

Curso: Materiales avanzados y nanotecnología

Docente: Dra. Sandra M. Mendoza

smendozaus@yahoo.com

Cel. 3482 651357

Ciclo lectivo 2025, UTN

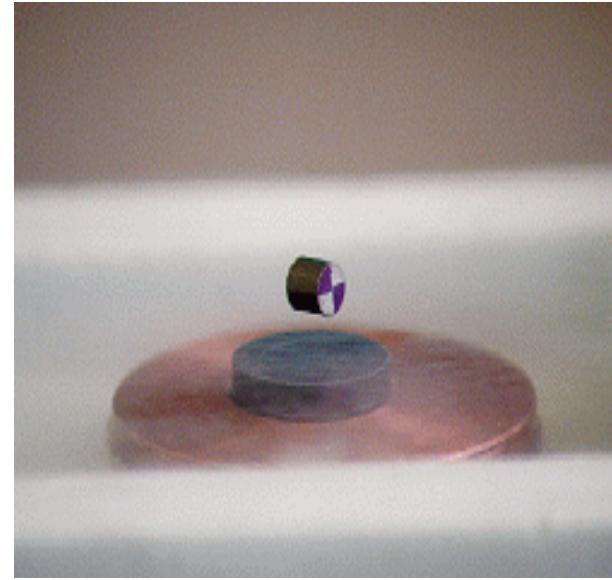
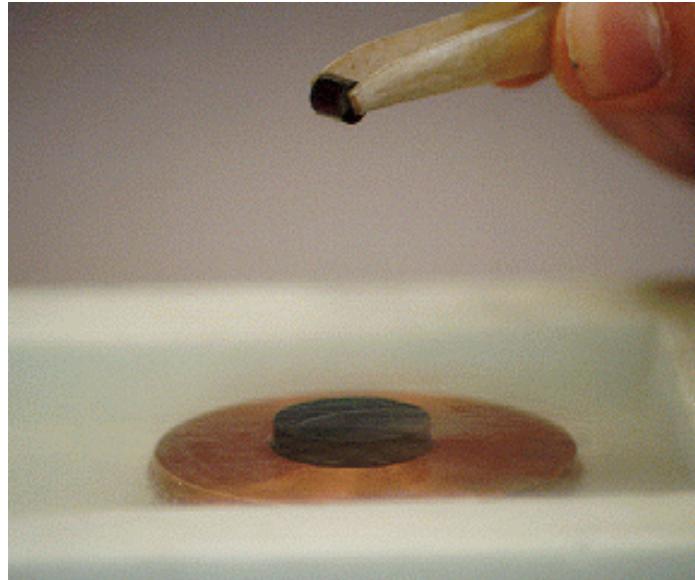
Unidad 6

Superconductividad

Definición – Introducción a los distintos tipos de superconductores. Breve introducción histórica. Elementos y aleaciones superconductores. Superconductores tipos I y II. Cerámicos superconductores. Aplicaciones.

Superconductividad

Imán levitando sobre un superconductor:



Fuente: Universidad de Oslo, Laboratorio de superconductividad

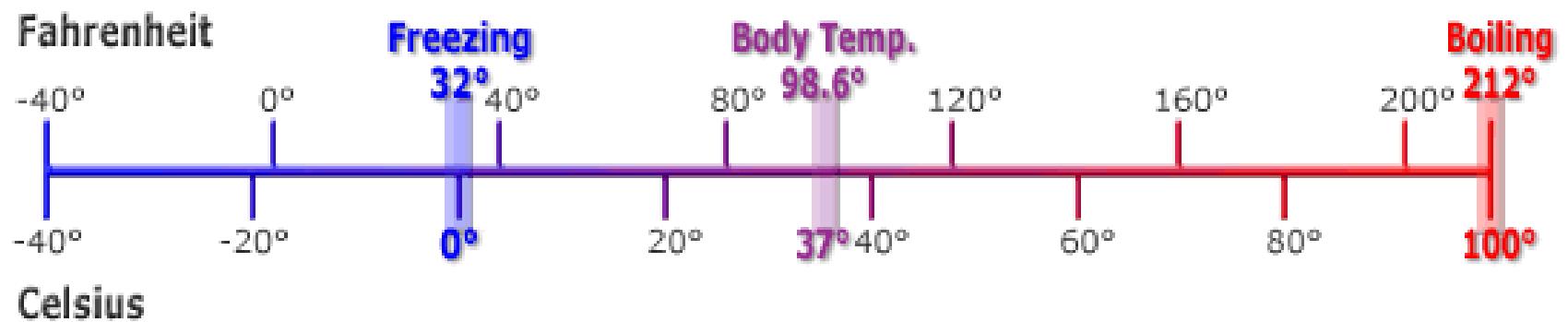
Definición

Se define como **superconductividad a la capacidad que tienen algunos materiales de conducir corriente eléctrica sin pérdida de energía.**

Es el flujo de corriente eléctrica sin resistencia, que se manifiesta en ciertos metales, aleaciones y cerámicas a temperaturas cercanas al cero absoluto, y en algunos casos, a temperaturas cientos de grados sobre el cero absoluto = -273°C.

Equivalencia de temperaturas

Temperaturas	F	C	K
P. de ebullición del agua	212.0	100.0	373.2
Temperatura corporal	98.6	37.0	310.2
T. en el interior de un edificio	77.0	25.0	298.2
Congelamiento del agua	32.0	0.0	273.2
Congelamiento del mercurio	-37.8	-38.8	234.4
Hielo seco (CO_2)	-108.4	-78.0	195.2
Oxígeno líquido	-297.4	-183.0	90.2
Nitrógeno líquido	-320.8	-196.0	77.2
Helio líquido	-452.1	-269.0	4.2
Cero absoluto	-459.7	-273.2	0.0



Fórmulas para transformar temperaturas:

- Grados Fahrenheit = $(9/5 * \text{Celsius}) + 32$
- Grados Celsius = $5/9(\text{Grados Fahrenheit} - 32)$
- Grados Kelvin = Degrees Celsius + 273

¿Qué es un superconductor?

Es un material con 2 características principales:

1) Resistividad eléctrica cero

Esto significa que la corriente eléctrica en un anillo superconductor continuará indefinidamente hasta que se aplique una fuerza opuesta.

2) El campo magnético dentro del material es cero (efecto Meissner).

Cuando se aplica un campo magnético al material, fluye corriente en su parte más externa (en su superficie), induciendo un campo magnético exactamente opuesto al campo aplicado. Como resultado, el material es fuertemente diamagnético.

Experimentalmente se puede observar el efecto Meissner haciendo levitar un imán sobre un material superconductor debidamente enfriado.

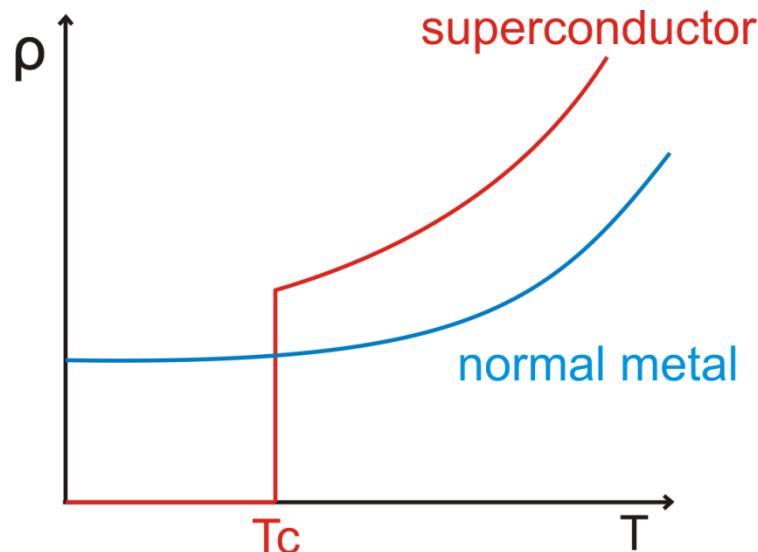
¿Qué es un superconductor?

Reducción de la resistividad a medida que la temperatura decrece:

$$\rho = \rho_0 (1 + \alpha(T - T_0))$$

ρ : resistividad

α : coeficiente de temperatura lineal de la resistividad.



Ejemplos:

Resistividad de un superconductor: $\rho_s \sim 4 \times 10^{-23} \Omega \text{ cm}$

Resistividad de un metal no superconductor $\rho_m \sim 1 \times 10^{-13} \Omega \text{ cm}$

¿Qué es un superconductor?

- ❑ La mayoría de los materiales superconductores se comportan como tales a muy bajas temperaturas, cercanas al 0 absoluto.
- ❑ A temperaturas superiores a una temperatura crítica (T_c), el material se comportará como un conductor metálico convencional o incluso como un aislante.
- ❑ Tan pronto como la temperatura decrece por debajo de T_c , la resistividad disminuye a cero y la corriente eléctrica fluye sin resistencia.

¿Qué es un superconductor?

Además:

3) Destrucción de la superconductividad por campos magnéticos.

