

# **Breve resumen de la larga historia de la Superconductividad**

**Gabriela Pasquini**

**DF, UBA**

# Los principios de la criogenia

- 1908 Kammerling Onnes licua He  $T_m = 4.2 \text{ K}$



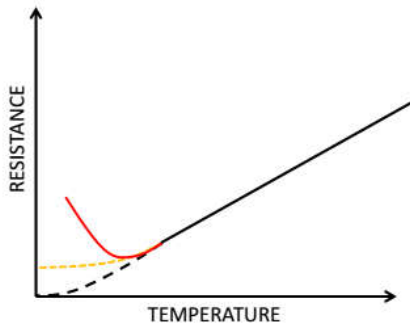
James Dewar

**H<sub>2</sub>: 20.4K**

**(N: 77 K, O<sub>2</sub>: 90.15 K)**

# Conductividad perfecta

Que ocurre con la  $\rho$  de los metales al bajar T?



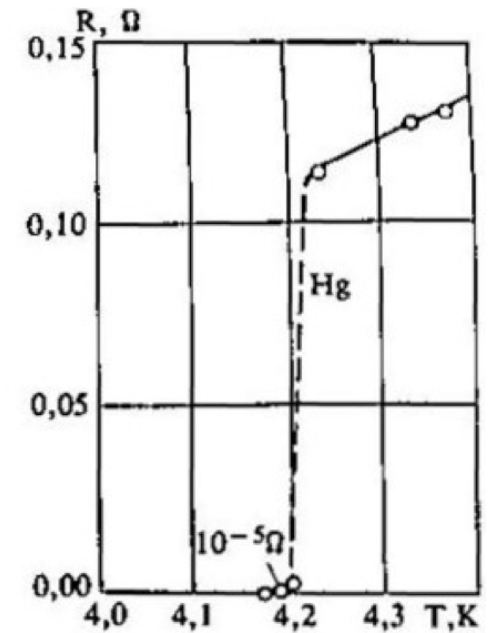
- 1911 : Descubre conductividad perfecta en Hg para  $T < 4K$



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!

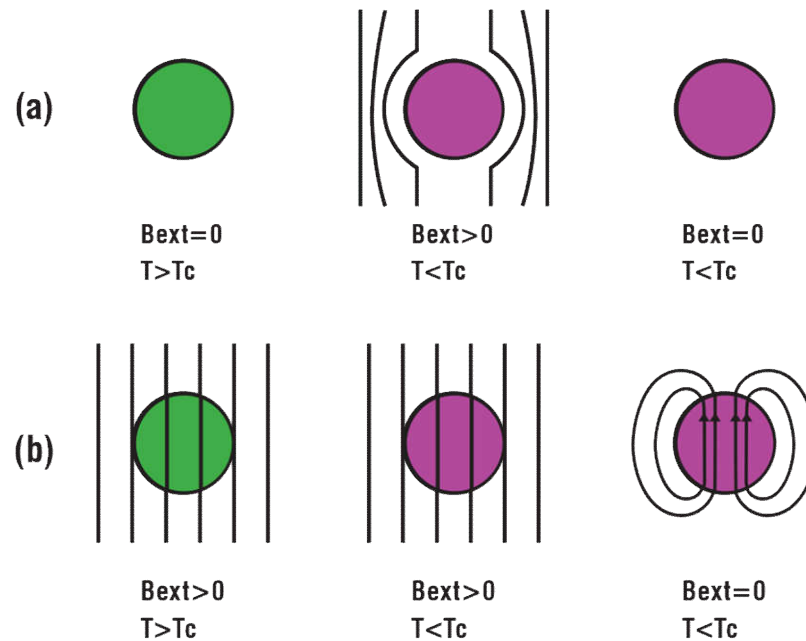
$$R = 0$$

# Conductor perfecto en un campo magnético

En un **conductor** 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

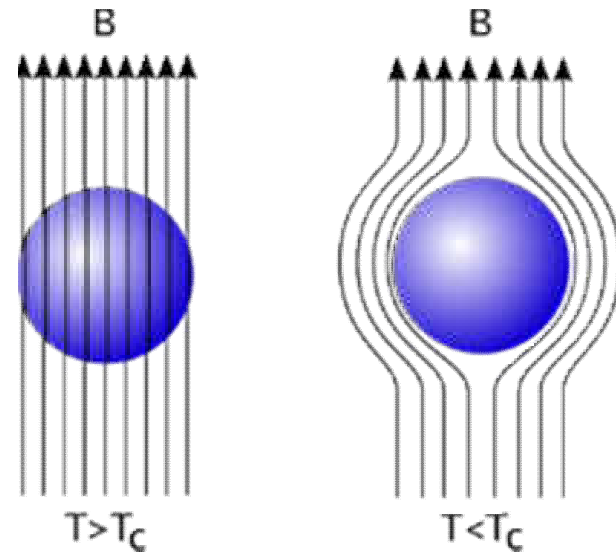
EFEECTO MEISSNER- OCHENSFELD

WALTHER MEISSNER



Walther Meissner  
(1882-1974)

ROBERT OCHSENFELD



Los superconductores expulsan el campo magnético

Se necesita otra ecuación constitutiva!

