

Curso: Materiales avanzados y nanotecnología
Docente: Dra. Sandra M. Mendoza
Ciclo lectivo 2019, UTN

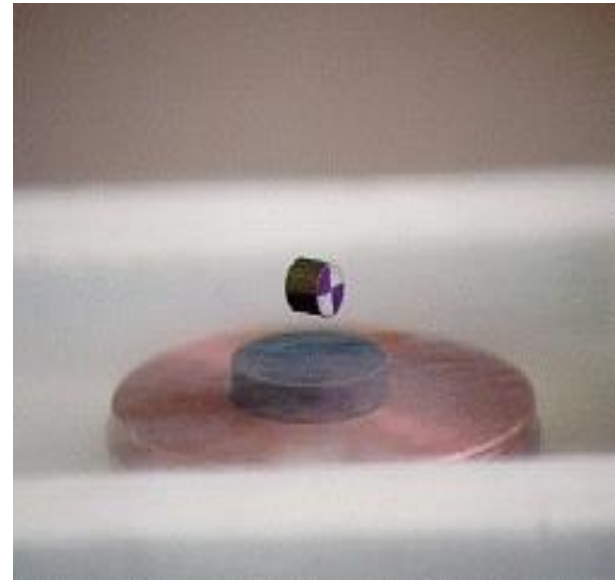
Unidad 6

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

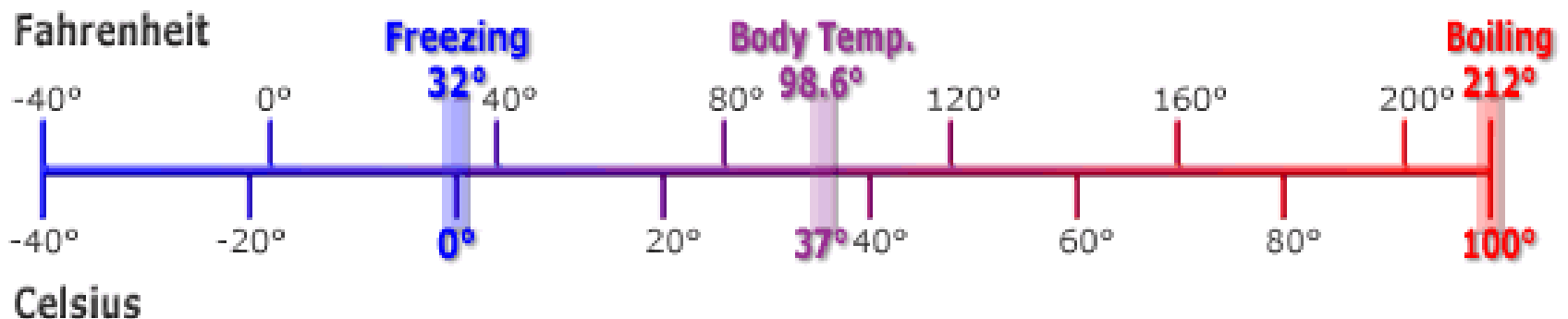
Definición

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 en ciertos metales, aleaciones y cerámica a temperaturas cercanas al cero absoluto y en algunos casos en temperaturas cientos de grados sobre el absoluto cero = -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	-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.

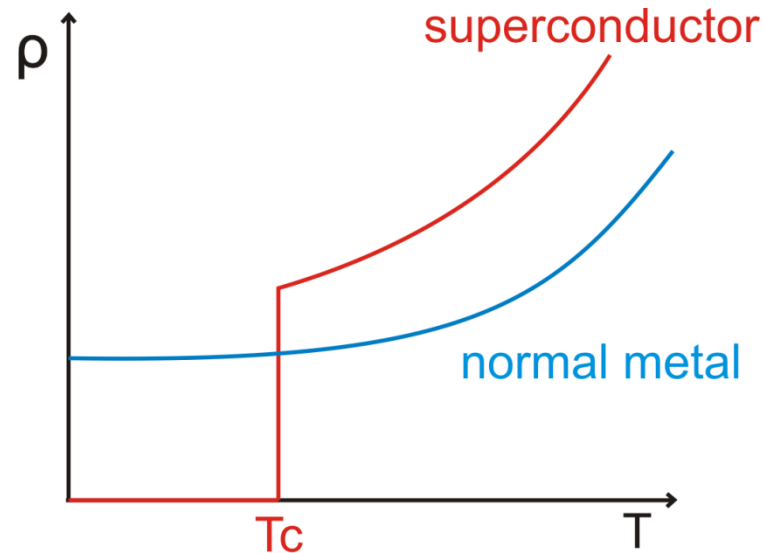
¿Qué es un superconductor?

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.

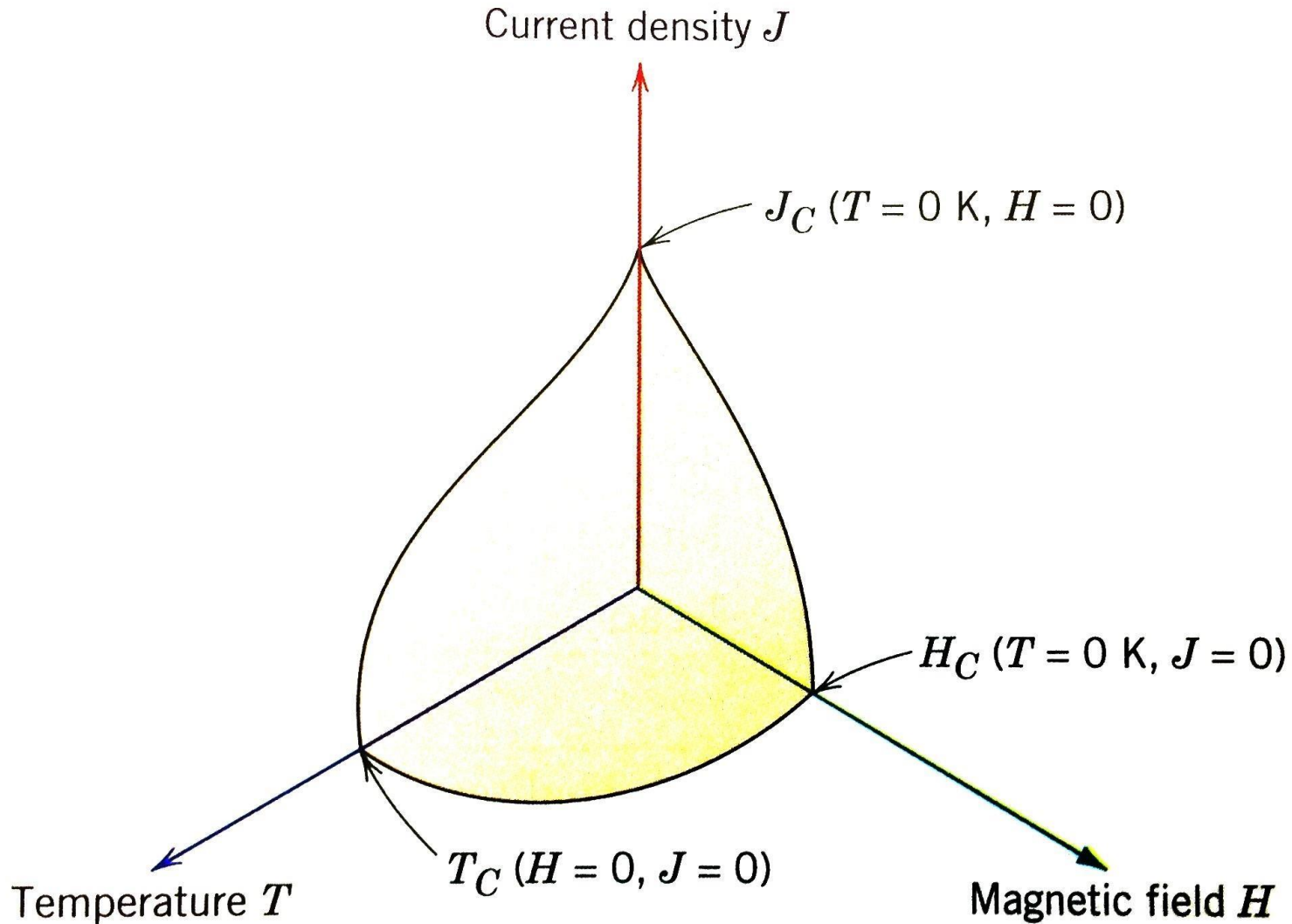
La tercera propiedad fundamental de un superconductor consiste en que al aplicar un campo magnético superior a un valor crítico, H_c , a una muestra superconductora, ésta recupera su resistencia eléctrica normal provocando la desaparición de la superconductividad.