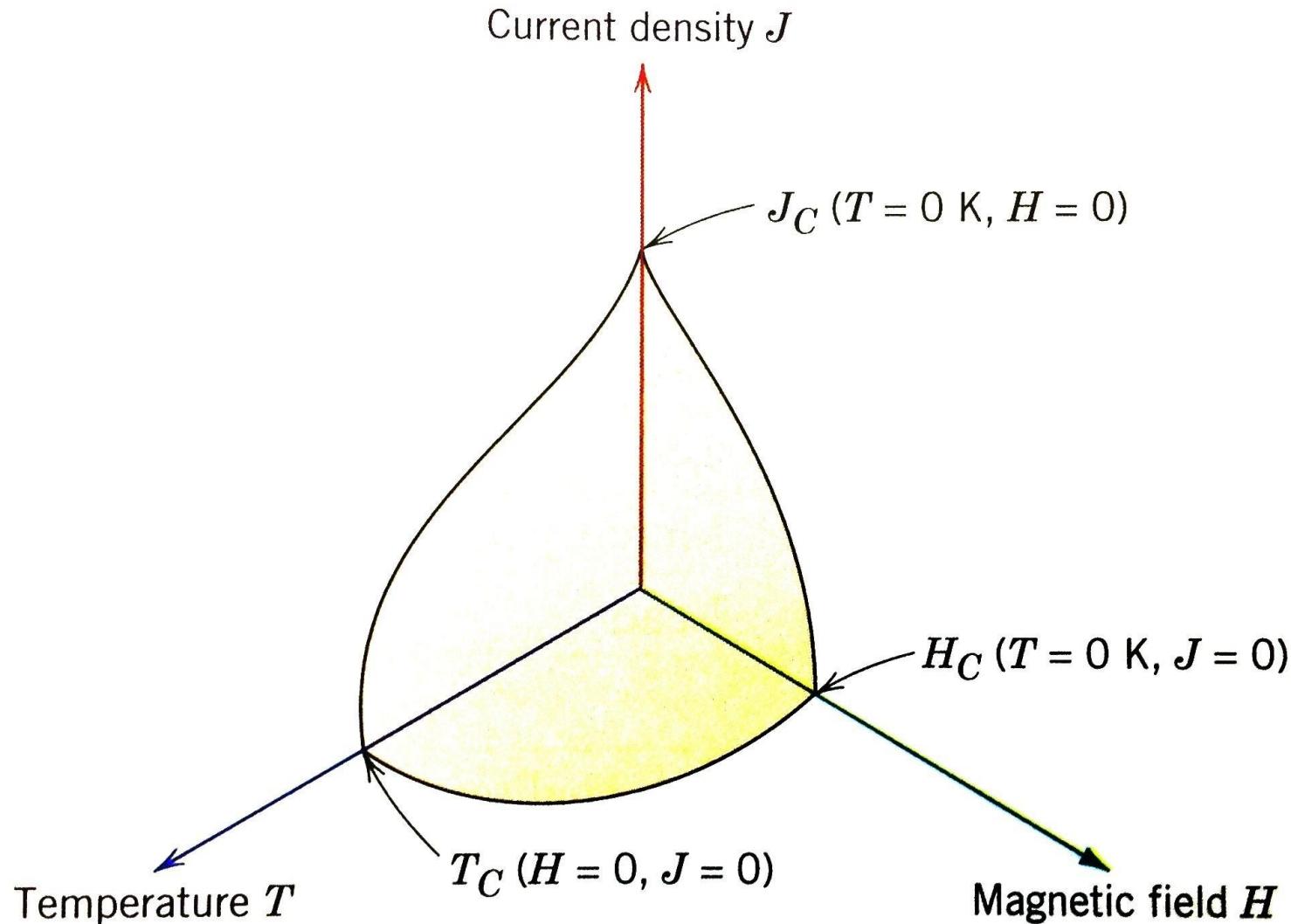
La tercera propiedad fundamental de un superconductor consiste en que, al aplicar un campo magnético superior a un valor crítico, H_c , a una muestra superconductora, ésta recupera su resistencia eléctrica normal, provocando la desaparición de la superconductividad.

Relación entre temperatura, campo magnético y densidad de corriente en el estado superconductor.

El estado superconductor es definido por tres factores muy importantes: temperatura crítica (T_c), campo crítico (H_c) y densidad de corriente crítica (J_c). Cada uno de estos parámetros depende de los otros dos:

- Temperatura crítica (T_c): la temperatura más alta a la cual la superconductividad ocurre en un material. Debajo de esta temperatura de transición, la resistencia del material es igual a cero.
- Campo magnético crítico (H_c): por encima de este valor de campo magnético, externamente aplicado, un superconductor deja de ser superconductor.
- Densidad de corriente crítica (J_c): es el máximo valor de la corriente eléctrica por unidad de área (sección transversal) que un superconductor puede llevar sin resistencia.

Relación entre temperatura, campo magnético y densidad de corriente en el estado superconductor.



Campo magnético crítico

- ☐ El campo magnético crítico que destruye la superconductividad obedece a una relación parabólica según:

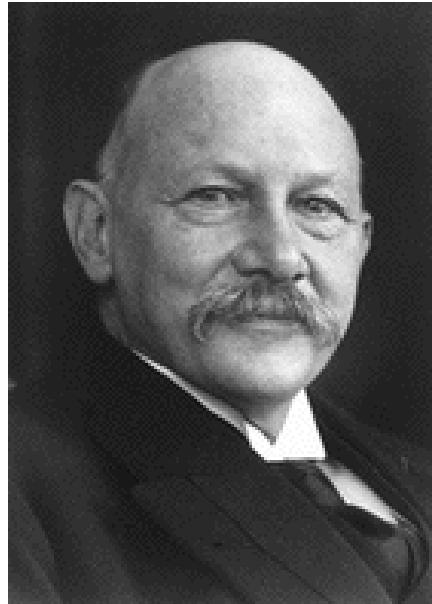
$$H_c = H_o \left[1 - \left(\frac{T}{T_c} \right)^2 \right]$$

donde H_o = constante, T = temperatura, T_c = temperatura crítica.

- ☐ En general, a mayor T_c , mayor H_c .

Descubrimiento de la Superconductividad

La superconductividad fue descubierta en 1911 por el físico holandés, Heike Kammerlingh Onnes.

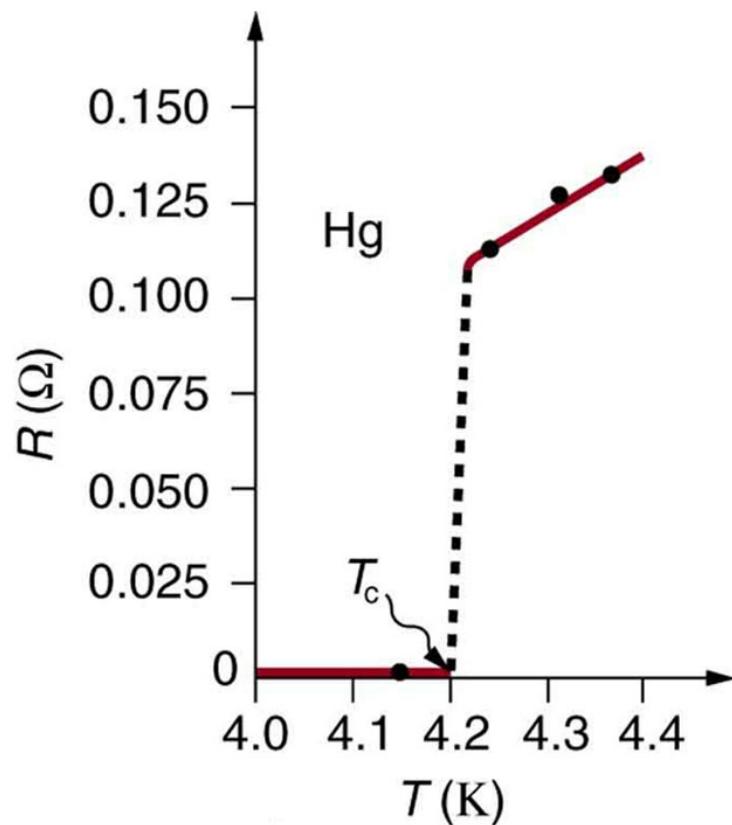


Fuente: Fundación Nobel

El Descubrimiento

- ❑ Onnes pensó que, a bajas temperaturas, decrecería la resistencia de un alambre frío y se lograría una mejor conducción de la electricidad.
- ❑ Los científicos creían que a un cierto punto de muy bajas temperaturas, la resistencia alcanzaría un valor mínimo permitiendo que la corriente fluya con poco o nada de resistencia.
- ❑ Onnes pasó una corriente a través de un alambre de mercurio puro y midió su resistencia mientras bajaba constantemente la temperatura. Para su sorpresa, registró que no había ninguna resistencia a 4.2K.

A 4.2K, la resistencia eléctrica (la oposición de un material al flujo de la corriente eléctrica) desapareció, lo que significó una conducción de la electricidad extremadamente buena:
Superconductividad



Descubrimiento de materiales superconductores

Elementos que se vuelven superconductores a baja temperatura.

