

# SUPERCONDUCTIVIDAD

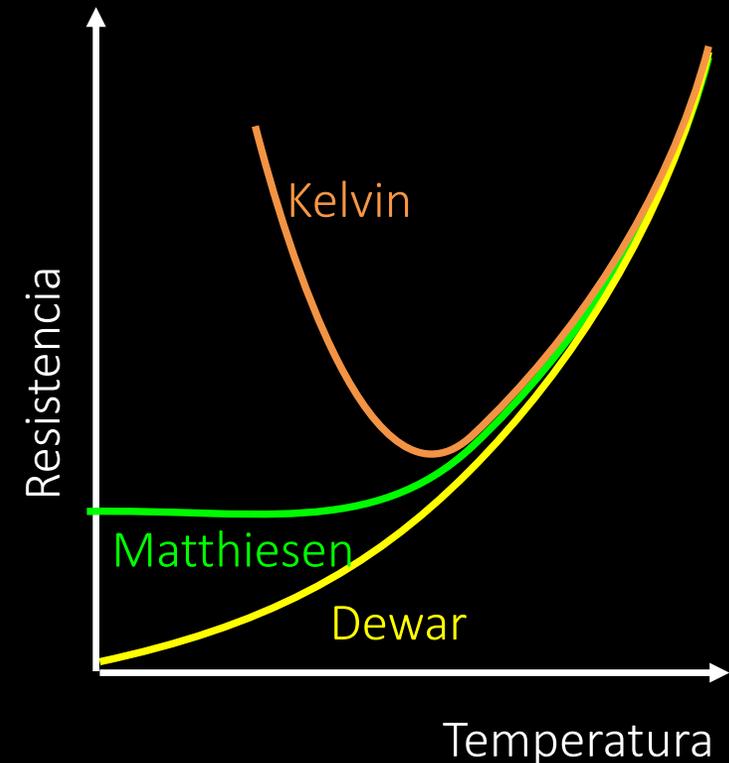
María José Calderón

[mariaj.calderon@csic.es](mailto:mariaj.calderon@csic.es), @MJ\_mjcp

# El descubrimiento

A principios del siglo XX había tres teorías sobre el comportamiento de la resistencia de los metales a baja temperatura. Sin embargo, no era posible bajar la temperatura de los metales lo suficiente para poder comprobarlo.

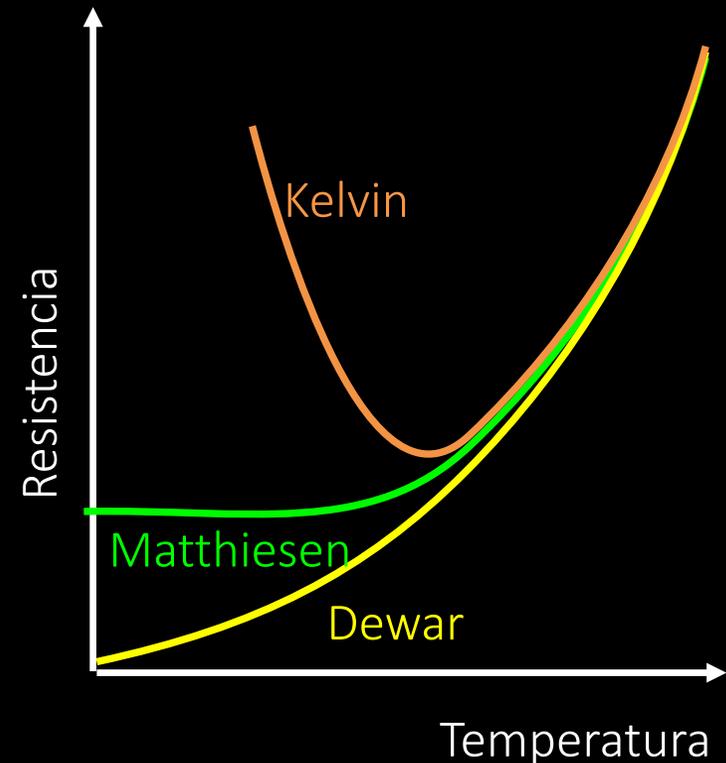
Este problema se resolvió en 1908 cuando Heike Kammerlingh Onnes (Leiden) licuó He. La temperatura de licuación del He es 4.2 K lo que permitía alcanzar temperaturas cercanas al cero absoluto.



# El descubrimiento

Gracias al He líquido se inició el estudio experimental de las propiedades de la materia a muy bajas temperaturas.

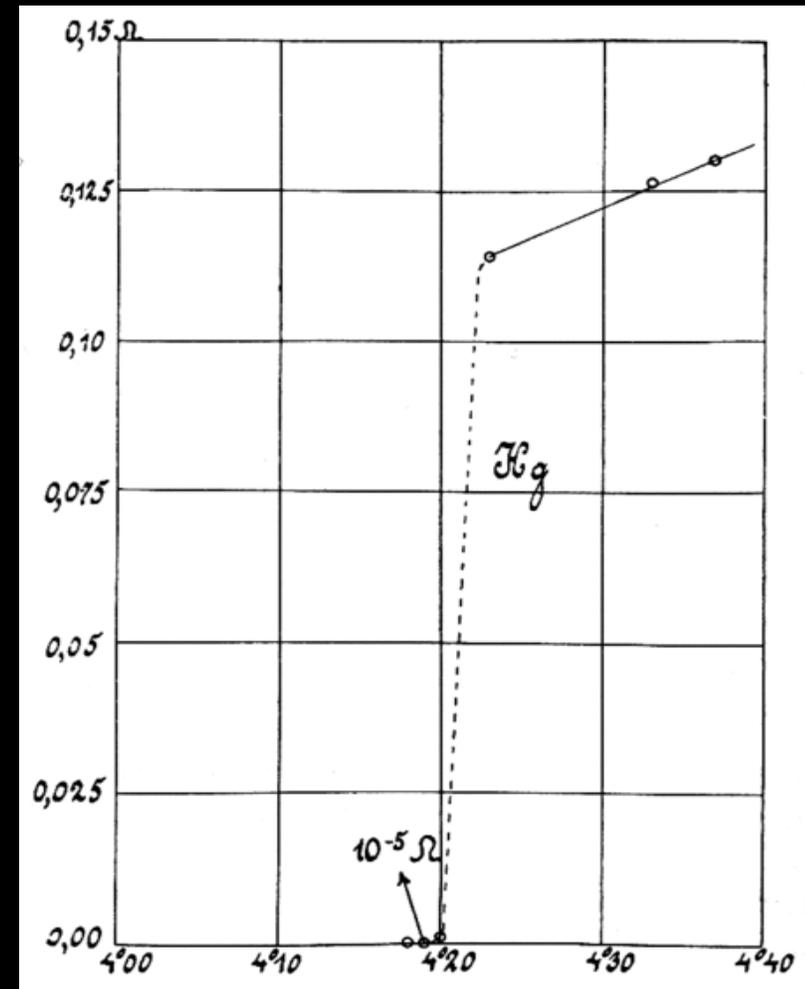
Heike Kammerlingh Onnes decidió estudiar precisamente la resistencia de los metales. Decidió probar con Hg, fácilmente purificable.



# El descubrimiento

La gran sorpresa fue que el mercurio no siguió las predicciones de ninguna de las 3 teorías existentes, sino que ¡la resistencia del mercurio desaparecía abruptamente a una determinada temperatura!  
(después se observó que no habría sido necesario purificar el Hg ya que este efecto persiste aunque haya defectos).

Esta es la gráfica del trabajo original  realizado el 8 de abril de 1911.



<http://commons.wikimedia.org/>

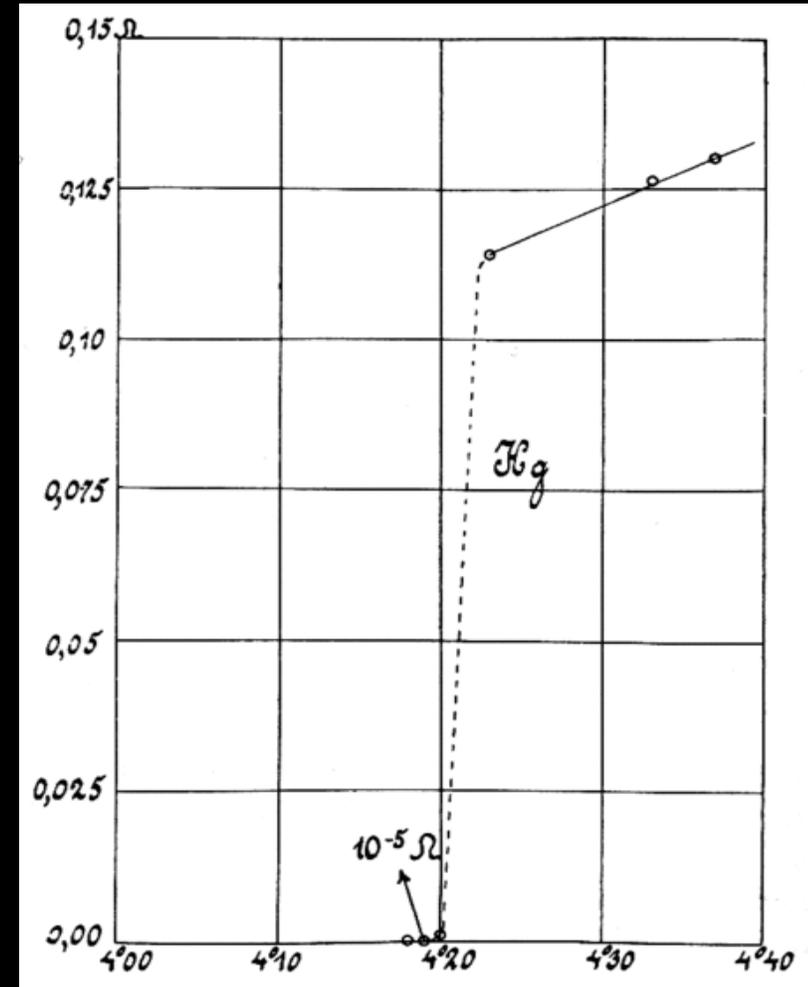
# El descubrimiento

El mercurio sufre una transición de fase a 4,2 K.  
Esta temperatura es su temperatura crítica:  $T_c$ .

