

Modern fizika vegyészmérnököknek

10. óra: Szupravezetés 1.

Budapest, 2022. november 16.

Összefoglalás: szupravezetés

Elemek vagy vegyületek, amik alacsony hőmérsékleten hirtelen elvesztik elektromos ellenállásuk

Kiszorítják magukból a mágneses mezőt

1911-ben fedezte fel Kamerlingh Onnes (Hg)

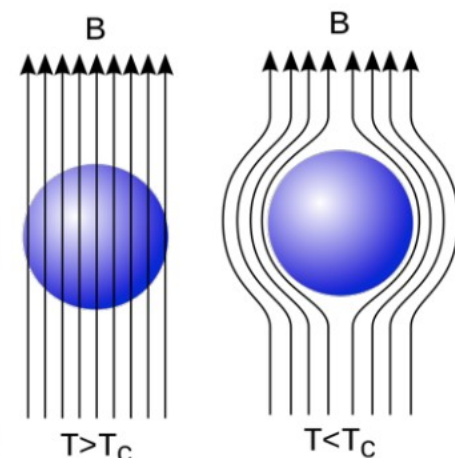
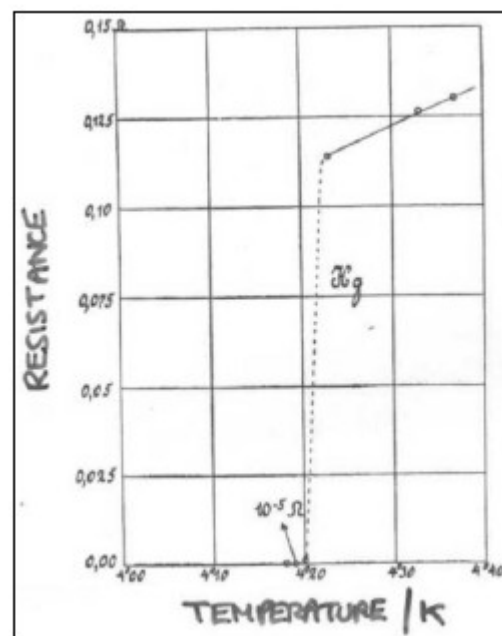
1950-es években születtek első jó elméletek, de a "magas hőmérsékletű" szupravezetést ezek sem magyarázzák

Fázisátalakulás: a vezetési elektronok Cooper-párokat alkotva tudnak ellenállás nélkül folyni

II-es típusú szupravezetők: mágneses tér örvények formájában csapdázódik benne
→ levitáció

Alkalmazások:

- mágneses tér érzékeny mérése (SQUID)
- erős mágnesek (CERN, MRI, maglev)



IA

1

1

H

IIA

4

2

3

Li

Be

11

12

Na

Mg

III B

IV B

V B

VI B

VII B

VIII

IX

X

13

14

15

16

17

18

Ar

19

20

21

22

23

24

25

26

27

28

29

30

31

32

33

34

35

36

K

Ca

Sc

Ti

V

Cr

Mn

Fe

Co

Ni

Cu

Zn

Ga

Ge

As

Se

Br

Kr

37

38

39

40

41

42

43

44

45

46

47

48

49

50

51

52

53

54

Rb

Sr

Y

Zr

Nb

Mo

Tc

Ru

Rh

Pd

Ag

Cd

In

Sn

Sb

Te

I

Xe

55

56

57

72

73

74

75

76

77

78

79

80

81

82

83

84

85

86

Cs

Ba

*La

Hf

Ta

W

Re

Os

Ir

Pt

Au

Hg

Tl

Pb

Bi

Po

At

Rn

87

88

89

104

105

106

107

108

109

110

111

112

Fr

Ra

+Ac

Rf

Ha

106

107

108

109

110

111

112

KNOWN SUPERCONDUCTIVE ELEMENTS

■ BLUE = AT AMBIENT PRESSURE

■ GREEN = ONLY UNDER HIGH PRESSURE

III A

IV A

V A

VI A

VII A

0

2

He

10

Ne

18

Ar

36

Kr

54

Xe

86

Rn

SUPERCONDUCTORS.ORG

* Lanthanide Series
+ Actinide 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
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

Fémek, félvezetők elektromos vezetése

U feszültség

→ E elektromos tér

→ elektronok árama

$$R = \frac{U}{I} = \rho \frac{L}{A}$$

Az összefüggésben fontos az atomtörzsek rezgéseinek (fononok) szóródás.

fajlagos ellenállás

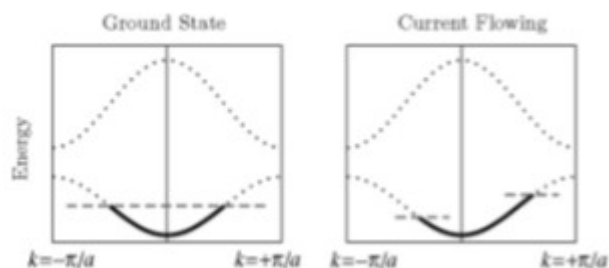
Félvezetők (kevés vezetési elektron/lyuk): Drude modell

$$\rho = \frac{m}{ne^2\tau}$$

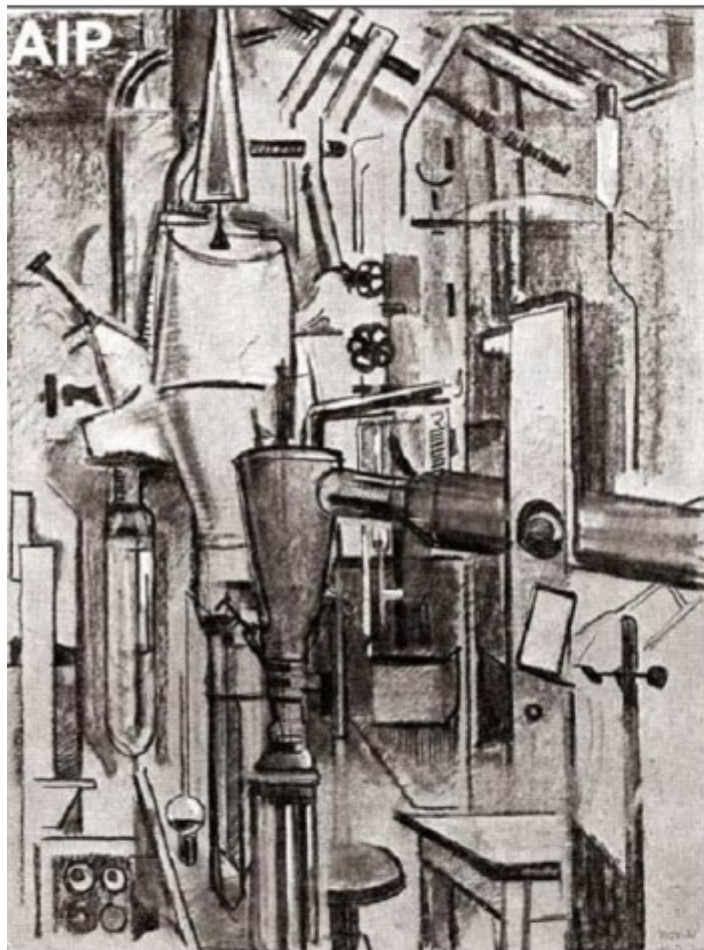
Material	Resistivity, ρ , at 20 °C ($\Omega \cdot m$)
Silver ^[d]	1.59×10^{-8}
Copper ^[e]	1.68×10^{-8}
Annealed copper ^[f]	1.72×10^{-8}
Gold ^[g]	2.44×10^{-8}

Air	10^9 to 10^{15}
Wood (oven dry)	10^{14} to 10^{16}
Sulfur	10^{15}
Fused quartz	7.5×10^{17}
PET	10^{21}
Teflon	10^{23} to 10^{25}

Fémek: sávmélelet

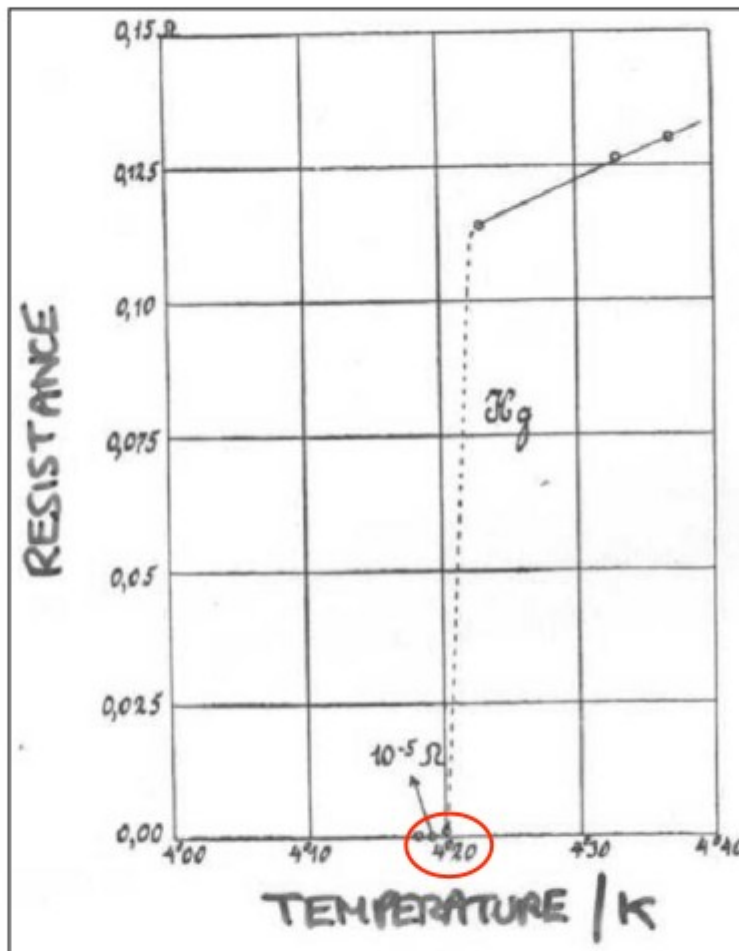


Abszolút nulla hőmérsékletéhez közelítve egyes anyagok fajlagos ellenállása hirtelen eltűnik



Az első hélium cseppfolyósító berendezés (1911)

Folyékony hélium forráspontja:
 $T = 4.2\text{ K}$ ($-269\text{ }^{\circ}\text{C}$)



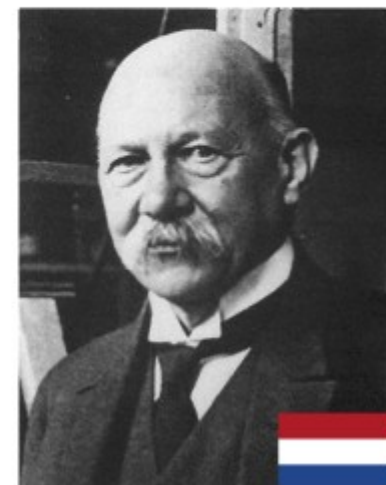
Felfedezés (1911):

A higany ellenállása $T = 4.15\text{ K}$ hőmérsékleten zérusra csökken (mérhetetlenül kicsivé válik)



Nobel-díj: 1913

Heike Kamerlingh
ONNES



Az elemek több mint 50%-a szupravezető elég alacsony hőmérsékleten – és még több extrém nyomáson

KNOWN SUPERCONDUCTIVE ELEMENTS

■

 BLUE = AT AMBIENT PRESSURE

■

 GREEN = ONLY UNDER HIGH PRESSURE

1A																	0																			
1	H																2	He																		
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	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
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												

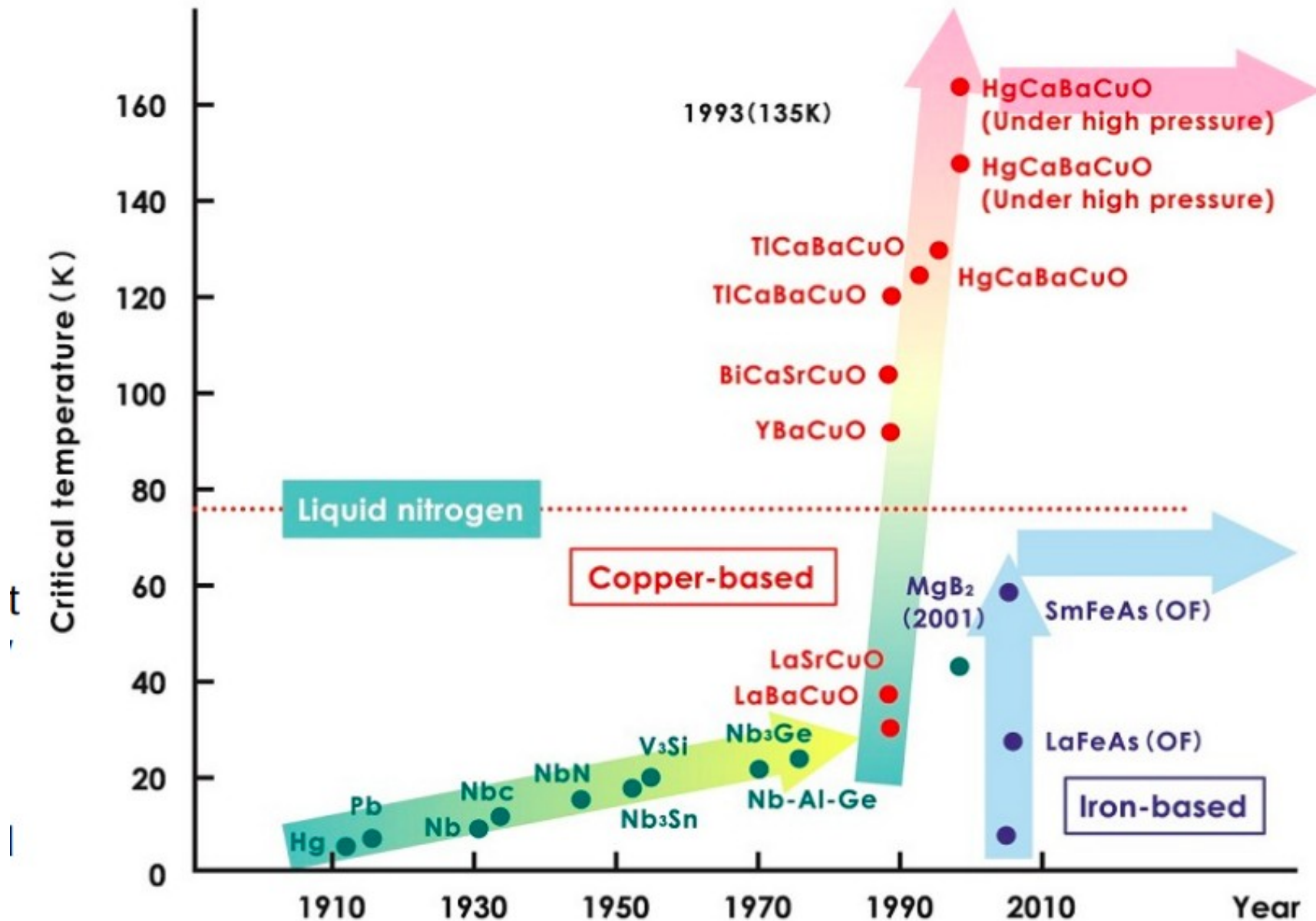
SUPERCONDUCTORS.ORG

* Lanthanide Series

+ Actinide 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
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

Intenzív kutatás → sok szupravezető anyag
Cél: szobahőmérsékletű szupravezető



2020: extrém nyomáson (Föld középpontja) szobahőmérsékletű szupravezető! 2022: Cikkek visszavonva, problémák az adatokkal

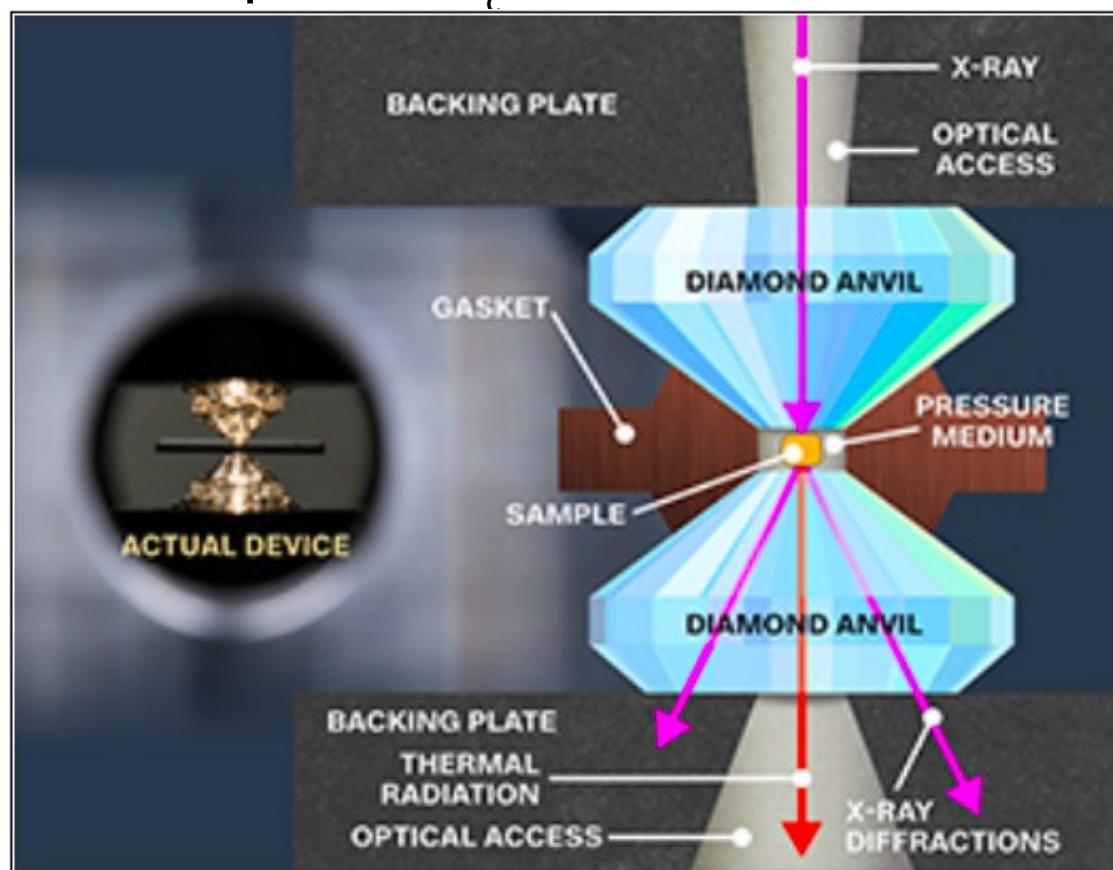
1968, Ashcroft, elméleti jóslat: elemi H, nagy nyomás: fém, extrém nyomás (500GPa > 360GPa=Föld középpontjában) → szobahőmérsékleten szupravezető

2015, Emerets (Mainz): H + S gyémánttüllők közé préselve $T_c = 203\text{K}$

2020, Ranga Dias (Uni Rochester):
gyémánttüllők közé préselt
H + C + S

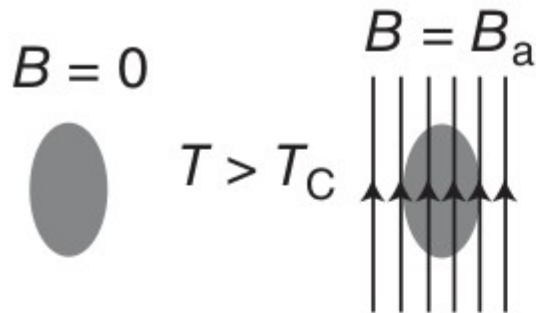
lézerrel gerjesztve, ismeretlen
formában megszilárdul
→ szupravezet, kiszorítja
a mágneses teret

Dias and Salamat have started a new company, Unearthly Materials, to find a path to a room temperature superconductor that can be scalable at ambient pressure.