Fuente: www.magnet.fsu.edu

The following table highlights elements that become superconductors at low temperatures, categorized by the condition under which they exhibit superconductivity:

1 H	2 He																
3 Li	4 Be																
11 Na	12 Mg																
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
55 Cs	56 Ba	57 La	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Ti	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
87 Fr	88 Ra	89 Ac	104 Rf	105 Ha	106 Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Uub						

This table provides a detailed view of the lanthanide and actinide series, which are also notable for their superconducting properties:

58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cr	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr

Descubrimiento de materiales superconductores

1911 – 4K. Mercurio (Hg) Onnes descubre la superconductividad. Pronto encuentra el mismo efecto en plomo y estaño.

1930 – 10K. Níquel (Ni).

1941 – 16K. Nitruro de niobio. Se comienza a buscar superconductividad en aleaciones.

1953 – 17.5K V₃Si

1971 – 23K Nb₃Ge

1986 – 30K LBCO. Investigadores de IBM crean el primer superconductor base de cobre, usando óxidos de lantano, bario y cobre.

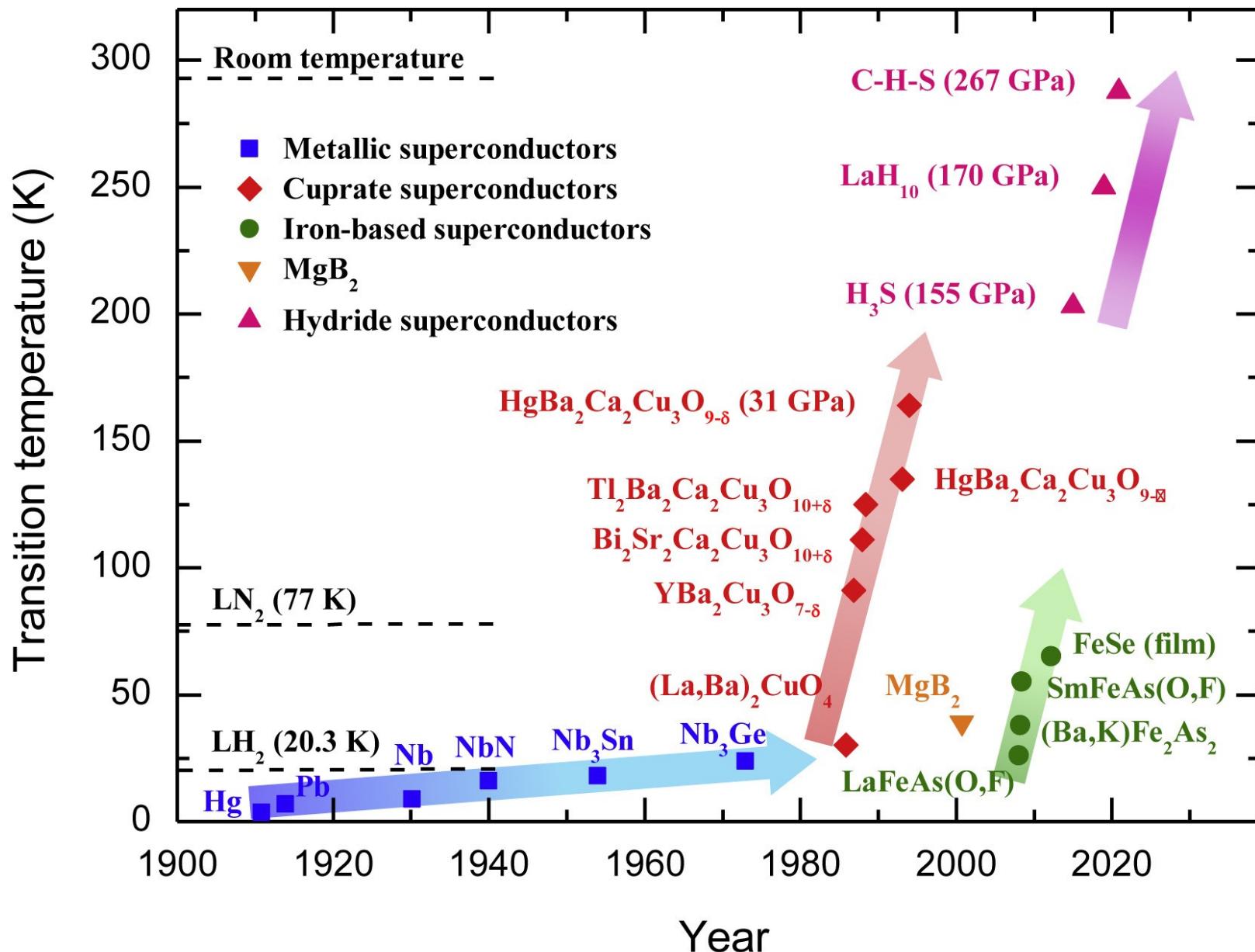
1987 – 92.0K YBCO primer material superconductor a temperaturas superiores al nitrógeno líquido. Se obtuvo al sustituir lantano por itrio.

1993 – 133K HgBa₂Ca₂Cu₃O₈ es aún el superconductor de mayor temperatura a presión atmosférica.

1993 – 147.0K Hg_{0.8}Tl_{0.2}Ca₂Cu₃O₈ Se logró aumentar la temperatura crítica sometiendo el material a presiones extremas.

2015 – 203K. Rompen récord de superconductividad gracias a compuesto con olor a huevo podrido. El sulfuro de hidrógeno puede conducir la electricidad sin resistencia a una temperatura récord de -70°C., pero bajo una presión de 1,5 millones de bars.

Descubrimiento de materiales superconductores a lo largo de los años

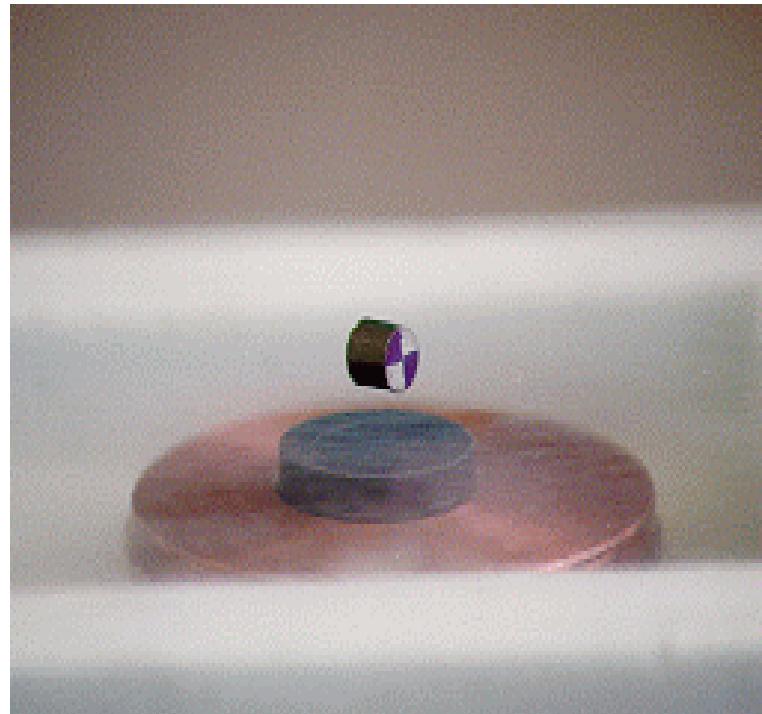


Fuente: Chao Yao and Yanwei Ma. iScience 24, 102541, June 25, 2021.

El efecto Meissner

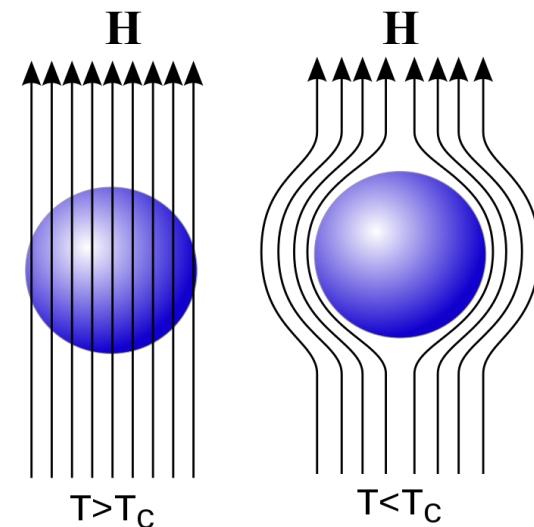
Efecto por el cual se observa la levitación de un imán sobre un superconductor frío.

Si un superconductor se enfria debajo de su temperatura crítica, el imán induce corriente eléctrica en el superconductor. Esta corriente crea una fuerza magnética que hace que los dos materiales se rechacen. Como resultado, se puede ver como el imán levita sobre el superconductor.



El efecto Meissner. Diamagnetismo perfecto

Los superconductores en el estado de Meissner exhiben diamagnetismo perfecto, o superdiamagnetismo, lo que significa que el campo magnético total es muy cercano a cero en su interior. El diamagnetismo se define como la generación de una magnetización espontánea en un material, la cual se opone a la dirección de un campo magnético externo aplicado.



Sin embargo, los orígenes fundamentales del diamagnetismo en superconductores y materiales normales son muy diferentes. En materiales no superconductores, el diamagnetismo surge como resultado del spin orbital de los electrones alrededor del núcleo de un átomo, inducido electromagnéticamente por un campo externo.

