Breve resumen de la larga historia de la Superconductividad

Gabriela Pasquini

DF, UBA

Los principios de la criogenia

- 1908 Kammerling Onnes licua He T_m = 4.2 K

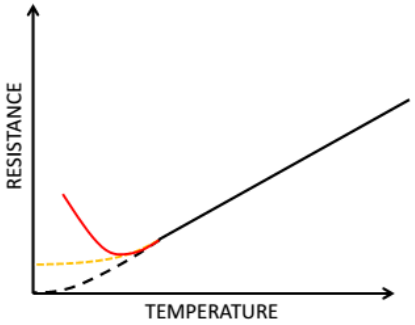
James Dewar

H_2: 20.4K

(N: 77 K, O_2: 90.15 K)

Conductividad perfecta

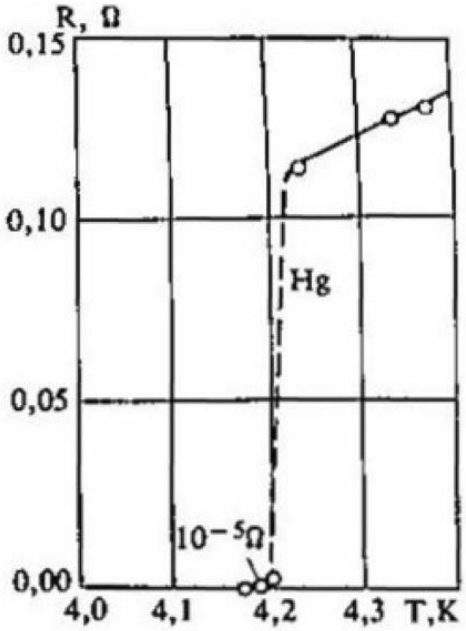
Que ocurre con la ρ de los metales al bajar T?



•1911 : Descubre conductividad perfecta en Hg para T< 4K

Gilles Holst

Premio Nobel 1913



Conductividad perfecta

La R muy chicas se miden por métodos inductivos:

- **Métodos resonantes**: A partir de tiempos característicos de circuitos RLC: se midió $\rho < 3.6 \times 10^{-22} \Omega cm$.

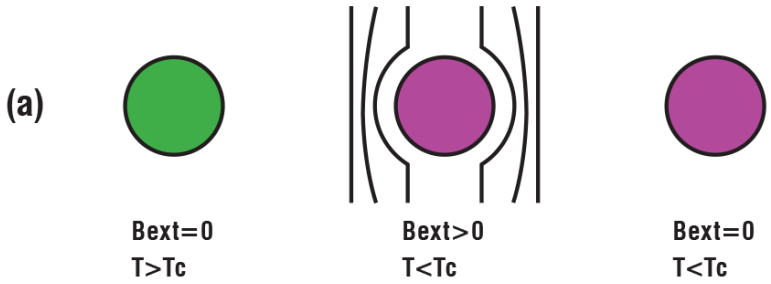
- **Tiempo de decaimiento de corrientes persistentes**: Se mide $d\phi/dt$ del campo B generado por una bobina superconductora. Tiempos característicos mayores que 10^5 años!

R = 0

Conductor perfecto en un campo magnético

En un **conductor** con $\rho = 0$, $\mathbf{E} = 0$; $\mathbf{E} = \rho\,\mathbf{J}$

Si imaginamos un material que se convierte en conductor perfecto por debajo de T_c: $\frac{\partial B}{\partial t} = 0$



Superconductor en un campo magnético

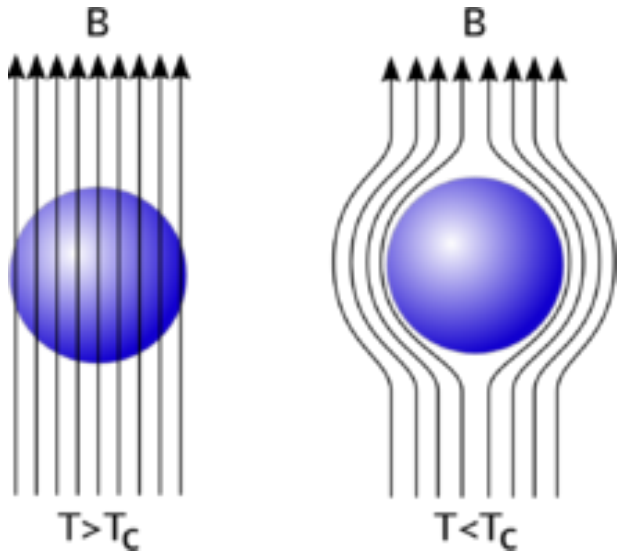
1933

EFECTO MEISSNER- OCHENSFELD

WALTHER MEISSNER

ROBERT OCHSENFELD

Walther Meissner
(1882-1974)



Los superconductores expulsan el campo magnético

Se necesita otra ecuación constitutiva!

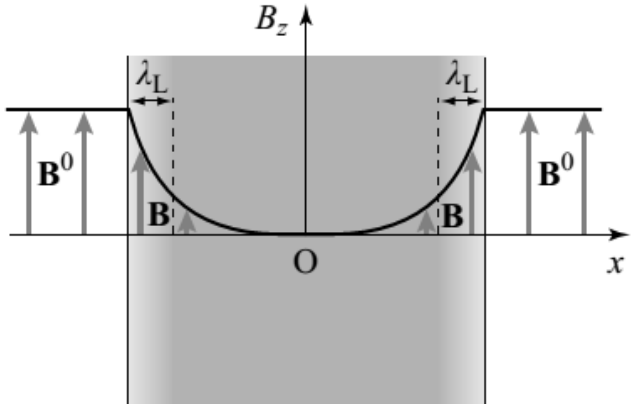
Modelo de London

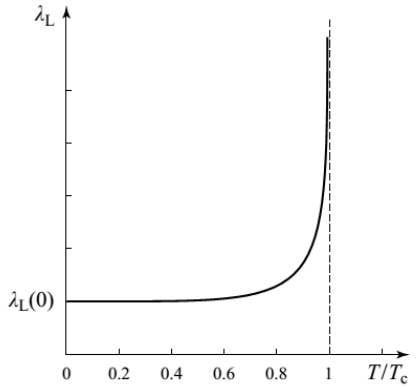
Primer modelo fenomenológico que explica R = 0 y B = 0

