

Szupravezetés

Sólyom Jenő

MTA SZFKI és ELTE Fizikai Intézet

Az atomoktól a csillagokig, 2007. december 6.

Vázlat

- Egyszerű fémek elektromos tulajdonságai
- A szupravezetés jelensége
- Mágneses tulajdonságok
- Elméleti megfontolások
- Makroszkopikus kvantumok jelenségei (Josephson-jelenség)
- A szupravezetés alkalmazásai
- Szupravezetés szobahőmérsékleten?

Egyszerű fémek elektromos tulajdonságai I

Az 1827-ben felfedezett Ohm-törvény szerint az alkalmazott feszültség és az átfolyó áram arányos:

$$U = I R .$$

Az áramsűrűséget és a mintán belüli elektromos teret véve :

$$j = \sigma E .$$

A mikroszkopikus kapcsolat nem lokális. Az áramsűrűség egy r helyen attól is függ, hogy a térerősség térben hogyan változik a mintában.



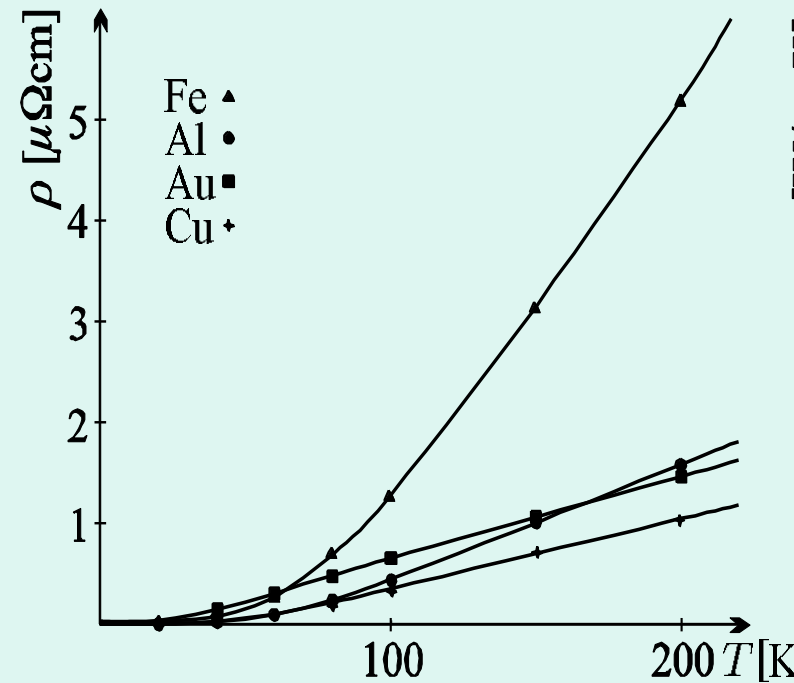
Georg Simon Ohm
(1789-1854)

Egyszerű fémek elektromos tulajdonságai II.

Az R ellenállás függ a hőmérséklettől. Ennek elsőrendű oka a kristálysíkok rezgése. Szokásos hőmérsékleteken, szobahőmérsékleten vagy afölött

$$R \sim T.$$

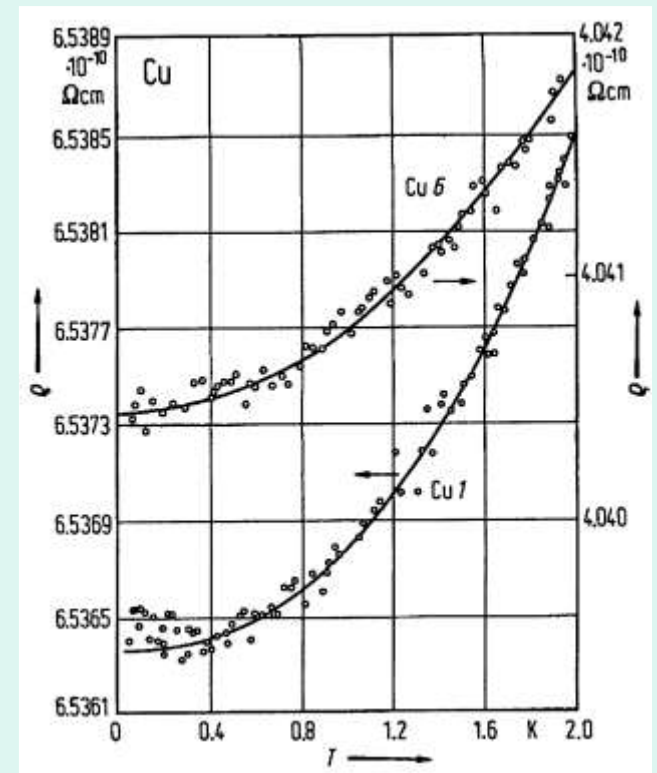
Alacsonyabb hőmérsékleteken ez már nem igaz. Annak ellenére, hogy a kristály nem szűnik meg rezegni, az ellenállás ideális esetben az abszolút nulla hőmérsékleten eltűnne. Az elektronok mint hullámok akadálymentesen tudnak terjedni.