Si  $T > T_c$ , el mercurio es metal.

Si  $T < T_c$ , el mercurio es superconductor.

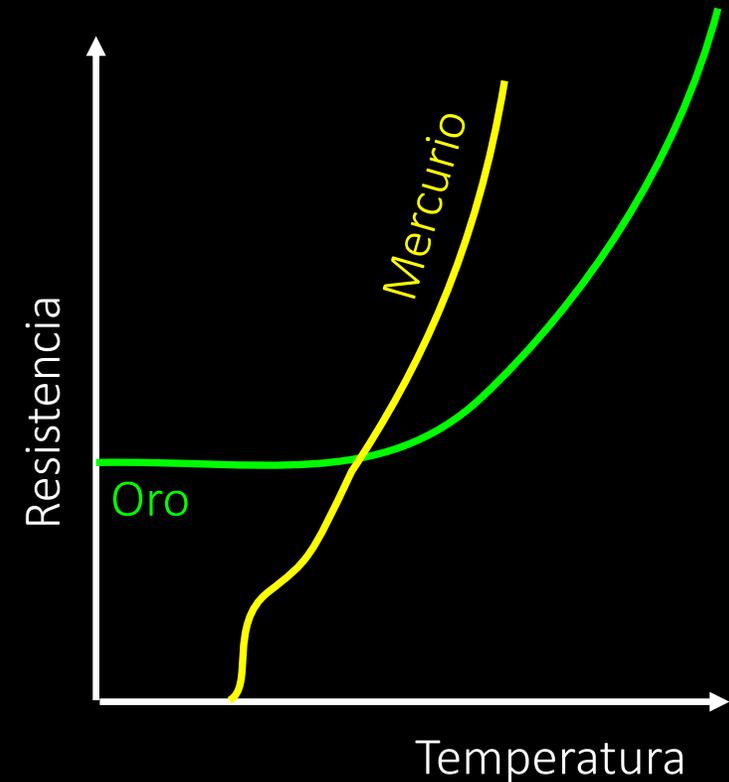
Esta es la gráfica del trabajo original  realizado el 8 de abril de 1911.



<http://commons.wikimedia.org/>

# El descubrimiento

Si hubieran intentado con el oro,  
¡habrían llegado a una conclusión  
muy diferente!



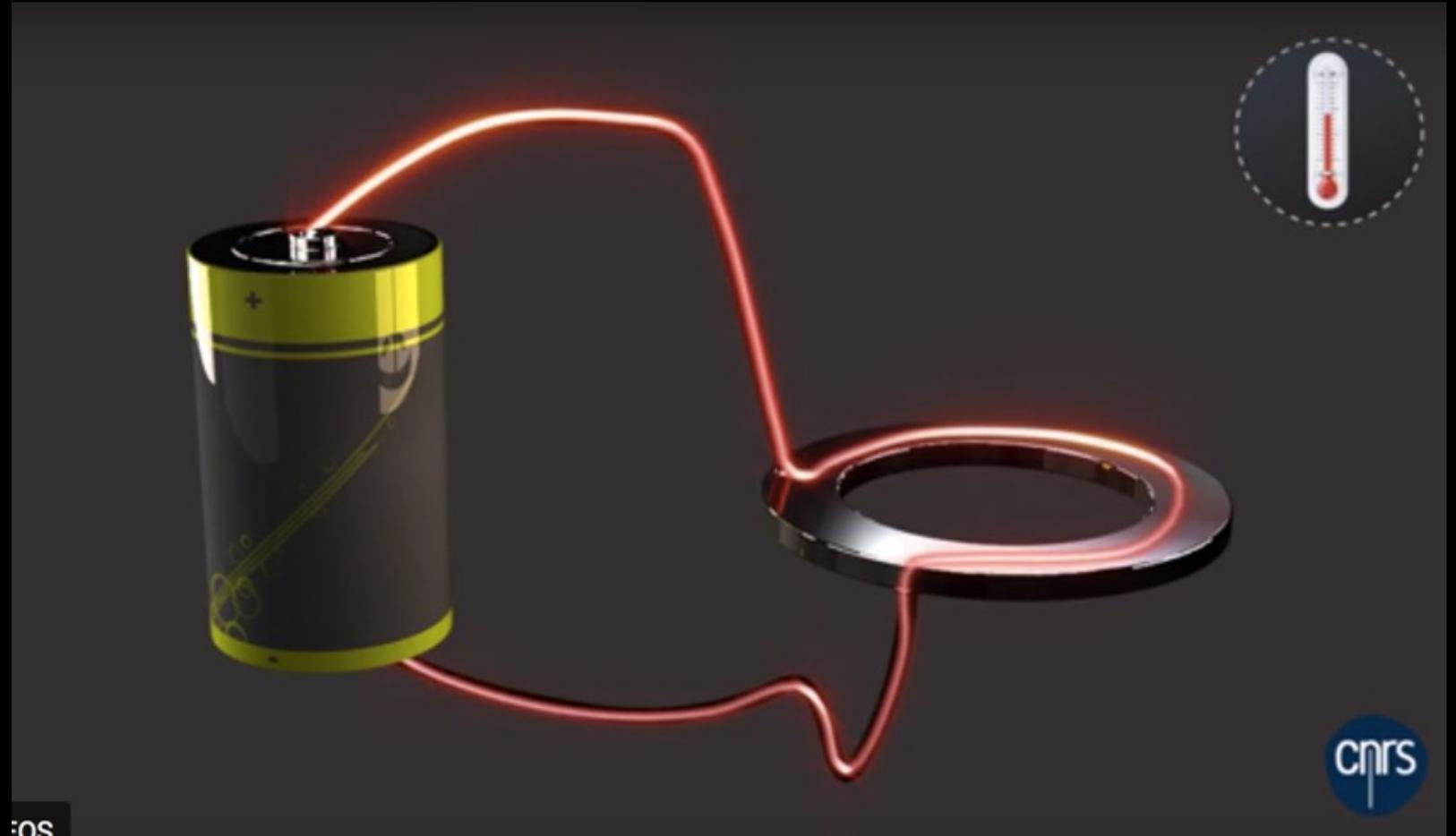
The Nobel Prize in Physics 1913 was awarded to Heike Kamerlingh Onnes “for his investigations on the properties of matter at low temperatures which led, inter alia, to the production of liquid helium”



<https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1913/summary/>

## 1ª propiedad:

Los superconductores no se resisten al paso de la corriente eléctrica



Vídeo:

<https://youtu.be/1wHm7WFB07I>

1ª propiedad:  
Los superconductores no se resisten al paso de la  
corriente eléctrica

2ª propiedad:  
Efecto Meissner (o qué le pasa a un superconductor en  
un campo magnético)