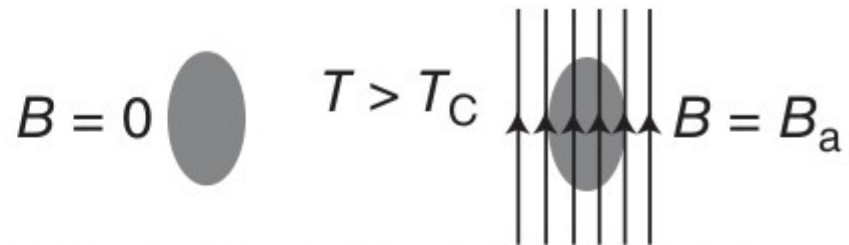


Szupravezetők: kiszorítják magukból a mágneses teret. Ez nem következik önmagában a 0 ellenállásból

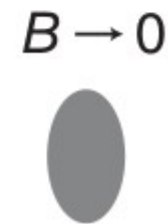
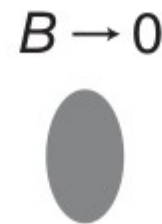
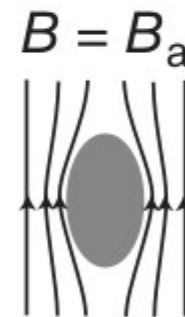
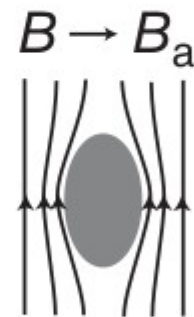
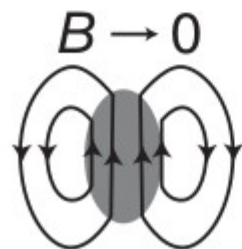
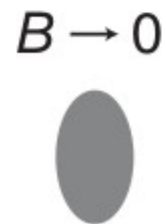
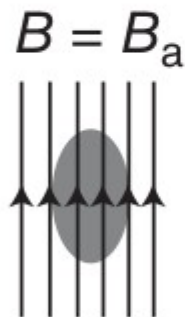
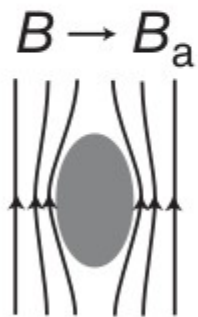
(a) Perfect conductor



(b) Superconductor



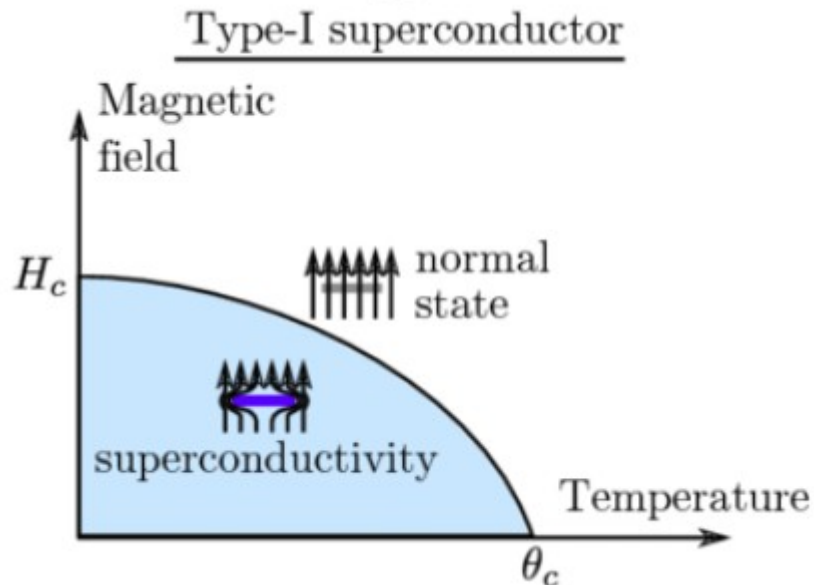
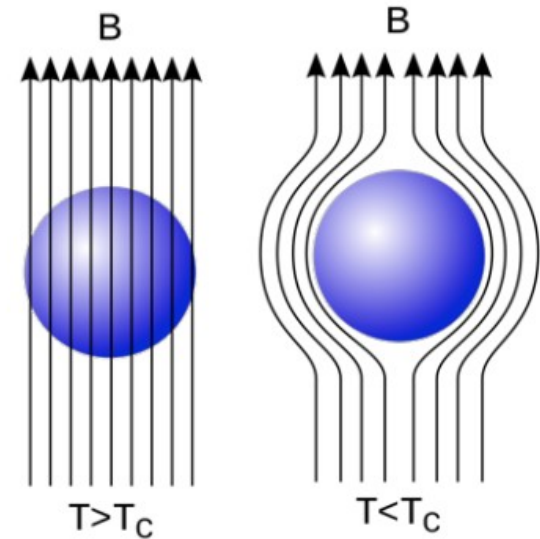
Cool below T_C



A mágneses tér kiszorítása = Meissner-jelenség része a szupravezetők definíciójának

Meissner-jelenség (1933):

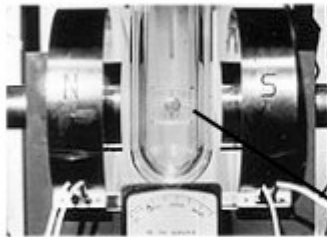
szupravezető a T_c alatt nem kiszorítja magából a mágneses teret.



$$B_C(T) = B_C(0) \left[1 - \left(\frac{T}{T_c} \right)^2 \right]$$

Hogyan mérjük a Meissner-jelenséget?

$$T = 1.6 \text{ K}, B = 8 \text{ mT} = 80 \text{ Gauss}$$



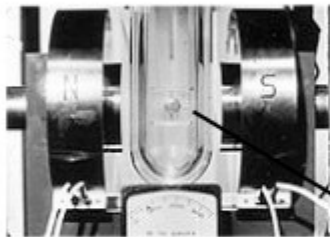
ón (Sn) henger
egy elektromágnesben
folyékony héliummal hűtve

henger körül
sok kis iránytű



T_c ($= 3 \text{ K}$) alatt a mágneses erővonalak elkerülik a szupravezetőt.

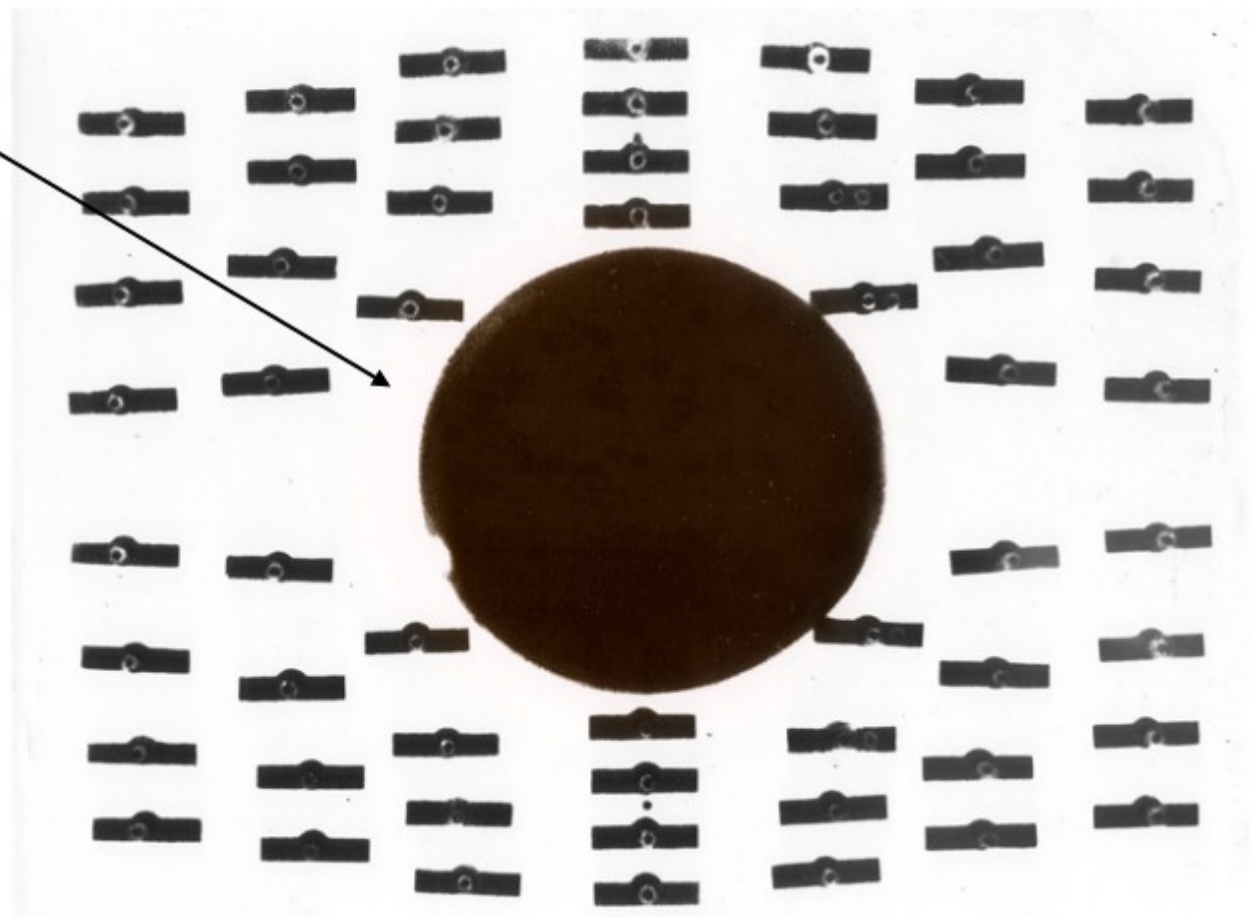
Hogyan mérjük a Meissner-jelenséget?



ón (Sn) henger
egy elektromágnesben
folyékony héliummal hűtve

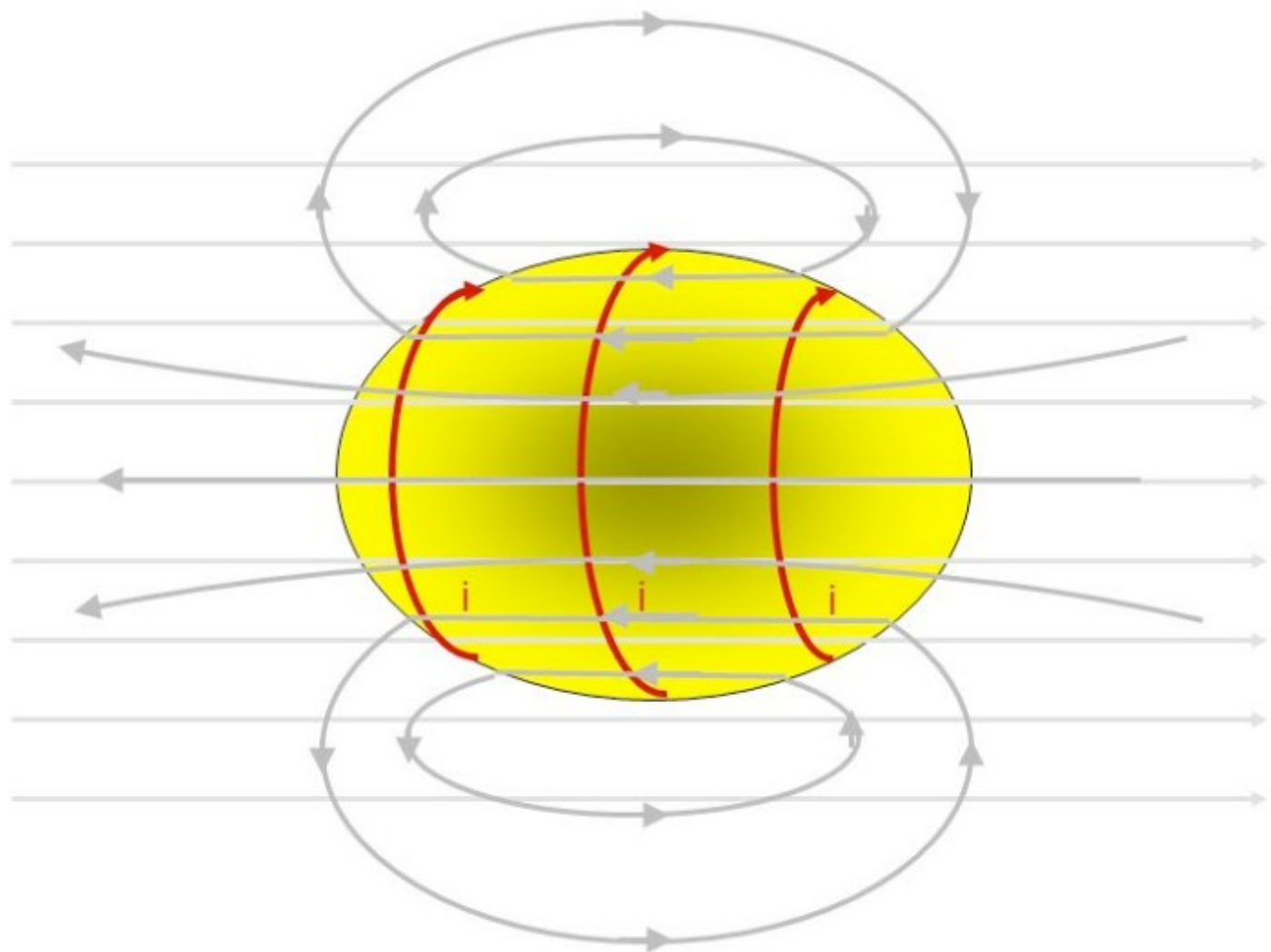
henger körül
sok kis iránytű

$$T = 4.2 \text{ K}, B = 8 \text{ mT} = 80 \text{ Gauss}$$



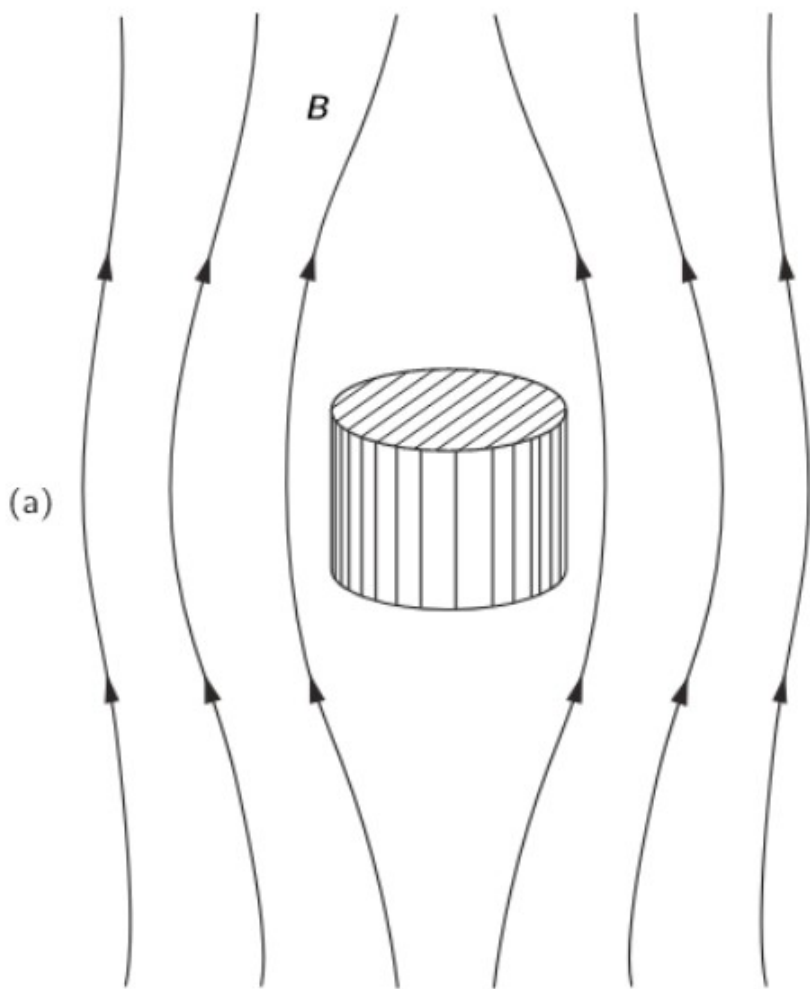
T_c ($= 3 \text{ K}$) fölött a mágneses erővonalak átszúrják a szupravezetőt.

Hogyan jön létre a Meissner-jelenség?