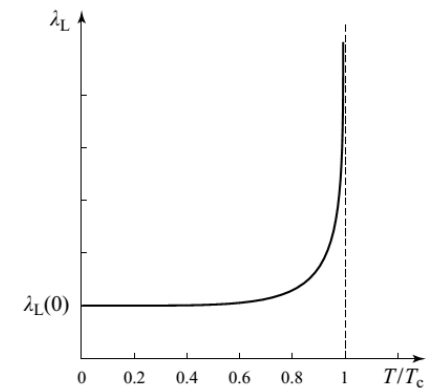
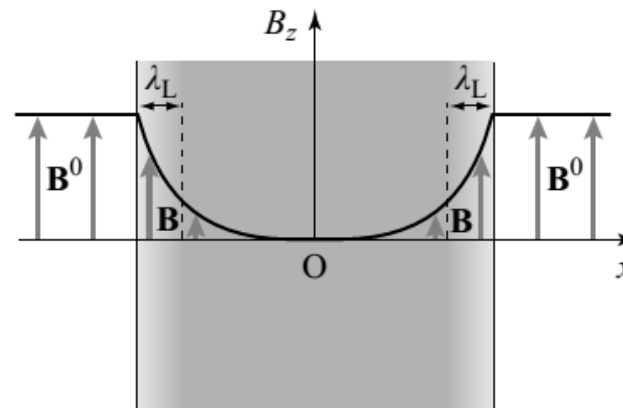
# Modelo de London

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

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

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

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



1934 Fritz y Heinz London

# Modelo de London

## Cuantización del fluxoide:

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

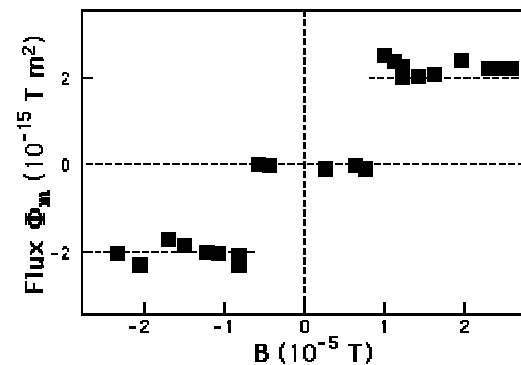
$$\mathbf{P} = m\mathbf{v} + q\mathbf{A}$$

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

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

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

$$\phi_0 = h/q$$



$$q = -2e$$

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:  $\xi$

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

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

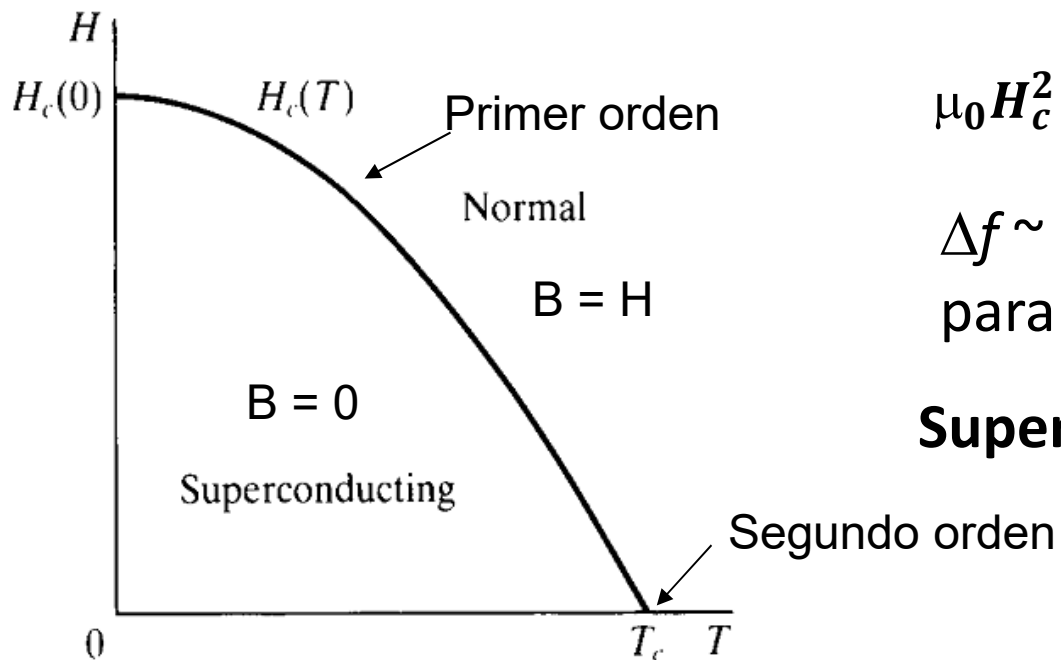
$$\xi^{-1} = \xi_0^{-1} + \ell^{-1}$$

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  $T$ :



