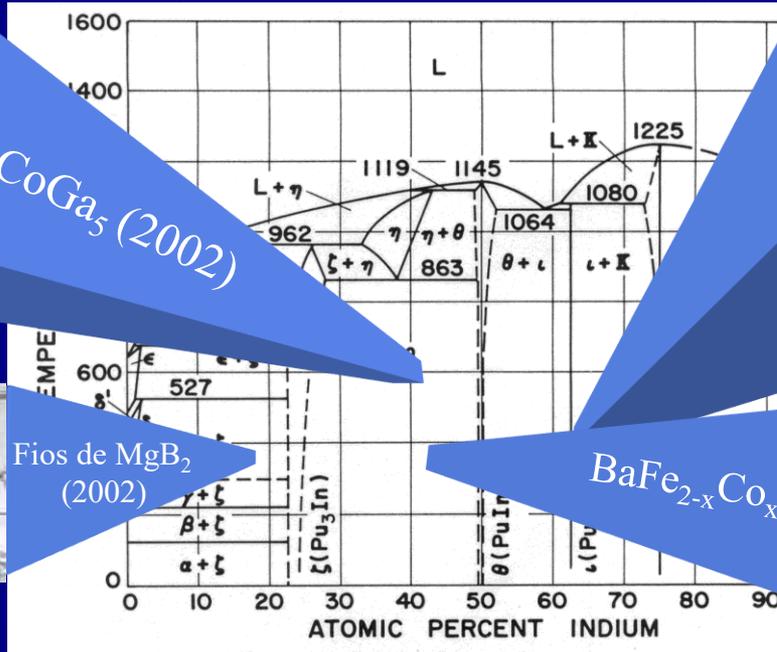


Supercondutividade



PuCoGa_5 (2002)

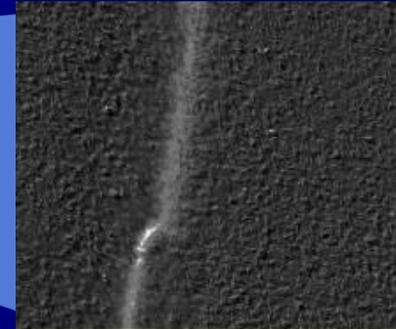


$\text{Na}_x\text{CoO}_2 \cdot y\text{H}_2\text{O}$
(2003)



Fios de MgB_2
(2002)

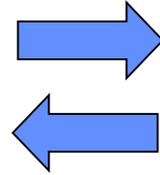
$\text{BaFe}_{2-x}\text{Co}_x\text{As}_2$ (2008)



Ciência e Tecnologia



**Desenvolvimento
da Ciência**



Tecnologia



*Novos Materiais
(ou descobertas)*



*Aprimoramento
Técnico-científico*

*Propriedades
extraordinárias*

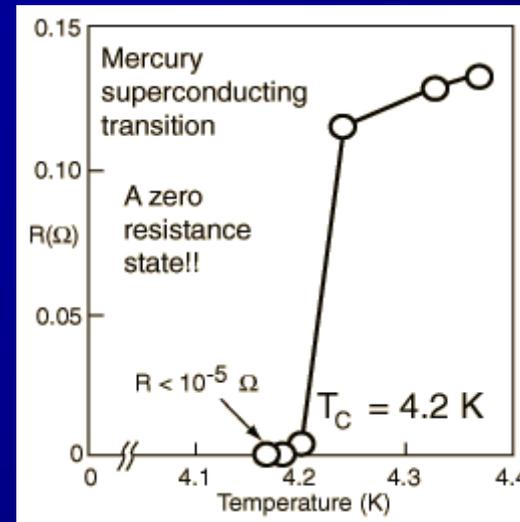
*Aplicação
Tecnológica e
Desenvolvimento
do conhecimento*



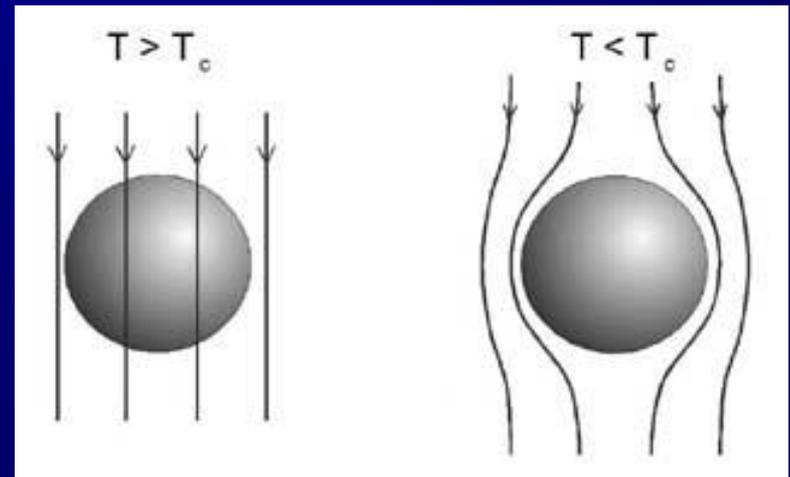
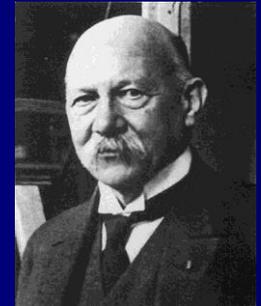
Supercondutividade

Descoberta por Kamerlingh Onnes em 1911 em Hg, Sn, Pb (Prêmio Nobel de 1913)

Em 1933, Meissner e Ochsenfeld descobriram que o campo magnético é expulso do interior de um SC abaixo de T_c .

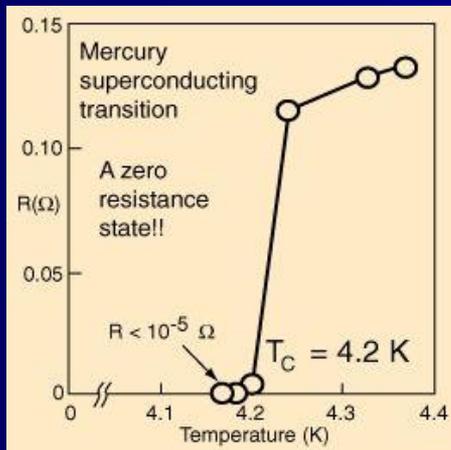


Onnes



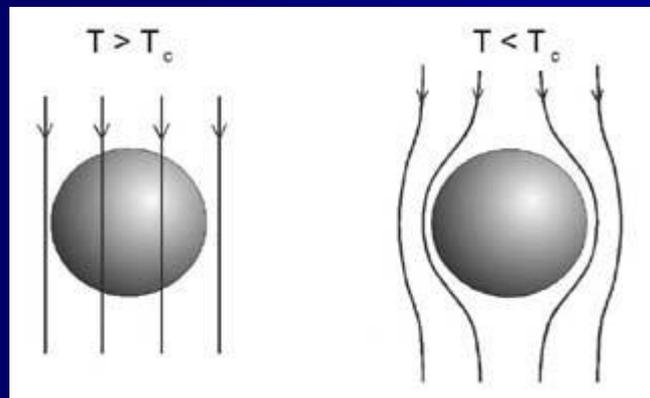
Duas propriedades extraordinárias dos Supercondutores

I. Condutividade perfeita ($\rho = 0$ para $T < T_C$)



Fios supercondutores podem conduzir corrente sem dissipar energia.

II. Diamagnetismo Perfeito ($\chi = -1/4\pi$ para $T < T_C$)



Efeito Meissner

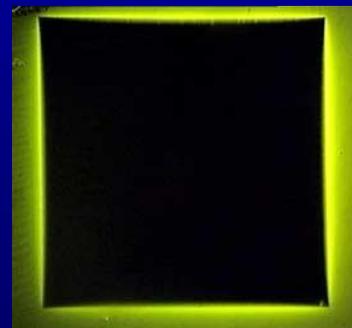
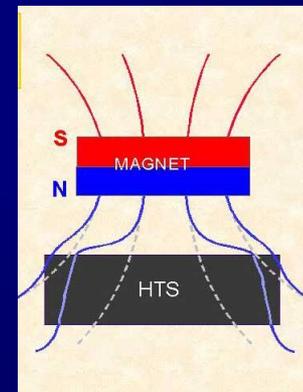


Imagem magneto-óptica –
Universidade de Oslo - Noruega



Teoria microscópica:

Bardeen, Cooper e Schrieffer



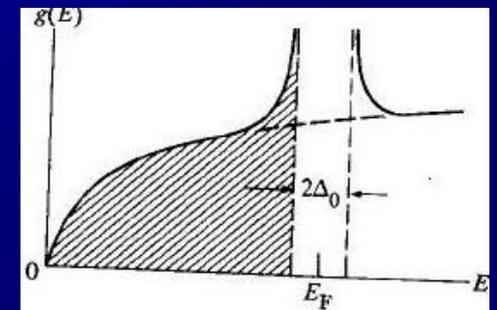
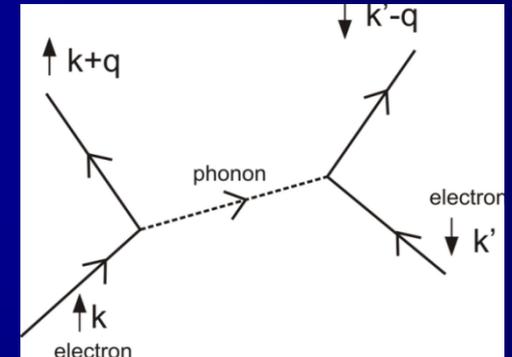
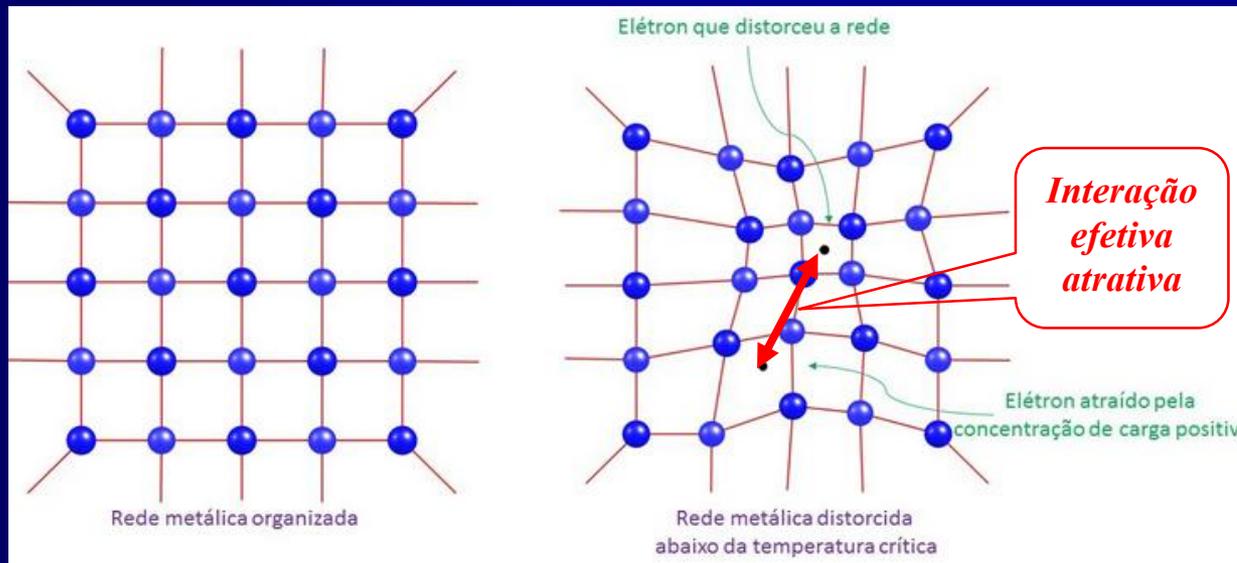
Em 1957, 46 anos após a descoberta da SC, BCS finalmente descobriram a explicação microscópica da SC.

Os 3 receberam o prêmio Nobel de 1972 pela descoberta. John Bardeen é o único a ter recebido 2 Nobel de Física (o primeiro, de 1956, junto com Brattain e Shockley, pela invenção do transistor).

O problema já havia frustrado as tentativas de físicos proeminentes como Bohr, Pauli, Heisenberg, Landau, Bloch, Einstein e Feynman.

Pares de Cooper:

Através dessa atração efetiva, os elétrons tendem a formar um estado fracamente ligado. Esses pares são chamados de pares de Cooper.

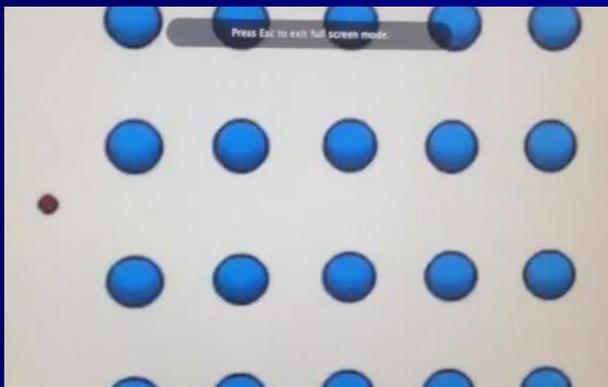
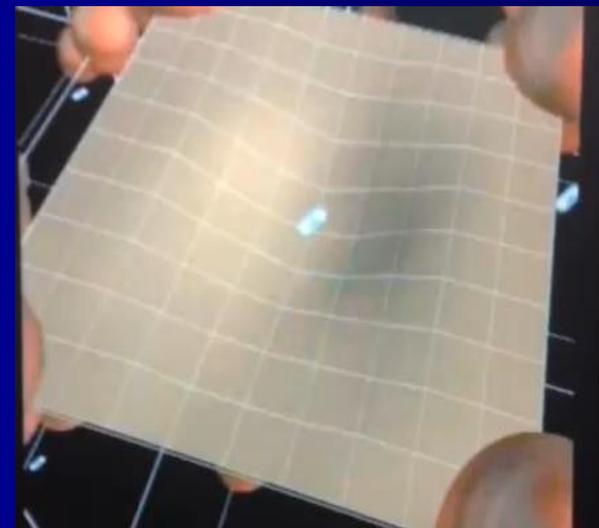
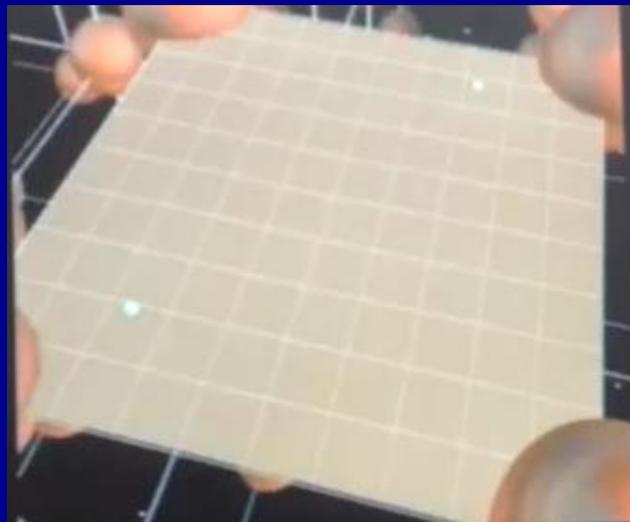


É interessante notar que os pares são muito "grandes", cerca de 100-1000 vezes o espaçamento de rede entre os íons e a própria distância média entre os elétrons: **entre os 2 elétrons de um par, existem milhares de outros pares!**

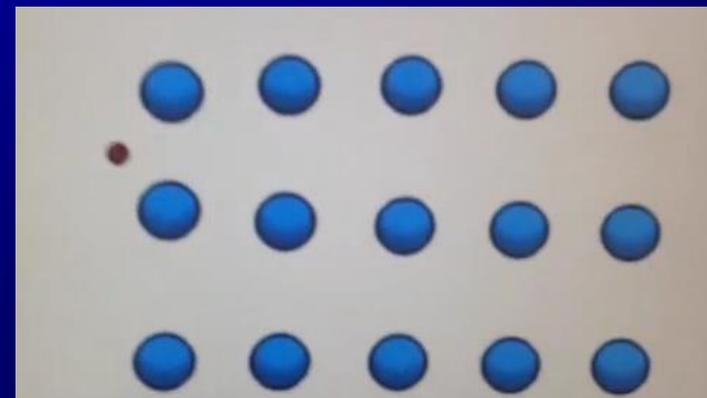
Condensação e rigidez da função de onda

O estado supercondutor é o resultado da condensação de pares de Cooper, o que resulta em uma função de onda global do condensado.

A rigidez da função de onda do condensado é que é responsável por duas propriedades importantes do SC: i) Sua resistência nula e ii) Efeito Meissner: a função de onda expulsa o campo magnético.