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.
- ❑ El campo magnético crítico (H_c): sobre 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:

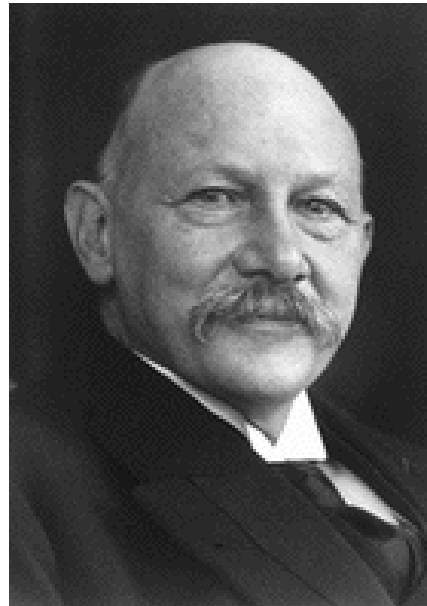
$$H_c = H_o \left[1 - \left(\frac{T}{T_c} \right)^2 \right]$$

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.

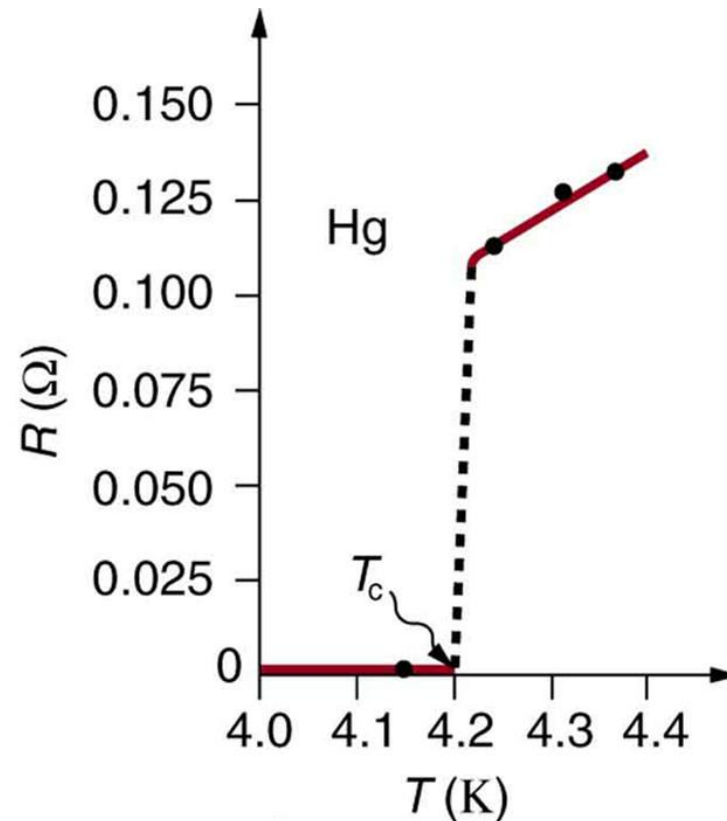


Fuente: Fundación Nobel

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

En volumen a presión ambiental																		A altas presiones				En una forma modificada	
1 H																		2 He					
3 Li	4 Be																	5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
11 Na	12 Mg																	13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
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 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn						
87 Fr	88 Ra	89 Ac	104 Rf	105 Ha	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Uub												
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 Cf	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 V_3Si

1971 – 23K Nb_3Ge

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

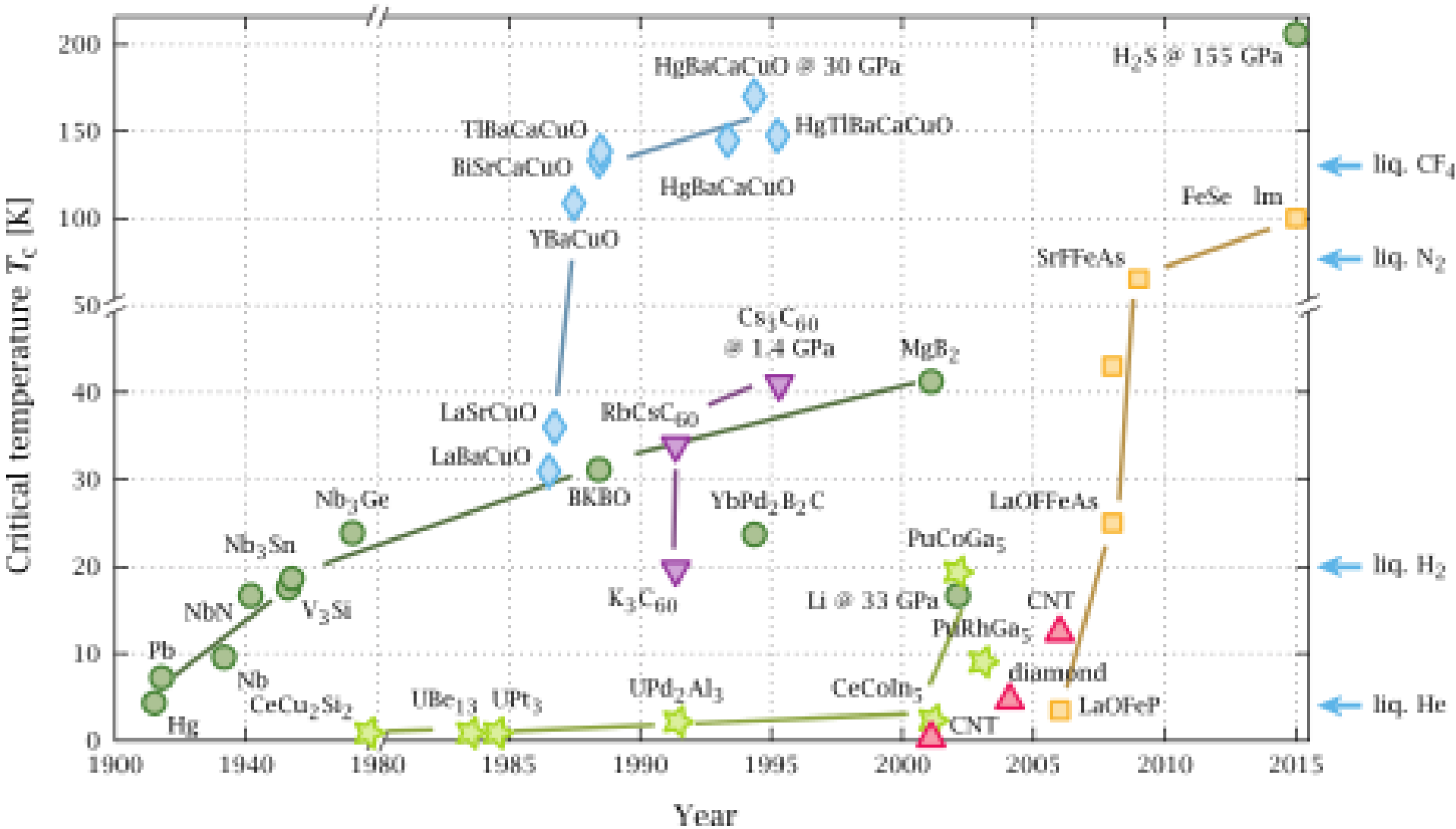
1987 – 92.0K YBCO primer material superconductor a temperaturas superiores al nitrógeno líquido. Se obtuvo al sustituir lantano por itrio.