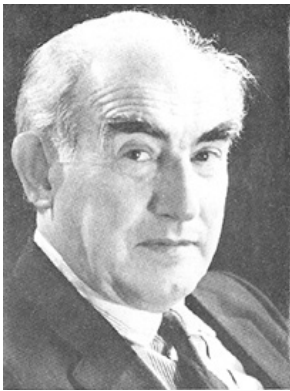
$$\mu_0 H_c^2(T) = f_n(T) - f_s(T)$$

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

**Superconductores de Tipo 1**

**Estado mixto**

# Teoría fenomenológica de Ginzburg-Landau



Nobel 2003



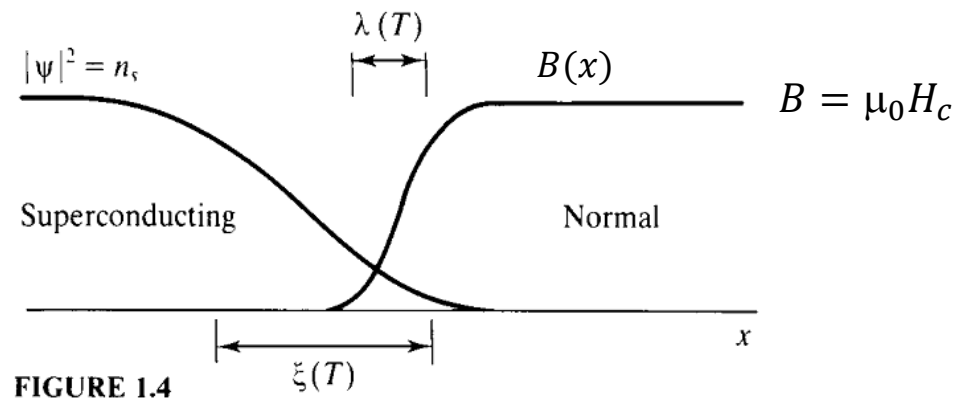
Nobel 1962

1950 Ginzburg y Landau

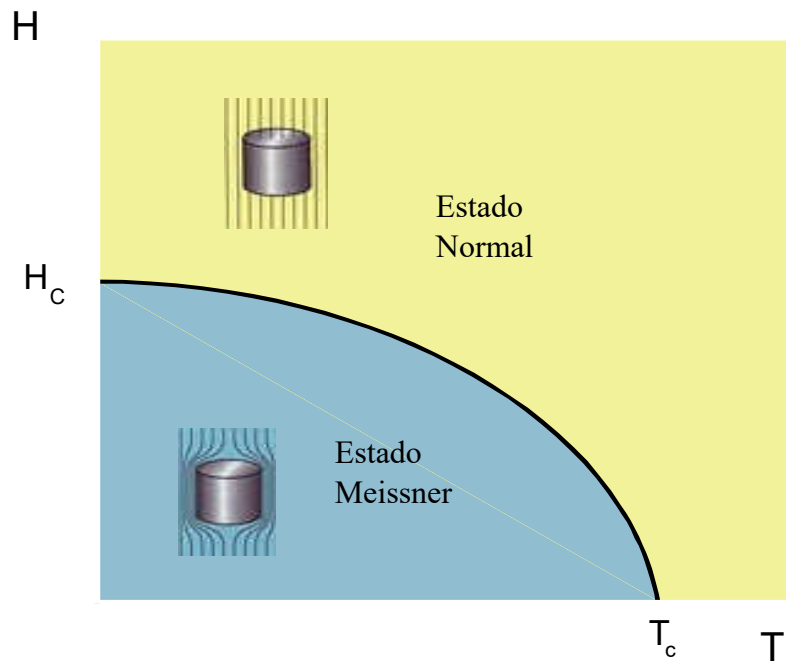
Transición de fase

Parámetro de orden complejo  $\Psi = |\Psi| e^{i\varphi}$   
 $|\Psi| \propto n_s$ .  $\Delta\varphi$  vinculado a  $J$

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



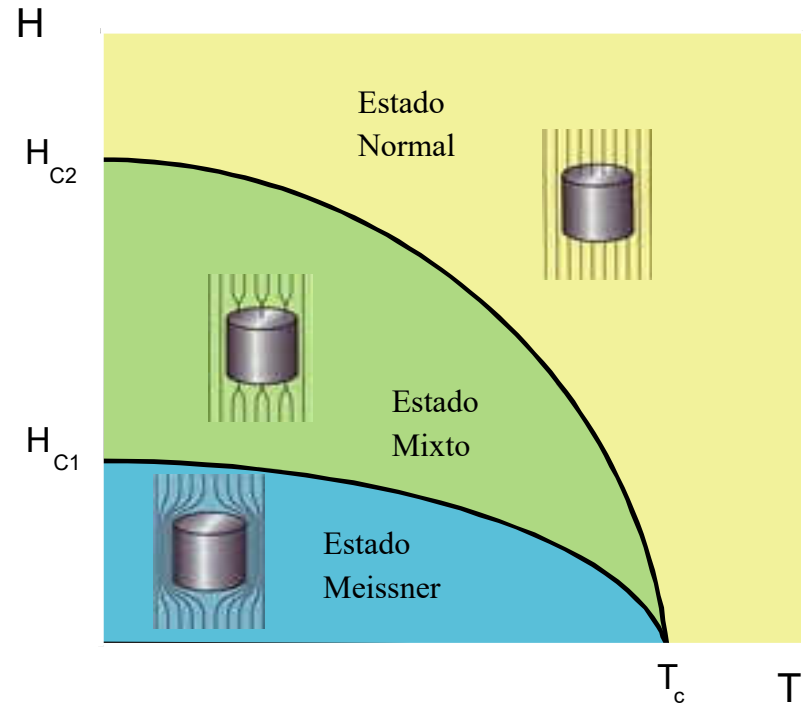
# Superconductores de Tipo I y Tipo II: estado mixto



