*Maglev*

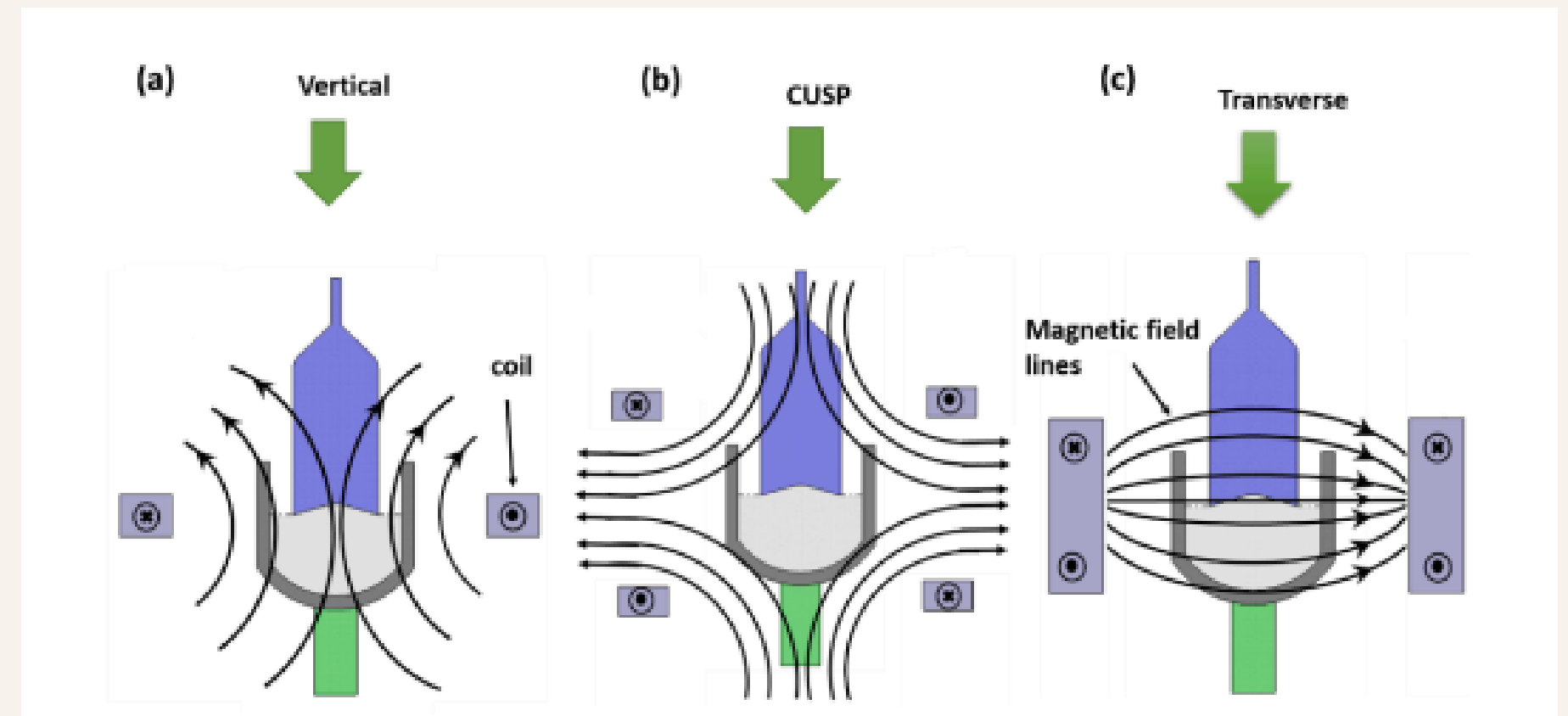
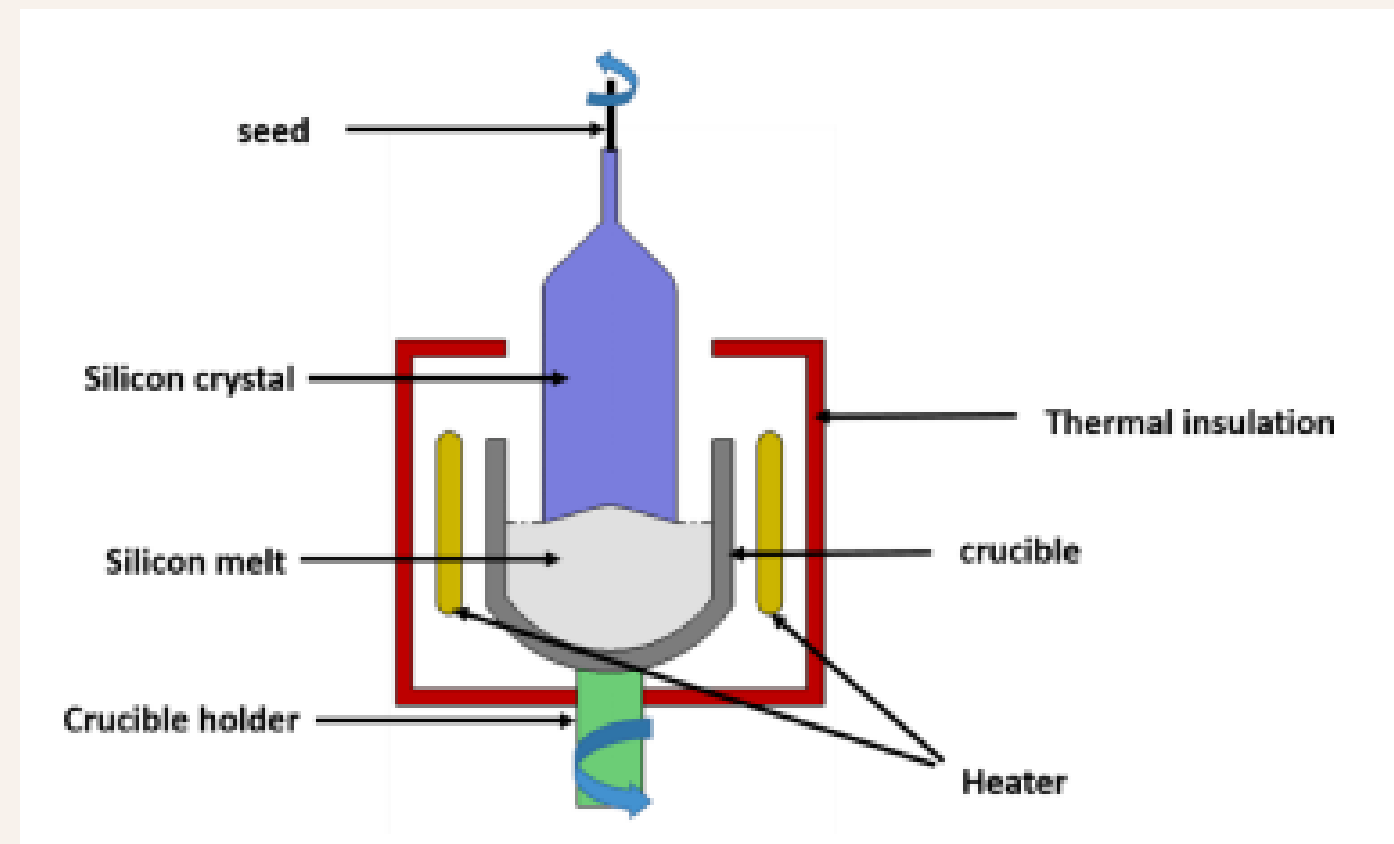