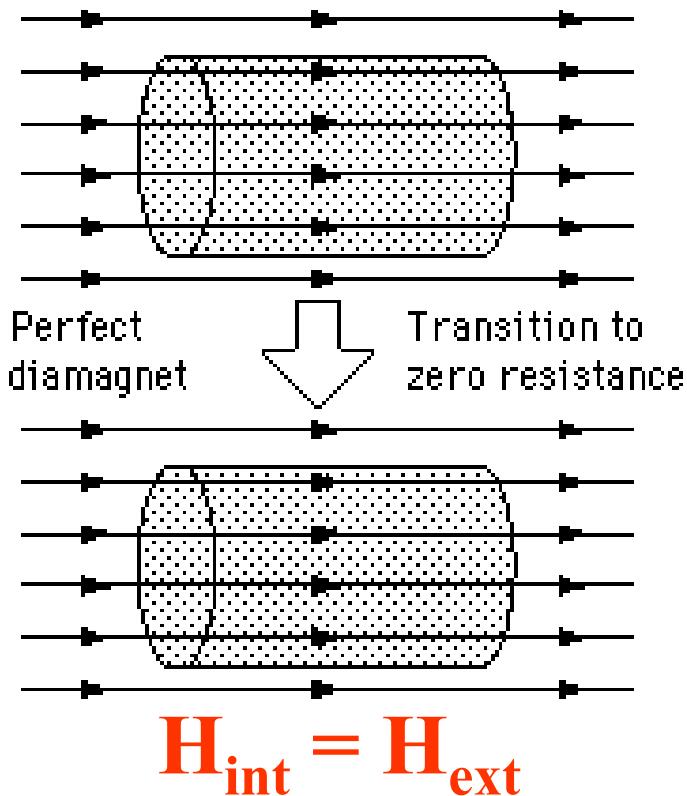
En los superconductores, el diamagnetismo perfecto se atribuye no solo al spin orbital, sino principalmente al flujo de corriente eléctrica que surge para oponerse al campo magnético aplicado (el efecto Meissner).

Al explicar el efecto Meissner, se determinó que:

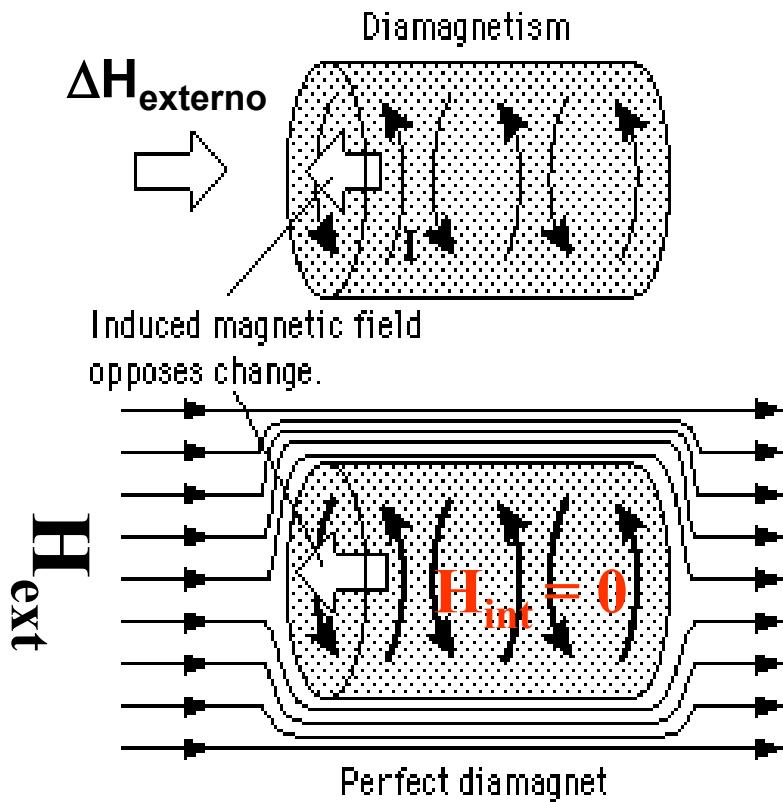
- a) el campo magnético debe ser nulo en el interior del superconductor,
- b) Las corrientes eléctricas están limitadas a la *superficie* del superconductor, en una capa de espesor nanométrico, que se conoce como la **longitud de penetración**, siendo nulas en el interior.

El efecto Meissner. Diamagnetismo perfecto

Estado normal



Superconductor



Ver videos:

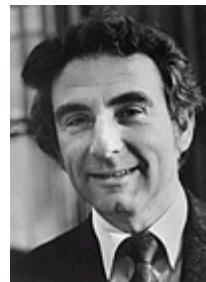
- Práctica de laboratorio: Efecto Meissner
- Tren levitando

Teoría BCS

- ❑ El comportamiento de electrones dentro de un superconductor es sumamente diferente a lo que se da en un conductor regular.
- ❑ Las impurezas y rosamiento que el material puedas tener todavía están allí si la temperatura disminuye, pero el movimiento de los electrones superconducidos cambia.
- ❑ Cuando los electrones son superconducidos, viajan a través del conductor sin obstáculo alguno en el complejo enredaje del cable o material.
- ❑ Debido a que no topan con nada y por ello no crean ninguna fricción, no existe resistencia ni pérdida de energía.

Teoría BCS

- La comprensión de la superconductividad avanzó notablemente hacia 1957 gracias a tres físicos americanos, Juan Bardeen, Leon Cooper y Juan Schrieffer, con su teoría de la superconductividad, conocida como la teoría de BCS.



Bardeen, Cooper, and Schrieffer, respectivamente.

Fuente: Fundación Nobel

- La teoría de BCS explica cómo se da la superconductividad a temperaturas cercanas al cero absoluto.
- Explicaron el fenómeno planteando la idea de que los electrones se agrupan en equipos (pares) que podrían pasar todos los obstáculos que causaban resistencia en el conductor.

Teoría BCS

- La teoría de BCS demuestra que los electrones se pueden atraer uno a otros a través de interacciones en la red cristalina del material. Esto ocurre a pesar del hecho de que los electrones tienen la misma carga.
- Cuando los átomos de la red oscilan entre las regiones positivas y negativas, el par de electrones se junta y se separa alternativamente sin que exista colisión alguna.
- La formación de pares de electrones es favorable porque tiene el efecto de poner el material en un estado más bajo de la energía.
- Cuando los electrones se ligan juntos en pares, se mueven a través del superconductor de una manera ordenada.

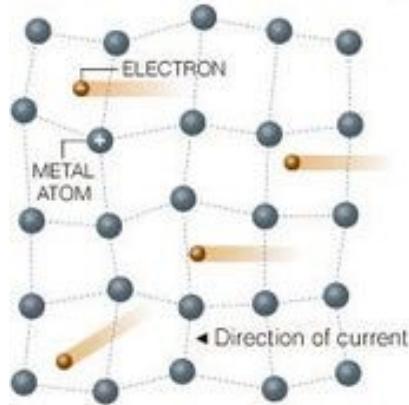
Teoría BCS

- ❑ Uno puede imaginar un metal como enrejado de iones positivos, que pueden moverse como si estubiesen unidos por resortes. Los electrones que se mueven a través de la red cristalina constituyen una corriente eléctrica.
- ❑ Normalmente, los electrones se rechazan y son dispersados por la red, creando resistencia.
- ❑ Pero en el caso de un superconductor, cuando un electrón pasa, le sigue un segundo electrón que es atraído hacia la región positiva dejada por el primero, y ellos viajan juntos a través del enrejado.

El par de Cooper:

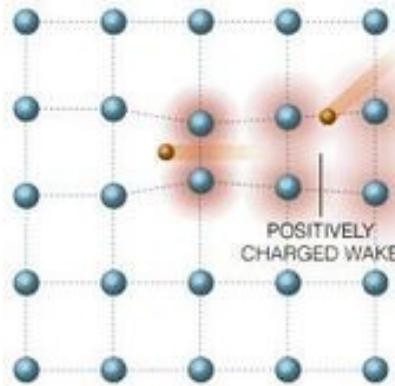
Low-Temperature Superconductivity

December was the 50th anniversary of the theory of superconductivity, the flow of electricity without resistance that can occur in some metals and ceramics.



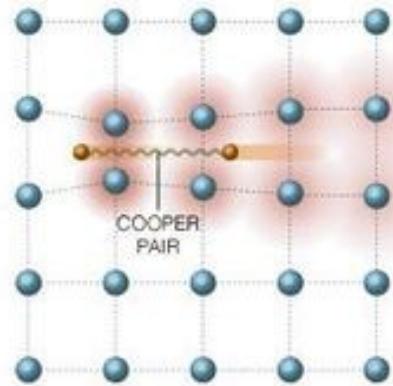
ELECTRICAL RESISTANCE

Electrons carrying an electrical current through a metal wire typically encounter resistance, which is caused by collisions and scattering as the particles move through the vibrating lattice of metal atoms.