Tipo I



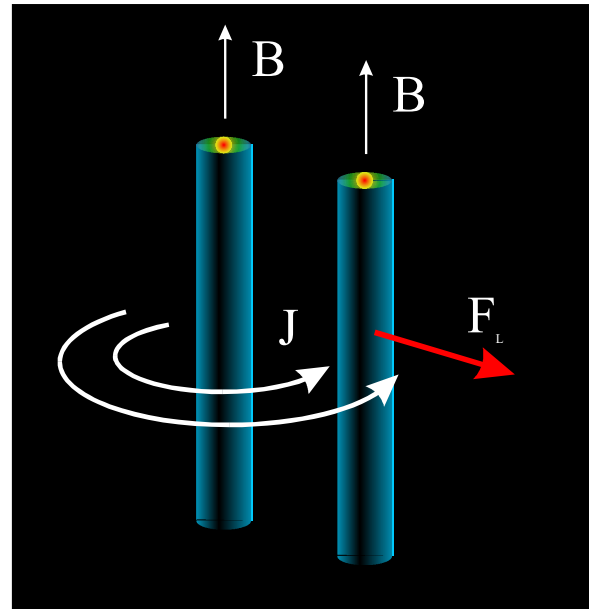
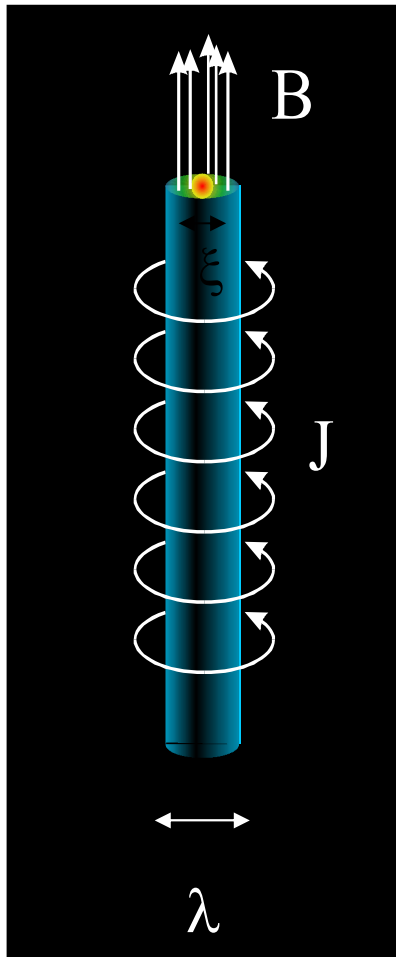
1957 A. Abrikosov  
Nobel 2003



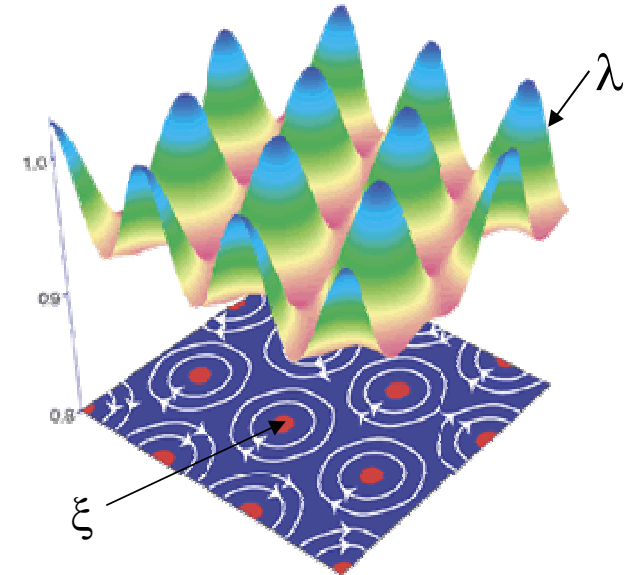
Tipo II

Predice red de vórtices  
en el estado mixto

# Estado mixto: vórtices en superconductores

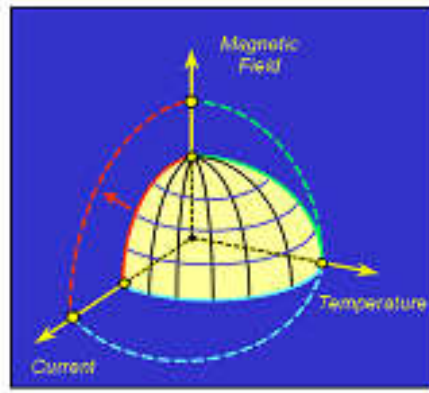


Interacción repulsiva



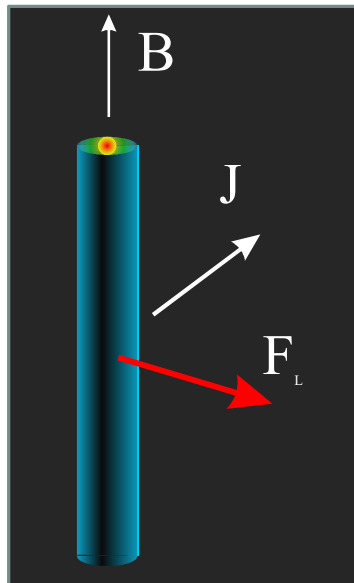
Se organizan en una Red de vórtices (RV)

# 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 se mueven

$$\mathbf{E} = -\mathbf{v} \times \mathbf{B}$$

$$\mathbf{E} \parallel \mathbf{J}; \mathbf{J} \cdot \mathbf{E} \neq 0$$

$$\mathbf{R} \neq 0 !$$

Si hay defectos,  
 $\mathbf{R} = 0$  para  $\mathbf{J} < \mathbf{J}_c$ .

# 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 formando pares de Cooper cuyo estado fundamental es un condensado.

BCS predice un gap finito de energía entre el condensado y los estados excitados (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 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.