*Fonte:*

*<https://www.theguardian.com/technology/2018/may/29/maglev-magnetic-levitation-domestic-travel>*

# Aplicações industriais

- Crescimento de cristais de silício pelo método Czochralski magnético

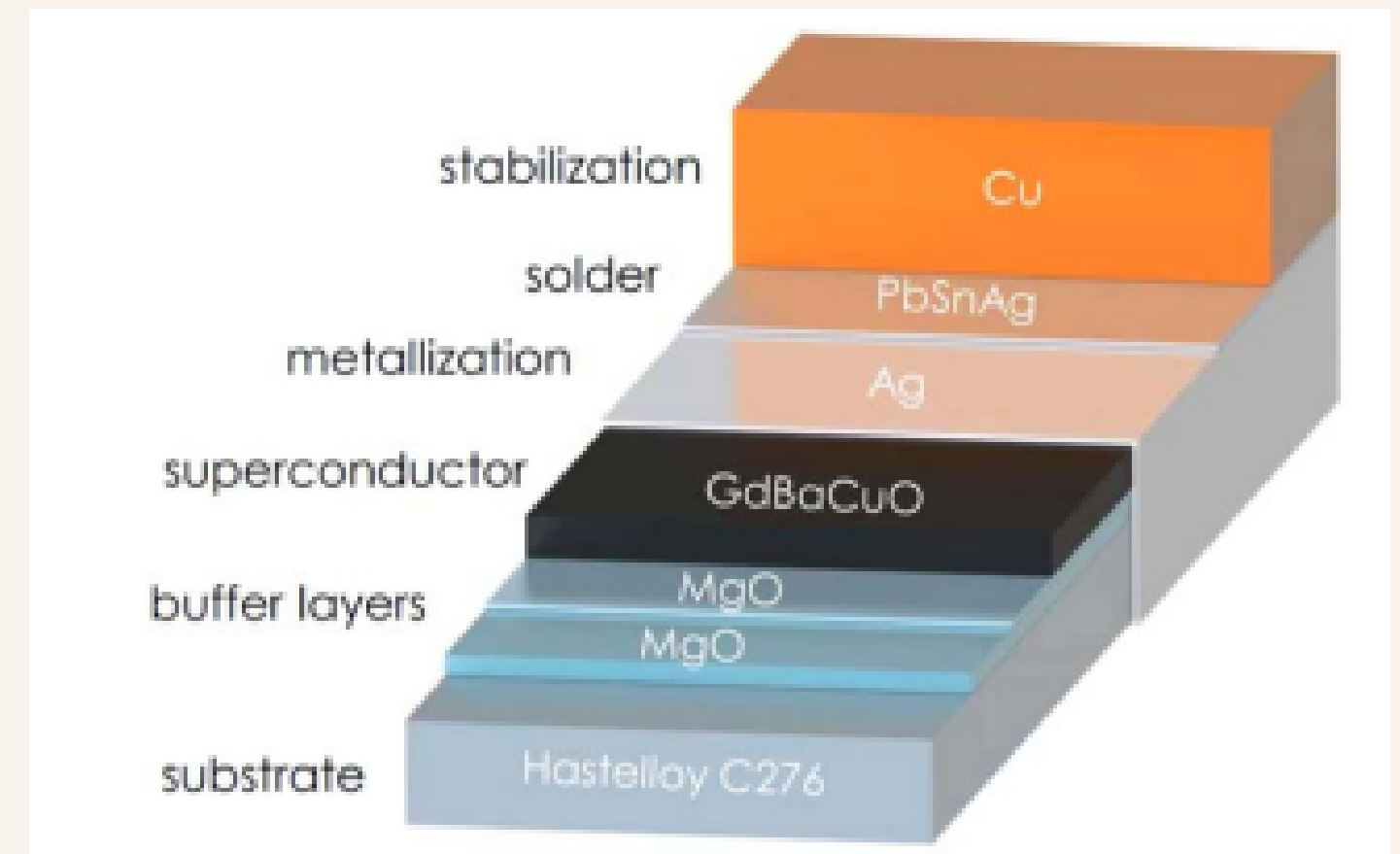


Usam-se, comumente, magnetos de NbTi

Mohammed Mun ELseed Hassaan, Wanjiang Pan, Yinfeng Zhu, Mo Shen, Cheng Wu, Simulation of the superconducting magnet for a silicon single crystal growth, Physica C: Superconductivity and its Applications, Volume 607, 2023, 1354226, ISSN 0921-4534, <https://doi.org/10.1016/j.physc.2023.1354226>.

