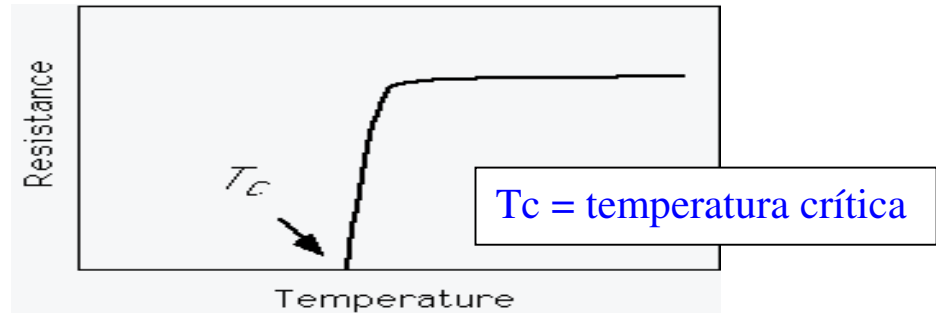


## 2.6 SUPERCONDUCTORES

### 2.6.1 SUPERCONDUCTIVIDAD



HEIKE  
KAMERLINGH  
ONNES



JOHN BARDEEN,  
LEON COOPER, Y  
JOHN SCHRIEFFER



ALEX MÜLLER Y  
GEORG BEDNORZ



### 2.6.2 LA HISTORIA

- **Descubrimiento: fue resultado de estudio de propiedades de los gases**
  - 1845 solidificación  $\text{CO}_2$  (Faraday) (195 K)
  - 1877 solidificación aire (Pictet, Cailletet)  
( $\text{O}_2$ : 90 K /  $\text{N}_2$ : 77 K)
  - 1892 invención termo Dewar (James Dewar)
  - 1898 licuifacción  $\text{H}_2$  (Dewar) (20 K)
  - 1907 cálculo de licuifacción del He (Onnes)

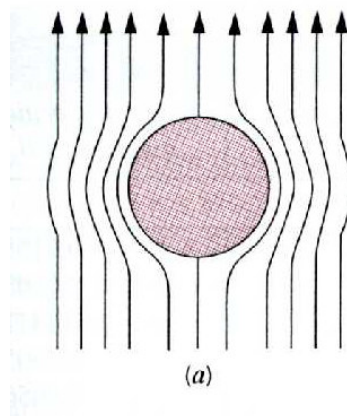
- 10/7/1908 primera muestra de He líquido (4K)
- Onnes continuó investigando  $\rho=\rho(T)$ 
  - Existían 3 teorías para  $\rho(T \rightarrow 0)$ 
    - Dewar:  $\rho(T \rightarrow 0K) \rightarrow 0$
    - Lord Kelvin:  $\rho$  alcanza mínimo y luego  $\uparrow$  (e- se congelan al átomo)
    - Matthiesen:  $\rho(T \rightarrow 0K) \rightarrow \rho_0$  (impurezas) (basado en teorías de Drude y Lorentz)
  - Confirmó teoría de Matthiesen: Au, Pt, ...
  - ... 1911 Hg !  $\rho(4 K) \rightarrow 0$   
1913 Premio Nobel de Física !



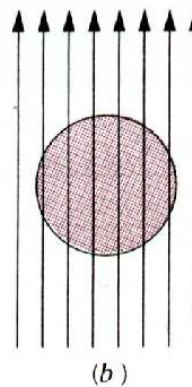
### 2.6.3 EFECTO MEISSNER (-OCHSENFELD)

- **Leyes de Maxwell en conductor perfecto con H (externo):** produce flujo opuesto para contrarestar el flujo.
- Si superconductor fuera conductor perfecto:
  - $H=0$  para  $T=T_{\text{amb}} \rightarrow T < T_c \Rightarrow$  se aplica  $H > 0$   
Efecto: repulsión del campo magnético