Egyszerű fémek elektromos tulajdonságai III.

A mintában mindig jelen lévő szennyezések miatt valódi anyagban mégis véges marad az ellenállás $T = 0$ -n is.

A maradék ellenállás nagyságát a minta tisztaságának jellemzésére lehet használni.

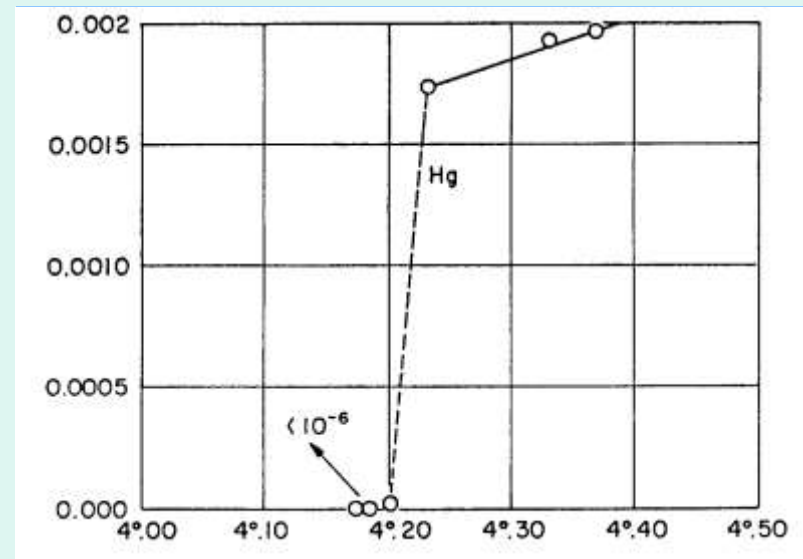


A szupravezetés jelensége



Heike Kamerlingh Onnes
(1853-1926)

H. Kamerlingh Onnes 1911-ben másféle viselkedést figyelt meg igen tiszta higanyban (később más fémekben is): az ellenállás hirtelen leesik nullára. Ezt a viselkedést nevezte el szupravezetésnek.



A szupravezető elemek a periódusos rendszerben

KNOWN SUPERCONDUCTIVE ELEMENTS

■ BLUE = AT AMBIENT PRESSURE
■ GREEN = ONLY UNDER HIGH PRESSURE

1	IA	1	H	IIA	2	He	0																														
2		3	Li	4	Be	5	B	6	C	7	N	8	O	9	F	10	Ne																				
3		11	Na	12	Mg	13	Al	14	Si	15	P	16	S	17	Cl	18	Ar																				
4		19	K	20	Ca	21	Sc	22	Ti	23	Y	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
5		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
6		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
7		87	Fr	88	Ra	89	+Ac	104	Rf	105	Ha	106	106	107	107	108	108	109	109	110	110	111	111	112	112	<i>SUPERCONDUCTORS.ORG</i>											

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

A szupravezetők nem a legjobb fémek (nemesfémek) vagy a legegyszerűbb fémek (alkálifémek) közül kerülnek ki, hanem az átmenetifémek közül.

