

Introducción

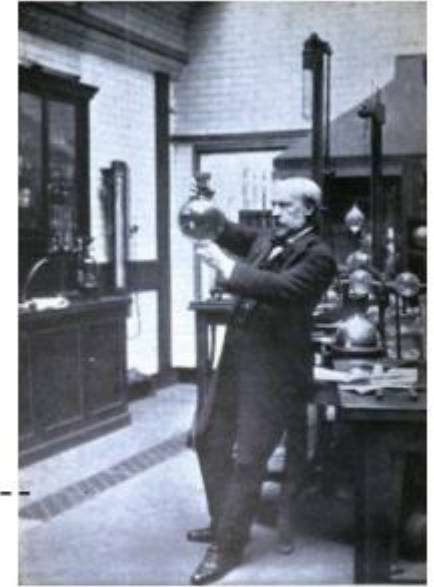
Breve resumen de la larga historia de la Superconductividad

Gabriela Pasquini

DF, FCEN, UBA

Los principios de la criogenia

- 1908 Kammerling Onnes licua He $T_m = 4.2$ K

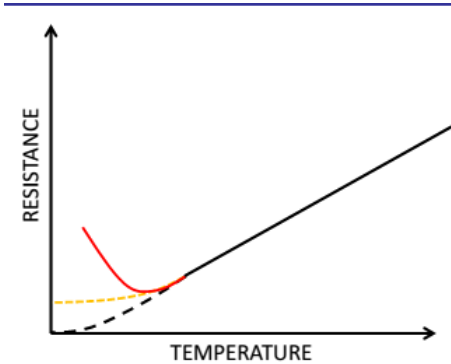


James Dewar

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 ?



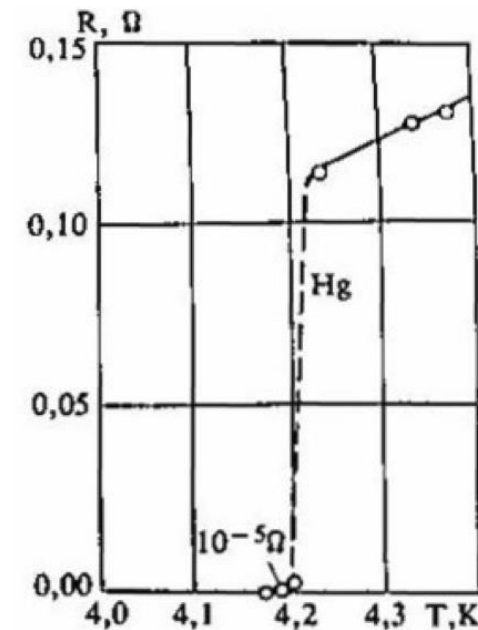
- 1911 : Descubre conductividad perfecta en Hg para $T < 4K$



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 $\rho < 3.6 \times 10^{-22} \Omega \text{cm}$.
- **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!

$$R = 0$$

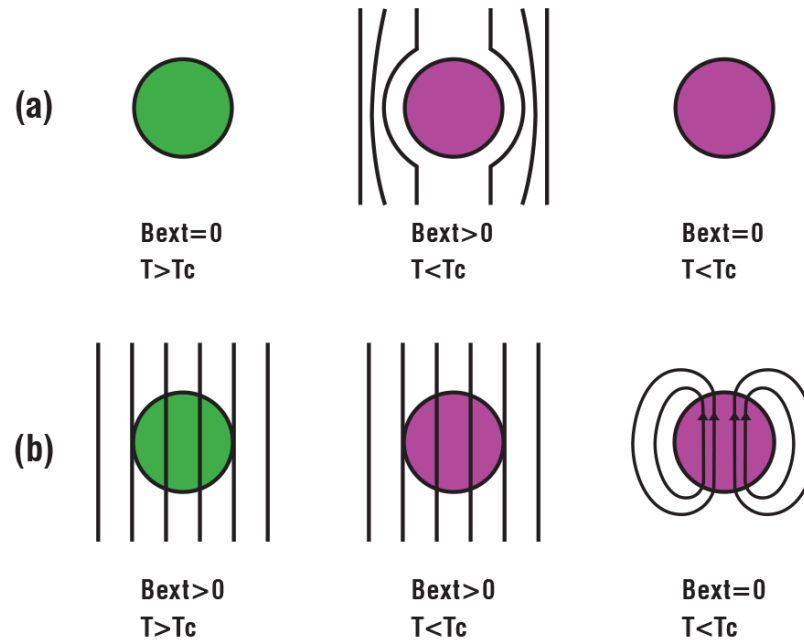
Conductor perfecto en un campo magnético

En un conductor en un campo magnético B : $E = \rho J$

Un material que se convierte en conductor perfecto ($\rho = 0$) por debajo de T_c :

$$E = 0 \Rightarrow \frac{\partial B}{\partial t} = 0$$

Conductor Perfecto



Superconductor en un campo magnético

1933

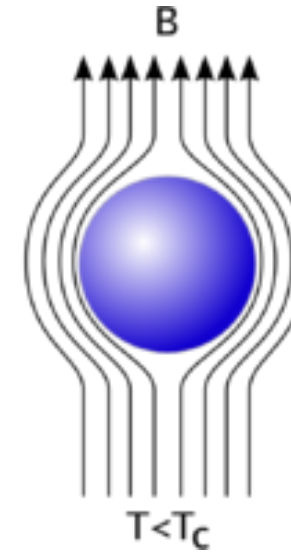
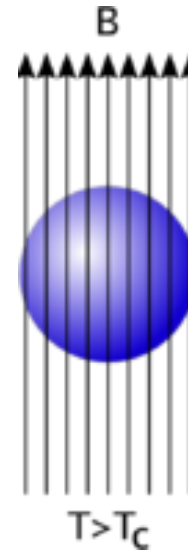
EFEECTO MEISSNER- OCHENSFELD

WALTHER MEISSNER



Walther Meissner
(1882-1974)

ROBERT OCHSENFELD



Los superconductores expulsan el campo magnético

Se necesita otra ecuación constitutiva!

