

Szupravezetés

Pályi András
BME Elméleti Fizika Tanszék

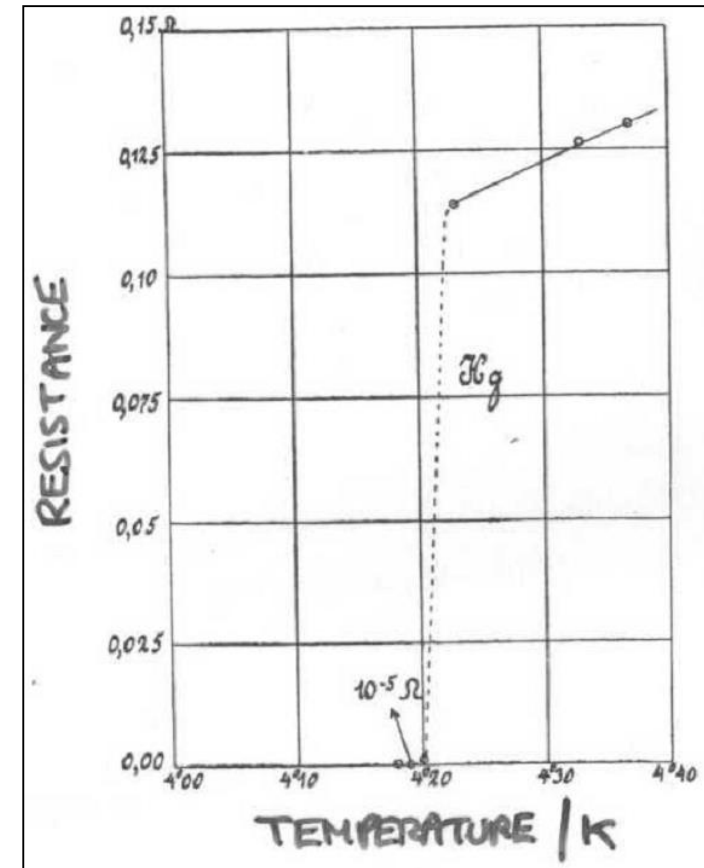
2019/11/27
Modern fizika vegyészmérnököknek



Mi a szupravezetés?

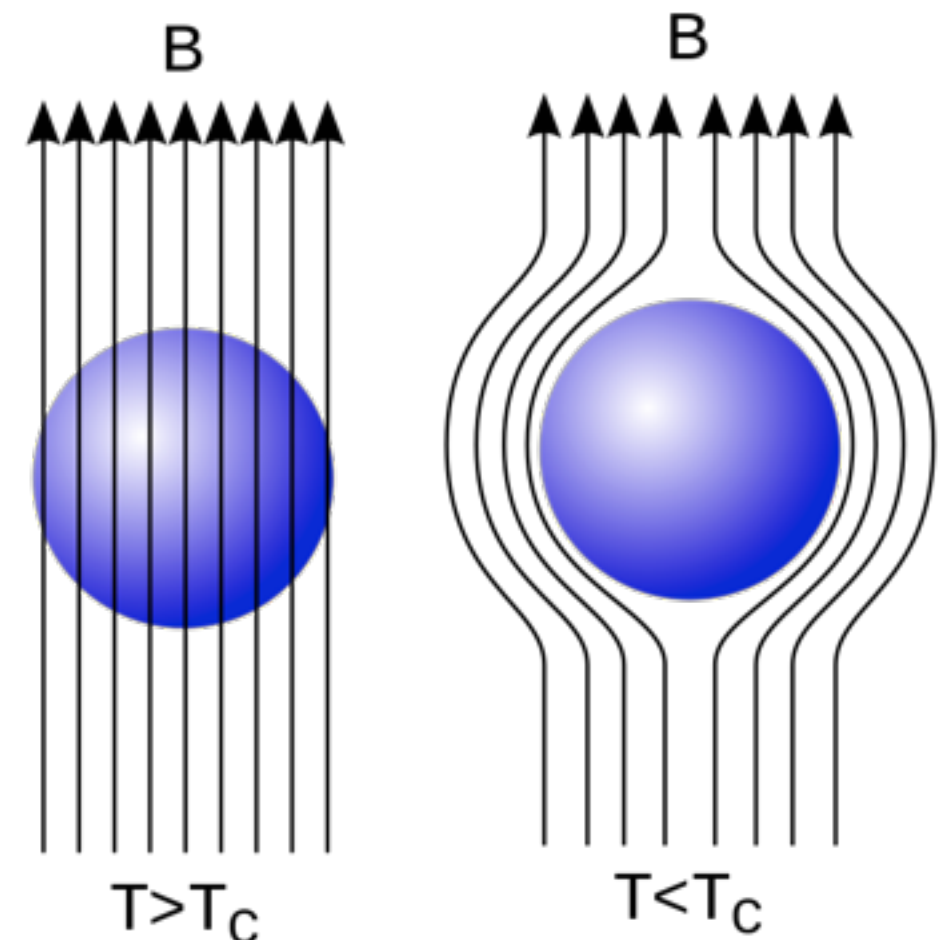
Zérus ellenállás (1911):

szupravezető drót ellenállása nullára csökken egy bizonyos kritikus hőmérséklet (T_c) alatt.