# Aplicações energéticas

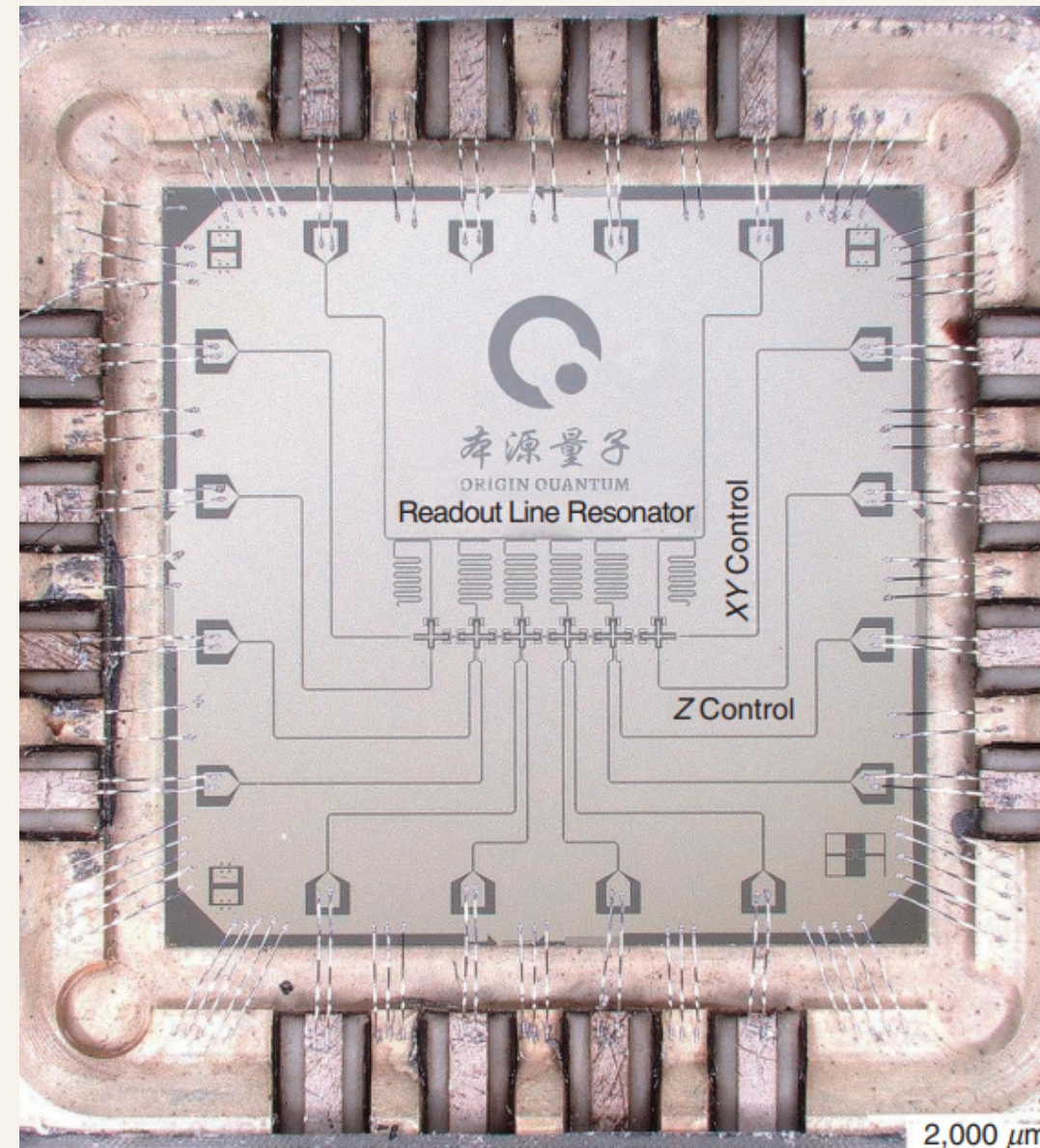
- EcoSwing: turbina eólica com rotor baseado em REBCO



