



Modelado numérico del efecto segundo pico en un superconductor tipo II a base de Fe

Dra. Carolina Romero Salazar

Universidad Autónoma “Benito Juárez” de Oaxaca

27 de noviembre de 2021




Agenda


- Antecedentes
- Efecto pico en un cristal Fe(Te,Se)
- Nuestra hipótesis
- Modelo fenomenológico
- Resultados

Antecedentes

- En 1999 Hideo Hosono, buscando materiales transparentes electroactivos inició *inesperadamente* una ruta al descubrir, en el 2008, un superconductor que contiene Fe: el $\text{LaFeAsO}_{1-x}\text{F}_x$ ($T_c=26$ K, 43K a $\sim 4\text{GPa}$).
- ¿Qué impulsó el estudio de los superconductores a base de hierro?



Una mejor comprensión de los ingredientes esenciales de la superconductividad de alta T_c .



Estos materiales tienen potencial para aplicaciones de nuevos tipos de cintas, cables y películas delgadas superconductoras.
 $H_{c2}(T = 0) \sim 100$ T, baja anisotropía comparada con los cupratos.

Diferencias y similitudes

TABLE 4.1: Comparison among 3 representative superconductors.

	Fe-pnictides	MgB ₂	Cuprates
Parent Material	(bad) metal ($T_N \sim 150$ K)	metal	Mott Insulator ($T_N \sim 400$ K)
Fermi Level	3d 5-bands	2-bands	3d single band
Max T_c	56 K	40 K	~ 140 K
Impurity	robust	sensitive	sensitive
Sc gap symmetry	sign inverted s-wave(?)	s-wave	d-wave
$H_c^2(0)$	100–200 T >	~ 40 T	~ 100 T
γ	2–4 (122)	~ 3.5	5–7 (YBCO); 50–90 (Bi system)
J_c	?		

H. Rogalla, P. H. Kes, 100 years of Superconductivity, CRC Press (2012)

A base de hierro	Cupratos
Estructura estratificada	Estructura estratificada
Experimentos y teoría coinciden en que los electrones superconductores fluyen en los planos que contienen Fe	Los electrones superconductores fluyen en los planos CuO
Fe(Se,Te) sus propiedades magnéticas son altamente irreversibles	

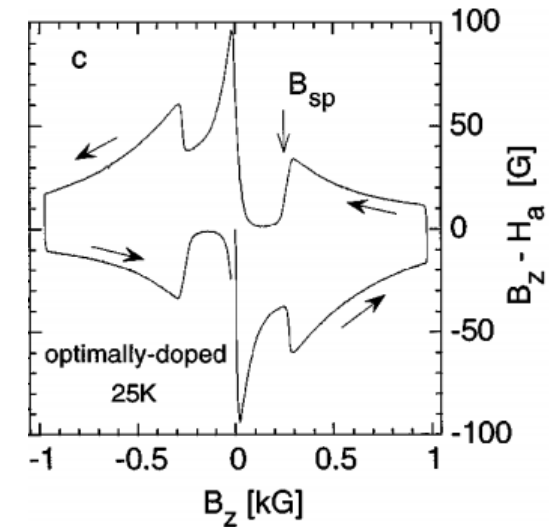
Efecto Pico

Es el incremento anómalo en el ancho del ciclo de magnetización de un HTS(LTS) conforme se incrementa el campo magnético, debido a cambios en la energía de pinning, $j_c(H,T)$.

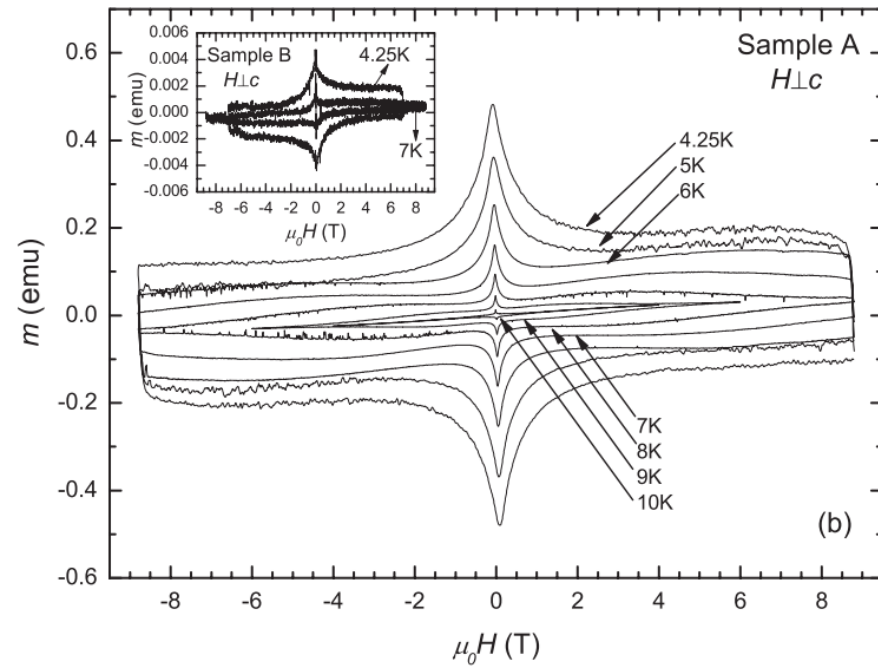
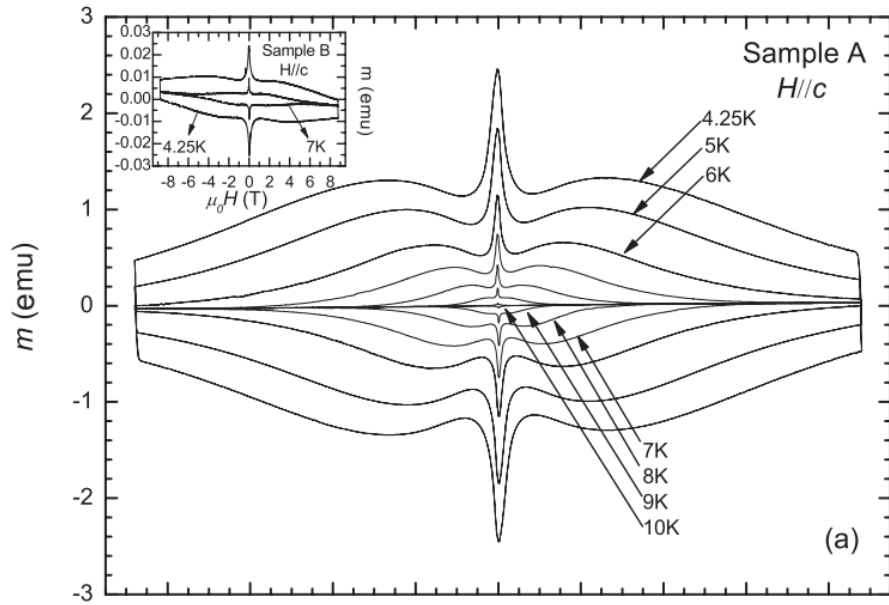
Estudios teóricos sugirieron que en los HTS las fluctuaciones térmicas pueden originar una transición de fase (melting) de la red de vórtices.

A bajas temperaturas las propiedades termodinámicas de la red de vórtices son enmascaradas por el comportamiento irreversible (histéresis) debido al anclaje fuerte.

En los 90's Zeldov et al. realizaron mediciones locales de B y M , así como un barrido fino del campo y la temperatura, en un HTS. Correlacionaron el efecto pico con una transición de fase del estado de vórtice (una fase líquida con anclaje reducido y una segunda fase en la que el anclaje se incrementa).