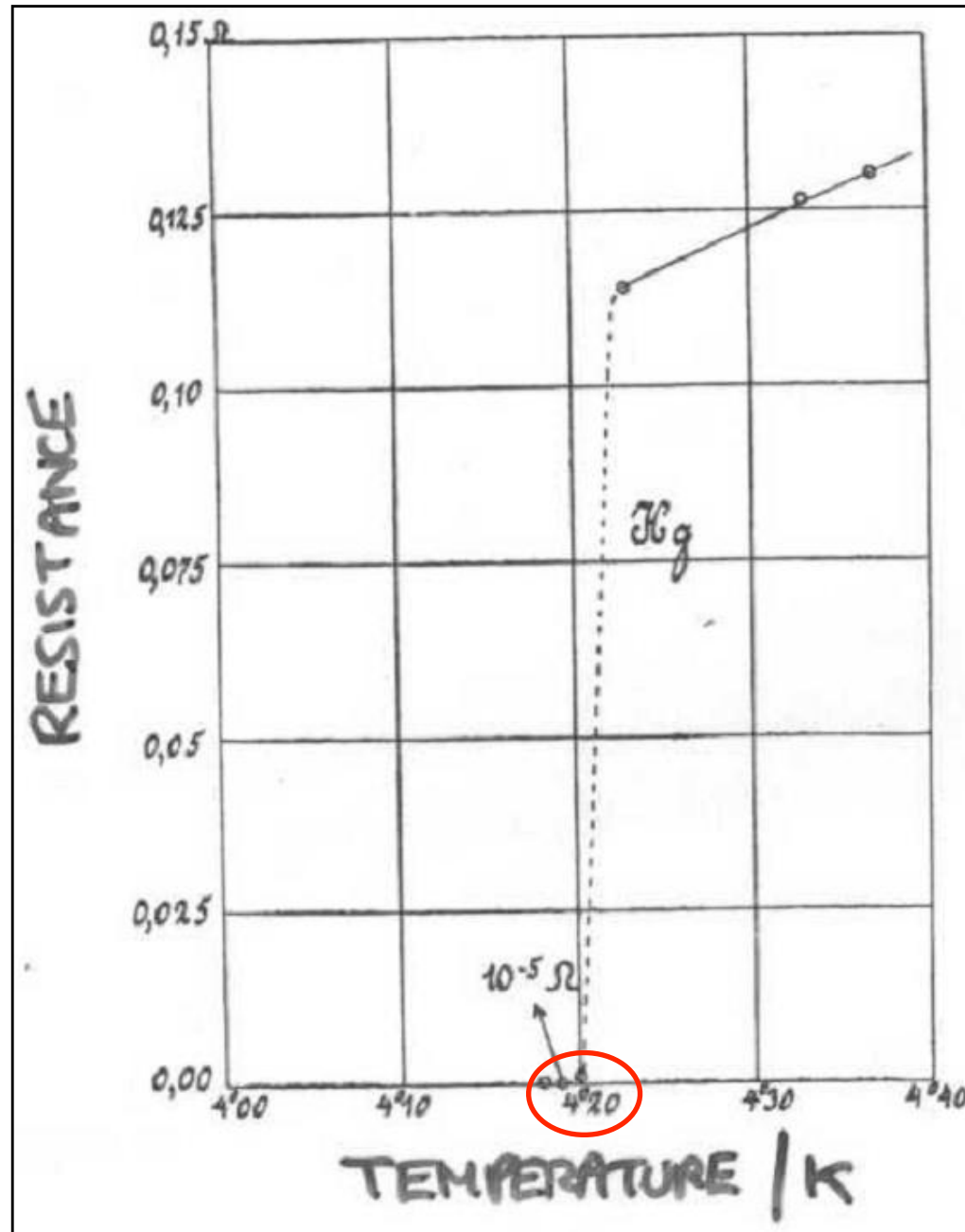
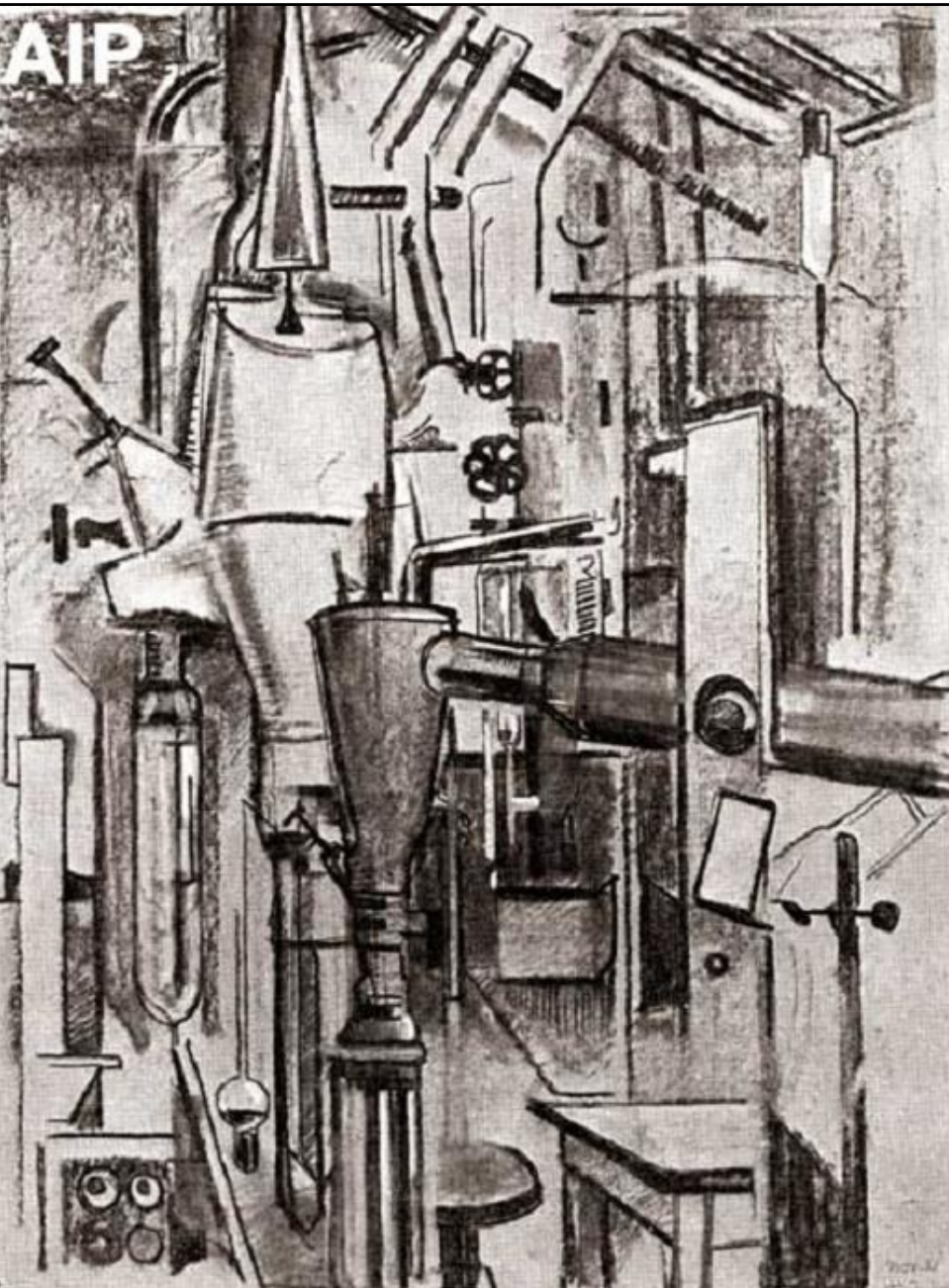


Meissner-jelenség (1933):

szupravezető a T_c alatt nem kizorítja magából a mágneses teret.