$$\boldsymbol{E} = \mu_0 \lambda_L^2 \frac{\partial}{\partial t} \boldsymbol{J}_s \qquad \boldsymbol{J} = -\frac{1}{\mu_0 \lambda_L^2} \mathbf{A}$$

$$\boldsymbol{B} = -\mu_0 \lambda_L^2 \boldsymbol{\nabla} X \boldsymbol{J}_s \qquad \lambda_L^2 = \frac{m}{\mu_0 n e}$$

$$\boldsymbol{\nabla}^2 \mathbf{B} = \frac{\boldsymbol{B}}{\lambda_L^2}$$





1934 Fritz y Heinz London

Modelo de London

Cuantización del fluxoide:

$$\boldsymbol{J} = -\frac{1}{\mu_0 \lambda_L^2}\boldsymbol{A}$$

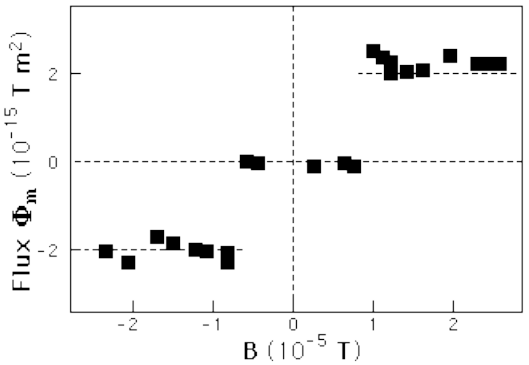
$$\boldsymbol{p} = m\boldsymbol{v} + q\boldsymbol{A}$$

$$\boldsymbol{J} = nq\,\boldsymbol{v}$$

$$\oint \boldsymbol{p}.d\boldsymbol{l} = nh$$

$$\mu_0 \lambda_L^2 \oint \boldsymbol{J}.\boldsymbol{dl} + \phi = n\phi_0$$

$$\phi_0 = h/q$$



Quantized magnetic flux in a superconducting ring.
B. S. Deaver and W. M. Fairbank, Phys. Rev. Lett. 7, 43 (1961).

Electrodinámica no Local

1953 B. Pippard: generaliza electrodinámica no local: ξ

Conductores:

$$\vec{J}(\vec{r}) = \sigma \vec{E}(\vec{r})$$

local

$$\vec{J}(\vec{r}) = -\frac{3\sigma}{4\pi \ell}\int \frac{\vec{R}[\vec{R}\cdot\vec{E}(\vec{r}')]}{R^4} e^{-R/\ell}\, d^3\vec{r}'$$

No local

$$\vec{R} = \vec{r} - \vec{r}'$$

Superconductores

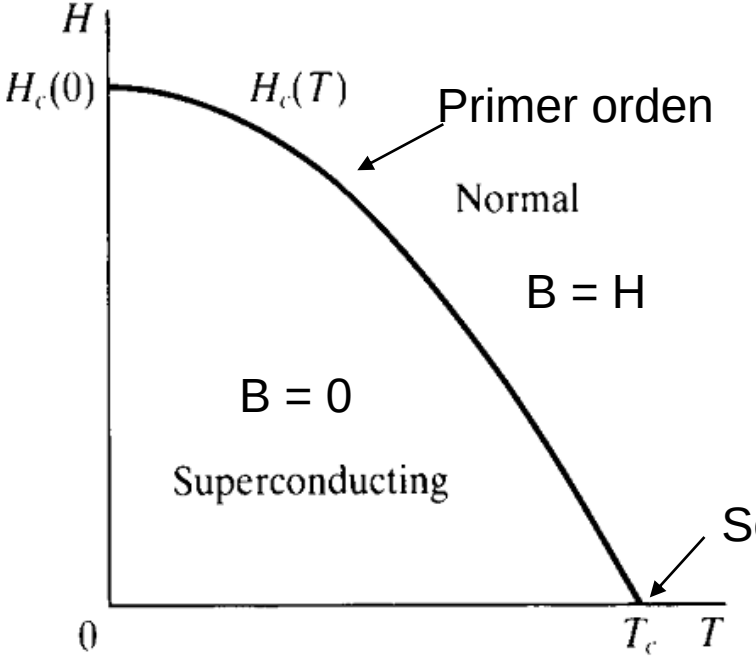
$$\vec{J}(\vec{r}) \propto -\frac{3}{4\pi\xi_0\lambda^2}\int \frac{\vec{R}[\vec{R}\cdot\vec{A}(\vec{r}')]}{R^4} e^{-R/\xi}\, d^3\vec{r}'$$

$$\xi^{-1} = \xi_0^{-1} + \ell^{-1}$$

Nueva escala

Fase superconductora y Campo crítico termodinámico H_c

1934 **Cornelius J. Gorter y H. Casimir: Transición de fase**.
La fase superconductora es estable para campos magnéticos menores que un campo crítico. Si llamamos f_n(T) y f_s(T) a las energía libres de Helmholtz por unidad de volumen del estado normal y superconductor a H = 0 y temperatura T:

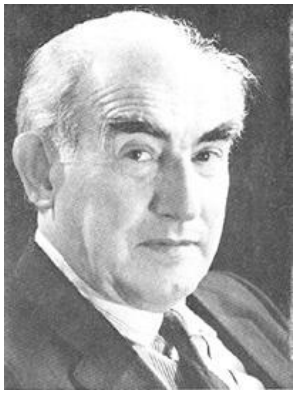


$$\mu_0 H_c^2(T) = f_n(T) - f_s(T)$$

$\Delta f \sim 10^{-6}$ eV por átomo para $H_c \sim 100$ Oe

Superconductores de Tipo I

Teoría fenomenológica de Ginzburg-Landau



Nobel 2003

Nobel 1962

1950 Ginzburg y Landau

Transición de fase

Parámetro de orden complejo $\Psi = |\Psi| e^{i\varphi}$

$|\Psi| \propto n_s$. $\Delta\varphi$ vinculado a J

Energía libre $f_s(\Psi, \mathbf{A}, h)$

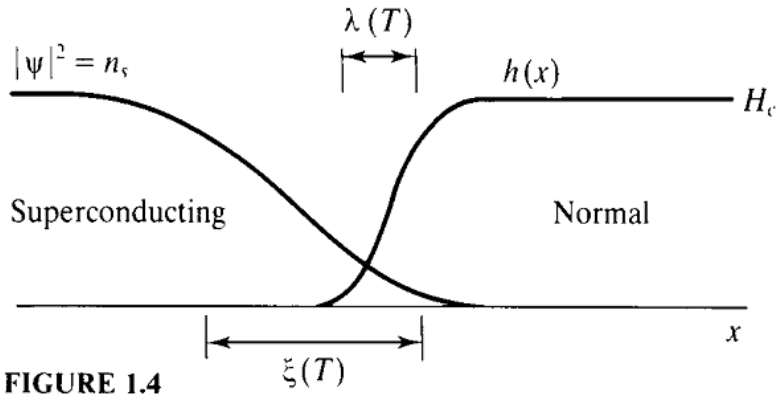
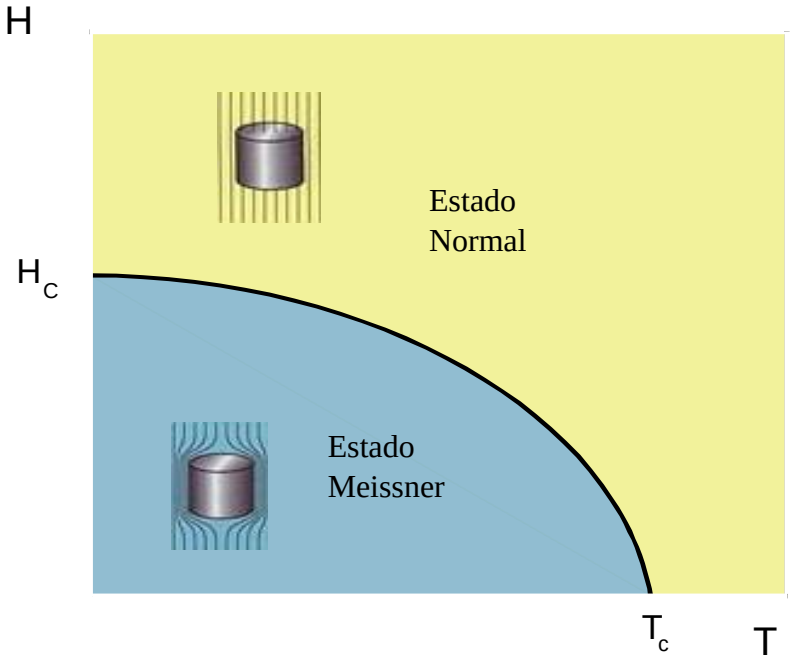


FIGURE 1.4

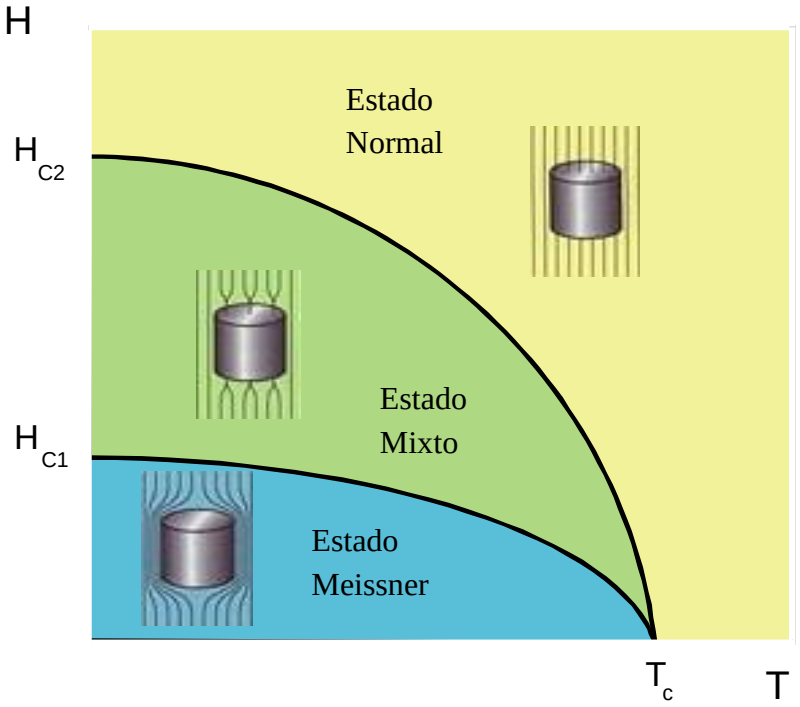
Superconductores de Tipo I y Tipo II: estado mixto