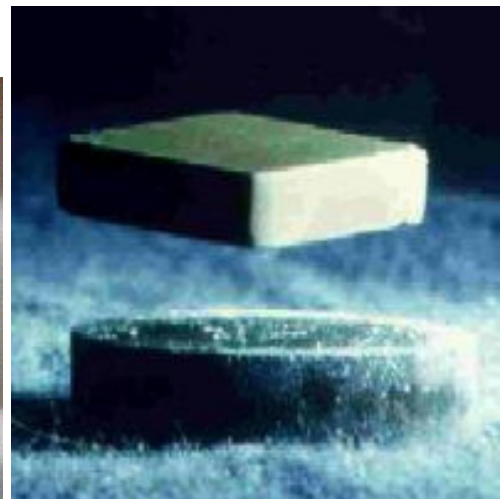
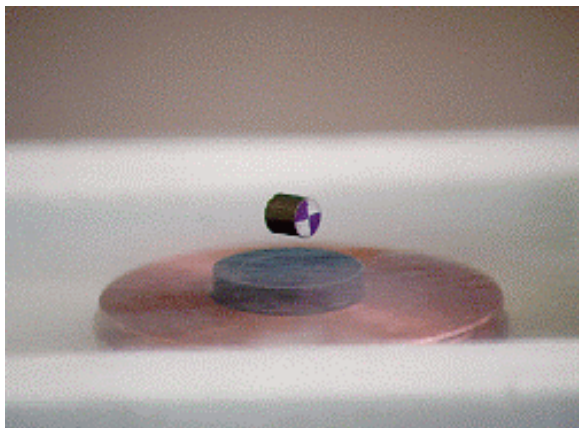
- $H > 0$  para  $T = T_{\text{amb}} \rightarrow T < T_c \Rightarrow H$  penetra el material  $\Rightarrow$  flujo magnético atrapado  
Efecto: no es posible levitar el material
- 1933, Berlín, Walther Meißner & Robert Ochsenfeld:
- Superconductor repele campo magnético sin importar si se aplica antes o después de  $T_c$ .
- Conocido como **efecto Meissner**.



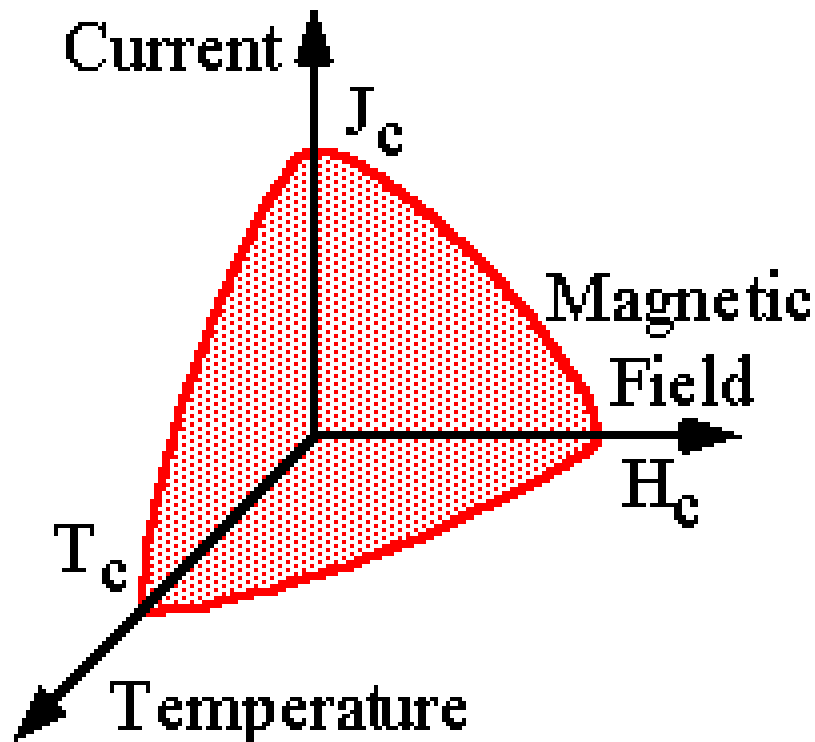
$T < T_c$



$T > T_c$



## 2.6.4 CAMPO MAGNÉTICO CRÍTICO

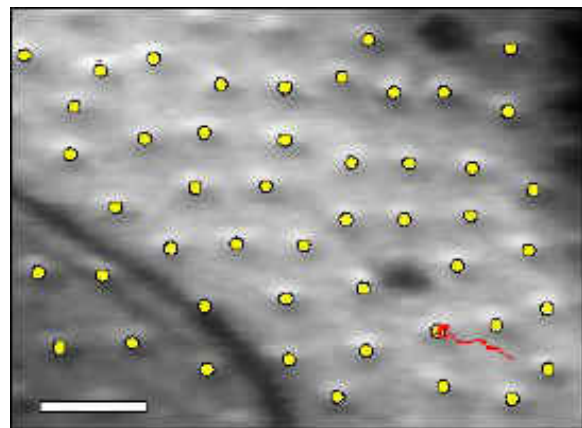
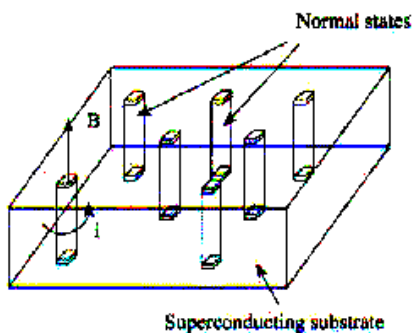