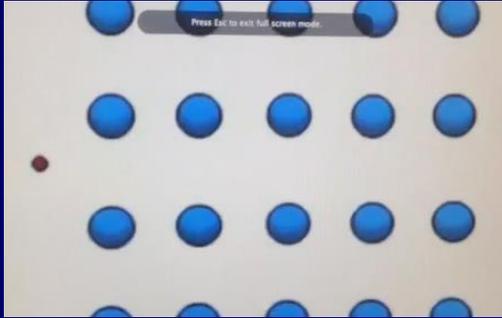


Alta-T

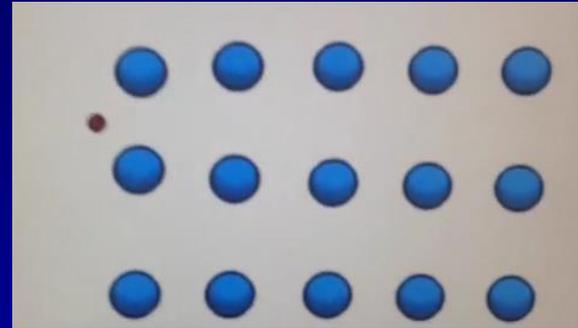


Baixa-T

Teoria BCS



Alta-T



Baixa-T

A deformação da rede cristalina aumenta a concentração local de cargas positivas, o que atrai outro elétron. Assim, os dois elétrons são atraídos mutuamente, por intermédio do fônon associado à deformação local. A partícula composta pelos dois elétrons e o fônon é o que se denomina par de Cooper.

A energia máxima que pode ser transferida de um elétron para o outro elétron num par de Cooper pelo fônon é da ordem de sua energia característica de fônon E_D :

$$E_D = k_B \theta_D \quad (1)$$

Onde θ_D é a temperatura de Debye e k_B é a constante de Boltzman.

Tipicamente, $\theta_D \sim 100$ K . Já a temperatura de Fermi é $T_F \sim 10^4 - 10^5$ K. Assim, fica evidente que a energia de fônon é muito menor do que a energia de Fermi.

Teoria BCS

A Teoria BCS prevê que o valor esperado do potencial atrativo entre os elétrons do par $\langle V_{\text{at}} \rangle = -V_0$ é uma quantidade importante na interpretação microscópica da supercondutividade.

De acordo com a teoria BCS, a existência de estados de pares ligados será possível somente para pequenos valores positivos de V_0 . Assim, para $T=0$, a teoria BCS prevê que a energia de ligação entre os elétrons num par de Cooper é dado por:

$$E_l = 2E_D e^{-\frac{2}{R_0 V_0}} \quad (2)$$

onde R_0 é a densidade numérica de partículas, ρ , por unidade de energia.

A equação (2) indica que a energia de ligação E_l pode ser muito menor do que a energia característica de fônon E_D . Este fato é fundamental na supercondutividade pois, como a temperatura crítica de transição osupercondutora T_c , que é da ordem de E_b/k , ele é usualmente 1 ou 2 ordens de grandeza menor do que a temperatura de Debye θ_D .

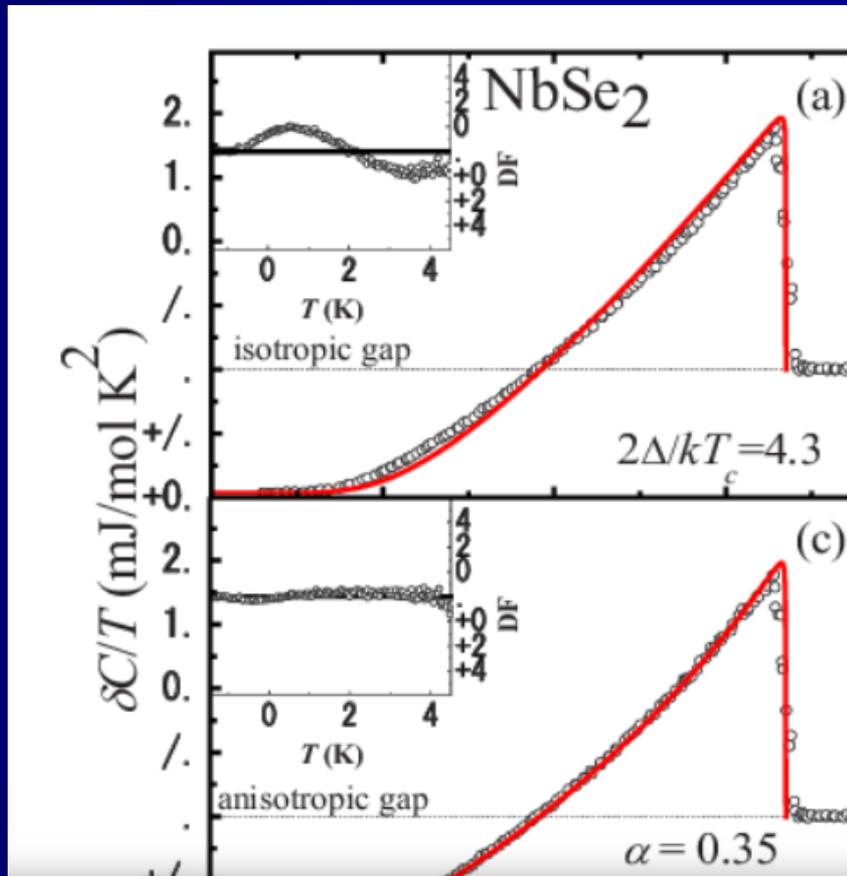
Ainda, a Teoria BCS prevê que quando os pares de Cooper se formam, o sistema diminui sua energia abrindo um *gap* na superfície de Fermi dado por:

$$\varepsilon_g = 2\Delta = 4E_D e^{-\frac{1}{R_0 V_0}} \quad (3)$$

Teoria BCS

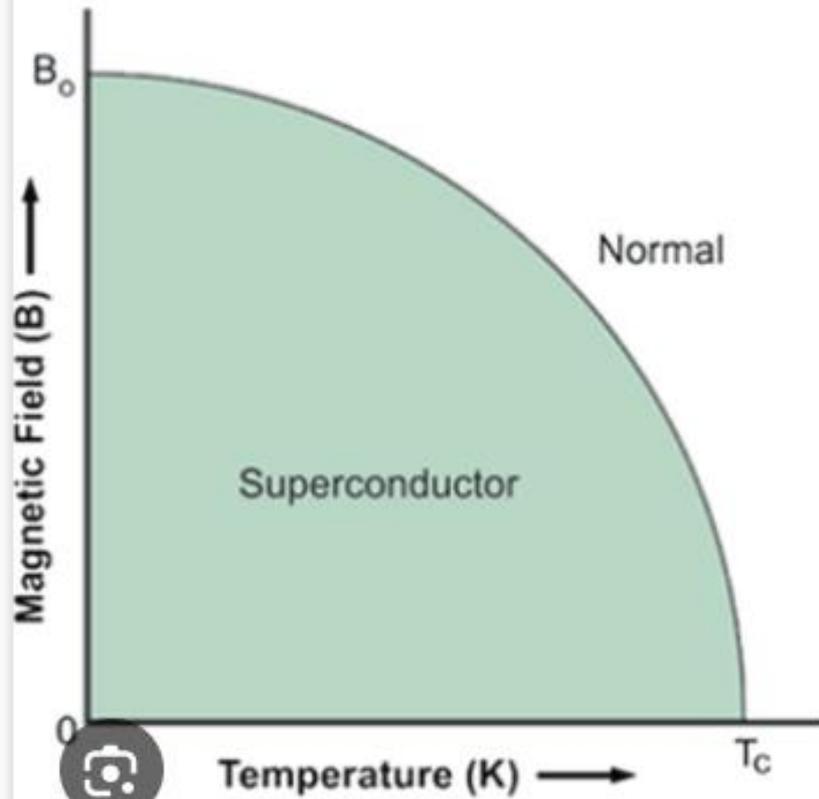
Ainda, a Teoria BCS prevê uma relação simples entre T_c e o “gap” de energia ϵ_g :

$$\epsilon_g = 3,51k_B T_C \quad (4)$$

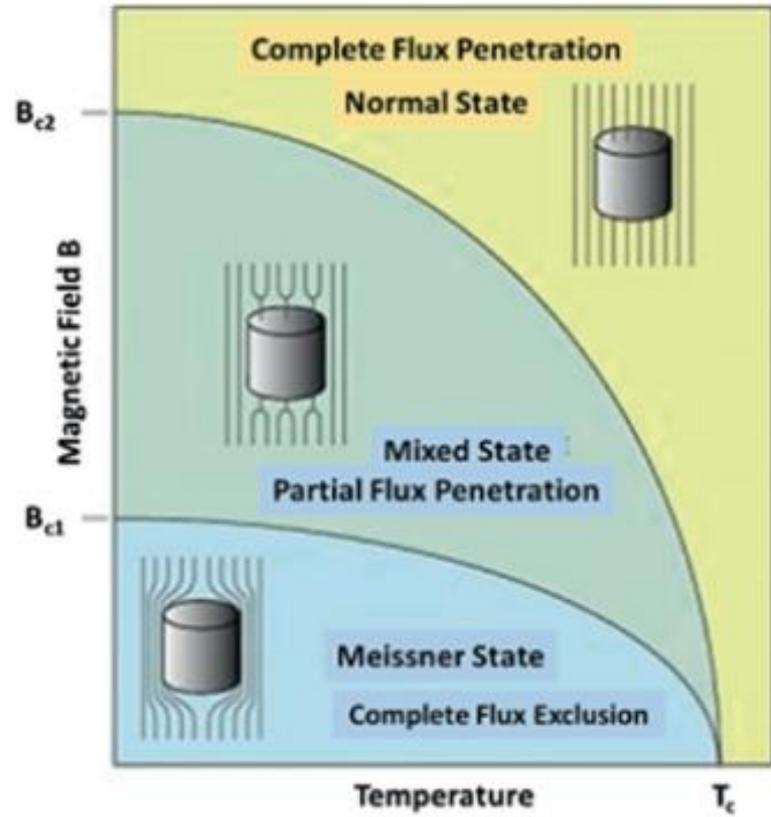


•DOI:[10.1103/PhysRevB.76.212504](https://doi.org/10.1103/PhysRevB.76.212504)

Superconductor Tipo I e II

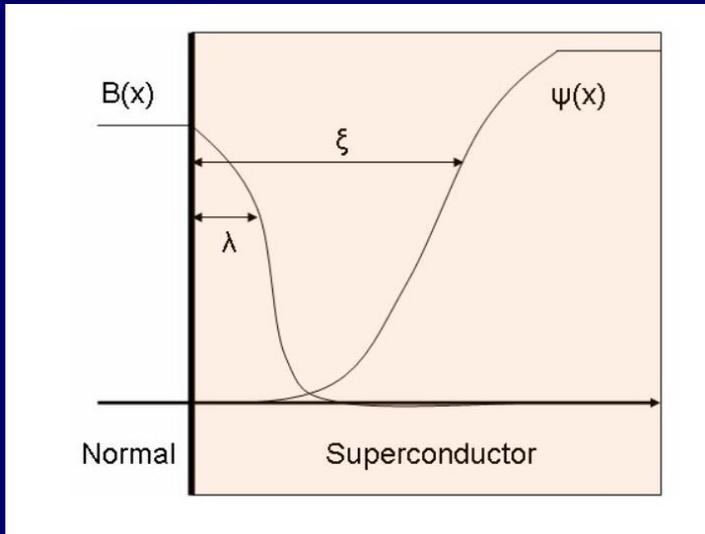


(a) Type I



(b) Type II

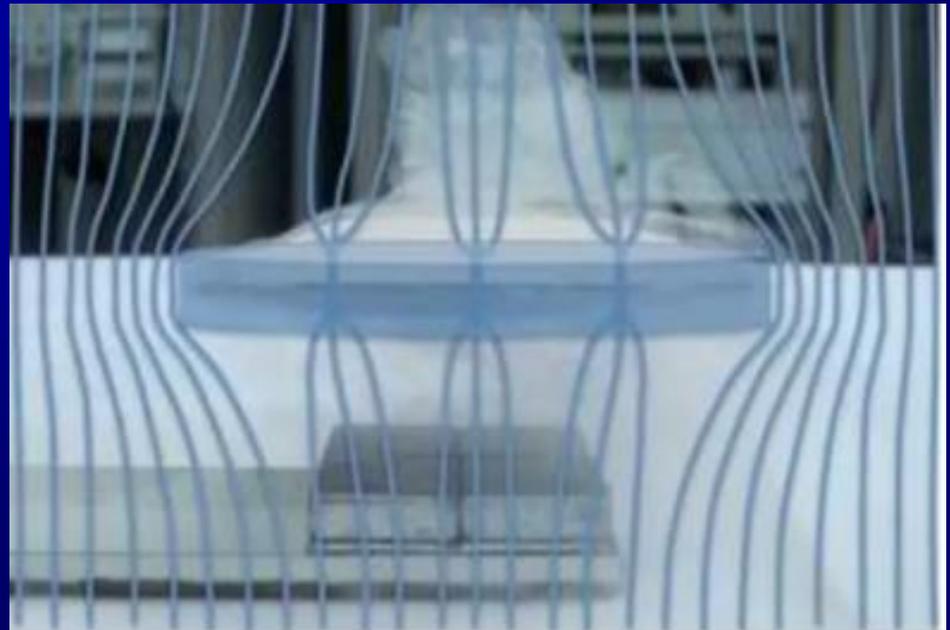
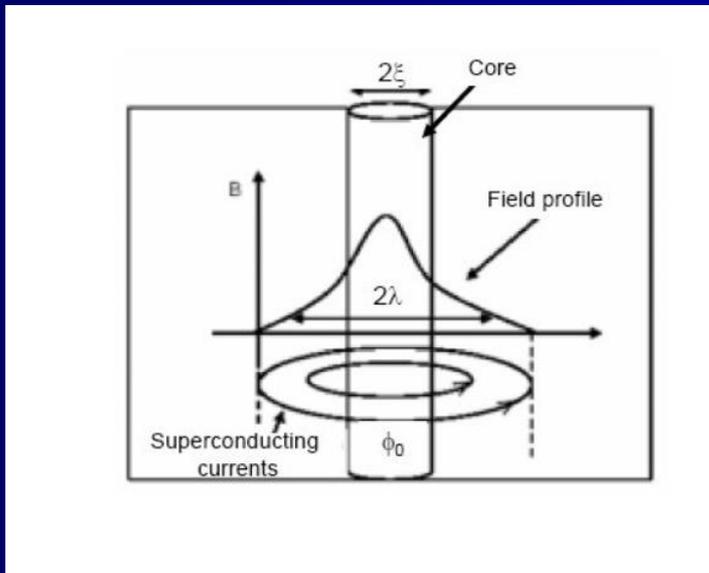
Supercondutor Tipo I e II



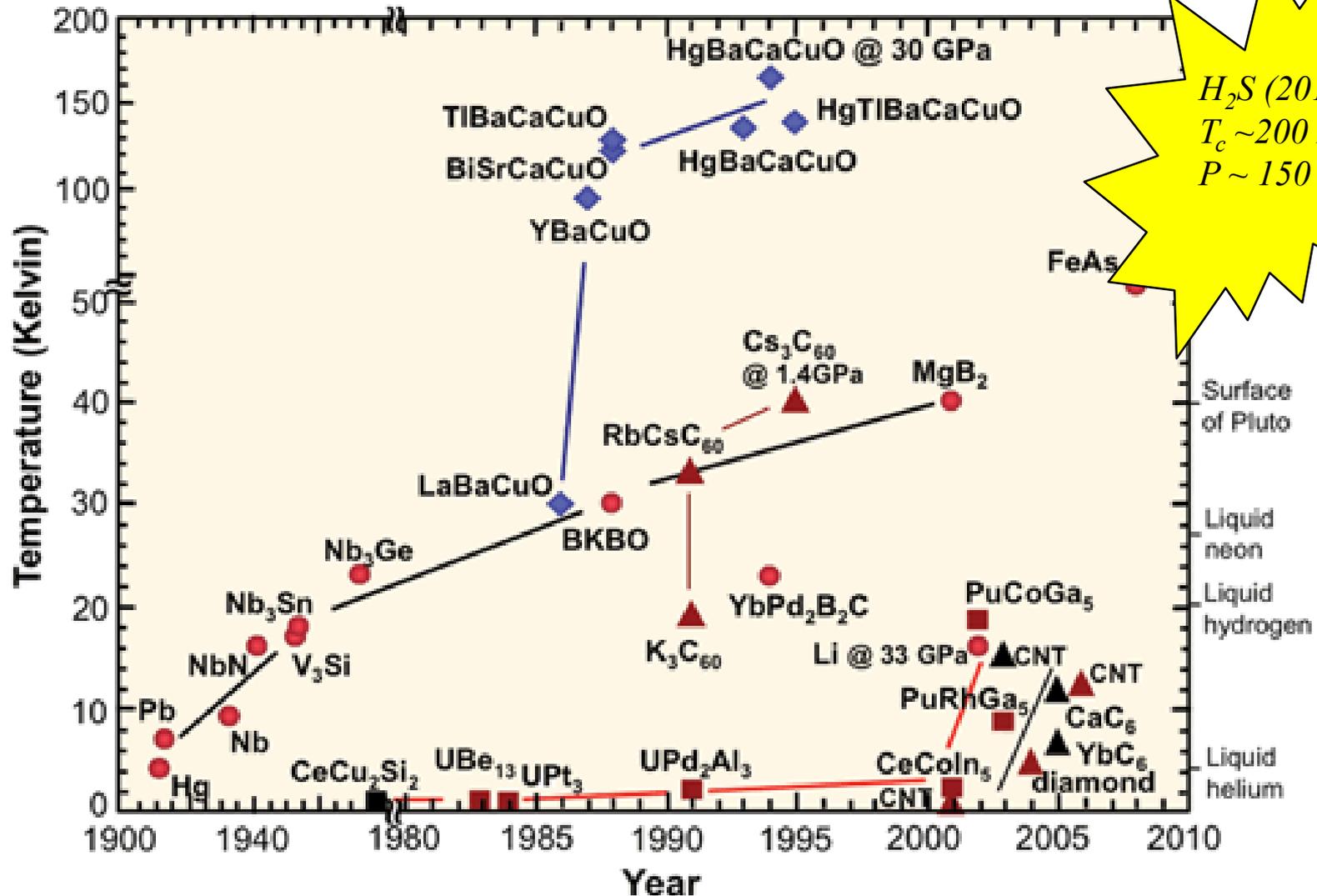
Onde ξ é o comprimento de coerência e λ é o comprimento de penetração.