Tipo I

1957 A. Abrikosov

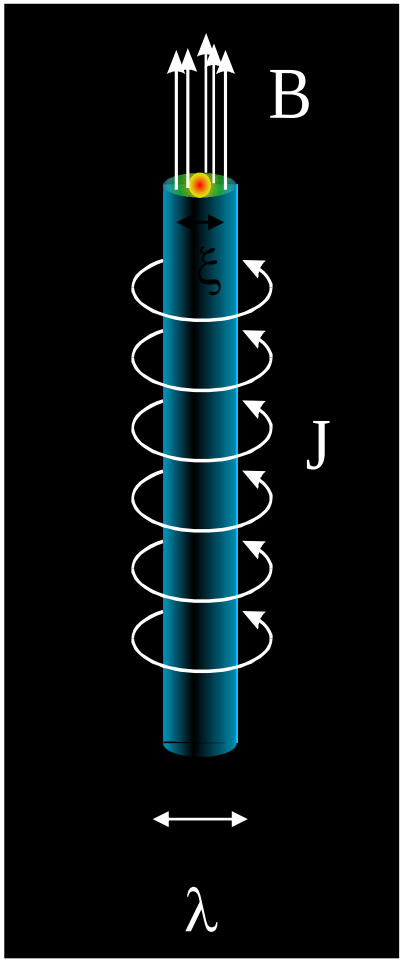
Nobel 2003

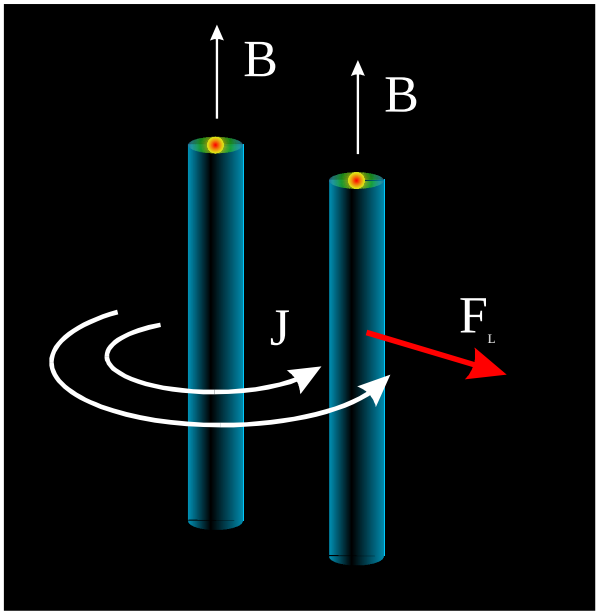


Tipo II

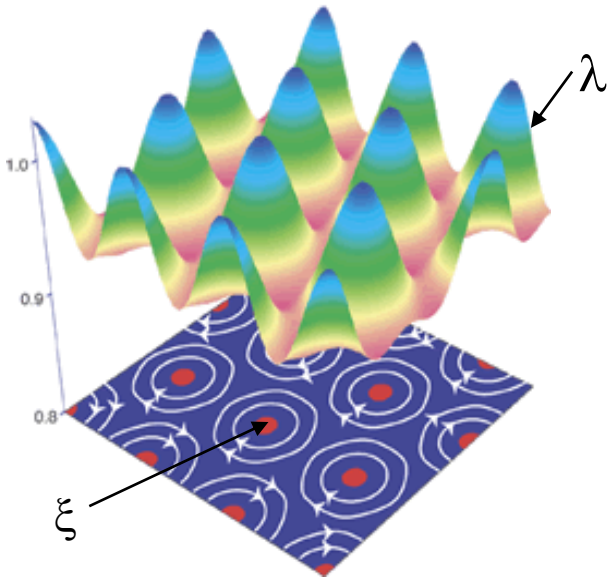
Predice red de vórtices en el estado mixto

Estado mixto: vórtices en superconductores



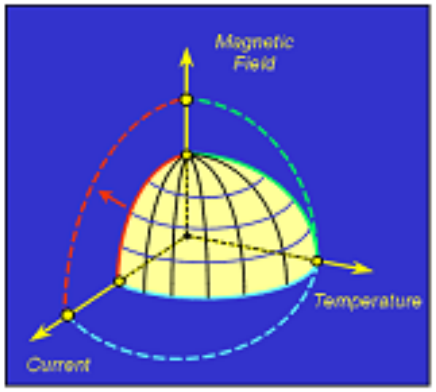


Interacción repulsiva



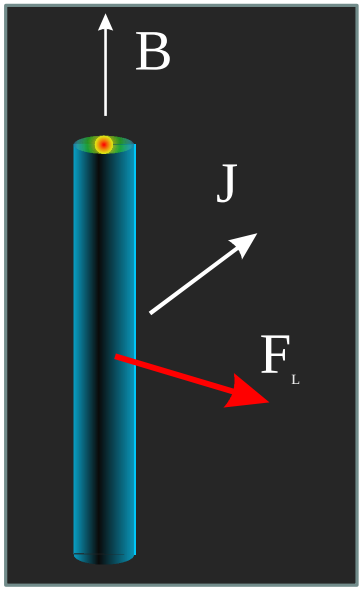
Se organizan en una
Red de vórtices (RV)

Corrientes críticas



La superconductividad puede ser inhibida por:

- Temperatura (T_c)
- Campos magnéticos (H_c (I) o H_{c2} (II))
- Densidad de corriente J_c



En el estado mixto:
$F_L \neq 0$ mueve los vórtices

Si hay defectos,
R = 0 para J < J_C.

Si se mueven

E = - v × B

E || J; J . E ≠ 0

R ≠ 0 !

Teoría microscópica BCS

J. Bardeen, L. Cooper y J. Schrieffer

Nobel 1972

1957 proponen teoría : hay una interacción atractiva efectiva entre los e mediada por los fonones de la red cristalina.

Los e se aparean formado pares de Cooper cuyo estado fundamental es un condensado.

BCS predice un gap finito de energía entre el condensado y los estados exitados (mínima energía para romper un par), que juega un rol fundamental en las propiedades superconductoras.