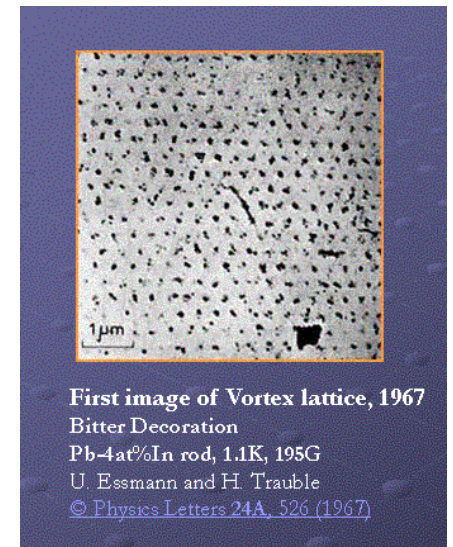


# Algunos hechos relevantes desde 1960 hasta 1987

- 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



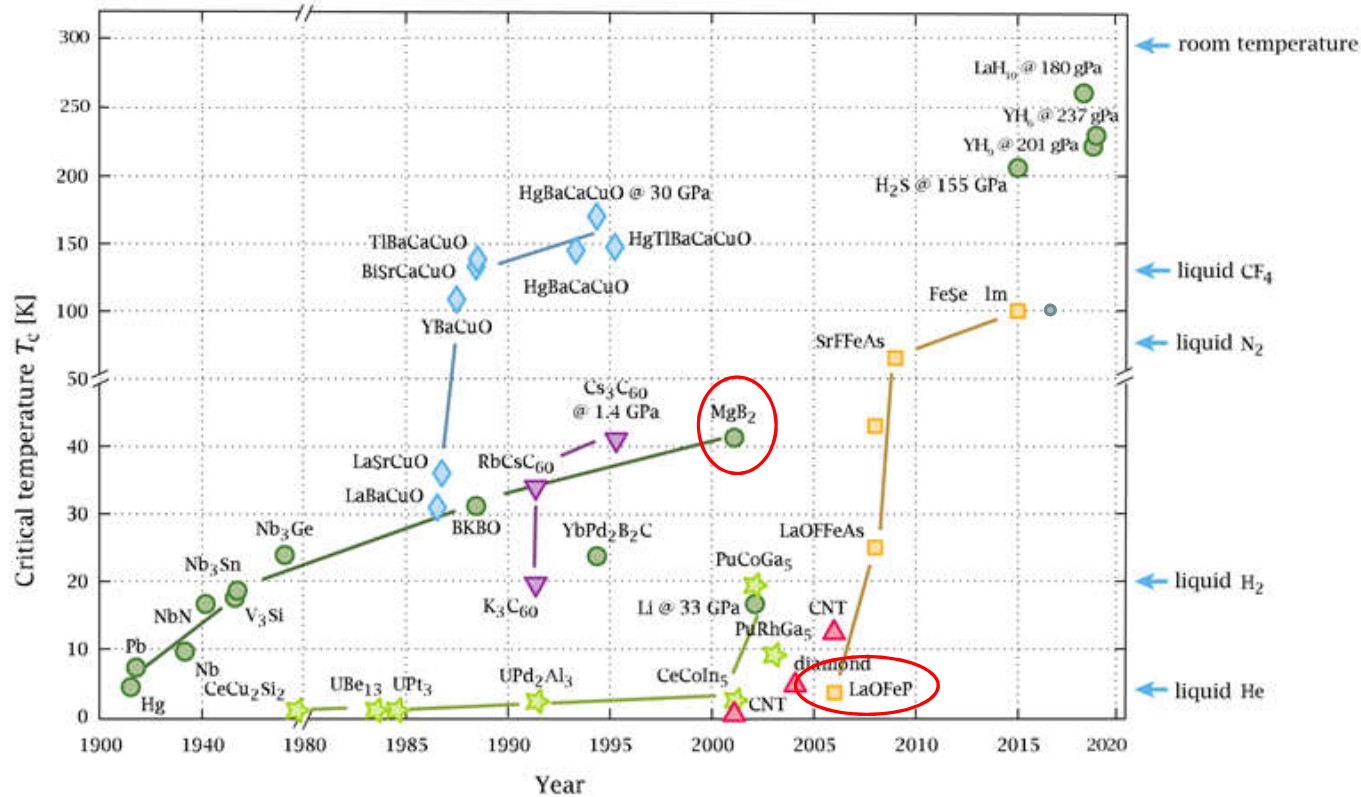
A. Müller y G. Bednorz  
Nobel 1987

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



$MgB_2$ : Akimitsu y colaboradores



FeAs: Hosono y colaboradores

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

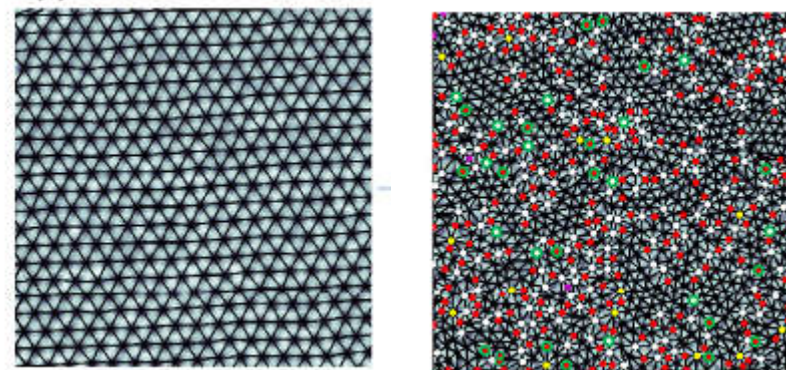
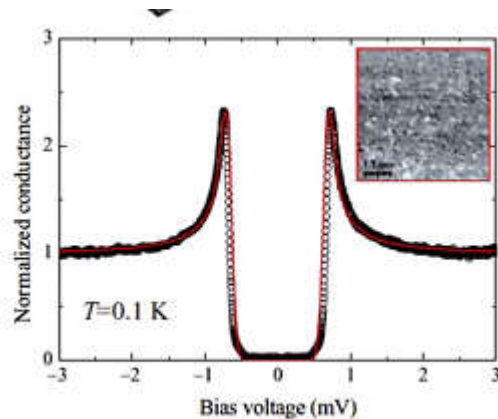
2008 Superconductores basados en Fe