Szupravezetők elektromos tulajdonságai

- A Maxwell-egyenletek érvényesek maradnak, de Ohm-törvénye nem érvényes.
- Az anyagra jellemző kritikus hőmérséklet (T_c) alatt az ellenállás eltűnik. Az áram veszteség nélkül halad át szupravezetőn.
- Ha gyűrű alakú mintába áramot vezetünk be, az az idők végtelenjéig veszteség nélkül kering. (Áram tárolása.)
- Mindez egyenáramra vagy alacsony frekvenciájú váltóáramra igaz. Nagyfrekvenciás árammal szemben már ellenállás lép fel.

Mágneses tulajdonságok I.

Az egyszerű fémek paramágnesesek, külső mágneses tér hatására mágnesessé válnak, a közelükbe tett mágnest magukhoz vonzzák (l. hűtőszekrényre tapadó mágnes).

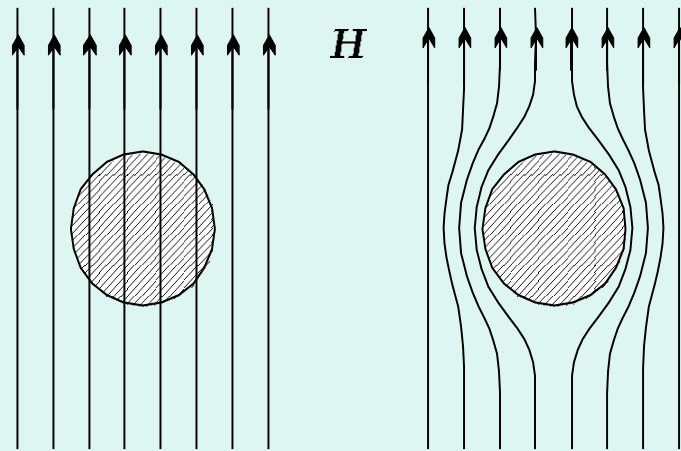
A szupravezetők diamágnesesek, a föléjük tett mágnest taszítják, az lebeg fölöttük. A mágnes áramot kelt a szupravezető felületén, annak mágneses tere taszítja a mágnest



Mágneses tulajdonságok II.

Ideális vezetőben a mágneses tér időben nem változhat, mert a mágneses tér időbeli változása elektromos teret indukálna.

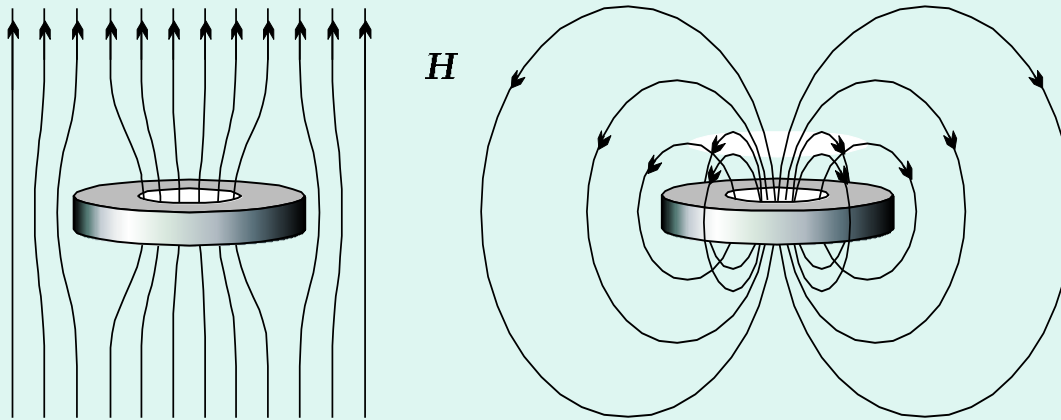
Mágneses tér jelenlétében hűtve le a mintát az ideális vezető állapotba, a mágneses tér befagy a mintába. Az ideális vezetőt téve mágneses térbe, az a mintába nem hatolhatna be.



Ezzel szemben szupravezető belsejében soha sem lehet mágneses tér, az oda nem tud behatolni, illetve kilökődik.

Mágneses tulajdonságok III.