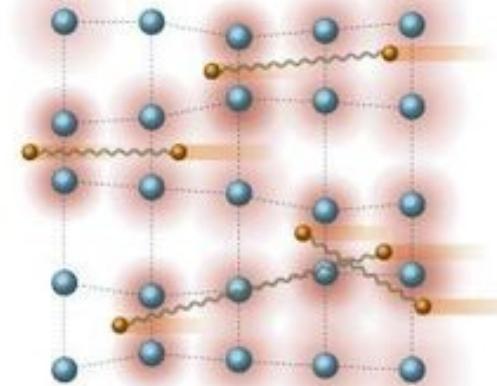
CRITICAL TEMPERATURE

As the metal is cooled to low temperatures, the lattice vibration slows. A moving electron attracts nearby metal atoms, which create a positively charged wake behind the electron. This wake can attract another nearby electron.



COOPER PAIRS

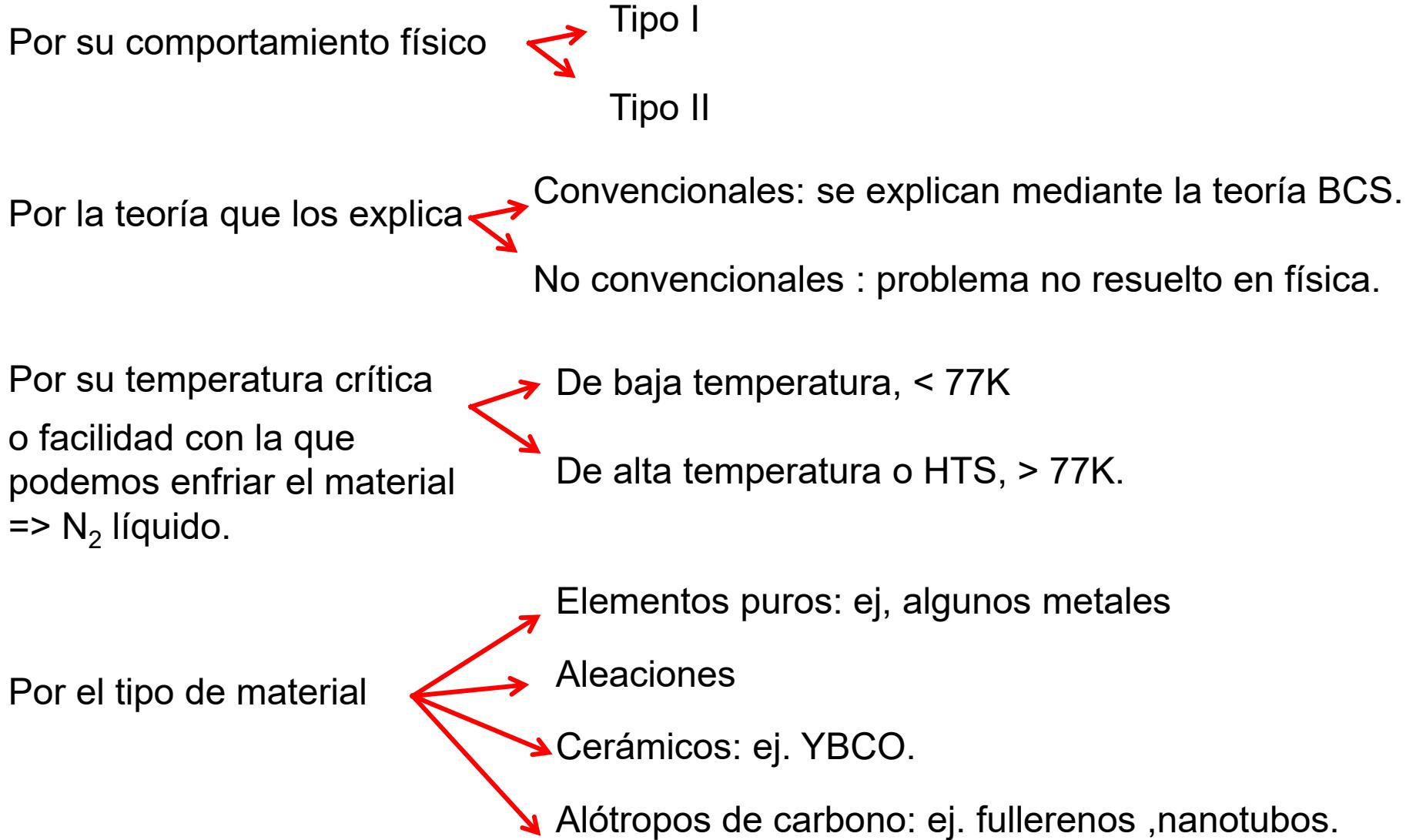
The two electrons form a weak bond, called a Cooper pair, which encounters less resistance than two electrons moving separately. When more Cooper pairs form, they behave in the same way.



SUPERCONDUCTIVITY

If a pair is scattered by an impurity, it will quickly get back in step with other pairs. This allows the electrons to flow undisturbed through the lattice of metal atoms. With no resistance, the current may persist for years.

Clasificación de superconductores

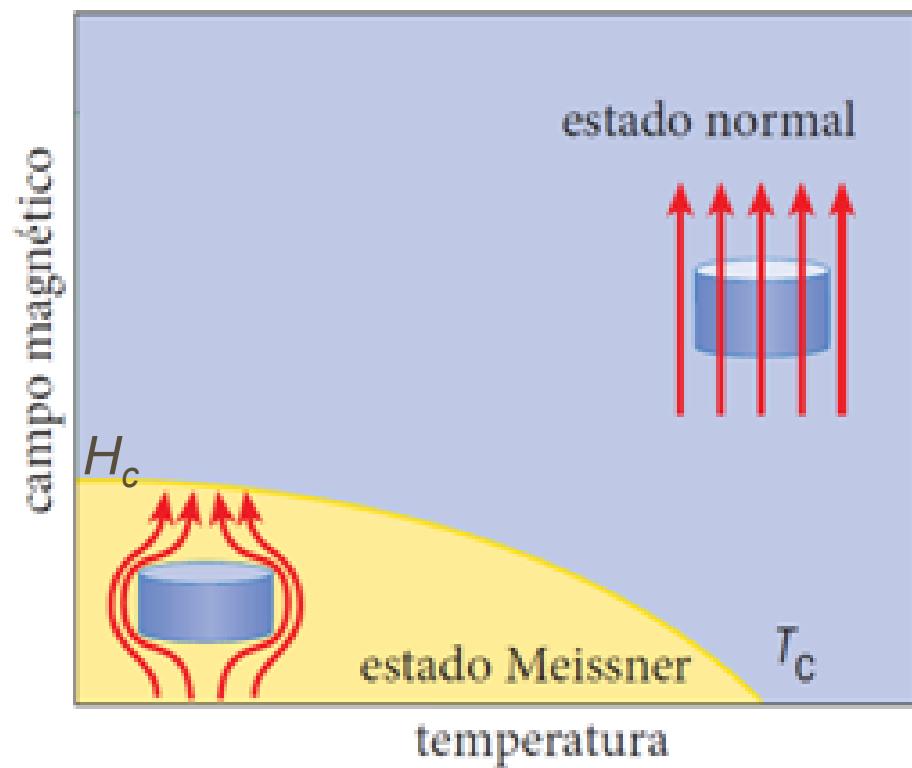


Superconductores tipo I y II

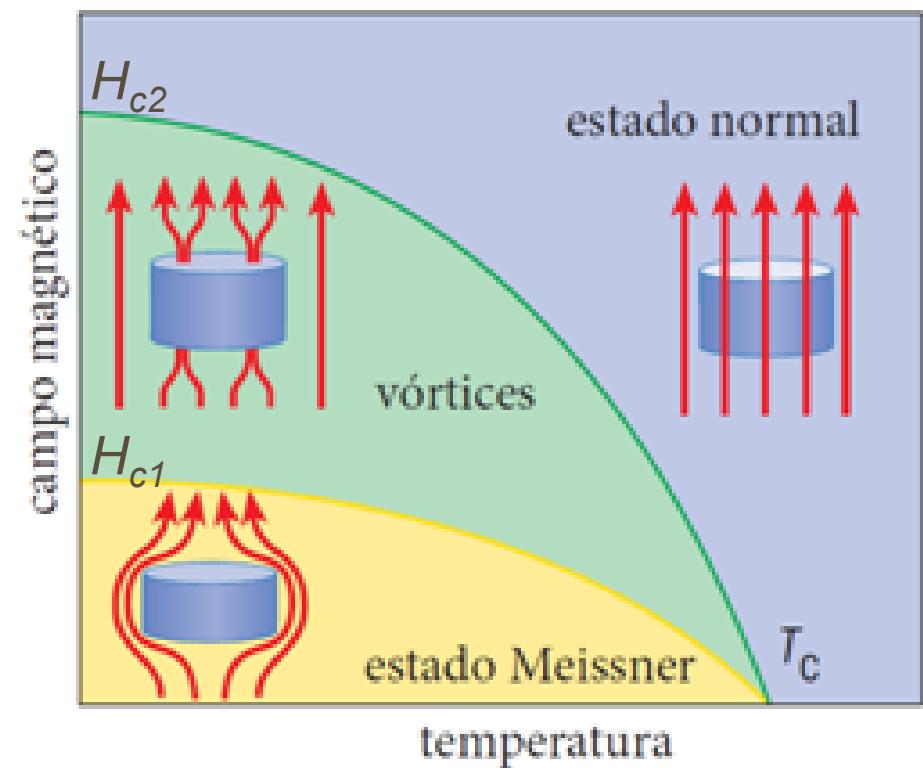
- Como dijimos, una característica importante de todos los superconductores es que la superconductividad desaparece cuando el material se expone a un campo magnético lo suficientemente alto. Este campo magnético, H_c , se llama campo magnético crítico.
- Si la superconductividad existe solo bajo una temperatura crítica y un campo magnético crítico, el material superconductor es de **TIPO I**.
- Los superconductores **TIPO II** tiene 2 campos magnéticos críticos. El primero es un campo magnético de baja intensidad, H_{c1} , que suprime parcialmente la superconductividad. El segundo es mucho más alto, H_{c2} , y la suprime por completo.