Anne Bergen et al 2019 Supercond. Sci. Technol. 32 125006

# Aplicação em computação quântica

- Qubits supercondutores

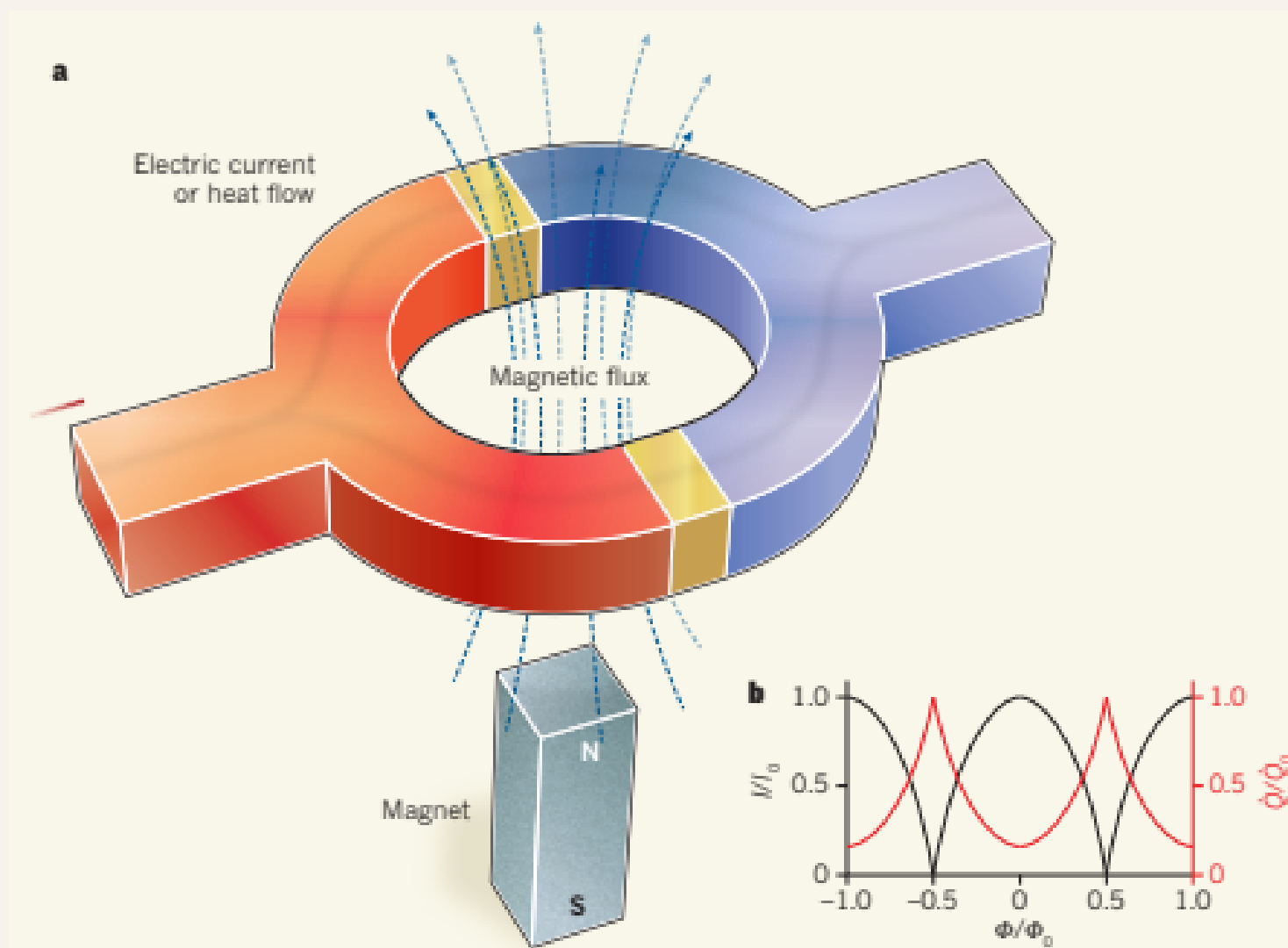


**KF C6-130**

Z. Jia et al., "Superconducting and Silicon-Based Semiconductor Quantum Computers: A review," in IEEE Nanotechnology Magazine, vol. 16, no. 4, pp. 10-19, Aug. 2022, doi: 10.1109/MNANO.2022.3175394.

# Aplicação em sensores

- SQUID e TES



Estudo de parâmetros geométricos na fabricação de TES baseados em bicamada de Mo/Au

Fábrega, L., Camón, A., Pobes, C., & Štrichovanec, P. (2024). On the physical origin of the superconducting transition in transition-edge sensors. *Journal of Applied Physics*, 136(15). <https://doi.org/10.1063/5.0225871>

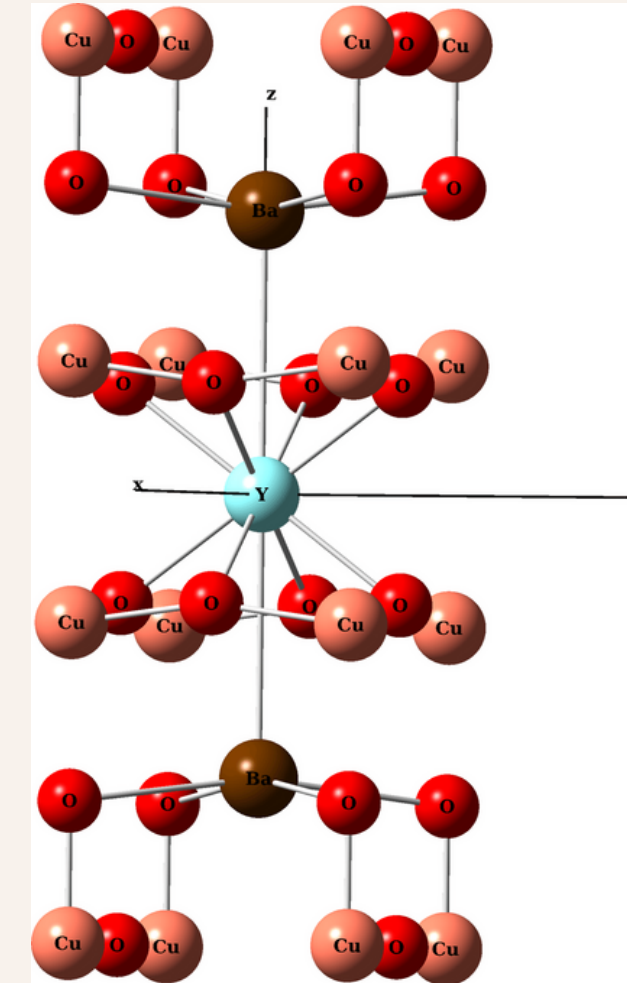
Simmonds, R. Quantum interference heats up. *Nature* 492, 358–359 (2012). <https://doi.org/10.1038/492358a>

