

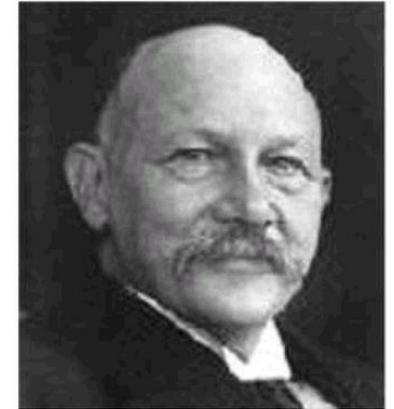
# **SUPERCONDUTORES**

**Classe especial de materiais que têm resistência elétrica zero (ou quase zero) abaixo de uma temperatura crítica**

# SUPERCONDUTORES

Os metais são bons condutores de eletricidade e suas condutividades aumentam com a diminuição da T

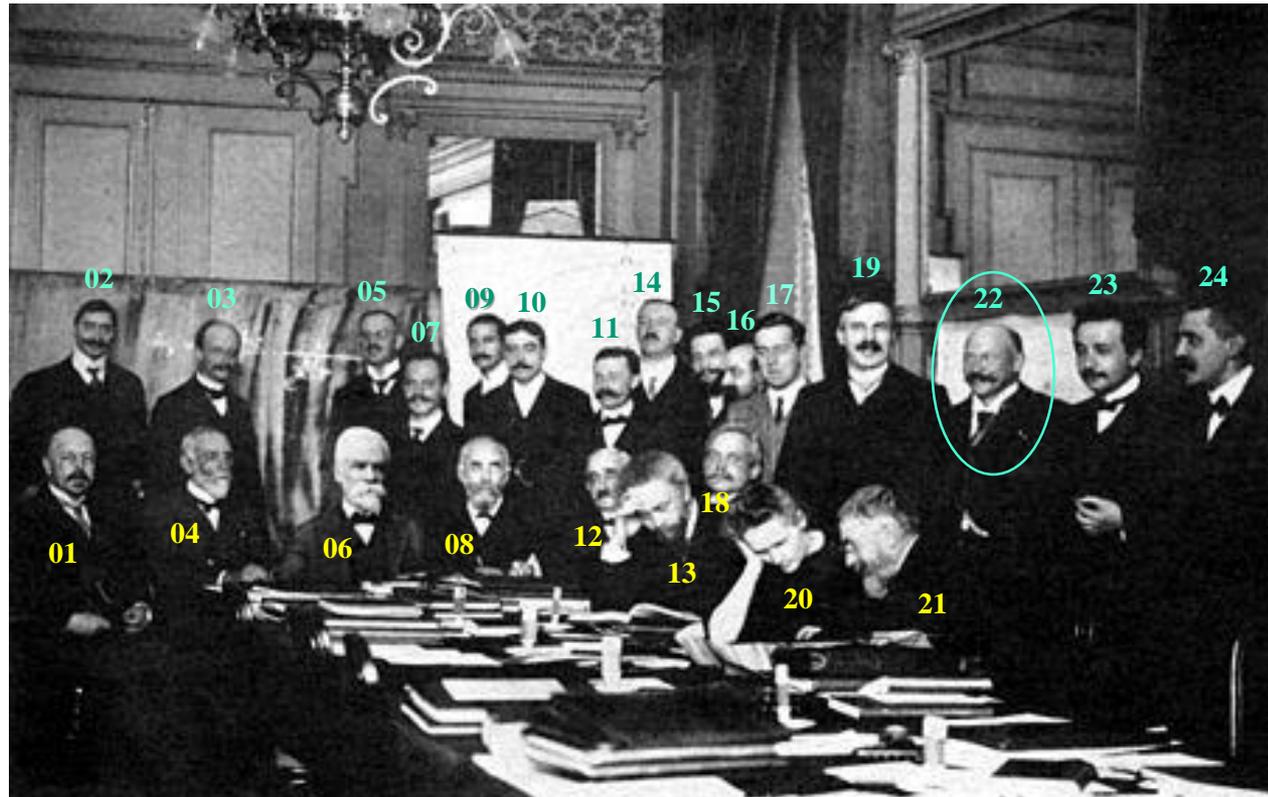
- 1908 – Heike Kammerlingh Onnes Conseguiu liquefazer o hélio líquido (4,2 K) pela 1ª vez
- 1911 – Descobriu que os metais Hg e Pb se tornam supercondutores a T , 4,0 K.
- 1913 – Nobel de Física - propriedades da matéria a baixas temperaturas e pela produção do He<sub>(l)</sub>.



Onnes: Premio Nobel de Fisica (1913)

- Supercondutor é um sólido com resistência zero (ou quase zero) a baixa T (temperatura crítica).
- Supercondutor pode transportar uma corrente elétrica sem perder energia que pode persistir por um tempo indefinido

- 01) Walter Nernst
- 02) Robert Goldschmidt
- 03) Max Planck
- 04) Léon Brillouin
- 05) Heinrich Rubens
- 06) Ernest Solvay
- 07) Arnold Sommerfeld
- 08) Hendrik Antoon Lorentz
- 09) Frederick Lindemann
- 10) Maurice de Broglie
- 11) Martin Knudsen
- 12) Emil Warburg
- 13) Jean-Baptiste Perrin
- 14) Friedrich Hasenöhrl
- 15) Georges Hostelet
- 16) Edouard Herzen
- 17) James Hopwood Jeans
- 18) Wilhelm Wien
- 19) Ernest Rutherford
- 20) Marie Curie
- 21) Henri Poincaré
- 22) Heike Kamerlingh Onnes
- 23) Albert Einstein
- 24) Paul Langevin



## Reunião da Solvay (1911)

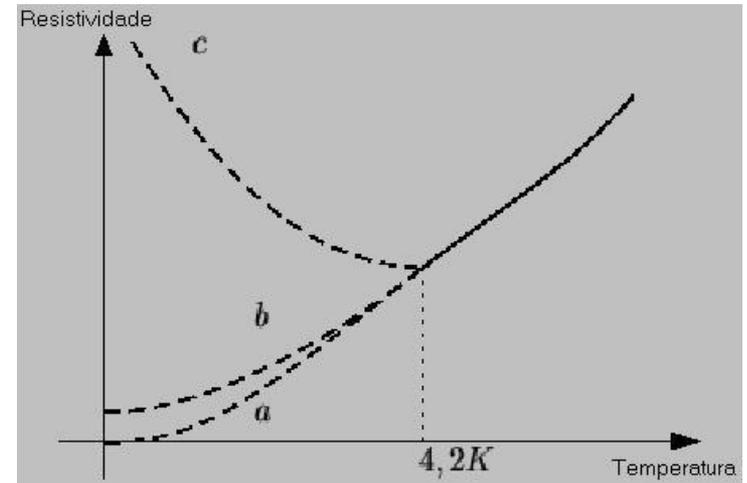
A descoberta da supercondutividade aconteceu por acaso, quando, em um desses experimentos, Onnes observou que a resistência do metal mercúrio caía inesperadamente a zero perto da temperatura de 4 K.

# SUPERCONDUTORES

Existe uma temperatura crítica ( $T_c$ ) na qual a resistência cai bruscamente em torno de zero, provocando o surgimento das propriedades supercondutoras.