Superconductores tipo I y II

Tipo I



Tipo II



Superconductores Tipo I – ejemplos:

Material	T _c (K)	Material	T _c (K)
Be	0	Gd	1.1
Rh	0	Al	1.2
W	0.015	Pa	1.4
Ir	0.1	Th	1.4
Lu	0.1	Re	1.4
Hf	0.1	Tl	2.39
Ru	0.5	In	3.408
Os	0.7	Sn	3.722
Mo	0.92	Hg	4.153
Zr	0.546	Ta	4.47
Cd	0.56	V	5.38
U	0.2	La	6.00
Ti	0.39	Pb	7.193
Zn	0.85	Tc	7.77
Ga	1.083	Nb	9.46

Superconductores Tipo II

- A partir de los años 1930 se encontró que aleaciones de bismuto- plomo exhiben superconductividad. Se denominaron superconductores de tipo II o superconductores duros.
- Se encontró que tienen un mayor campo magnético crítico (H_c) y por ende podrían llevar una densidad de corriente mayor mientras permanecen en el estado superconductor.

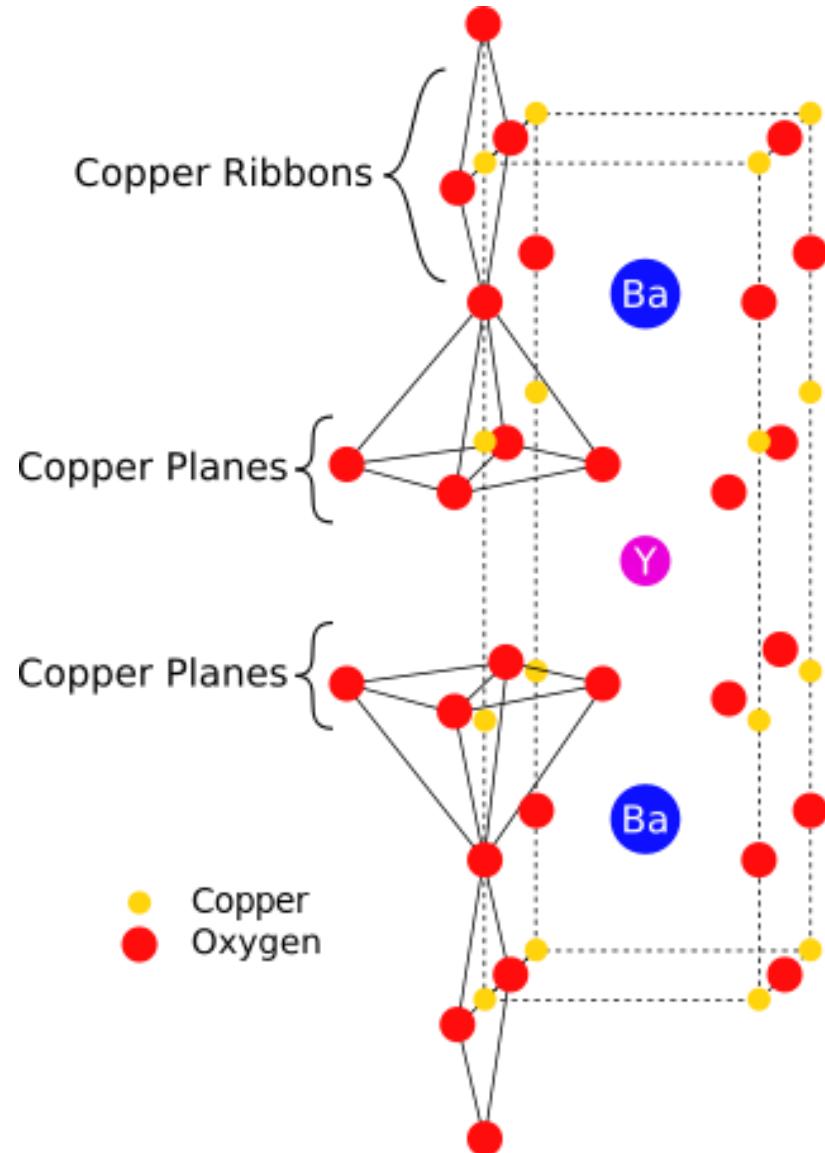
Superconductores Tipo II

Material	Transition Temp (K)	Critical Field (T)
NbTi	10	15
PbMoS	14.4	6.0
V ₃ Ga	14.8	2.1
NbN	15.7	1.5
V ₃ Si	16.9	2.35
Nb ₃ Sn	18.0	24.5
Nb ₃ Al	18.7	32.4
Nb ₃ (AlGe)	20.7	44
Nb ₃ Ge	23.2	38

From Blatt, Modern Physics

Cerámicas superconductoras

- Los materiales cerámicos utilizados para hacer superconductores son generalmente del tipo perovskitas.
- Entre los más estudiados está el óxido de itrio, bario y cobre, de fórmula $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$. Pertenece a la familia de compuestos denominados con la sigla YBCO, de fórmula general $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$.
- Tienen una T_c en el orden de 90K, bien por encima de la temperatura de ebullición del nitrógeno líquido (que se suele usar para enfriar).



Cerámicas superconductoras de alta temperatura (High Temperature Superconductor - HTS)

- ❑ Descubiertas a partir de 1986, las cerámicas HTS funcionan a T_c por encima de 77 K, permiten disminuir los costos de funcionamiento con respecto a los materiales conocidos hasta esa fecha.
- ❑ Las más conocidas son las cerámicas YBCO. Aunque tienen dos desventajas: son frágiles y se degradan en condiciones ambientales normales.
- ❑ Años más tarde se obtuvieron otros materiales HTS basados en cobre y en hidrógeno.

Ejemplos HTS:

Tc (K)	Tc (°C)	Material	Familia
203	-70	Ejemplo: <u>H₂S</u> (a presiones >150 GPa)	Basados en hidrógeno
195	-78	Sublimación del hielo seco	
184	-89.2	<u>Temp.</u> Más baja registrada en la Tierra.	
133	-140	<u>HgBa₂Ca₂Cu₃O_x(HBCCO)</u>	Óxidos de cobre
110	-163	<u>Bi₂Sr₂Ca₂Cu₃O₁₀(BSCCO)</u>	
93	-180	<u>YBa₂Cu₃O₇(YBCO)</u>	
77	-196	Punto de ebullición del N ₂	
55	-218	SmFeAs(O,F)	Compuestos de hierro
41	-232	CeFeAs(O,F)	
26	-247	LaFeAs(O,F)	
20	-253	Punto de ebullición del H ₂	
18	-255	<u>Nb₃Sn</u>	Metálicos, de baja temperatura
10	-263	<u>NbTi</u>	
9.2	-263.8	<u>Nb</u>	
4.2	-269	Punto de ebullición del helio.	
4.2	-268.8	Hg	Metálicos, de baja temperatura

Superconductores - Tipos de aplicación

Actualmente se destacan 3 tipos de aplicaciones:

- **Producción de grandes campos magnéticos**
- **Fabricación de cables de transmisión de energía**
- **Fabricación de componentes para circuitos electrónicos**

Superconductores - Áreas de aplicación

Energy	Defense	Transportation	Industrial	Medical	Science/Research
<ul style="list-style-type: none">• FCL• Cable• Generators• Transformers, incl. FCL• Storage<ul style="list-style-type: none">- SMES- Flywheels 	<ul style="list-style-type: none">• Motors• Cables• Directed energy weapons  Courtesy of SuperPower and Furukawa	<ul style="list-style-type: none">• Maglev• Motors• Rail engines  Courtesy of SPX	<ul style="list-style-type: none">• Induction heaters• Motors• Generators• Magnetic separation• Bearings  Courtesy of Oswald	<ul style="list-style-type: none">• Current leads• NMR• MRI 	<ul style="list-style-type: none">• HF magnets• Space exploration• SQUIDS• High energy physics• Electronics• Cell tower base station filters 

Key:

- Near-Term addressable: 1-5 years
- Mid-Term: 3-7 years
- Longer term: 5-10 years

Fuente: International Superconductivity Industry Summit, Gyeonggi-do, Korea, 2011.

Transporte de levitación magnética, o tipo maglev

Tiene el potencial de superar 6440 km/h si se realiza en un túnel al vacío.