Tipo I - $\xi \gg \lambda$

Tipo II - $\xi \ll \lambda$

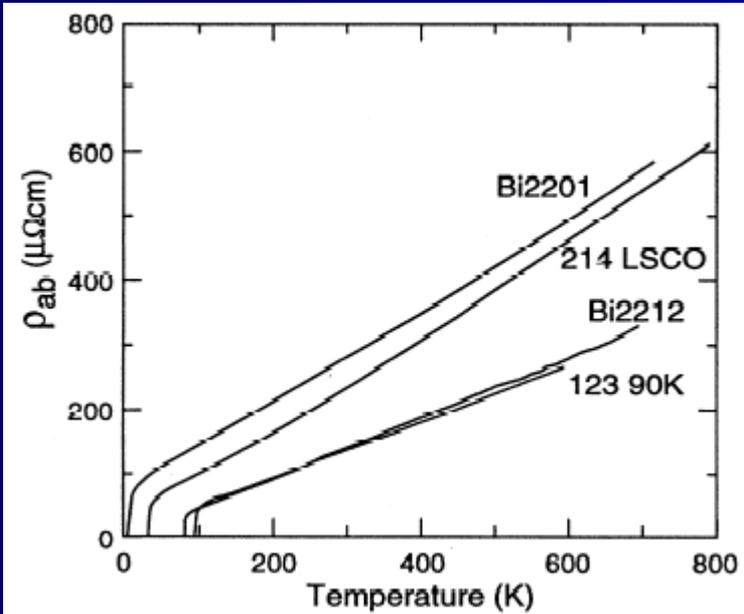


A história da supercondutividade



A história ainda não terminou...

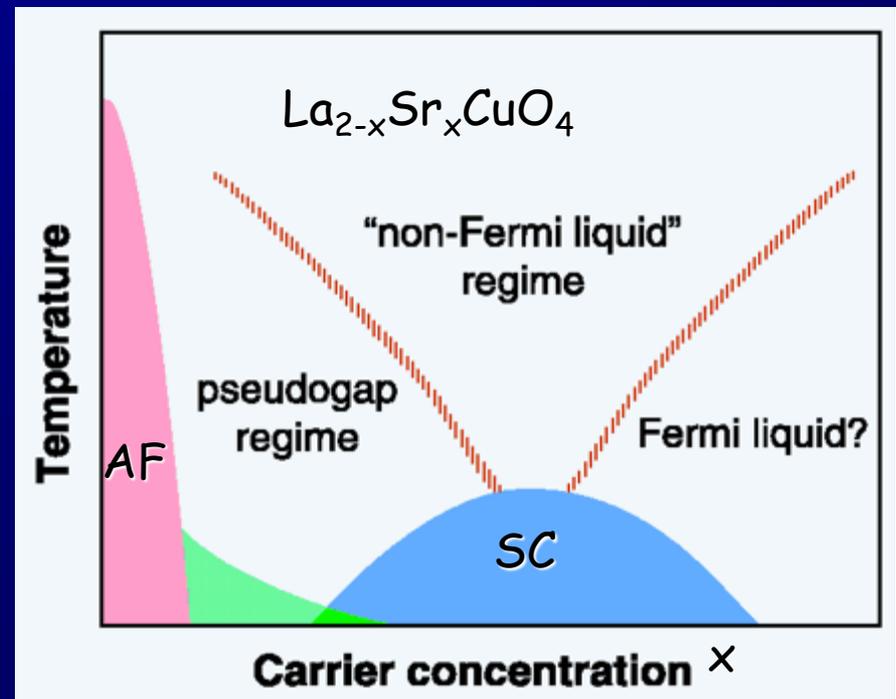
Supercondutores de alta temperatura crítica: descobertos em 1986 por Bednorz e Müller (Nobel 1987)



T_c recorde é 139 K a press. ambiente.

Não se conhece ainda o mecanismo microscópico.

Forte conexão com magnetismo: SC ocorre próximo ao antiferromagnetismo.



Aplicações da Supercondutividade

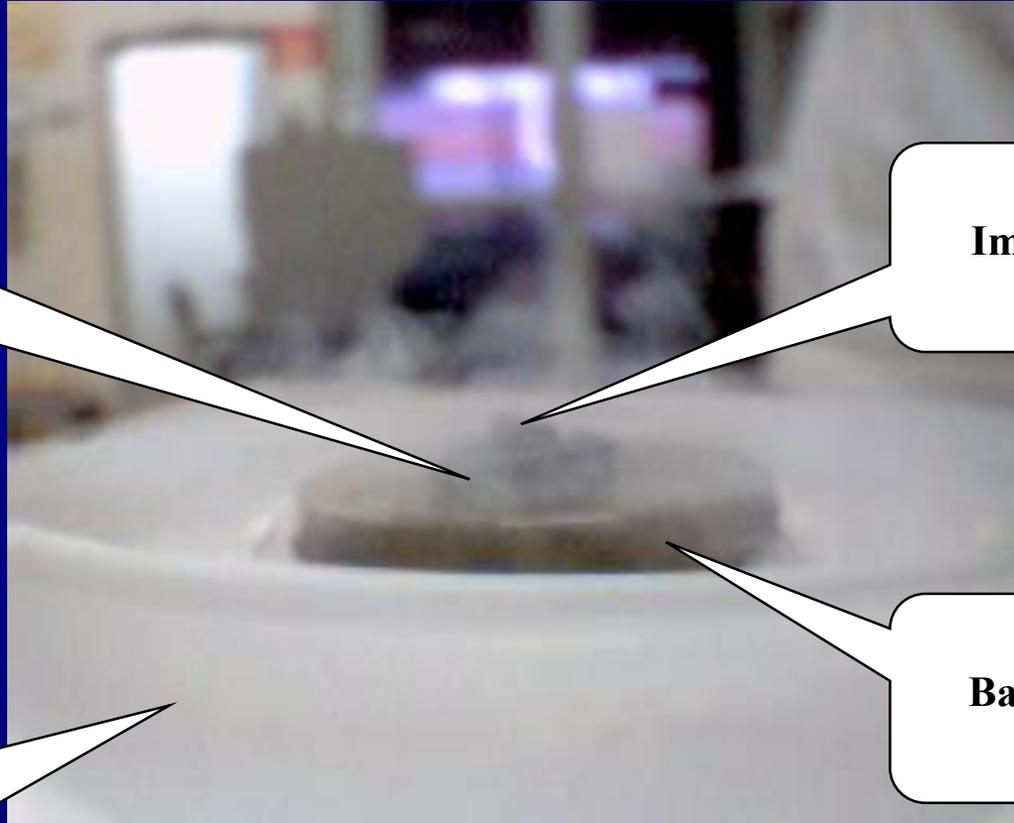
Pastilha de
 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7+\delta}$
 $T_c \sim 90 \text{ K}$.

Imã permanente

Nitrogênio Líquido

$T = 77 \text{ K}$

Base de Cobre

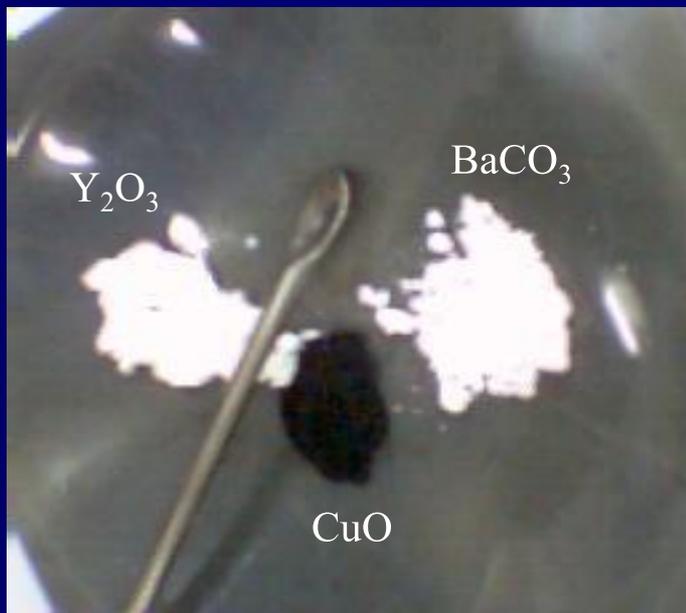


Aplicações da Supercondutividade



Preparando uma pastilha supercondutora de $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7+\delta}$

(Reação de Estado Sólido)



Cadinhos de Alumina

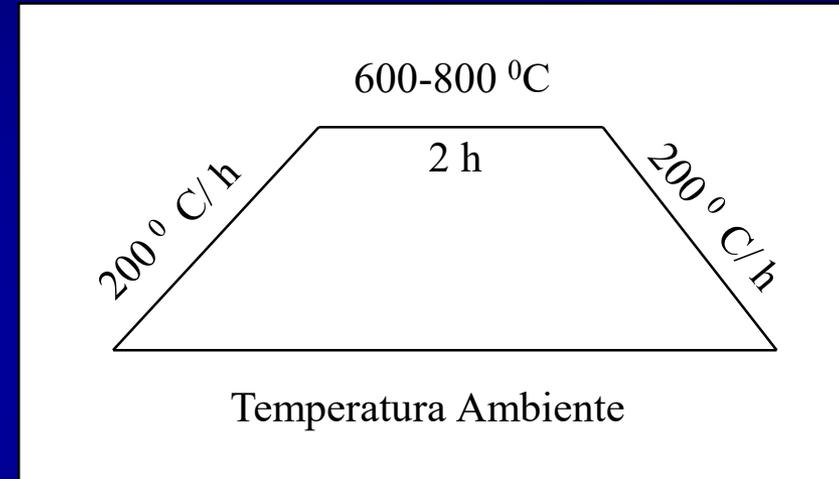
Preparando uma pastilha supercondutora de $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7+\delta}$

(Reação de Estado Sólido)

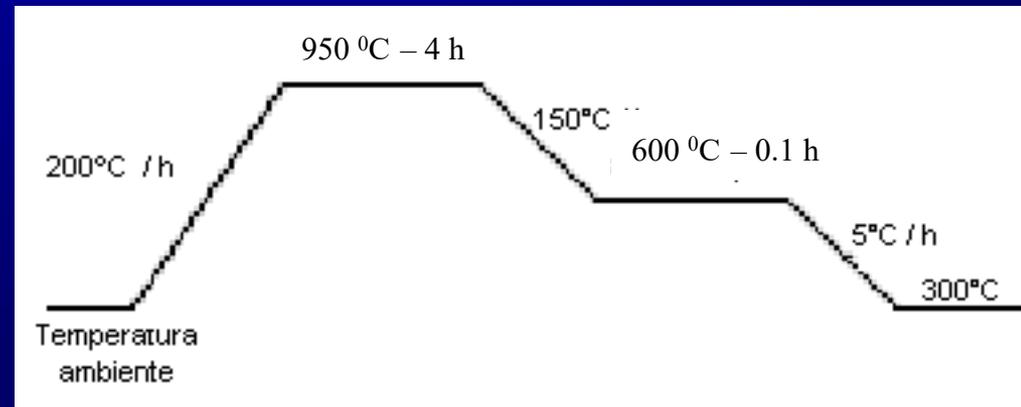


Forno Tubular Convencional

Primeiro Passo – Calcinação



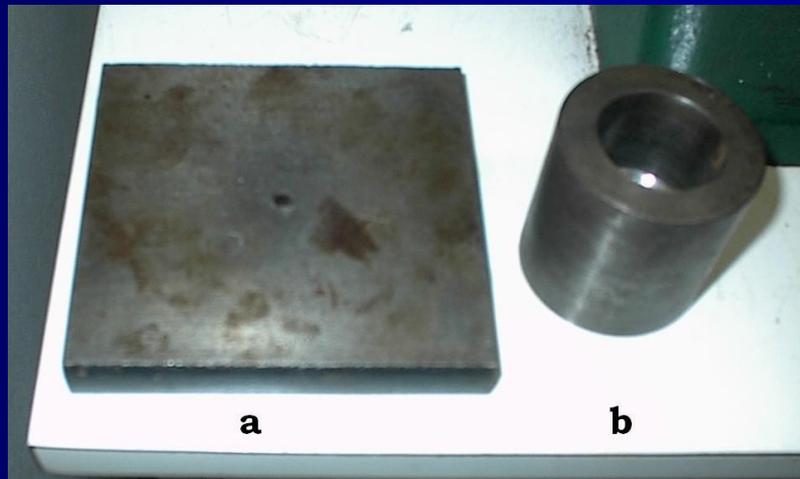
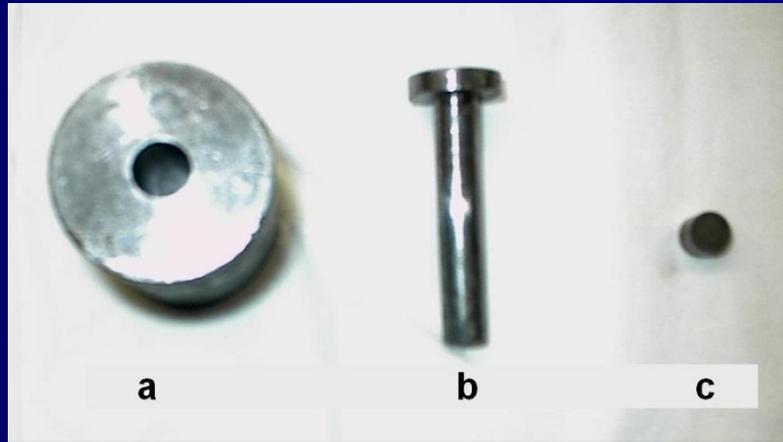
Segundo Passo – Síntese



Preparando uma pastilha supercondutora de $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7+\delta}$

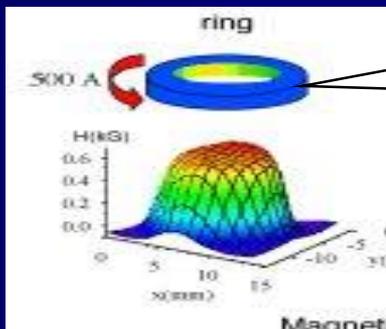
(Reação de Estado Sólido)

Prensagem do Pó Resultante



Aplicações da Supercondutividade

SuperMagnetos



Anéis supercondutores podem conduzir altíssimos valores de correntes persistentes produzindo fortes campos magnéticos



**Magneto SC de 200 toneladas -
Argonne National Laboratory-USA
Projeto de geração de energia por fusão**



**Magnetos para técnicas de imagens usando
Ressonância magnética Nuclear**

MagLev – Veículos de levitação magnética



Japanese Maglev prototype
MLU002N Railway Technical
Research Institute Maglev
Systems Development Department

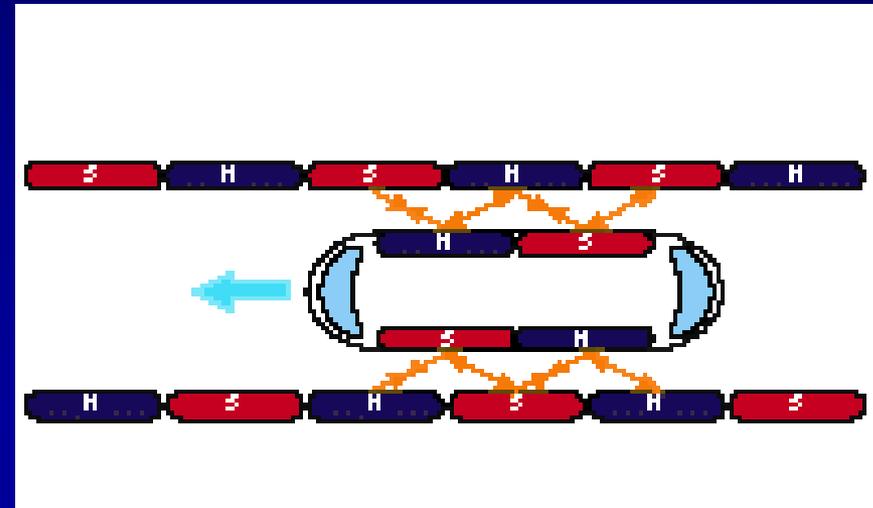
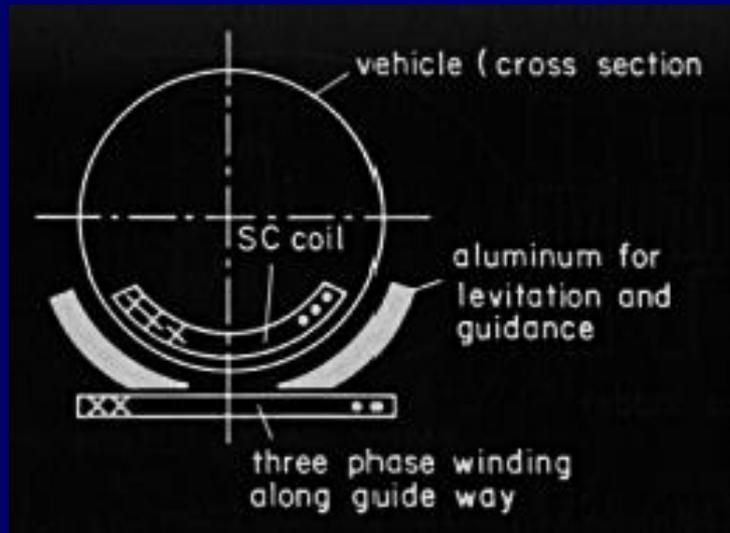


Trilho teste em Miyazaki no Japão



New prototype – $V \sim 500$ km/h.