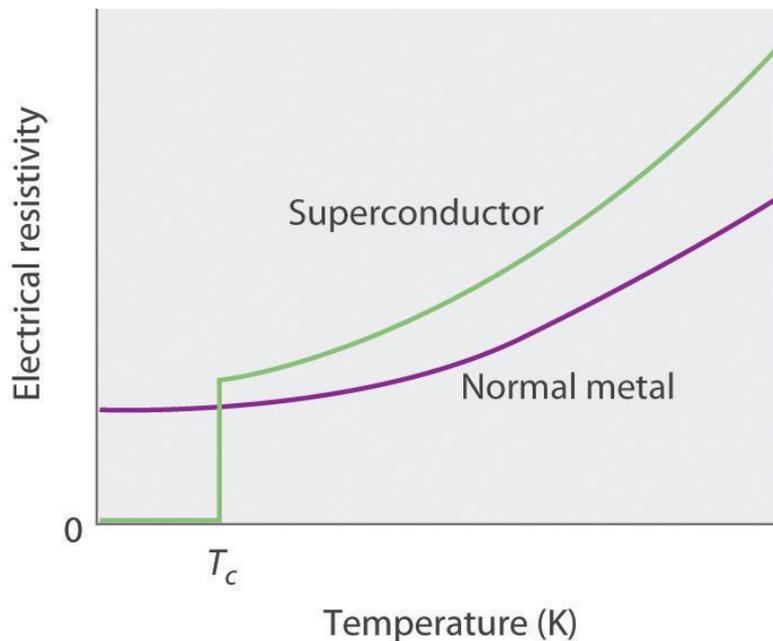
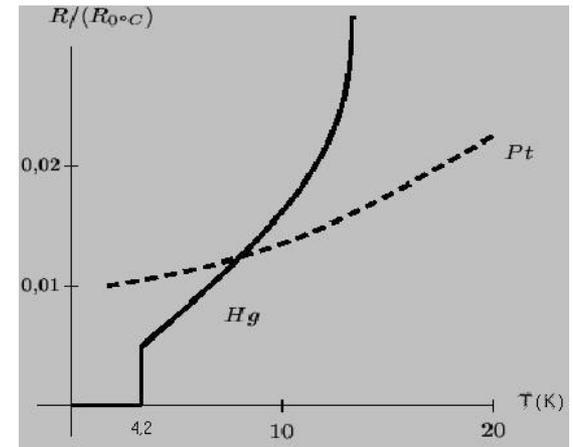
Onnes esperava três possíveis resultados devido às teorias da época:

- Essa curva ocorreria se a resistência fosse inteiramente devido à obstrução das trajetórias dos elétrons pelas vibrações térmicas, sendo assim a diminuição dessa temperatura aproximando-se a zero faria cessar a resistência.
  - Essa curva era esperada caso as impurezas e imperfeições da rede cristalina influenciassem na resistividade.
  - Essa curva ocorreria se houvesse uma diminuição do número de elétrons de condução devido a algum mecanismo de condensação.
- 1º Onnes utilizou a Pt, sem muito sucesso. No 2º experimento utilizou um material, que na sua época, poderia se conseguir maior grau de pureza, o Hg.

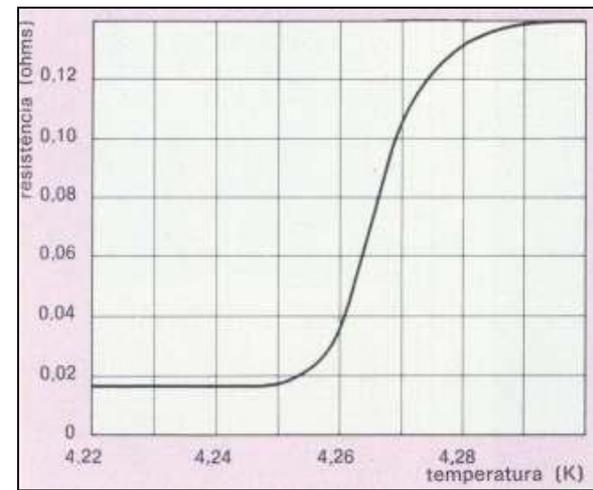


# SUPERCONDUTORES

Existe uma temperatura crítica ( $T_c$ ) na qual a resistência cai bruscamente em torno de zero, provocando o surgimento das propriedades supercondutoras.

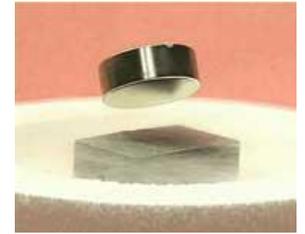
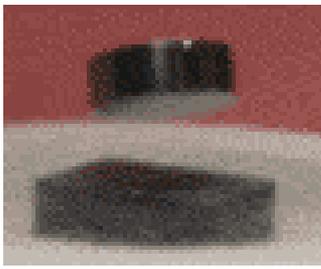


Não apresenta supercondutividade



Pb - Resistência x T

# SUPERCONDUTORES



Os supercondutores são divididos em dois tipos de acordo com as suas propriedades específicas:

**Tipo 1:** são formados principalmente pelos metais e algumas ligas metálicas e, em geral, são condutores de eletricidade à temperatura ambiente.

**Tipo 2:** são formados por ligas metálicas e outros compostos. Em geral, as temperaturas críticas ( $T_c$ ) associadas a eles são muito mais altas que as dos supercondutores do Tipo 1, como é o caso das cerâmicas baseadas em óxidos de cobre.

Metal	$T_c$ (K)
Pb	7,2
Hg	4,12
Al	1,175
Ti	0,4

Os melhores condutores Au, Ag e Cu não são supercondutores!

# SUPERCONDUTORES (Tipo 1)

Existe uma temperatura crítica ( $T_c$ ) na qual a resistência cai bruscamente em torno de zero, provocando o surgimento das propriedades supercondutoras.

## Tipo 1:

-  $T_c$ : extremamente baixa, que segundo a teoria TBS, seria necessário para diminuir as vibrações dos átomos no cristal e permitir o fluxo de elétrons sem dificuldade pelo. Material.

- T cai abruptamente

- Ocorre o efeito Meissner



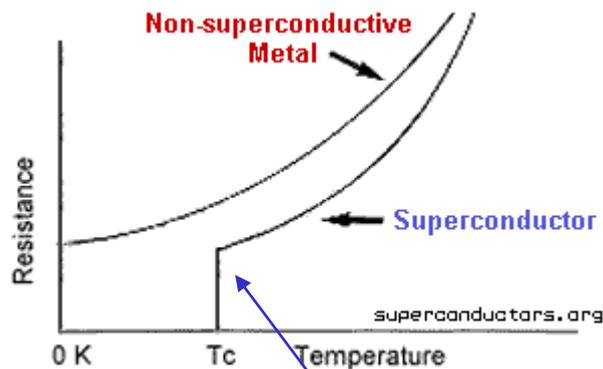
Ano	Metal (Liga)	$T_c$ recorde (K)
1929	Nb	9,25
1941	NbN	16,0
1953	$V_3Si$	17,5
1986	$Nb_3Ge$	23,2

O único meio de alcançar as  $T_c$  de metais é utilizando hélio líquido, que **é muito caro!!!**