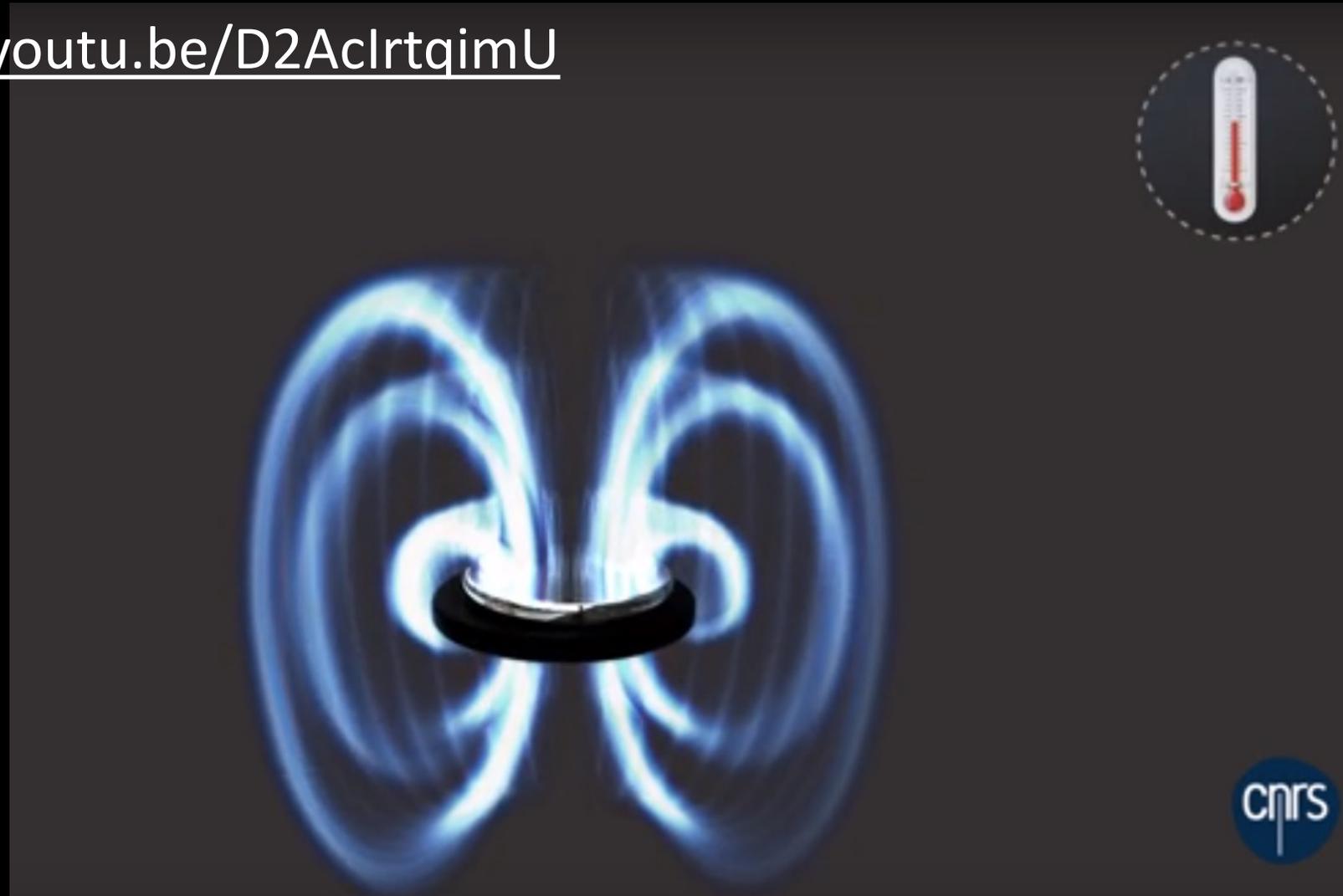


Walther Meissner



Robert Ochsenfeld

Vídeo: <https://youtu.be/D2AclrtqimU>

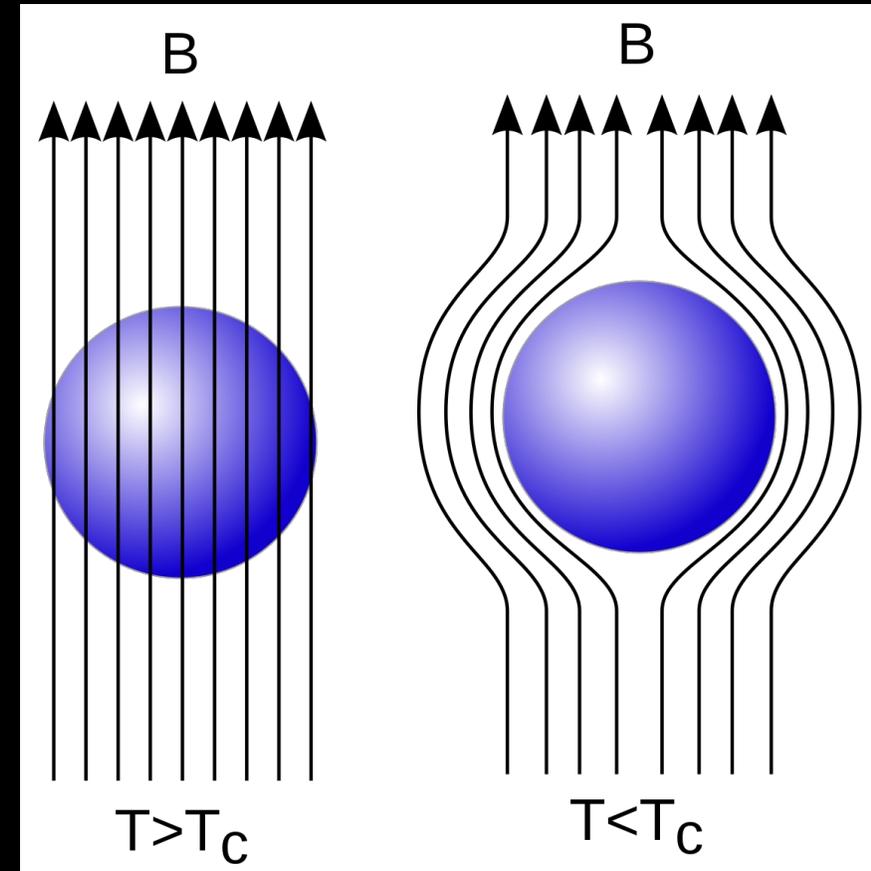


**Efecto Meissner: Los superconductores expulsan los campos magnéticos y levitan**

# ¿Qué está pasando?

El campo magnético decae exponencialmente dentro del superconductor.

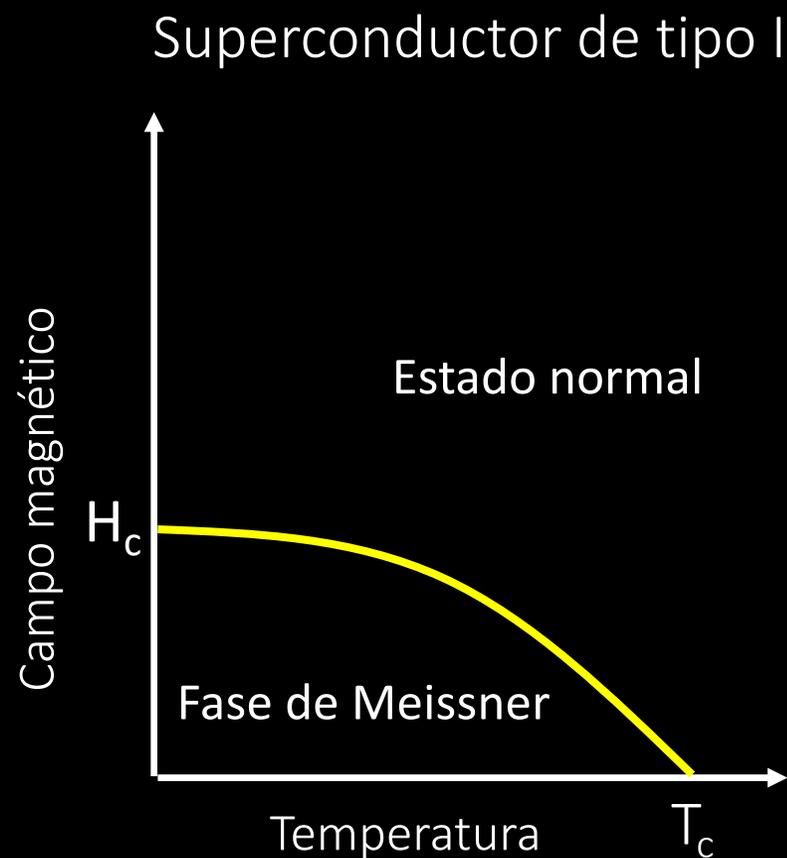
Supercorrientes superficiales “apantallan” el campo magnético aplicado: los superconductores son superdiamagnéticos.



Pero si el campo magnético aplicado es muy alto,  
¡la superconductividad también se destruye!

Por lo tanto, la superconductividad se destruye subiendo la temperatura ( $T_c$ ) o aplicando campo magnético ( $H_c$ ).

Este es su  
diagrama de fases:

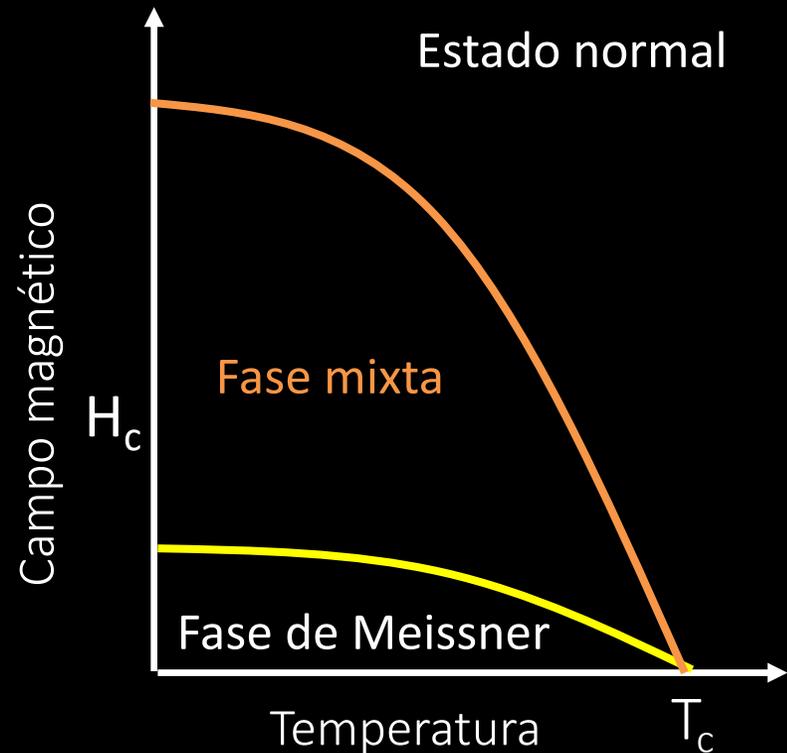


Corrientes eléctricas suficientemente altas ( $I_c$ ), también destruyen la superconductividad.