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

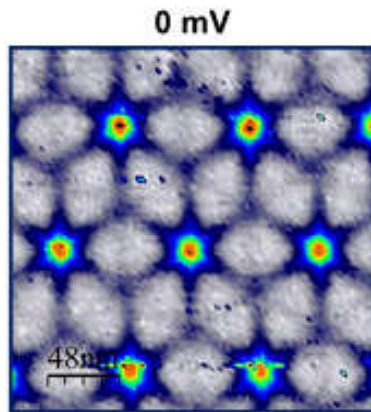
# Algunas técnicas experimentales

- Técnicas de transporte:  $V(I)$ . Transición superconductor  $\rho(T, \mathbf{H}, \mathbf{J})$ ;  $J_c$
- Magnetización:  $M(T, H)$ . Mide la diferencia entre  $B$  y  $B_0$  (estado Meissner, estado mixto,  $J_c$ , y mucho más)
- Susceptibilidad alterna:  $\chi_{ac}(T, H)$ . 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

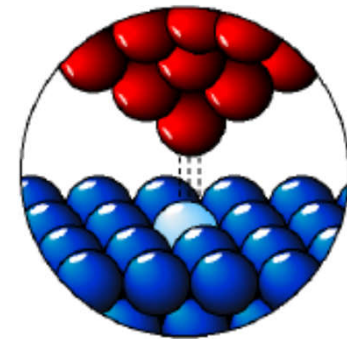


S. Ganguli et al., 2014



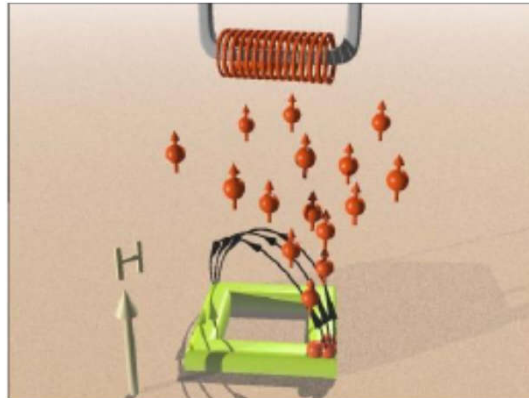
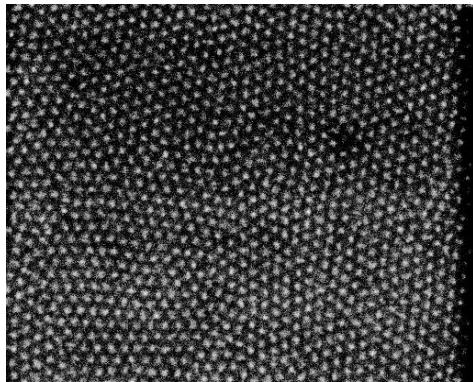
H. Suderow et al. Review 2014

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

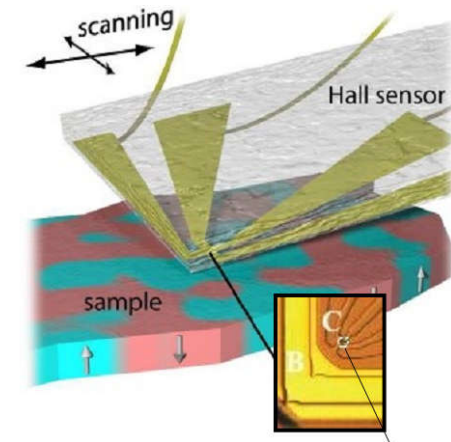
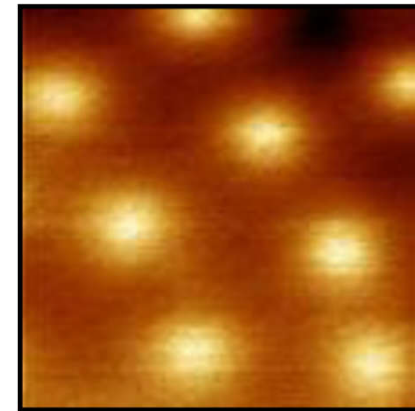
## Decoración magnética



## Decoración en NbSe<sub>2</sub>, CAB

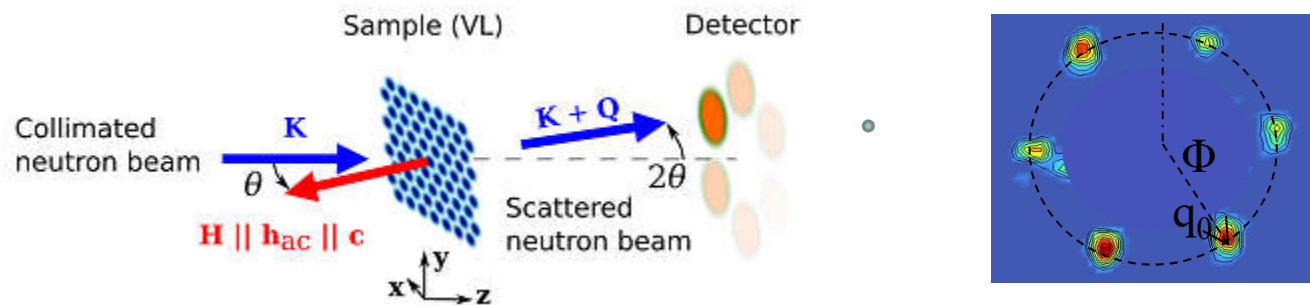
La RV también se puede “ver” midiendo la modulación espacial del campo magnético