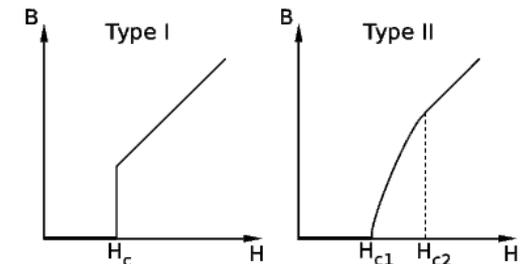
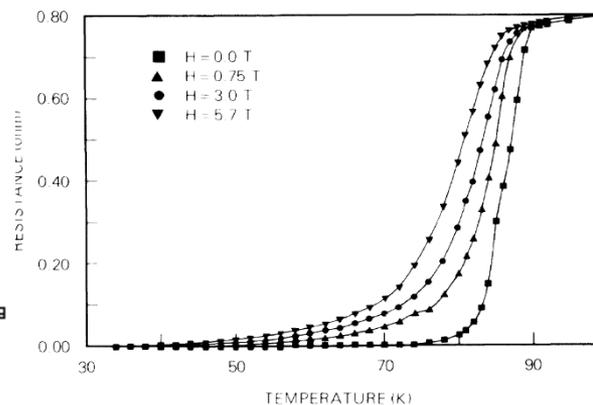
# SUPERCONDUTORES (Tipo 2)

- São formados por ligas metálicas e outros compostos.
- Em geral, as  $T_c$  são muito mais altas que as dos supercondutores do **Tipo 1**, como é o caso das cerâmicas baseadas em óxidos de cobre.
- O mecanismo atômico que leva supercondutividade ainda não completamente desvendado.
- A transição para o estado supercondutor **Tipo 2** é gradual com estágios intermediários comparado ao **Tipo 1**.

## Tipo 2



## Tipo 1



## SUPERCONDUTORES (Tipo 2)

Todos os supercondutores de alta temperatura pertence ao Tipo 2 cerâmicas

Material cerâmico	$T_c$ recorde (K)
$\text{Hg}_{0,8}\text{Tl}_{0,2}\text{Ba}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{8,33}$	138
$\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$	115
$\text{Ca}_{1-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_2$	110
$\text{TmBa}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$	101
$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$	93
$\text{La}_{1,85}\text{Ba}_{1,15}\text{CuO}_4$	35

Metais (ligas)	$T_c$ recorde (K)
$\text{MgB}_2$	39,2
$\text{Nb}_3\text{Ge}$	23,2
Nb	9,25
Tc	7,80
V	5,40

Os metais (Nb, Tc e V, exceções) pertence aos supercondutores Tipo 2



Walther Meissner

## Efeito de Meissner - 1933 (efeito Meissner-Ochsenfeld)

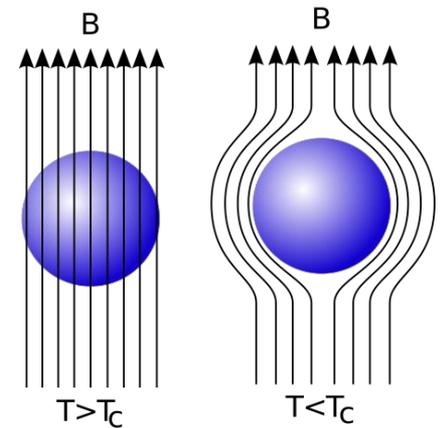


Robert Ochsenfeld

Característica mais famosa dos supercondutores,  
é a causa da levitação magnética de um ímã

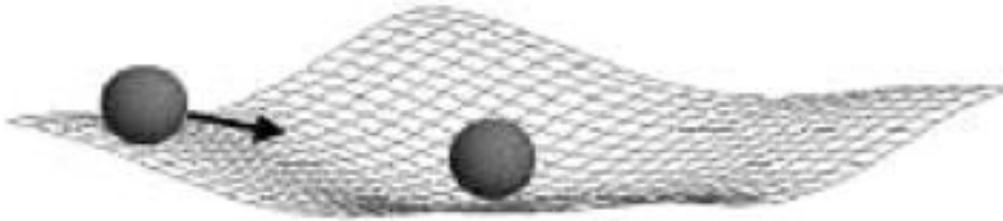
A explicação para o fenômeno está na expulsão total dos campos magnéticos externos pelos supercondutores, o que faz com que o campo magnético interno seja nulo, desde que o campo externo aplicado não seja muito intenso.

Se considerarmos um condutor ideal, ou seja, que não apresenta resistência à corrente elétrica, o cancelamento do campo é total, caracterizando o chamado "diamagnetismo perfeito".



Supercond. Tipo 1

# Teoria BCS - 1957



Bardeen

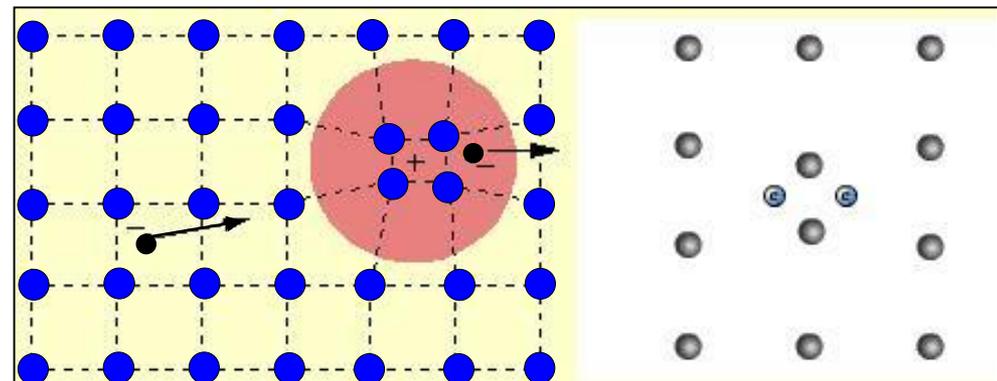
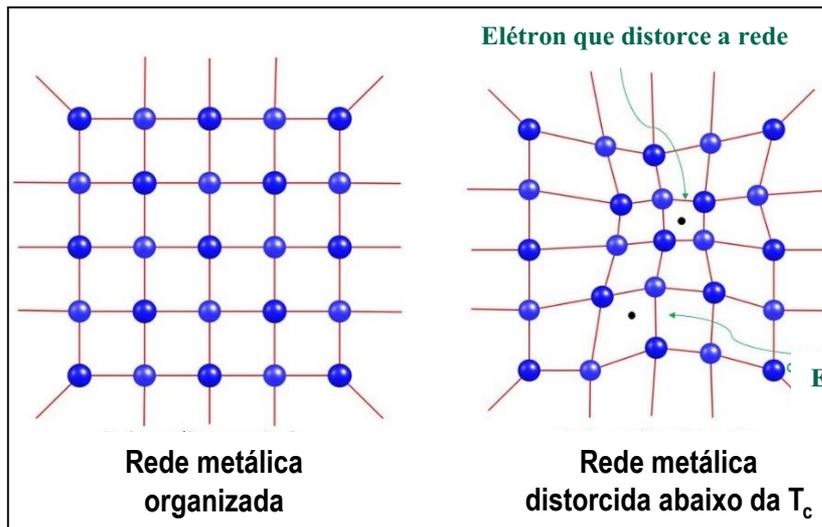
Cooper  
(Nobel – 1972)

Schrieffer

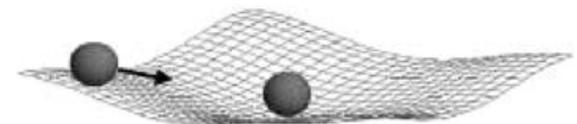
- A teoria viria explicar satisfatoriamente o fenômeno da supercondutividade a baixas temperaturas presentes nos supercondutores Tipo I.
- Formação de “pares de elétrons” (pares de Cooper) através da interação com as oscilações da rede cristalina (vibrações).
- Os elétrons (spin fracionários) são chamados de férmions - obedecem o Princípio de Pauli.
- Os pares Cooper comportam de forma diferentes - atuam como bósons (spin inteiros).