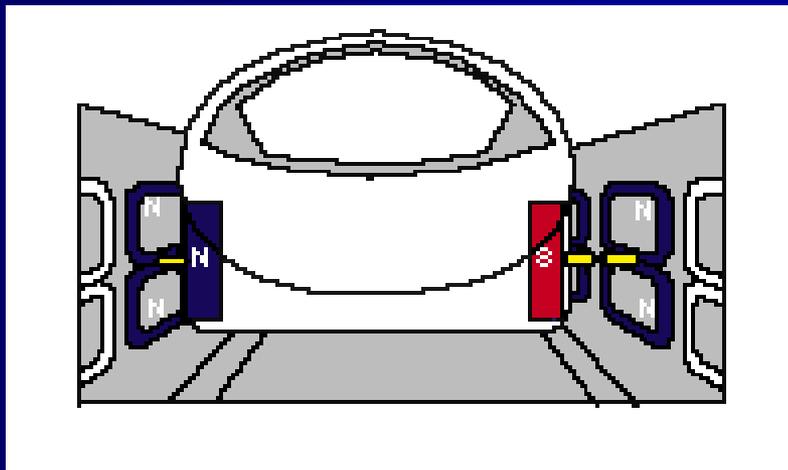
MagLev – Veículos de levitação magnética



Propulsão

Altos Custos com Criogenia

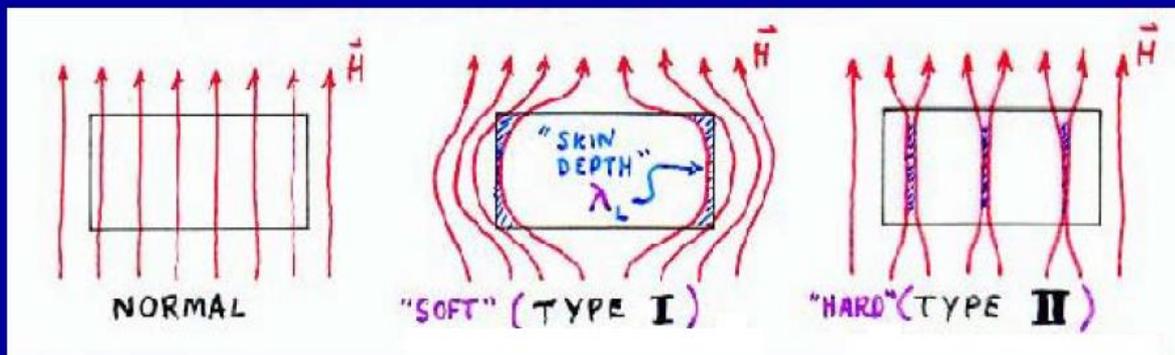
Refrigeração usando Hélio Líquido (-269 ° C).



Levitação

Óxidos Supercondutores de Alta- T_c (HTS)

Supercondutores tipo II → VÓRTICES



$T > T_c$

tipo I

tipo II

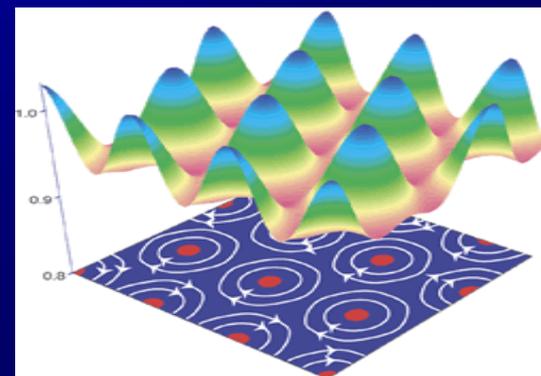
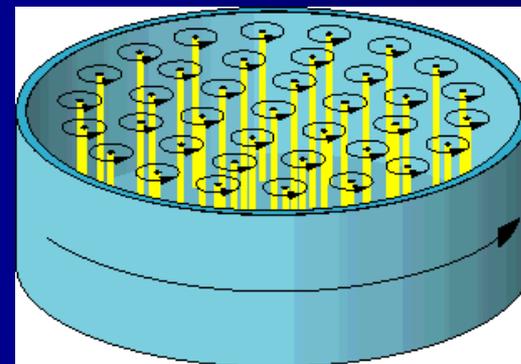
Campo magnético penetra
somentenuma pequena
profundidade λ_L

Campo magnético penetra
em "tubos" de diâmetro
 λ_L formando regiões
normais dentro do material

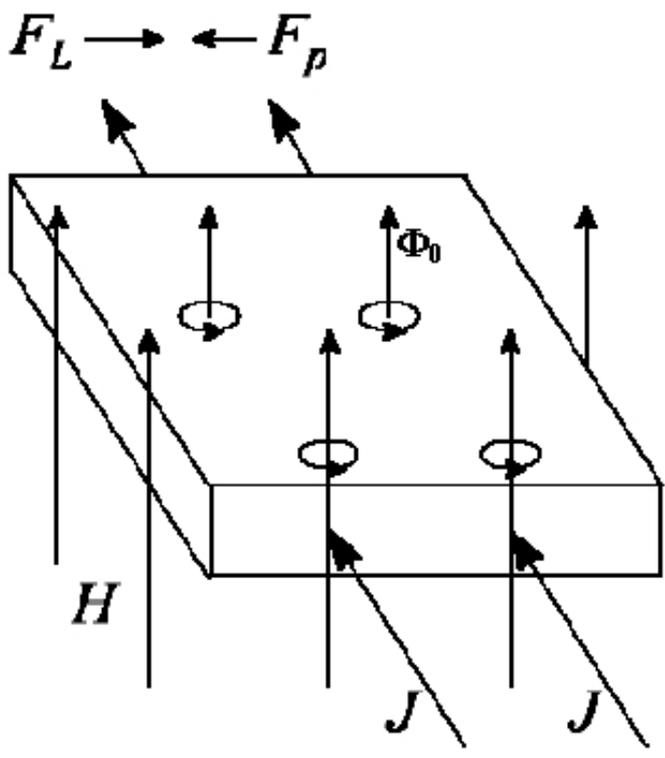
Tipo-I

Tipo-II

Os HTS são
supercondutores
tipo-II



Dissipação no estado Supercondutor

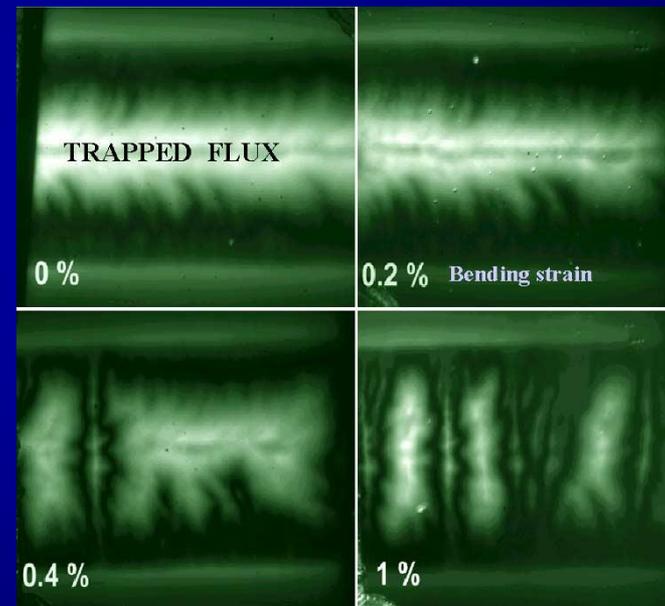
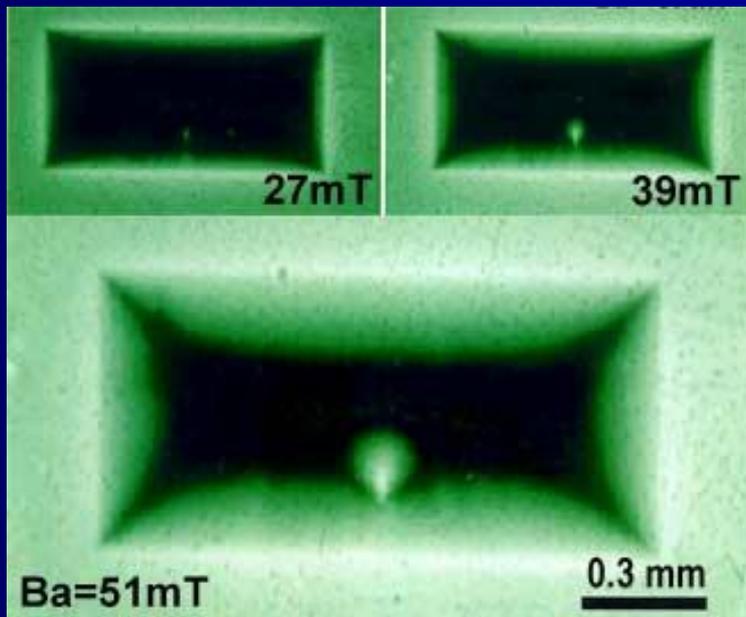


- Quando uma corrente flui em um supercondutor Tipo II, aparece uma força sobre os vórtices que faz com que eles se movam!
- Os vórtices possuem um núcleo de material normal que quando se movimentam no “meio” supercondutor dissipa energia e gera uma resistência.

• Os vórtices tendem a ficar aprisionados em defeitos do material. A corrente necessária para libertá-los dos defeitos e a corrente crítica I_C .

Obstáculos a serem vencidos

- Altas temperaturas críticas T_C e altas correntes corrente críticas I_C



- Tentativas de aumento de I_C por fabricação de defeitos em óxidos HST.

Futuro da Tecnologia da Supercondutividade

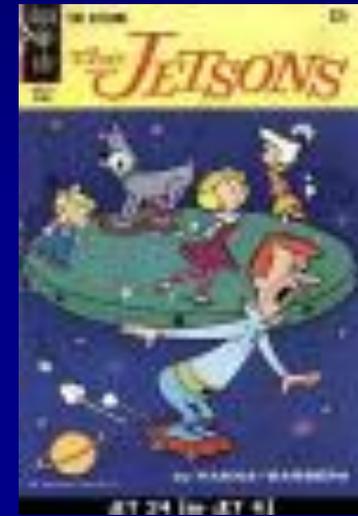
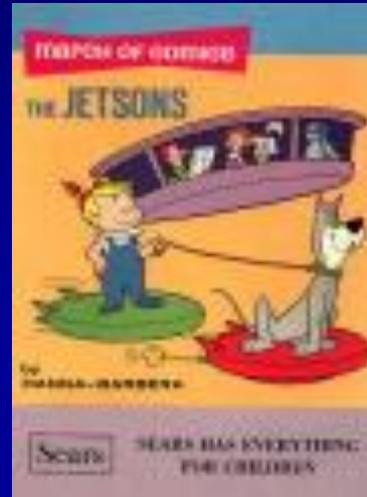
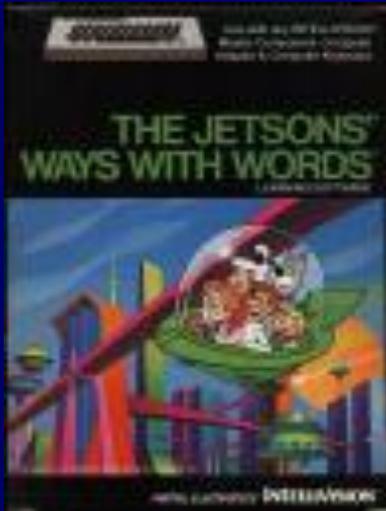
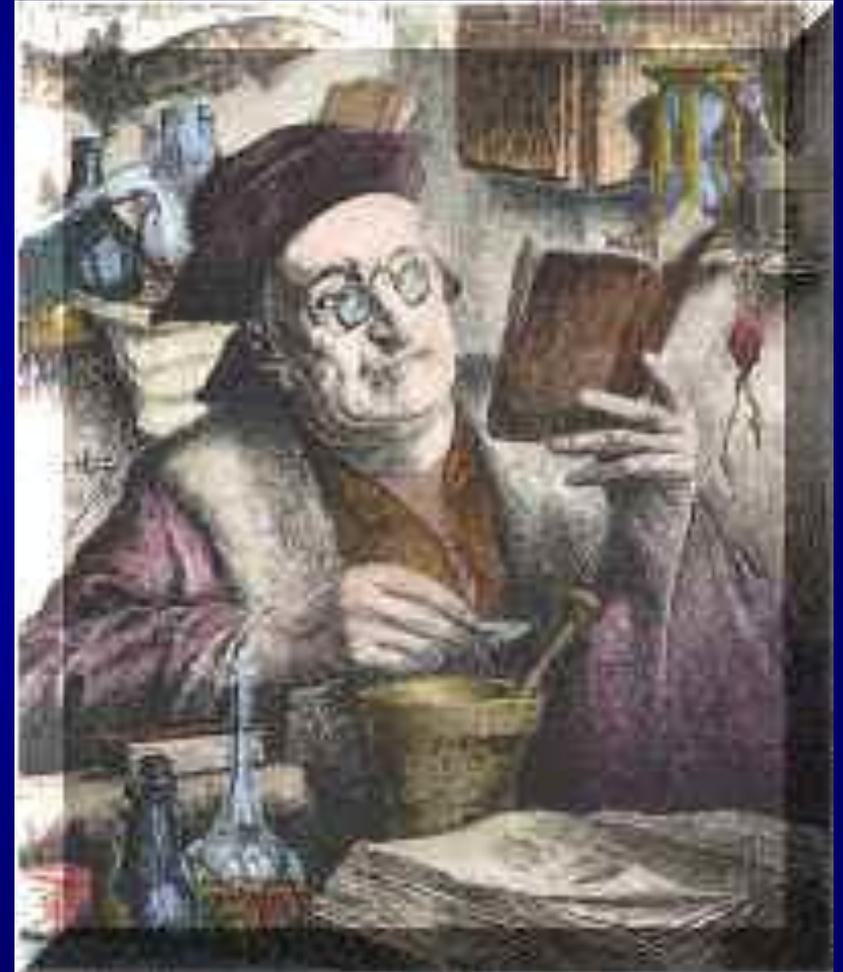