# Superconductores de tipo II

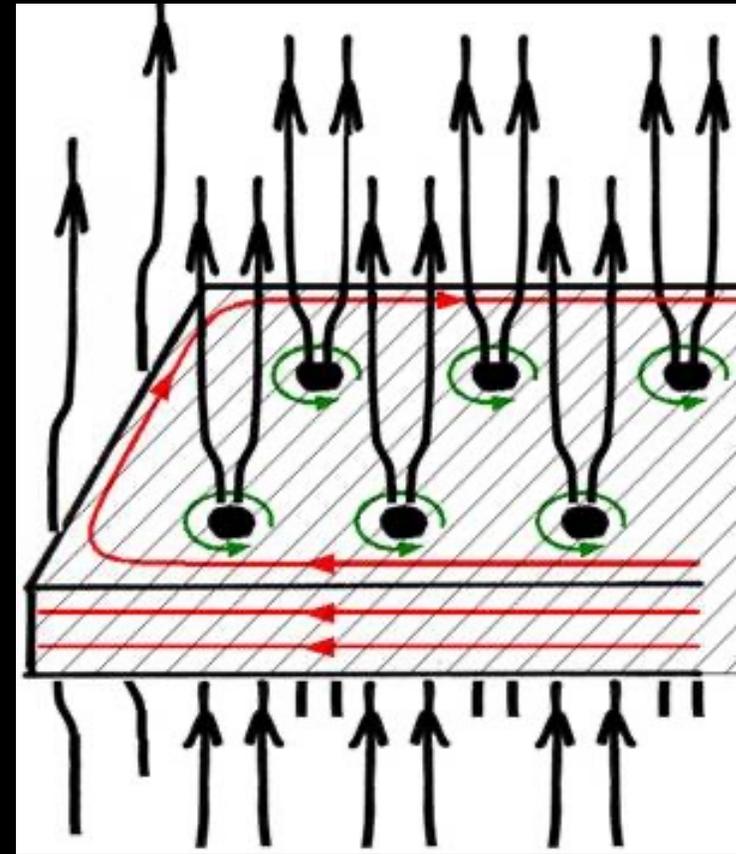
Presentan una fase mixta que permite la penetración de líneas de flujo de campo magnético que destruyen la superconductividad localmente. El resto del material sigue siendo superconductor.

Esto permite que el superconductor soporte campos magnéticos y corrientes mucho más altas que los del tipo I.



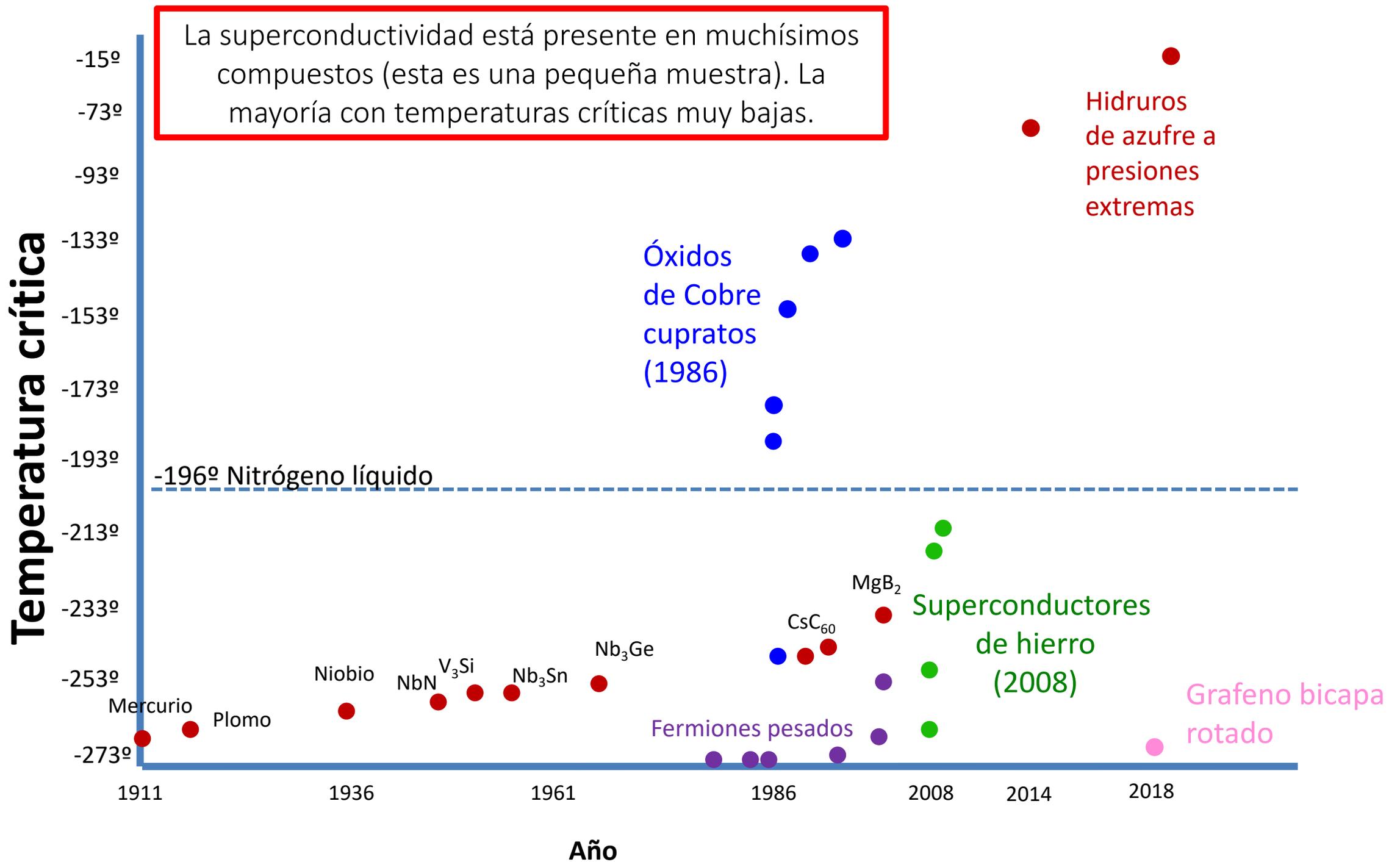
# Superconductores de tipo II

Presentan una fase mixta que permite la penetración de líneas de flujo de campo magnético que destruyen la superconductividad localmente. El resto del material sigue siendo superconductor.