Material	$H_c$ [ $\text{Am}^{-1}$ ]	$T_c$ [K]
$\text{Nb}_3\text{Ge}$	40	23
$(\text{La,Sr})\text{CuO}_4$	130	39
$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$	320	93

## 2.6.5 SUPERCONDUCTORES TIPO II

- Superconductores originales son Tipo I:  
Hg, Al, Zn
  - A  $T < T_c$  y si  $H < H_c$   
 $\Rightarrow \rho = 0$  y diamagnetismo perfecto
  - A  $T < T_c$  y si  $H > H_c$   
 $\Rightarrow \rho > 0$  y hay penetración del flujo

- **Superconductores Tipo II: 2 campos críticos** ( $H_{c1}$  y  $H_{c2}$ )
  - $T < T_c$ 
    - Si  $H < H_{c1}$ 
      - $\Rightarrow \rho = 0$  y diamagnetismo perfecto (**idem I**)
    - Si  $H > H_{c2}$ 
      - $\Rightarrow \rho > 0$  y hay penetración del flujo (**idem I**)
    - Si  $H_{c1} < H < H_{c2}$ 
      - $\Rightarrow \rho = 0$  y hay penetración de flujo parcial (**solo II**)
  - 1957, descubierto por físico soviético Abriksov
  - Si  $H_{c1} < H < H_{c2}$ : estado de vórtices
    - Núcleos de material “normal” ( $\rho > 0$ )
    - Rodeados de material superconductor
    - Se crean corrientes cuantizadas alrededor de núcleos.
    - Si  $H \uparrow \Rightarrow$  aumenta  $N^\circ$  de núcleos “normales”
    - Si  $H$  crece hasta  $H_{c2} \Rightarrow$  no caben más vórtices  
 $\Rightarrow$  desaparece SC



**Vórtices en película de Nb a  
4,5 K (1998)**

## 2.6.6 TEORÍA BCS

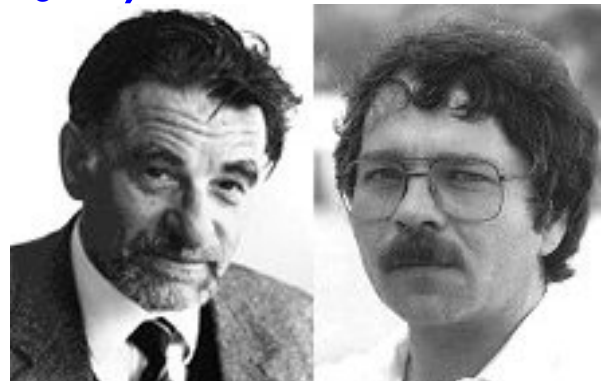
- 1957, establecen modelo para explicar la superconductividad.
- 1972, Premio Nóbel de Física.
- En SC electrones forman pares: pares de Cooper
- No puede predecir qué materiales si y cuales no