Tabela Periódica

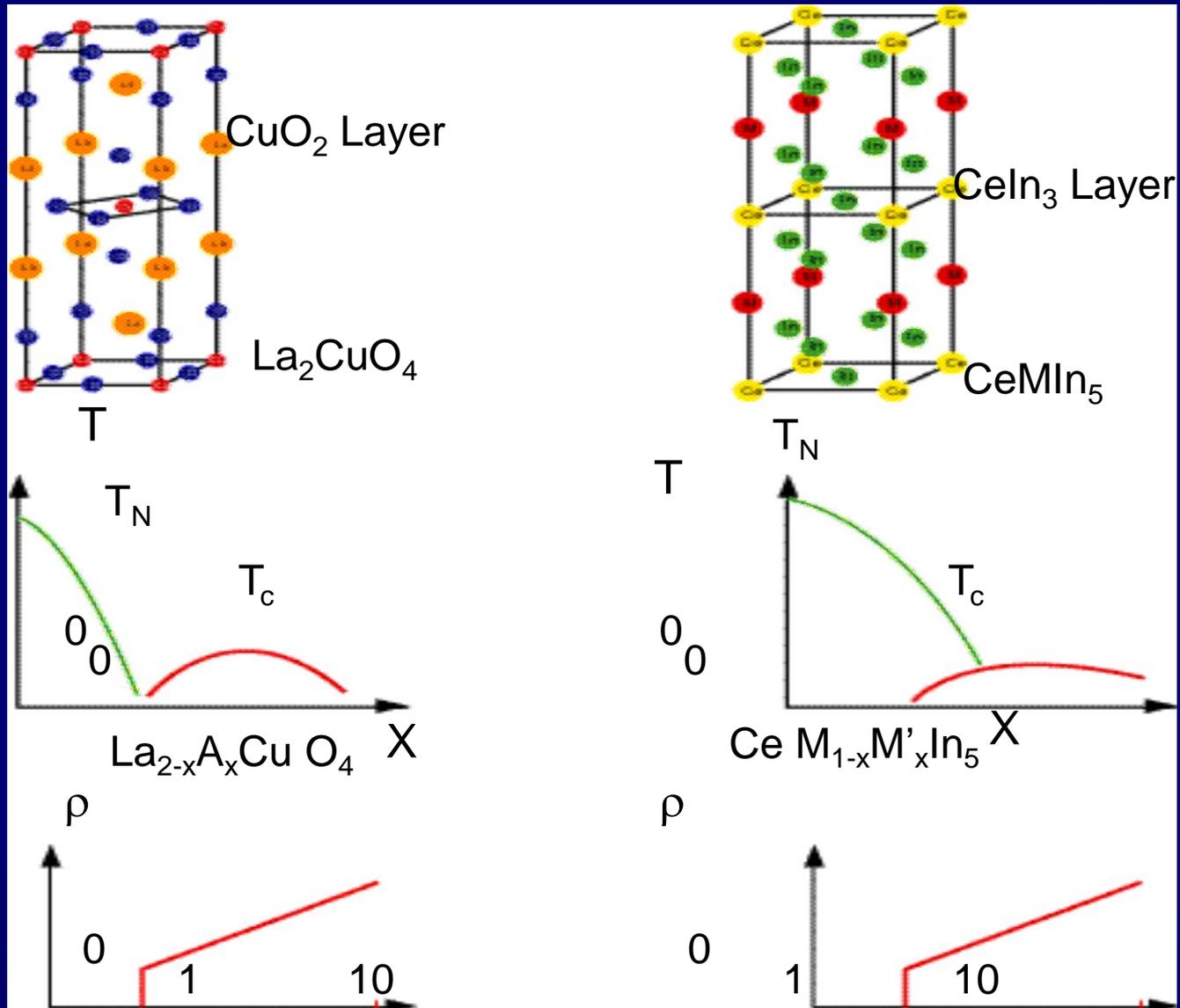


1	2		13	14	15	16	17	18
H								He
Li	Be		B	C	N	O	F	Ne
Na	Mg		Al	Si	P	S	Cl	Ar
K	Ca		Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
Rb	Sr		In	Sn	Sb	Te	I	Xe



O Alquimista

Um Caminho



Implicação no desenvolvimento de novos materiais relacionados

- Baixa dimensionalidade é fundamental e pequenos aumentos na anisotropia tem efeitos significantes.
- Supostamente deve-se procurar a proximidade com magnetismo.
- Procurar novos Cu_3Au como ponto de partida.

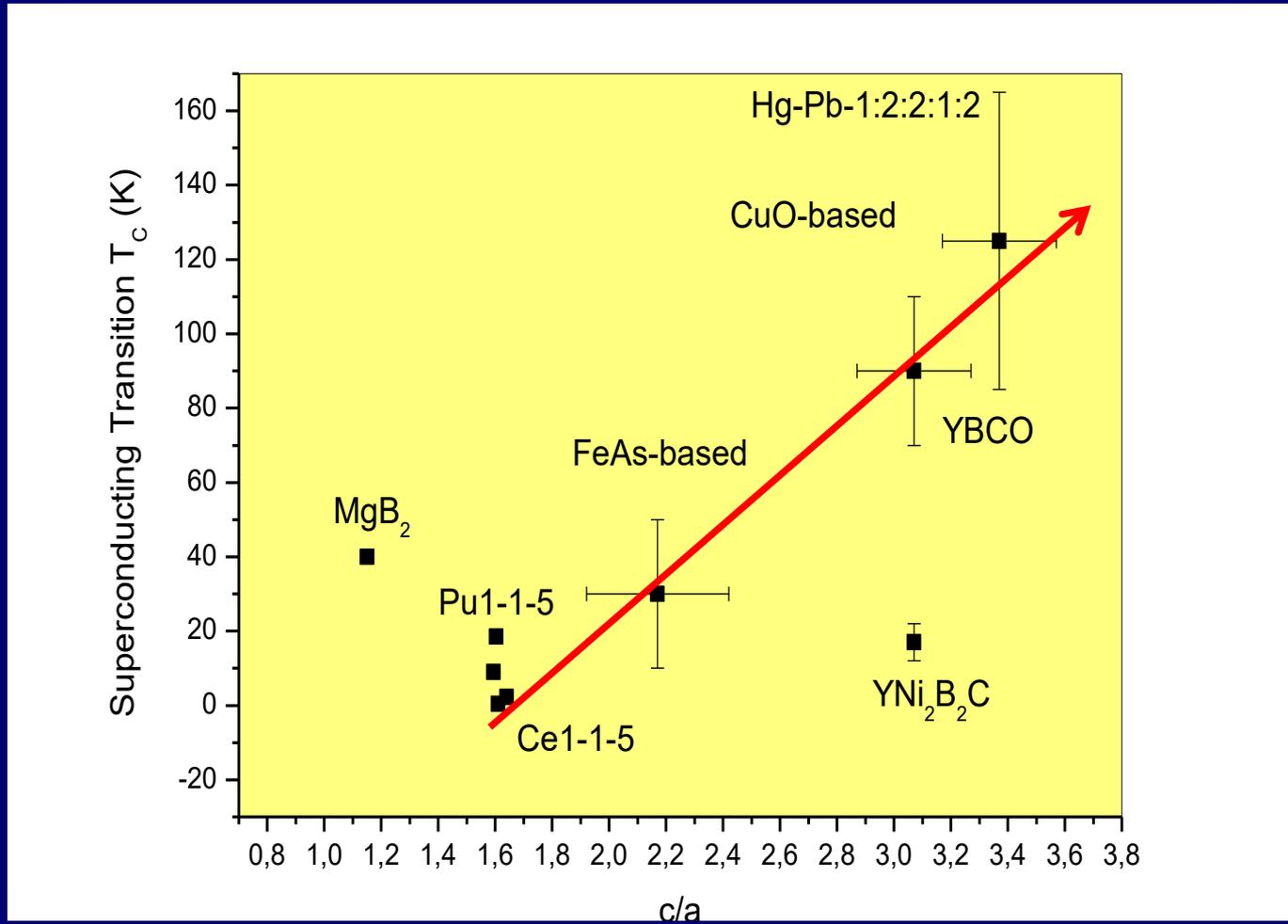


Novas descobertas???



Principais contribuições na área da supercondutividade.

Gráfico de c/a generalizado



- *Porque algumas estruturas favorecem a ocorrência de Supercondutividade na fronteira com o magnetismo?*

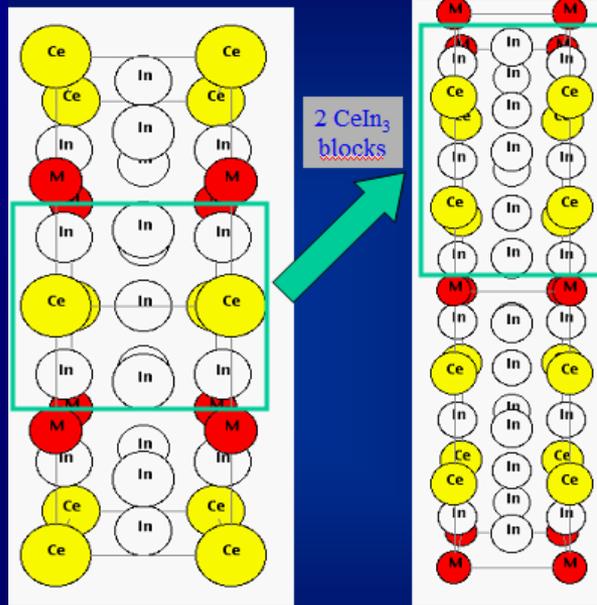
Implicação no desenvolvimento de novos materiais relacionados

• *Baixa dimensionalidade é fundamental e pequenos aumentos são significantes. Dupletto do CEF tipo Ising!*

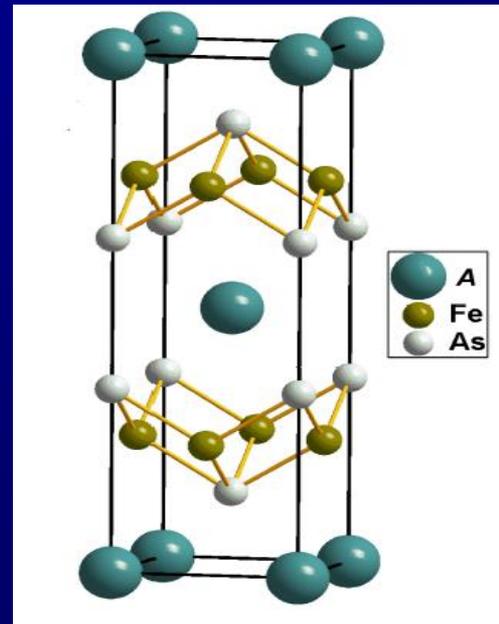


• *Aumento c/a – sintonizar GS CEF – flutuação tipo Ising – pareamento de elétrons em bandas planares*

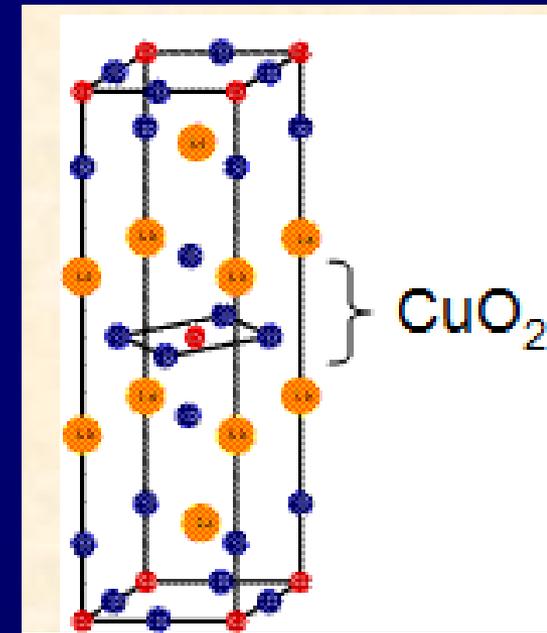
• *Aumentar a intensidades das flutuações magnéticas – spins 3d tendem a ter J maiores!!!*



1-1-5 e 2-1-8



1-2-2



2-1-4, etc

Impacto dos critérios de busca criados no GPOMS



Materials Genome Initiative

[About](#) | [Goals](#) | [Examples](#) | [News & Announcements](#) | [Federal Programs](#) | [External Stakeholder Activities](#) | [Contact Us](#)

To help businesses discover, develop, and deploy new materials twice as fast, we're launching what we call the Materials Genome Initiative. The invention of silicon circuits and lithium-ion batteries made computers and iPods and iPads possible -- but it took years to get those technologies from the drawing board to the marketplace. We can do it faster.

— President Obama, June 2011 at Carnegie Mellon University



8 Palestras sobre critério de busca e ingredientes fundamentais de novos supercondutores

Papers Teóricos com a ideia de CEF

Hotta et al JPSJ 75, 083702 (2006)

Coleman et al Nature Physics 4, 643 (2008)

Coleman et al PRL 105, 246404 (2010)

Haule et al. Nature Materials (2010)

Georges PRL 112, 106407 (2014)

ICAM-I2CAM & BOSTON UNIVERSITY PRESENT

DIGITAL DESIGN OF MATERIALS: the way forward for materials science?

SEPTEMBER 27th - 29th, 2013
BOSTON UNIVERSITY | BOSTON, MA



Program

FRIDAY, SEPTEMBER 27

- 8:00 a.m. – 9:00 a.m. Breakfast & Registration**
- 9:00 a.m. – 9:10 a.m. Welcome**
David Bishop, Boston University
- 9:10 a.m. – 10:00 a.m. Introductory Overview**
Gabriel Kotliar, Rutgers University
- 10:15 a.m. – 1:00 p.m. Session I: Solid State Chemistry**
Discussion leader: David Coker, Boston University
Evgeny Antipov, Lomonosov Moscow State University
Hideo Hosono, Tokyo Institute of Technology
Ni Ni, UCLA
Hidenori Takagi, RIKEN
- 1:00 p.m. – 2:00 p.m. Lunch**
- 2:00 p.m. – 5:00 p.m. Session II: The Search for Materials**
Discussion leader: Malcolm Beasley, Stanford University
Meigan Aronson, Stony Brook University
Zachary Fisk, UC Irvine
Pascoal Pagliuso, UNICAMP
Darrell Schlom, Cornell University

SATURDAY, SEPTEMBER 28

- 8:00 a.m. – 9:00 a.m. Breakfast**
- 9:00 a.m. – 9:45 a.m. Introductory Overview**
Brian Sales, Oak Ridge National Laboratory
- 10:00 a.m. – 1:00 p.m. Session III: State of the Art of Theory**
Discussion leader: Karen Hallberg, Centro Atômico Bariloche
Ryotaro Arita, University of Tokyo
Kristjan Haule, Rutgers University
Andrew Millis, Columbia University
Mark van Schilfgaarde, King's College London
Cedric Weber, King's College London

Mecanismo de pareamento por flutuações magnéticas?