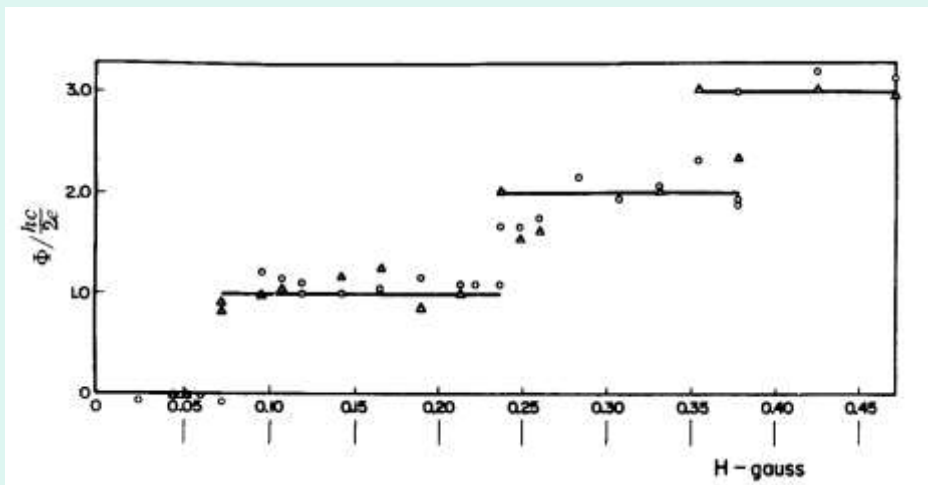
Gyűrű alakú mintát véve a mágneses tér által keltett felületi áram, mely a külső teret kiszorítja, a tér kikapcsolása után is megmarad.



A szupravezető állapotban a gyűrűn belüli tartományba kiszoruló mágneses fluxus nem lehet akármekkora.

$$\Phi = h/2e$$

A Planck-állandó megjelenése mutatja, hogy kvantumos jelenségről van szó.



Az elmélet felé vezető lépések

- Az atommagok valamilyen szerepet kell játszanak, mert azonos elem esetén a kritikus hőmérséklet függ az izotóp-összetételtől.
- Az elektronrendszer merev.
- A fluxuskvantum értékében az elemi töltés kétszerese jelent meg.
- A kristályrácsban mozgó elektron a rácsot megrezegteti, ez vonzólag hat a többi elektronra. Két elektron között kötött állapot (Cooper-pár) jöhet létre.

BCS-elmélet (1957)



John Bardeen
(1908-1991)



Leon N. Cooper
(1930-)



J. Robert Schrieffer
(1931-)

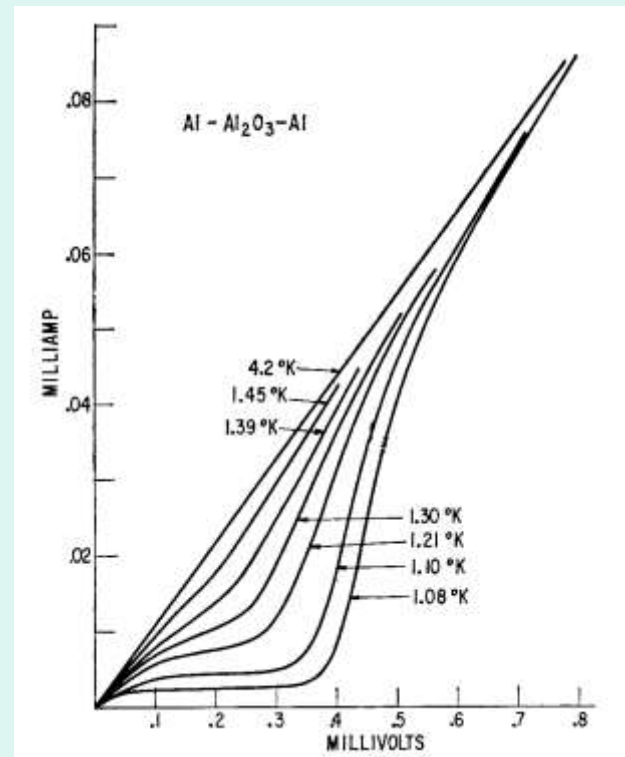
- Szupravezető rendszerben az összes elektron párokba rendeződik.
- Párt csak véges energia befektetésével lehet felszakítani
- A makroszkopikus állapotot csak a **kvantummechanika** segítségével lehet leírni, klasszikusan nem.