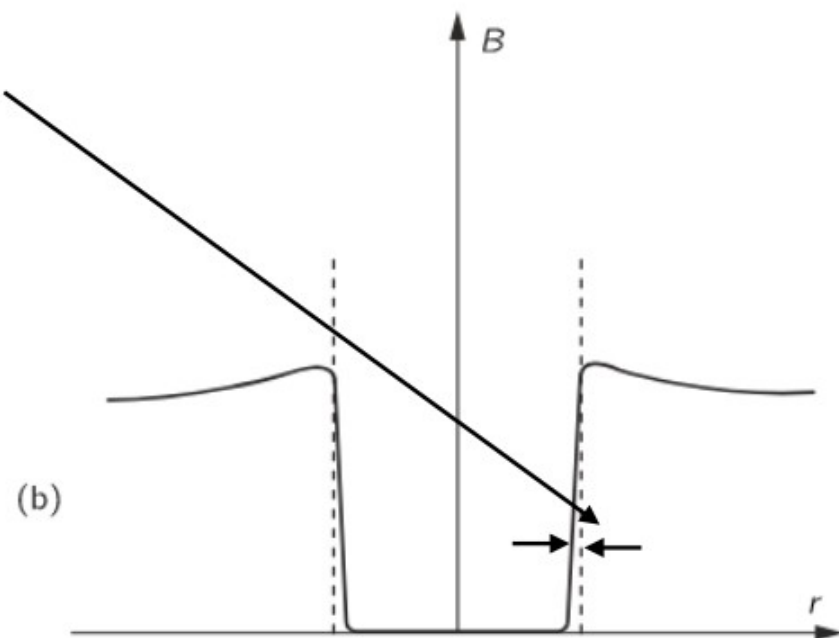


A szupravezető felületén olyan köráramok indulnak, melyek pont a külső B-térrel ellentétes B-teret indukálnak.

A mágneses tér egyáltalán nem hatol be a szupravezetőbe?



De.

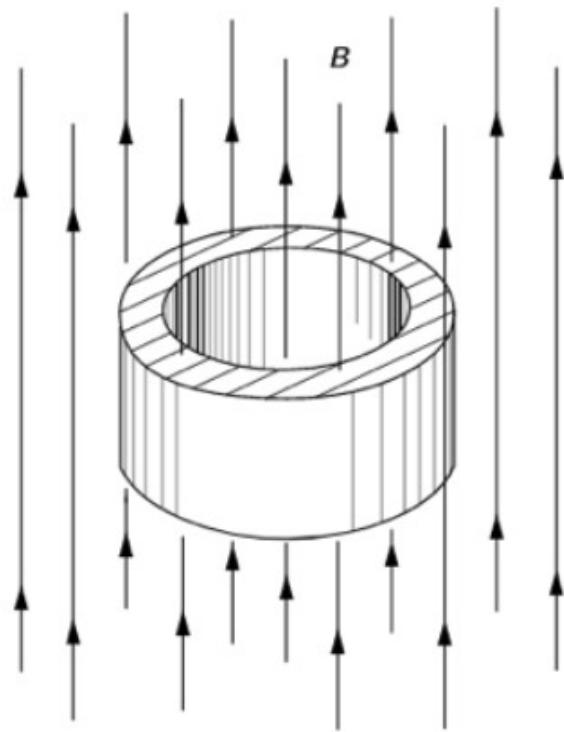


mágneses tér exponenciálisan cseng le a felülettől való d távolság függvényében:
 $B(d) \propto e^{-d/\lambda}$

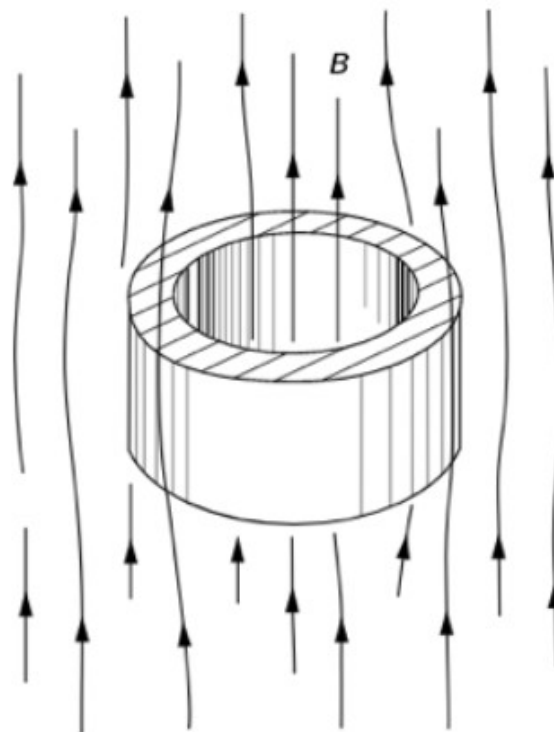
London-féle behatolási mélység, λ

λ függ az anyagtól, a hőmérséklettől, a mágneses tér erősségétől
tipikus nagyságrend: $\lambda \sim 10 - 100 \text{ nm}$

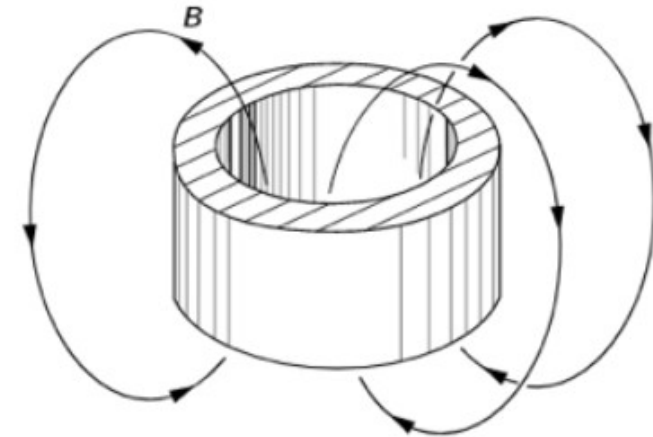
Mi történik egy szupravezető gyűrűben?



(a)



(b)



(c)

kritikus hőmérséklet felett
külső B-térben



kritikus hőmérséklet alatt
külső B-térben



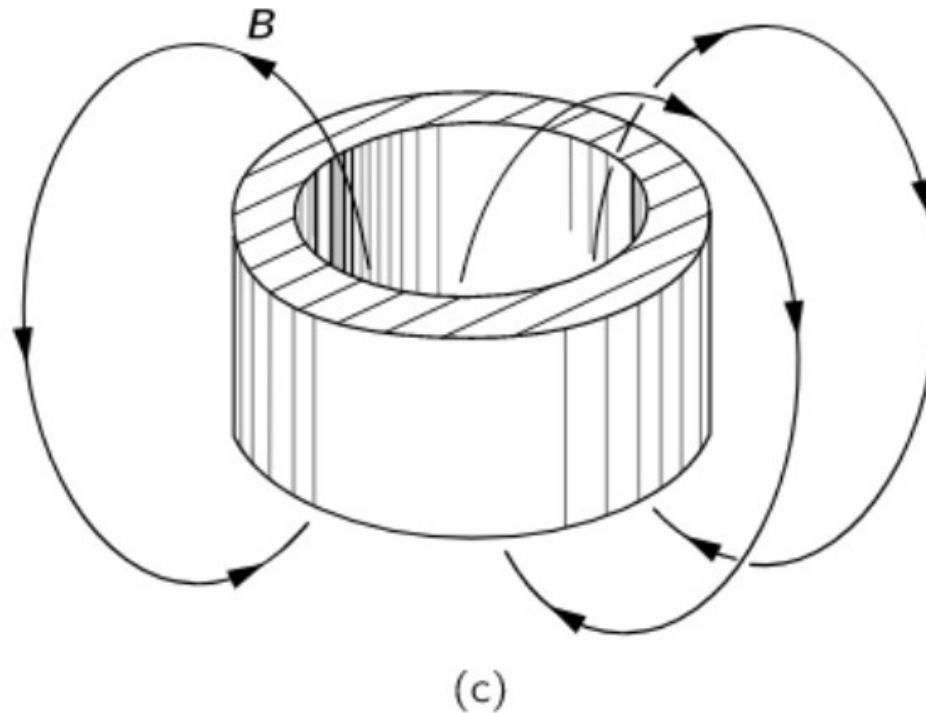
kritikus hőmérséklet alatt
B-tér kikapcsolva

B-tér behatol az anyagba

B-tér kiszorul az anyagból
gyűrűben köráram indul

köráram megmarad
(perzisztens áram)

Mi történik egy szupravezető gyűrűben?



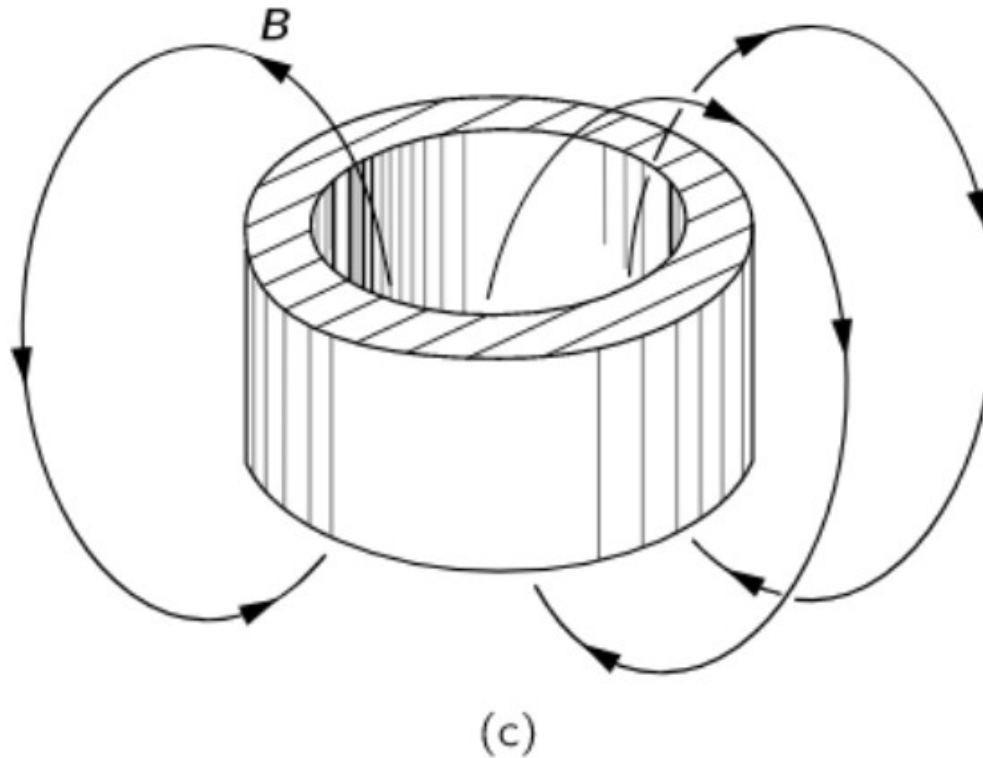
- köráram nagyon sokáig (akár több ezer év) fennmarad (perzisztens áram)
- bezárt fluxus kvantált: a fluxuskvantum egész számszorosa

$$\Phi = \int d\mathbf{F} \mathbf{B}(\mathbf{r}) = n\Phi_0 \quad (n \text{ egész})$$

$$\text{fluxuskvantum: } \Phi_0 = \frac{h}{2e} \approx 2 \times 10^{-15} \text{ Wb}$$

Föld mágneses tere: mm² -enként ~10.000 fluxuskvantum

Hogyan mérjük a zérus ellenállást?

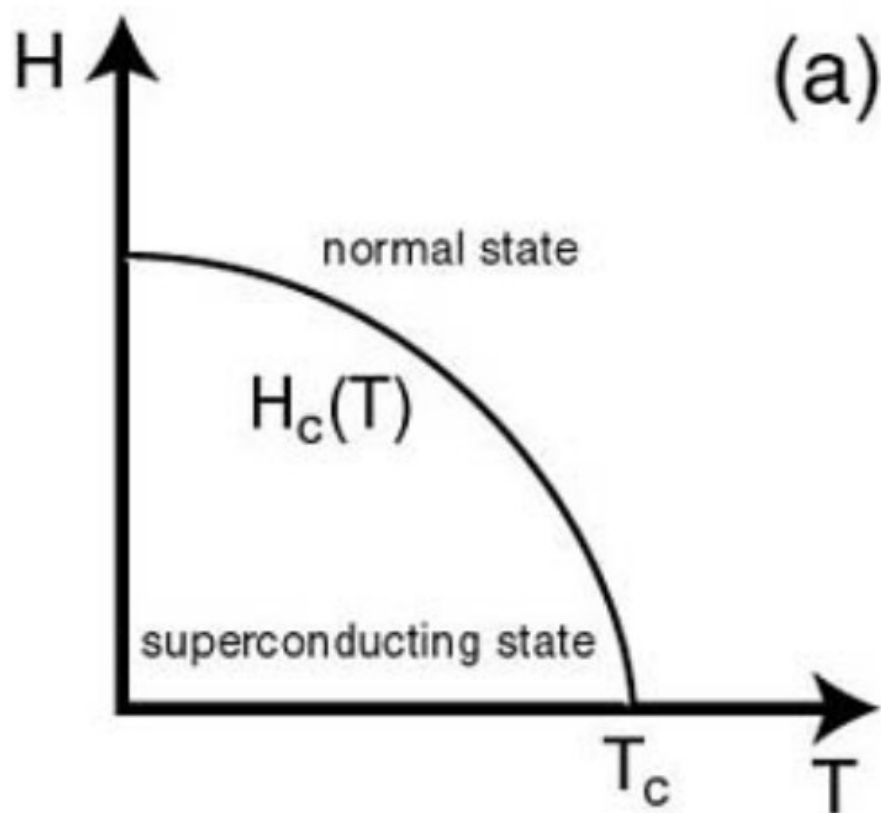


- köráram nagyon sokáig (akár több ezer év) fennmarad (perzisztens áram)
- áram időfüggésének méréséből a gyűrű R ellenállása megkapható:

$$B(t) \propto I(t) = I_0 e^{-(R/L)t} \equiv I_0 e^{-t/\tau}$$

Egy szupravezető bármekkora mágneses teret kitaszít?

Nem. Erős mágneses tér megöli a szupravezetést.



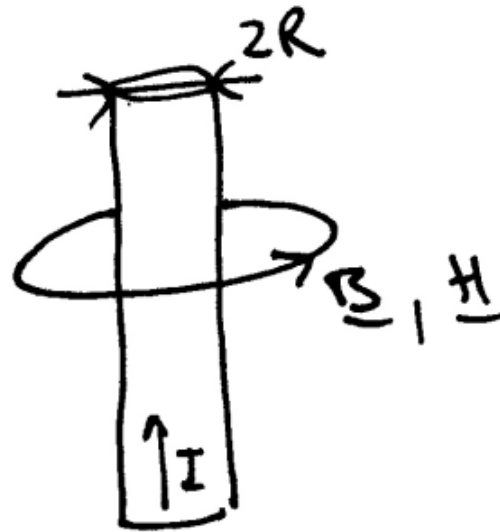
$$H_c(T) = H_c(0) \left[1 - \left(\frac{T}{T_c} \right)^2 \right]$$

kritikus tér: $H_c(T)$; hőmérséklettől függ

kritikus hőmérséklet: $T_c(H)$; mágneses tértől függ

Egy szupravezető bármekkora áramot tud vezetni?

Nem. Az áram mágneses teret indukál, ami pedig megölheti a szupravezetést.



Áramjárta (I), hengeralakú, R sugarú szupravezető felületén a tér:

$$H = I / (2\pi R)$$

Há I túl nagy, akkor $H > H_c$, és a szupravezetés megszűnik.

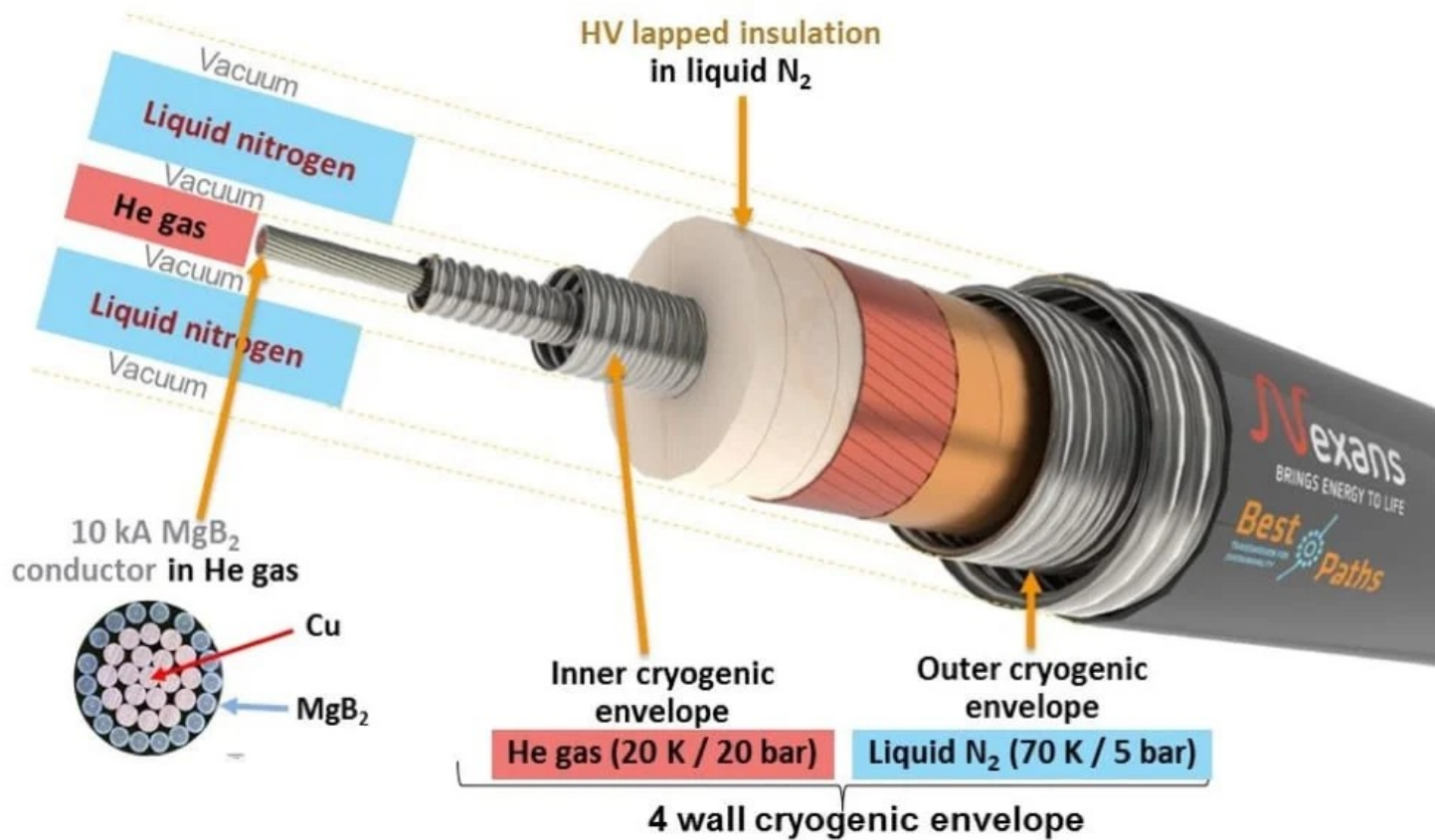
Szupravezető kábelek áramvezetésre: áttörés előtt álló technológia?