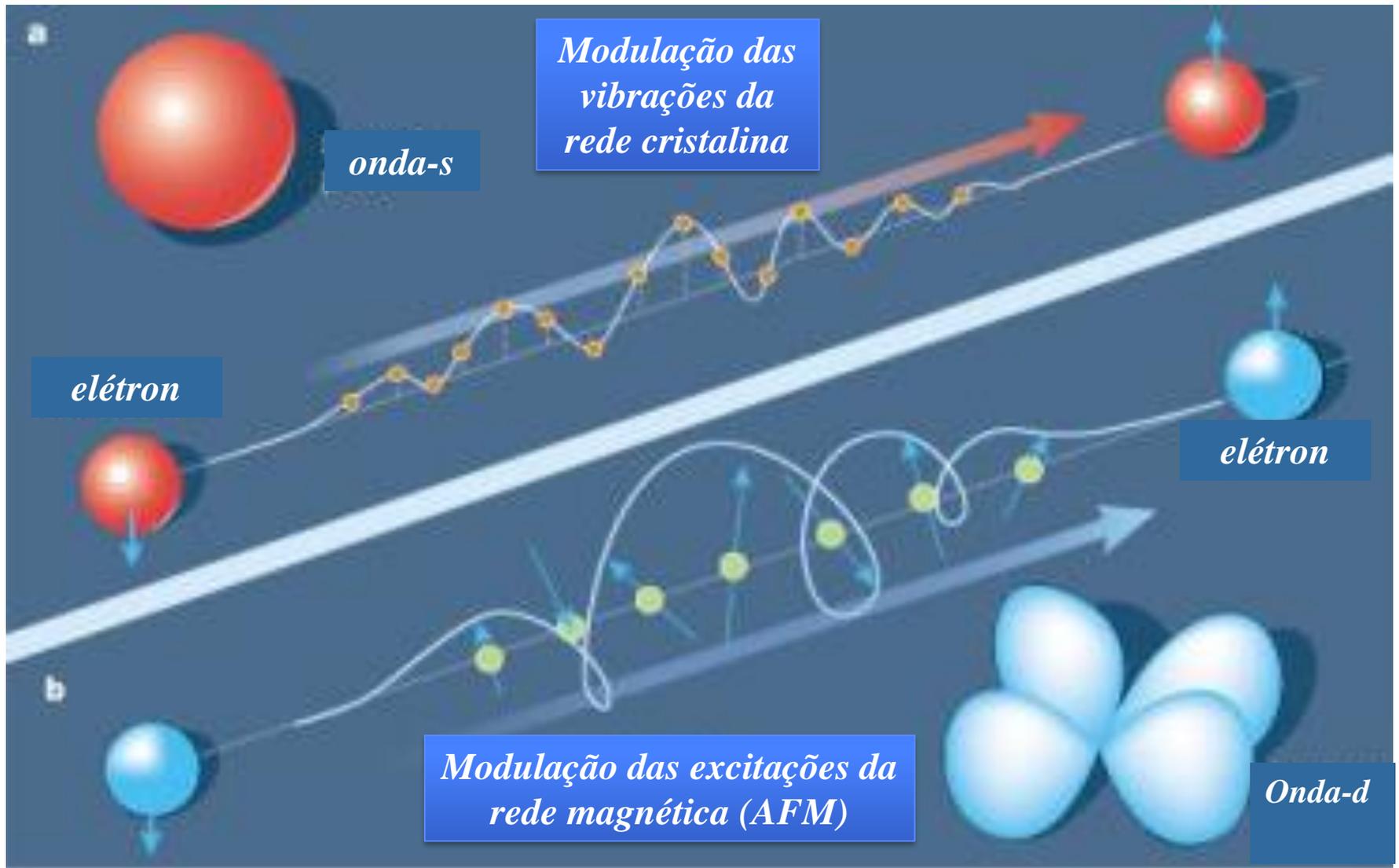
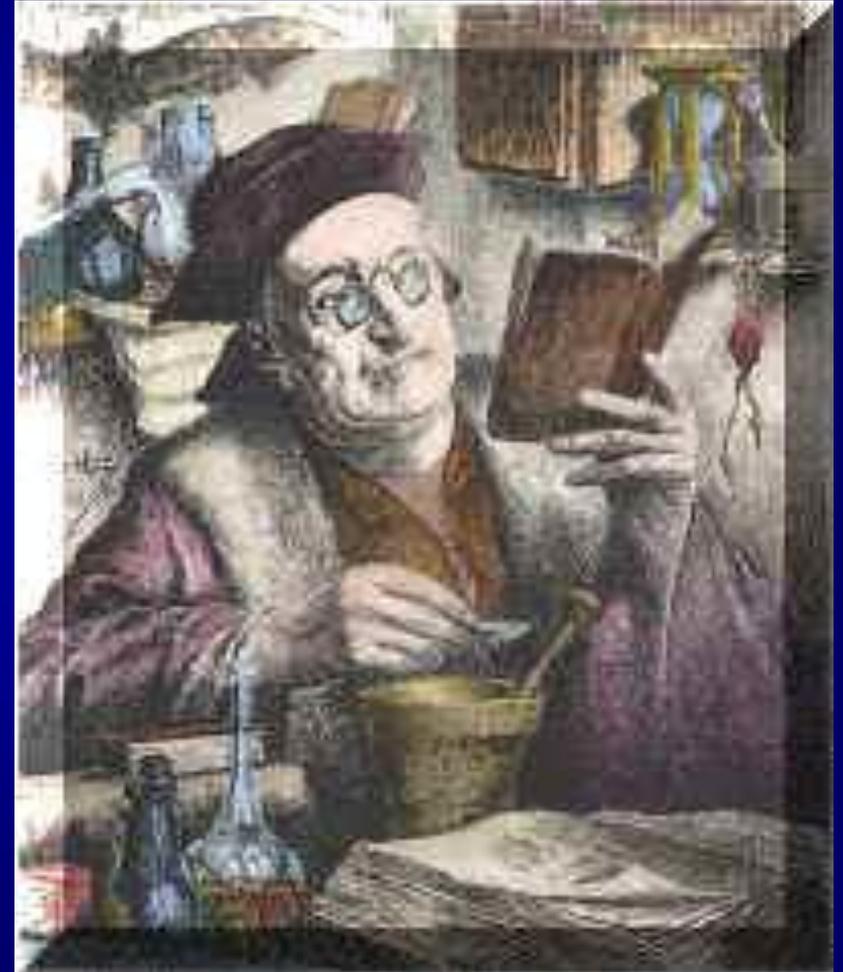


Tabela Periódica



1	2		13	14	15	16	17	18
H								He
Li	Be		B	C	N	O	F	Ne
Na	Mg		Al	Si	P	S	Cl	Ar
K	Ca		Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
Rb	Sr		In	Sn	Sb	Te	I	Xe

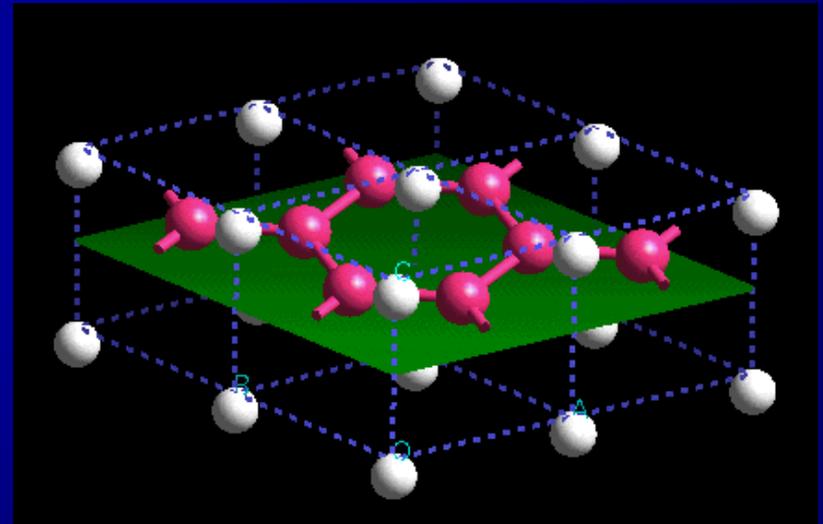
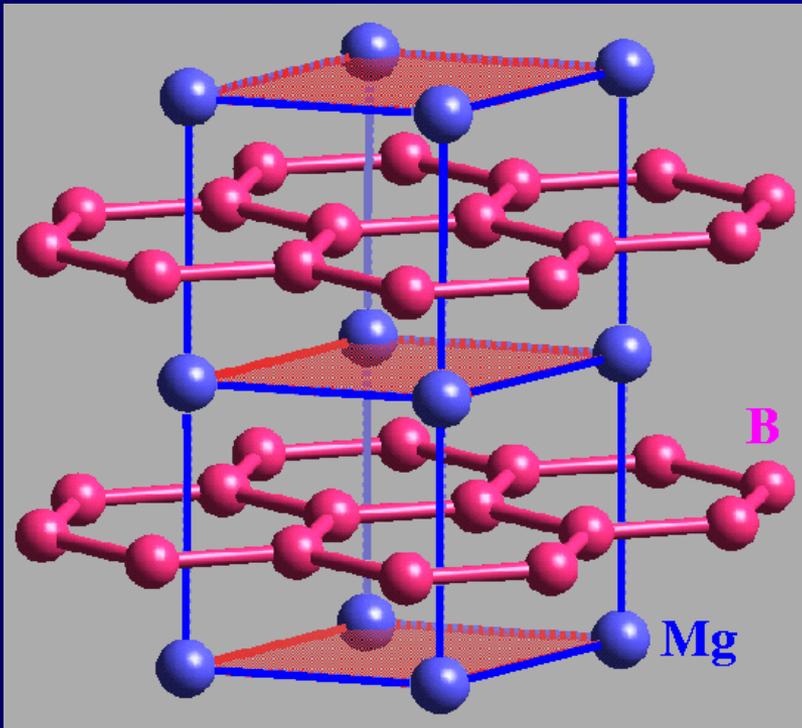


O Alquimista

MgB₂: Motivação (2001)

Estrutura hexagonal
simples tipo AlB₂

Átomos de Boro formam camadas
como no grafite separadas por
camadas de átomos de Mg.



Carbono é a chave?

VOLUME 87, NUMBER 14

PHYSICAL REVIEW LETTERS

1 OCTOBER 2001

Indication of Superconductivity at 35 K in Graphite-Sulfur Composites

R. Ricardo da Silva,* J.H.S. Torres, and Y. Kopelevich

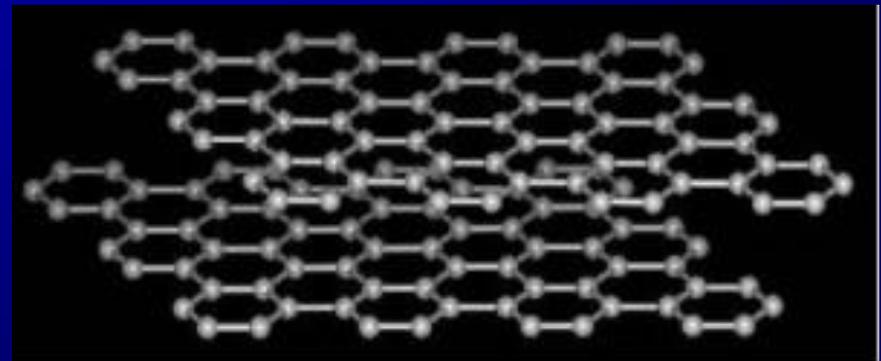
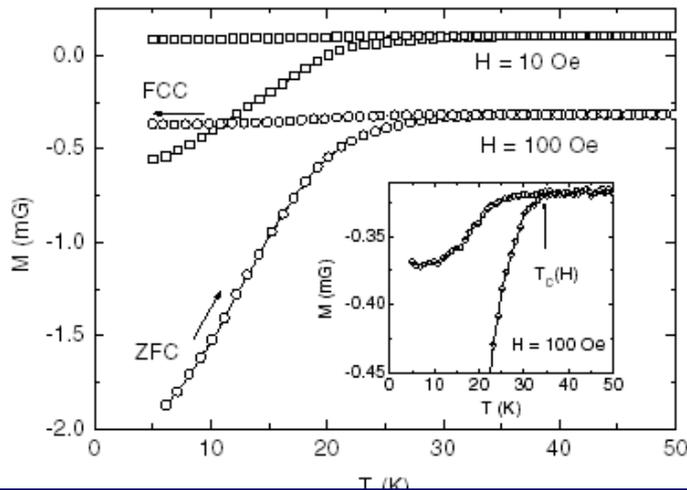
Instituto de Física "Gleb Wataghin," Universidade Estadual de Campinas, Unicamp 13083-970, Campinas, São Paulo, Brasil

(Received 17 May 2001; published 12 September 2001)

We report magnetization measurements performed on graphite-sulfur composites which demonstrate a clear superconducting behavior below the critical temperature $T_{c0} = 35$ K. The Meissner-Ochsenfeld effect, screening supercurrents, and magnetization hysteresis loops characteristic of type-II superconductors were measured. The results indicate that the superconductivity occurs in a small sample fraction, possibly related to the sample surface.

DOI: 10.1103/PhysRevLett.87.147001

PACS numbers: 74.10.+v, 74.80.-g



Diamantes Superconductores (2004).

Superconductivity in diamond

E. A. Eldimov¹, V. A. Sidorov¹, E. D. Bauer², N. N. Mel'nik³, N. J. Curro², J. D. Thompson² & S. M. Stishov¹

¹Vereshchagin Institute for High Pressure Physics, Russian Academy of Sciences, 142190 Troitsk, Moscow region, Russia

²Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, New Mexico 87545, USA

³Lebedev Physics Institute, Russian Academy of Sciences, 117924 Moscow, Russia

Diamond is an electrical insulator well known for its exceptional hardness. It also conducts heat even more effectively than copper, and can withstand very high electric fields¹. With these physical properties, diamond is attractive for electronic applications², particularly when charge carriers are introduced (by chemical doping) into the system. Boron has one less electron than carbon and, because of its small atomic radius, boron is relatively easily incorporated into diamond³; as boron acts as a charge acceptor, the resulting diamond is effectively hole-doped. Here we report the discovery of superconductivity in boron-doped diamond synthesized at high pressure (nearly 100,000 atmospheres) and temperature (2,500–2,800 K). Electrical resistivity, magnetic susceptibility, specific heat and field-dependent resistance measurements show that boron-doped diamond is a bulk, type-II superconductor below the superconducting transition temperature $T_c \approx 4$ K; superconductivity survives in a magnetic field up to $H_{c2}(0) \approx 3.5$ T. The discovery of superconductivity in diamond-structured carbon suggests that Si and Ge, which also form in the diamond structure, may similarly exhibit superconductivity under the appropriate conditions.

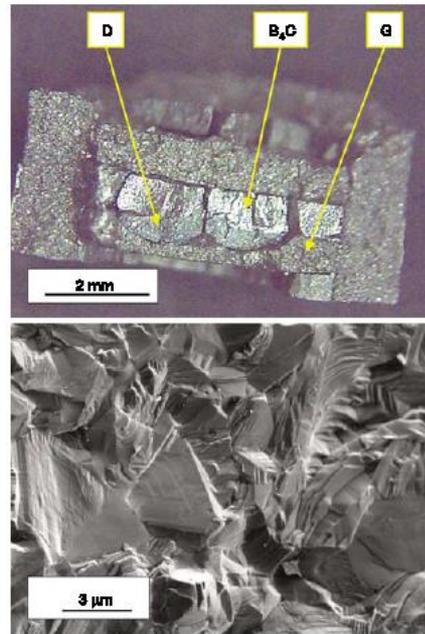


Figure 1 Optical and scanning electron microscopy images of the material. Top, central part of the high-pressure synthesis cell after subjecting graphite and B₄C to high-pressure, high-temperature conditions. D, diamond; G, graphite. Bottom, SEM image of B-doped diamond synthesized at high pressures and temperatures.

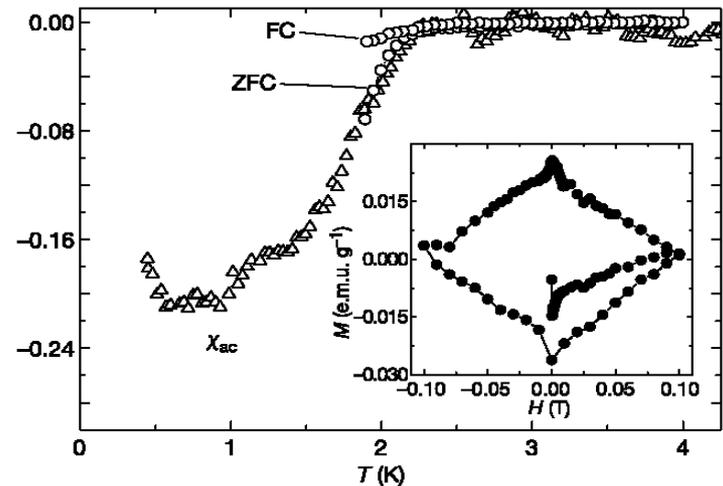
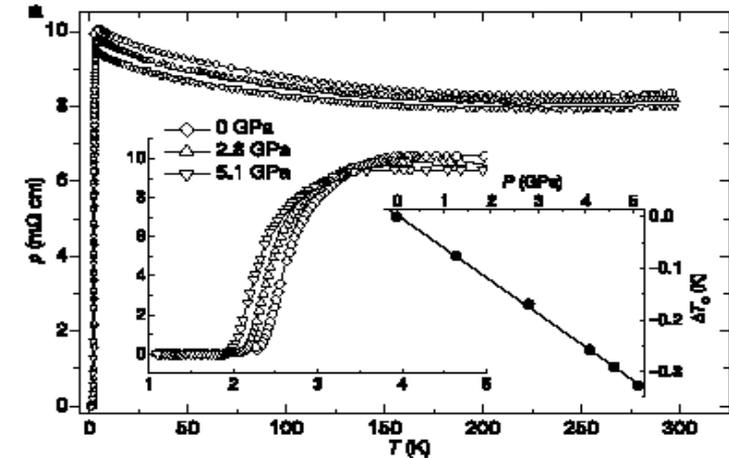
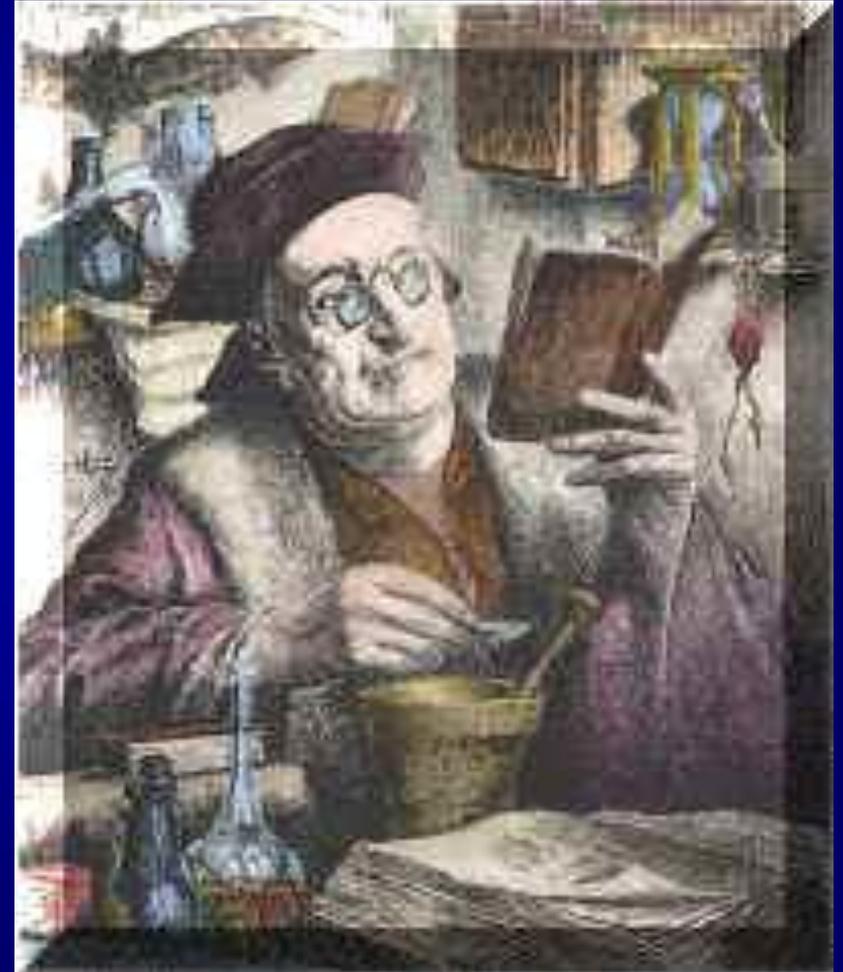


Tabela Periódica



1	2		13	14	15	16	17	18
H								He
Li	Be		B	C	N	O	F	Ne
Na	Mg		Al	Si	P	S	Cl	Ar
K	Ca		Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
Rb	Sr		In	Sn	Sb	Te	I	Xe



O Alquimista

Óxidos não cupratos?