JOHN BARDEEN, LEON COOPER, Y JOHN SCHRIEFFER

## 2.6.6 SUPERCONDUCTORES DE ALTA Tc

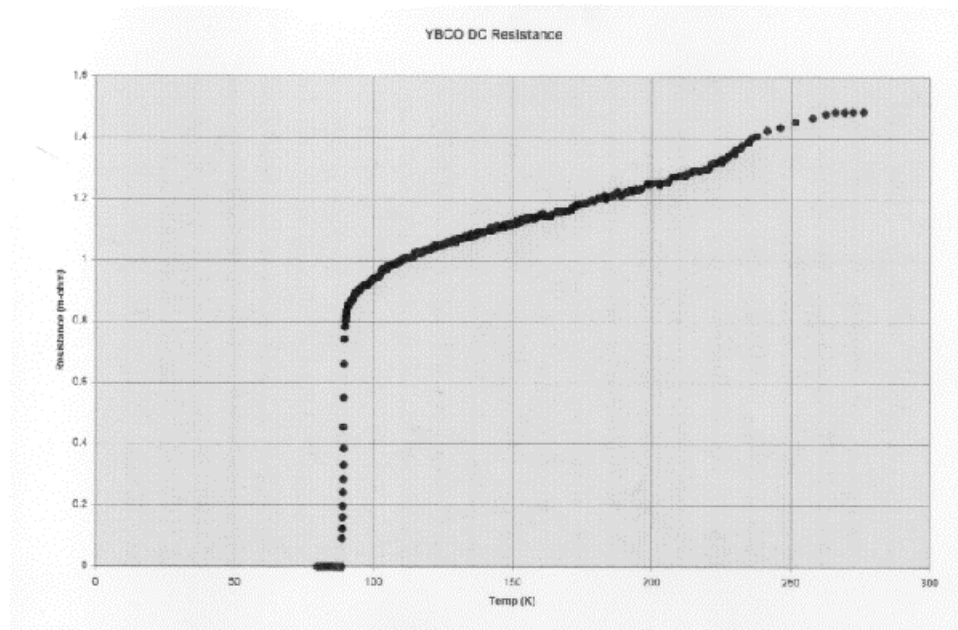
- Hasta 1986:  $(T_c)_{\max}=23\text{ K}$  ( $\text{Nb}_3\text{Ge}$ )
- 1986, IBM, Suiza, Bednorz & Müller
- $\text{La}_{1,85}\text{Ba}_{0,15}\text{CuO}_4$ ,  $T_c=30\text{K}$  !
- Descubren nuevo tipo de superconductor
- 1987, Premio Nóbel de Física



ALEX MÜLLER Y GEORG BEDNORZ

- 1987, Paul Chu @ University of Alabama, Huntsville, descubre 123 (YBCO),

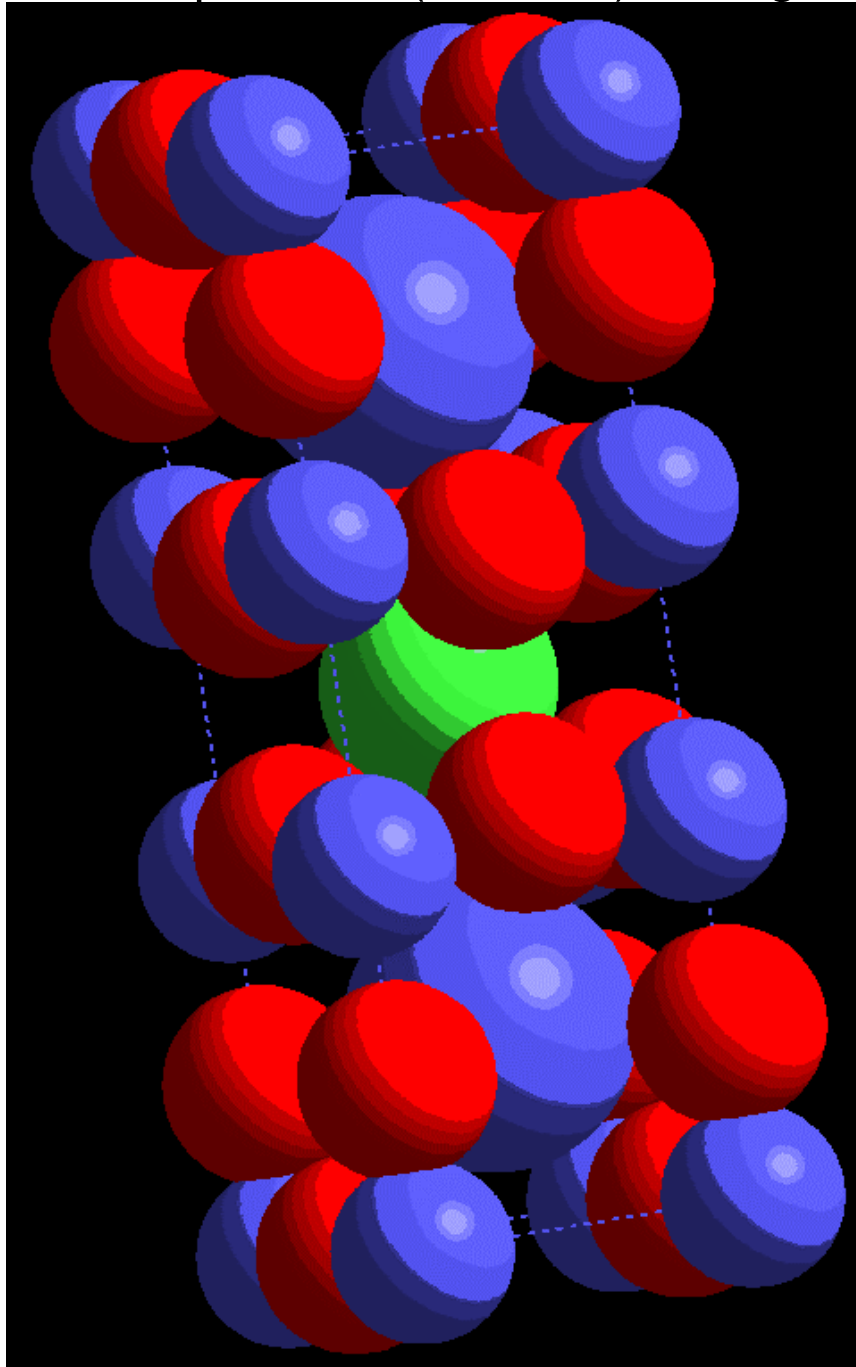
**$T_c = 90\text{ K} > 77\text{K} !!!!!$**