Alagútjelenség

Jellegzetesen kvantummechanikai jelenség. Az elektronok szigetelő rétegen is átjutnak két vezető között.

Szupravezetőknél különlegesség, hogy áram csak akkor folyhat, ha a feszültség elég nagy, hogy felszakítsa a párokat.

Ez a párok létének legjobb bizonyítéka.



Josephson-jelenség (1962)



Brian D. Josephson
(1940-)

Nemcsak egyes elektronok, hanem elektronok párojai is áthaladhatnak alagútjelenséggel két szupravezető között.

- Feszültségesés nélkül folyhat áram.
- Egyenfeszültséget alkalmazva váltóáram folyik
- Váltakozó feszültség hatására egyenáram folyik.
- Az áram igen érzékeny mágneses térre.

A szupravezetés alkalmazásai

- A legnagyobb teljesítményű elektromágnesek szupravezetőkből készülnek
 - o részecskegyorsítók
 - o MRI berendezés
 - o mágneses vonat
- A mágneses tér mérésére szolgáló precíziós eszközök

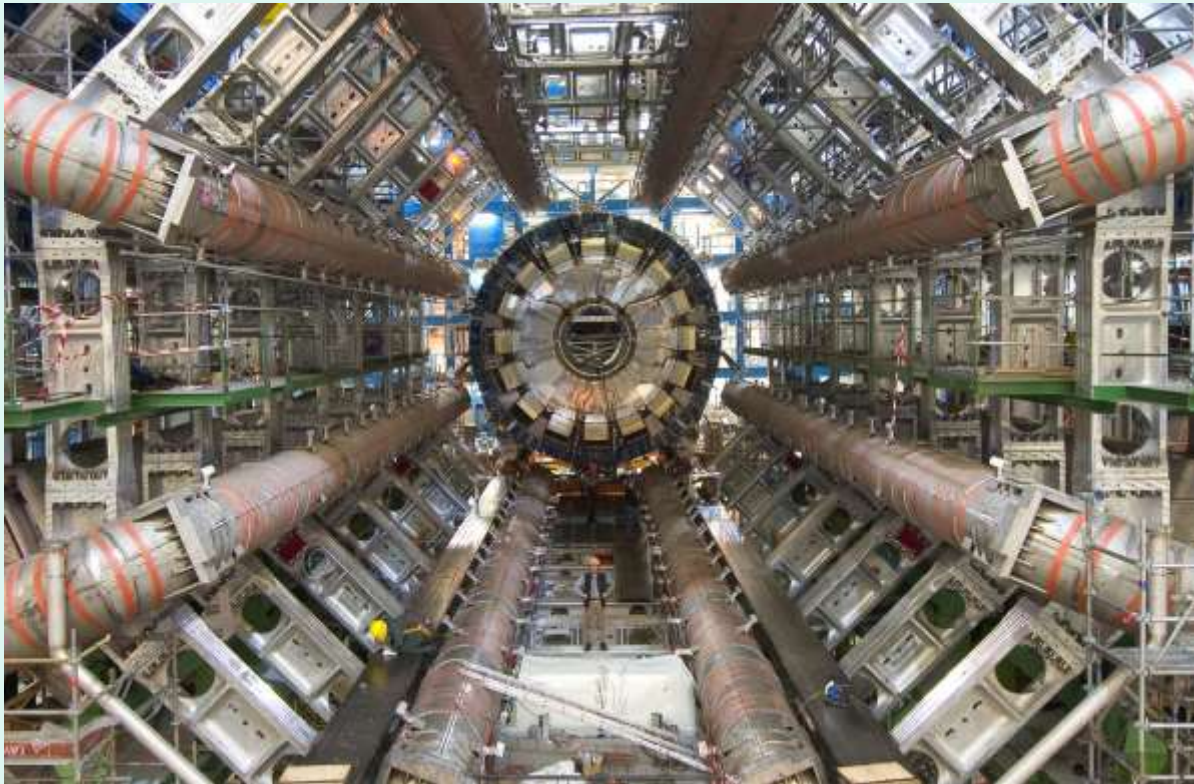
A RHIC gyorsító szupravezető mágnesei

A brookhaveni RHIC gyorsítónál szupravezető mágnesek biztosítják a részecskék keringéshez szükséges nagy mágneses teret.