• Leading players of Superconducting Cables

- ◊ Nexans
- ◊ AMSC
- ◊ MetOx
- ◊ Furukawa Electric
- ◊ STI
- ◊ Bruker
- ◊ Fujikura
- ◊ SEI
- ◊ SuNam
- ◊ SHSC
- ◊ Innost

• Market split by Type, can be divided into:

- ◊ YBCO Cable
- ◊ Bi-2212 Cables
- ◊ Bi2223 Cables
- ◊ Others



Miért vannak vékony szupravezető kábelek tekercselve az alkalmazásokban, miért nem egy vastag kábel van?

Áramjárta (I), hengeralakú, R sugarú szupravezető felületén a tér:

$$H = I/(2\pi R)$$

Ha I túl nagy, akkor $H > H_c$, és a szupravezetés megszűnik.

Ha N -szer annyi áramot akarok vinni:

- a) N drót, párhuzamosan
- b) N -szer olyan vastag drót

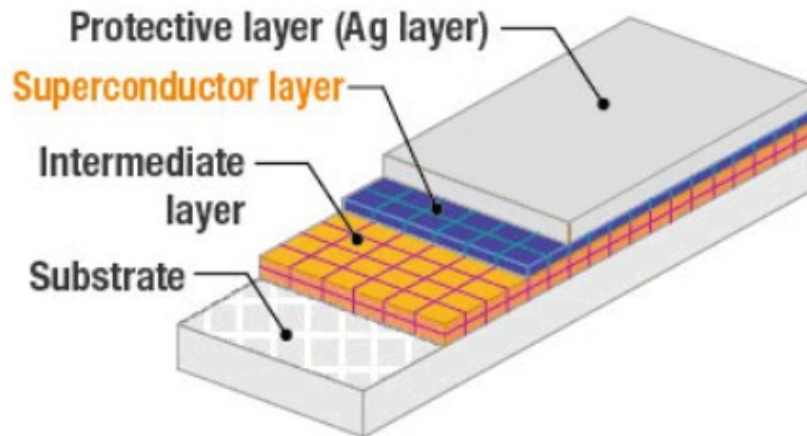
Furukawa Electric, Japan:

cable

275kV HTS power cable



66kV HTS power cable



YBCO tape

YBCO is a crystalline chemical compound with the formula $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$. This material, a renowned "high-temperature superconductor," achieved prominence because it was the first material to achieve superconductivity above the boiling point of nitrogen.

2005-ben 500m-en demonstrálták

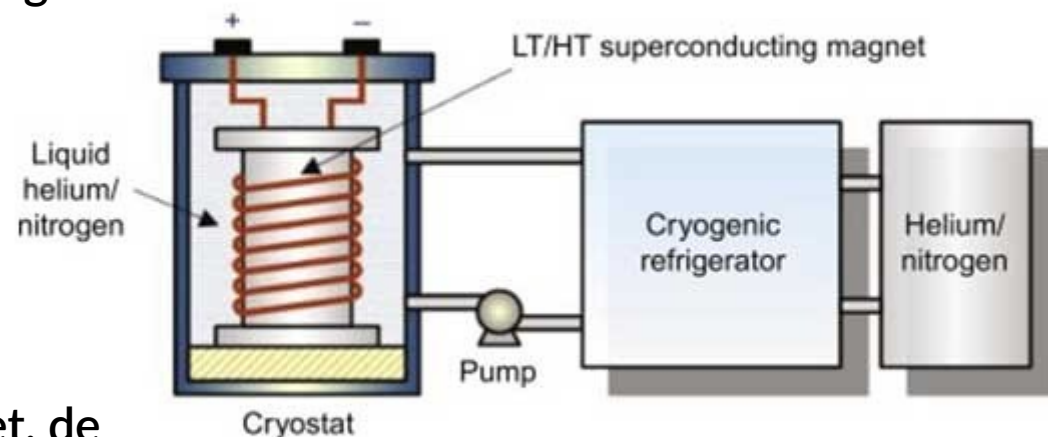
Szupravezető kábelek elektromágnesekhez: piacon lévő technológia

Erős mágneses tér:

- NMR (mágneses rezonancia) anyagszerkezethez
- MRI (mágneses rezonancia) orvosi diagnosztika
- Tömegspektrométer
- Fúziós reaktor
- Részecskegyorsító
- Bizonyos maglev vonatok (Japán)

Anyaga: másodfajú szupravezető

- NbTi (10K, 15T@4.2K)
- Nb₃Sn (18K, 25T@4.2K)
- Magashőmérsékletű szupravezető is lehet, de nehezebb drótot gyártani: BSCCO, YBCO



Rézbe ágyazva → stabilabb, vezeti az áramot, ha kell

Üzemeltetés:

- 1) Lassú áramnövelés (önindukció veszélyes)
- 2) Perzisztens üzemmód: szupravezetővel rövidre zárás, áramforrásról levehető

Szupravezető mágnesek története

1911: ötlet Kamerlingh Onnestől

1955: első siker, Nb drót, 0.7T @4.2K

1960: Perzisztens üzemmód, ehhez szupravezető kapcsoló

1961: Nb+Sn nagyobb mágneses teret bír → 8.8T

1962: Nb+Ti : könnyebb alakítani, gyártani, olcsóbb, de max. 10T → legelterjedtebb alapanyag

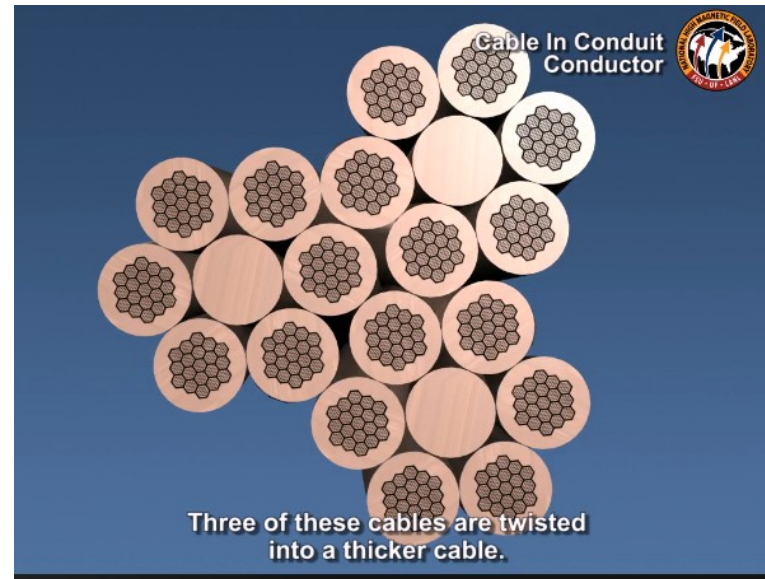
1986: magashőmérsékletű szupravezetők: He helyett N hűtés

2007: YBCO → 26.8T

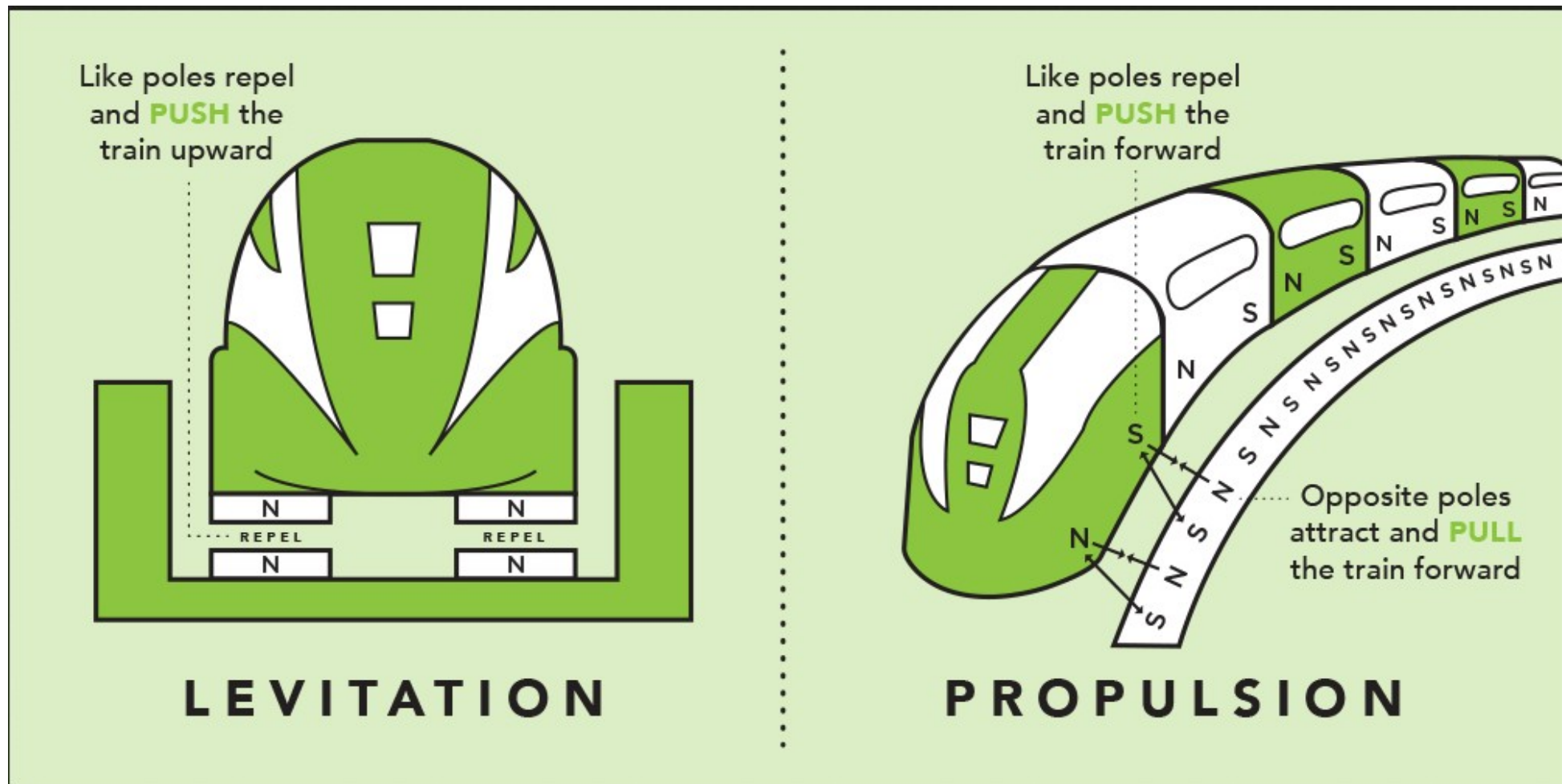
2017: National High Magnetic Field Laboratory (NHML), YBCO → 32 T,
robusztusan megépített elektromágnes

2019: NHMFL: kísérleti tekercs, YBCO: 45.5 T

Egy példa a gyártási folyamatra: National High Magnetic Field Laboratory



A Maglev-vonatokban a szupravezetők az erős mágneses teret keltő tekercsekhez kellene



A maglev vonatokat lineáris indukciós motor valamilyen válfaja hajtja

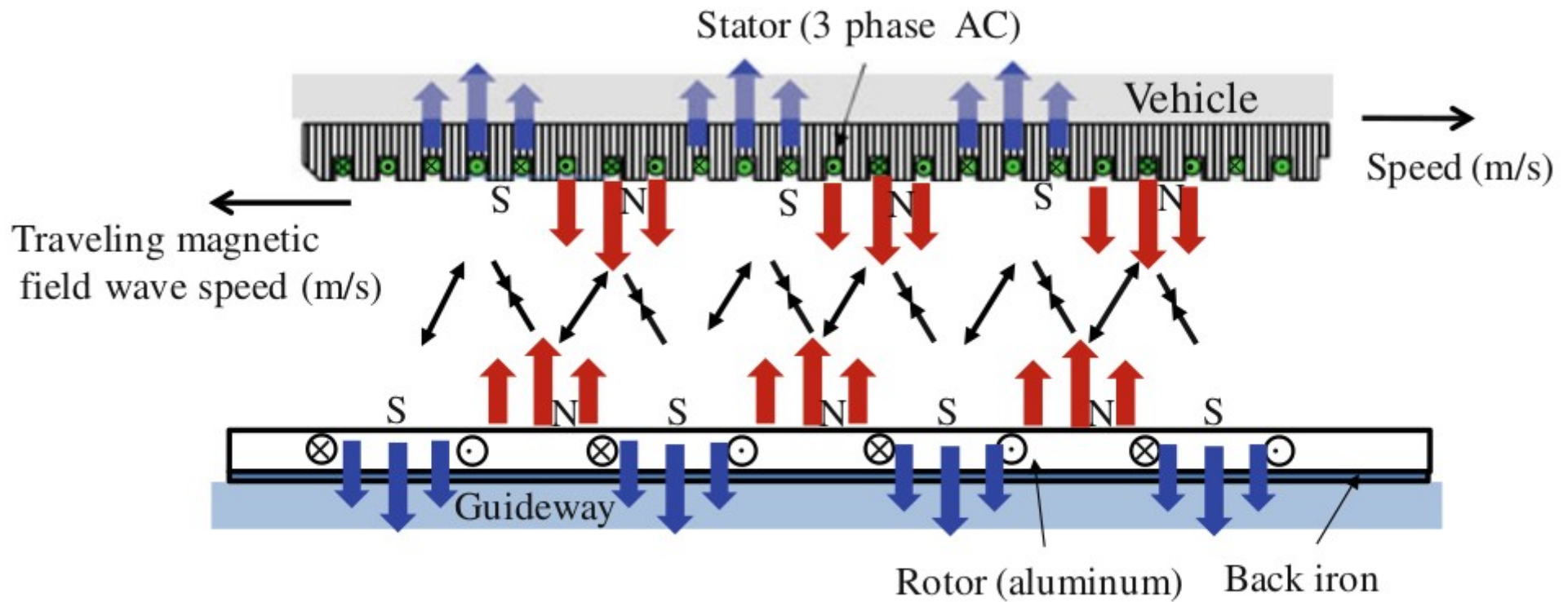


Fig. 2.24 Principle of a LIM for use in urban maglev vehicle

Japán maglev vonat: szupravezetők



teszt fázis
603 km/h
1 cm lebegés
tervezett nyitás: 2027

szupravezető a vonatban,
tekercsek a vágányokban

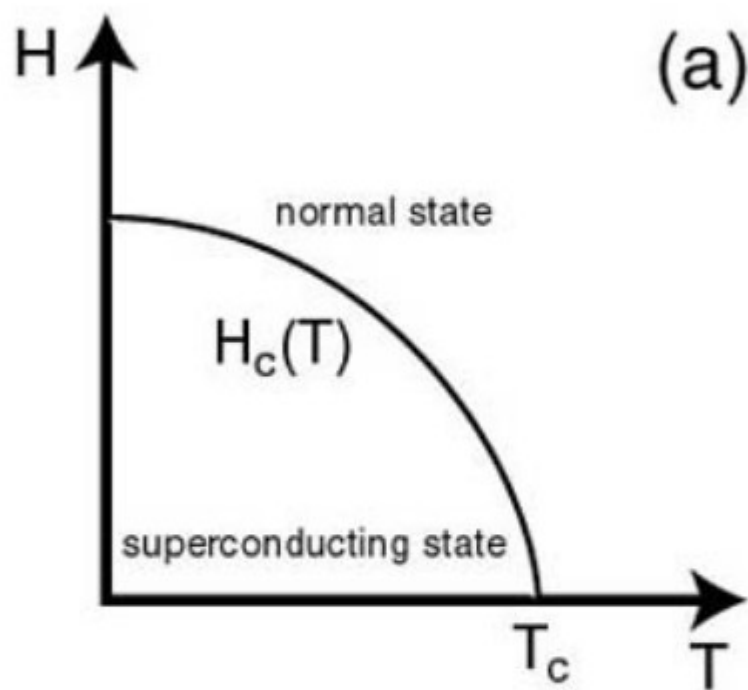
Működő kínai maglev vonat: szupravezető nélkül

Nearly 40 years after work on maglev trains began, the first commercial maglev system Transrapid launched its operation in Shanghai, China in 2004. Key technical

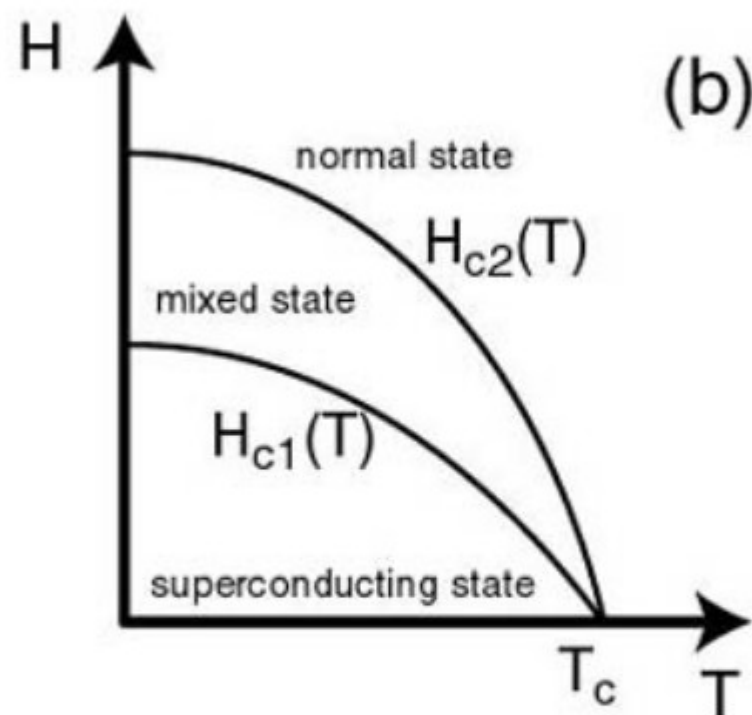


430 km/h
1 cm lebegés
elektromágnesek

Elsőfajú és másodfajú szupravezetők



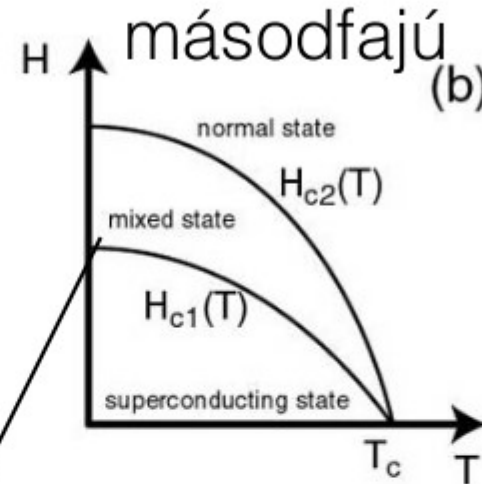
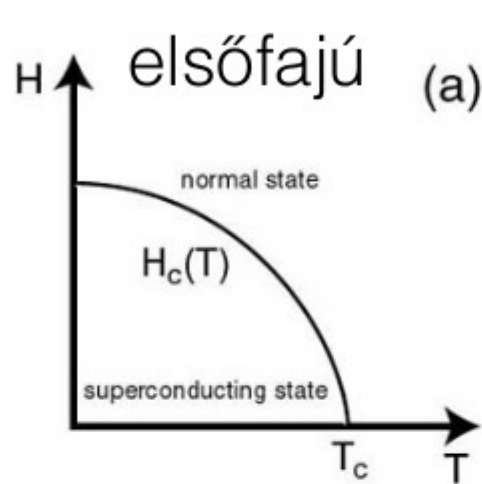
elsőfajú
(pl. higany, alumínium)