# Perspectivas futuras da supercondutividade



# Supercondutores de alta temperatura (HTS)

- YBCO (Yttrium Barium Copper Oxide) e BSCCO (Bismuth Strontium Calcium Copper Oxide) representam avanços significativos, operando acima de 77 K (-196°C, ponto de ebulição do nitrogênio líquido).
- **Progresso no desenvolvimento das teorias:** A supercondutividade em HTS ainda desafia modelos convencionais (BCS), com hipóteses como acoplamento magnético (spin fluctuations) e heterogeneidades eletrônicas (charge stripes) ganhando relevância.



Superconductivity: A century of challenges and overcoming - Scientific Figure on ResearchGate. Available from: [https://www.researchgate.net/figure/Figura-9-Estrutura-cristalina-celula-unitaria-do-YBa-2-Cu-3-O-7-d-A-estrutura\\_fig4\\_262651543](https://www.researchgate.net/figure/Figura-9-Estrutura-cristalina-celula-unitaria-do-YBa-2-Cu-3-O-7-d-A-estrutura_fig4_262651543)

# Supercondutividade em temperatura ambiente

- Marco controverso (2020): O estudo da Nature (586, 373–377) reportou supercondutividade em 15°C no carbonato de hidrogênio enxofrado (C-S-H), sob pressões extremas (267 GPa).
- **Superar desafios:** Reprodutibilidade limitada e a necessidade de pressões elevadas mantêm a busca por materiais estáveis em condições ambientais.

# Novas estruturas promissoras

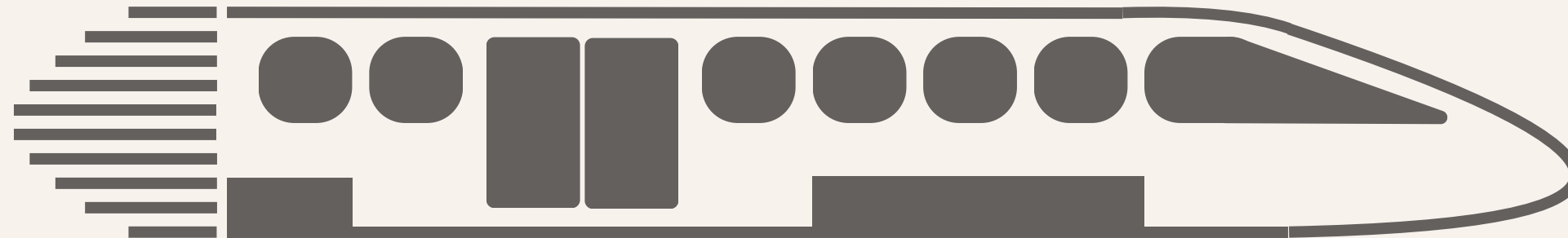
Espera-se avanços no estudo e descoberta de novas estruturas

- Hidretos de lantânio (LaH<sub>10</sub>): Exibem supercondutividade até 250 K (-23°C) sob pressão, com mecanismos de fônons convencionais (BCS modificado).
- Materiais 2D: Estruturas como grafeno bicamada torcido (twisted bilayer graphene) apresentam supercondutividade correlacionada, aberta a novos paradigmas teóricos.

# Trens MagLev

Apesar de já existirem em operação, como o SCMaglev (Japão):  
Utiliza eletroímãs supercondutores de YBCO (Yttrium Barium Copper Oxide) resfriados a nitrogênio líquido (77 K), atingindo 603 km/h (Fujimoto, 2021).

Existêm ainda grandes desafios para se superar, como a redução dos custos iniciais em infraestrutura e o alto custo gerado pelo sistema de resfriamento.



# Transmissão de energia

O projeto AmpaCity (Alemanha) demonstrou redução de perdas energéticas em até 95% em comparação com cabos convencionais.