1993 – 133K $HgBa_2Ca_2Cu_3O_8$ es aún el superconductor de mayor temperatura a presión atmosférica.

1993 – 147.0K $Hg_{0.8}Tl_{0.2}Ca_2Cu_3O_8$ 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 $-70^\circ C.$, pero bajo una presión de 1,5 millones de bars.

Descubrimiento de materiales superconductores a lo largo de los años



Fuente: Pia Jensen Ray. Figure 2.4 in Master's thesis, "Structural investigation of La(2-x)Sr(x)CuO(4+y) - Following staging as a function of temperature". Niels Bohr Institute, Faculty of Science, University of Copenhagen. Copenhagen, Denmark, November 2015.

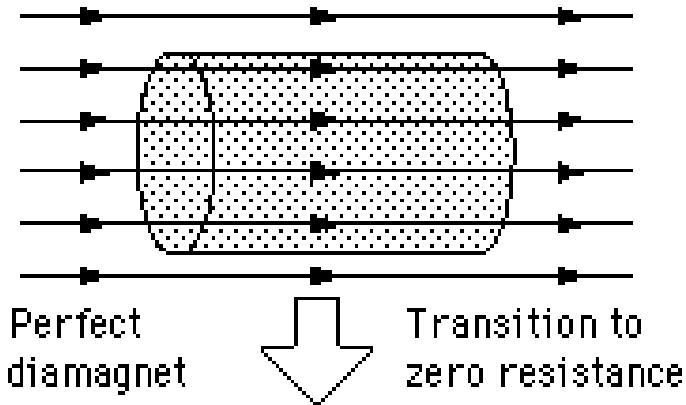
El efecto Meissner

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

Si un superconductor se enfría debajo de su temperatura crítica (mientras que el campo magnético rodea pero no penetra al superconductor), el imán produce corriente en el superconductor. Esta corriente crea una fuerza magnética que hace que los dos materiales se rechacen. Así se puede ver como el imán levita sobre el superconductor.

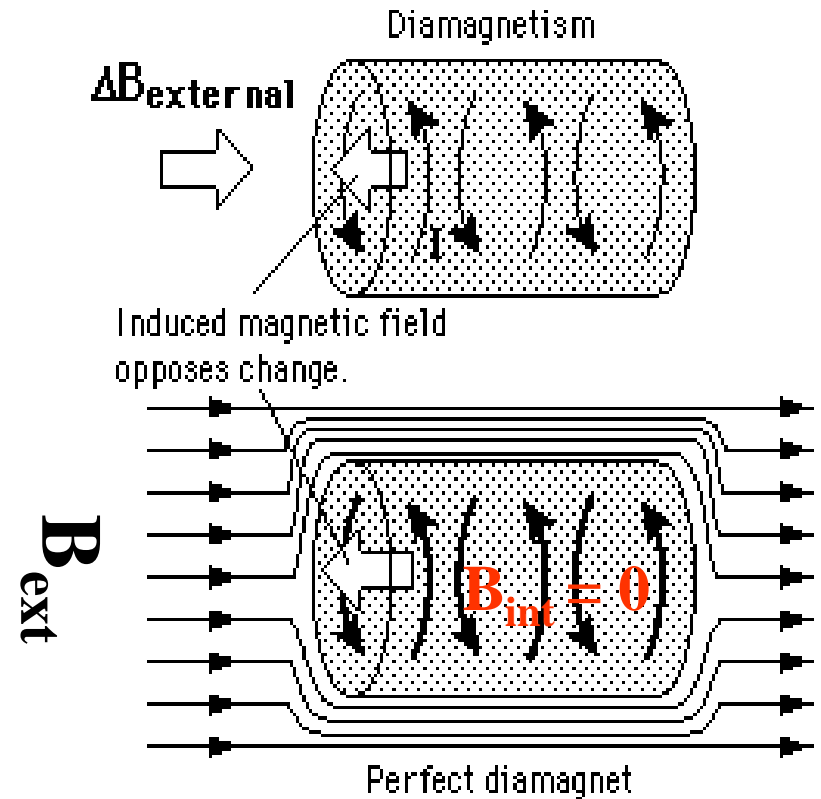
El efecto Meissner

Estado normal

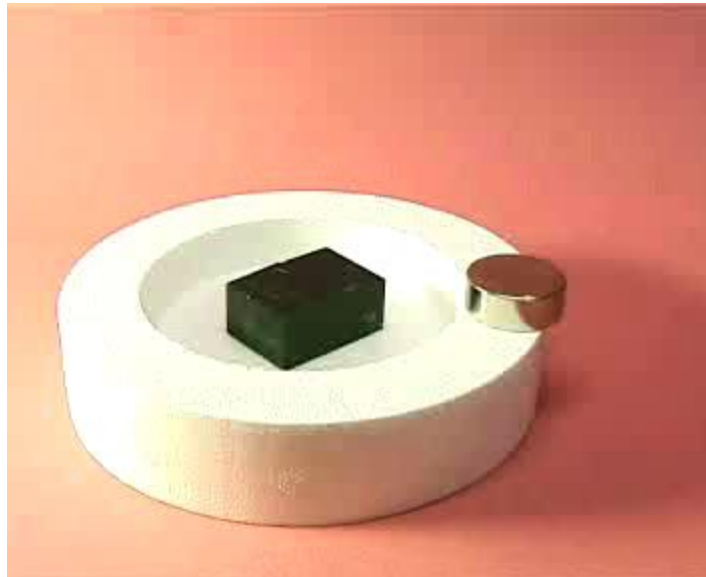


$$\mathbf{B}_{\text{int}} = \mathbf{B}_{\text{ext}}$$

Superconductor



Demostración del efecto Meissner



Fuente: Universidad de Oslo

El efecto Meissner

El efecto Meissner no es una consecuencia directa de la resistividad nula, sino una propiedad adicional de los superconductores. El razonamiento que justifica esta afirmación es el siguiente:

La ley de Ohm ($V = IR$) predice que si el conductor es perfecto $R \rightarrow 0$, el potencial eléctrico $V \rightarrow 0$.