## SHM



Micro sensores Hall

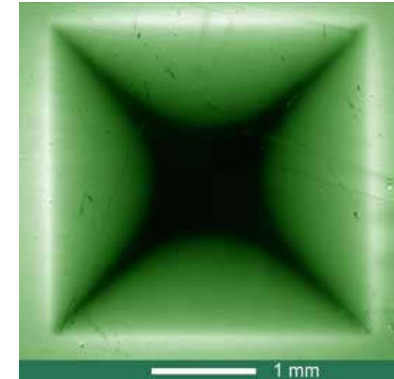
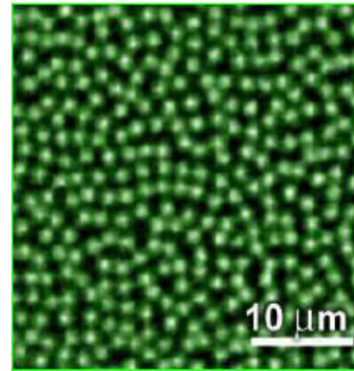
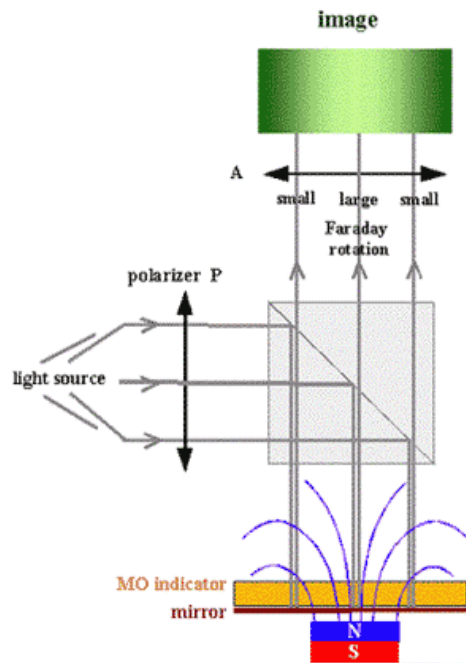
# Algunas técnicas experimentales



M. Marzali et al., PRL 2015

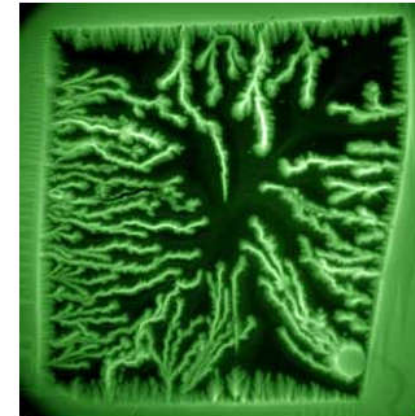
La RV también se puede “ver” mirando la modulación del campo en el espacio recíproco, con difracción de neutrones de bajo ángulo (SANS)

# Algunas técnicas experimentales



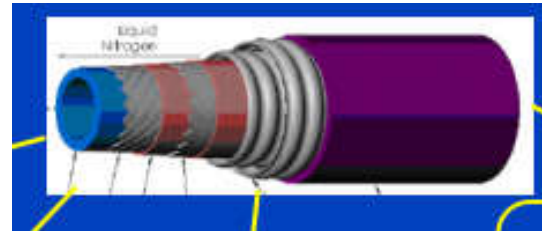
Imágenes tomadas por el grupo de I Johansen, Universidad de Oslo

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





# Aplicaciones

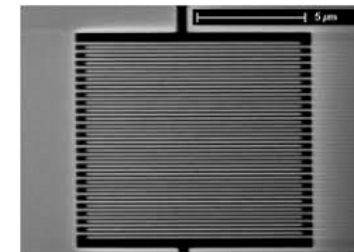
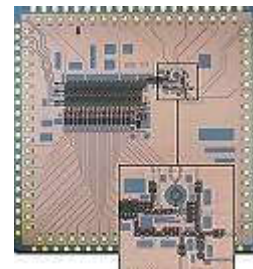
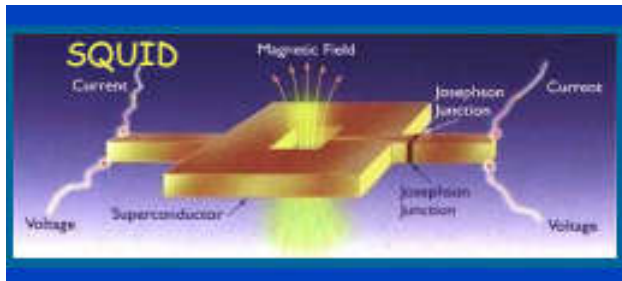