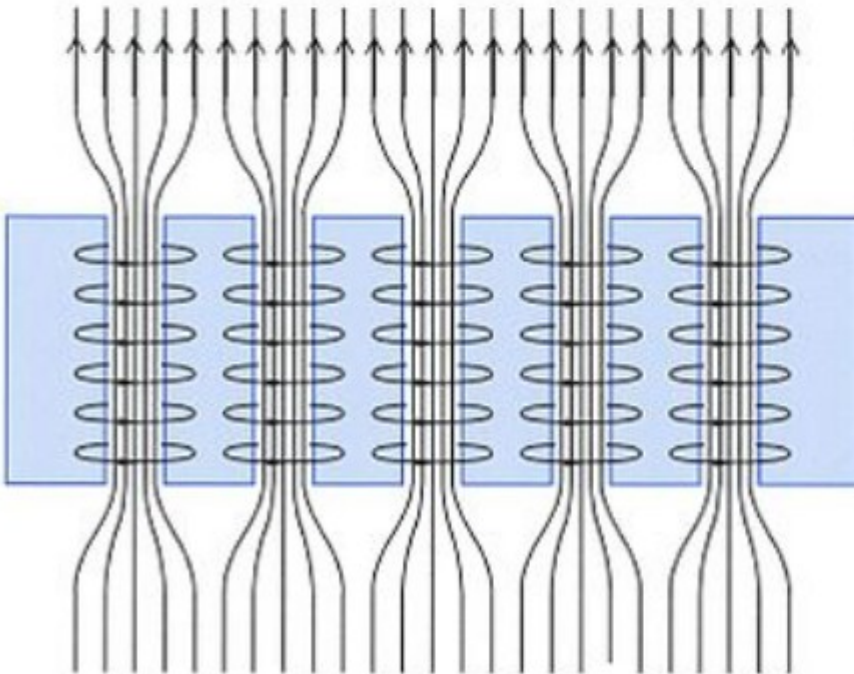
másodfajú
(pl. kuprátok)

Elsőfajú és másodfajú szupravezetők

pl. Hg, Al



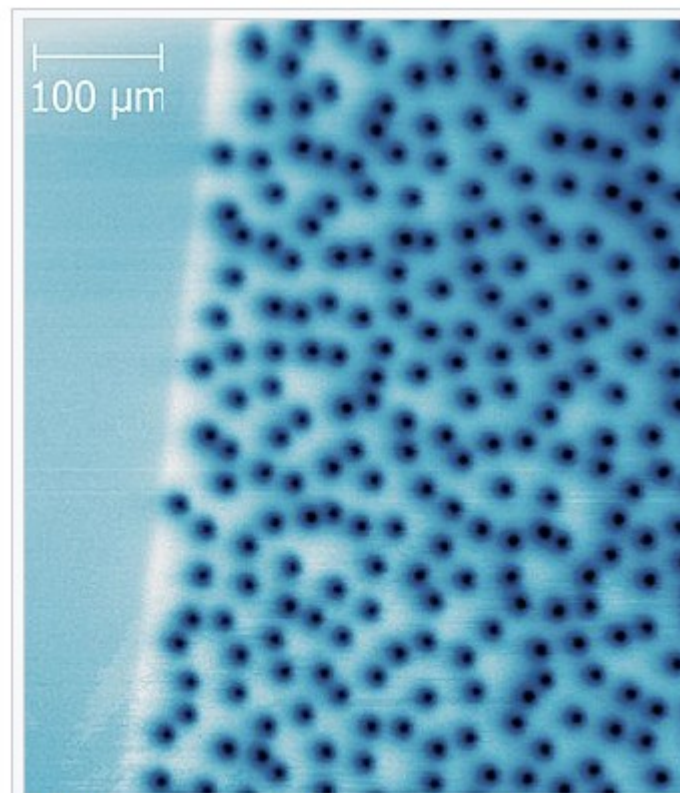
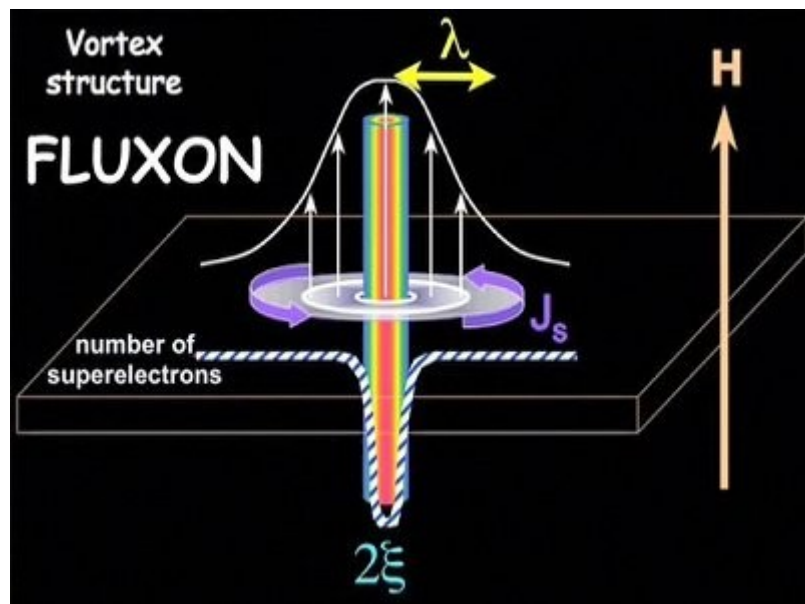
pl. magashőmérsékletű szupravezetők, YBCO, BSSCO



kevert fázis vagy vortex fázis:

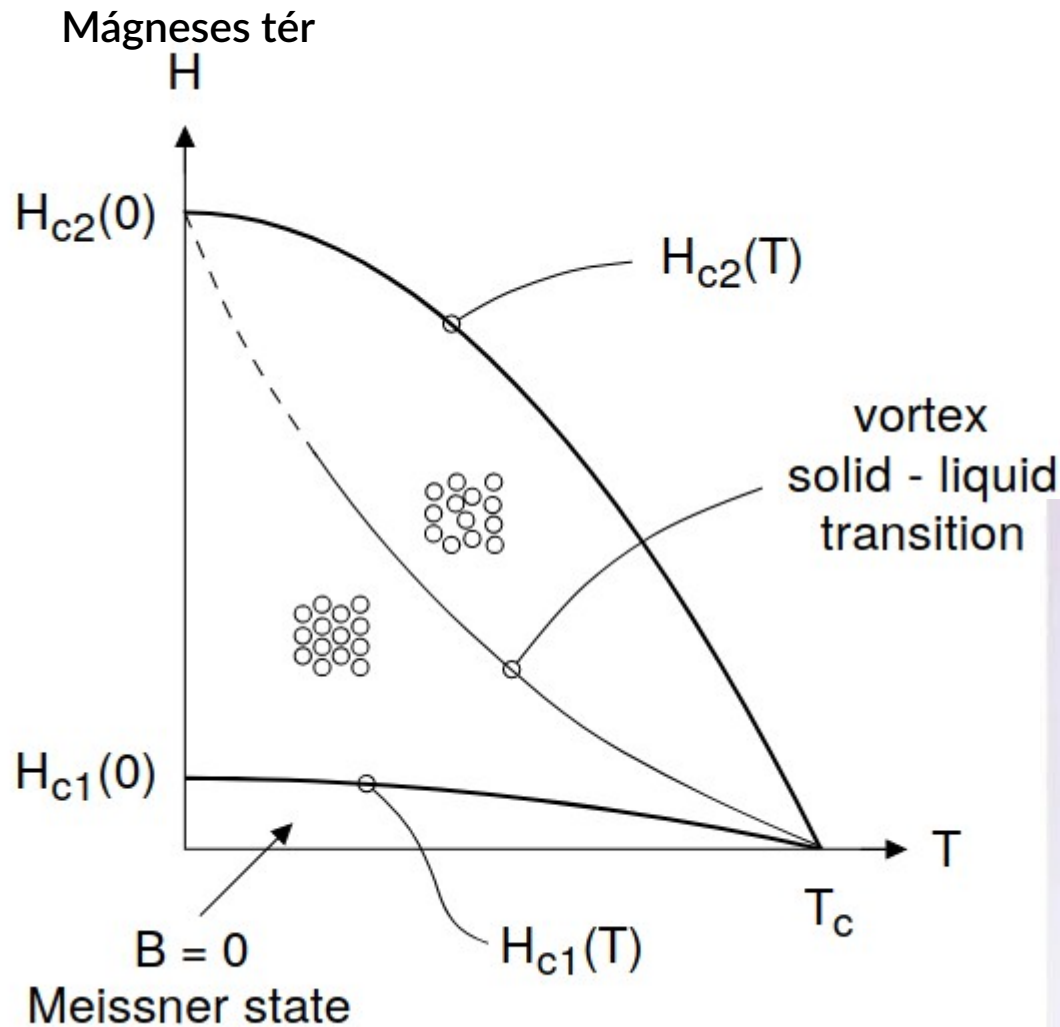
- mágneses tér csövek (vortexek) mentén behatol az anyagba
- a vortexek körül örvényáramok képződnek
- a vortexek „magja” elveszti a szupravezetést
- az anyag ellenállása továbbra is lényegében nulla

A másodfajú szupravezetők örvényei (Abrikosov vortex)
egy-egy fluxuskvantum mágneses teret visznek, taszítják
egymást, árammal hajthatók

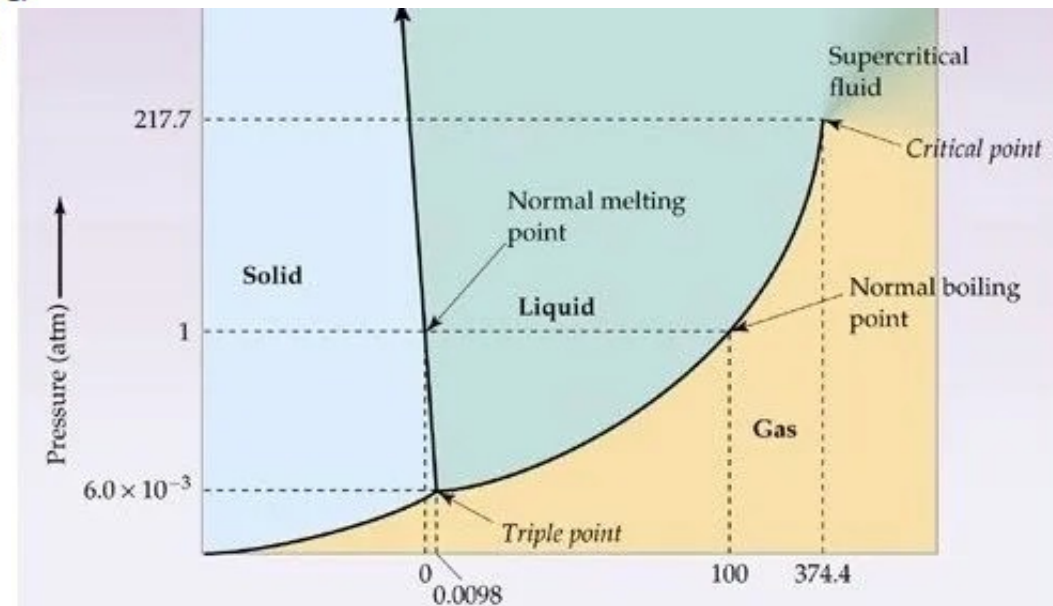


Vortices in a 200-nm-thick
YBCO film imaged by scanning
SQUID microscopy^[1]

Másodfajú szupravezetők vortexei Abrikoszov-rácsba rendeződnek, a rács megolvad ha a vortexek sűrűsége túl nagy



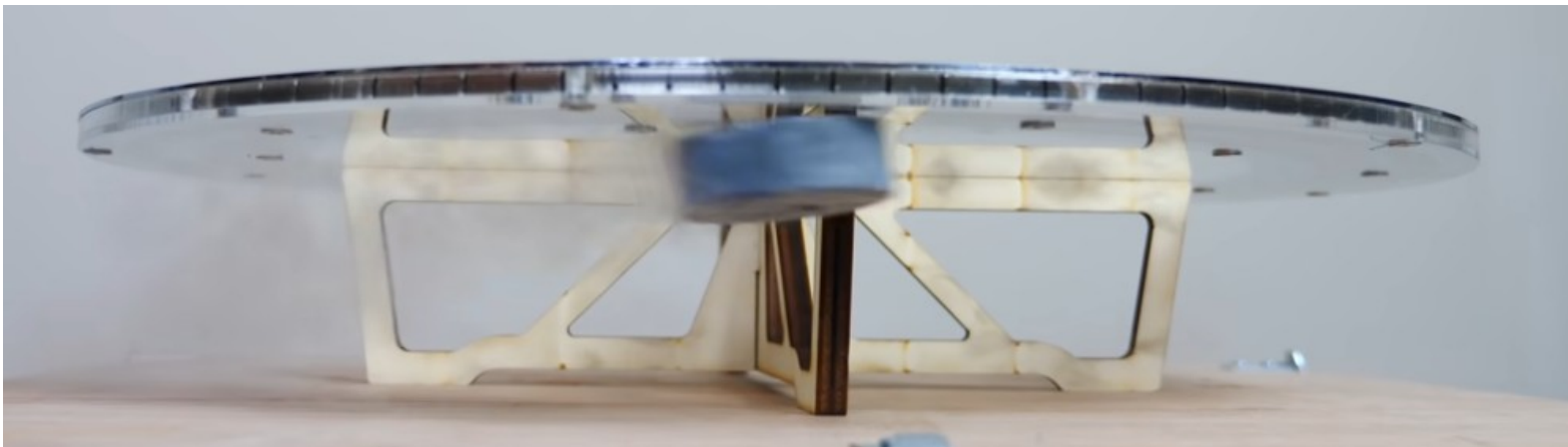
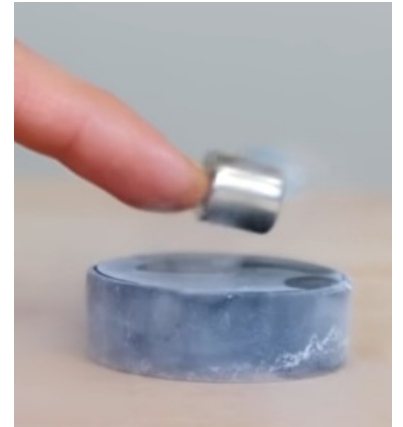
Hasonlóan a vízjéghez:
fagyáskor "tágulás":
eltávolodnak egymástól a
vortexek



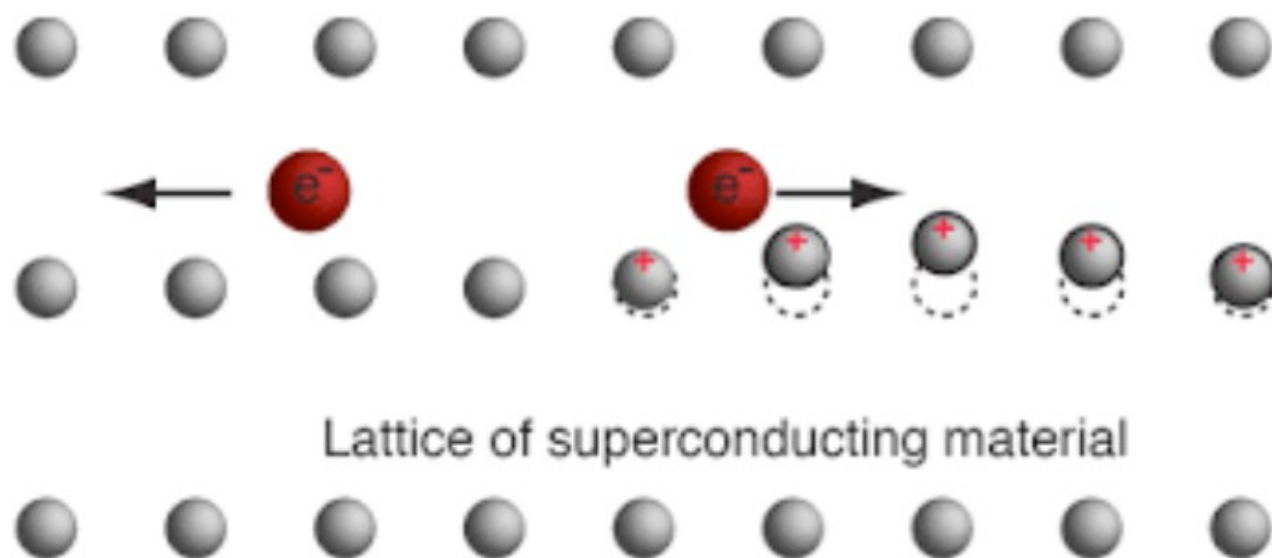
Hőmérséklet (C)

Másodfajú szupravezetőbe befagynak a vortexek → mágneses levitáció

<https://www.youtube.com/watch?v=8GY4m022tgo>



Miért van szupravezetés? (Elsőfajú esetben)



Elektron-fonon-kölcsönhatás miatt.

Honnan tudjuk? Izotóp-effektusból.

$$T_c \sqrt{M} = \text{állandó}$$

Elektron-fonon-kölcsönhatás
elektronpárokat (Cooper-párokat) hoz létre.