Por otra parte, la ley de Faraday ($V = -dH/dt$) predice que si $V = 0$, se tiene que cumplir que $dH/dt = 0$. En un conductor perfecto el campo magnético no depende del tiempo, por tanto el flujo no puede cambiar.

London explicó el comportamiento de los superconductores restringiendo las soluciones de la ecuación de Faraday. Postuló que las corrientes y campos magnéticos en los superconductores sólo pueden existir dentro de una capa de pequeño espesor en la superficie. Por tanto en la ecuación $dH/dt = 0$, no es suficiente que $H = \text{cte.}$ sino que la inducción debe ser **nula**. En un conductor perfecto el campo magnético siempre es constante y en el superconductor es además cero, que es un requerimiento mucho más fuerte.

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 con éxito 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.

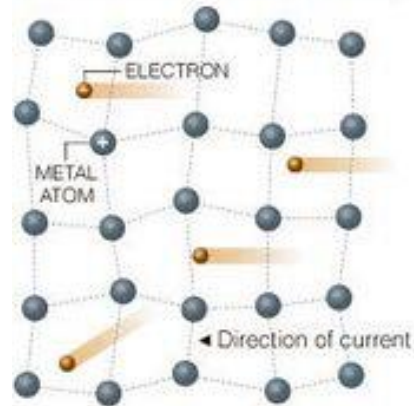
Teoría BCS

- ❑ Uno puede imaginar un metal como enrejado de iones positivos, que pueden moverse como si estuviesen 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:

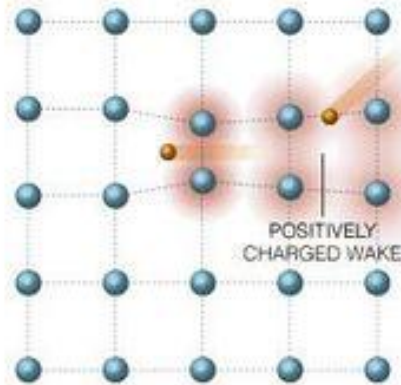
Low-Temperature Superconductivity

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



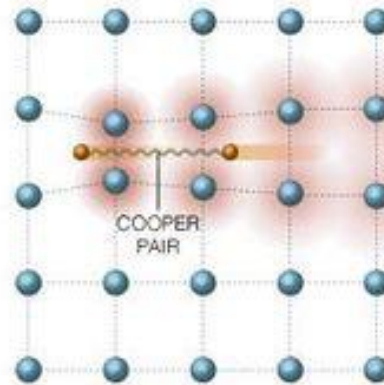
ELECTRICAL RESISTANCE

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.



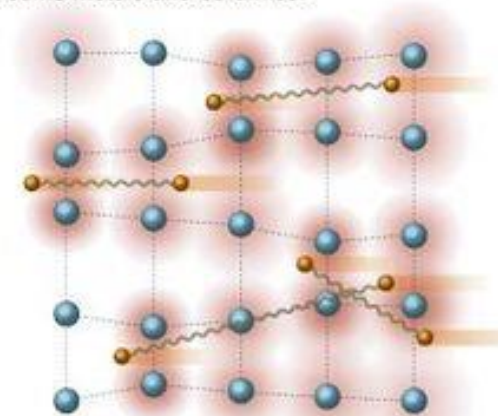
CRITICAL TEMPERATURE

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.

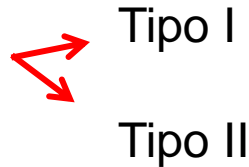


SUPERCONDUCTIVITY

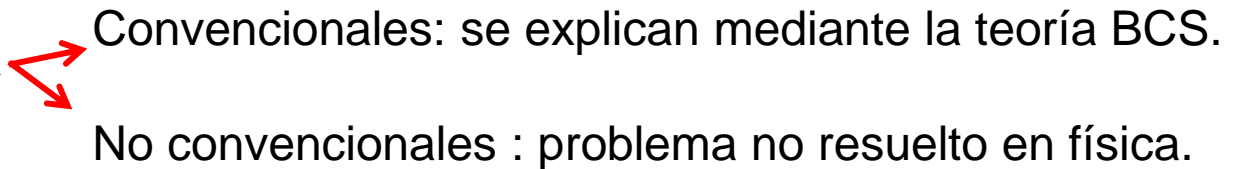
If a pair is scattered by an impurity, it will quickly get back in step with other pairs. This allows the electrons to flow undisturbed through the lattice of metal atoms. With no resistance, the current may persist for years.

Clasificación de superconductores

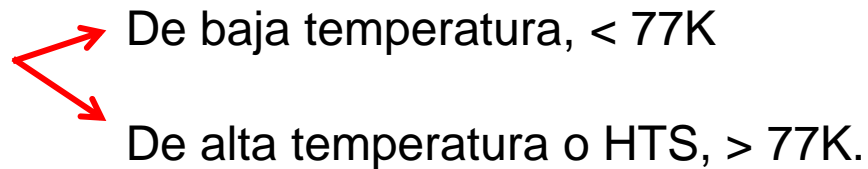
Por su comportamiento físico



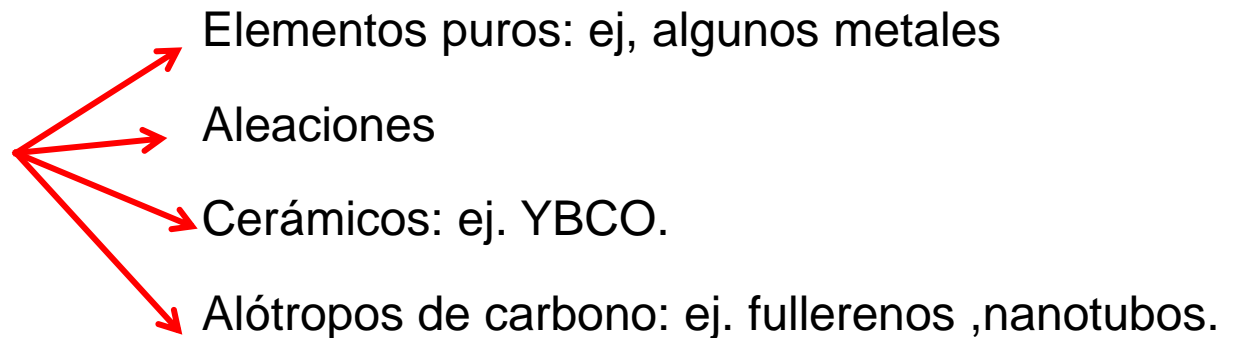
Por la teoría que los explica



Por su temperatura crítica o facilidad con la que podemos enfriar el material
=> N₂ líquido.