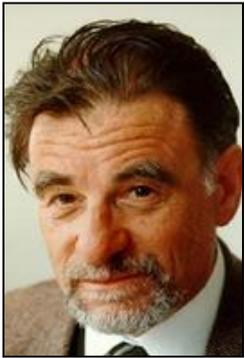
# Movimento do par de Cooper por uma rede cristalina.

- As distorções da rede são provocadas pela passagem de um elétron que acarreta na atração do outro. A distorção é fônon emitido pelo primeiro elétron e capturado pelo segundo.
- Um elétron é atraído pela deformação da rede cristalina provocado por outro elétron com spin e momentos contrários.
- Os pares de Cooper formam um condensado que flui sem resistência pelo material e atua expulsando campos magnéticos externo fracos (efeito Meissner).



Elétron atraído pela concentração de carga positiva





Alex Muller

## Supercondutores a altas temperaturas

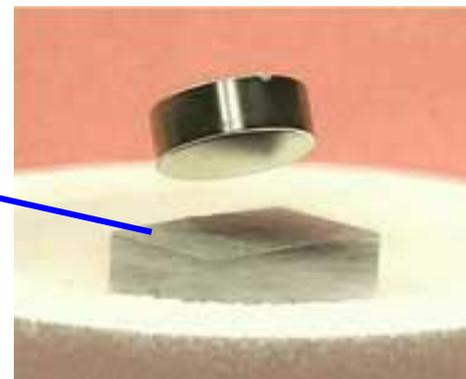
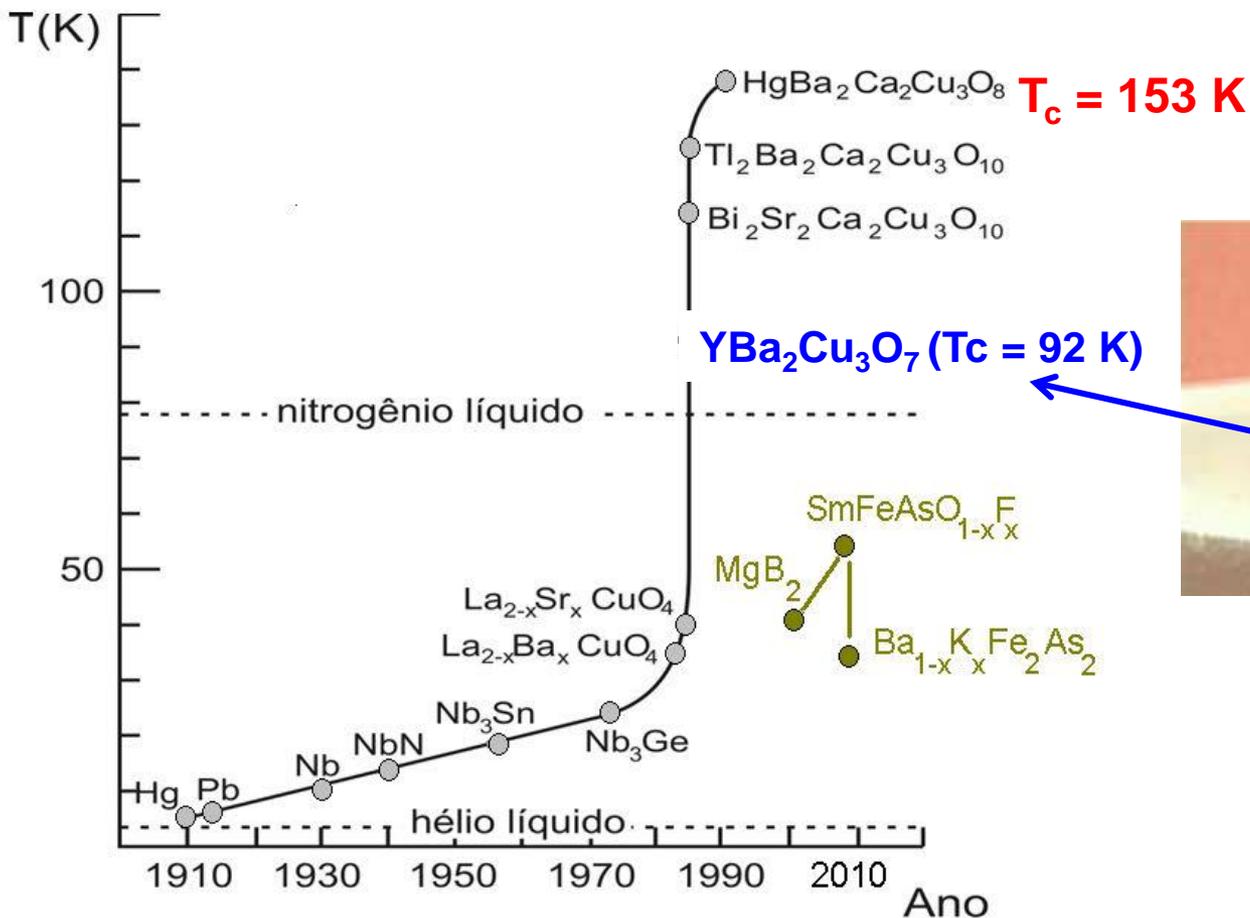
### Cerâmicas supercondutoras - 1986 (Nobel - 1987)