Modelo de London

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

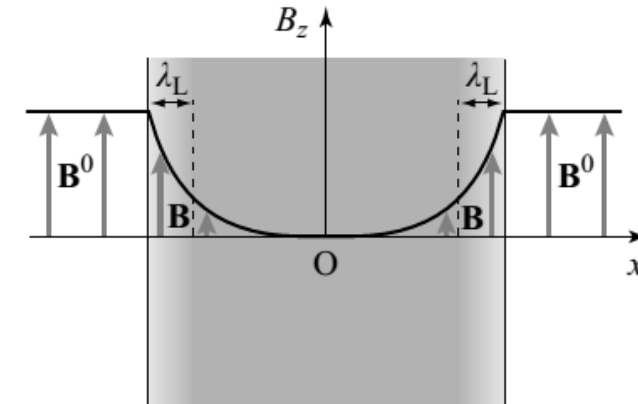
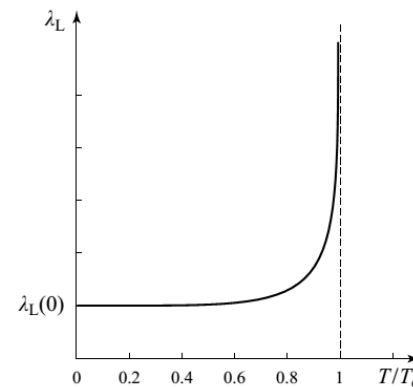


1934 Fritz y Heinz London

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

$$\mathbf{B} = -\mu_0 \lambda_L^2 \nabla \chi \quad \lambda_L^2 = \frac{m}{\mu_0 n e^2}$$

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



Modelo de London

Cuantización del fluxoide:

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

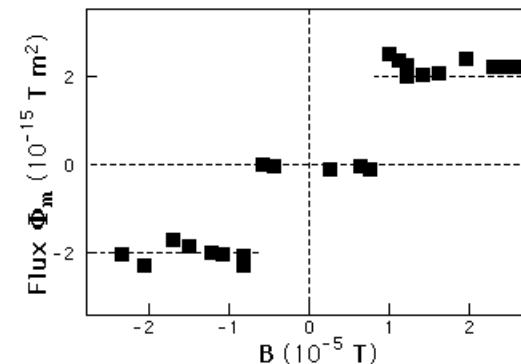
$$\mathbf{P} = m\mathbf{v} + q\mathbf{A}$$

$$\mathbf{J} = nq\mathbf{v}$$

$$\oint \mathbf{P} \cdot d\mathbf{l} = nh$$

$$\mu_0 \lambda_L^2 \oint \mathbf{J} \cdot d\mathbf{l} + \phi = n\phi_0$$

$$\phi_0 = h/q$$



$$q = -2e$$

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

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

No local

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

Superconductores

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

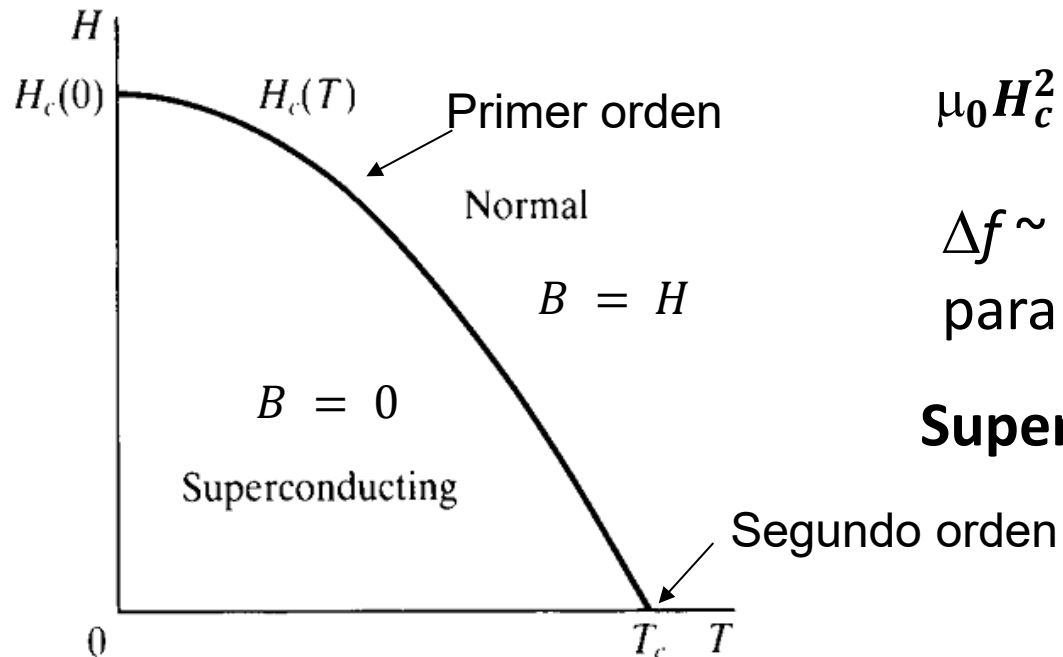
$$\xi^{-1} = \xi_0^{-1} + \ell^{-1}$$

Nueva escala

Fase superconductor y Campo crítico termodinámico H_c

1934 **Cornelius J. Gorter y H. Casimir: Transición de fase.**

La fase superconductor es estable para campos magnéticos menores que un campo crítico. Si llamamos $f_n(T)$ y $f_s(T)$ a las energías libres de Helmholtz por unidad de volumen del estado normal y superconductor a $H = 0$ y temperatura T :