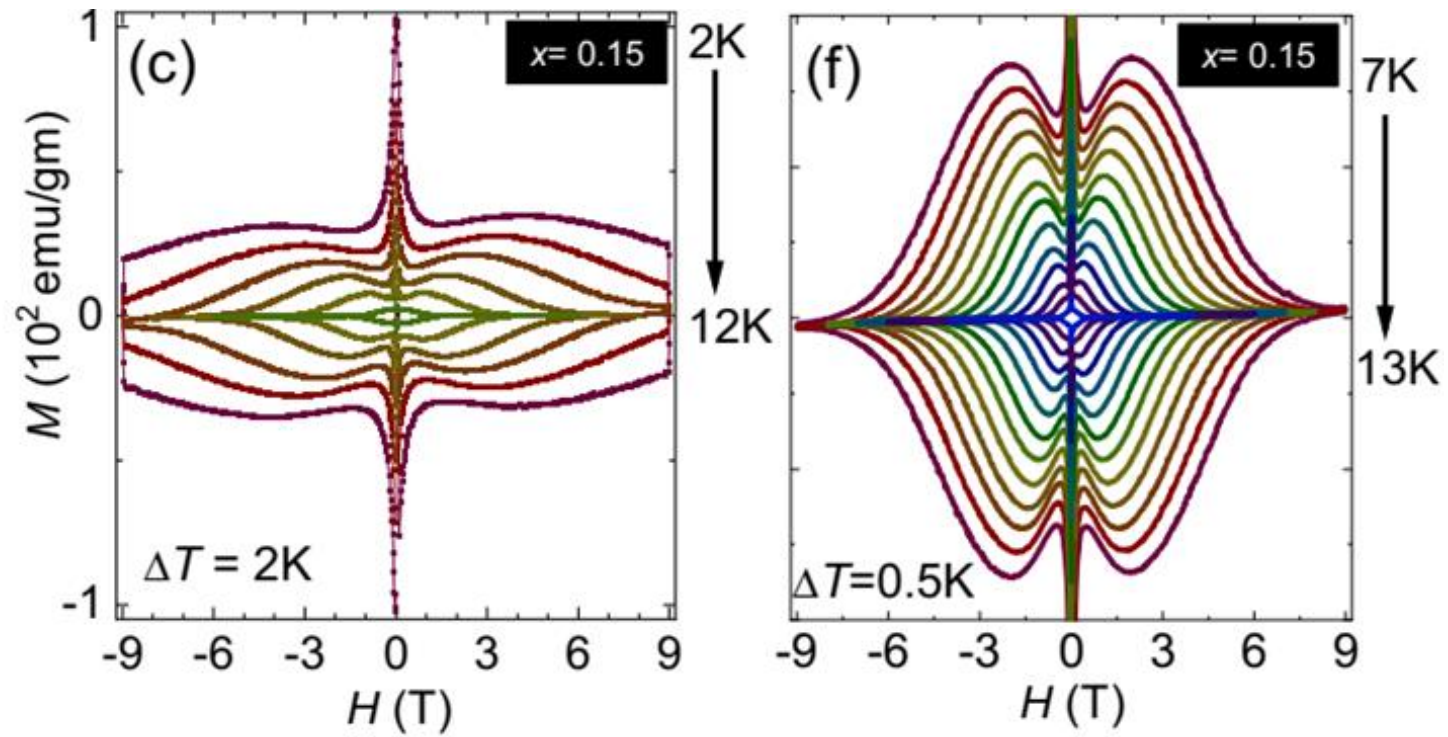
(Obtenido con sensores Hall)
B. Khaykovich et al. PRL 76 (1996) 2555



PHYSICAL REVIEW B 85, 134532 (2012)

Temperature and time scaling of the peak-effect vortex configuration in $\text{FeTe}_{0.7}\text{Se}_{0.3}$

Marco Bonura,^{1,*} Enrico Giannini,² Romain Viennois,^{2,3} and Carmine Senatore^{1,2}



PHYSICAL REVIEW B **101**, 235163 (2020)

Sharp peak of the critical current density in $\text{BaFe}_{2-x}\text{Ni}_x\text{As}_2$ at optimal composition

Derrick Van Gennep¹, Abdelwahab Hassan,² Huiqian Luo,^{3,4} and Mahmoud Abdel-Hafez^{1,5,*}

¿Cómo modelar el efecto pico?

PHYSICAL REVIEW B

VOLUME 56, NUMBER 17

1 NOVEMBER 1997-I

Critical-state model with a secondary high-field peak in $J_c(B)$

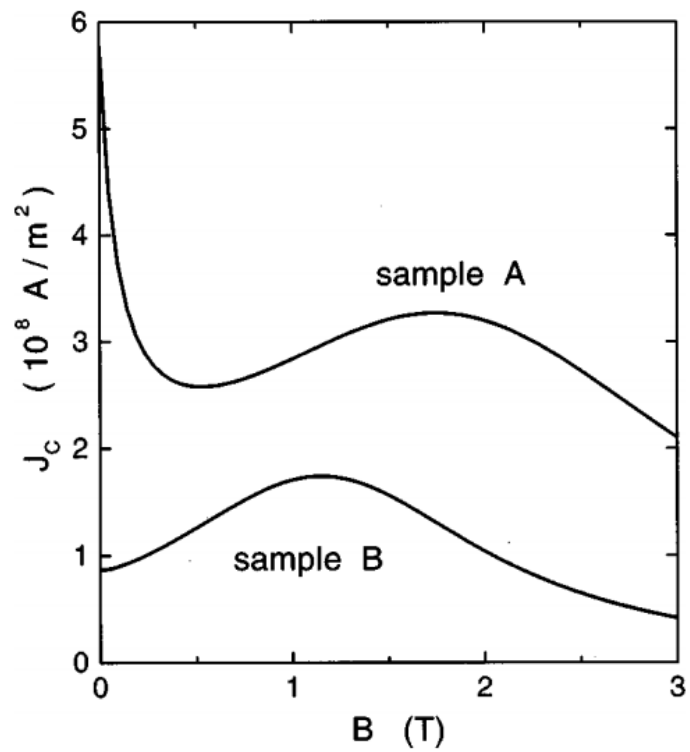
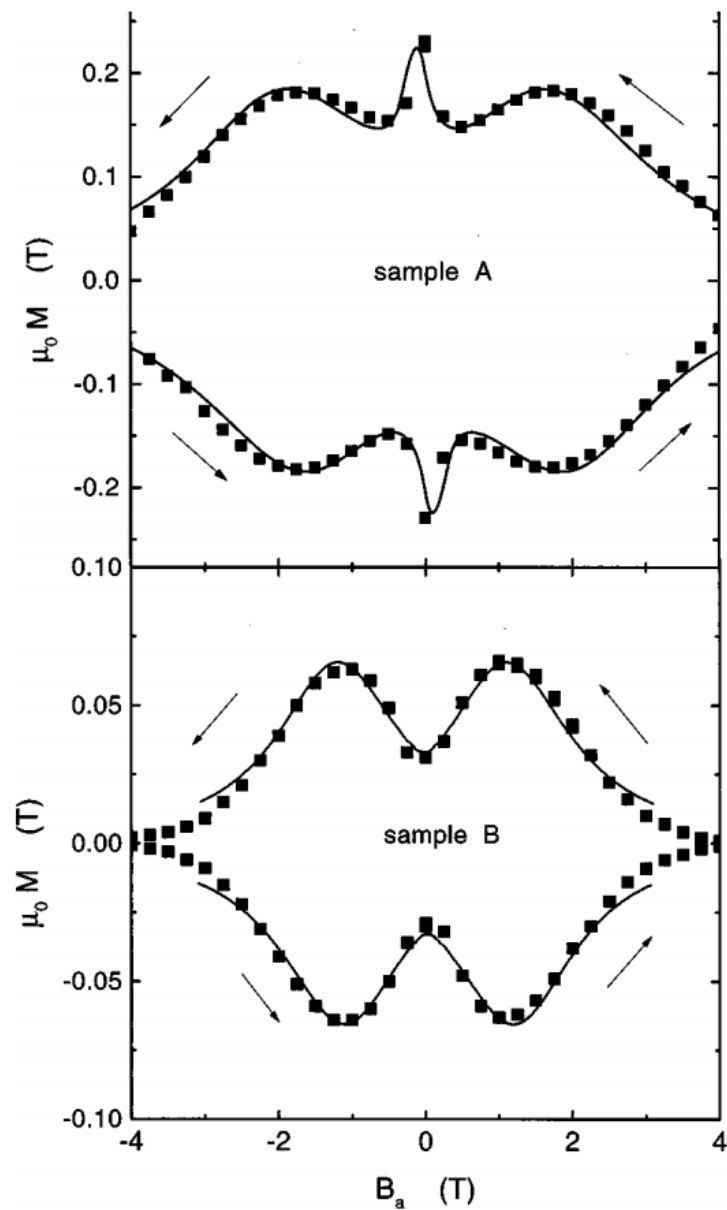
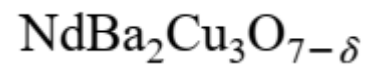
T. H. Johansen, M. R. Koblishka, H. Bratsberg, and P. O. Hetland