Superconductivity in two-dimensional CoO_2 layers

Kazunori Takada^{*,‡}, Hiroya Sakurai[†], Eiji Takayama-Muromachi[†],
Fujio Izumi^{*}, Ruben A. Dilanian^{*} & Takayoshi Sasaki^{*,‡}

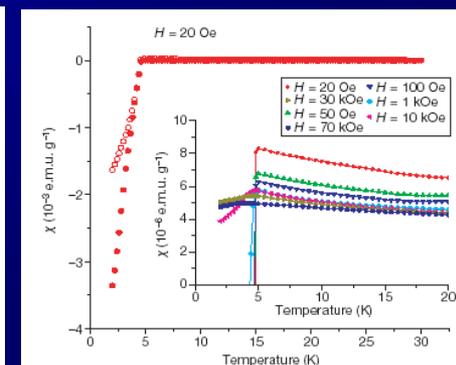
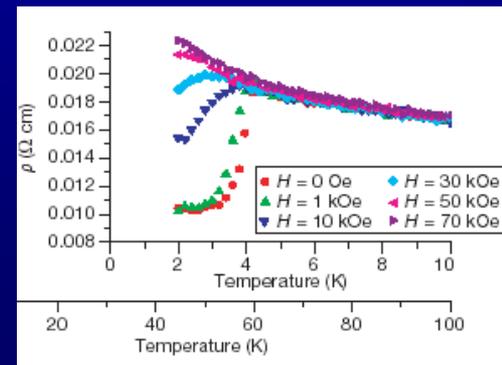
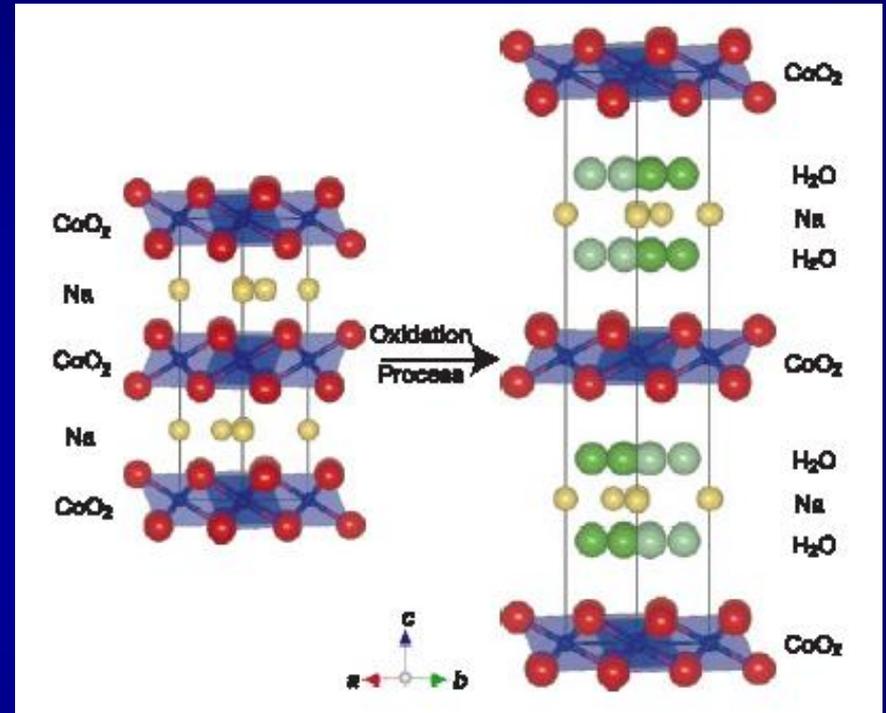
^{*} Advanced Materials Laboratory, National Institute for Materials Science, Tsukuba, Ibaraki 305-0044, Japan

[†] Superconducting Materials Center, National Institute for Materials Science, Tsukuba, Ibaraki 305-0044, Japan

[‡] CREST, Japan Science and Technology Corporation

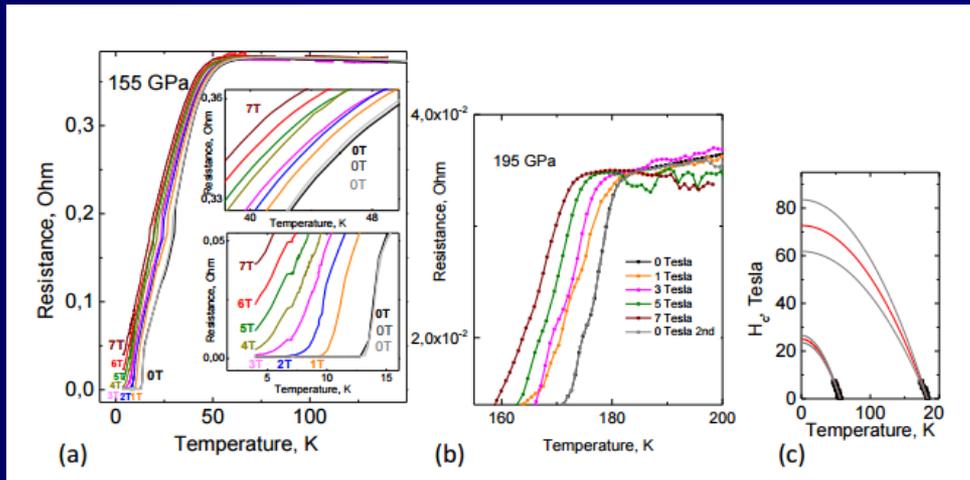
Since the discovery of high-transition-temperature (high- T_c) superconductivity in layered copper oxides¹, many researchers have searched for similar behaviour in other layered metal oxides involving 3d-transition metals, such as cobalt and nickel. Such attempts have so far failed, with the result that the copper oxide layer is thought to be essential for superconductivity. Here we report that $\text{Na}_x\text{CoO}_2 \cdot y\text{H}_2\text{O}$ ($x \approx 0.35$, $y \approx 1.3$) is a superconductor with a T_c of about 5 K. This compound consists of two-dimensional CoO_2 layers separated by a thick insulating layer of Na^+ ions and H_2O molecules. There is a marked resemblance in superconducting properties between the present material and high- T_c copper oxides, suggesting that the two systems have similar underlying physics.

The $\text{Na}_x\text{CoO}_2 \cdot y\text{H}_2\text{O}$ sample was obtained through a chemical

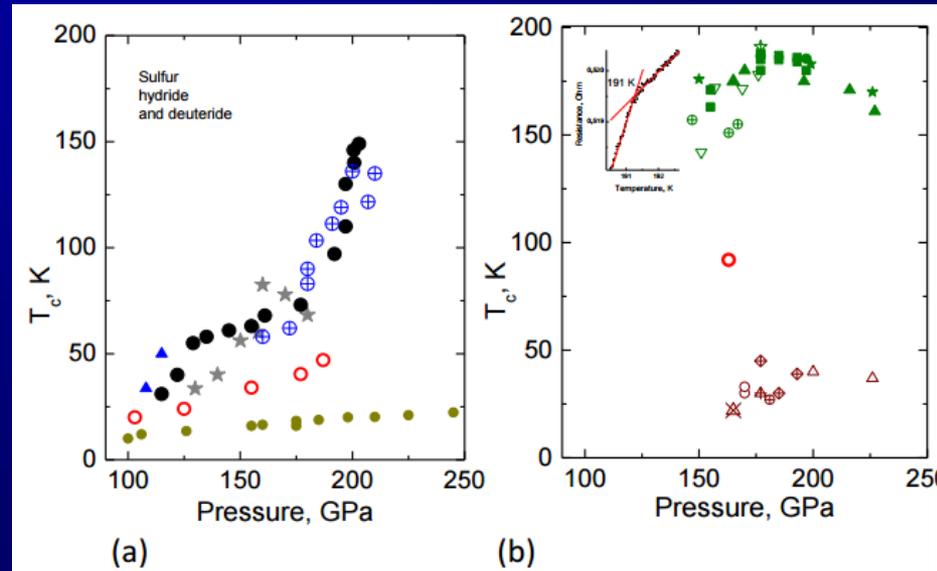


Também materiais a base de Ru:
ex: SrRu_2O_4

De volta para os BCS?



Materiais leves
 sob altíssimas
 pressões!



Superfluidez do LHe

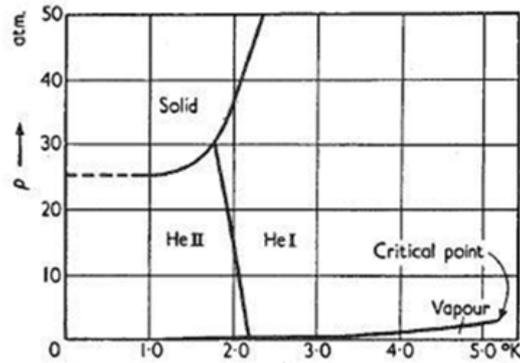
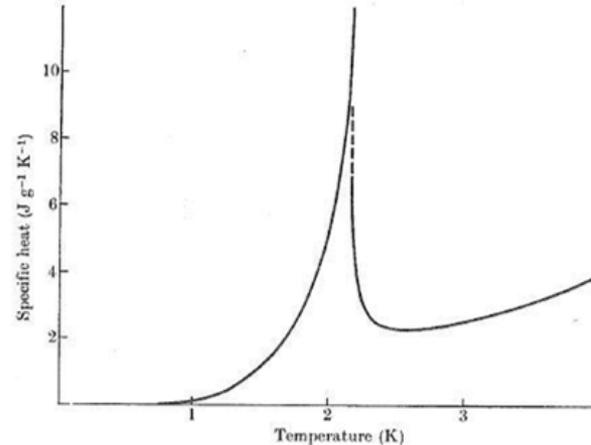


Figura 3. Curva pressão-temperatura para hélio



Transição de Fase λ (He superfluido) para $T \sim 2.2$ K em 1 atm. Uma transição de Fase que envolve uma mudança de entropia contínua de uma fase para outra (parâmetro de ordem) gera um pico no calor específico. (transição de segunda ordem!)
Uma transição de fase de primeira ordem gera uma descontinuidade do calor específico devido a presença de um calor latente.

Superfluididez do LHe

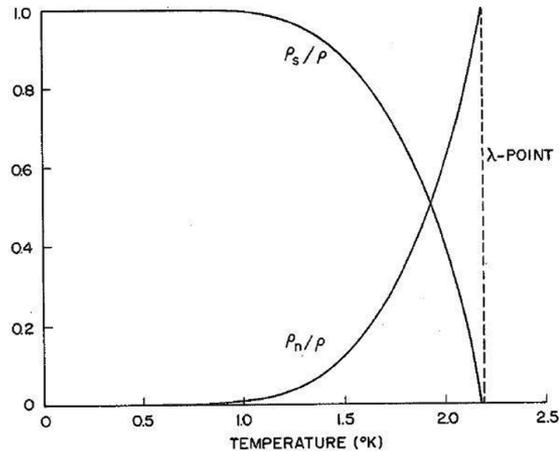
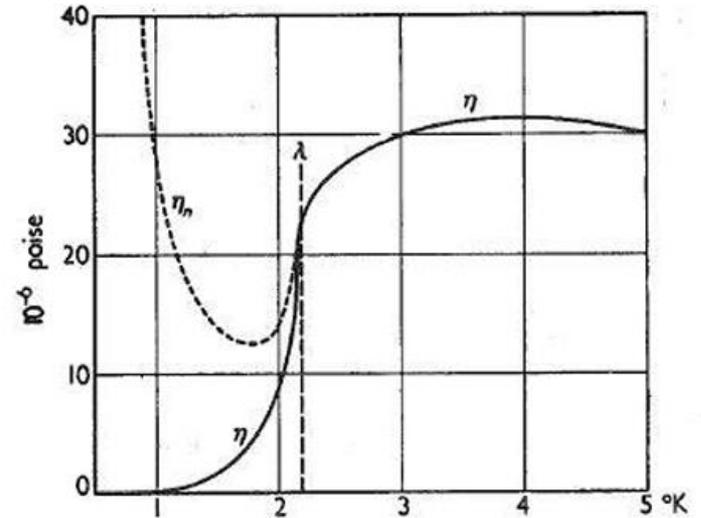


Figura 5. Frações de equilíbrio de He II normal e superfluido em função da temperatura.



O modelo de dois fluidos

*O coeficiente de viscosidade de hélio líquido já é próximo daquele de um gás, mas não existe nenhum comportamento singular da viscosidade entre o ponto crítico, em 5,2 K, até próximo de 3 K. Nesta temperatura tem-se, pode-se dizer, uma antecipação da transição lambda e a viscosidade começa a decrescer acentuadamente. Como pode ser observado na curva sólida da Fig. acima à direita, esse declínio continua através da transição lambda e, perto de 1 K, a viscosidade é aproximadamente nula, que é o fenômeno da **superfluididez**.*

Superfluidez do LHe

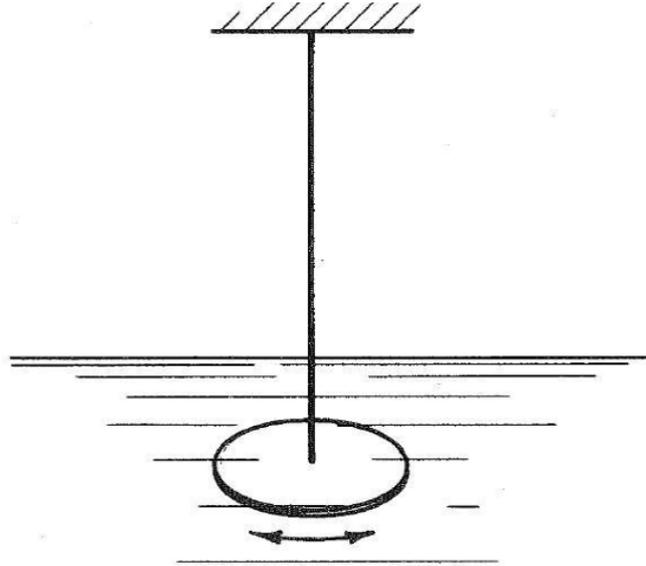


Figura 7. Pêndulo de torção para determinar a viscosidade de hélio líquido.

Se a viscosidade de He II é medida por outro método clássico, tal como o da observação da velocidade de escoamento através de tubos, diferentes resultados podem ser obtidos. Em tubos maiores que 0,1 cm obtém-se, essencialmente, os mesmos valores de viscosidade medidos pelo pêndulo de torção da Fig. 7; para uma dada diferença de pressão entre as extremidades do tubo, a velocidade de escoamento diminui com o decréscimo de diâmetro do tubo como se observa nos líquidos clássicos. Diminuindo continuamente o diâmetro do tubo, a velocidade começa a crescer novamente, até que para tubos muito finos – 10^{-5} cm de diâmetro, aproximadamente – uma velocidade crítica de 13 cm/s é medida, que é independente da diferença de pressão aplicada ao tubo. Esse comportamento viola, drasticamente, as leis dos fluidos clássicos e é devido à superfluidez.

Superfluididez do LHe

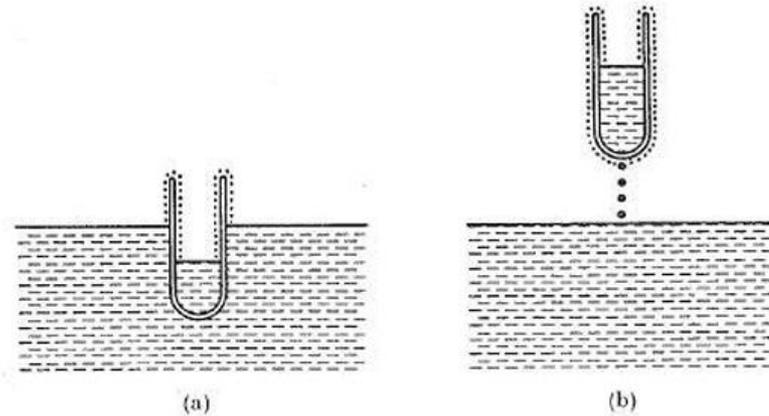


Figura 8. Representação esquemática do fluxo hélio líquido. (a) Do reservatório de hélio para o bico; (b) do bico para o reservatório.