Predice con éxito los observables experimentales en superconductores “tradicionales”.

Tuneleo de pares de Cooper

B. Josephson

Nobel 1973

1962: Efecto Josepshon: Propone teóricamente el tuneleo de pares de Cooper en una juntura formada por dos superconductores separados por un material no-superconductor (aislante o metálico). Predijo:

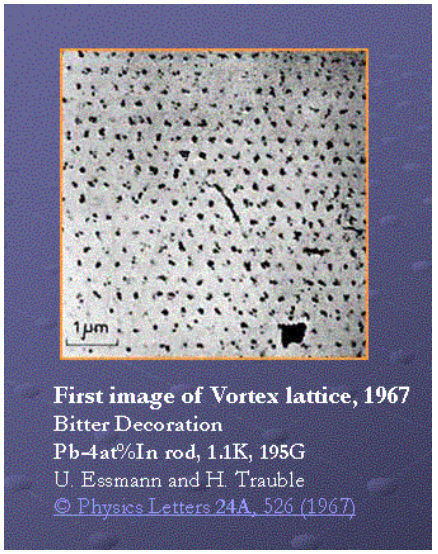
- Sin aplicar diferencia de potencial, puede haber corriente entre los dos superconductores.
- Si se fuerza una diferencia de potencial DC aparece una corriente AC entre los superconductores. Predijo la frecuencia de dicha corriente.

1966 Reflecciones de Andreev: Andreev propone que un electrón puede reflejarse como un hueco en una barrera N/S, creando un par de cooper en el superconductor.

Algunos hechos relevantes desde 1960 hasta 1987

- Se comprobaron experimentalmente todas las predicciones de BCS.
- En 1967 Se comprobaron todas las predicciones del Efecto Josephson DC y AC
- Se pudo medir detalladamente la densidad de energía, el gap. Las excitaciones.
- Se observó en forma directa la red de vórtices.
- Se demostró experimentalmente que los vórtices disipan al moverse :hacen falta defectos para anclarlos.
- Se desarrollaron modelos de dinámica de vórtices, que permitieron describir las propiedades magnéticas y de transporte de los superconductores de Tipo II.

I Giaver Nobel 1973



Superconductores de alta T_c/cupratos

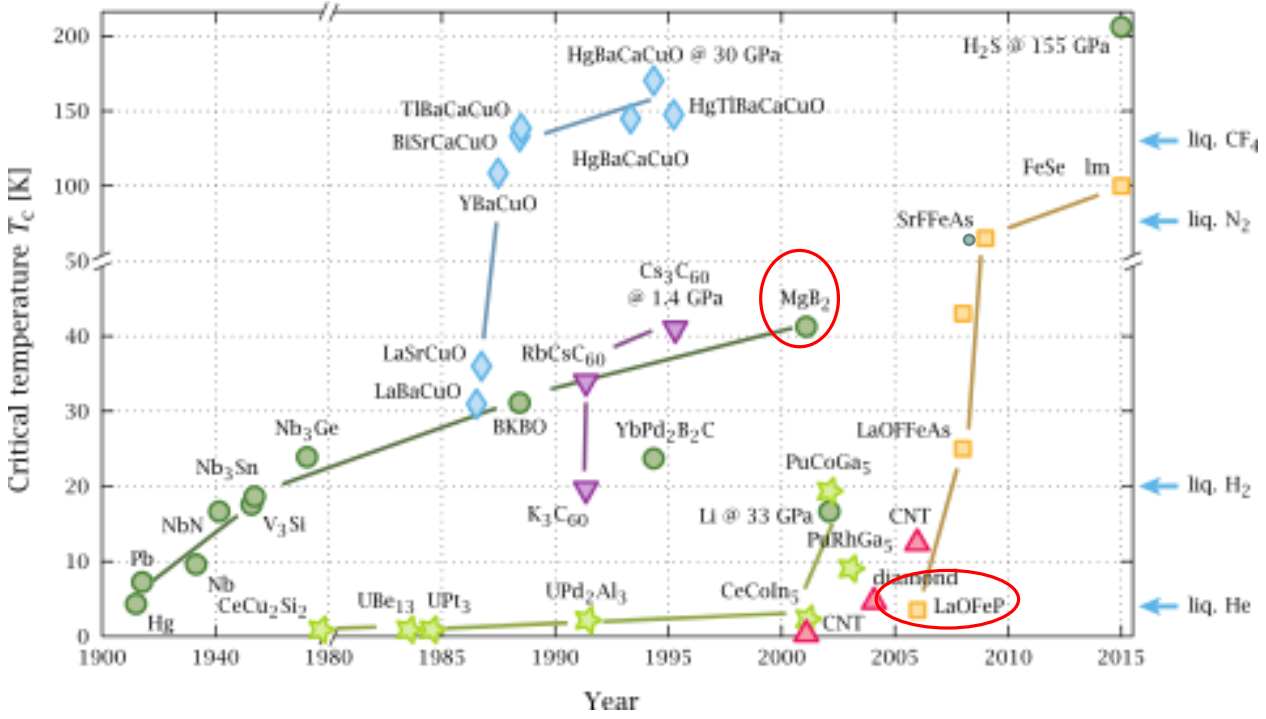
A. Müller y G. Bednorz
Nobel 1987

1986: Descubren superconductividad en familias de perovskitas con planos de CuO con Tc mucho mayores que las predichas por BCS (> 77 K, no hace falta He!)