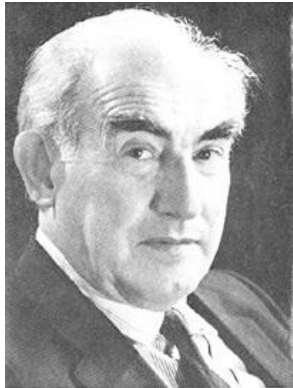
$$\mu_0 H_c^2(T) = f_n(T) - f_s(T)$$

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

Superconductores de Tipo 1

Condiciones de contorno:
Estado mixto

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

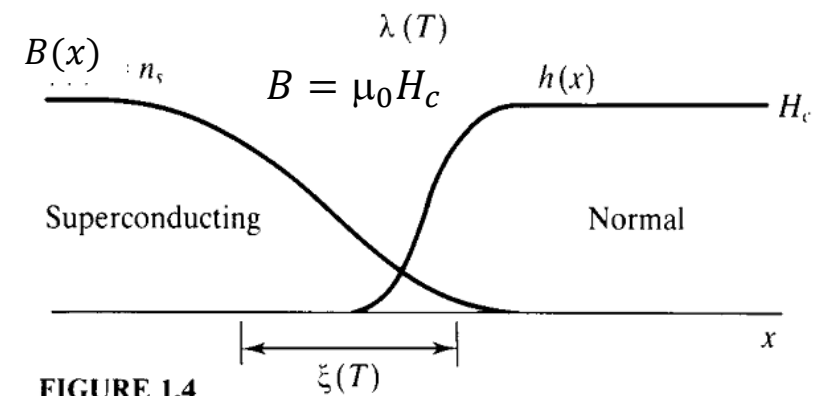
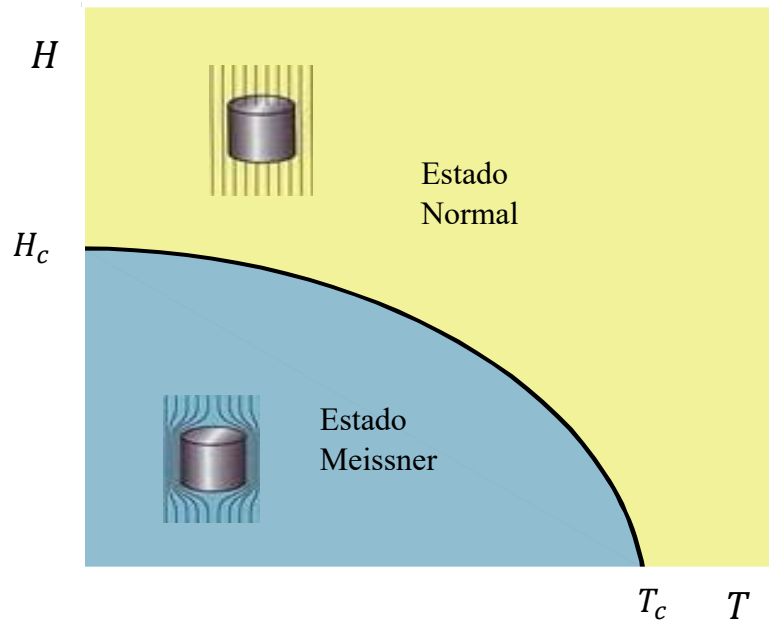