A világ legnagyobb szupravezető mágnesese

A Genf melletti CERN-ben, egy most épülő részecskegyorsítónál egy éve helyezték üzembe a világ legnagyobb szupravezető mágnesét.



Magnetic Resonance Imaging

A mágneses magrezonancia a fizika és kémia régóta ismert módszere atommagok környezetének tanulmányozására. Élő szervezetről a vízben lévő hidrogén atommagjai segítségével lehet képet kapni.



Paul. C. Lauterbur
1929-2007

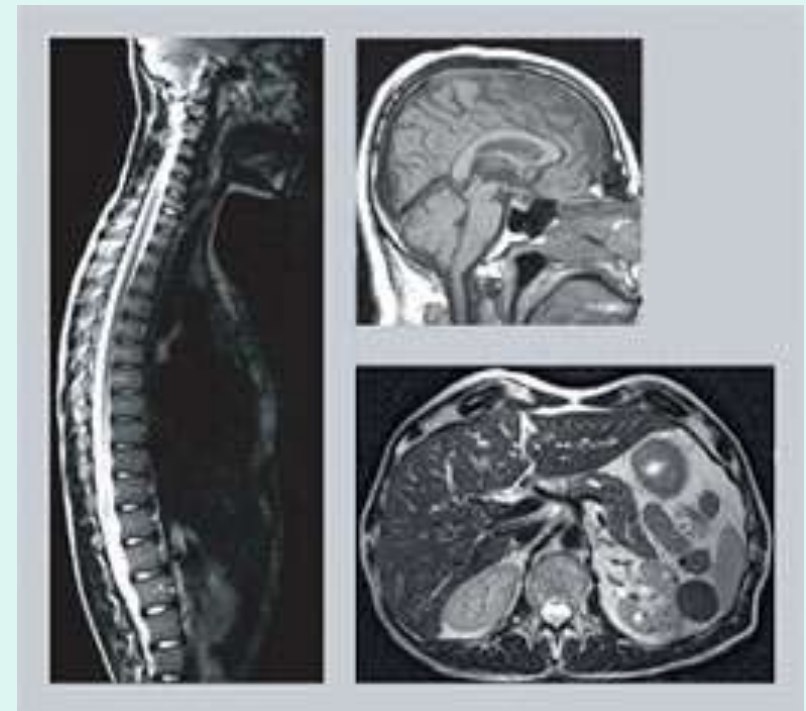


Sir Peter Mansfield
1933-

2003-ban kaptak orvosi
Nobel-díjat az MRI-vel
kapcsolatos felfedezé-
seikért

MRI berendezés

Orvosi alkalmazáshoz nagy stabilitású mágneses tér szükséges. Ezt biztosítja a szupravezető mágnes.

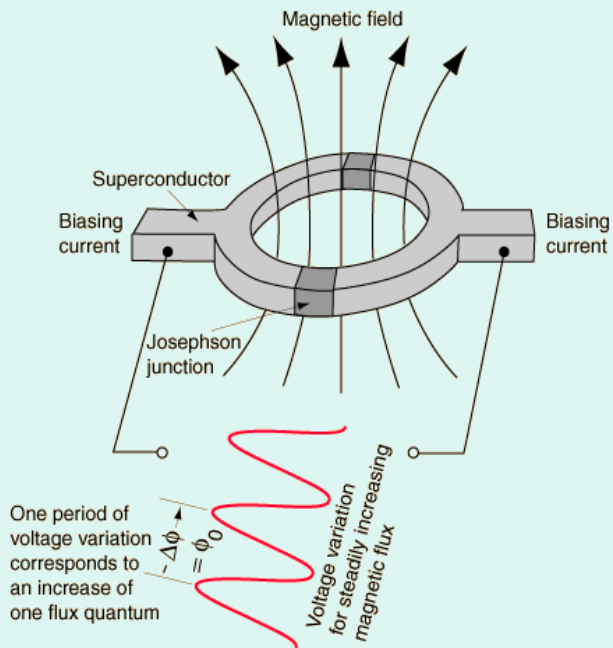


Maglev, mágneses szupervonat

A mágneses lebegést kihasználó, a sínt nem érintő vonatokkal több mint 500 km/óra sebességet értek már el. A japán MAGLEV kísérleti vonatoknál szupravezetőkkel állítják elő a mágneses teret. A sanghaji menetrendszerűen működő vonatnál hagyományos mágneseket alkalmaznak.