Revolución en el campo de la superconductividad:

- Se rompe el límite teórico para la Tc
- BCS no explica los resultados experimentales.
- Nuevos desarrollos teóricos y experimentales.
- Nuevas aplicaciones

Muchos más superconductores



MgB_2: Akimitzu y colaboradores

FeAs: Hosono y colaboradores

2001 MgB_2 : superconductor BCS con $T_c \sim 40$ K

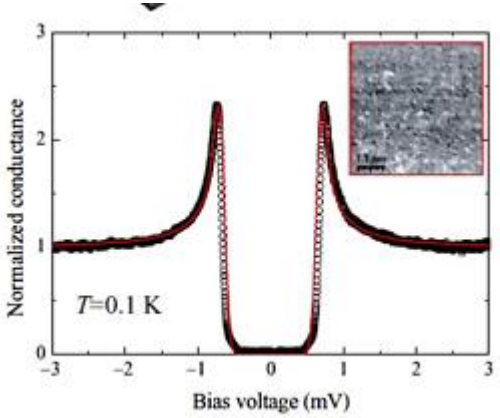
2008 Superconductores basados en Fe

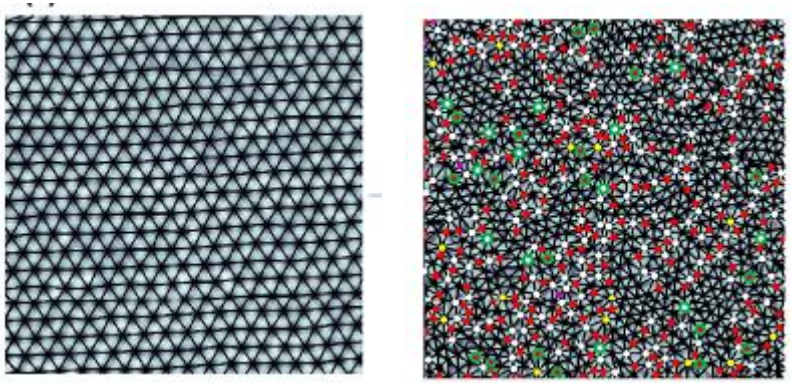
MUCHOS no convencionales: No aplica BCS, sistema electrónico con fuertes correlaciones, acoplamiento con fases magnéticas y/o de orden de carga.

Algunas técnicas experimentales

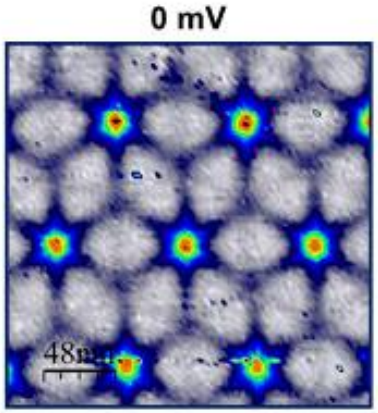
- Técnicas de transporte: V(I). Transición superconductora $\rho(T, \mathbf{H, J})$; J_c
- Magnetización: M(T, H). Mide la diferencia entre B y B_0 (estado Meissner, estado mixto, J_c, y mucho más)
- Susceptibilidad alterna: χ_{ac} (T, H). Permite medir procesos dinámicos de variación de flujo magnéticos y resistividades menores que las técnicas de transporte.
- Espectroscopía (XPS): Espectro, niveles de energía, excitaciones.

Algunas técnicas experimentales



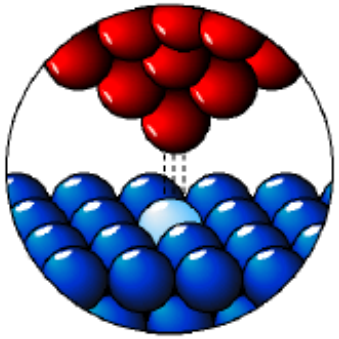


S. Ganguli et al., 2014



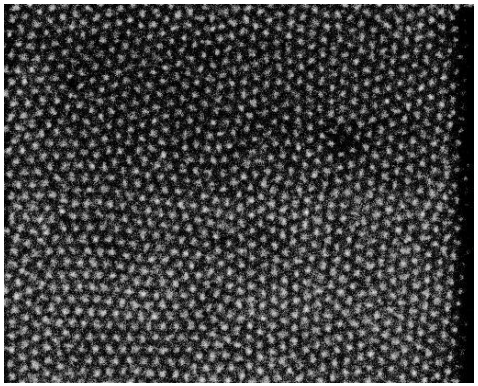
H. Suderow et al. Review 2014

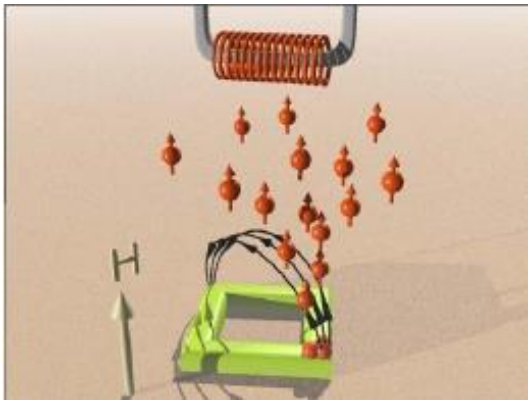
Con STM y STS se mide una corriente proporcional a la densidad de estados electrónicos. Eso permite medir el gap, las excitaciones, y las variaciones de n_s. Se puede “ver” la RV