Menos subestações

Baixo custo de  
operação

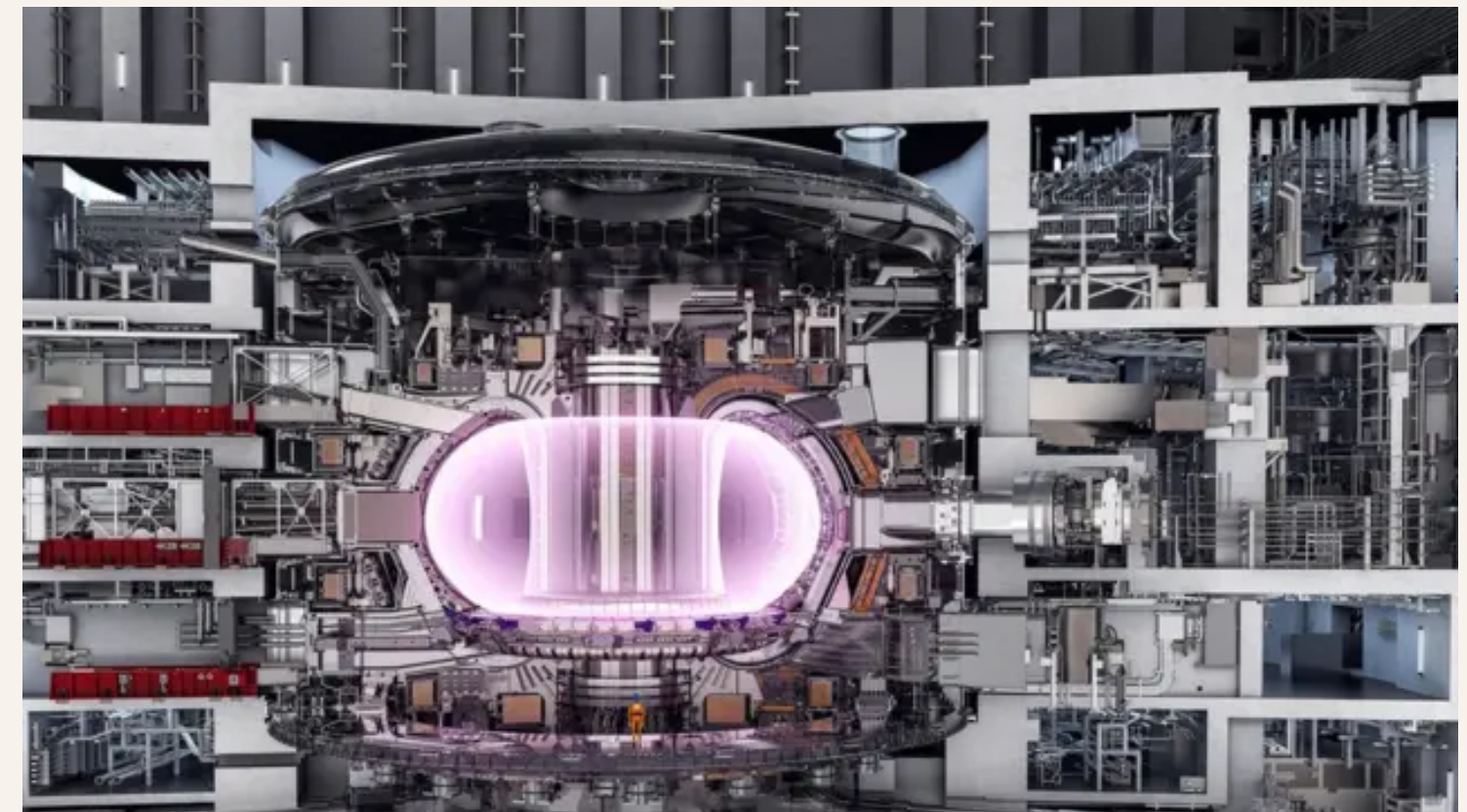
**Desafios a superar:** Dificuldade de escalonamento e custos elevados de materiais (ex: BSCCO).

# Fusão nuclear

Reatores tokamak (ex: ITER): Utilizam ímãs supercondutores ( $\text{Nb}_3\text{Sn}$  e  $\text{NbTi}$ ) para gerar campos magnéticos intensos (13 Tesla) e confinar plasma a milhões de graus.

**Evoluções ligadas ao futuro da supercondutividade:** Possibilidade de reatores comerciais se novos materiais (ex: REBCO) permitirem campos magnéticos ainda mais fortes.

**Desafio crítico:** Desenvolvimento de supercondutores que operem sob altas tensões e radiação.



ITER. (2019). Reactor tokamak for the international fusion energy project Iter [Illustration]. BBC News. Retrieved from <https://www.bbc.com/portuguese/geral-50422745>

# Ressonância magnética (MRI)

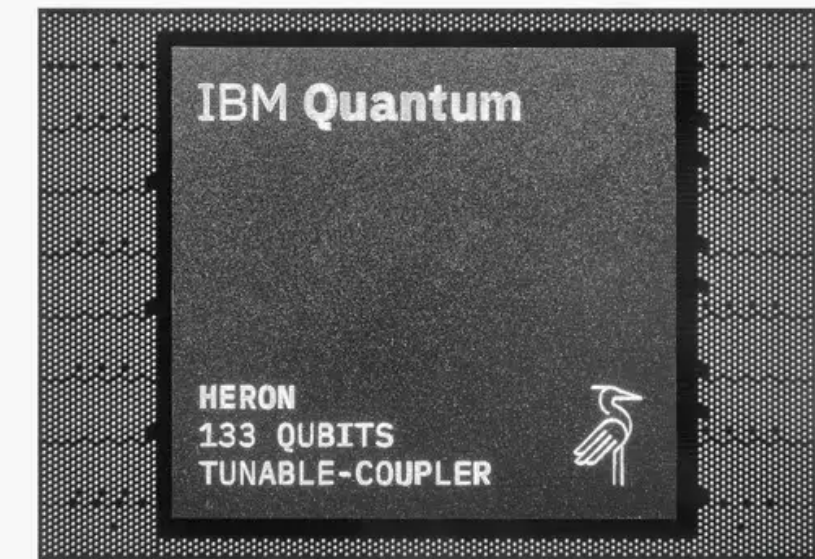
Supercondutores em MRI: Permitem campos magnéticos intensos (1.5–7 Tesla), garantindo imagens de alta resolução para diagnósticos precisos.

**Evoluções esperadas:** Redução dos custos de produção do equipamento, permitindo o aumento da acessibilidade.

# Computação quântica

Pesquisa de supercondutores topológicos (ex.: Majorana fermions) para qubits mais robustos contra decoerência.

Uso potencial de HTS (YBCO, BSCCO) para operação em temperaturas mais altas ( $\sim 77$  K), reduzindo custos criogênicos.