Méréstechnikai alkalmazások



Az áram két oldalon futja körbe a belül lévő mágneses teret. Annak ellenére, hogy ott, ahol az áram folyik, nincs mágneses tér, a kifolyó áram függ a belül lévő tér értékétől.

A mágneses tér megváltozása igen érzékenyen mérhető.

Mágneses EnkefaloGram

Az agyi neuronokban folyó igen gyenge áram által keltett rendkívül gyenge mágneses tér is mérhető.

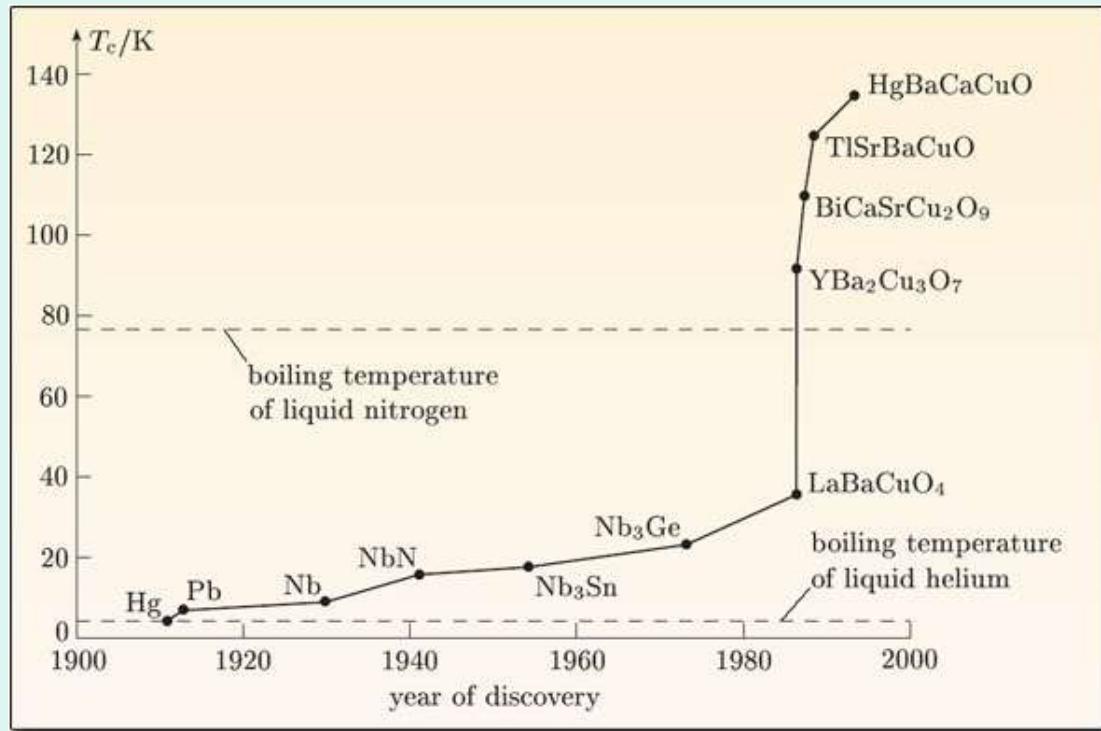
Az agyműködés dinamikája vizsgálható.



Jövőbeli tervek

- Távvezeték
- Áramtároló
- Szupravezető elektromotor

Szobahőmérsékleti szupravezetés?



A legmagasabb ismert kritikus hőmérséklet az 1980-as évek közepén hirtelen megugrott, de még messze vagyunk a szobahőmérséklettől. Elérünk-e valaha is oda?