Algunas técnicas experimentales

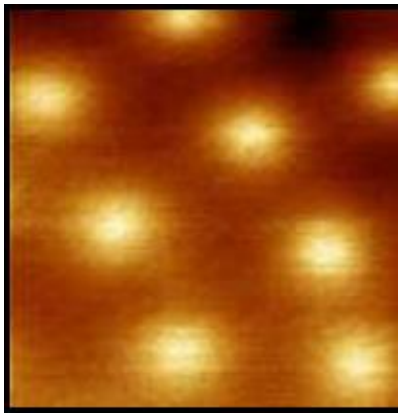
Decoración magnética

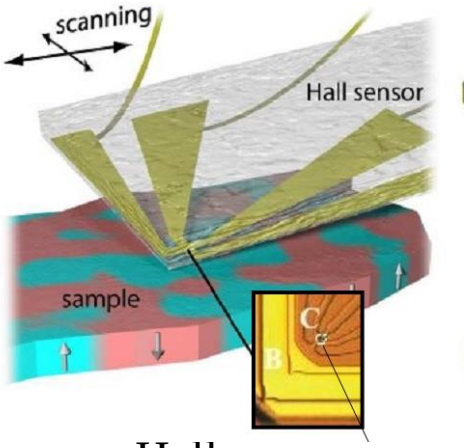




Decoración en $NbSe_2$, CAB

SHM

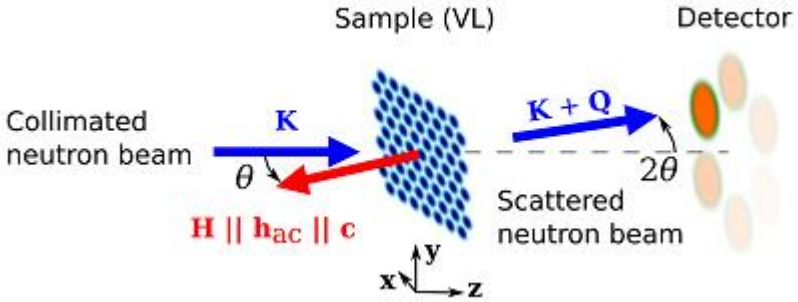


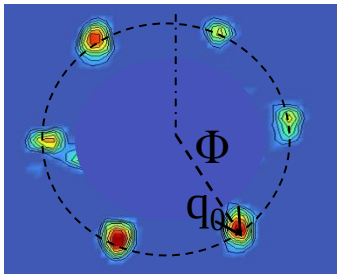


Micro sensores Hall

La RV también se puede “ver” midiendo la modulación espacial del campo magnético

Algunas técnicas experimentales

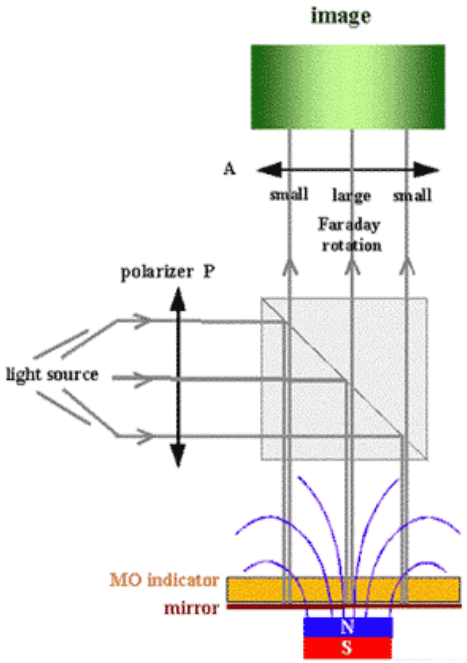


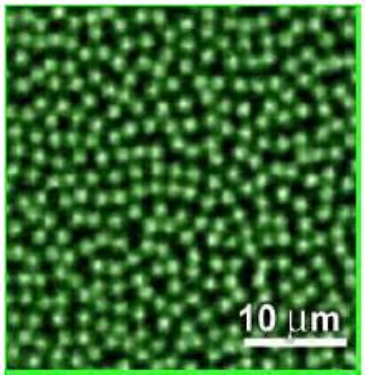


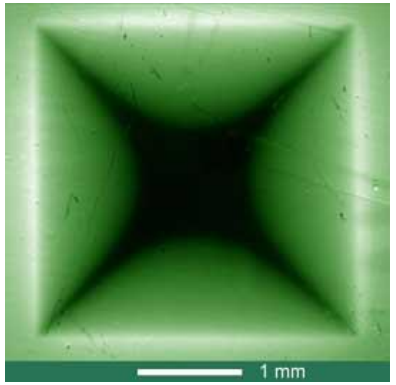
M. Marziali et al., PRL 2015

La RV también se puede “ver” mirando la modulación del campo en el espacio recíproco, con difracción de neutrones de bajo ángulo (SANS)

Algunas técnicas experimentales



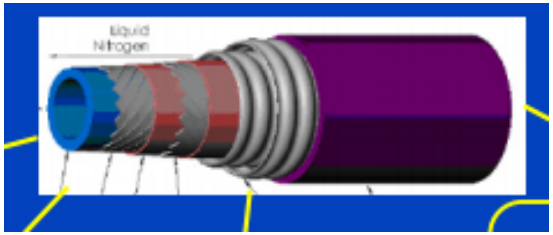




Imágenes tomadas por el grupo de I Johansen, Universidad de Oslo

Las técnicas magneto ópticas permiten ver la dinámica del flujo magnético a distintas escalas.