Mik a tipikus kritikus hőmérsékletek?



Nobel-díj: 1913

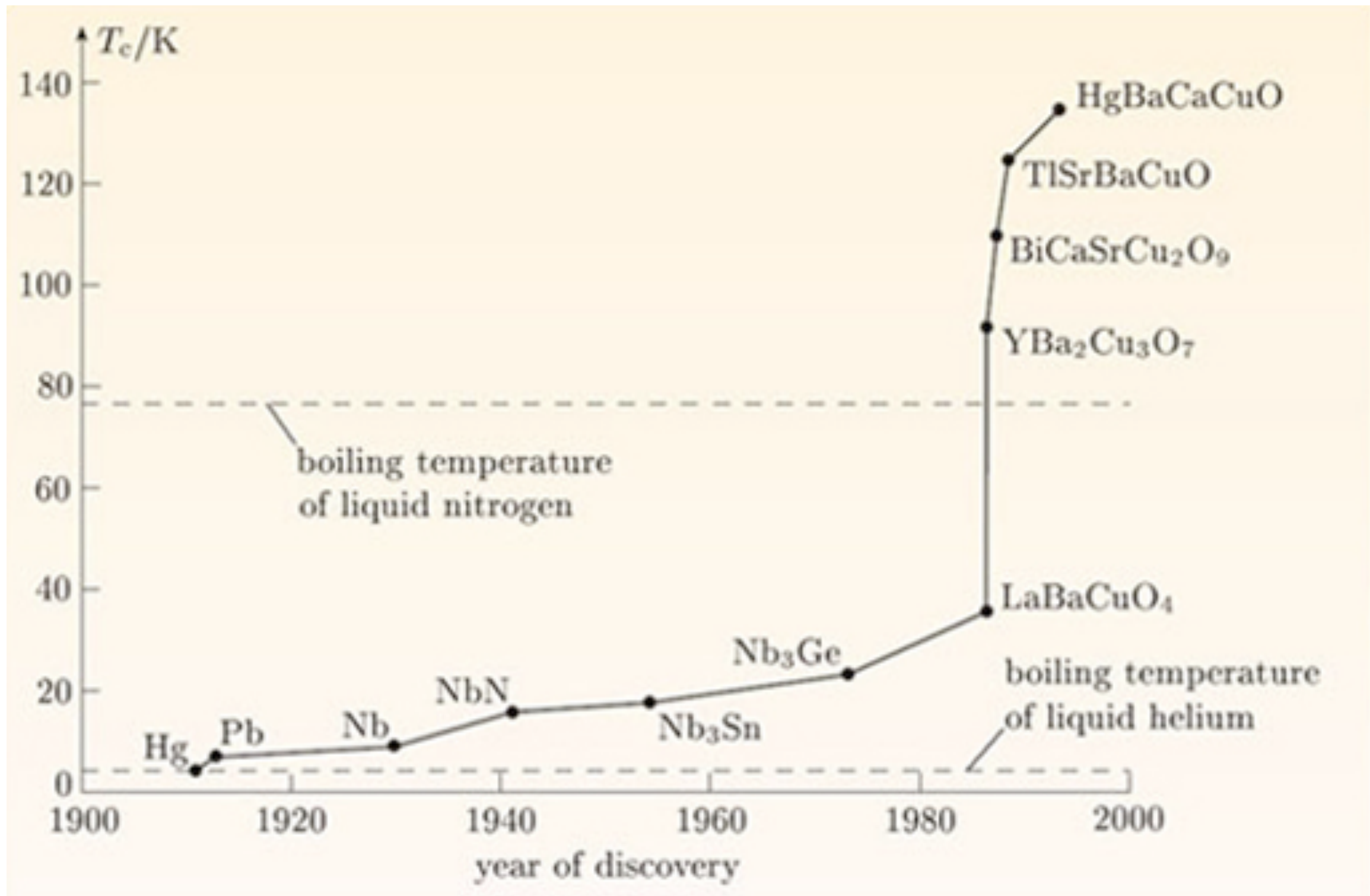
Heike Kamerlingh
ONNES



Az első hélium cseppfolyósító
berendezés (1911)
Folyékony hélium forráspontja:
 $T=4,2\text{K}$ ($-269\text{ }^{\circ}\text{C}$)

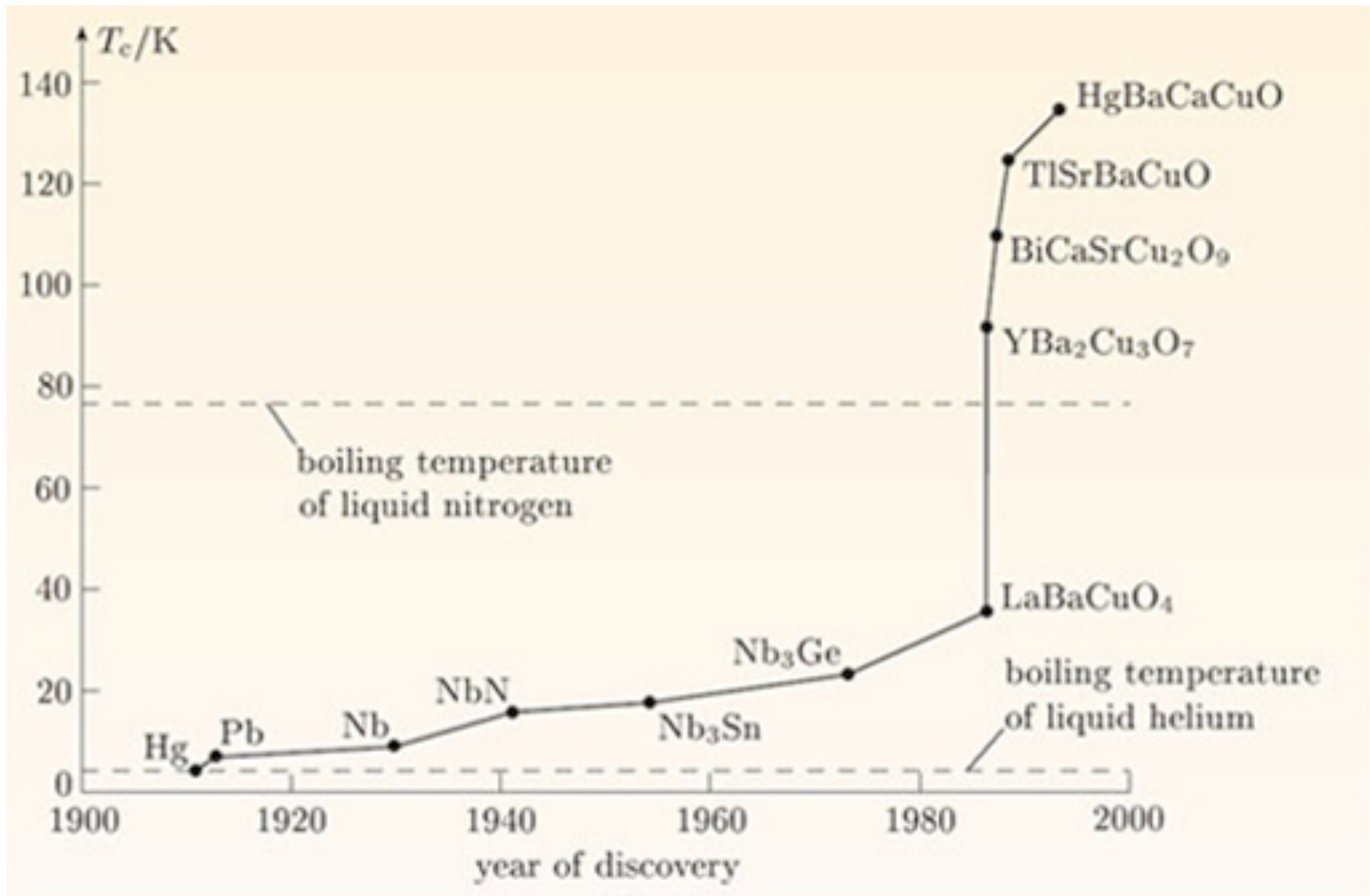
Felfedezés (1911):
A higany ellenállása $T=4,15\text{ K}$
hőmérsékleten zérusra csökken
(mérhetetlenül kicsivé válik)