Georg Bednorz

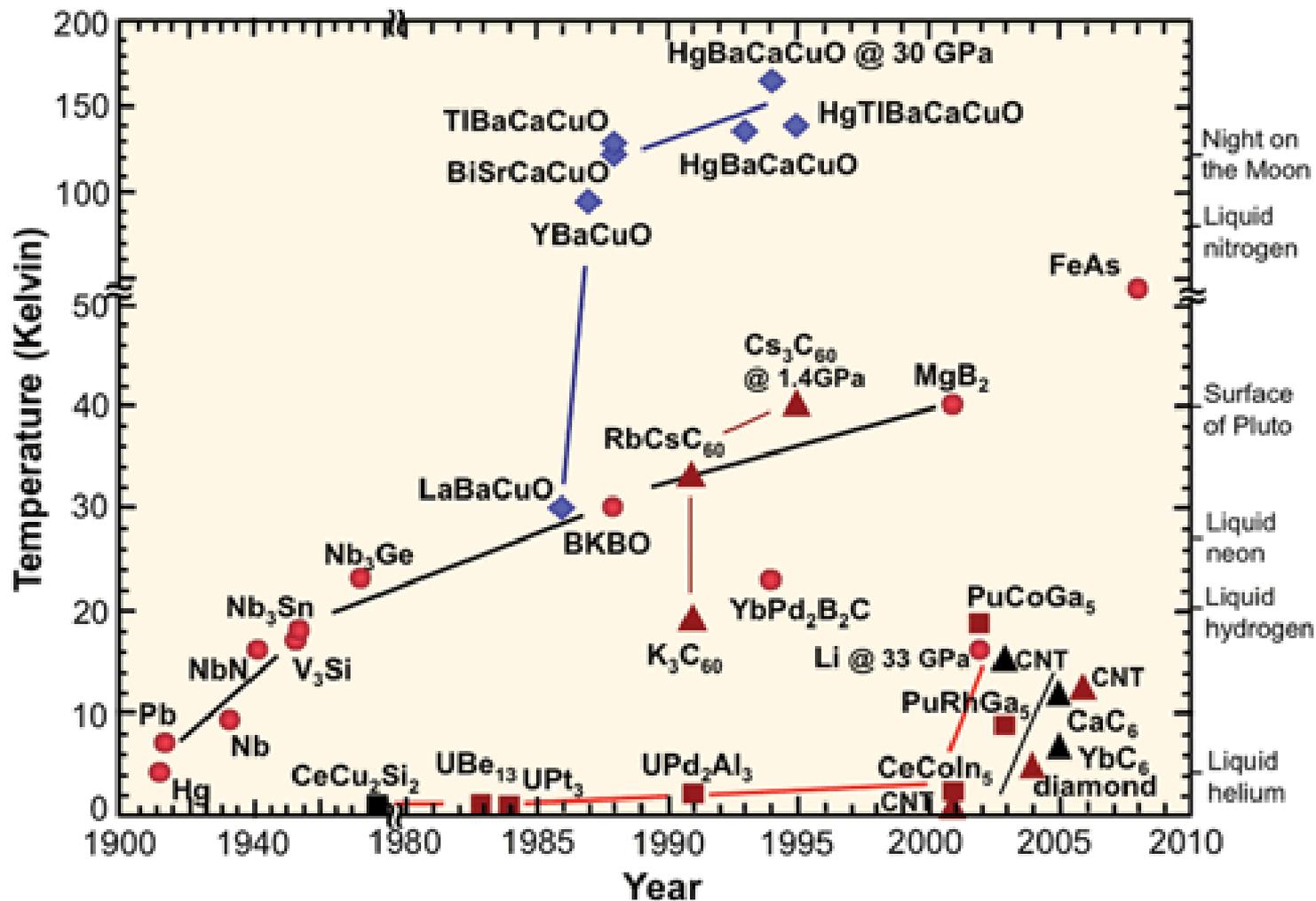
- A teoria BCS não explica satisfatoriamente o fenômeno da supercondutividade a altas temperaturas.
- A supercondutividade havia sido descoberta em cerâmicas ( $\text{BaLaCuO}$  -  $T_c = 30$  K), um material que geralmente atua como um isolante.
- Também em 1986, Paul Chu e Mang-Kang Wu descobriram o conhecido supercondutor  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  (93 K), temperatura superior a do nitrogênio líquido (77 K)

# Evolução da $T_c$ dos supercondutores de 1911-2008



As linhas horizontais pontilhadas indicam as temperaturas dos líquidos refrigerantes hélio e nitrogênio necessários para atingir baixas temperaturas.

# Evolução da $T_c$ dos supercondutores de 1900-2010



1964 - O primeiro supercondutor não-metálico  $ABO_3$  ( $BaTiO_3$ ,  $CaTiO_3$  e  $NaNbO_3$  - Estrutura da Perovskita –  $T_c = 0,01$  K)

Estado de oxidação A e B = 6

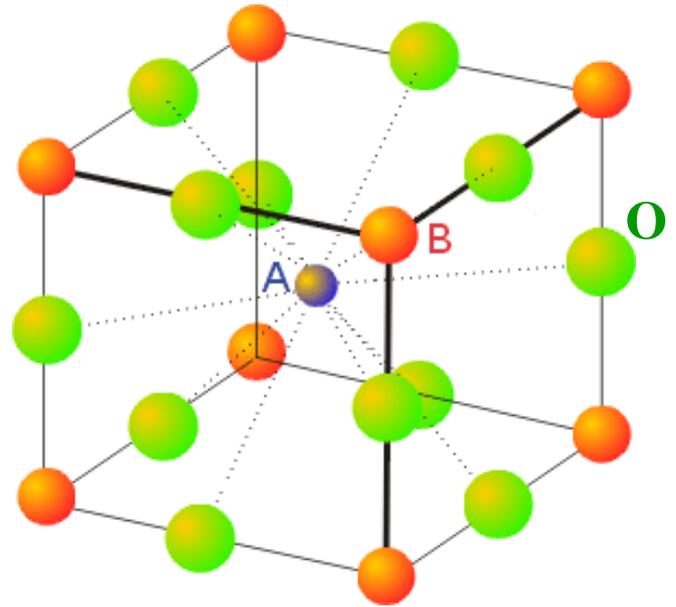
$Ca^{2+}$  e  $Ti^{4+}$

Perovskita - Cúbica simples

$Ca^{2+}$  no centro do cubo (NC = 12)

$Ti^{4+}$  localizam nos vértices (NC = 6,  $O_h$ )

$O^{2-}$  se situam nas arestas

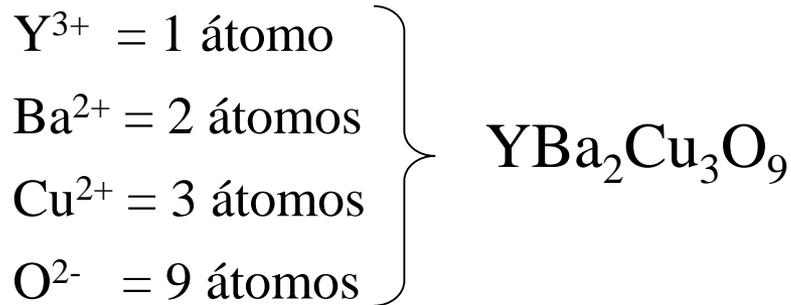


1986 – Geog Bednorz e Alex Muller (Lab. IBM em Zurique, Suíça) descobriram o novo supercondutor  $La_{(2-x)}Ba_xCuO_{4-x}$  - Estrutura da Perovskita –  $T_c = 35$  K)

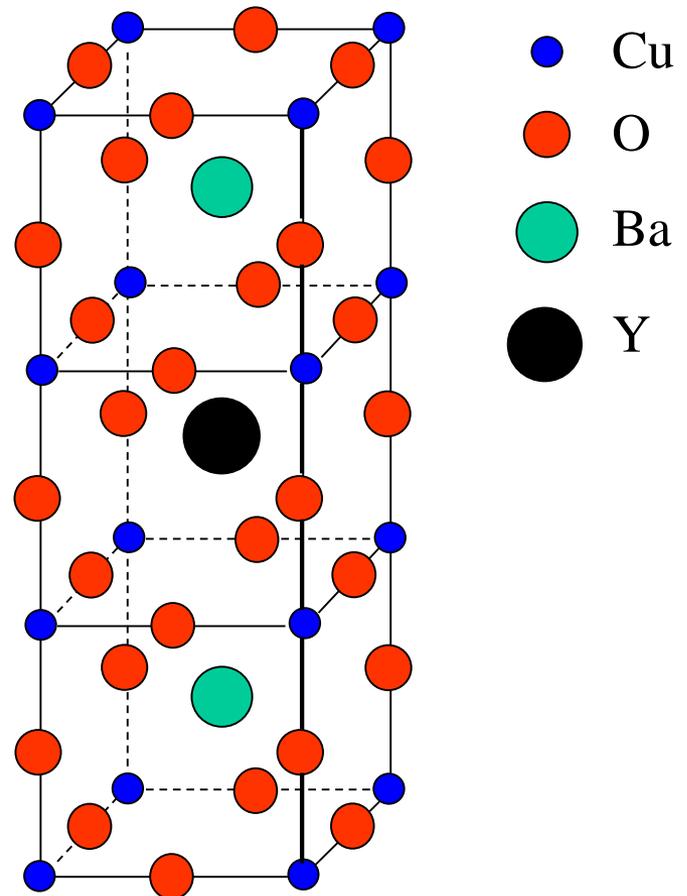
1987 – Geog Bednorz e Alex Muller (Premio Nobel de Fisica)

1987 – Wu, Chu e col. prepararam o primeiro material supercondutor a **93 K** [N<sub>2(ℓ)</sub>], YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-x</sub> – constituído por três unidades de cúbicas de Perovskita empilhadas – célula unitária alongada tetragonal

- Cubos superiores e inferiores possuem íon Ba<sup>2+</sup> no centro e íons Cu<sup>2+</sup> nos vértices
- O cubo do meio é semelhante, mas tem um íon Y<sup>3+</sup> no centro.