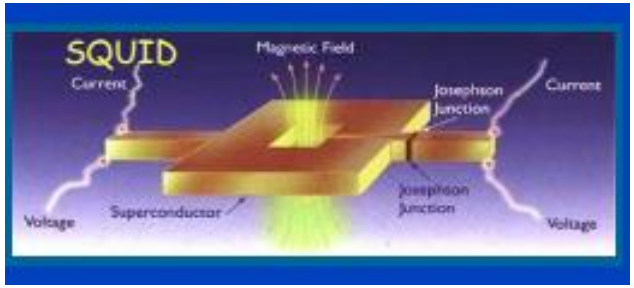
Aplicaciones

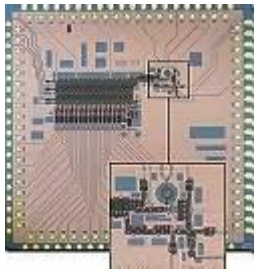


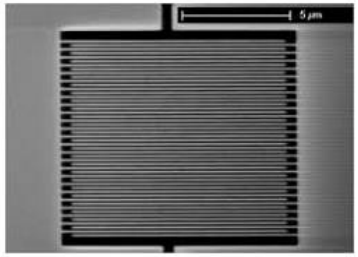
Cables de SAT para altas corrientes

Altos H: IMR y otras aplicaciones

Altos H en investigación: LHC

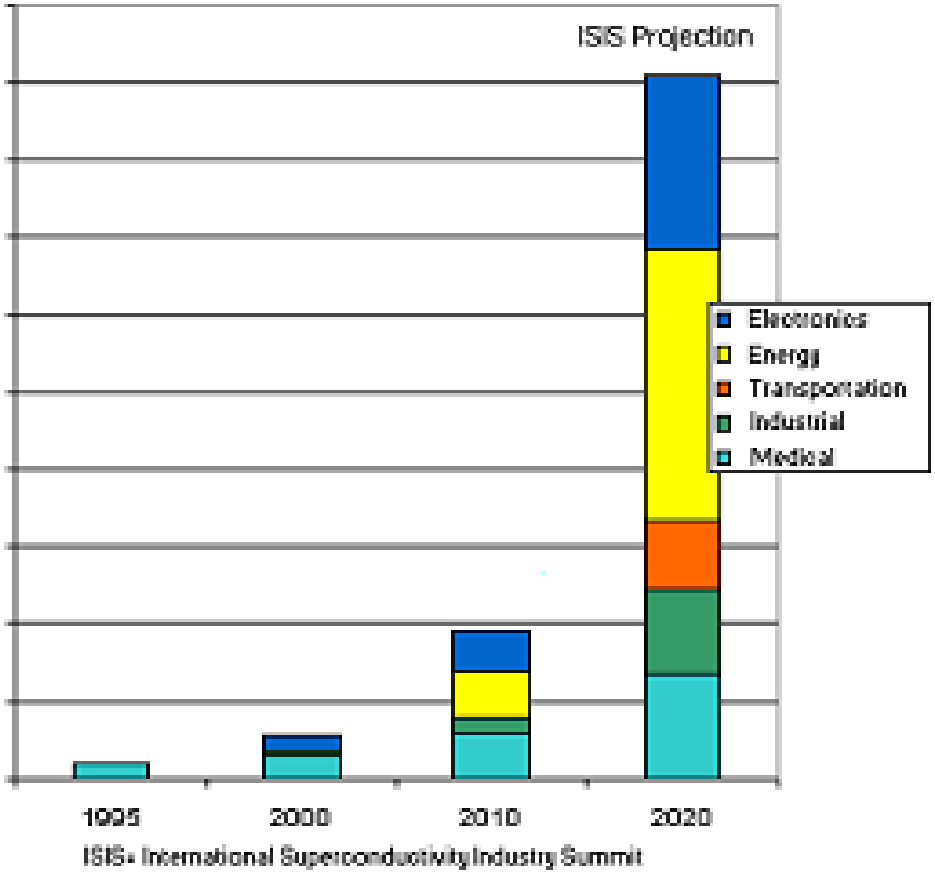






Junturas Joshepson: medición de campos magnéticos; circuitos integrados. Detectores de fotones. Computación cuántica (Qbits).

Aplicaciones



Programa y cronograma tentativo

Fecha		
17/8	Reunión preliminar	
24/8	Introducción/reseña histórica	
25/8	Resistividad en conductores. Efecto pelicular. Conductores perfectos.	Guia 1
31/8	Campo magnético en conductores. Magnetización y susceptibilidad. Factor demagnetizante. Conductores y Superconductores. Estado Meissner.	Guia 1
1/9	Modelo de London. Longitud de penetración. Ejemplos de cálculos para algunas geometrías. Modelo de dos fluidos.	Guia 2
7/9	Momento de London. Gauge de London. Cuantización del Fluxoide.	Guia 2
8/9	Fase superconductora. Planteo termodinámico. Campo crítico Hc.	Guia 3
14/9	Estado intermedio. Ejemplos de geometrías. Corriente crítica.	Guia 3
15/9	Electrodinámica no local. Longitud de Pippard. Energía de pared normal/superconductor.	Guia 3
21/9	Modelo Fenomenológico de GL: energía libre. Ecuaciones de GL. Longitud de Coherencia. Experimento de Little y Parks.	Guia 3
22/9	Energía de pared a partir de GL. Superconductores de Tipo I y Tipo II. Estado mixto y campos críticos H_{c1} y H_{c2}.	Guia 4
28/9	AFA	
29/9		
5/10	Ecuaciones de GL linealizadas: cálculo de H_{c2} y Red de vórtices (RV)	Guia 4
6/10	Energía de 1 vórtice; cálculo de H_{c1}. Interacción entre vórtices. Magnetización de equilibrio.	Guia 4

12/10	Dinámica de vórtices. Corriente crítica.	Guia 4
13/10	Regímenes dinámicos y respuesta magnética.	Guia 5
19/10	Fases de vórtices.	Guia 5
20/10	ENTREGA DE PROBLEMAS Y EXPOSICIÓN. Descripción de experimentos a realizar.	
26/10	EXPERIMENTOS	
27/10		
2/11	Teoría BCS	Discusión de resultados experimentales
3/11	Tuneleo de pares. Efecto Josephson	Discusión de resultados experimentales
9/11	Experimentos de tuneleo. Superconductores no convencionales.	
10/11	ENTREGA DE INFORMES Y CHARLAS	
16	SQUID	Entrega y discusión de informes
17	Superconductores de alta temperatura crítica.	Discusion de posibles temas para monografia
23	Superconductores basados en Fe.	Distribucion de temas monografía.
24	Temas extra/ colchon	Consultas, discusión sobre temas monografias
30	Temas extra/ colchon	Consultas, discusión sobre temas monografias
1	Charla estudiantes de doctorado	