La mayor velocidad obtenida hasta ahora fue de 603 km/h en la ruta Yamanashi el 21 de abril de 2015. Unos días antes llegó a alcanzar los 590 km/h, el 16 de abril de 2015, en la misma ruta, siendo 15 km/h más rápido que el récord de velocidad del TGV convencional.

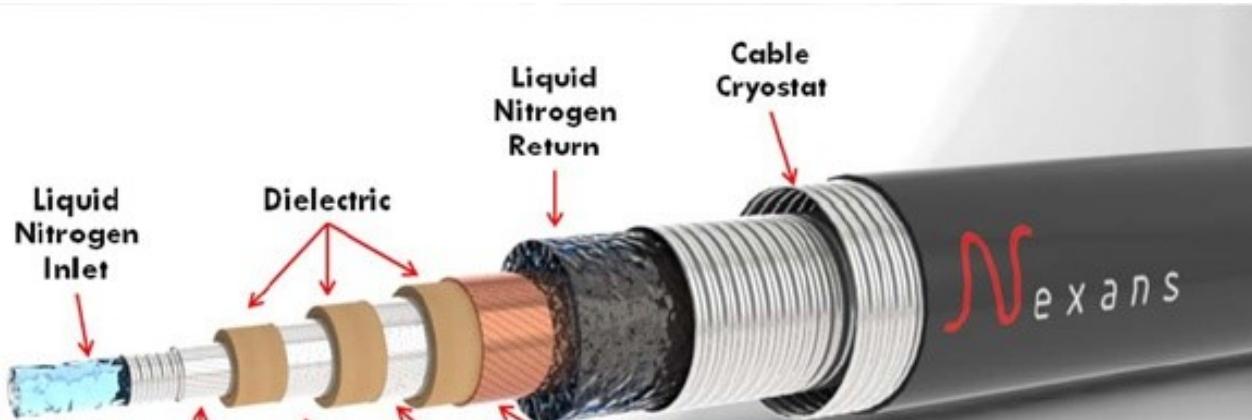


El **Shanghai Maglev**. Primera línea comercial de alta velocidad mediante levitación magnética construida en el mundo. Completa una distancia total de 30 kilómetros en 7 minutos.

Fuente: Wikipedia.

Cable

Transmite 3 a 5 veces más energía que el alambre de cobre



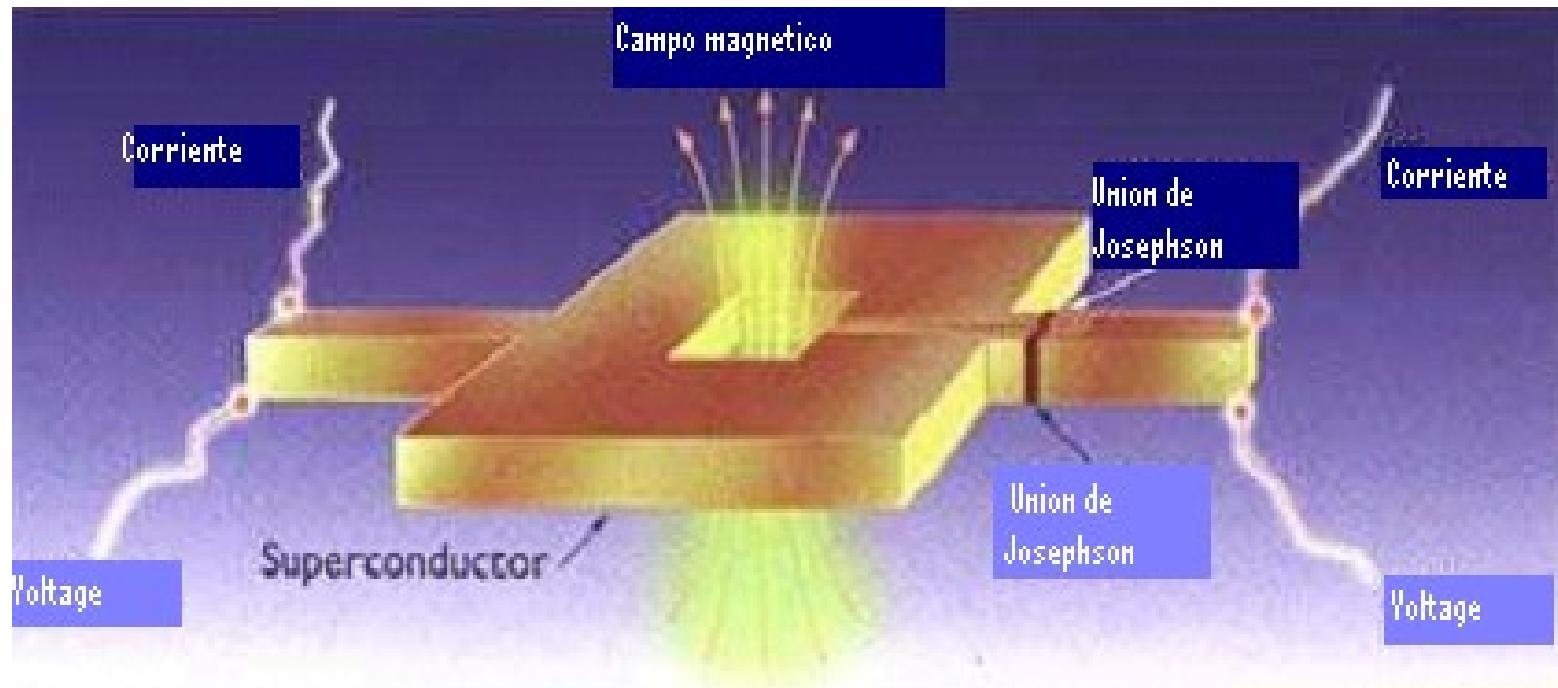
[...] “the German city of Essen recently installed a kilometer-long superconducting cable for transferring grid power. This cable uses liquid nitrogen to achieve a working temperature of 60K, or -206°C. That’s very impressive, and the use of liquid nitrogen for cooling makes it at least somewhat affordable, but we’ll need far better to start mass-replacing the electrical infrastructure of the entire world.” [...]

Fuente: <https://www.extremetech.com/extreme/208651-what-is-superconductivity>

SQUIDS

Un SQUID (“Superconducting quantum interference device” por sus siglas en inglés) es el tipo más sensible de detector conocido.

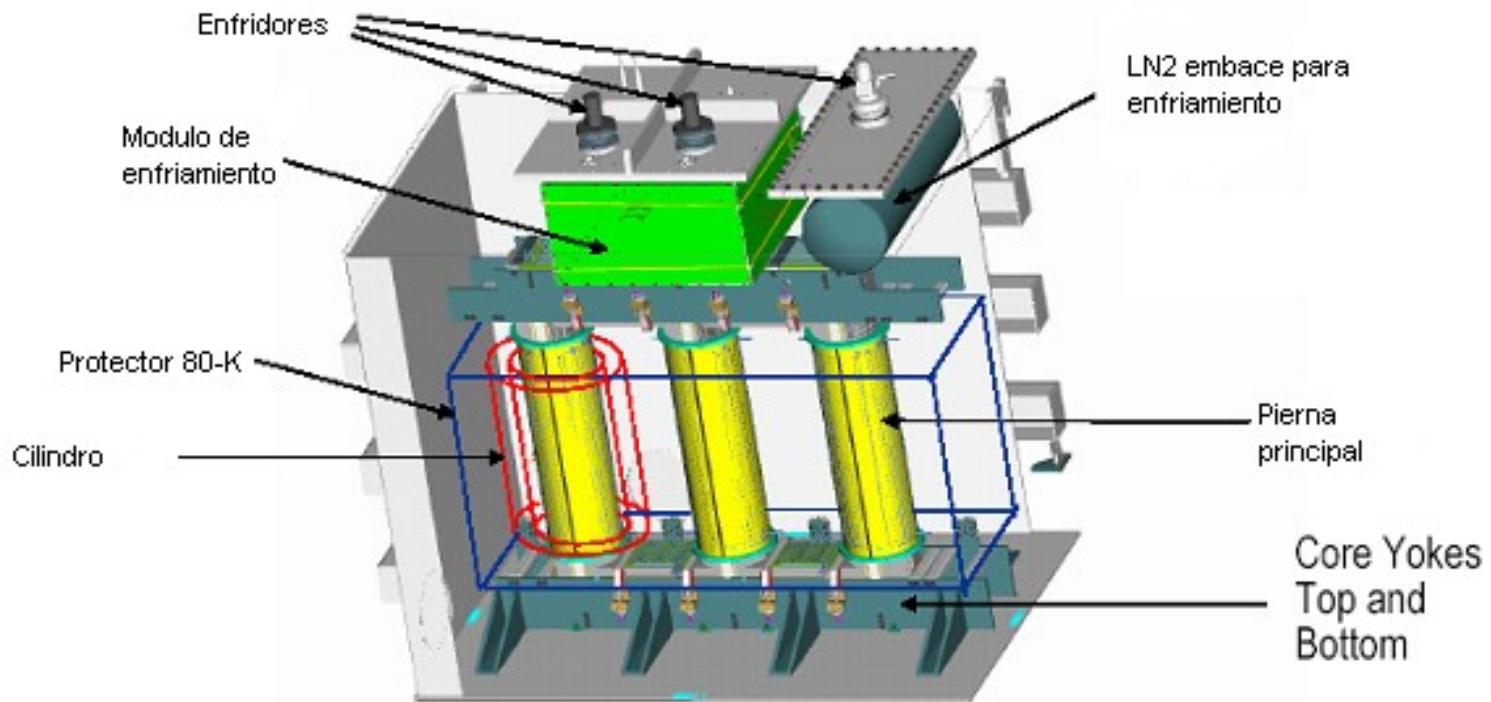
Consiste en un superconductor con dos uniones de Josephson. Los SQUIDS son usados para medir campos magnéticos.