Estequiometria YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-x</sub>



- O cubo do meio é semelhante, mas tem um íon  $Y^{3+}$  no centro.
- Cubos superiores e inferiores possuem íon  $Ba^{2+}$  no centro e íons  $Cu^{2+}$  nos vértices

$Y^{3+} = 1$  átomo (centro)

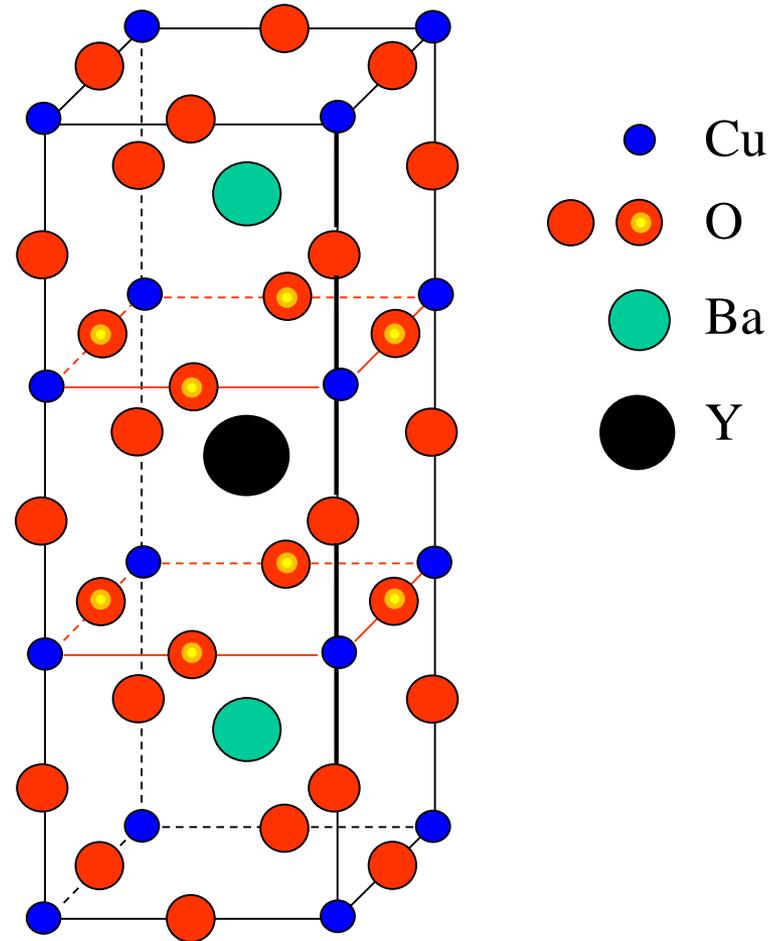
$Ba^{2+} = 2$  átomos (centro)

$Cu^{2+} = 8 (1/8) + 8 (1/4) = 3$  átomos  
(vértices) (arestas)

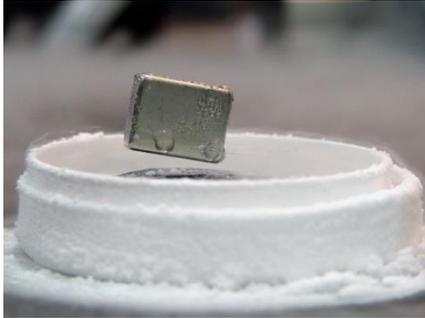
$O^{2-} = 20 (1/4) + 8 (1/2) = 9$  átomos  
(arestas) (faces)



Estequiometria  $YBa_2Cu_3O_{7-x}$



# TREM BALA



Para criar o campo magnético, que é o que faz o trem levitar, os cientistas resfriam os supercondutores a  $-196^{\circ}\text{C}$  (77K), utilizando nitrogênio líquido. O nitrogênio é um combustível que custa menos de R\$ 0,30 e não polui o ambiente.



**O trem Maglev usa o supercondutor para levitar sobre os trilhos, eliminando a fricção com os trilho ( Shanghai - 500 Km/h)**

# Aplicações tecnológicas



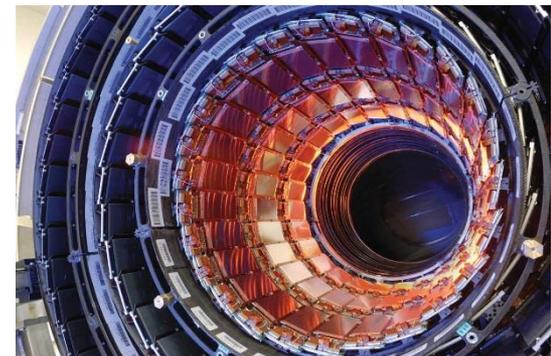
The Yamanashi MLX01 MagLev train  
Em dezembro de 2003: 581 k/h. Japão

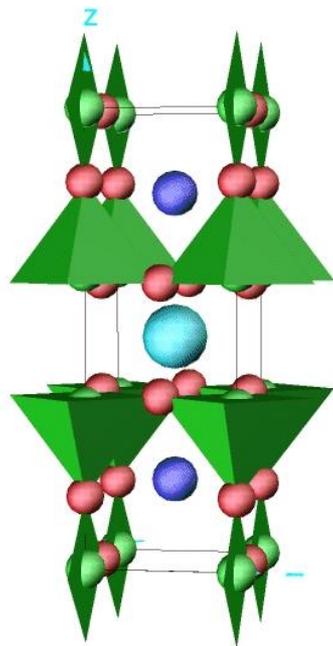


MRI: Imagem por  
Ressonância magnética



CERN: Magnetos supercondutores LHCb. Genebra, na Suíça





### YBCO compounds

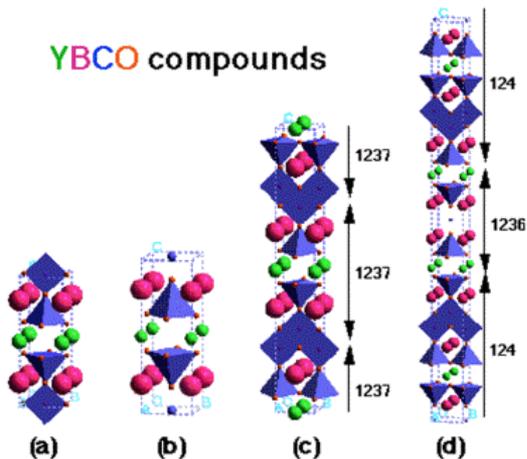


Fig. 15. Structures of (a)  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ , (b)  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_6$ , (c)  $\text{YBa}_2\text{Cu}_4\text{O}_8$  and (d)  $\text{Y}_2\text{Ba}_4\text{Cu}_7\text{O}_{15}$ .