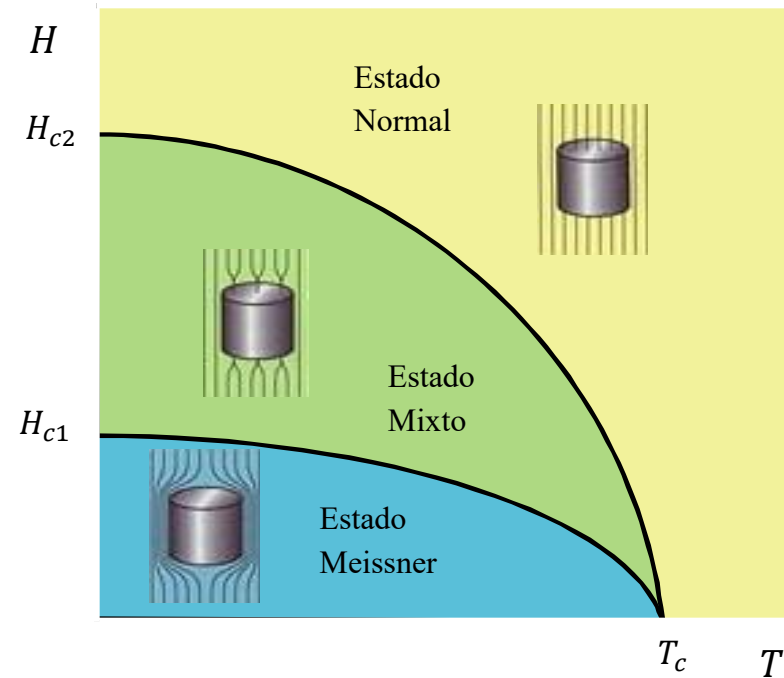
FIGURE 1.4

Superconductores de Tipo I y Tipo II: estado mixto



Tipo I

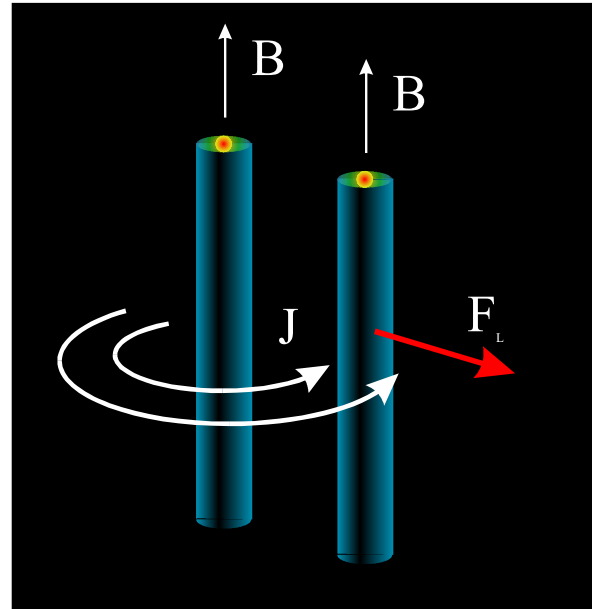
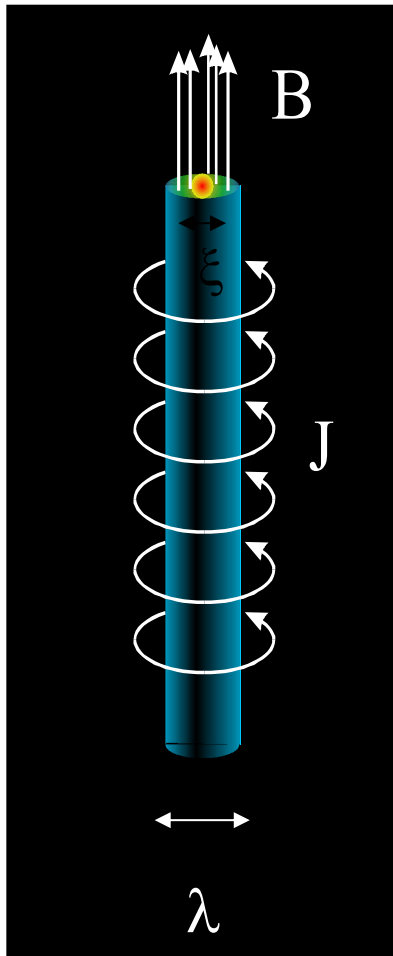
1957 A. Abrikosov
Nobel 2003



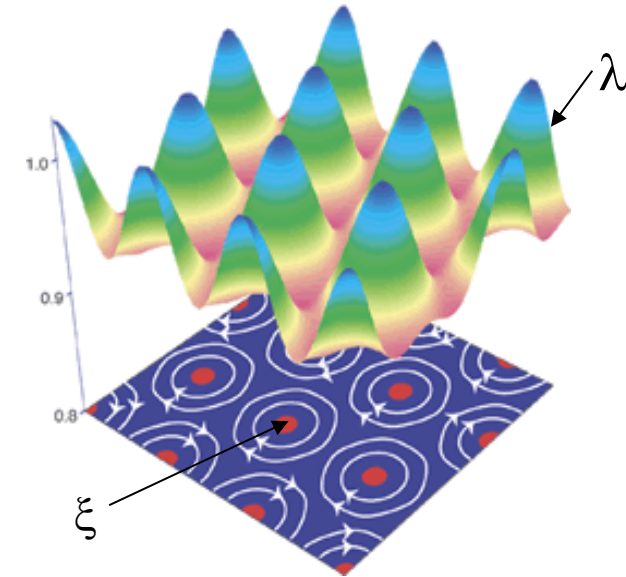
Tipo II

Predice red de vórtices
en el estado mixto

Estado mixto: vórtices en superconductores

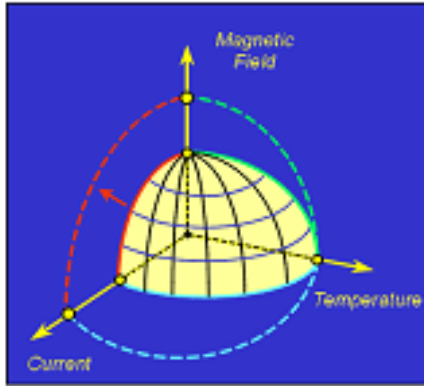


Interacción repulsiva



Se organizan en una Red de vórtices (RV)

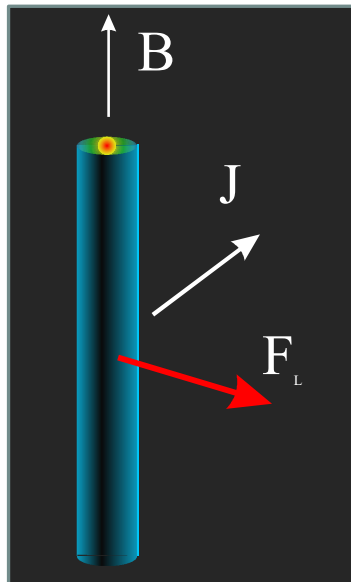
Corrientes críticas



La superconductividad puede ser inhibida por:

- Temperatura (T_c)
- Campos magnéticos (H_c (TI) o H_{c2} (TII))
- Densidad de corriente de desapareo J_{c0}

Aún en el estado superconductor se puede perder la propiedad de disipación nula:



En el estado mixto:

$F_L \neq 0$ mueve los vórtices

Si se mueven

$$E = -v \times B$$

$$E \parallel J; J \cdot E \neq 0$$

$$R \neq 0!$$

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

Teoría microscópica BCS



J. Bardeen, L. Cooper
y J. Schrieffer

Nobel 1972

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

Los electrones se aparean formando pares de Cooper cuyo estado fundamental es un condensado.

BCS predice un gap finito de energía entre el condensado y los estados excitados, que juega un rol fundamental en las propiedades superconductoras.

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

Tuneleo de pares de Cooper



B. Josephson

Nobel 1973

1962: Efecto Josephson: 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.

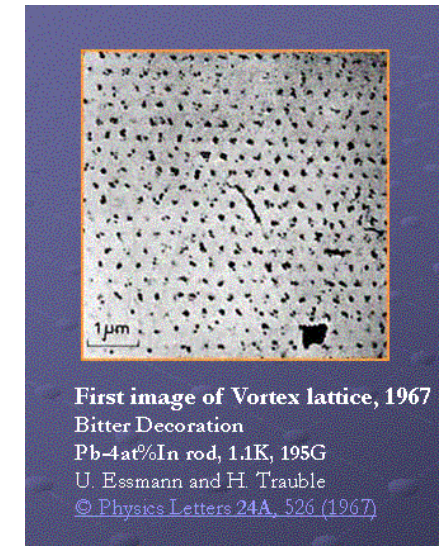
1966 Reflecciones de Andreev: Andreev propone que un electrón puede reflejarse como un hueco en una barrera N/S, creando un par de cooper en el superconductor.