Department of Physics, University of Oslo, P.O. Box 1048, Blindern, 0316 Oslo 3, Norway

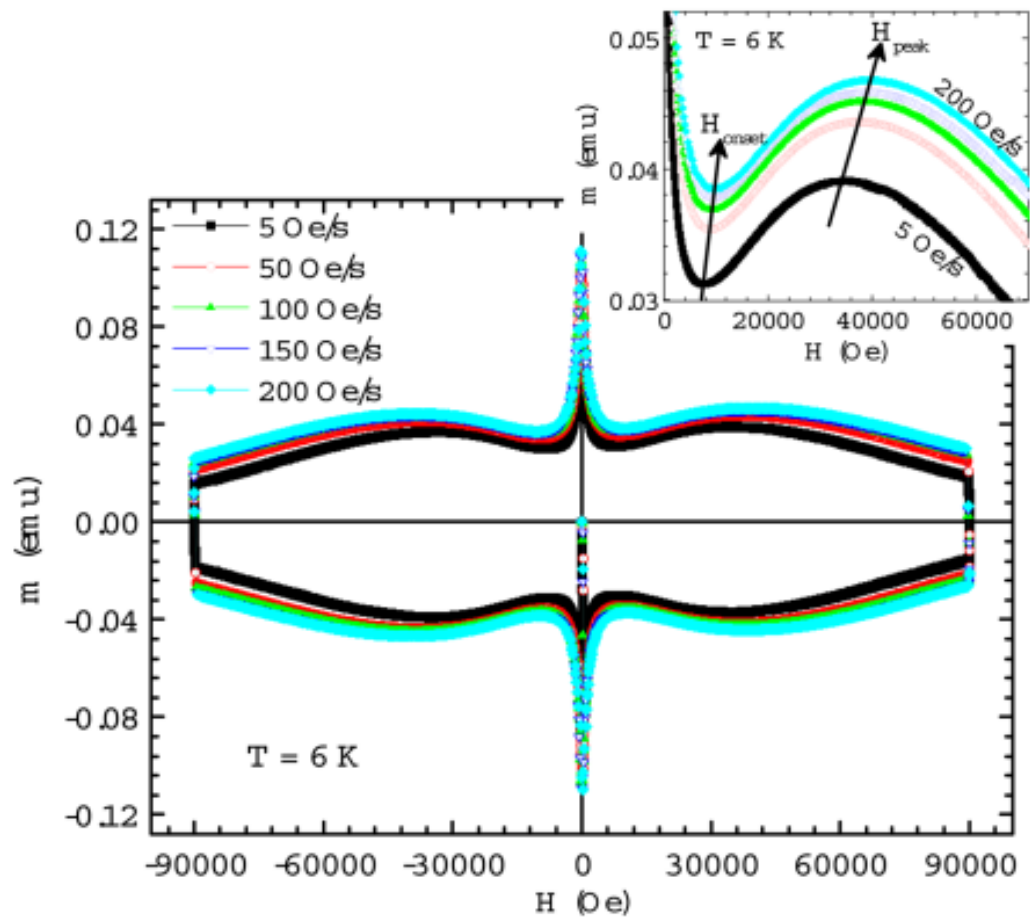
$$J_c(B) = J_0 \left[\frac{1}{1 + |b|} + \frac{a}{(|b| - b_1)^2 + b_2^2} \right],$$

Modelo de Kim

Función de Lorentz



Efecto pico en un cristal Fe(Te,Se)



A Galluzzi et al 2020 J. Appl. Phys. **128**, 073902

Cristal $\text{Fe}_{0.96}\text{Te}_{0.59}\text{Se}_{0.45}$

$T_c = 14.5 \text{ K}$

$j_c \sim 10^8 - 10^9 \text{ A/m}^2$, usando el criterio $J_c = \frac{20\Delta M}{\left[a \left(1 - \frac{a}{3b} \right) \right]}$

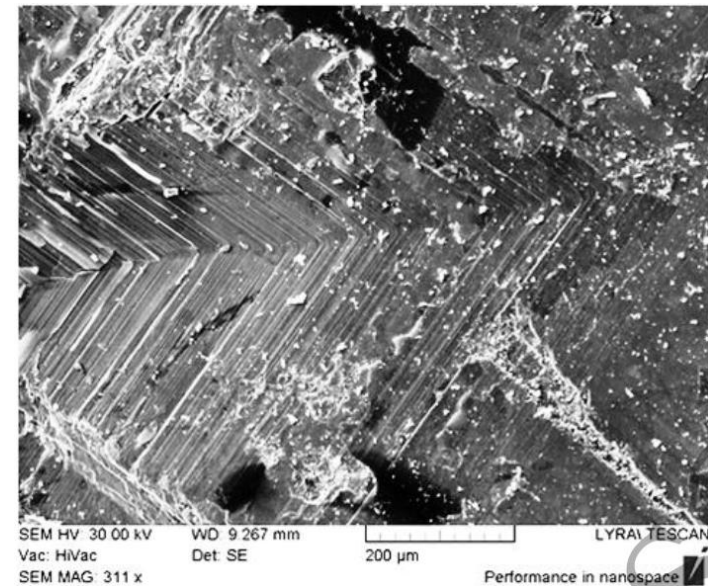


Imagen SEM de la superficie de un cristal $\text{Fe}(\text{Se},\text{Te})$ que muestra la presencia de *twin boundaries*.

A Galluzzi et al 2018 Supercond. Sci. Technol. **31**, 015014

- El efecto pico está correlacionado con los *twin boundaries* que actúan como centros de anclaje fuerte a campos magnéticos grandes ($H > 3T$).
- Identificaron una transición de anclaje débil a fuerte mediado por los *twin boundaries* .
- A campos pequeños ($H < 3T$), los vórtices quedan atrapados en centros de anclaje puntuales que están distribuidos aleatoriamente.
- A campos grandes ($H > 3T$) la eficiencia de estos centros de anclaje disminuye, los vórtices escapan para ser atrapados por los *twin boundaries*. La eficiencia total se incrementa y como consecuencia j_c .