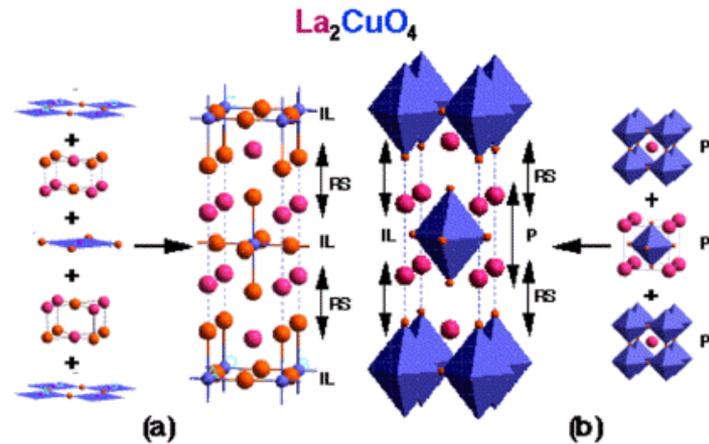


Fig. 7. Structure of  $\text{La}_2\text{CuO}_4$ .

### Pb-based cuprate superconductors

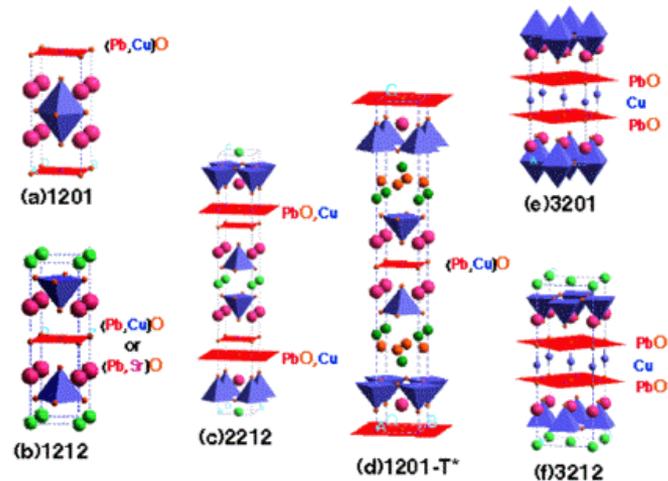
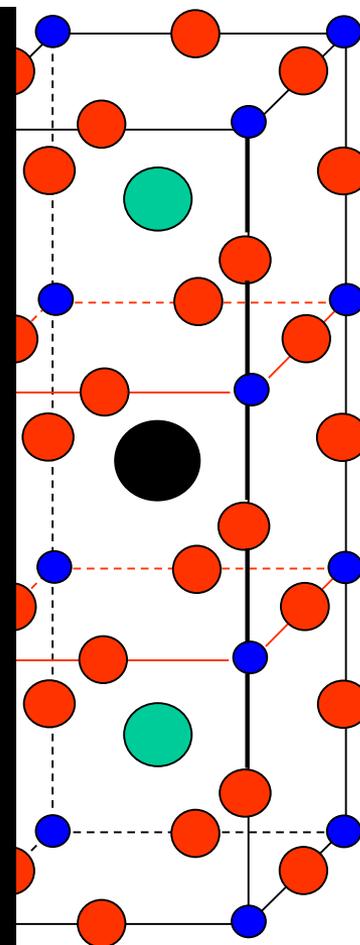
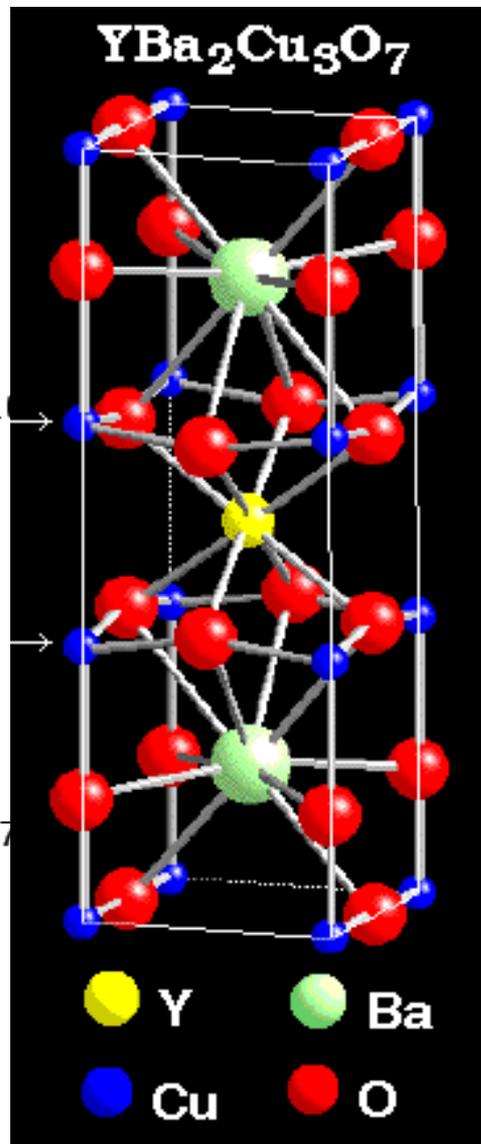
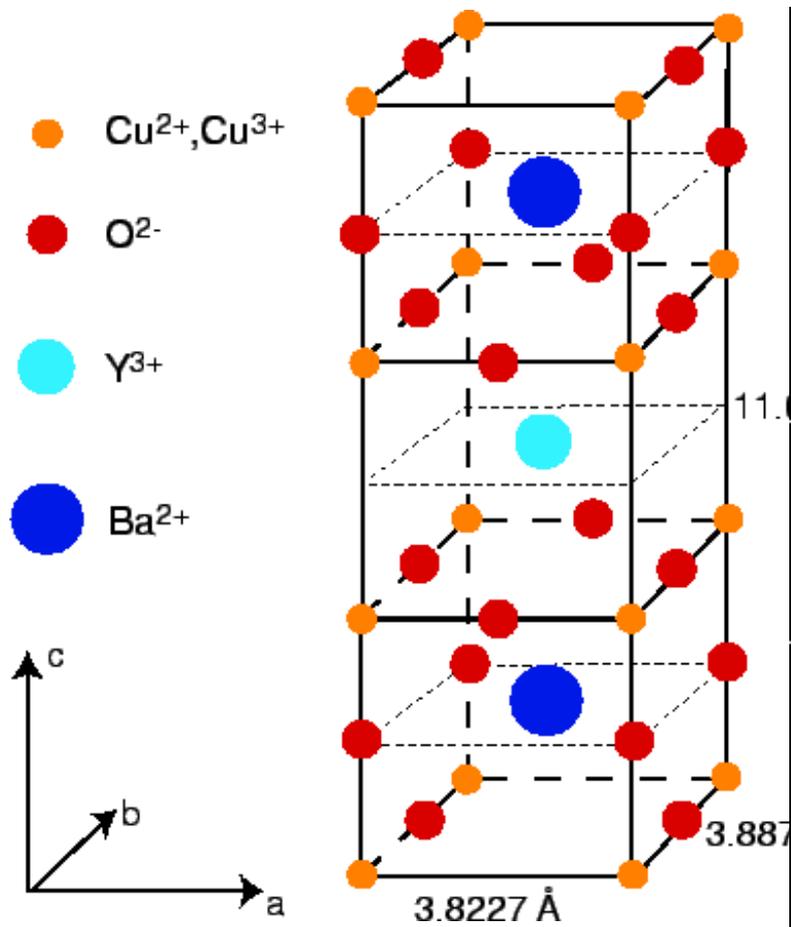
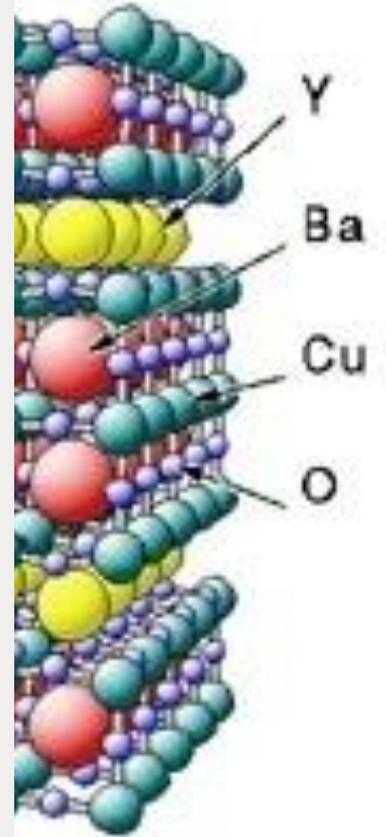
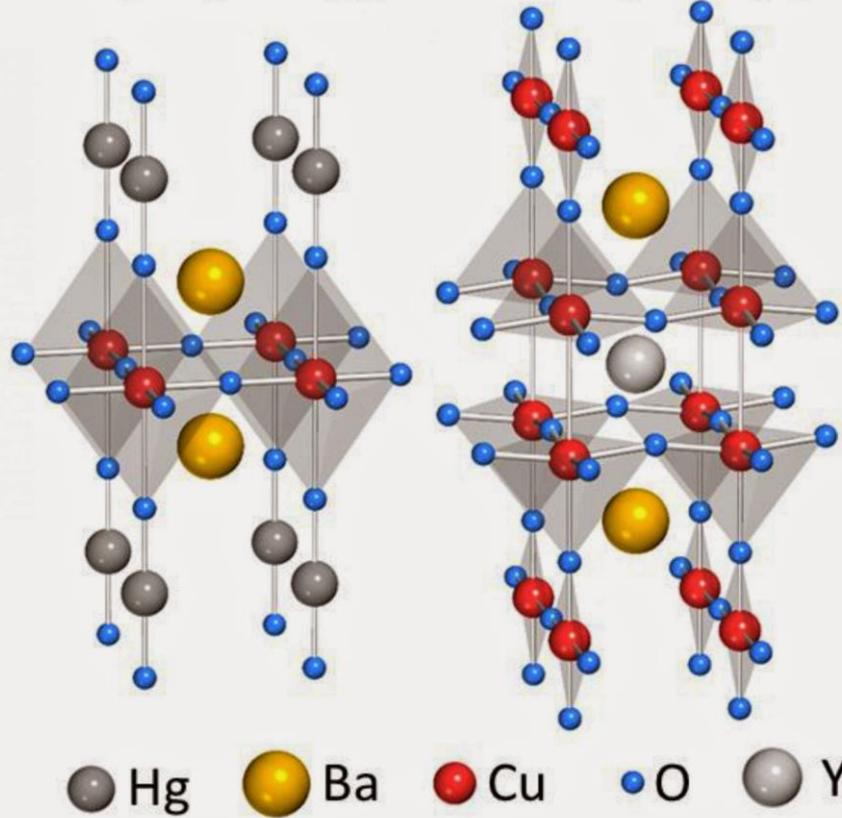
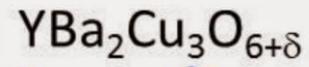
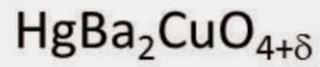
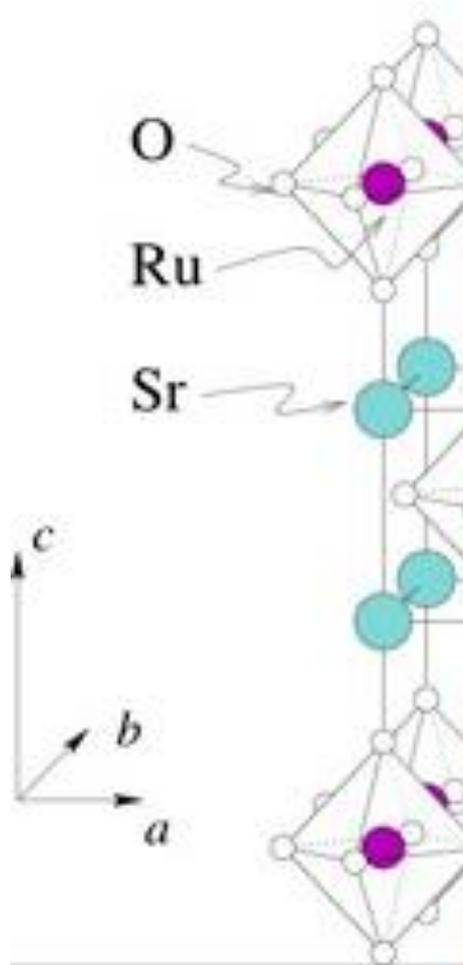
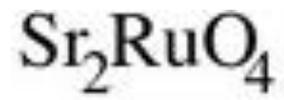