Mik a tipikus kritikus hőmérsékletek?



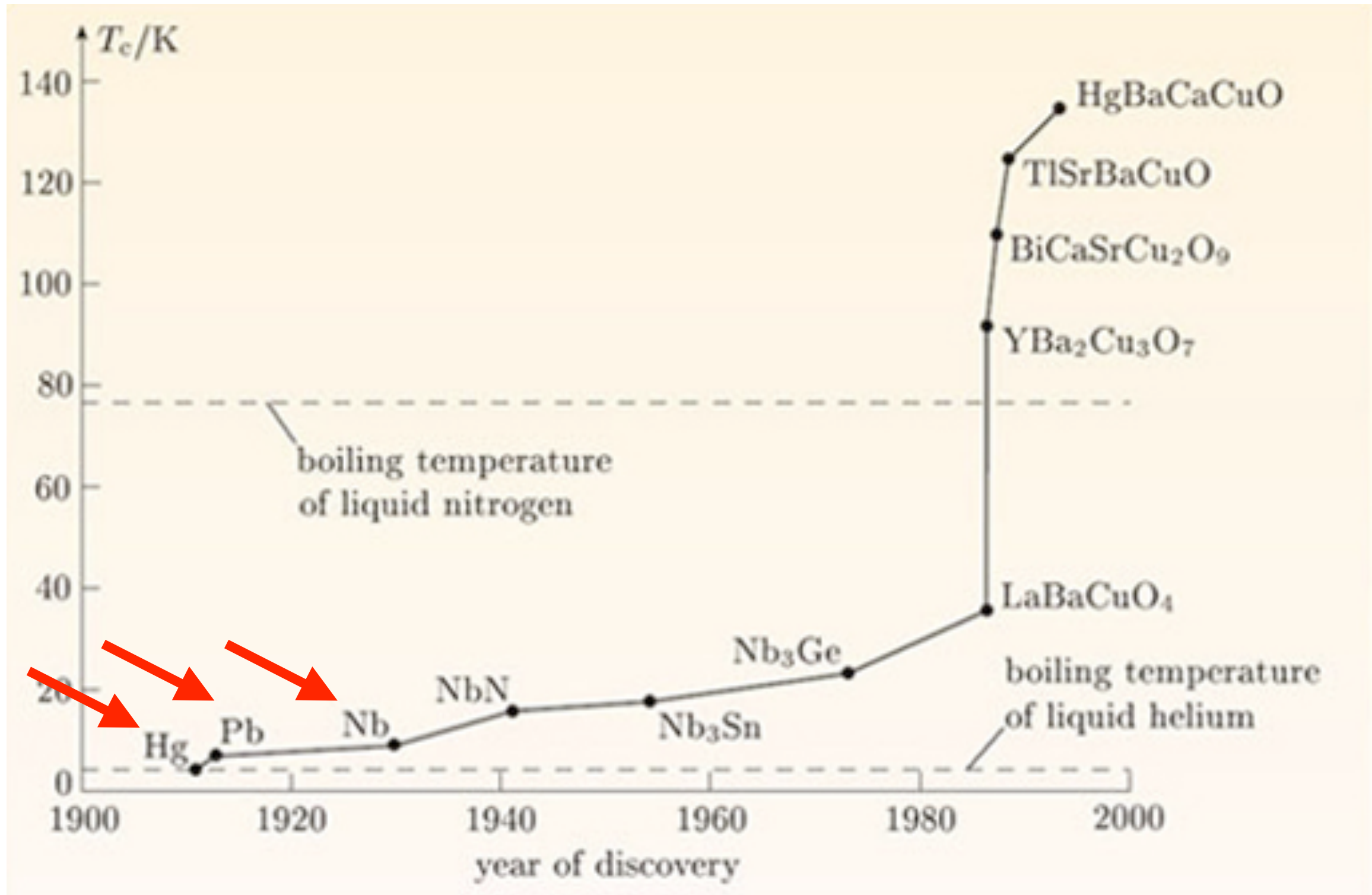
egyelőre nincs szobahőmérsékleti szupravezető

Mik a tipikus kritikus hőmérsékletek?



minél magasabb a T_c , annál könnyebb szupravezetővé tenni az anyagot
(folyékony nitrogén: 200 Ft/liter, folyékony hélium: 6000 Ft/liter)

Melyik elemek szupravezetők?



Melyik elemek szupravezetők?