Por el tipo de material

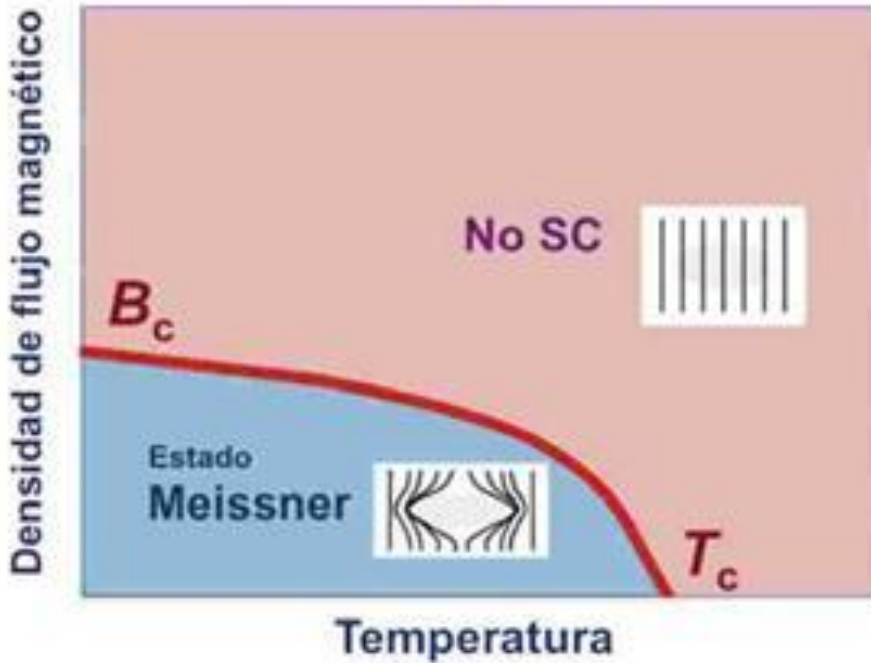


Superconductores tipo I y II

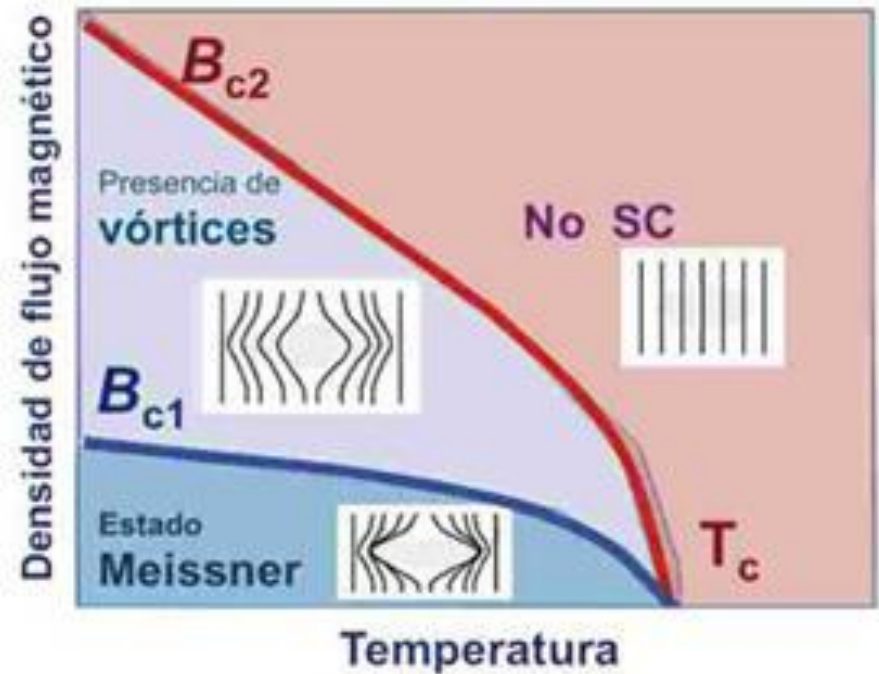
- ❑ Como dijimos, una característica importante de todos los superconductores es que la superconductividad desaparece cuando el material se expone a un campo magnético lo suficientemente alto. Este campo magnético, H_c , se llama campo magnético crítico.
- ❑ Si la superconductividad existe solo bajo 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

SC tipo I



SC tipo II



(B = campo magnético)

Superconductores Tipo I – ejemplos:

Material	T _c (K)
Be	0
Rh	0
W	0.015
Ir	0.1
Lu	0.1
Hf	0.1
Ru	0.5
Os	0.7
Mo	0.92
Zr	0.546
Cd	0.56
U	0.2
Ti	0.39
Zn	0.85
Ga	1.083

Material	T _c (K)
Gd	1.1
Al	1.2
Pa	1.4
Th	1.4
Re	1.4
Tl	2.39
In	3.408
Sn	3.722
Hg	4.153
Ta	4.47
V	5.38
La	6.00
Pb	7.193
Tc	7.77
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.