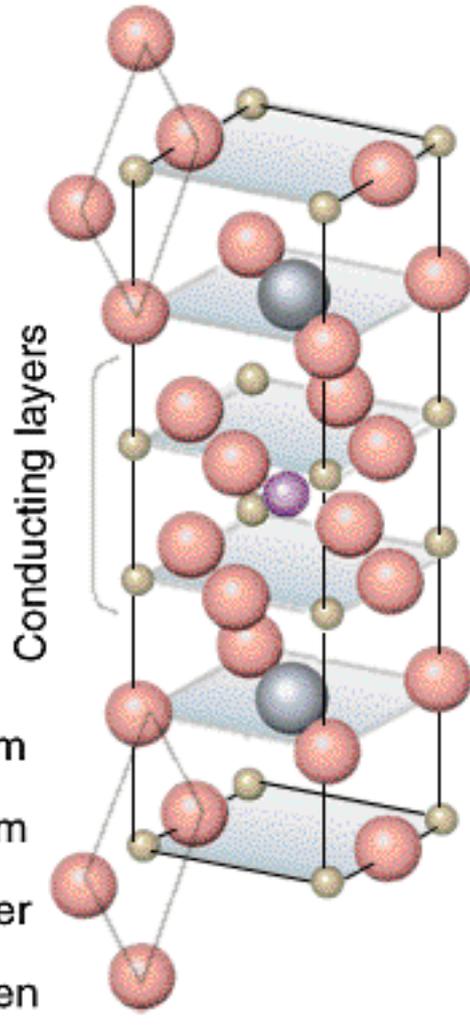


Fig. 18. Structures of Pb-based superconductors. (a) PbCu-1201, (b) PbCu-1212 & Pb-1212, (c) Pb-2212, (d) Pb-1201-T\*, (e) Pb-3201, and (f) Pb-3212.





# Ceramics



## Superconducting Ceramics

- Superconductors show no resistance to flow of electricity.
- Superconducting behavior only starts below the superconducting transition temperature,  $T_c$ .
- Meissner effect: permanent magnets levitate over superconductors. The superconductor excludes all magnetic field lines, so the magnet floats in space.