- Usaron tasas de incremento del campo magnético de 5, 50, 100, 150, 200 Oe/s, a una temperatura fija, para obtener los ciclos de histéresis.
- Como consecuencia, se observó un cambio en el ancho de la curva de magnetización junto con el desplazamiento de la posición del segundo pico.

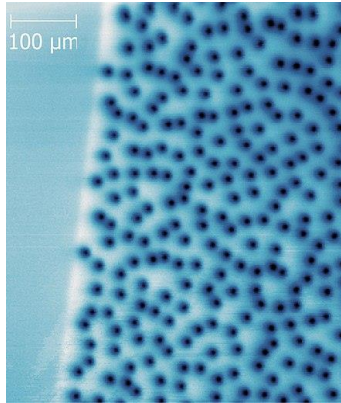
Nuestra hipótesis

A mayor tasa de barrido del campo magnético aplicado, mayor será el incremento local de la temperatura en el material superconductor.



Modelo fenomenológico

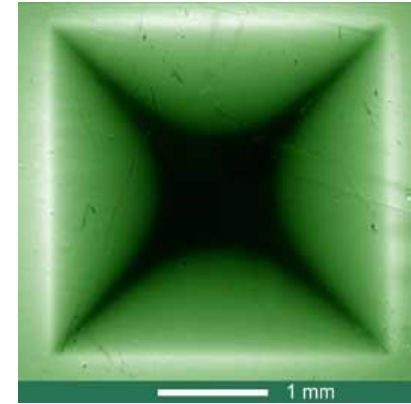
Materia de vórtices



Electrodinámica de
medios continuos



Promedio de H , B , j , E



Ecuaciones de Maxwell

+

Leyes materiales

+

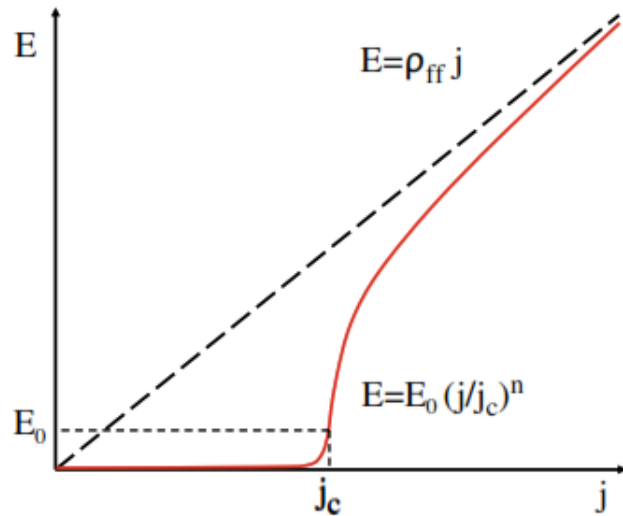
Modelo para j_c

Régimen dinámico

$$B = \mu_0 H$$

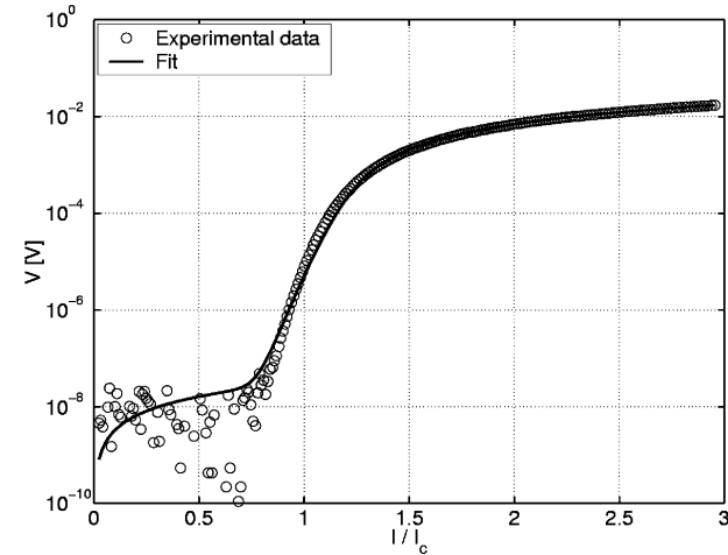
$$E = \rho j$$

Ley material $E=\rho j$



H. Rogalla, P. H. Kes, *100 years of Superconductivity*, CRC Press (2012)

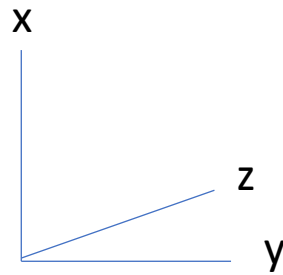
$$\bar{\rho} = 2 \frac{j_{c0}}{j_c} \frac{\left(\frac{j}{j_c}\right)^m}{1 + \left(\frac{j}{j_c}\right)^m}$$



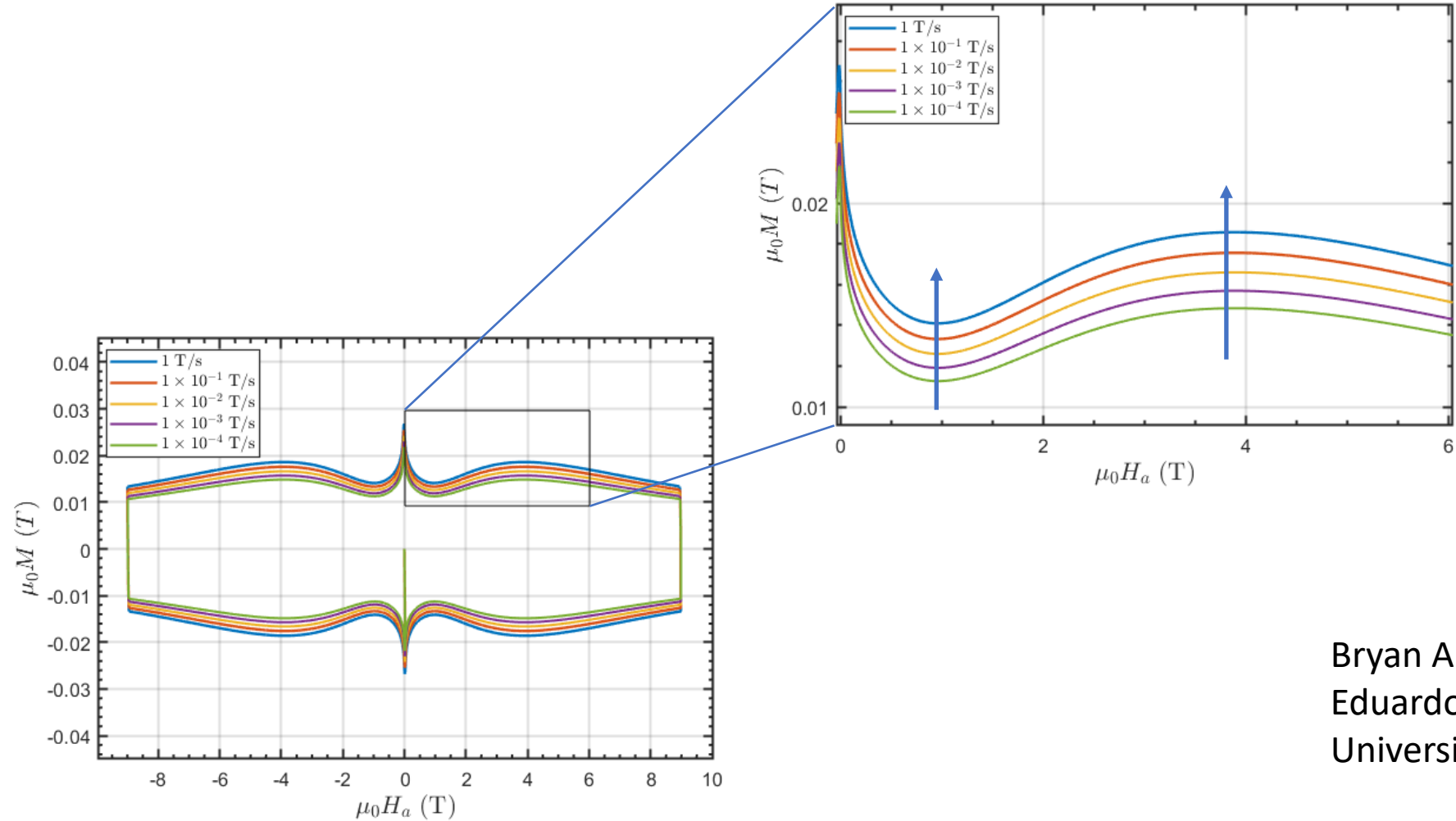
Duron, Grilli, et al. *Physica C* 401 (2004) 231–23 (HTS)