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 T_c 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 T_c
- BCS no explica los resultados experimentales.
- Nuevos desarrollos teóricos y experimentales.
- Nuevas aplicaciones

Muchos más superconductores

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

MgB_2 : Akimitsu y colaboradores

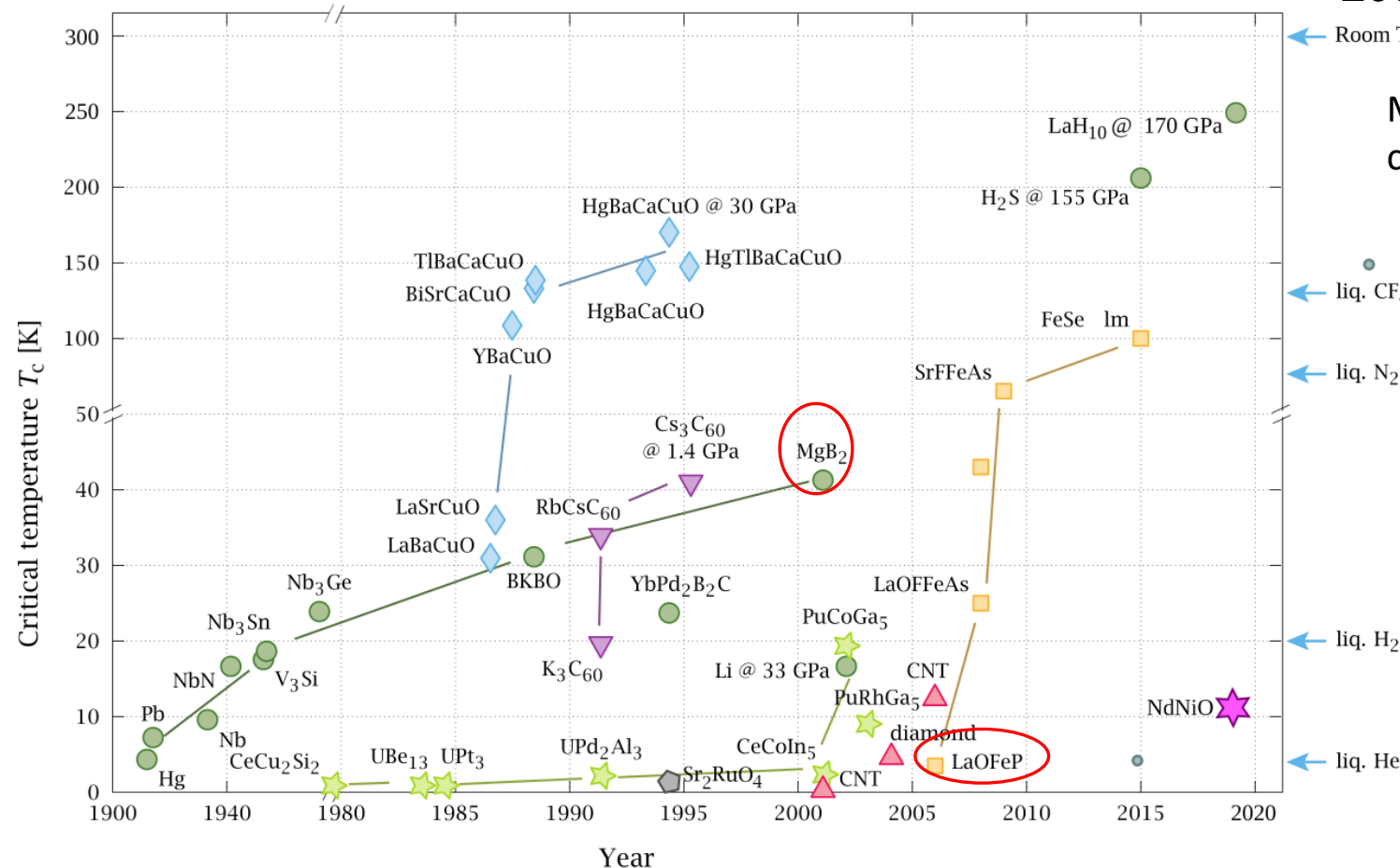


2008 Superconductores basados en Fe

FeSC: Hosono y colaboradores



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



Timeline of superconducting materials. Colors represent different classes of materials: ■ BCS (dark green circle) ■ Heavy fermion-based (light green star) ■ Cuprate (blue diamond) ■ Buckminsterfullerene-based (purple inverted triangle) ■ Carbon-allotrope (red triangle) ■ Iron-pnictogen-based (orange square) ■ Strontium ruthenate (grey pentagon) ■ Nickel-based (pink six-point star) *NdNiO should read $\text{Sr}_{0.2}\text{Nd}_{0.8}\text{NiO}_2$ ^[8]