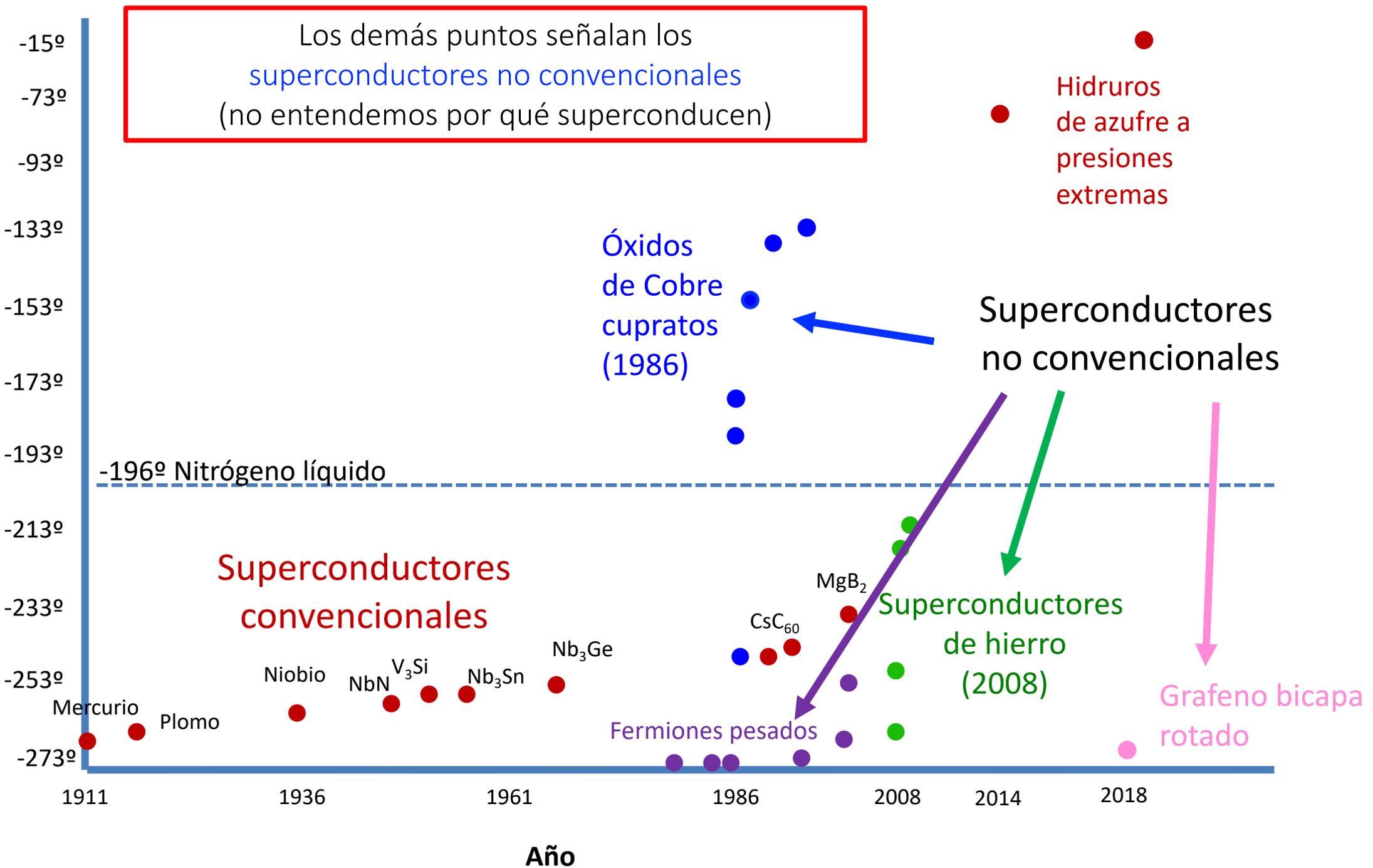
[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Vortex\\_dans\\_un\\_supraconducteur.png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Vortex_dans_un_supraconducteur.png)

Las flechas rojas son las supercorrientes que apantallan el campo exterior y las verdes apantallan el campo que penetra el superconductor, formando vórtices. Los vórtices se “anclan” a defectos del material. El anclaje de los vórtices implica que la levitación de un superconductor de tipo II sobre un imán sea muy especial... (lo verás en los vídeos recomendados al final).





Temperatura crítica



# Superconductores convencionales

## The Nobel Prize in Physics 1972



Photo from the Nobel Foundation archive.

**John Bardeen**

Prize share: 1/3



Photo from the Nobel Foundation archive.

**Leon Neil Cooper**

Prize share: 1/3

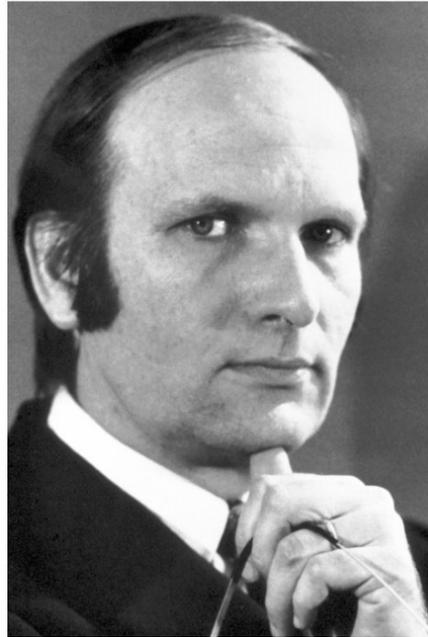


Photo from the Nobel Foundation archive.

**John Robert Schrieffer**

Prize share: 1/3

Bardeen, Cooper y Schrieffer explicaron la superconductividad en 1957, ¡46 años después de su descubrimiento!

# Teoría BCS

<https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1972/summary/>

# Superconductividad: transición de fase electrónica

$$T > T_c$$

Fase metálica

La interacción entre los electrones y con su entorno produce resistencia

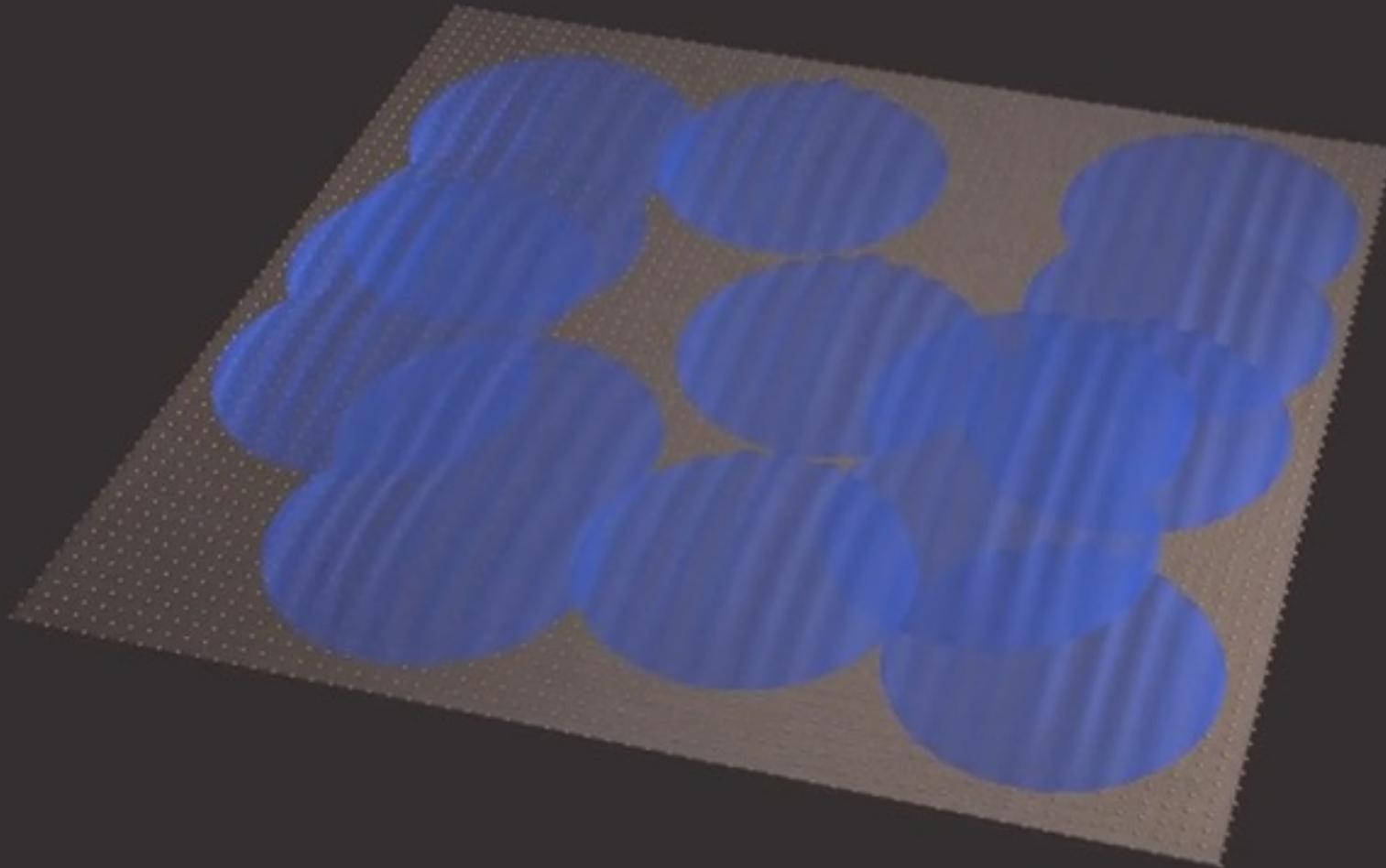
Al disminuir la temperatura, los electrones cambian su forma de interaccionar:

$$T < T_c$$

Fase superconductora

los electrones se emparejan (**pares de Cooper**) y forman un estado cuántico colectivo macroscópico

# Estado cuántico colectivo (estado emergente)



Vídeo: [https://youtu.be/-m\\_dy1nY8T4](https://youtu.be/-m_dy1nY8T4)

# Muchas partículas que interaccionan: *Fenómenos Emergentes*

“More is different” Science 177, 393 (1972). P.W. Anderson

The elementary entities of science X obey the laws of science Y.

X	Y
solid state or many-body physics	elementary particle physics
chemistry	many-body physics
molecular biology	chemistry
cell biology	molecular biology
⋮	⋮
psychology	physiology
social sciences	psychology

But this hierarchy does not imply that science X is “just applied Y.”