KNOWN SUPERCONDUCTIVE
ELEMENTS

BLUE = AT AMBIENT PRESSURE

GREEN = ONLY UNDER HIGH PRESSURE

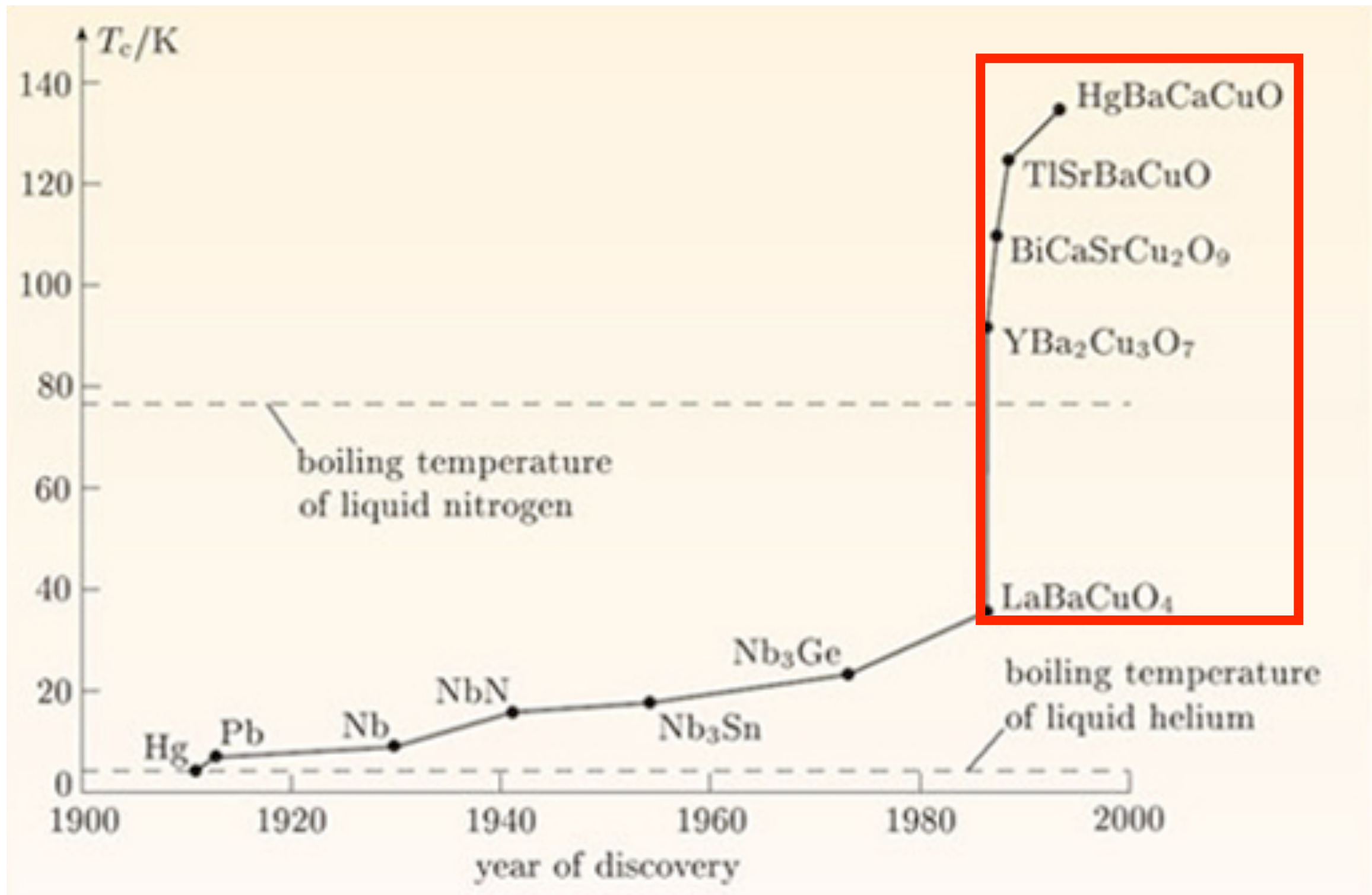
1A		1	H	IIA																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																										
----	--	---	---	-----	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

* Lanthanide Series

+ Actinide Series

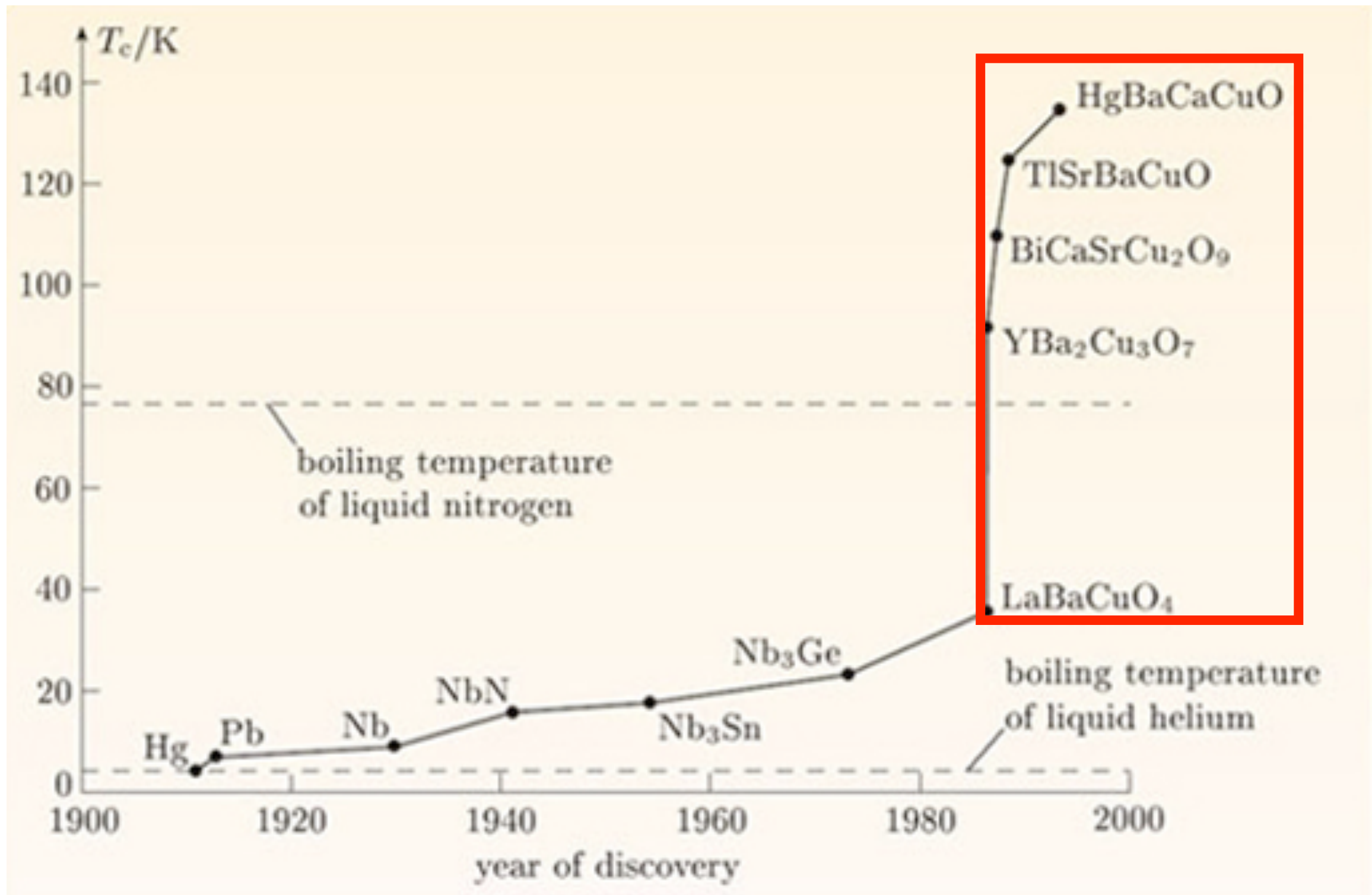
58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103
Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr

Csak elemi szupravezetők léteznek?



Nem. Ellenpélda: réz-oxid-alapú “kerámiák”, az ún. kuprátok.

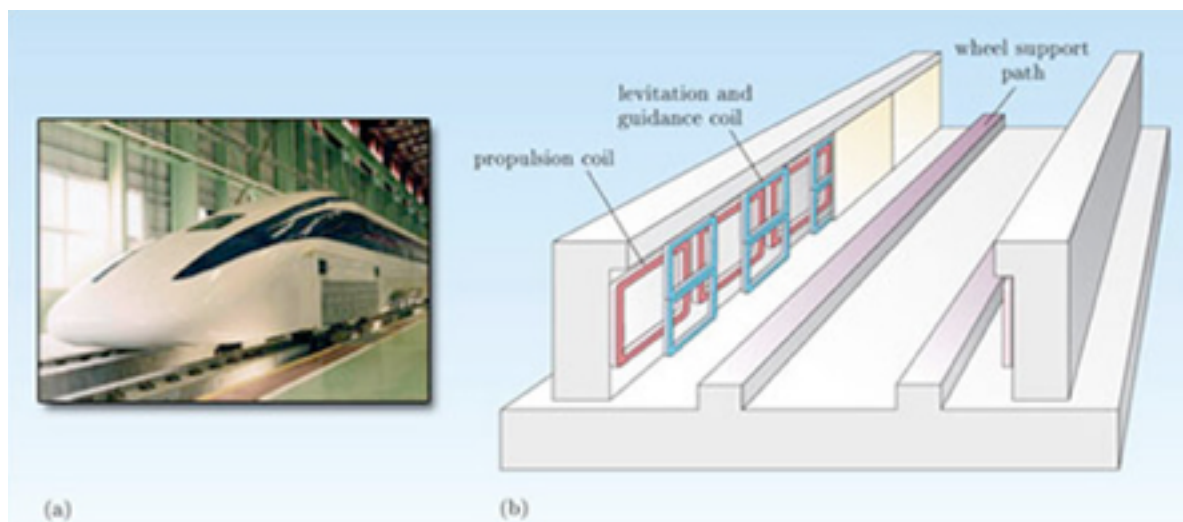
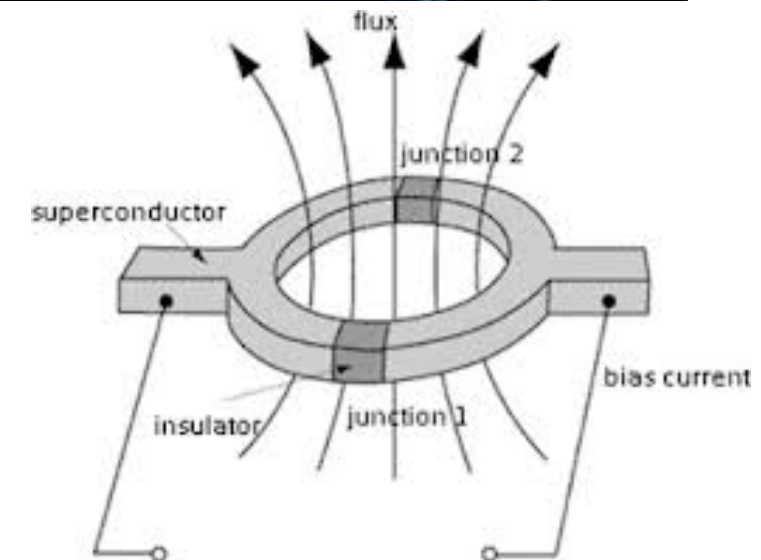
Csak elemi szupravezetők léteznek?



A kuprátokat sokszor „magas átmeneti hőmérsékletű” (high- T_c) szupravezetőknek is hívják.