Cables de SAT para altas corrientes



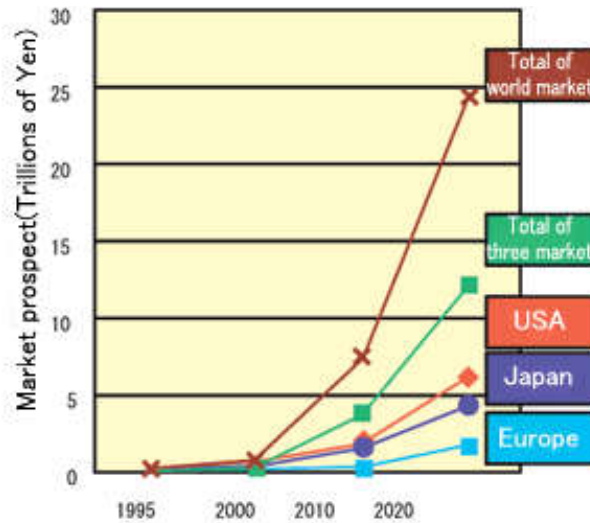
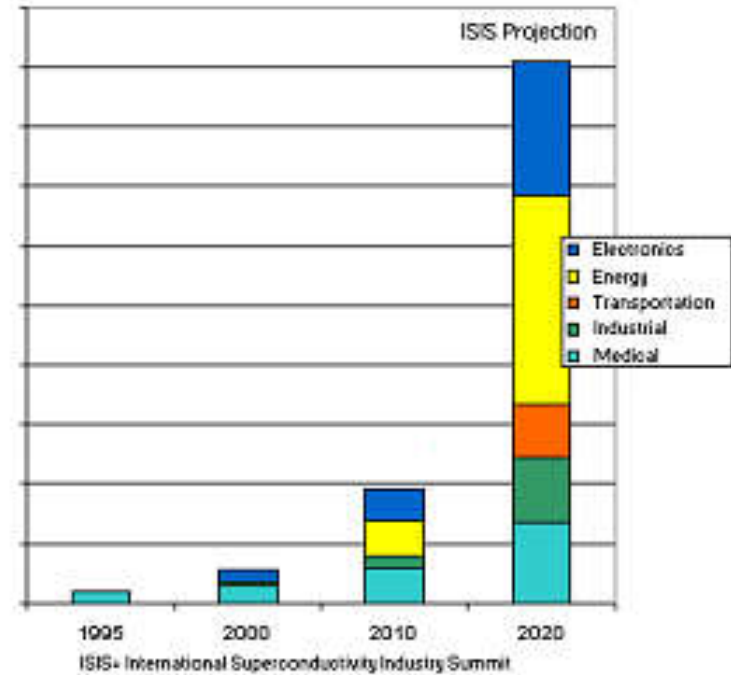
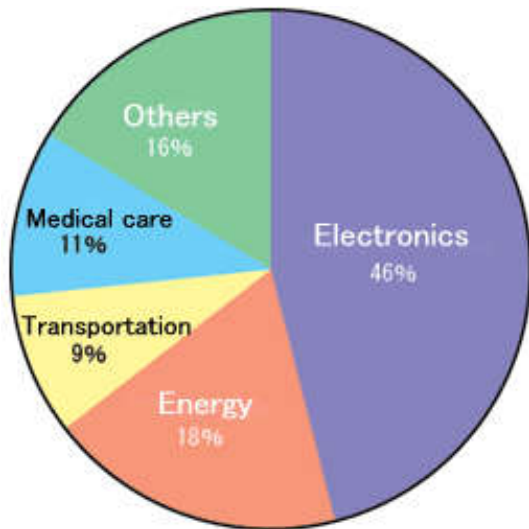
Altos H: IMR y otras aplicaciones

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		
31/8	Reunión preliminar	
3/8	Introducción/reseña histórica	
7/9	Resistividad en conductores. Efecto pelicular. Campo magnético en conductores. Magnetización y susceptibilidad.	Guia 1
10/9	Conductores perfectos. Conductores y Superconductores. Estado Meissner. Factor demagnetizante.	Guia 1
14/9	Modelo de London. Longitud de penetración. Ejemplos de cálculos para algunas geometrías. Modelo de dos fluidos.	Guia 2
17/9	Momento de London. Gauge de London. Cuantización del Fluxoide.	Guia 2
21/9	DIA DEL ESTUDIANTE	
24/9	Fase superconductor. Planteo termodinámico. Campo crítico $H_c$ .	Guia 3
28/9	Estado intermedio. Ejemplos de geometrías. Corriente crítica.	Guia 3
1/10	Electrodinámica no local. Longitud de Pippard. Energía de pared normal/superconductor.	
5/10	Modelo Fenomenológico de GL: energía libre. Ecuaciones de GL. Longitud de Coherencia. Experimento de Little y Parks.	Guia 3
8/10	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
12/10	FERIADO	
15/10	Ecuaciones de GL linealizadas: cálculo de $H_{c2}$ y Red de vórtices (RV)	Guia 4
19/10	Energía de 1 vórtice; cálculo de $H_{c1}$ . Interacción entre vórtices. Magnetización de equilibrio.	Guia 4
22/10	Dinámica de vórtices. Corriente crítica.	Guia 4
26/10	Regímenes dinámicos y respuesta magnética.	Guia 5
29/10	Regímenes dinámicos y respuesta magnética.	
2/11	Descripción de experimentos	Distribución de datos experimentales
5/11	Fases de vórtices.	Guia 5
9/11	Teoría BCS	Discusión de datos experimentales

12/11	Resultados BCS- GAP- Experimentos de tuneo	Discusión de datos experimentales
16/11	CHARLAS DE RESULTADOS EXPERIMENTALES	ENTREGA PROBLEMAS
19/11	EXPOSICION DE PROBLEMAS	
23/11	FERIADO	
26/11	Tuneo de pares. Efecto Josephson	ENTREGA INFORMES
30/11	SQUID	Discusion de posibles temas de monografías posgrado.
3/12	Superconductores no convencionales	Distribucion de temas monografía posgrado
7/12	FERIADO	
10/12	Colchón	