Izotópeffektusra példa ónban:

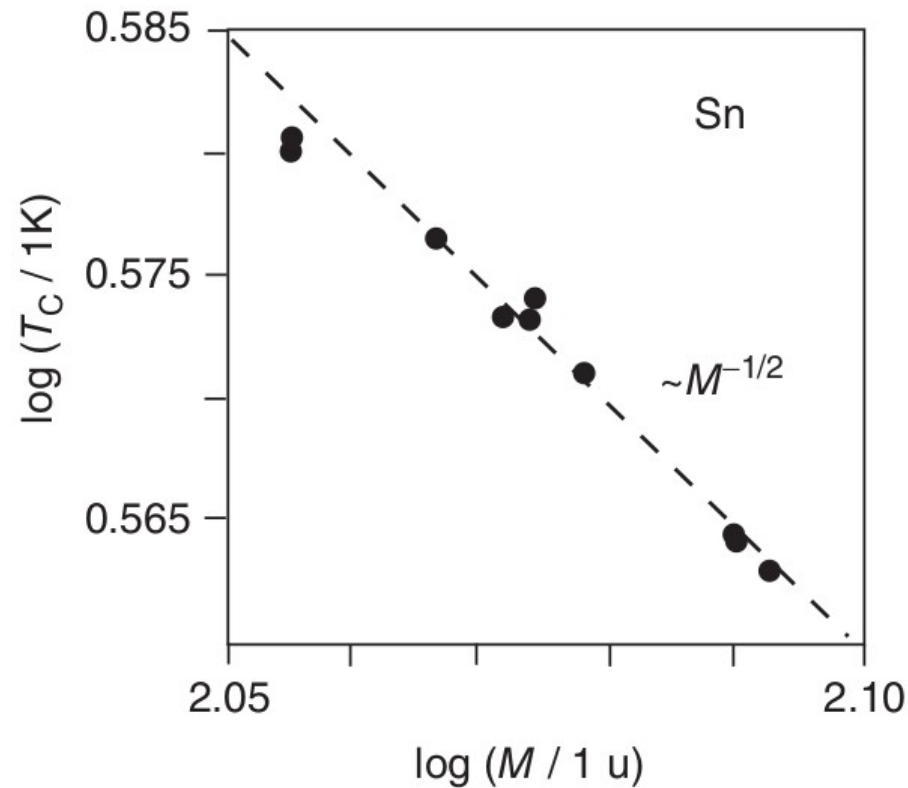


Figure 10.5 Illustration of the isotope effect. The graph shows the critical temperature as a function of isotope mass as a log-log plot. The data points lie on a straight

line suggesting a power law behavior with $T_C \propto M^{-1/2}$. Data taken from Maxwell (1952), Serin, Reynolds, and Lohman (1952).

Adalék a szupravezetés elméletéhez:

Minden elemi részecske vagy bozon, vagy fermion

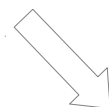
klasszikus fizika: minden tárgy megkülönböztethető

kvantumfizika: minden elektron teljesen megkülönböztethetetlen
→ 1-es és 2-es részecskék cseréjénél az állapot nem változik

$$\Psi(\vec{r}_1, \vec{r}_2, s_1, s_2) = e^{i\phi} \Psi(\vec{r}_2, \vec{r}_1, s_2, s_1)$$

cseré majd cseré = nem csinállok semmit:

$$e^{i\phi} e^{i\phi} = 1$$



$$\Psi(\vec{r}_1, \vec{r}_2, s_1, s_2) = -\Psi(\vec{r}_2, \vec{r}_1, s_2, s_1)$$

fermionok

pl. elektron, proton, neutron

spinjük félegész: 1/2, 3/2, ...

Pauli-elv: nem lehetnek azonos állapotban

$$\Psi(\vec{r}_1, \vec{r}_2, s_1, s_2) = \Psi(\vec{r}_2, \vec{r}_1, s_2, s_1)$$

bozonok

pl. foton, fonon, ^4He

spinjük egész: 0, 1, 2, ...

szeretnek azonos állapotban lenni

A fermionok és bozonok más kvantumstatisztikát követnek: energiaszintek betöltöttsége más



Enrico Fermi (1901-54)

Hőmérsékleti egyensúlyban E energiaszint betöltöttsége:

Fermi-Dirac
eloszlás:

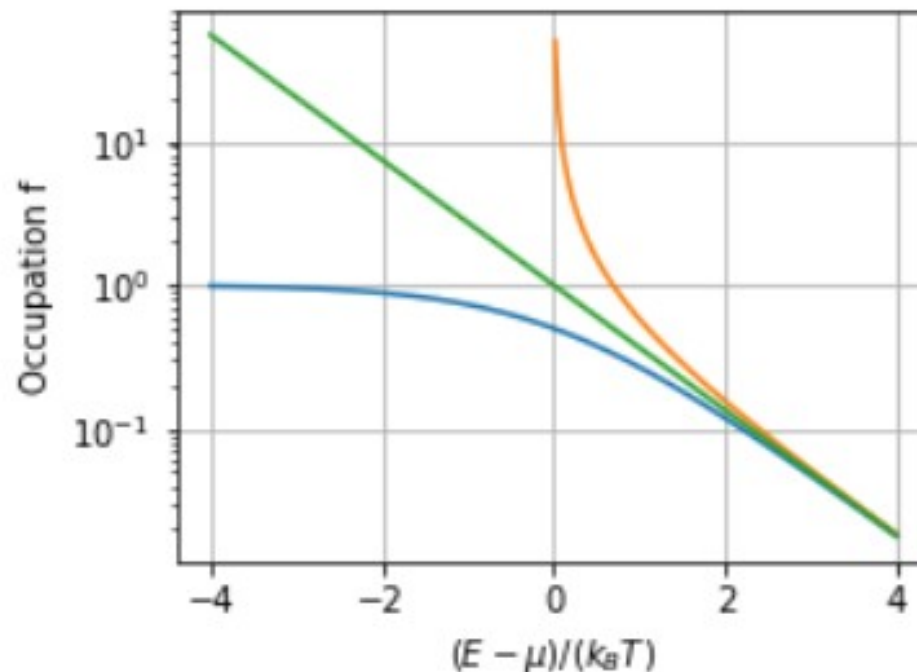
$$p(E) = f_{FD}(E) = \frac{1}{e^{\frac{E-\mu}{k_B T}} + 1}$$

Bose-Einstein
eloszlás:

$$f_{BE}(E) = \frac{1}{e^{\frac{E-\mu}{k_B T}} - 1}$$



Satyendra Nath Bose
(1894-1974)

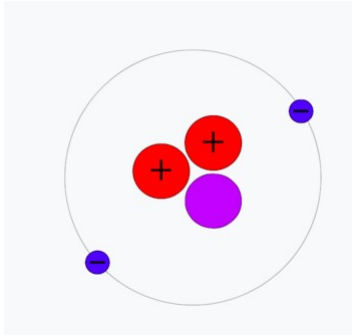


Boltzmann-
eloszlás:

$$f_B(E) = \frac{1}{e^{\frac{E-\mu}{k_B T}}}$$

alacsony energián bozonok szeretnek azonos állapotban lenni!

Minden összetett részecske is bozon vagy fermion. Páros sok fermion tartalmaz: bozon (spin egész).
Páratlan sok fermion tartalmaz: fermion (spin félegész)



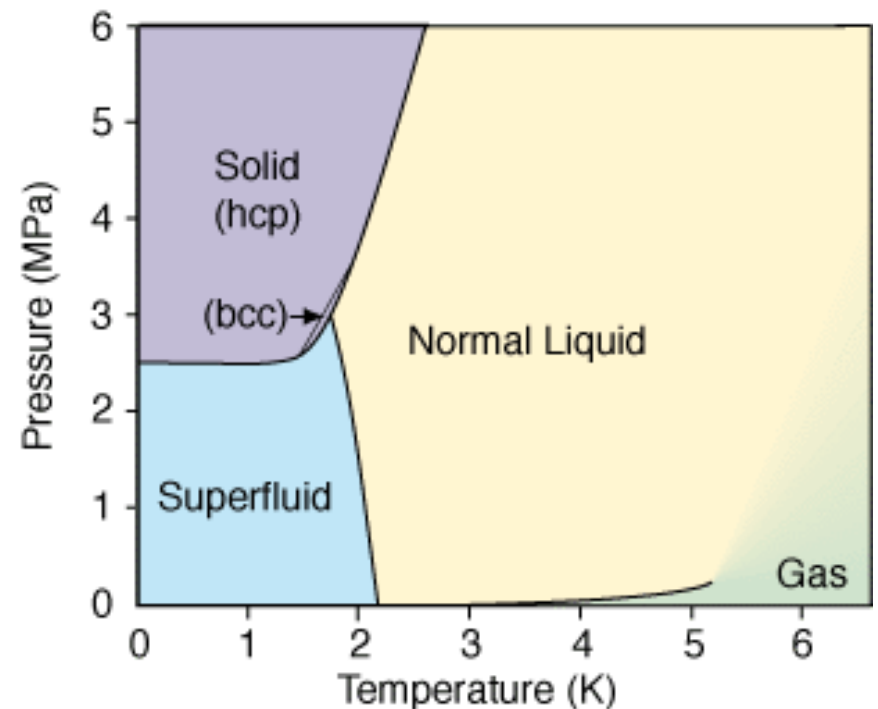
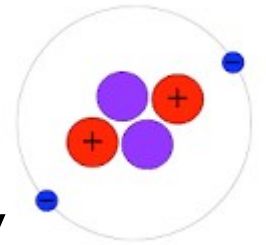
^3He (<1%)

fermion
3.2 K: lecsapódik

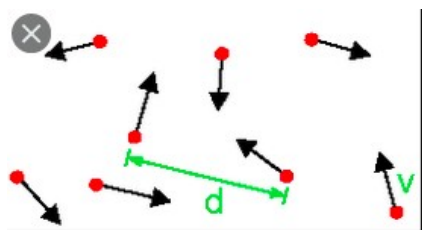
Nem
szuperfolyékony
(kivéve mK alatt,
egzotikus állapot)

^4He (99%)

bozon
4.2 K: lecsapódik
2.17K: szuperfolyékony
→ elveszti viszkozitását



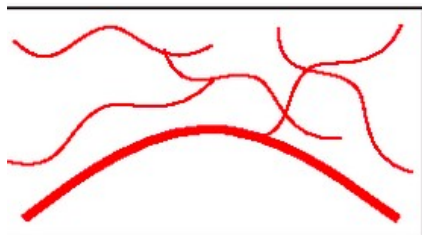
Kitérő: Bose-Einstein-kondenzátum tankönyvi esete nem a szuperfolyékony He, hanem a lézerrel hűtött híg atomi gázok



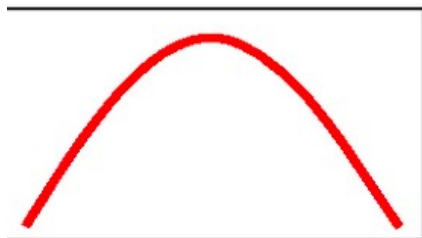
High
Temperature T :
thermal velocity v
density d^{-3}
"Billiard balls"



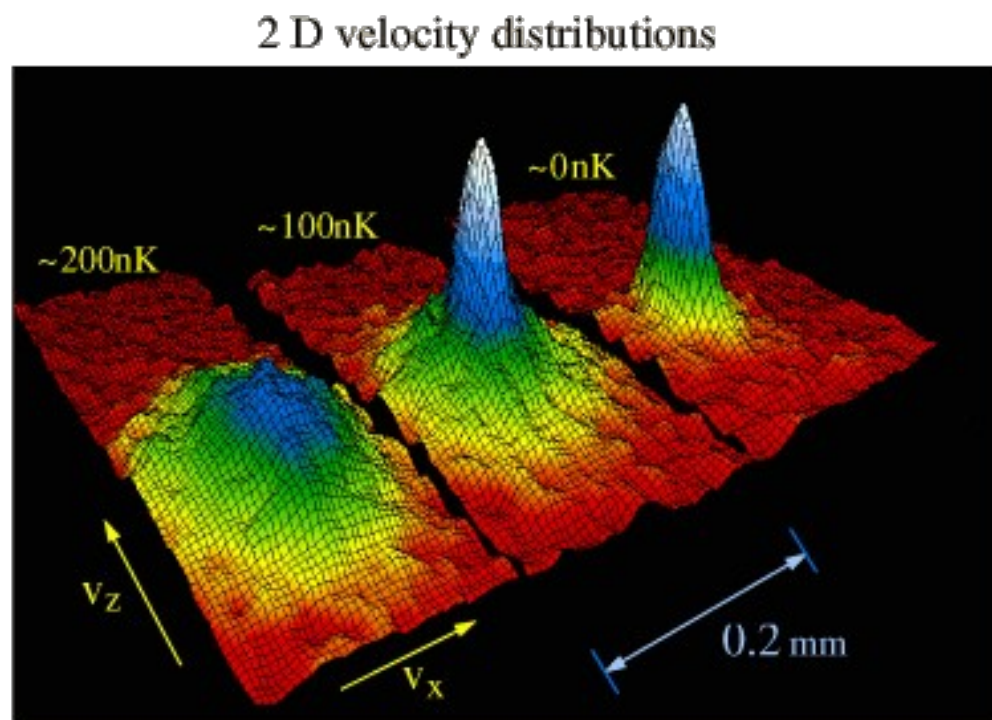
Low
Temperature T :
De Broglie wavelength
 $\lambda_{dB} = h/mv \propto T^{-1/2}$
"Wave packets"



$T = T_{\text{crit}}$:
Bose-Einstein
Condensation
 $\lambda_{dB} \approx d$
"Matter wave overlap"



$T = 0$:
Pure Bose
condensate
"Giant matter wave"



1995: Cornell & Wiemann, NIST, ^{85}Rb ;
Ketterle, MIT, ^{23}Na



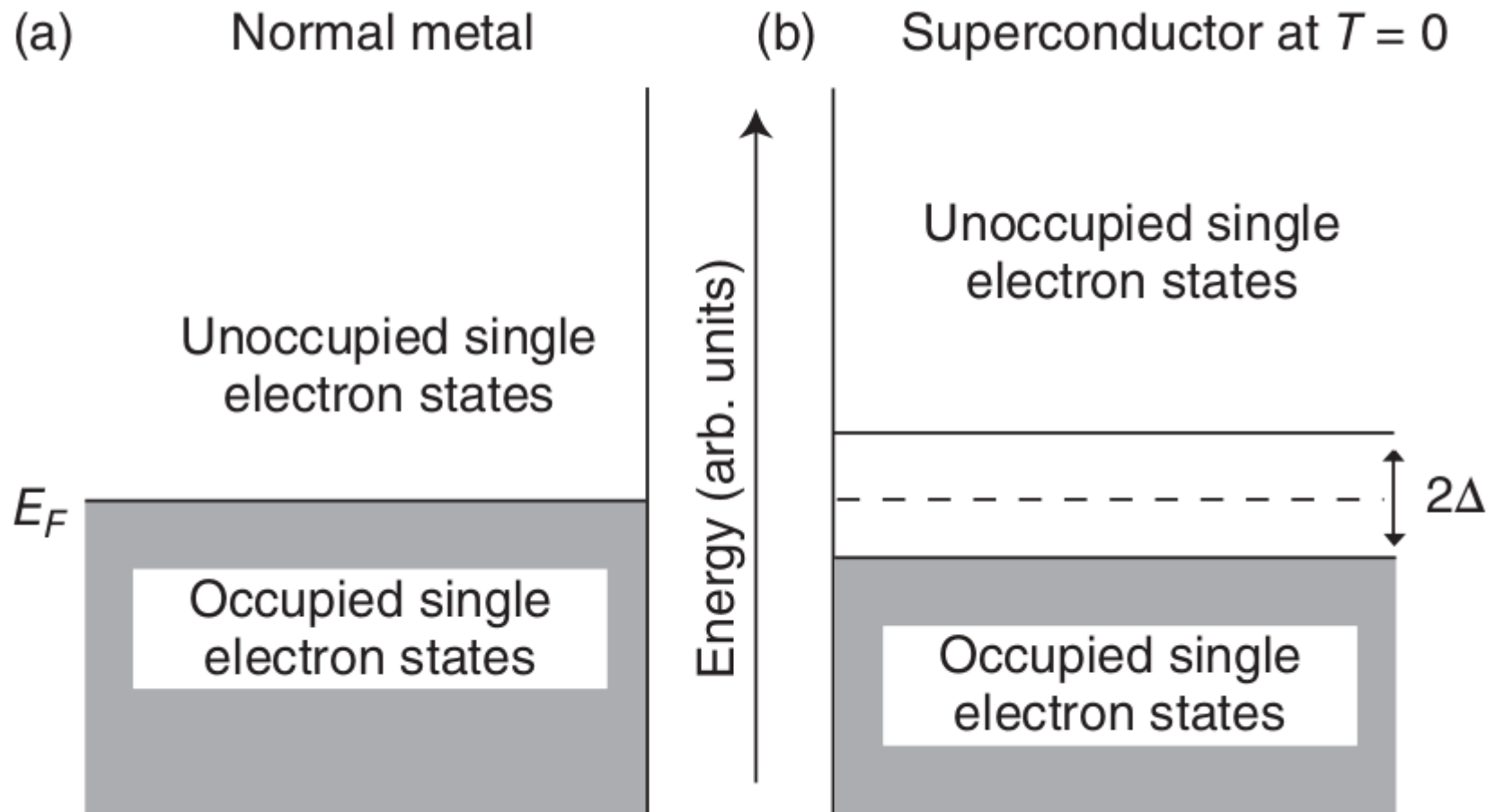
2001

Ellenőrző kérdés: Honnan látszik, hogy ezek az atomok bozonok?