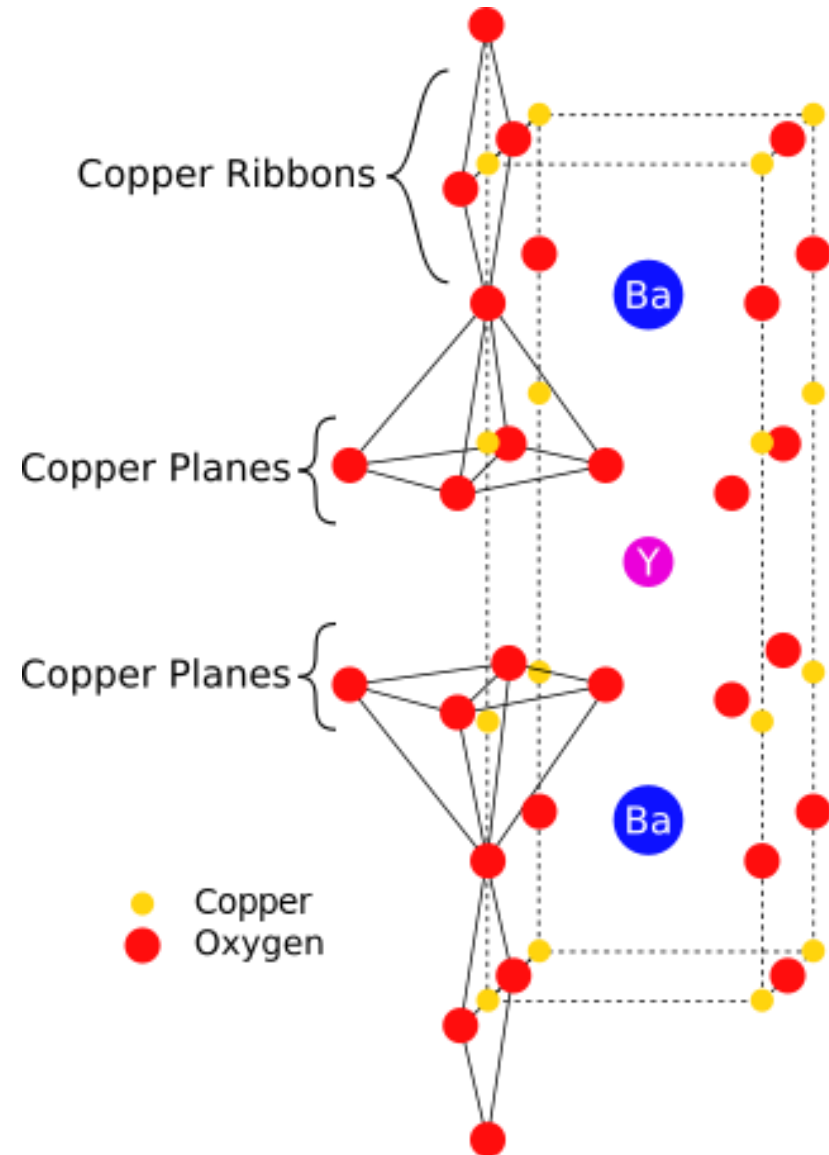
Superconductores Tipo II

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:

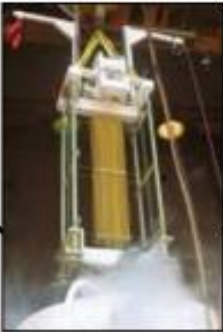





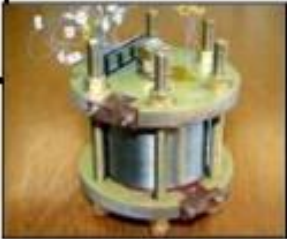

Tc (K)	Tc (°C)	Material	Familia
203	-70	Ejemplo: <u>H₂S</u> (a presiones >150 GPa)	Basados en hidrógeno
195	-78	Sublimación del hielo seco	
184	-89.2	<u>Temp.</u> Más baja registrada en la Tierra.	
133	-140	<u>HgBa₂Ca₂Cu₃O_x</u> (HBCCO)	Óxidos de cobre
110	-163	<u>Bi₂Sr₂Ca₂Cu₃O₁₀</u> (BSCCO)	
93	-180	<u>YBa₂Cu₃O₇</u> (YBCO)	
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  <p>Courtesy of SuperPower and Furukawa</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Maglev • Motors • Rail engines  <p>Courtesy of SPX</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Induction heaters • Motors • Generators • Magnetic separation • Bearings   <p>Courtesy of Oswald</p>	<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

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.

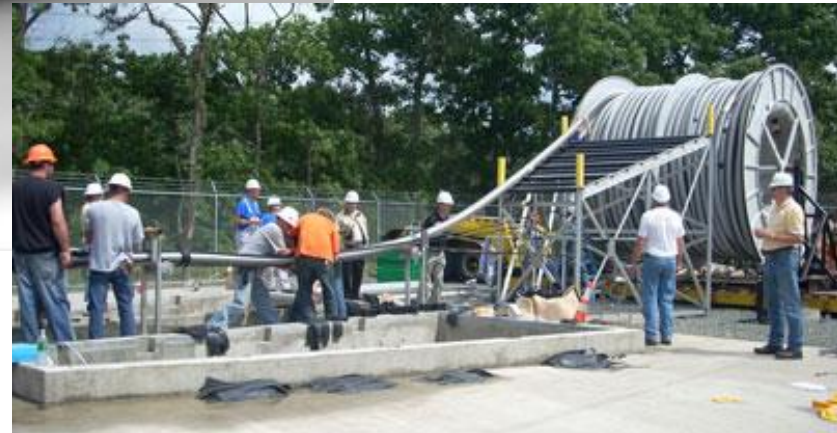
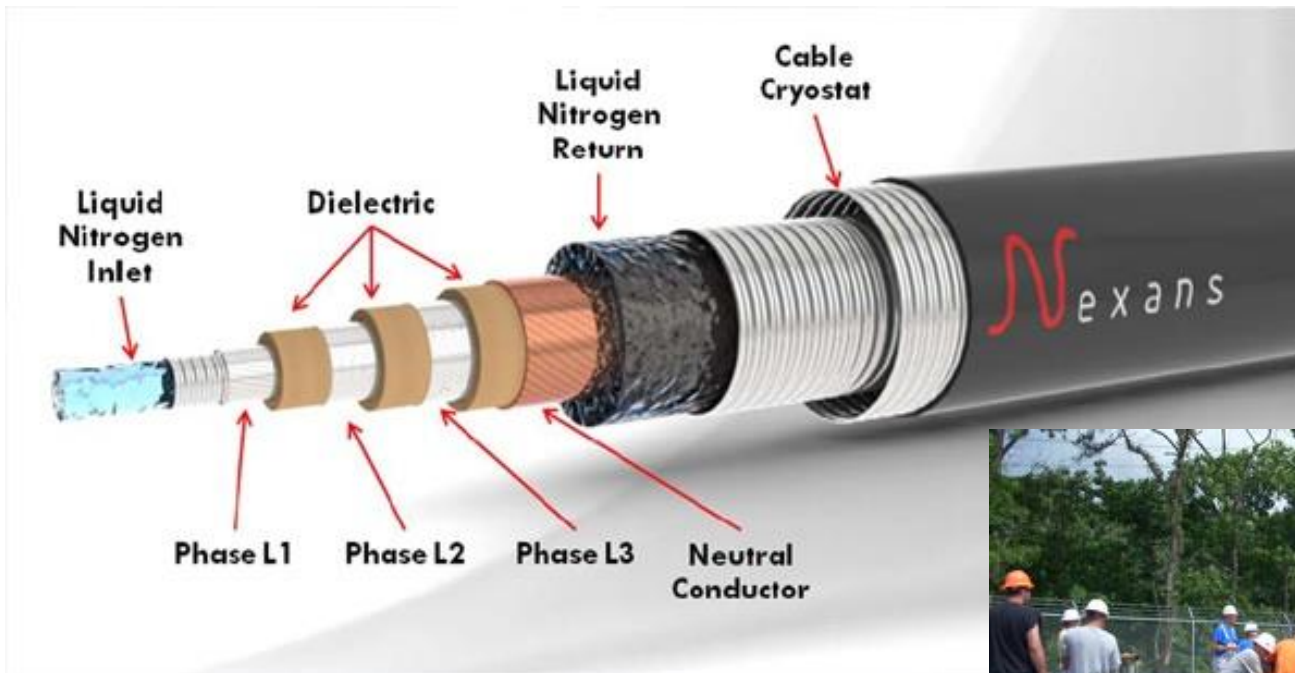


El **Shanghai Maglev**. Primera línea comercial de alta velocidad mediante levitación magnética construida en el mundo. Completa una distancia total de 30 kilómetros en 7 minutos.

Fuente: Wikipedia.