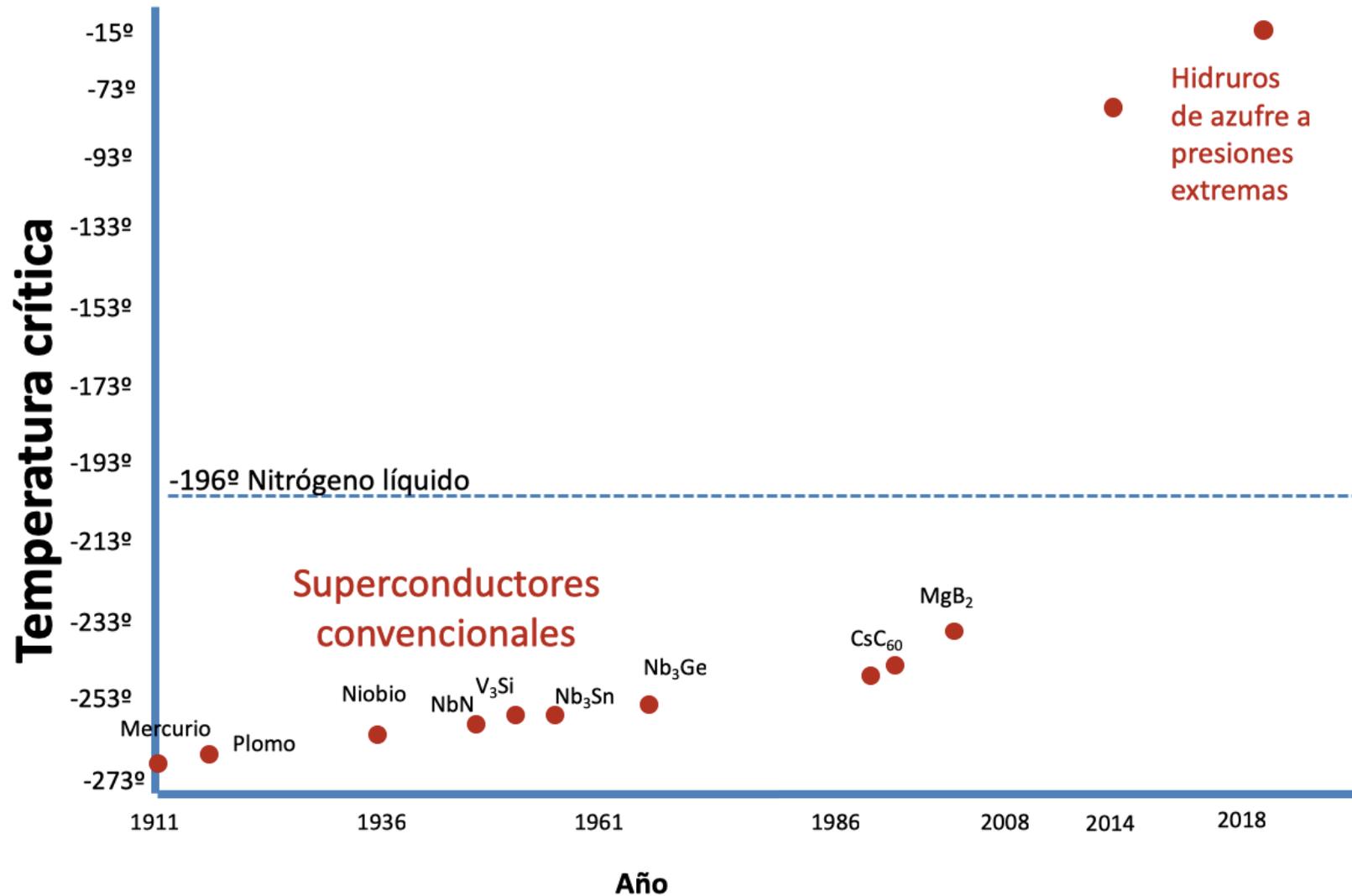
we can see how the whole becomes not only more than but very different from the sum of its parts.

Reduccionismo

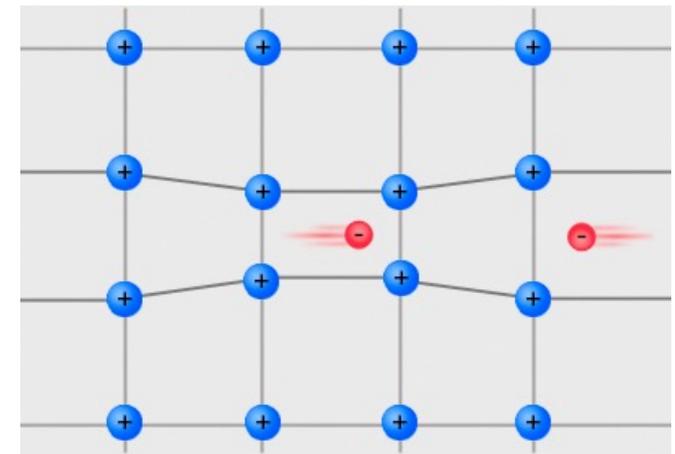
Mecanismo de la superconductividad:  
¿por qué se forman los pares de Cooper....?

...si los electrones se repelen??!!

# Mecanismo de la superconductividad: ¿por qué se forman los pares de Cooper?



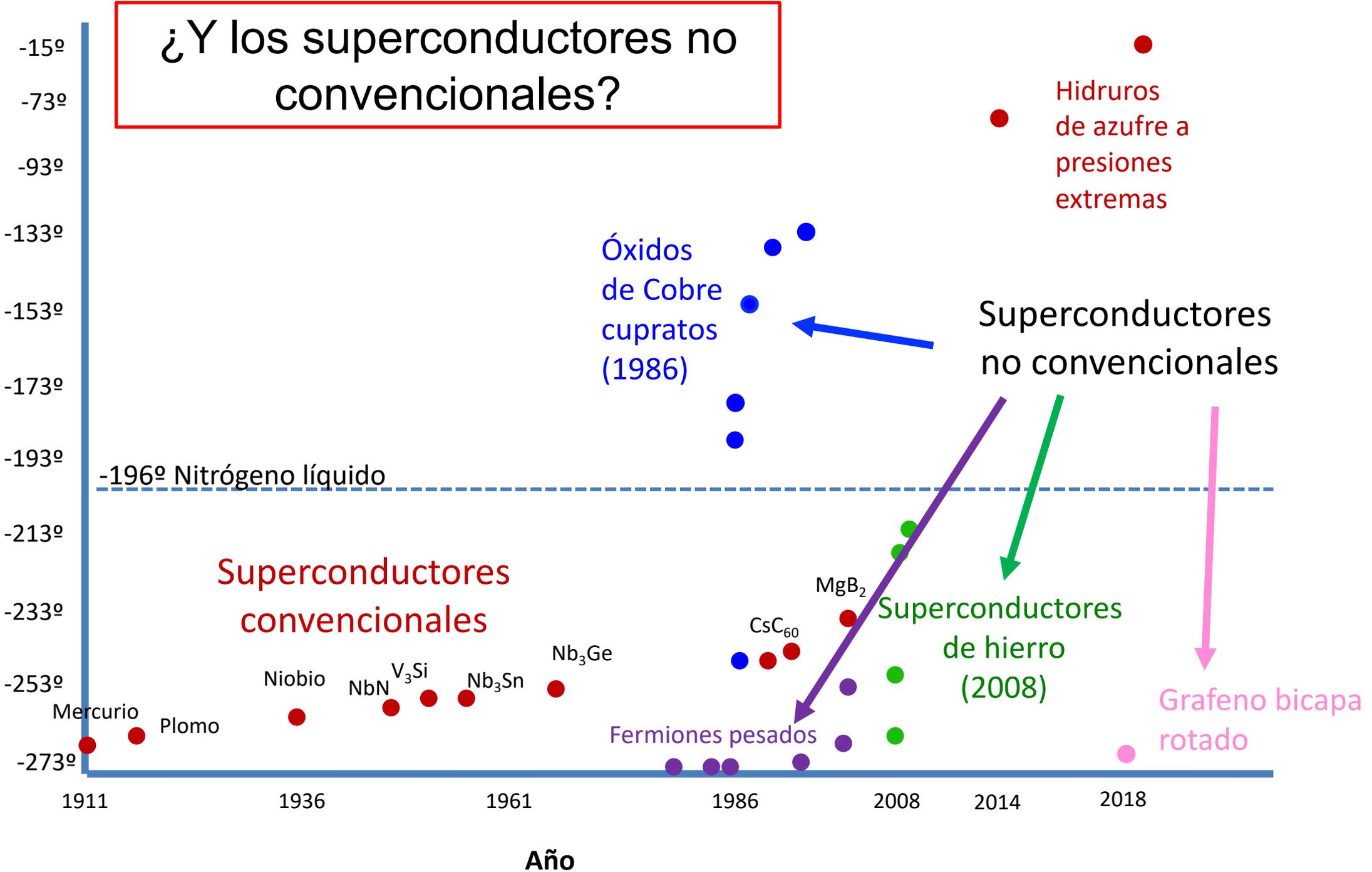
En los superconductores convencionales la clave está en la interacción de los electrones con las vibraciones de la red (fonones).