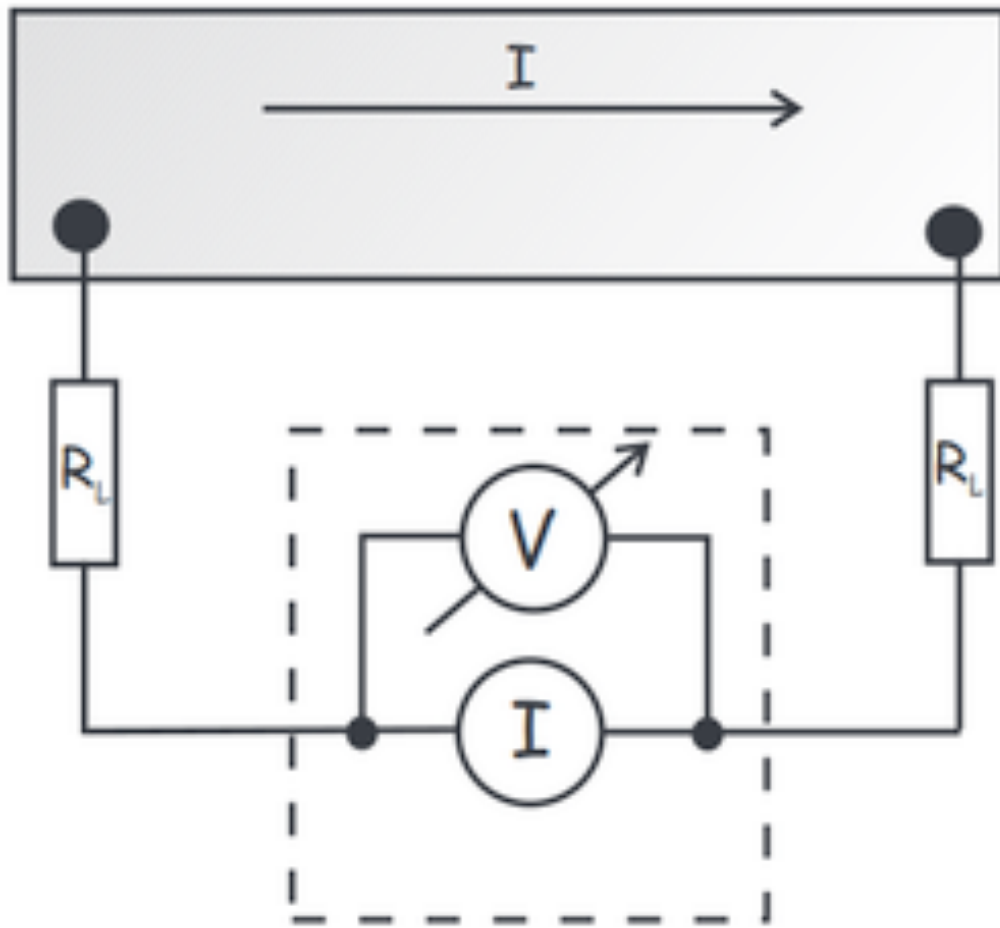
Van a szupravezetésnek technológiai jelentősége?

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

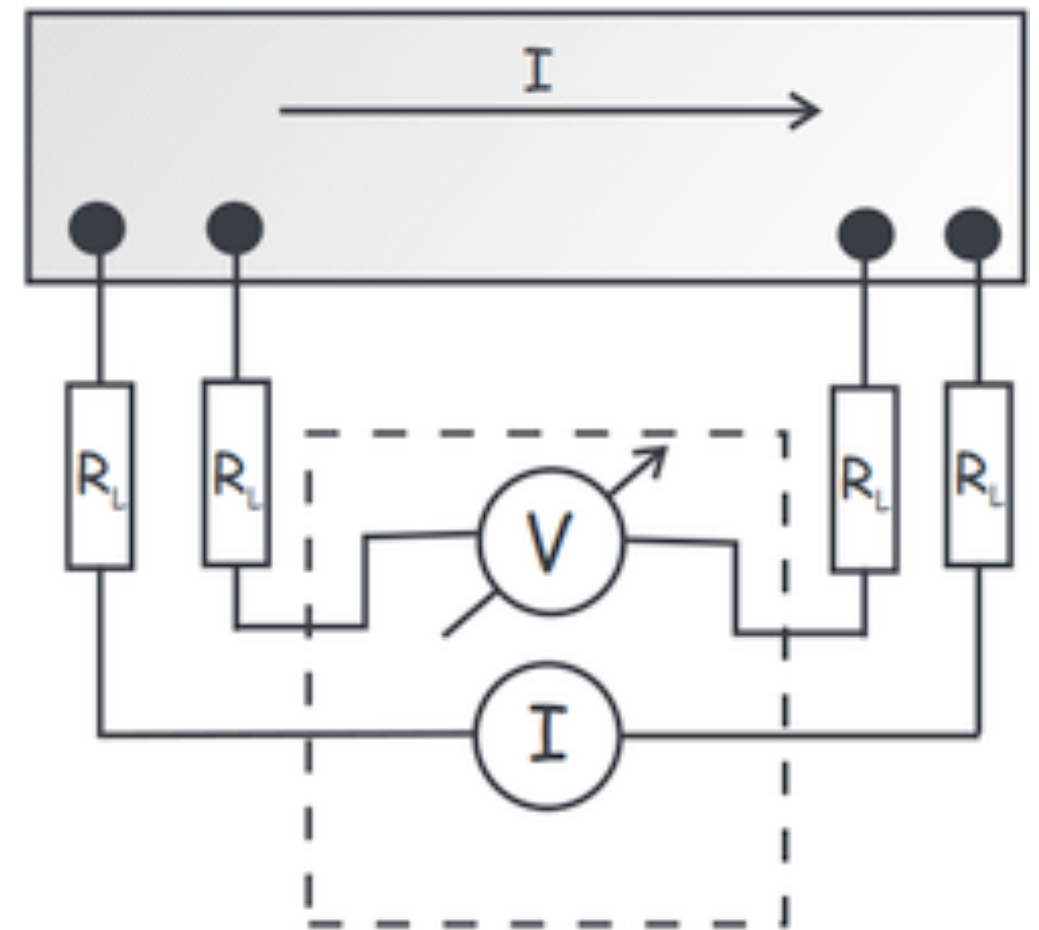


Hogyan mérjük a zérus ellenállást?

áramhajtott rendszeren eső feszültség mérése
négypont-elrendezésben



kétpont-konfiguráció:
drótók ellenállását méri
 $V/I = 2 R_L$
(nem jó)