$$\rho_{SC} = \frac{\left(E_0 \cdot \frac{|J|^{n-1}}{J_c^n} + \rho_0\right) \cdot \rho_{SCn}}{\left(E_0 \cdot \frac{|J|^{n-1}}{J_c^n} + \rho_0\right) + \rho_{SCn}}$$

Geometría paralela

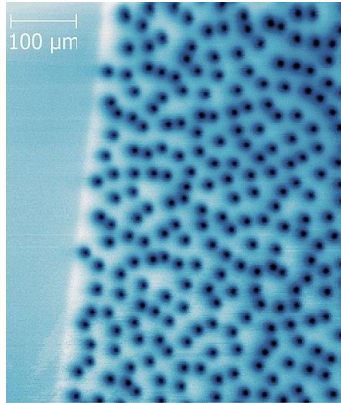


$$\vec{H}_a = H_a \hat{z}$$
$$B_a = \mu_0 H_a = (sr)t$$



Bryan A. Rodríguez-Murrieta
Eduardo Tirado Félix
Universidad Autónoma de Sinaloa

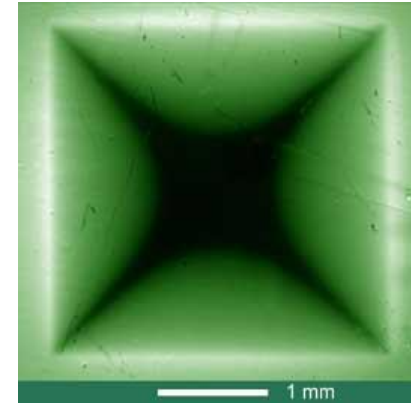
Materia de vórtices



Electrodinámica de
medios continuos



Variables macroscópicas H , B , j , E



Ecuaciones de Maxwell

+

Leyes materiales

+

Modelo para j_c

+

Ecuación de difusión de calor

$$\frac{\partial \bar{B}_z}{\partial \bar{t}} = \frac{t_0}{t_1} \frac{\partial}{\partial \bar{x}} \left(\bar{\rho} \frac{\partial \bar{B}_z}{\partial \bar{x}} \right)$$

$$\bar{c}(\bar{T}) \frac{\partial \bar{T}}{\partial \bar{t}} = \frac{t_0}{t_2} \frac{\partial}{\partial \bar{x}} \left(\bar{\kappa}(\bar{T}) \frac{\partial \bar{T}}{\partial \bar{x}} \right) + \frac{t_0}{t_3} \bar{\rho}(\bar{B}_z) \left(\frac{\partial \bar{B}_z}{\partial \bar{x}} \right)^2$$

$$x = d\bar{x}, \quad t = t_0\bar{t}, \quad T = T_c\bar{T}, \quad B_z = B_0\bar{B}_z.$$

CI: $\bar{B}_z(\bar{x}, \bar{t} = 0) = 0,$
 $\bar{T}(\bar{x}, \bar{t} = 0) = \bar{T}_B,$

CF: $\bar{B}_z(\bar{x} = 0, \bar{t}) = \bar{B}_z(\bar{x} = 1, \bar{t}) = \bar{B}_a.$
 $\bar{T}(\bar{x} = 0, \bar{t}) = \bar{T}(\bar{x} = 1, \bar{t}) = \bar{T}_B.$

$$t_1 = \frac{\mu_0 d^2}{\rho_n}, \quad t_2 = \frac{c_0 d^2}{\kappa_0}, \quad t_3 = \frac{\mu_0^2 d^2 c_0 T_c}{\rho_0 B_0^2} = t_1 \frac{c_0 T_c}{B_0 H_0}$$

$$\frac{\partial \bar{B}_z}{\partial \bar{t}} = \frac{t_0}{t_1} \frac{\partial}{\partial \bar{x}} \left(\bar{\rho} \frac{\partial \bar{B}_z}{\partial \bar{x}} \right)$$

$$\bar{c}(\bar{T}) \frac{\partial \bar{T}}{\partial \bar{t}} = \frac{t_0}{t_2} \frac{\partial}{\partial \bar{x}} \left(\bar{\kappa}(\bar{T}) \frac{\partial \bar{T}}{\partial \bar{x}} \right) + \frac{t_0}{t_3} \bar{\rho}(\bar{B}_z) \left(\frac{\partial \bar{B}_z}{\partial \bar{x}} \right)^2$$

$$x = d\bar{x}, \quad t = t_0\bar{t}, \quad T = T_c\bar{T}, \quad B_z = B_0\bar{B}_z.$$

$$d \sim 10^{-3} \text{ m}$$

$$t_0 \sim 1 \text{ s}$$

$$T_c = 14.5 \text{ K}$$

$$B_0 = \mu_0 d j_{c0} \sim 1 \text{ T}$$

CI: $\bar{B}_z(\bar{x}, \bar{t} = 0) = 0,$

$$\bar{T}(\bar{x}, \bar{t} = 0) = \bar{T}_B,$$

CF: $\bar{B}_z(\bar{x} = 0, \bar{t}) = \bar{B}_z(\bar{x} = 1, \bar{t}) = \bar{B}_a.$

$$\bar{T}(\bar{x} = 0, \bar{t}) = \bar{T}(\bar{x} = 1, \bar{t}) = \bar{T}_B.$$

$$t_1 = \frac{\mu_0 d^2}{\rho_n}, \quad t_2 = \frac{c_0 d^2}{\kappa_0}, \quad t_3 = \frac{\mu_0^2 d^2 c_0 T_c}{\rho_0 B_0^2} = t_1 \frac{c_0 T_c}{B_0 H_0}$$

$$\frac{\partial \bar{B}_z}{\partial \bar{t}} = \frac{t_0}{t_1} \frac{\partial}{\partial \bar{x}} \left(\bar{\rho} \frac{\partial \bar{B}_z}{\partial \bar{x}} \right)$$

$$\bar{c}(\bar{T}) \frac{\partial \bar{T}}{\partial \bar{t}} = \frac{t_0}{t_2} \frac{\partial}{\partial \bar{x}} \left(\bar{\kappa}(\bar{T}) \frac{\partial \bar{T}}{\partial \bar{x}} \right) + \frac{t_0}{t_3} \bar{\rho}(\bar{B}_z) \left(\frac{\partial \bar{B}_z}{\partial \bar{x}} \right)^2$$

$$x = d\bar{x}, \quad t = t_0\bar{t}, \quad T = T_c\bar{T}, \quad B_z = B_0\bar{B}_z.$$