[https://pt.wikipedia.org/wiki/Par\\_de\\_Cooper#/media/Ficheiro:Cooper\\_pairs.jpg](https://pt.wikipedia.org/wiki/Par_de_Cooper#/media/Ficheiro:Cooper_pairs.jpg)

¿Y los superconductores no convencionales?

Temperatura crítica



## Superconductores no convencionales

son sistemas fuertemente correlacionados (la interacción repulsiva entre los electrones es especialmente fuerte)

Los electrones también forman pares de Cooper pero aún no se conoce cuál es el mecanismo de la superconductividad en estos materiales

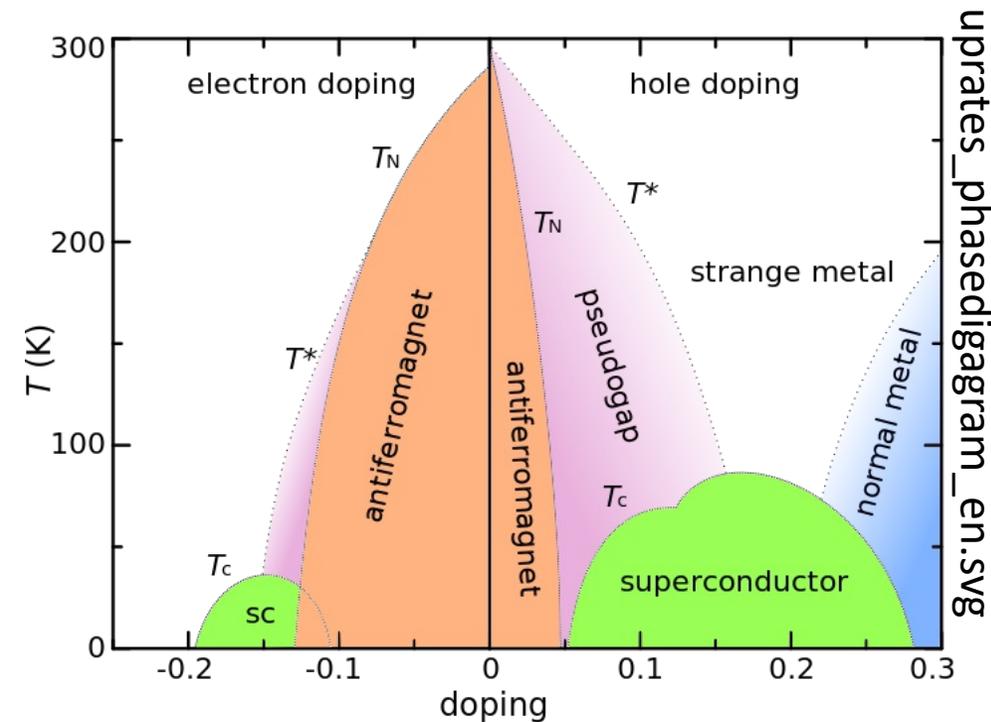
# Superconductores no convencionales

son sistemas fuertemente correlacionados (la interacción entre los electrones es especialmente fuerte)

Los superconductores no convencionales más estudiados son los cupratos (descubiertos en 1986, premio Nobel en 1987: <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1987/summary/>).

Se les llama superconductores de alta temperatura porque fueron los primeros superconductores con  $T_c$  por encima de la temperatura de licuación del nitrógeno líquido (mucho más barato y accesible que el He líquido).

Diagrama de fases de los cupratos



Eje x: Cambio en la composición química

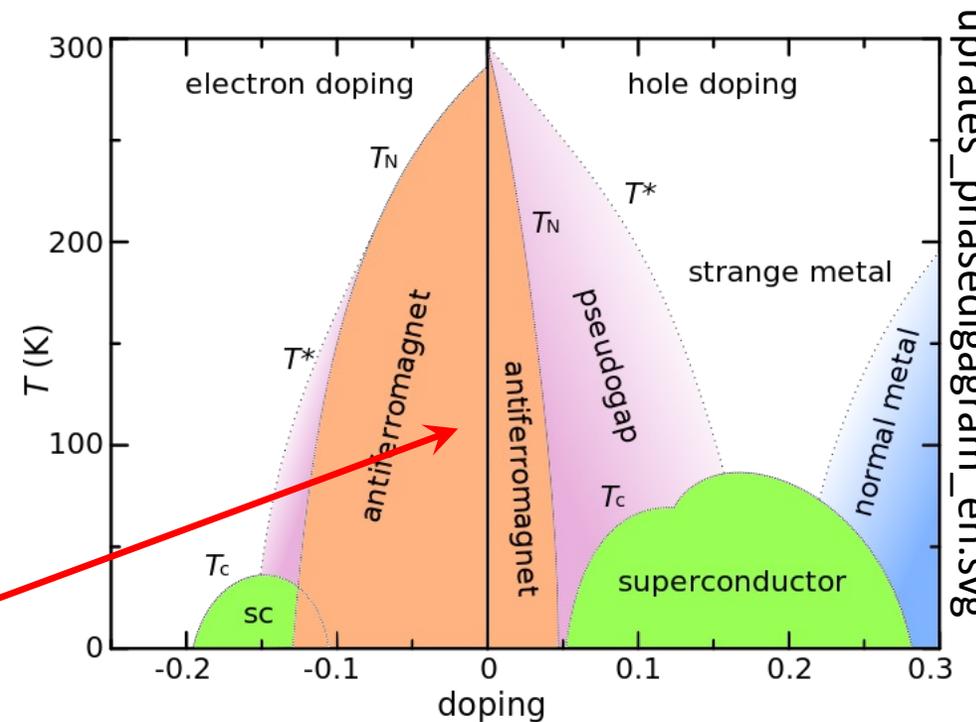
Por ej.  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6+\delta}$

Además de la superconductividad, en los sistemas fuertemente correlacionados surgen otras fases “emergentes”, como el **aislante de Mott**.

Los aislantes de Mott son materiales que se esperaría que fueran metálicos pero las interacciones entre los electrones los convierten en aislantes.

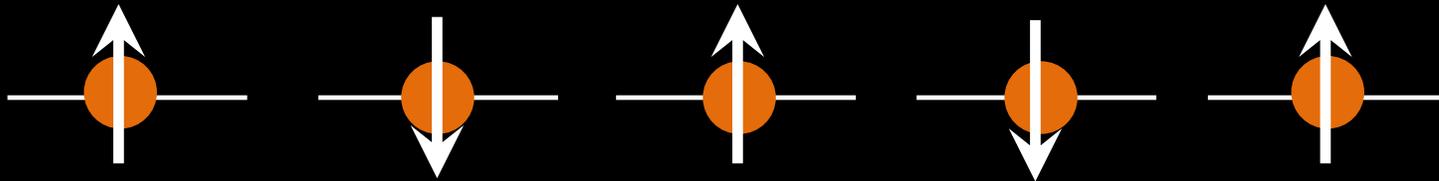
Aislante de Mott

Diagrama de fases de los cupratos



Eje x: Cambio en la composición química  
Por ej.  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6+d}$

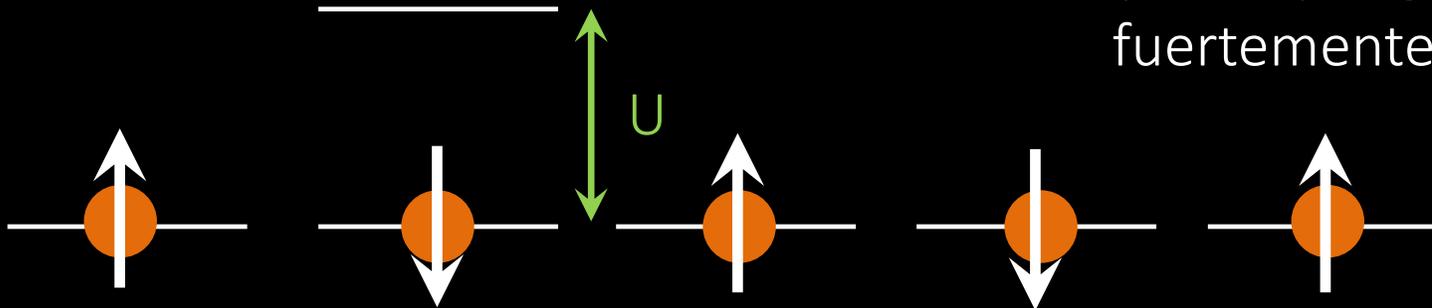
# Sistemas de electrones fuertemente correlacionados: aislante de Mott



Si los electrones se pueden mover entre los sitios de la red de iones,  
“ganan” energía cinética: metal

# Sistemas de electrones fuertemente correlacionados: aislante de Mott

1 electrón por sitio: aislante de Mott  
Si quito o pongo electrones: metal  
fuertemente correlacionado.