Fuente: Superconductors.org

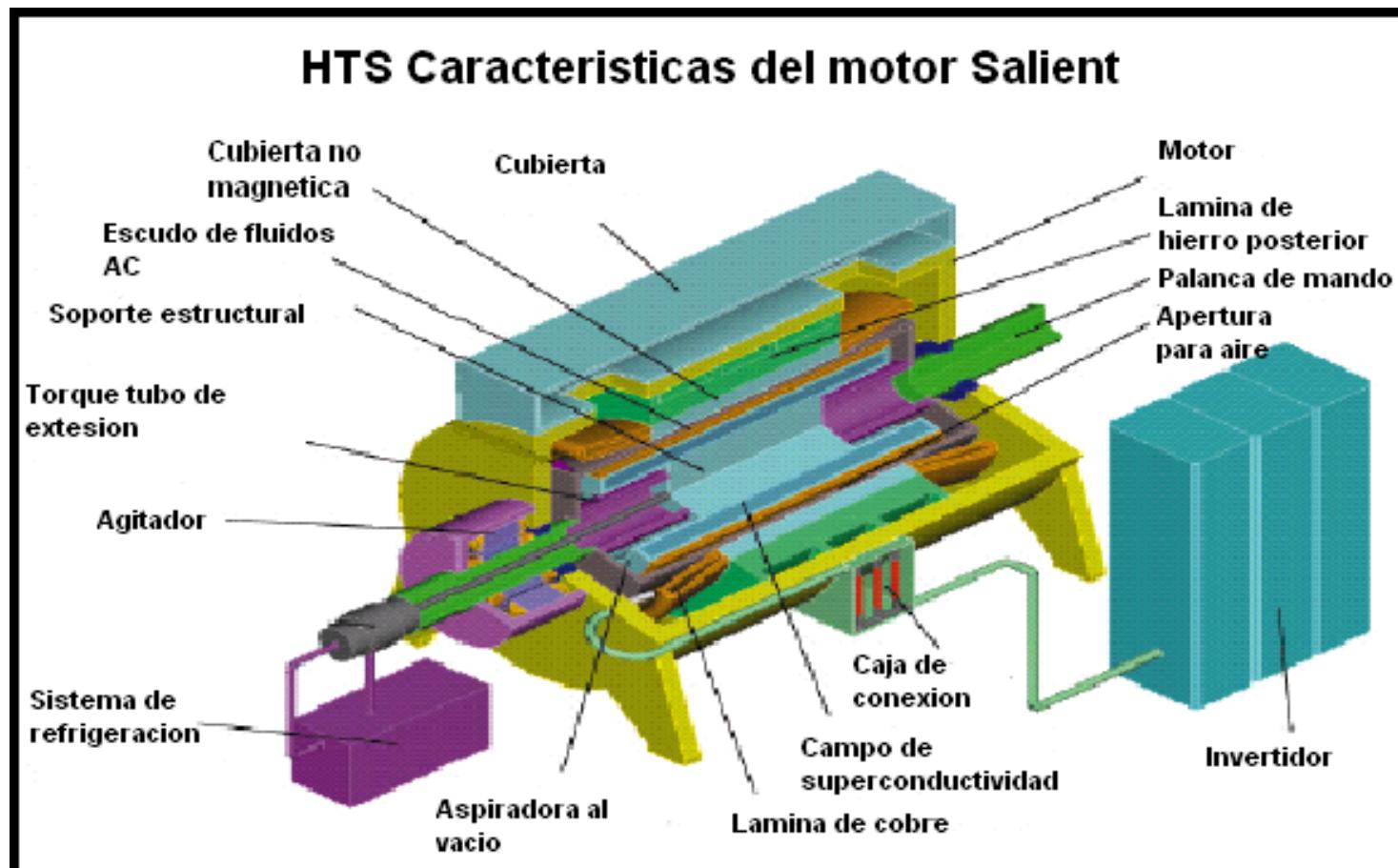
Transformador- de sobrecapacidad de dos tiempos sin daño de aislamiento y ambientalmente amigable debido a la baja necesidad de aceite necesario para la operación.

El 5/10 MVA HTS Transformador concepto se baso en el 30/60 MVA



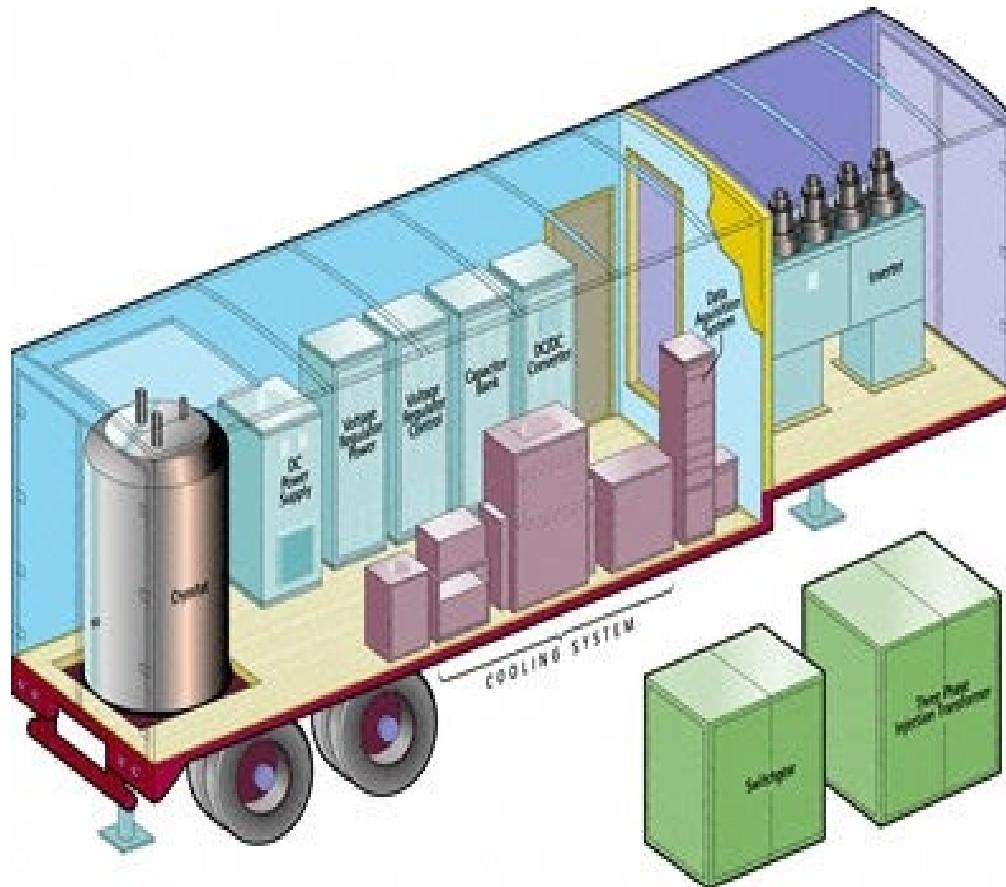
Fuente: Waukesha Electric Systems

Motor HTS – requiere la mitad del espacio de los motores basados en alambre de cobre



Fuente: Rockwell

SMES (Baterías magnéticas de superconductividad)



Fuente: American Superconductor

Otro Premio Nobel para investigadores de la superconductividad

El comité otorgó el premio en 2003 al siguiente grupo de investigadores: Vitaly Ginzburg, Alexei Abrikosov y Anthony Leggett--por “contribuciones decisivas concernientes a dos fenómenos físicos: superconductividad y superfluidos”



Fuente: *Scientific American*

Perspectivas

Investigación, desarrollo e innovación en:

□ Electroimanes

Una corriente eléctrica en un alambre crea un campo magnético a su alrededor. La fuerza del campo magnético aumenta al tiempo que la corriente en el alambre se incrementa. Debido a que los superconductores pueden llevar corrientes grandes sin la pérdida de energía, ellos están lo suficientemente dotados para hacer potentes electroimanes, mucho más pequeños que los tradicionales.

□ Generadores eléctricos

Generadores con superconductores podrían generar la misma cantidad de electricidad con un equipo más pequeño y menos consumo. Así, una vez que la electricidad fuera generada, podría ser distribuida a través de alambres superconductores.

□ Almacenamiento de energía

La energía se podría almacenar en bobinas de superconductores por períodos de tiempo largos sin pérdida significativa.

□ Computadoras más potentes

Procesadores superconductores extremadamente veloces , capaces de procesar bases de datos internacionales en centésimas de segundos.