CI: $\bar{B}_z(\bar{x}, \bar{t} = 0) = 0,$

$$\bar{T}(\bar{x}, \bar{t} = 0) = \bar{T}_B,$$

CF: $\bar{B}_z(\bar{x} = 0, \bar{t}) = \bar{B}_z(\bar{x} = 1, \bar{t}) = \bar{B}_a.$

$$\bar{T}(\bar{x} = 0, \bar{t}) = \bar{T}(\bar{x} = 1, \bar{t}) = \bar{T}_B.$$

$$t_1 = \frac{\mu_0 d^2}{\rho_n}, \quad t_2 = \frac{c_0 d^2}{\kappa_0}, \quad t_3 = \frac{\mu_0^2 d^2 c_0 T_c}{\rho_0 B_0^2} = t_1 \frac{c_0 T_c}{B_0 H_0}$$

$$\frac{\partial \bar{B}_z}{\partial \bar{t}} = \frac{t_0}{t_1} \frac{\partial}{\partial \bar{x}} \left(\bar{\rho} \frac{\partial \bar{B}_z}{\partial \bar{x}} \right)$$

$$\bar{c}(\bar{T}) \frac{\partial \bar{T}}{\partial \bar{t}} = \frac{t_0}{t_2} \frac{\partial}{\partial \bar{x}} \left(\bar{\kappa}(\bar{T}) \frac{\partial \bar{T}}{\partial \bar{x}} \right) + \frac{t_0}{t_3} \bar{\rho}(\bar{B}_z) \left(\frac{\partial \bar{B}_z}{\partial \bar{x}} \right)^2$$

$$x = d\bar{x}, \quad t = t_0\bar{t}, \quad T = T_c\bar{T}, \quad B_z = B_0\bar{B}_z.$$

CI: $\bar{B}_z(\bar{x}, \bar{t} = 0) = 0,$
 $\bar{T}(\bar{x}, \bar{t} = 0) = \bar{T}_B,$

CF: $\bar{B}_z(\bar{x} = 0, \bar{t}) = \bar{B}_z(\bar{x} = 1, \bar{t}) = \bar{B}_a.$
 $\bar{T}(\bar{x} = 0, \bar{t}) = \bar{T}(\bar{x} = 1, \bar{t}) = \bar{T}_B.$

$$t_1 = \frac{\mu_0 d^2}{\rho_n}, \quad t_2 = \frac{c_0 d^2}{\kappa_0}, \quad t_3 = \frac{\mu_0^2 d^2 c_0 T_c}{\rho_0 B_0^2} = t_1 \frac{c_0 T_c}{B_0 H_0}$$

$$\frac{\partial \bar{B}_z}{\partial \bar{t}} = \frac{t_0}{t_1} \frac{\partial}{\partial \bar{x}} \left(\bar{\rho} \frac{\partial \bar{B}_z}{\partial \bar{x}} \right)$$

$$\bar{c}(\bar{T}) \frac{\partial \bar{T}}{\partial \bar{t}} = \frac{t_0}{t_2} \frac{\partial}{\partial \bar{x}} \left(\bar{\kappa}(\bar{T}) \frac{\partial \bar{T}}{\partial \bar{x}} \right) + \frac{t_0}{t_3} \bar{\rho}(\bar{B}_z) \left(\frac{\partial \bar{B}_z}{\partial \bar{x}} \right)^2$$

$$x = d\bar{x}, \quad t = t_0\bar{t}, \quad T = T_c\bar{T}, \quad B_z = B_0\bar{B}_z.$$

CI: $\bar{B}_z(\bar{x}, \bar{t} = 0) = 0,$
 $\bar{T}(\bar{x}, \bar{t} = 0) = \bar{T}_B,$

CF: $\bar{B}_z(\bar{x} = 0, \bar{t}) = \bar{B}_z(\bar{x} = 1, \bar{t}) = \bar{B}_a.$
 $\bar{T}(\bar{x} = 0, \bar{t}) = \bar{T}(\bar{x} = 1, \bar{t}) = \bar{T}_B.$

$$t_1 = \frac{\mu_0 d^2}{\rho_n}, \quad t_2 = \frac{c_0 d^2}{\kappa_0}, \quad t_3 = \frac{\mu_0^2 d^2 c_0 T_c}{\rho_0 B_0^2} = t_1 \frac{c_0 T_c}{B_0 H_0}$$

$$\frac{\partial \bar{B}_z}{\partial \bar{t}} = \frac{t_0}{t_1} \frac{\partial}{\partial \bar{x}} \left(\bar{\rho} \frac{\partial \bar{B}_z}{\partial \bar{x}} \right)$$

$$\bar{c}(\bar{T}) \frac{\partial \bar{T}}{\partial \bar{t}} = \frac{t_0}{t_2} \frac{\partial}{\partial \bar{x}} \left(\bar{\kappa}(\bar{T}) \frac{\partial \bar{T}}{\partial \bar{x}} \right) + \frac{t_0}{t_3} \bar{\rho}(\bar{B}_z) \left(\frac{\partial \bar{B}_z}{\partial \bar{x}} \right)^2$$

$$x = d\bar{x}, \quad t = t_0\bar{t}, \quad T = T_c\bar{T}, \quad B_z = B_0\bar{B}_z.$$

CI: $\bar{B}_z(\bar{x}, \bar{t} = 0) = 0,$
 $\bar{T}(\bar{x}, \bar{t} = 0) = \bar{T}_B,$

CF: $\bar{B}_z(\bar{x} = 0, \bar{t}) = \bar{B}_z(\bar{x} = 1, \bar{t}) = \bar{B}_a.$
 $\bar{T}(\bar{x} = 0, \bar{t}) = \bar{T}(\bar{x} = 1, \bar{t}) = \bar{T}_B.$

$$t_1 = \frac{\mu_0 d^2}{\rho_n}, \quad t_2 = \frac{c_0 d^2}{\kappa_0}, \quad t_3 = \frac{\mu_0^2 d^2 c_0 T_c}{\rho_0 B_0^2} = t_1 \frac{c_0 T_c}{B_0 H_0}$$

¿...Y la información del superconductor?

Leyes materiales

$$B_z = \mu_0 H_z$$

$$E_y = \rho j_y$$

$$\bar{\rho} = 2 \frac{j_{c0}}{j_c} \frac{\left(\frac{j}{j_c}\right)^m}{1 + \left(\frac{j}{j_c}\right)^m}$$

$$j_c = j_{c0} \bar{j}_c \quad \bar{j}_c = \bar{j}_T(\bar{T}) \bar{j}_B(\bar{B}_z, \bar{T})$$

$$\bar{j}_T(\bar{T}) = (1 - \bar{T}^{c_1})^{c_2}$$

$$\bar{j}_B(\bar{B}_z, \bar{T}) = \exp \left\{ - \left(\frac{|\bar{B}_z|}{b(T)} \right)^{c_4} \right\} + \frac{c_5}{c_6^2 + \left(c_7 - \frac{|\bar{B}_z|}{15b(T)} \right)^2}$$