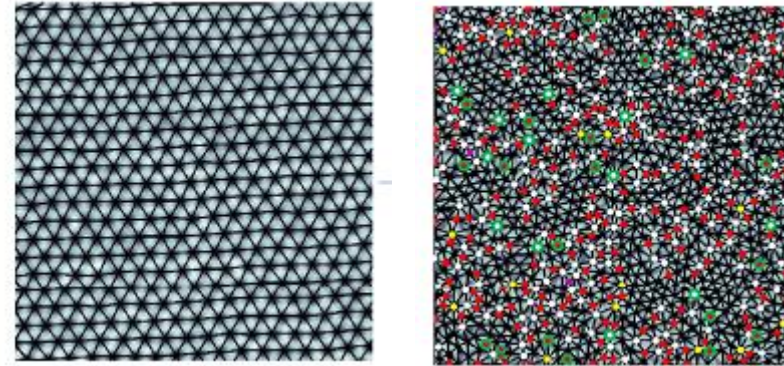
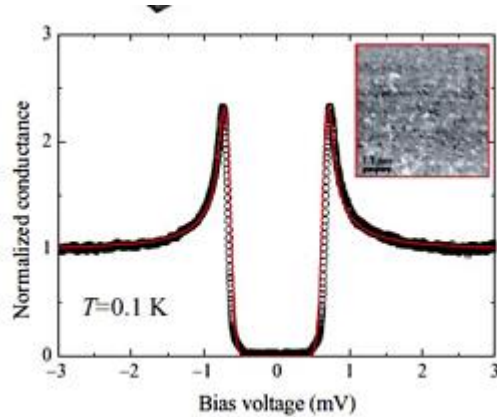
Algunas técnicas experimentales

Propiedades globales

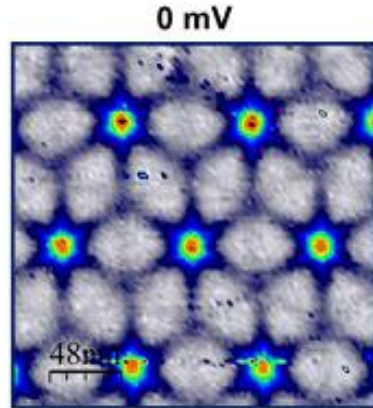
- Técnicas de transporte: se mide la caída de voltaje al aplicar corriente $V(I)$: Transición superconductora; $\rho(T, \mathbf{H})$; $\mathbf{E}(J)$; $J_c(T, \mathbf{H})$
- Magnetización: se mide el momento magnético asociado a las corrientes que apantallan el campo magnético, al que se asocia una magnetización por unidad de volumen $M(T, H)$. Da info sobre estado Meissner, estado mixto, J_c , y mucho más...
- Susceptibilidad alterna: $\chi_{ac}(T, H)$. Permite medir procesos dinámicos de variación de flujo magnéticos y también medir resistividades menores que las accesibles con técnicas de transporte.
- Espectroscopías: Permiten acceder espectro de energías, al gap superconductor y sus excitaciones.

Algunas técnicas experimentales

Propiedades locales

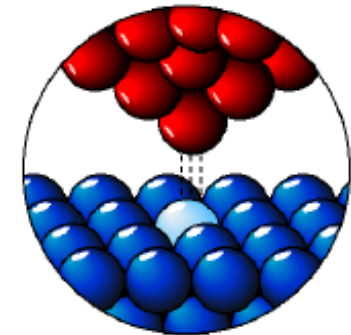


S. Ganguli et al., 2014



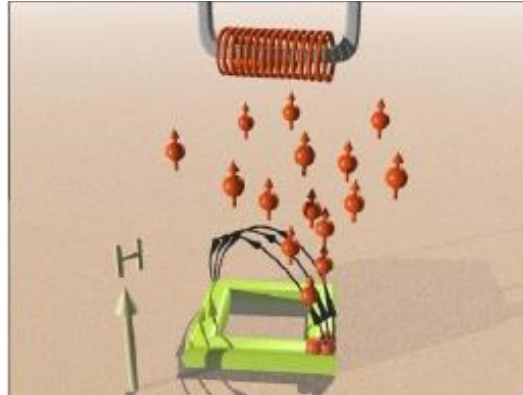
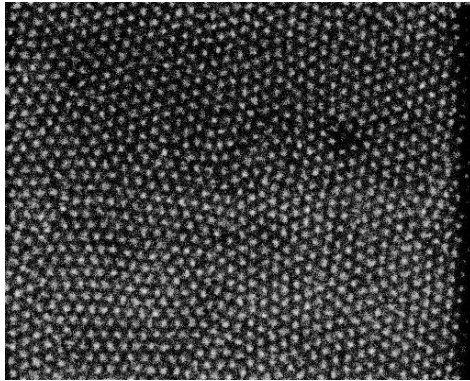
H. Suderow et al. Review 2014

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 . En cada posición. Se puede “ver” la RV



Algunas técnicas experimentales

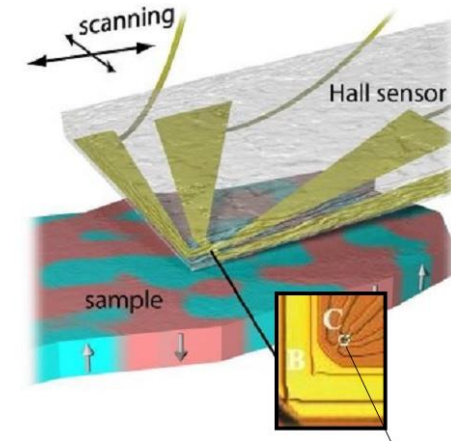
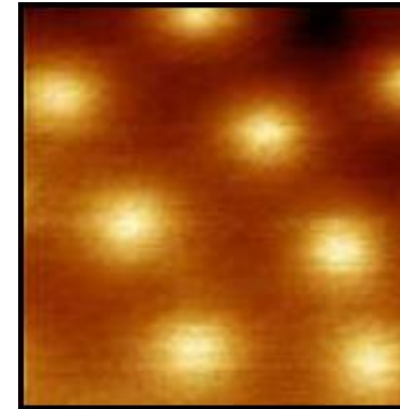
Decoración magnética