No ${}^4\text{He}$ líquido em pressão atmosférica, observa-se a formação de bolhas. Entretanto, se a temperatura é gradativamente diminuída, ao chegar no ponto de transição (2,17 K), a ebulição subitamente cessa mesmo que o líquido continue a se vaporizar rapidamente. Pode ainda haver alguma atividade na superfície – bolhas que se formam na interface líquido-vapor se a taxa de evaporação for alta, mas **bolhas não se formarão abaixo da superfície como no caso dos líquidos normais**. Esse efeito surpreendente evidencia a transição para a fase de superfluididez, chamada de He II. de segunda ordem.

Superfluididez do LHe

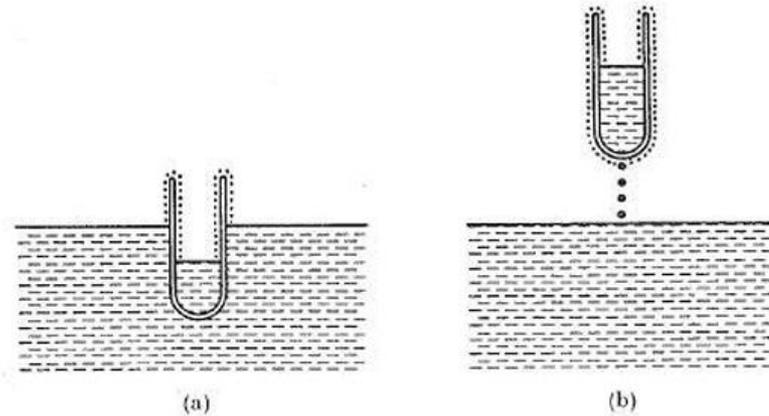


Figura 8. Representação esquemática do fluxo hélio líquido. (a) Do reservatório de hélio para o bico; (b) do bico para o reservatório.

No ${}^4\text{He}$ líquido em pressão atmosférica, observa-se a formação de bolhas. Entretanto, se a temperatura é gradativamente diminuída, ao chegar no ponto de transição (2,17 K), a ebulição subitamente cessa mesmo que o líquido continue a se vaporizar rapidamente. Pode ainda haver alguma atividade na superfície – bolhas que se formam na interface líquido-vapor se a taxa de evaporação for alta, mas **bolhas não se formarão abaixo da superfície como no caso dos líquidos normais**. Esse efeito surpreendente evidencia a transição para a fase de superfluididez, chamada de He II. de segunda ordem.

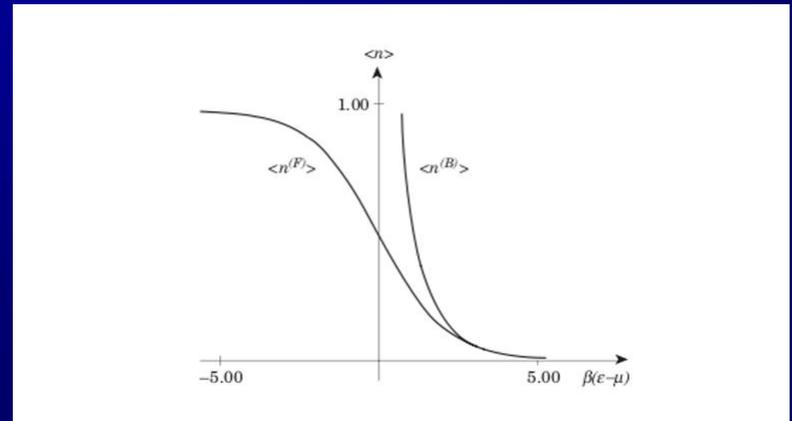
Superfluidez do LHe

A estatística quântica aplicável à hélio líquido é aquela adequada à partículas idênticas indistinguíveis de **spin de número inteiro**, chamadas de bósons. Com dois nêutrons e dois prótons em seu núcleo, o ${}^4\text{He}$ é um **bóson**, e a estatística é a de Bose-Einstein, caracterizada pela função de distribuição:

$$\bar{n}_s = \frac{1}{e^{\beta(\epsilon_s - \mu)} - 1}$$

onde n_s é o número médio de bósons no nível de energia s , ϵ_s é a energia do estado s , μ é o potencial químico do gás e $\beta = 1/k_B T$, (k_B é constante de Boltzmann e T a temperatura).

Usando essa função distribuição, demonstra-se que acima de uma temperatura crítica, T_C , as partículas se distribuem nos níveis de energia num padrão muito semelhante ao que seria calculado pela teoria clássica de Maxwell & Boltzmann. Abaixo de T_C , entretanto, uma apreciável porção das partículas “condensa” no estado de energia mais baixo – a fração que se condensa se aproxima da unidade à medida que a temperatura tende para 0 K.



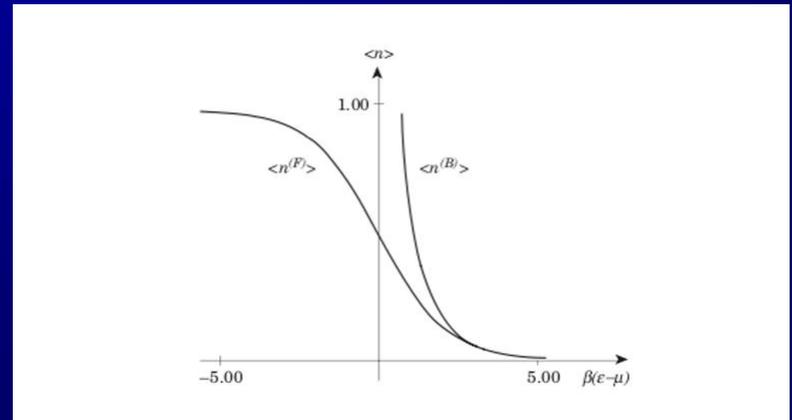
Superfluidez do LHe

A estatística quântica aplicável à hélio líquido é aquela adequada à partículas idênticas indistinguíveis de **spin de número inteiro**, chamadas de bósons. Com dois nêutrons e dois prótons em seu núcleo, o ${}^4\text{He}$ é um **bóson**, e a estatística é a de Bose-Einstein, caracterizada pela função de distribuição:

$$\bar{n}_s = \frac{1}{e^{\beta(\epsilon_s - \mu)} - 1}$$

onde n_s é o número médio de bósons no nível de energia s , ϵ_s é a energia do estado s , μ é o potencial químico do gás e $\beta = 1/k_B T$, (k_B é constante de Boltzmann e T a temperatura).

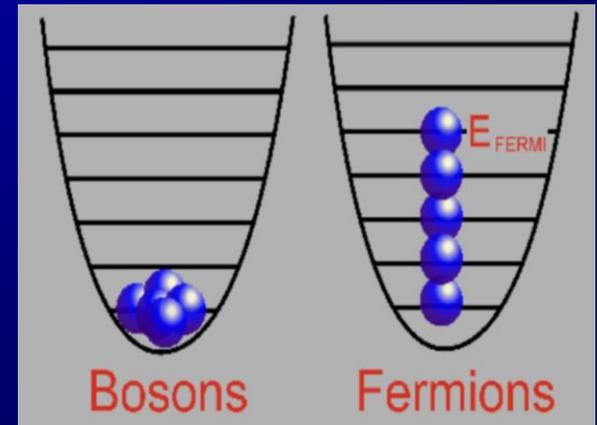
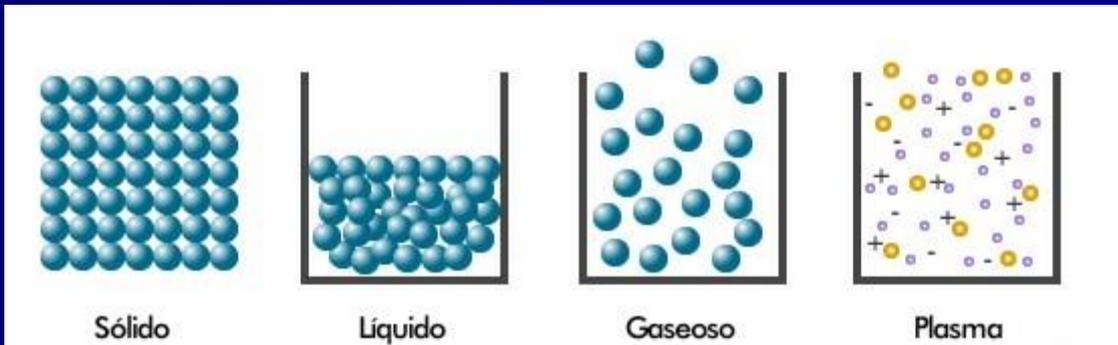
Usando essa função distribuição, demonstra-se que acima de uma temperatura crítica, T_C , as partículas se distribuem nos níveis de energia num padrão muito semelhante ao que seria calculado pela teoria clássica de Maxwell & Boltzmann. Abaixo de T_C , entretanto, uma apreciável porção das partículas “condensa” no estado de energia mais baixo – a fração que se condensa se aproxima da unidade à medida que a temperatura tende para 0 K.



Superfluididade do LHe

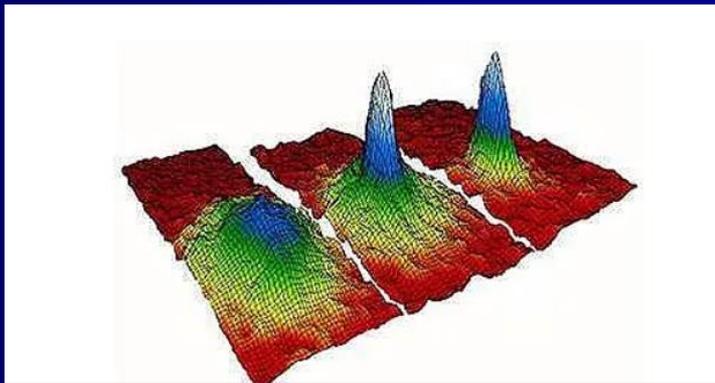
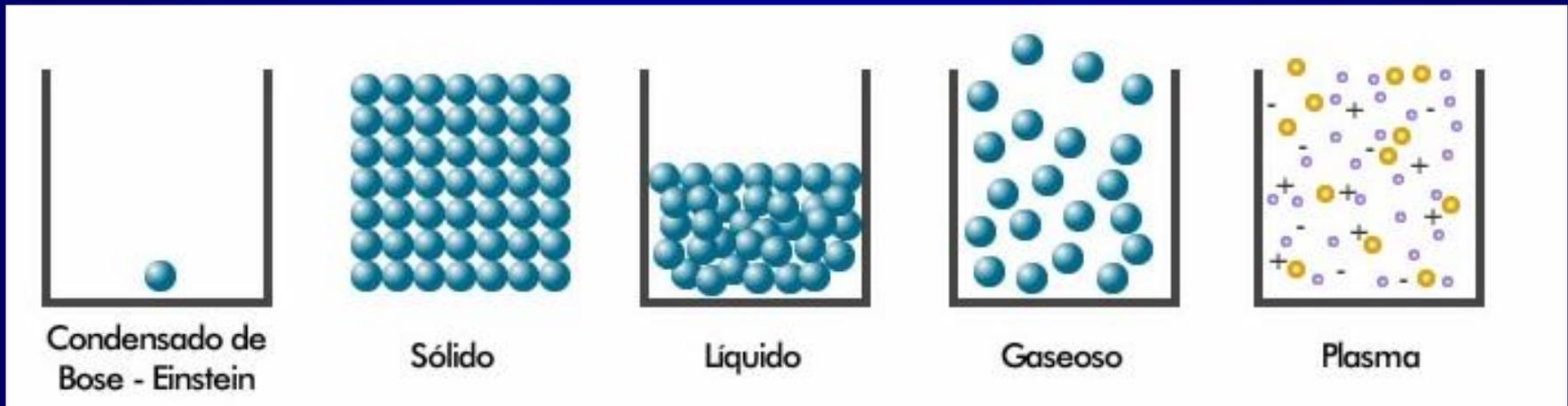
A estatística de Bose-Einstein, e cálculos nela baseados, nos dão, pelo menos, parte da resposta sobre o que constitui os dois fluidos de He II. De acordo com esses, o superfluido é a fração de átomos de hélio que se condensa no estado de energia mais baixo abaixo de T_c , e o fluido normal é a fração restante que se distribui em estados de energia mais alta. No exposto acima, sobra ainda algum questionamento sobre porque os átomos condensados tem as propriedades de superfluido observadas. É entretanto possível ter um entendimento qualitativo se postularmos a existência de um gap de energia entre a fase superfluida e a fase normal. Os átomos do superfluido, abaixo do gap, tenderão a permanecer nessa situação até que haja algum tipo de interação envolvendo uma energia igual ou maior que o gap – a quantidade de energia, por exemplo, de uma colisão quando He II flui num tubo.

Por outro lado, a supercondutividade em metais é ligada a pares de elétrons. E enquanto elétrons isolados são férmions, são pares de elétrons os responsáveis pela supercondutividade, que tem estreita analogia com superfluididade. Seguindo essa analogia, tratamentos teóricos usados em supercondutividade foram aplicados ao ^3He para calcular a temperatura de transição esperada para a fase superfluida. O valor previsto é aproximadamente $8 \times 10^{-4} \text{ K}$.



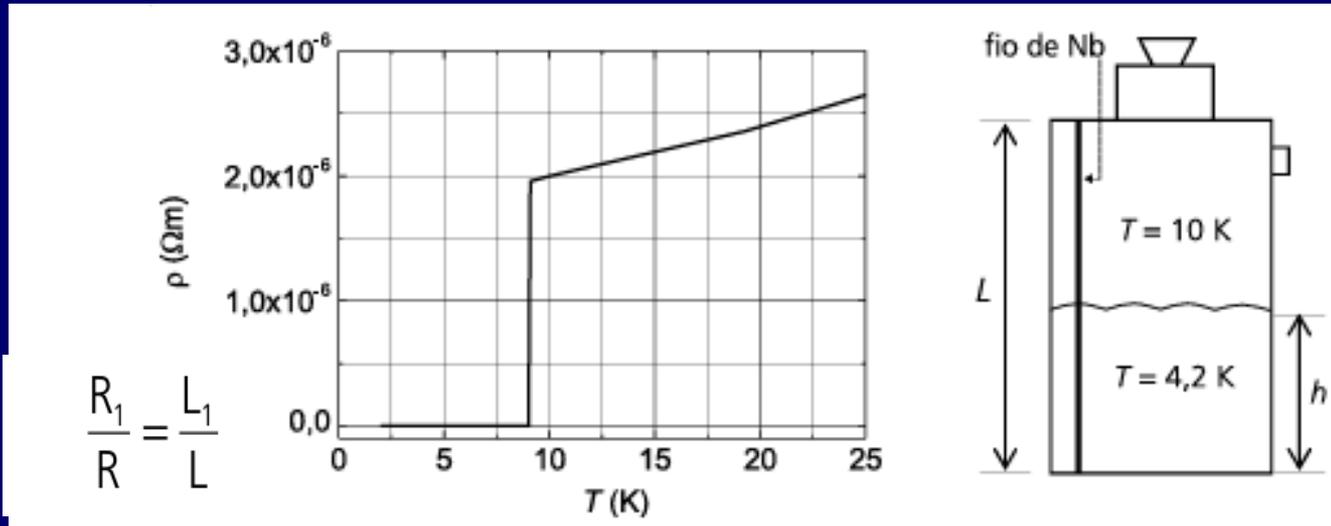
Condensado de Bose-Einstein:

Condensado de Bose-Einstein: quando as partículas (bósons) atingem o estado quântico mais baixo próximo do zero Kelvin. Apresentam efeitos quânticos macroscópicos. Os átomos condensam-se, dando origem a um único superátomo macroscópico, em que todos os átomos apresentam propriedades idênticas (ex.: Hélio-4, sódio, rubídio)



Acima com resistência zero no supercondutor, superfluidez pode ser observada pelo modelo de dois fluidos antes da formação completa do Condensado.

Medindo o nível de LHe



Efeito termoacústico

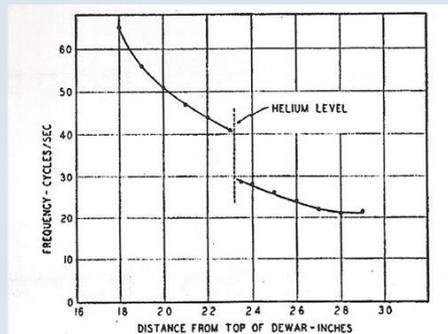


FIG. 1. Frequency of oscillation vs position of cold end for a $\frac{1}{4}$ in. o.d. tube oscillating in a 25-liter storage Dewar.

Experimentos das próximas aulas

[6] Filmes finos - preparação e aplicações

[7] Criostatos

[8] Supercondutividade

[9] Superfluidez do hélio

Revezamento na ordem de [6]-[9]



SEE YA LATER,
ALLIGATOR!