Cable

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



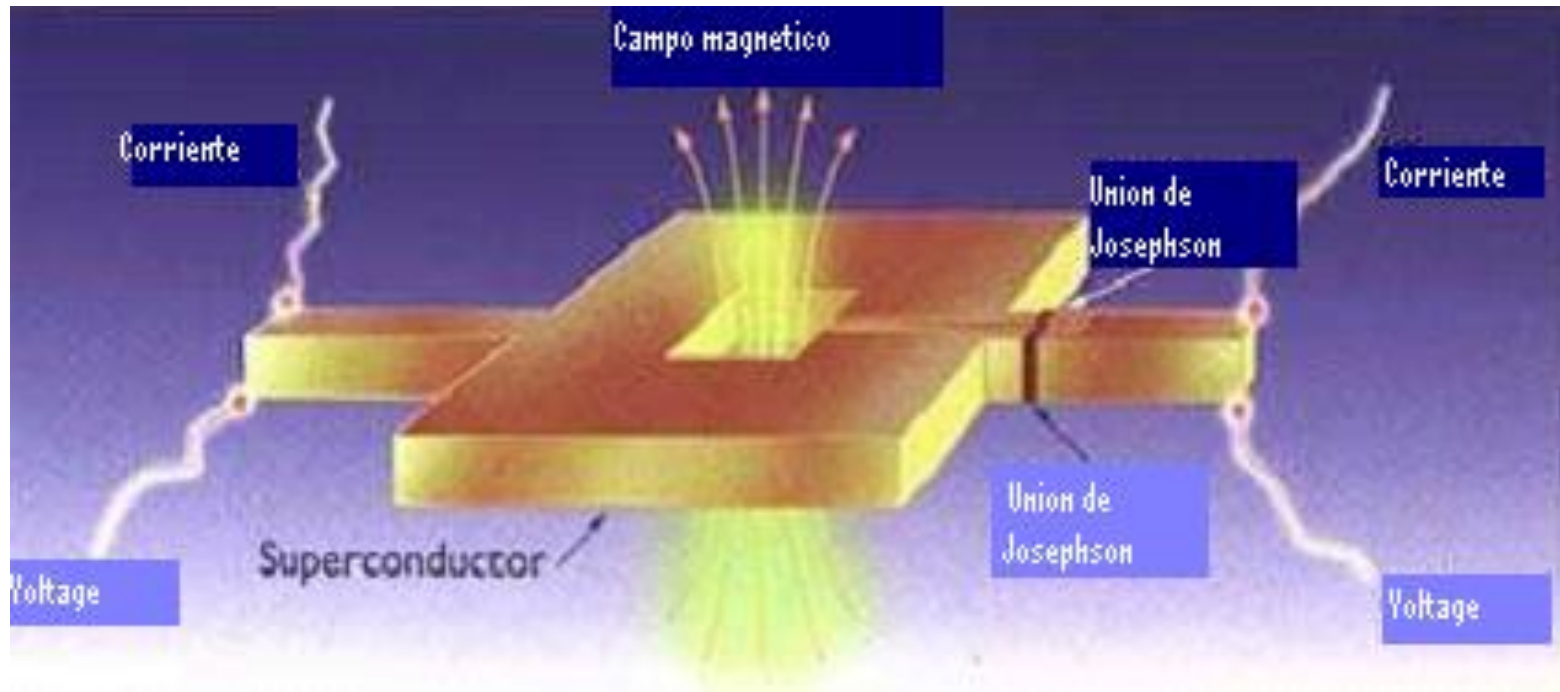
[...] “ the German city of Essen recently installed a kilometer-long superconducting cable for transferring grid power. This cable uses liquid nitrogen to achieve a working temperature of 60K, or -206°C . That’s very impressive, and the use of liquid nitrogen for cooling makes it at least somewhat affordable, 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

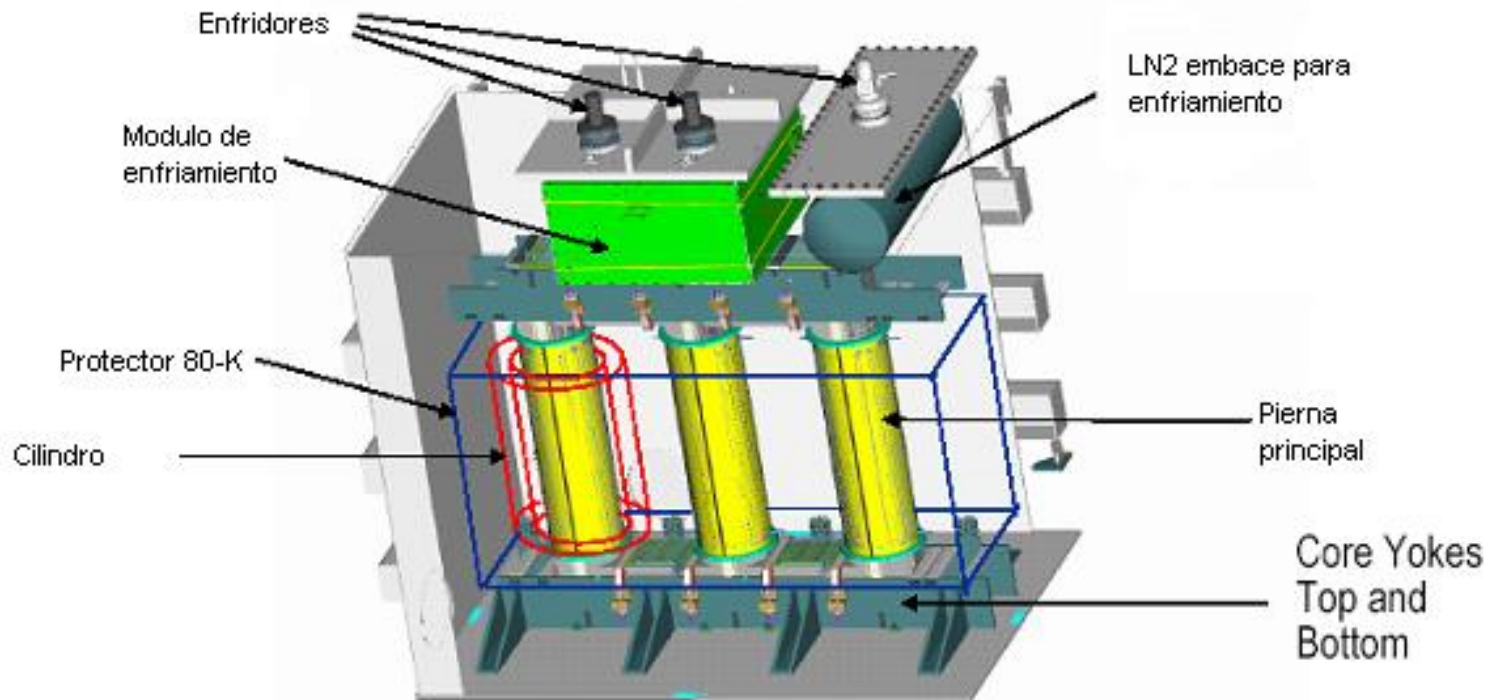
Un SQUID (“Superconducting quantum interference device” por sus siglas en inglés) es el tipo más sensible de detector conocido.