- >1987 REVOLUCION.
- Woodstock de la física ... etc.
- 1988  $\text{Ti}_2\text{Ba}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$ ,  $T_c = 127 \text{ K}$  (ojo: Ti)
- 1993  $\text{HgBa}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{8+\delta}$ ,  $T_c = 133 \text{ K}$  (ojo Hg)
- $\approx 1995$ : con  $\text{HgBaCaCuO}$   $T_c = 150 \text{ K}$  pero a  $P = 235\,000 \text{ atm}$  ! ... poco práctico
- 1999 ... desilución ... pocas aplicaciones útiles

## Superconductor 123: $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ ( $x \approx 0,1$ )

- A temperatura ambiente: ortorrómbico
- A alta temperatura ( $>600^\circ\text{C}$ ): tetragonal





## 2.6.7 APLICACIONES

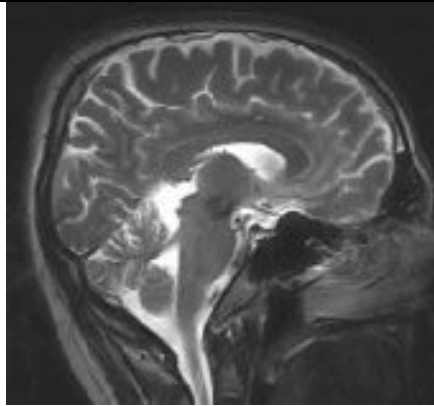


### **Maglev: tren de levitación magnética**

- "Flota" sobre imanes superconductores
- Prácticamente elimina roce
- 1990. Japón financia Tecnología Maglev. Se autoriza construcción de línea de pruebas.
- Abril 1997, línea de pruebas Yamanichi Maglev se inaugura.
- Abril 14, 1999, prueba del MLX01 (foto) alcanzó velocidad de 550 kph.

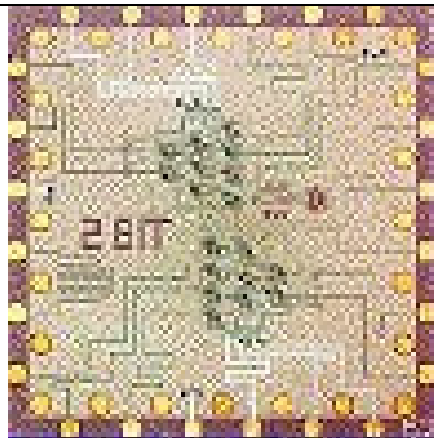


### **Cables superconductores**



### **Resonancia magnética nuclear**

- Imágenes del interior del cuerpo humano
- Usa campo magnético para alinear los núcleos de hidrógeno (protones) de acuerdo a su spin.
- $f=68$  kHz aplica torque al H y lo suelta  $\Rightarrow$  genera radiación electromagnética  $\Rightarrow$  imagen
- Se usa imán superconductor de  $\text{Nb}_3\text{Sn}$  (Tipo II,  $T_c=18$  K,  $H_{c2}=24,5$  T) con  $I \sim 700$  A  $\Rightarrow$  He líq.
- (Dato: persona se desmaya con 3 T)
- (Otro Dato: campo magnético tierra: 0,5 gauss =  $0,5 \times 10^{-5}$  T)



**Chips son superconductores**