Decoración en NbSe₂, CAB

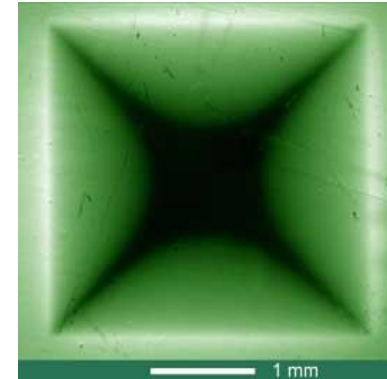
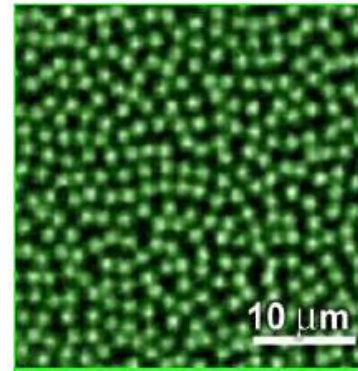
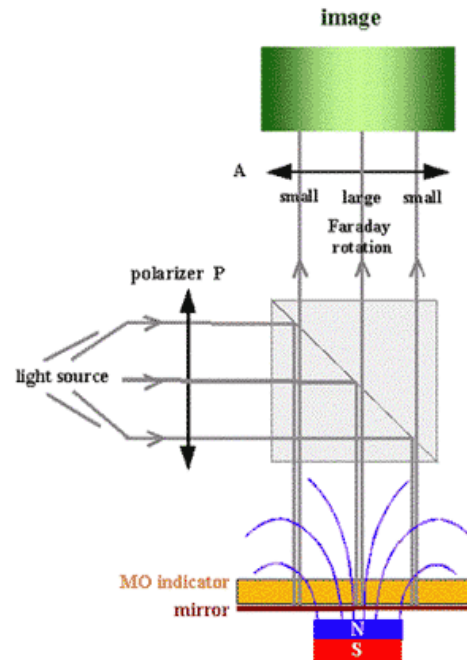
La RV también se puede “ver” midiendo la modulación espacial del campo magnético

SHM



Micro sensores Hall

Algunas técnicas experimentales

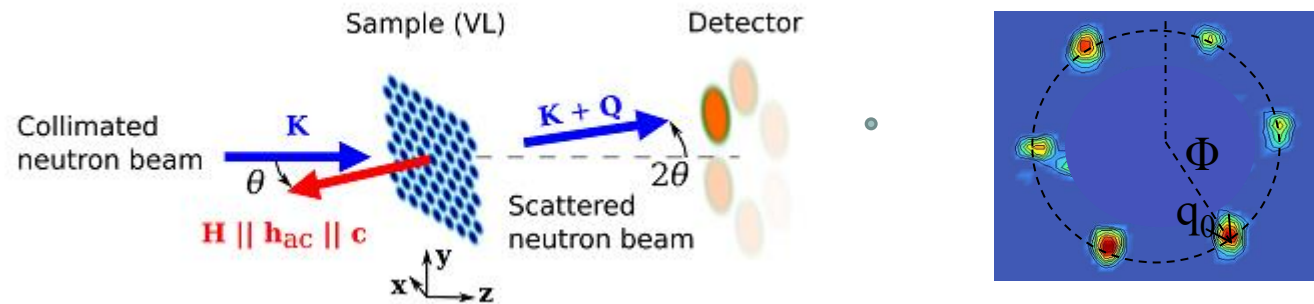


Imágenes tomadas por el grupo de I Johansen, Universidad de Oslo

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



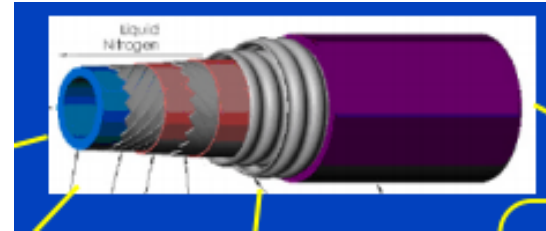
Algunas técnicas experimentales



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)

Aplicaciones

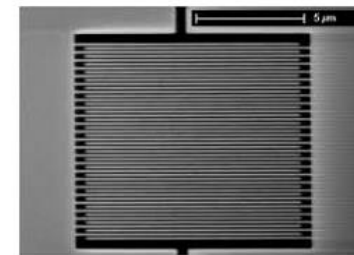
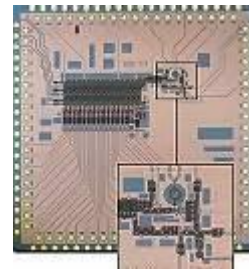
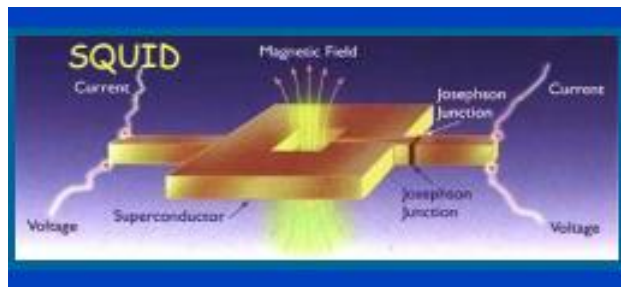