Szupravezetőkben a Cooper-párok bozonok. Ők kondenzálódnak: mind azonos kvantumállapotot foglalnak el, hasonlóan a Bose-Einstein-kondenzátumhoz

Szupravezetők érdekes tulajdonságai: Cooper-párok kondenzátuma szuperfolyékonyan áramlik

A szupravezetőkben a Fermi-felület elektronjai Cooper-párokba rendeződnek
→ tiltott sáv alakul ki



A tiltott sáv hűtésre nő: több Cooper-pár lesz

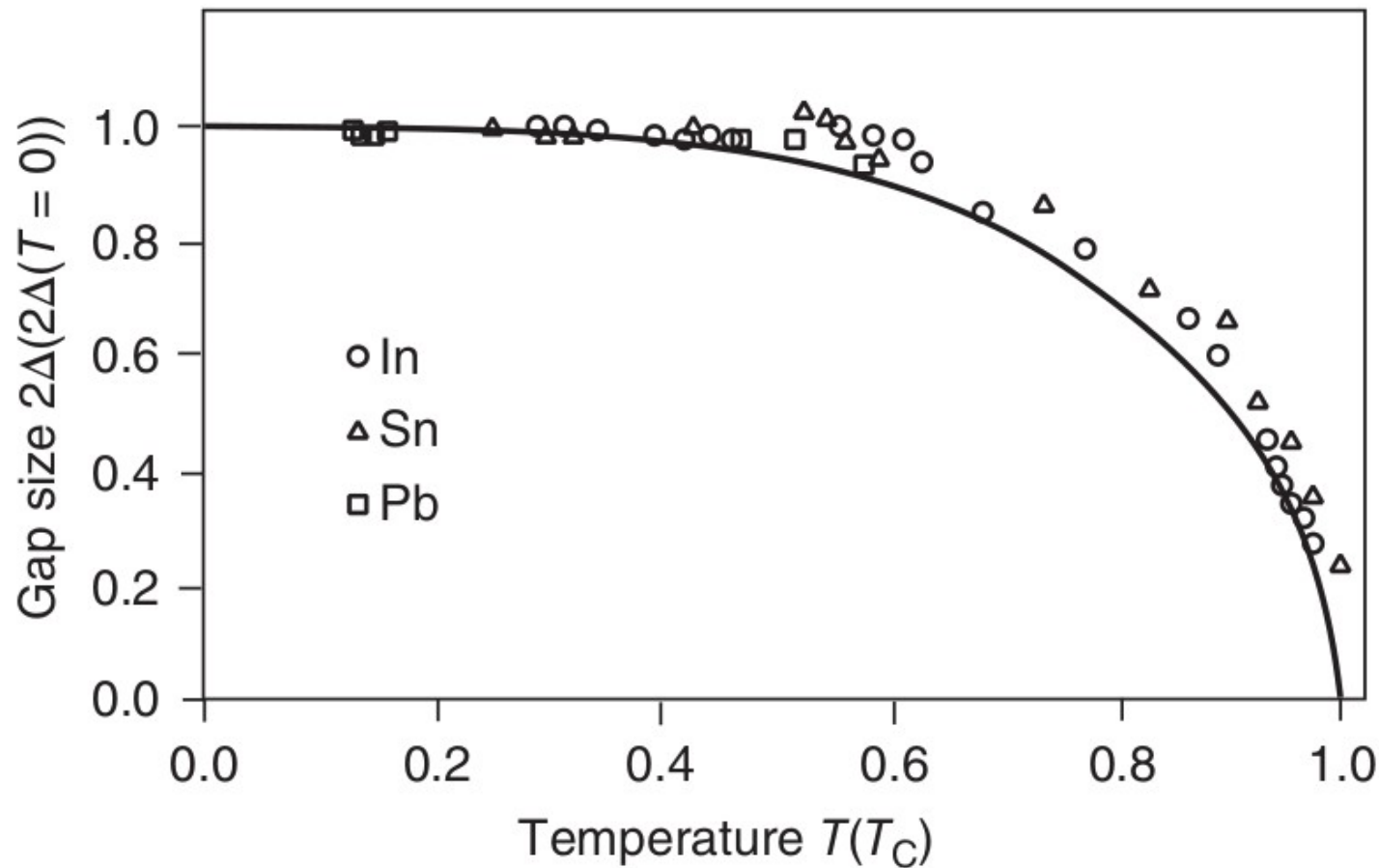
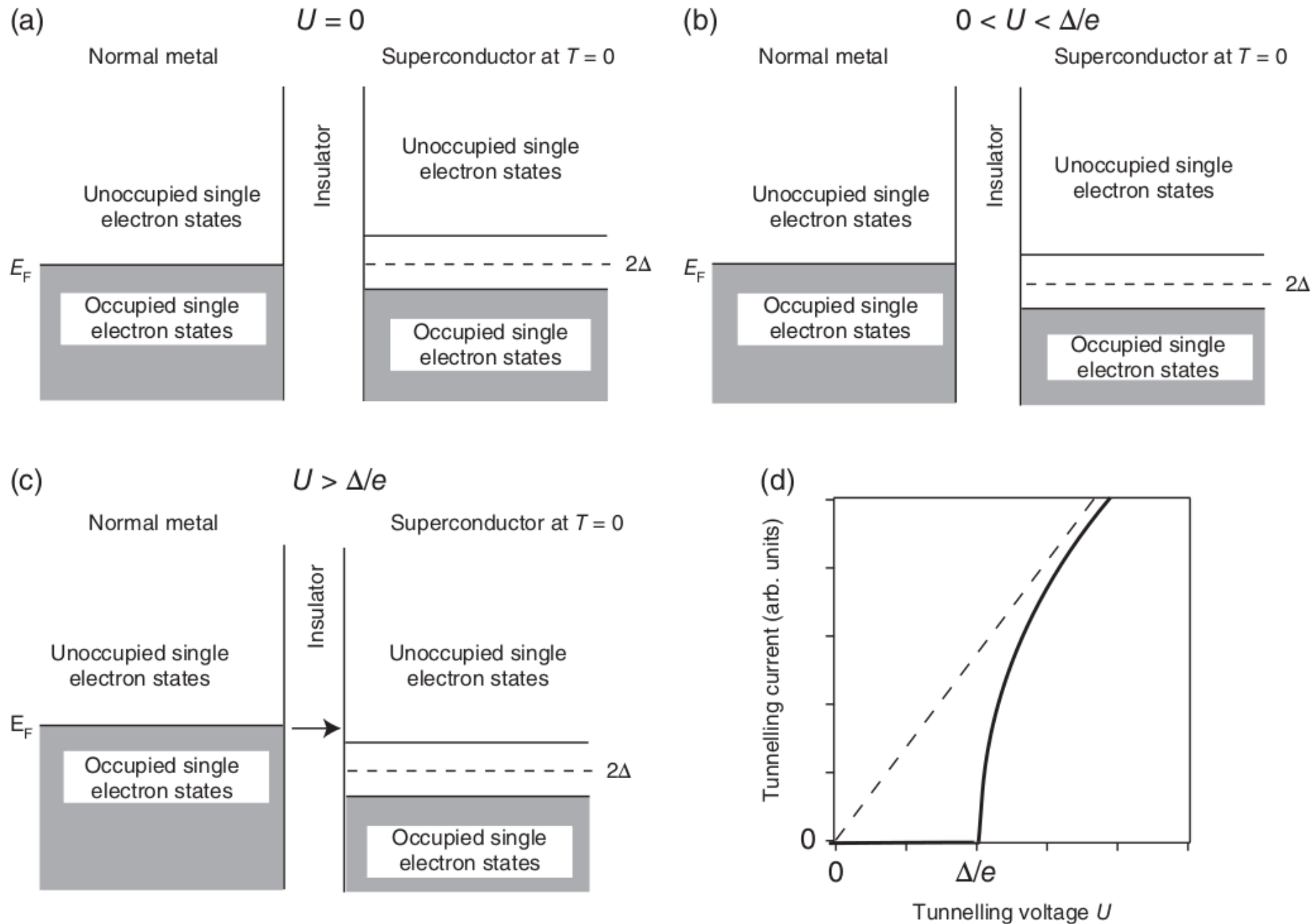


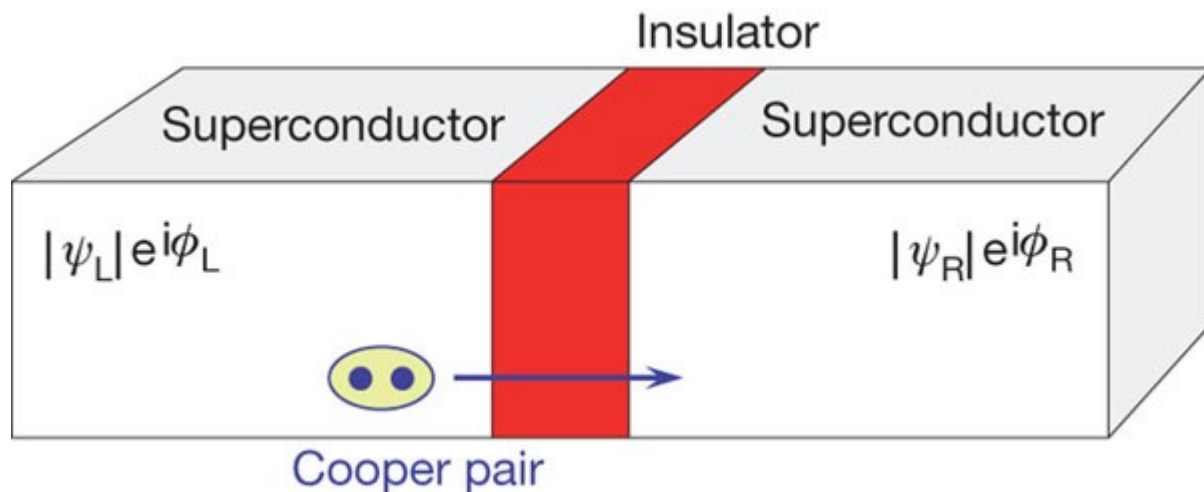
Figure 10.9 Gap size for a superconductor in the BCS model as a function of temperature and comparison to experimental data from In, Sn and Pb. At the transition temperature T_C , the gap is closed. Data from Giaever and Megerle (1961).

Tiltott sáv mérése: alagútellenálláson átfolyatott áram. Itt a szupravezető rosszul vezet!



A szupravezetés makroszkopikus kvantumállapot. Ennek bizonyítékai a Josephson-jelenségek

1962: 22 éves PhD-hallgató, Brian D. Josephson, elméleti jóslatai:

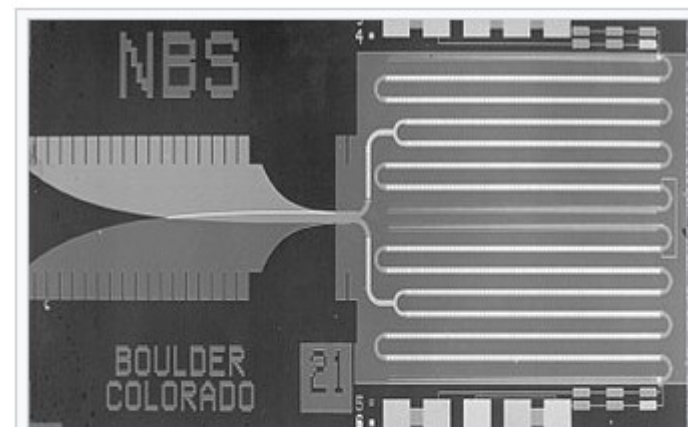
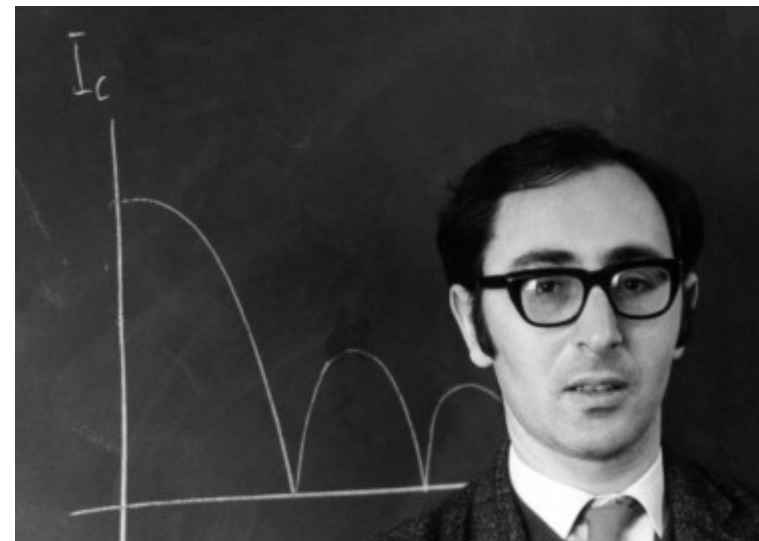


Cooper-párok alagutaznak: ellenállás nélkül áram vékony szigetelő (<0.3 nm) vagy fém (<3μm) rétegen.

$$I(t) = I_c \sin(\varphi(t))$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} = \frac{2eV(t)}{\hbar}$$

$$\varphi = \Phi_A - \Phi_B$$



Josephson junction array chip developed by the [National Institute of Standards and Technology](#) as a standard volt

Josephson-jelenség I: megszakított gyűrű

(perzisztens, nem csillapodó) elektromos áram I

mágneses tér B
mágneses fluxus $\Phi = \int d\mathbf{F} \cdot \mathbf{B}(\mathbf{r})$

INSULATOR

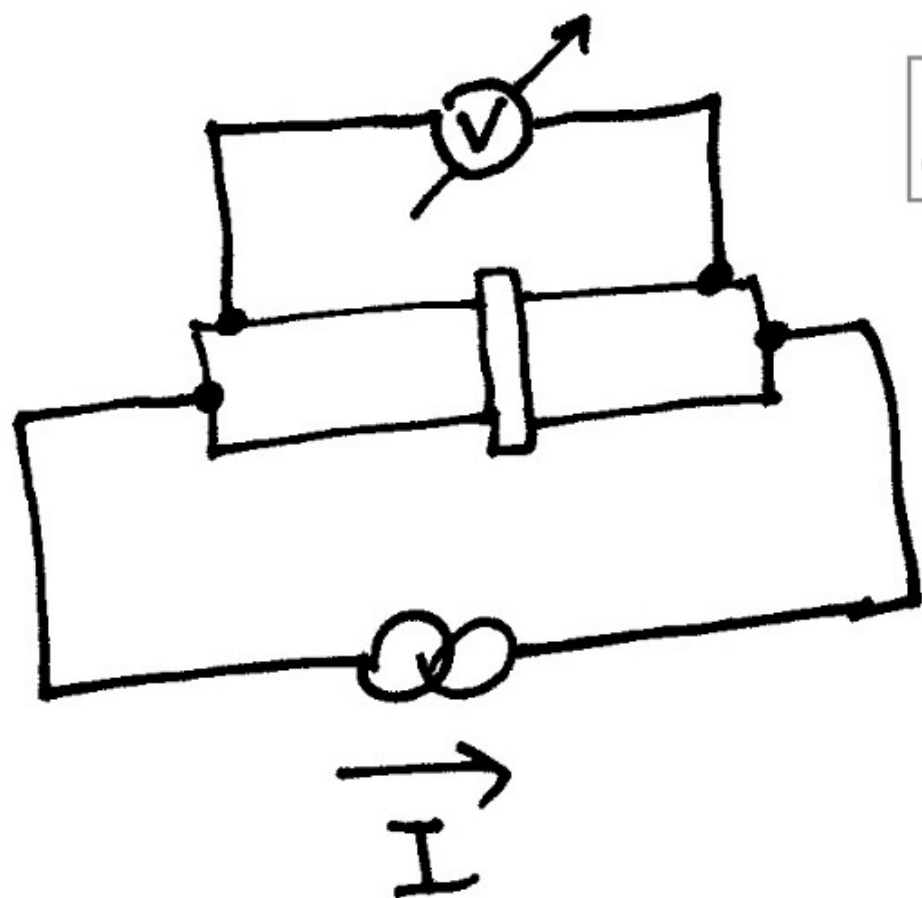
SUPERCONDUCTOR

A hurkot átszűrő dc mágneses tér dc áramot indukál.
(Ez NEM a szokásos mágneses indukció!)

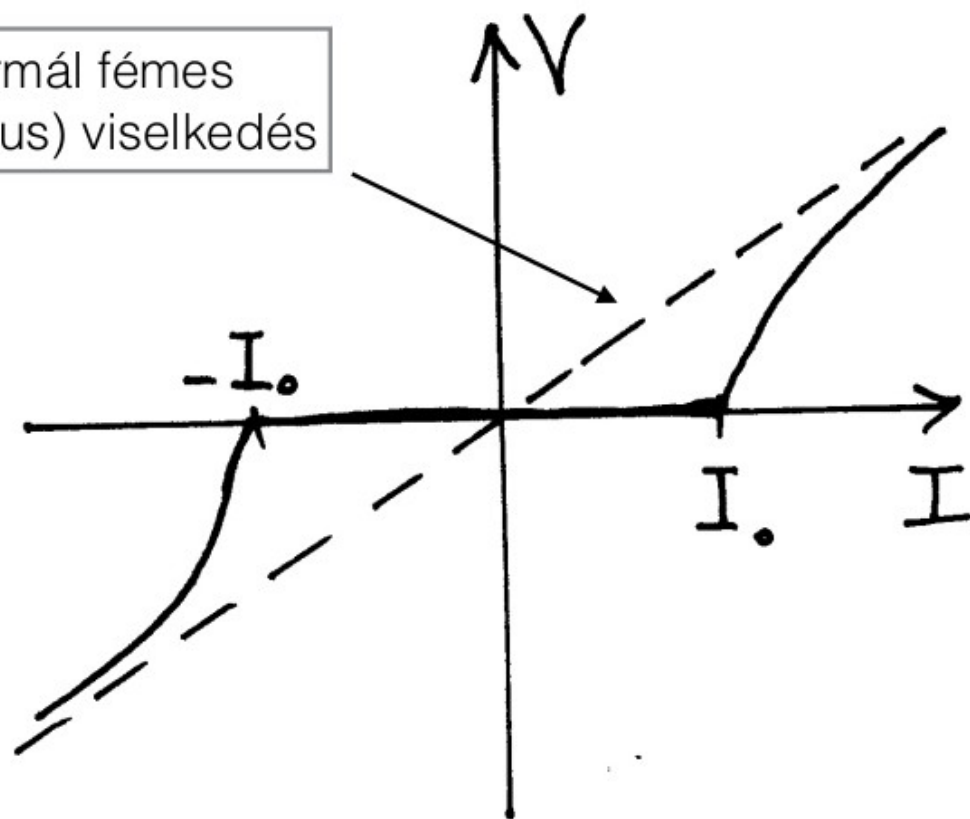
$$I(\Phi) = I_0 \sin(2\pi\Phi/\Phi_0)$$

fluxuskvantum: $\Phi_0 = \frac{h}{2e} \approx 2 \times 10^{-15} \text{Wb}$

Josephson-jelenség II: alagútátmenet árammal hajtva

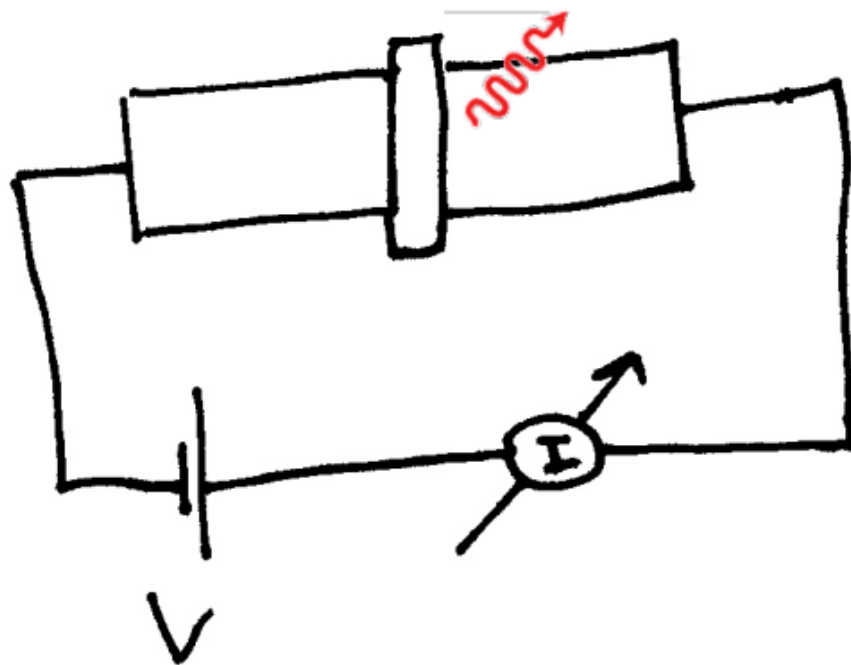


Normál fémes
(Ohmikus) viselkedés



Ez az I_0 ugyanaz, mint a megszakított gyűrűnél látott I_0 . Neve: *kritikus áram*.