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



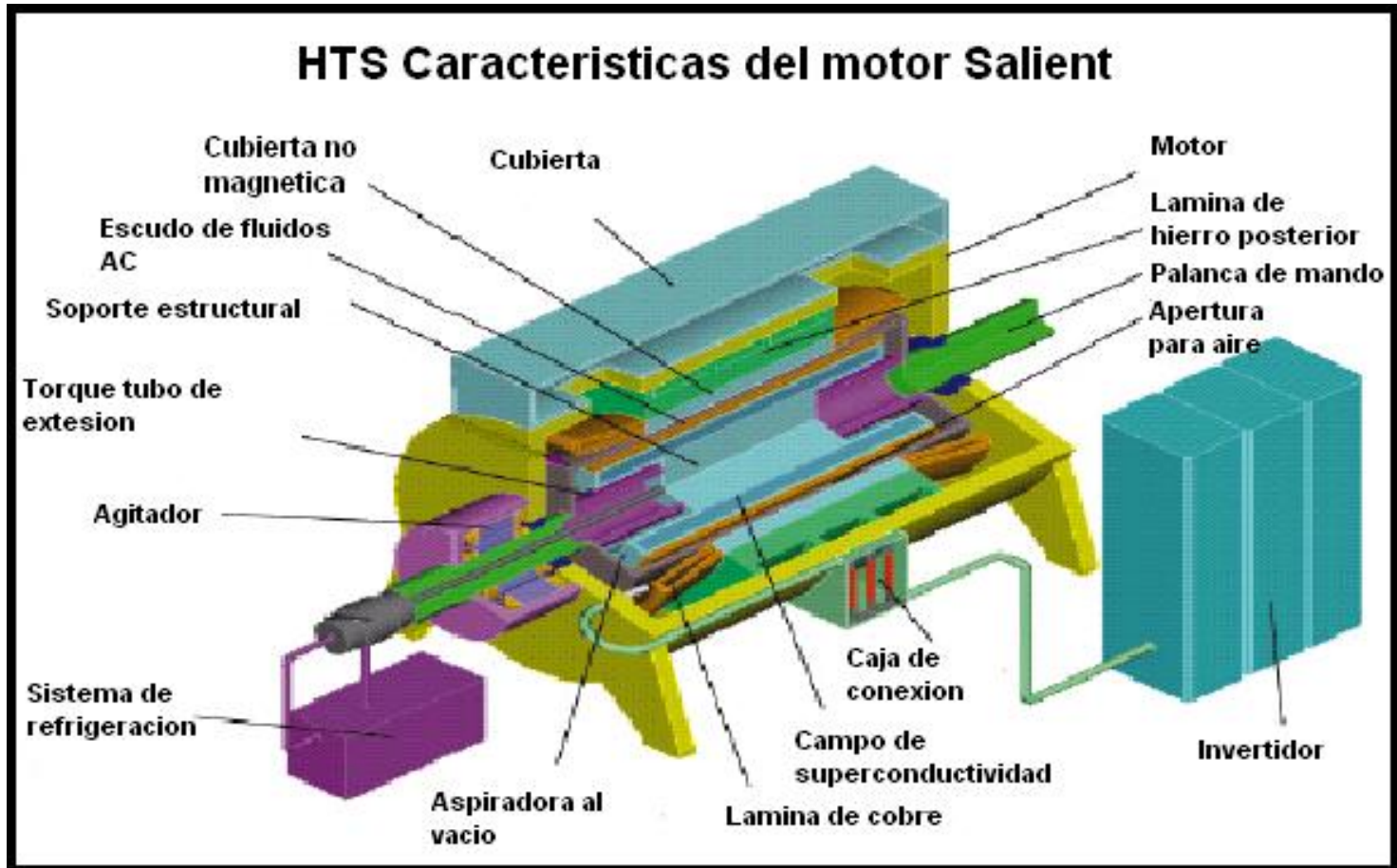
Transformador- de sobrecapacidad de dos tiempos sin daño de aislamiento y ambientalmente amigable debido a la baja necesidad de aceite necesaria para la operación.

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



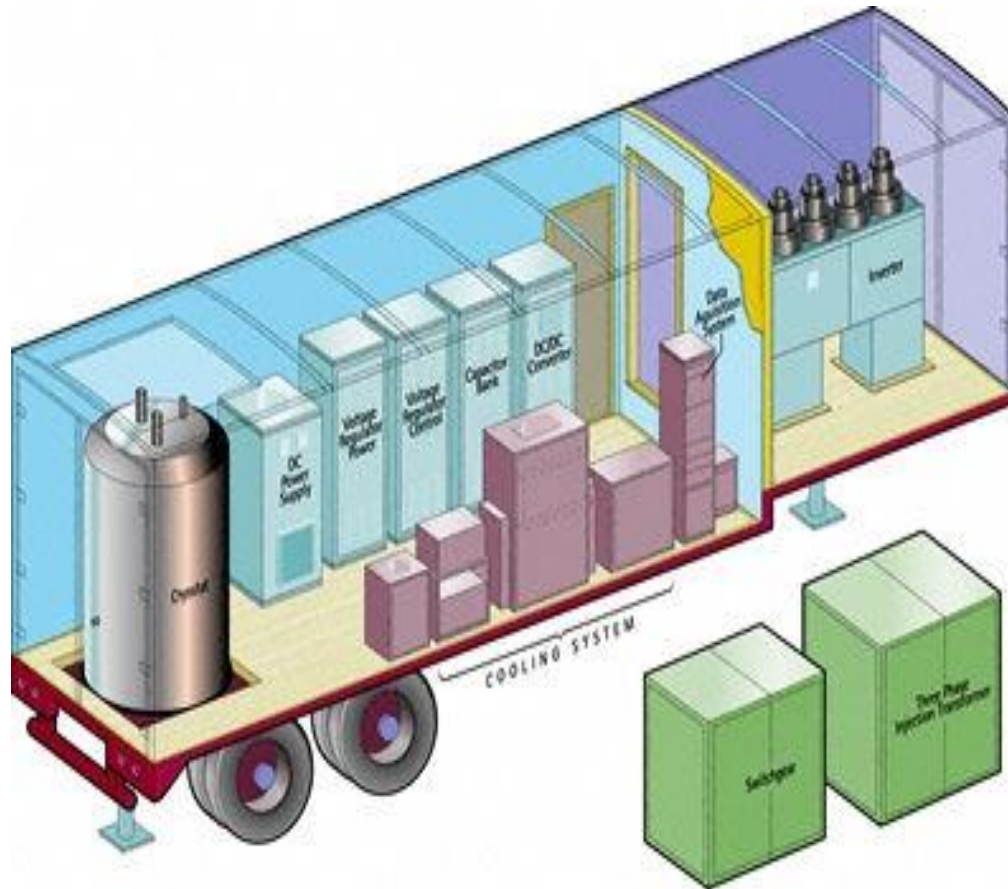
Fuente: Waukesha Electric Systems

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.