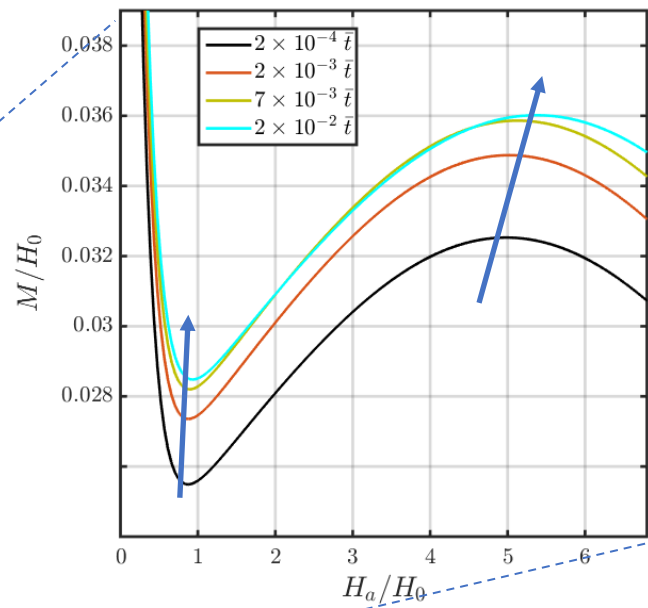
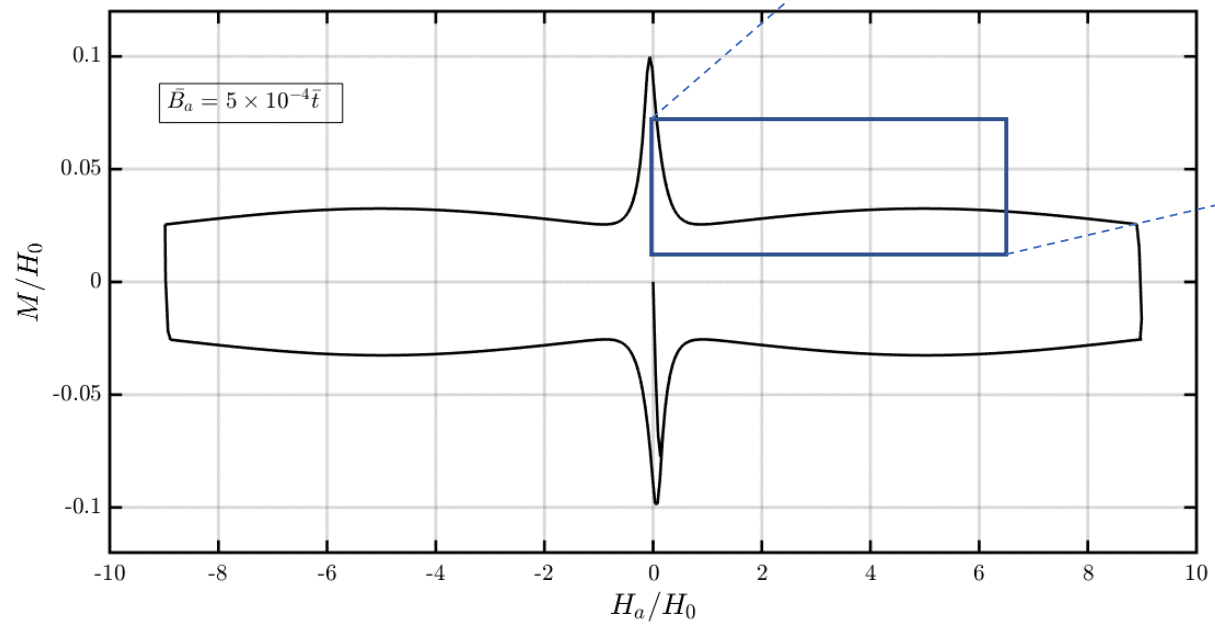
$$b(T) = c_3 / (1 - \bar{T})$$

Función de Lorentz

$$\bar{\kappa} = \bar{T}^3,$$

$$\bar{c} = \bar{T}^3.$$

Resultados



Trabajo en equipo

Omar A. Hernández-Flores

Carlos E. Ávila-Crisóstomo

Pedro L. Valdés-Negrin

Raúl Cortés-Maldonado

Gracias por su atención

Apéndices

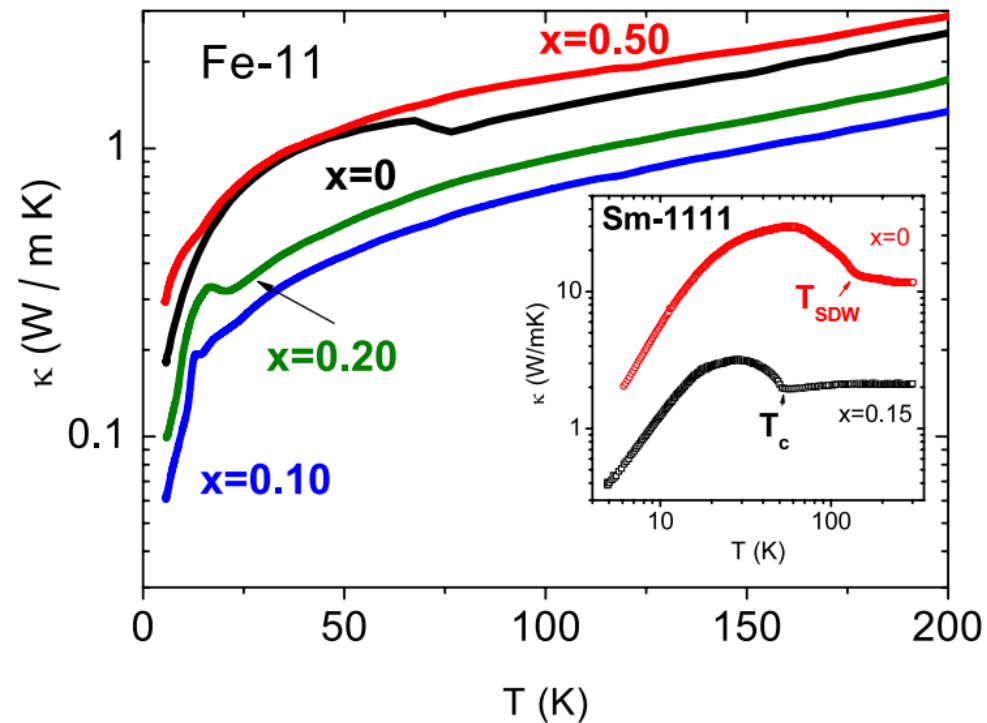
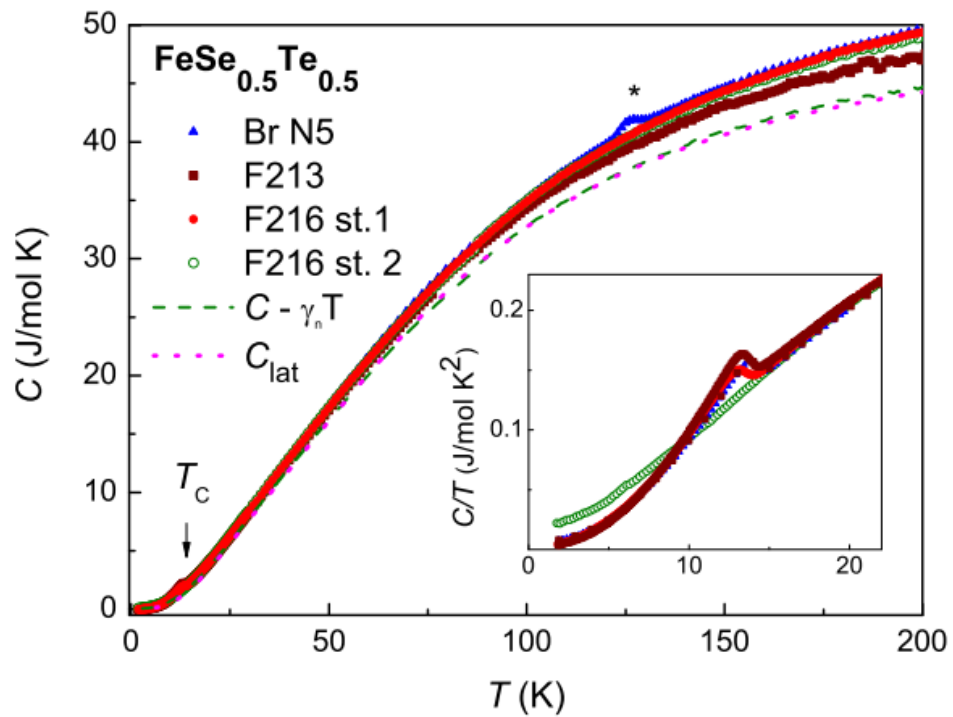


Figure 8. κ versus T in Fe-11. Inset: κ versus T in Sm-1111.