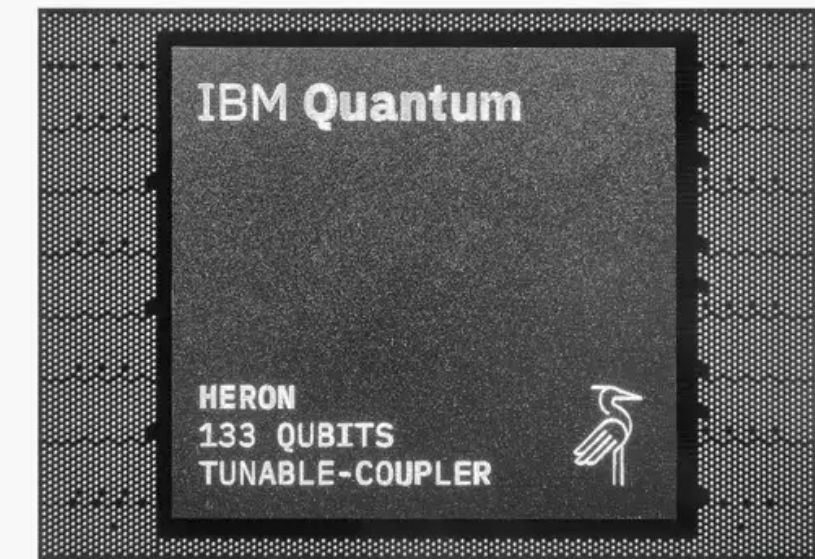
IBM. (2023). IBM Quantum System Two quantum processor [Photograph]. AIoT Brasil. Retrieved from <https://aiotbrasil.com.br/noticias/ibm-tem-novo-processador-quantico>

# Computação quântica

## Arquiteturas Avançadas:

Desenvolvimento de "qubits protegidos" (protected qubits) que usam propriedades intrínsecas de supercondutores (ex.: fluxonium) para reduzir erros.

Integração com fotônica supercondutora para redes quânticas distribuídas.



IBM. (2023). IBM Quantum System Two quantum processor [Photograph]. AIoT Brasil. Retrieved from <https://aiotbrasil.com.br/noticias/ibm-tem-novo-processador-quantico>

# SQUIDs

Relembrando as aplicações:

- Detectam campos magnéticos ultrafracos (ex.: atividade cerebral em neurociência).
- Usados em geofísica (mineração) e medicina (magnetoencefalografia).

**Pesquisas de aprimoramento:** Desenvolvimento de SQUIDs baseados em HTS (ex.: YBCO) para operação em nitrogênio líquido.



A supercondutividade oferece um fértil terreno para avanços científicos e tecnológicos, com desafios teóricos fundamentais - como a busca por supercondutores em temperatura ambiente - e aplicações revolucionárias em energia, transporte e computação quântica. O impacto científico de novas descobertas pode ser tão alto quanto os impactos comerciais.

# Referências

Anne Bergen et al 2019 Supercond. Sci. Technol. 32 125006

DEVRED, A. "Review of superconducting storage-ring dipole and quadrupole magnets", 1 ago. 1998. DOI: 10.5170/CERN-1998-005.43. Disponível em: <http://cds.cern.ch/record/367388/files/p43.pdf>.

S. Izquierdo Bermudez et al., "Magnetic Analysis of the MQXF Quadrupole for the High-Luminosity LHC," in IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 29, no. 5, pp. 1-5, Aug. 2019, Art no. 4901705, doi: 10.1109/TASC.2019.2897848.

MQXF1 quadrupole at Fermilab before testing. Courtesy of : G. Ambrosio (US-LARP and Fermilab), P. Ferracin and E. Todesco (CERN TE-MS).

S.S. Ali and M. Zulqarnain, Superconductors for Medical Applications, Materials Research Foundations, Vol. 132, pp 211-229, 2022

Mohammed Mun ELseed Hassaan, Wanjiang Pan, Yinfeng Zhu, Mo Shen, Cheng Wu, Simulation of the superconducting magnet for a silicon single crystal growth, Physica C: Superconductivity and its Applications, Volume 607, 2023, 1354226, ISSN 0921-4534, <https://doi.org/10.1016/j.physc.2023.1354226>.

Z. Jia et al., "Superconducting and Silicon-Based Semiconductor Quantum Computers: A review," in IEEE Nanotechnology Magazine, vol. 16, no. 4, pp. 10-19, Aug. 2022, doi: 10.1109/MNANO.2022.3175394.

Simmonds, R. Quantum interference heats up. Nature 492, 358–359 (2012). <https://doi.org/10.1038/492358a>

Fábrega, L., Camón, A., Pobes, C., & Štrichovanec, P. (2024). On the physical origin of the superconducting transition in transition-edge sensors. Journal of Applied Physics, 136(15). <https://doi.org/10.1063/5.0225871>

<https://www.supercon-wire.com/content/nb3sn-superconducting-wires>

<https://www.theguardian.com/technology/2018/may/29/maglev-magnetic-levitation-domestic-travel>

# Referências

Rogalla, H., and Kes, P.H. (2012). 100 Years of Superconductivity (CRC Press).

Balachandran, S., Tarantini, C., Starch, W.L., Paudel, N., Lee, P.J., and Larbalestier, D.C. (2020). 60 years on - A new alloy for better Nb<sub>3</sub>Sn. presentation at Applied Superconductivity Conference (virtual) (presentation ID: Wk2P3-1).

Lee, P. (2018). Engineering critical current density vs. Applied field for superconductors. [nationalmaglab.org/magnet-development/applied-superconductivity-center/plots](http://nationalmaglab.org/magnet-development/applied-superconductivity-center/plots).

Bednorz, J.G., and Muller, K. (1986). Possible high T<sub>c</sub> superconductivity in the Ba-La-Cu-O system Z. Phys. B 64, 189-193.

Michel, C., Hervieu, M., Borel, M.M., Grandin, A., Deslandes, F., Provost, J., and Raveau, B. (1987). Superconductivity in the Bi-Sr-Cu-O system 2. Physik B 68, 421-423.