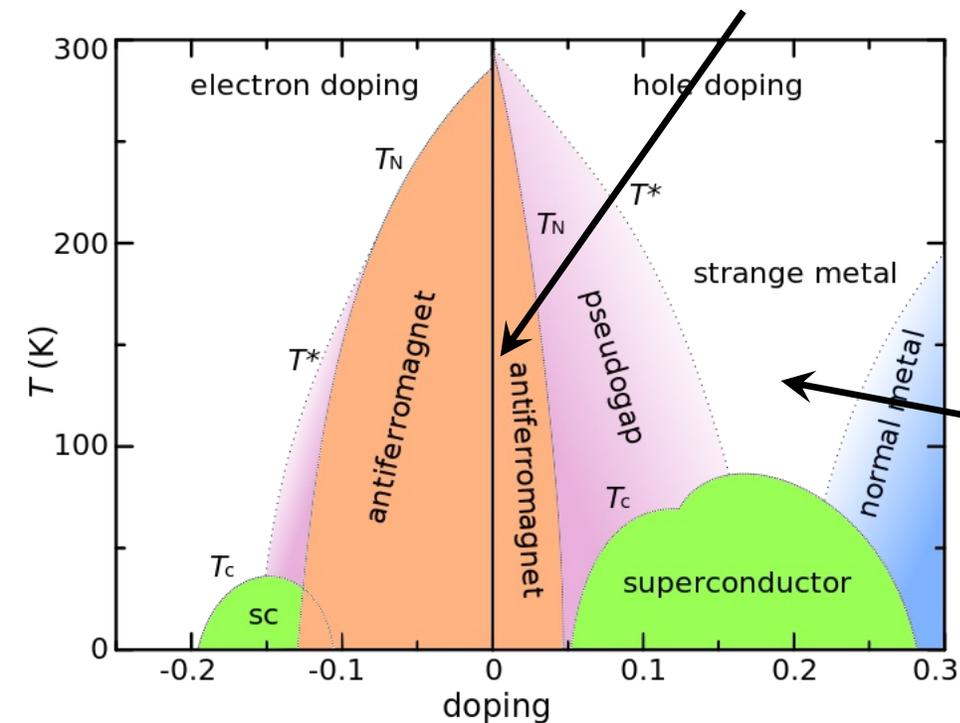
Si los electrones se pueden mover entre los sitios de la red de iones,  
“ganan” energía cinética: metal

En los sistemas fuertemente correlacionados la energía que hay que pagar por poner 2 electrones en el mismo sitio es muy alta. Por esto, si tienes un electrón por sitio, prefieren quedarse “quietos” (aislante)

Los superconductores no convencionales son sistemas fuertemente correlacionados

Cupratos

Aislante de Mott



Metal fuertemente correlacionado



De aquí surge la superconductividad no convencional

[https://en.wikipedia.org/wiki/File:Cuprates\\_phasedigram\\_en.svg](https://en.wikipedia.org/wiki/File:Cuprates_phasedigram_en.svg)

Curso de posgrado <https://wp.icmm.csic.es/emergence/>



# Últimos hitos en superconductividad

Temperatura crítica

-15°  
-73°  
-93°  
-133°  
-153°  
-173°  
-193°  
-213°  
-233°  
-253°  
-273°

1911 1936 1961 1986 2008 2014 2018

-196° Nitrógeno líquido

Superconductores convencionales

Óxidos de Cobre cupratos (1986)

Temperaturas críticas cerca de la ambiente (¡¡pero necesita presiones de 200 GPa!!)  
ALGUNOS EXPERIMENTOS MUY RECIENTES SE HAN PUESTO EN DUDA

Superconductores de hierro (2008)

Fermiones pesados

Grafeno bicapa rotado



Mercurio

Plomo

Niobio

NbN

V<sub>3</sub>Si

Nb<sub>3</sub>Sn

Nb<sub>3</sub>Ge

CsC<sub>60</sub>

MgB<sub>2</sub>

2008

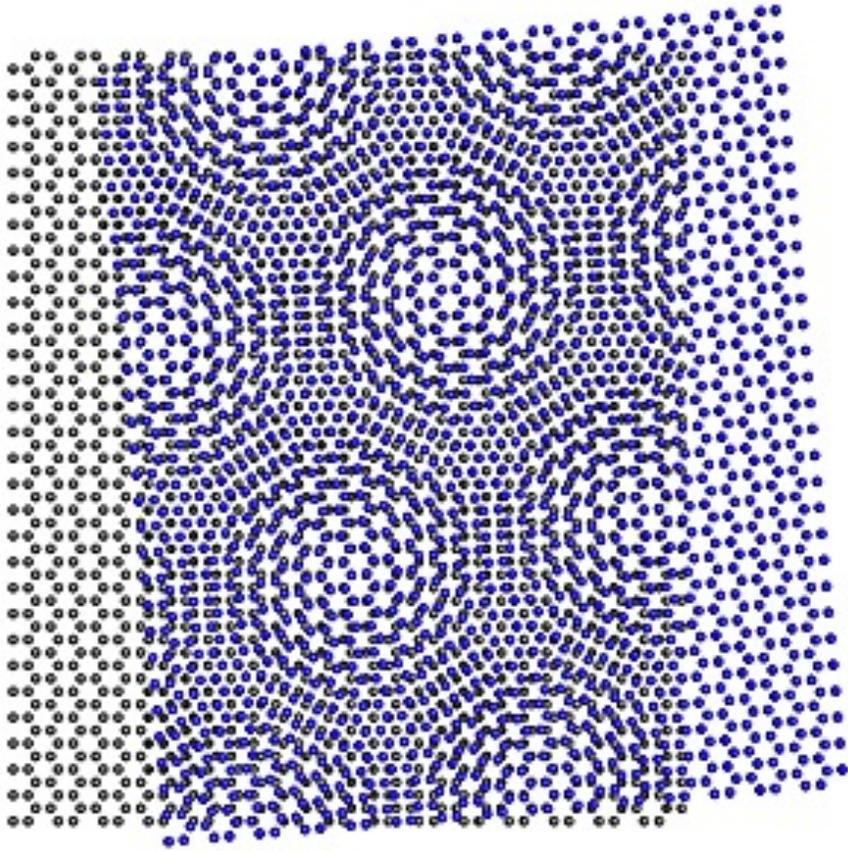
2014

2018

Año

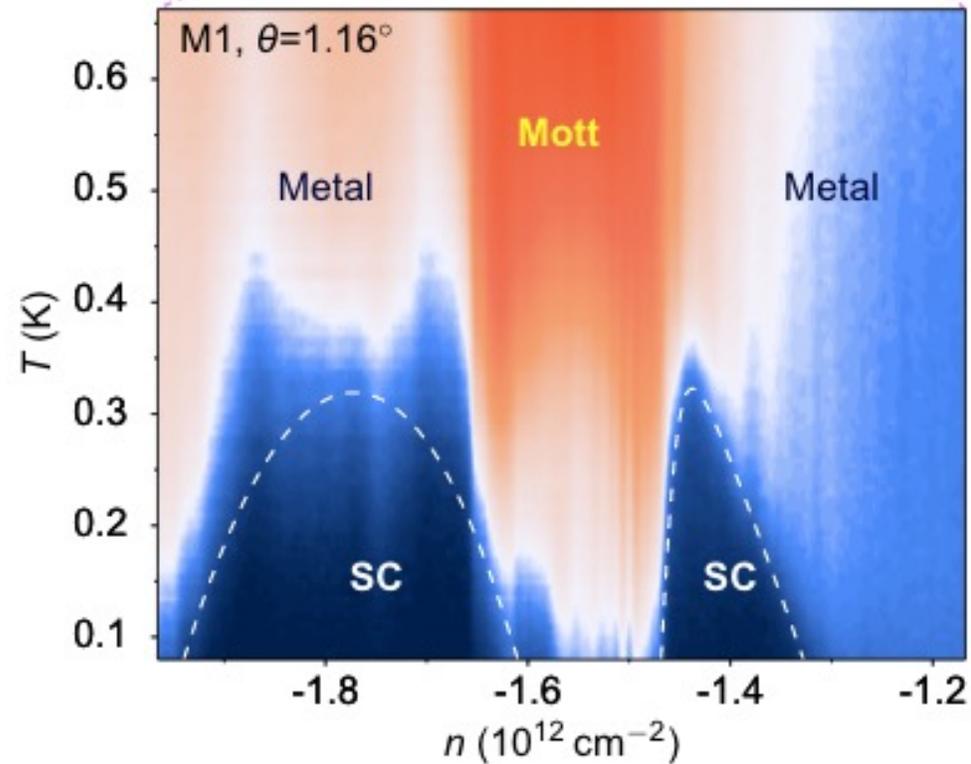


# Superconductividad en el grafeno bicapa rotado



Grafeno bicapa rotado

Grafeno bicapa rotado



*Nature* **556**, 43 (2018)

Muestra características que recuerdan al diagrama de fases de los cupratos.

Vídeo de la primera presentación de este trabajo de Pablo Jarillo-Herrero  
<https://www.youtube.com/watch?v=O2HVCjhuJIE>

Y un par de vídeos:

[https://www.youtube.com/watch?v=XN\\_UOoACLq0](https://www.youtube.com/watch?v=XN_UOoACLq0)

<https://www.youtube.com/watch?v=D3rz3mVqQtQ>

# Superconductividad en España

En este link puedes encontrar información de 42 grupos que trabajan en superconductividad en España:

<https://gefes-rsef.org/superconductivity-in-spain/>