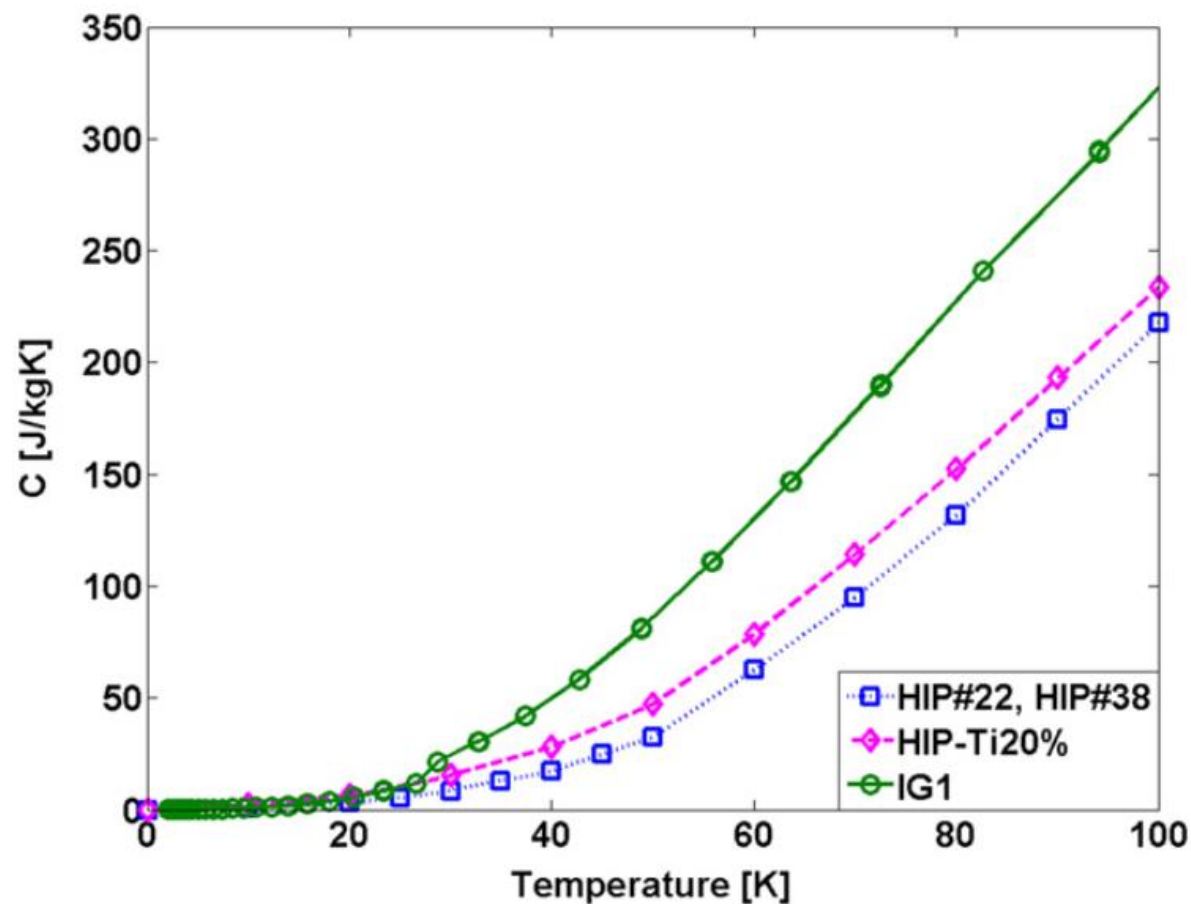


Figure 3. Experimentally measured C (specific heat) data for the HIP#22, HIP#38 and IG1 samples, and the estimated C for the HIP-Ti20% sample.

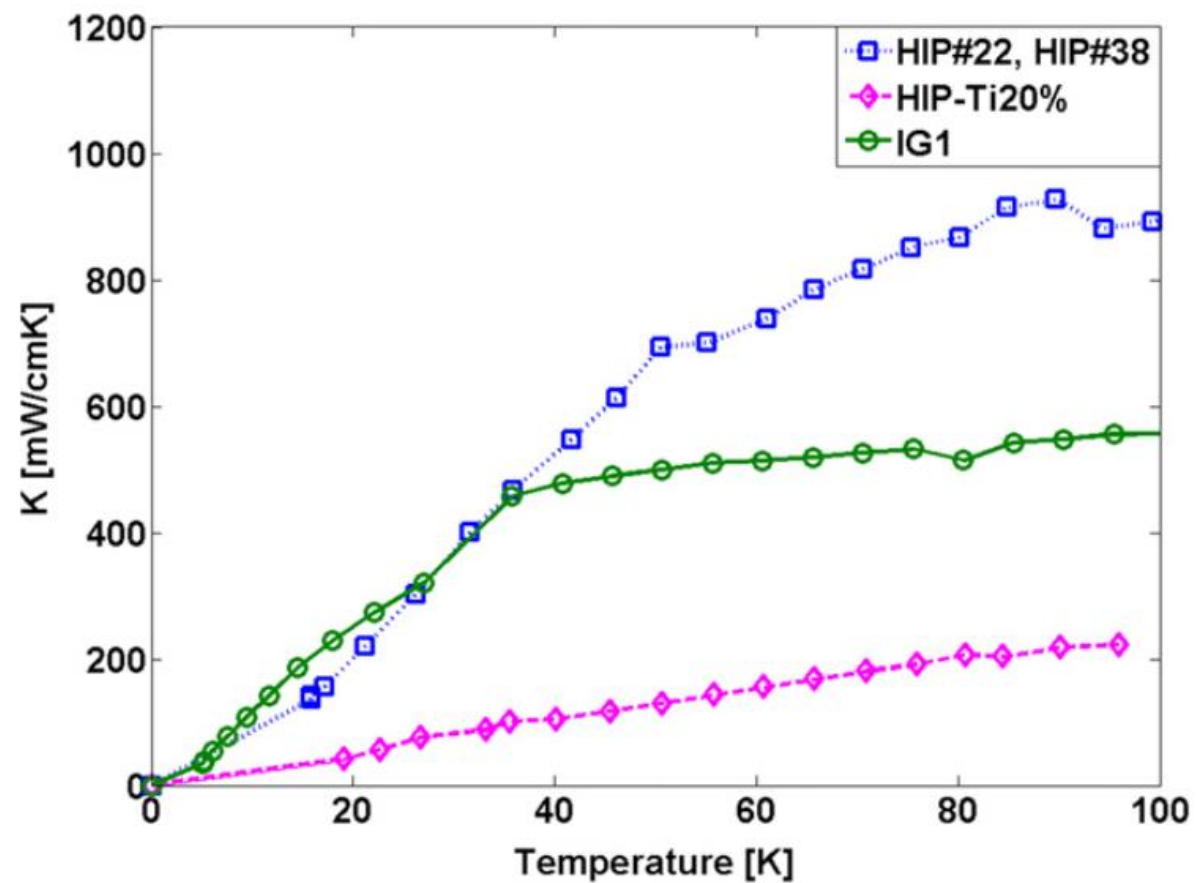


Figure 5. Experimentally measured κ (thermal conductivity) data for the MgB₂ samples.