Cables de SAT para altas corrientes



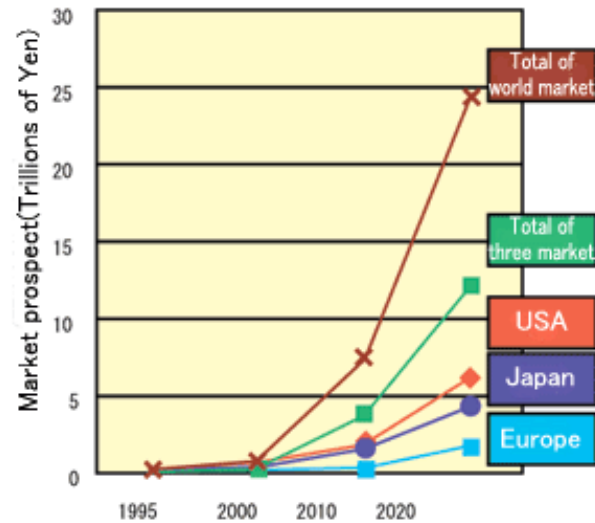
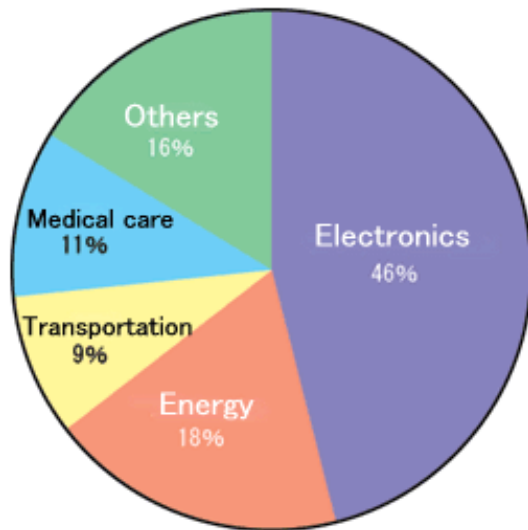
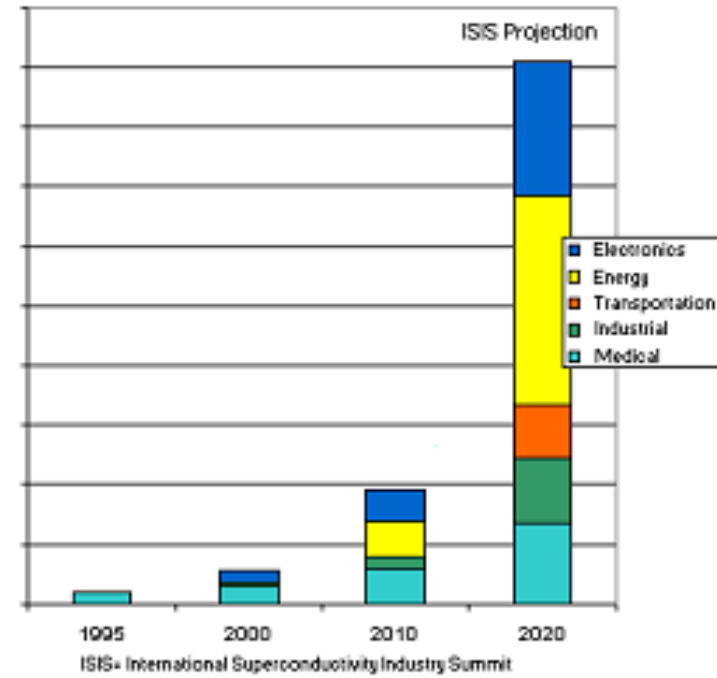
Altos campos en investigación: LHC

Altos campos: IMR y otras aplicaciones



Juntas Josephson: medición de campos magnéticos (SQUID); Medición patrón de voltaje (JJ AC). Circuitos lógicos integrados. Detectores de fotones. Computación cuántica (Qbits).

Aplicaciones



Cronograma tentativo

Fecha			
Ma 17/3	PARO DOCENTE		
Ju 19/3	PARO DOCENTE		
Ma 24/3	FERIADO		
Ju 26/3	Presentación de materia. Introducción/reseña histórica		
	Resistividad en conductores. Efecto pelicular. Campo magnético en conductores. Magnetización y susceptibilidad. Guia 1		
Ma 31/3	Conductores perfectos. Conductores y Superconductores. Estado Meissner. Factor demagnetizante.	Guia 1	
Ju 2/4	FERIADO		
Ma 7/4	Modelo de London. Longitud de penetración. Ejemplos de cálculos para algunas geometrías. Modelo de dos fluidos.	Guia 1 y 2	
Ju 9/4	Momento de London. Gauge de London. Cuantización del Fluxoide.	Guia 2	Entrega guía 1
Ma 14/4	Fase superconductor. Planteo termodinámico. Campo crítico H_c .	Guia 2	
Ju 16/4	Termodinámica. Estado intermedio. Ejemplos de geometrías. Corriente crítica.	Guia 3	
Ma 21/4	Electrodinámica no local. Longitud de Pippard. Energía de pared normal/superconductor.	Guia 3	
Ju 23/4	Modelo Fenomenológico de GL: energía libre. Ecuaciones de GL. Longitud de Coherencia. Experimento de Little y Parks.	Guia 3	Entrega guía 2
Ma 28/4	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 3	

Jue 30/4	Ecuaciones de GL linealizadas: cálculo de H_{c2} y Red de vórtices (RV)	Guia 4	
Ma 5/5	Energía de 1 vórtice; cálculo de H_{c1} . Interacción entre vórtices. Magnetización de equilibrio.	Guia 4	
Ju 7/5	Dinámica de vórtices. Corriente crítica.	Guia 4	Entrega guía 3
Ma 12/5	Regímenes dinámicos y respuesta magnética.	Guia 4	
Ju 14/5	Regímenes dinámicos y respuesta magnética.	Guia 5	
Ma 19/5	Fases de vortices	Guia 5	
Ju 21/5	ACTIVIDAD EXPERIMENTAL		Entrega guía 4
Ma 26/5	ACTIVIDAD EXPERIMENTAL		
Ju 28/5	Teoría BCS		Discusión de datos
			experimentales – Guia 5
Ma 2/6	Resultados BCS- GAP- Experimentos de tuneleo. STM	Discusión de datos experimentales	
Ju 4/6	CHARLAS DE RESULTADOS EXPERIMENTALES	Entrega informes experimentales	
Ma 9/6	Tuneleo de pares. Efecto Josephson		Entrega guía 5
Ju 11/6	SQUID y saltos de Shapiro		
Ma 16/6	Temas actuales Experimento Nobel. Qbits superconductores.		
Ju 18/6	PRESENTACION DE PROBLEMAS DE ALUMNOS		
Ma 23/6	Temas actuales Superconductores no convencionales. Discusión temas monografías posgrado		Entrega guía 6
Ju 25/6	Temas actuales: Superconductores topológicos. Otros		
Ma 30/6			
Ju 2/7			