Josephson-jelenség III: alagútátmenet feszültséggel hajtva



ac Josephson-jelenség: egyenfeszültség váltóáramot indukál: $I = I(t) = I_0 \sin\left(\frac{2eV}{\hbar}t\right)$

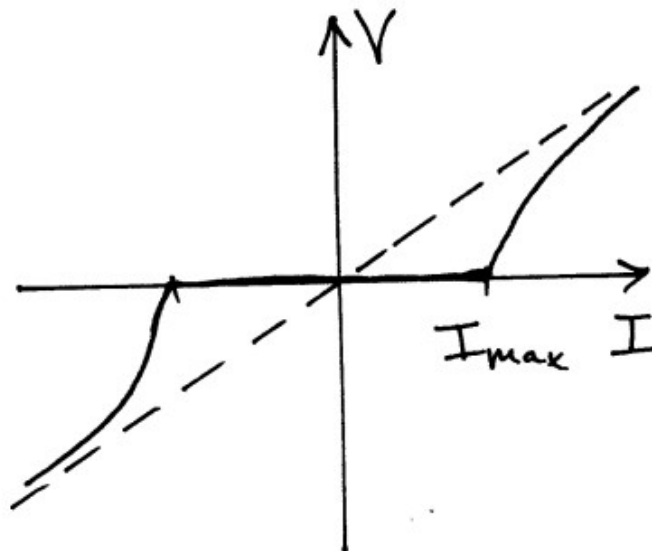
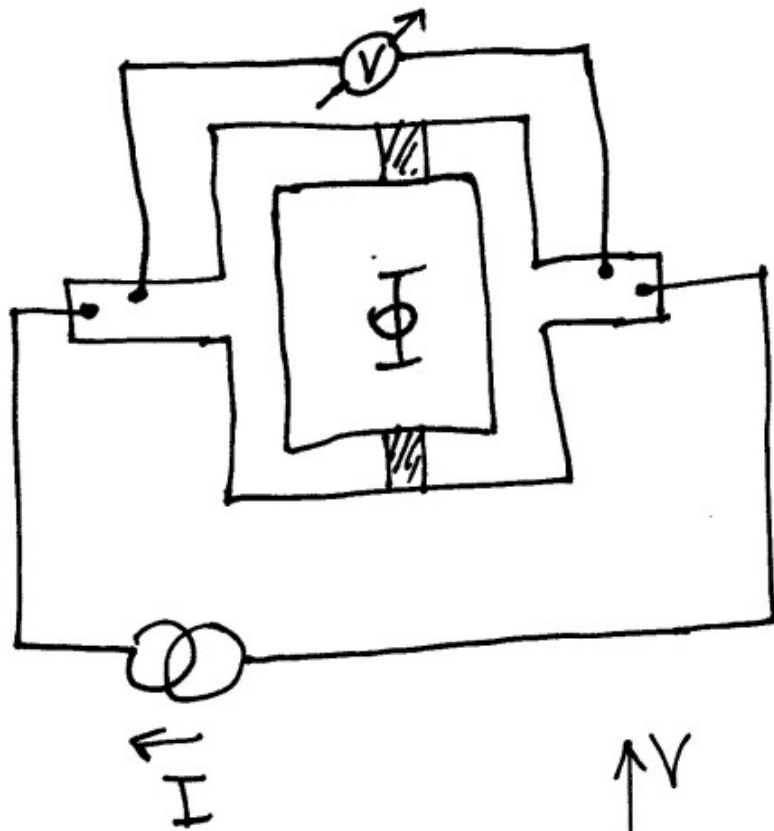
I_0 ugyanaz, mint a Josephson-jelenség I. és II. esetében.

Feladat

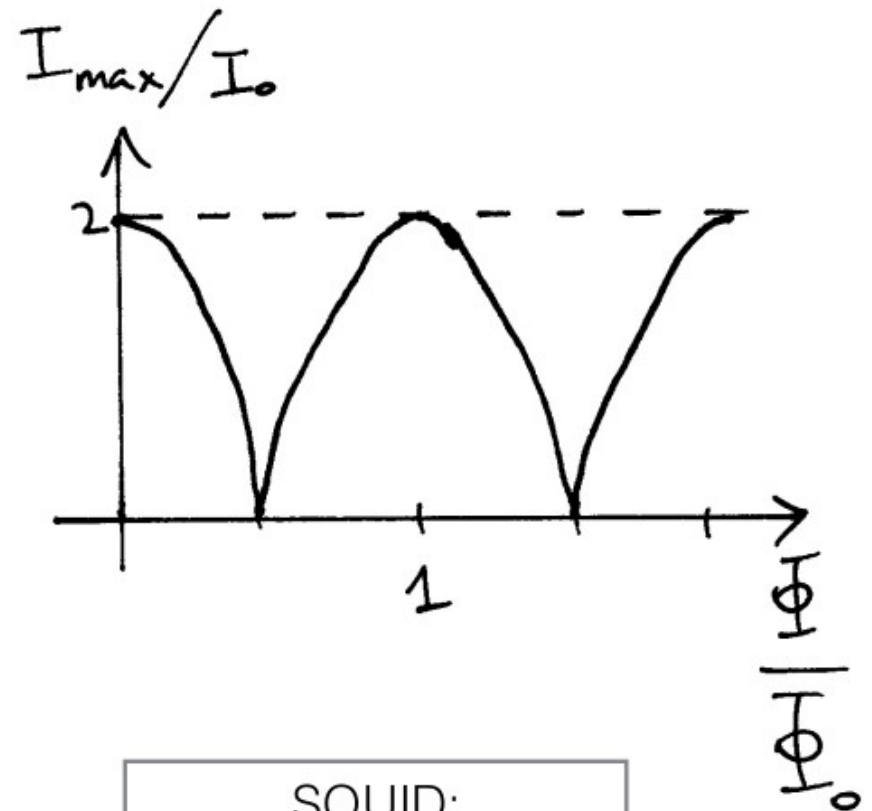
Milyen frekvenciájú váltóáramot hoz létre egy 1 millivolttal hajtott Josephson-átmenet?
(Válasz: kb. 500 GHz)

Josephson-jelenség IV: SQUID

SQUID = Superconducting QUantum Interference Device



$$I_{\max} = 2 I_0 \left| \cos \left(\frac{e \Phi}{\hbar} \right) \right|$$



SQUID:
Mágneses tér
elektromos jellé alakít

SQUID-ek orvosi alkalmazása

Magnetoencephalography

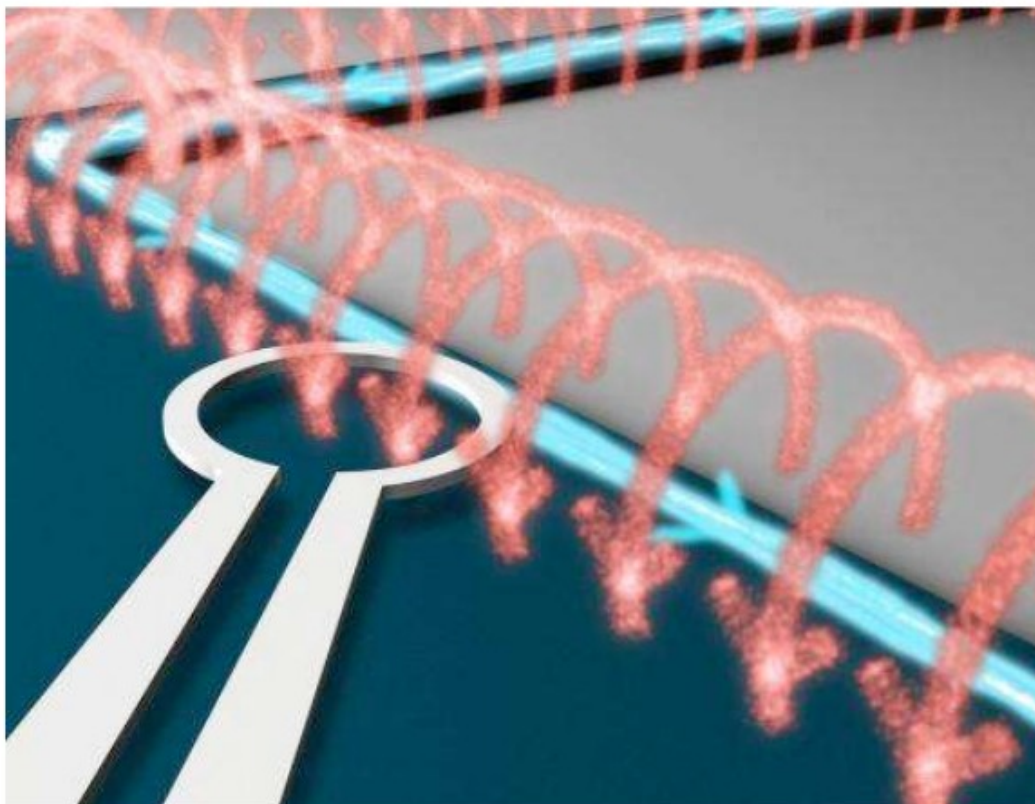
From Wikipedia, the free encyclopedia

Magnetoencephalography (MEG) is a [functional neuroimaging](#) technique for mapping brain activity by recording [magnetic fields](#) produced by [electrical currents](#) occurring naturally in the [brain](#), using very sensitive [magnetometers](#). Arrays of [SQUIDs](#) (superconducting quantum interference devices) are currently the most common magnetometer, while the [SERF](#) (spin exchange relaxation-free) magnetometer is being investigated for future machines.^{[1][2]} Applications of MEG include basic research into perceptual and cognitive brain processes, localizing regions affected by pathology before surgical removal, determining the function of various parts of the brain, and [neurofeedback](#). This can be applied in a clinical setting to find locations of abnormalities as well as in an experimental setting to simply measure brain activity.^[3]



SQUID-ek tudományos alkalmazása

Pásztázó SQUID mikroszkóp



Képalkotás
nano- és mikroskálás mágneses mintázatokról
és áramsűrűségekről

A szupravezetés felfedezései több Nobel-díjhoz vezettek

1911, Kamerlingh Onnes: 4.15 K-re hűtve a Hg elveszti ellenállását



1913: Kamerlingh Onnes

1933, Meissner & Ochsenfeld: szupravezető kiszorítja a mágneses teret



1972: Bardeen, Cooper, Schrieffer

1935, London-testvérek: első fenomenologikus elmélet

1957, BCS: első mikroszkopikus elmélet
→ elektronok Cooper-párokat alkotnak



1973: Esaki, Giaever, Josephson

1962, Josephson: szupravezetők közti szigetelő rétegen is folyik áram
→ mágneses terek mérése



1987: Bednorz, Müller

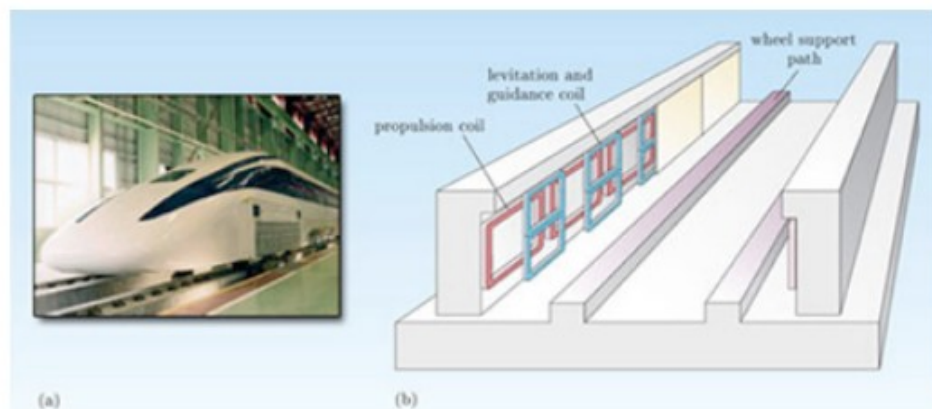
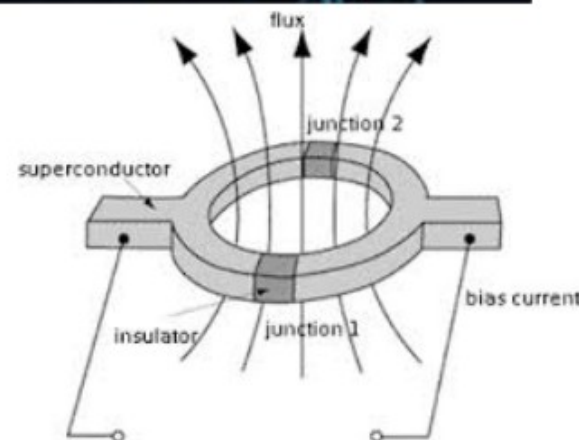
1986, Bednorz & Müller: 30K-en kuprát szupravezetők



2003: Abrikosov, Ginsburg, Leggett

Van a szupravezetésnek technológiai jelentősége?

1. Veszteségmentes vezetés
2. Elektromos biztosíték
3. Szupravezető elektromágnesek
például MRI, NMR, ESR méréshez
4. Mágneses levitáció (pl. MagLev vonat)
5. Mágneses tér érzékeny mérése
6. Klasszikus információtechnológia: RSFQ
7. Kvantuminformáció-technológia



Összefoglalás: szupravezetés

Elemek vagy vegyületek, amik alacsony hőmérsékleten hirtelen elvesztik elektromos ellenállásuk

Kiszorítják magukból a mágneses mezőt

1911-ben fedezte fel Kamerlingh Onnes (Hg)

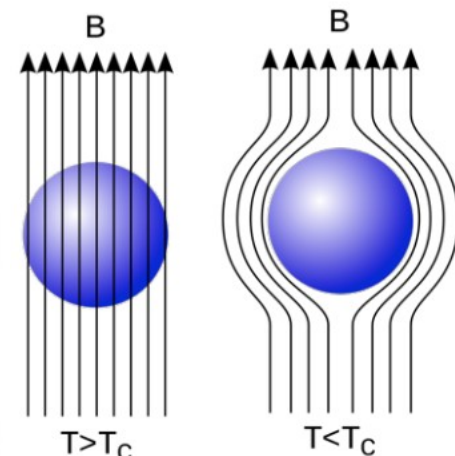
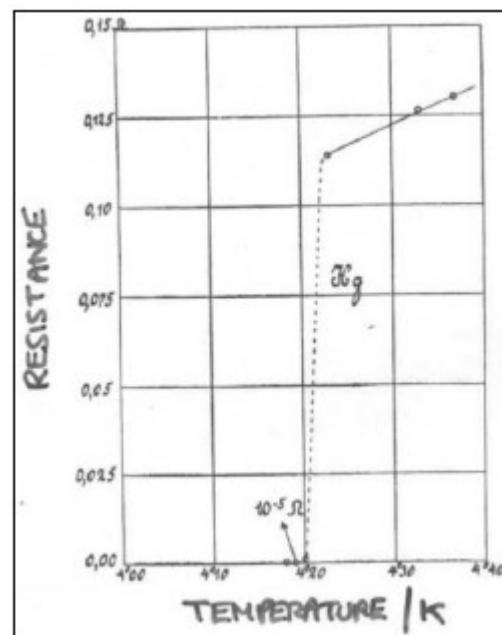
1950-es években születtek első jó elméletek, de a "magas hőmérsékletű" szupravezetést ezek sem magyarázzák

Fázisátalakulás: a vezetési elektronok Cooper-párokat alkotva tudnak ellenállás nélkül folyni

II-es típusú szupravezetők: mágneses tér örvények formájában csapdázódik benne
→ levitáció

Alkalmazások:

- mágneses tér érzékeny mérése (SQUID)
- erős mágnesek (CERN, MRI)
- mágneses levitációs (maglev) vonat



IA

1

1 H

IIA

2

3 Li

4 Be

III A

5 B

IV A

6 C

V A

7 N

VI A

8 O

VII A

9 F

0

10 He

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

107

108

109

110

111

112

112

■ BLUE = AT AMBIENT PRESSURE

■ GREEN = ONLY UNDER HIGH PRESSURE

SUPERCONDUCTORS.ORG

* Lanthanide Series
+ Actinide 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
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

Példa: Szupravezető drótban a kritikus áram

Tekintsünk egy 2mm átmérőjű ólomdrótot ($T_c = 7.2 \text{ K}$, $H_c(T=0)=800 \text{ Oe}$), 4,2 K hőmérsékleten. Mekkora a legnagyobb áram, amit ellenállásmentesen vezet?

Szupravezető mágneses térben

Ha túl erős mágneses térbe rakunk egy szupravezetőt, megszűnik szupravezetőként viselkedni. A szupravezető mágneses térre való "sérülékenysége" hőmérséklet növelésével...

- A) Nő
- B) Csökken
- C) Nő vagy csökken, aszerint, hogy első- vagy másodfajú
- D) Nem függ a hőmérséklettől

Példa: Hány vortex egy szupravezetőben?

25 μT mágneses mezőben egy 1mm x 2mm méretű másodfajú szupravezető lemezkében hány vortex van?
A mágneses tér merőleges a lemezkére.

Szupravezető mágneses térben

^{85}Rb , ^{12}C , ^{13}C , ^{21}Ne . Ezek közül hány izotóp bozonikus?

A) 1

B) 2

C) 3

D) 4