MacManus-Driscoll, J.L., and Wimbush, S.C. (2021). Processing and application of high-temperature superconducting coated conductors. Nat. Rev. Mater., In press.

Kamihara, Y., Watanabe, T., Hirano, M., and Hosono, H. (2008) Iron-based layered superconductor La<sub>1-x</sub>O<sub>1-xF</sub>FeAs (x=0.005-0.12) with T<sub>c</sub>=26K J. Am. Chem. Soc. 130, 3296-3297. (Descoberta dos IBS)

Hosono, H., Yamamoto, A., Hiramatsu, H., and Ma, Y.W. (2018) Recent advances in iron-based superconductors toward applications. Mater. Today 21, 278-302.

Yao, C., and Ma, Y.W (2019), Recent breakthrough development in iron-based superconducting wires for practical applications. Supercond. Sci Technol. 32, 023002.

# Referências

Ashcroft, N. W., & Mermin, N. D. (1976). Solid State Physics. Saunders College.

H. Frohlich, Phys. Rev. 79,845 (1950)

J. Bardeen and D. Pines, Rhys. Rev. 99,1140 (1955)

Langer, J. S., & Ambegaokar, V. (1967). Intrinsic Resistive Transition in Narrow Superconducting Channels. Physical Review, 164(2), 498–510.

F. London and H. London, Proc. Roy. Soc. (London), A149, 71 (1935)

J. Bardeen, L. N. Cooper, and J. R. Schrieffer, Phys. Rev. 108,1175 (1957)

L. N. Cooper. Phys. Rev. 104, 1189 (1956).

V. L. Ginzburg and L. D. Landau, Zh. Eksp. Teor. Fiz. 20,1064 (1950)

B. S. Deaver and W. M. Fairbank, Phys. Rev. Lett. 7, 43 (1961)

R. Doll and M. Nabauer, Phys. Rev. Lett. 7, 51 (1961)

S. Shapiro et al., IBM J. Res. Develop. 6, 34 (1962)

MODERN PHYSICS SERWAY: superconductivity. [S.l.], abril. 2004.

UNESP: historico\_supercondutividade. São Paulo. Disponível em: [https://wwwp.fc.unesp.br/~rafael/historico\\_supercondutividade.htm](https://wwwp.fc.unesp.br/~rafael/historico_supercondutividade.htm). Acesso em: 09 jun. 2025.

NUNES, Cristina Bormio. Supercondutividade: conceitos básicos. Usp, Lorena. maio 2025.

NUNES, Cristina Bormio. Supercondutividade:origem quântica e consequências. Usp, Lorena. maio 2025.

# Referências

WINES, Daniel; CHOUDHARY, Kamal. Data-driven design of high pressure hydride superconductors using DFT and deep learning. Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology, 2024.

Pengye Liu et al 2024 J. Phys.: Condens. Matter 36 353001

KONG, Panpan; MINKOV, Vasily S.; KUZOVNIKOV, Mikhail A.; DROZDOV, Alexander P.; BESEDIN, Stanislav P.; MOZAFFARI, Shirin; BALICAS, Luis; BALAKIREV, Fedor F.; PRAKAPENKA, Vitali B.; CHARITON, Stella; KNYAZEY, Dmitry A.; GREENBERG, Eran; EREMETS, Mikhail I. Superconductivity up to 243 K in the yttrium-hydrogen system under high pressure. Nature Communications, [S. l.], v. 12, n. 1, 2021. Disponível em: | <https://doi.org/10.1038/s41467-021-25372-2>. Acesso em: 10 de junho de 2025

Drozdo, A.P., Kong, P.P., Minkov, V.S. et al. Superconductivity at 250 K in lanthanum hydride under high pressures. Nature 569, 528–531 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1201-8>

Drozdo, A., Eremets, M., Troyan, I. et al. Conventional superconductivity at 203 kelvin at high pressures in the sulfur hydride system. Nature 525, 73–76 (2015). <https://doi.org/10.1038/nature14964>

ALVES, Bruno Coelho (org.). ESTUDO SOBRE APLICAÇÃO E VANTAGENS DE ELEMENTOS SUPERCONDUTORES DE ALTA TEMPERATURA EM LINHAS DE TRANSMISSÃO. Universidade Federal de Viçosa Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas Departamento de Engenharia Elétrica, Viçosa. 2014.

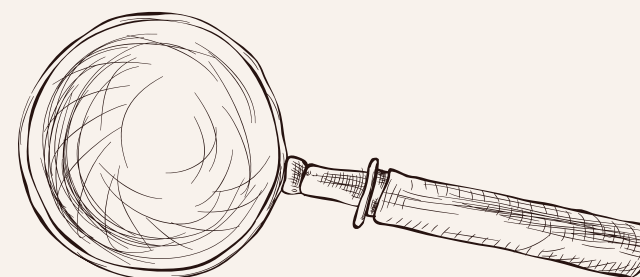
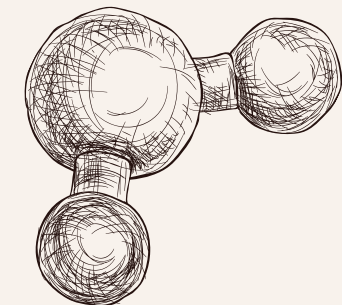
# Referências

Nature (2020). "Room-temperature superconductivity in a carbonaceous sulfur hydride".

Fujimoto, T. (2021). "Development of Superconducting MagLev in Japan". IEEE Transactions on Applied Superconductivity.

MarketsandMarkets (2023). "Superconductors Market Forecast".

ITER Organization (2023). "Superconducting Magnets for Fusion".



# Obrigado!