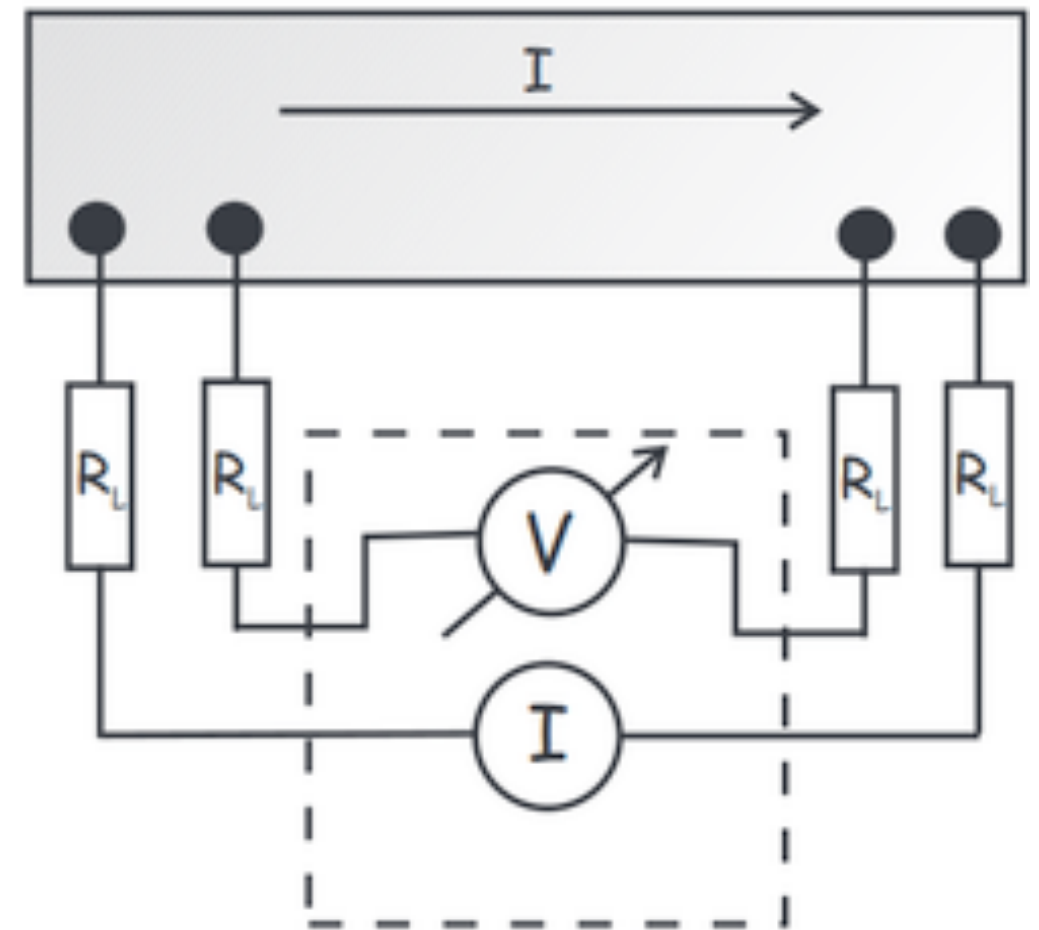


négypont-konfiguráció:
szupravezető ellenállását méri
 $V/I = 0$
(jó)

Hogyan mérjük a zérus ellenállást?

áramhajtott rendszeren eső feszültség mérése
négypont-elrendezésben

20mm x 3mm x 2mm

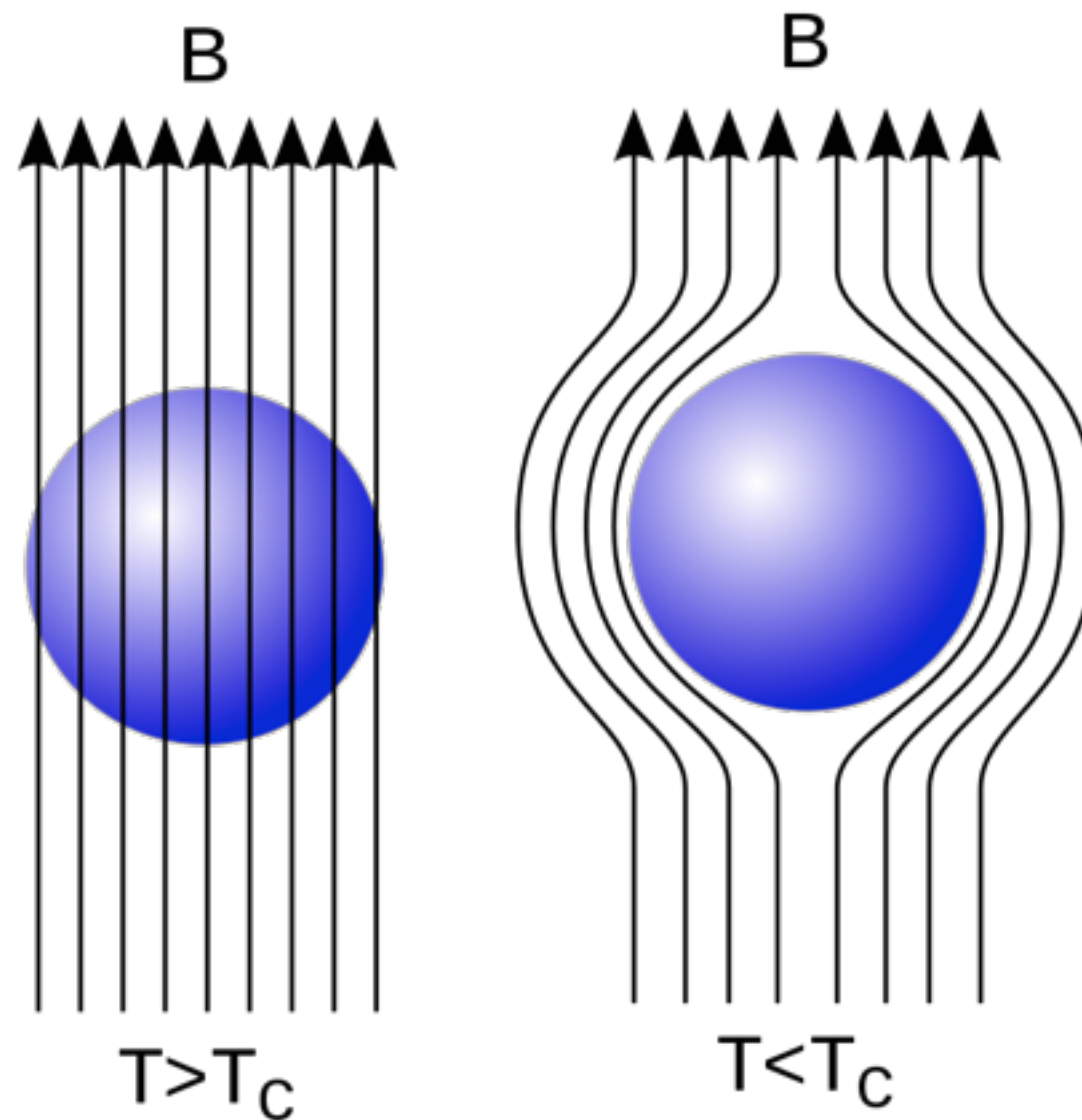


négypont-konfiguráció:
szupravezető ellenállását méri

$$V/I = 0$$

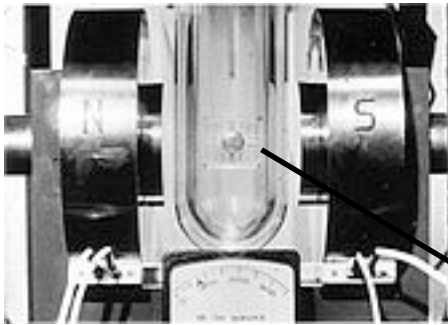
(jó)

Hogyan mérjük a Meissner-jelenséget?



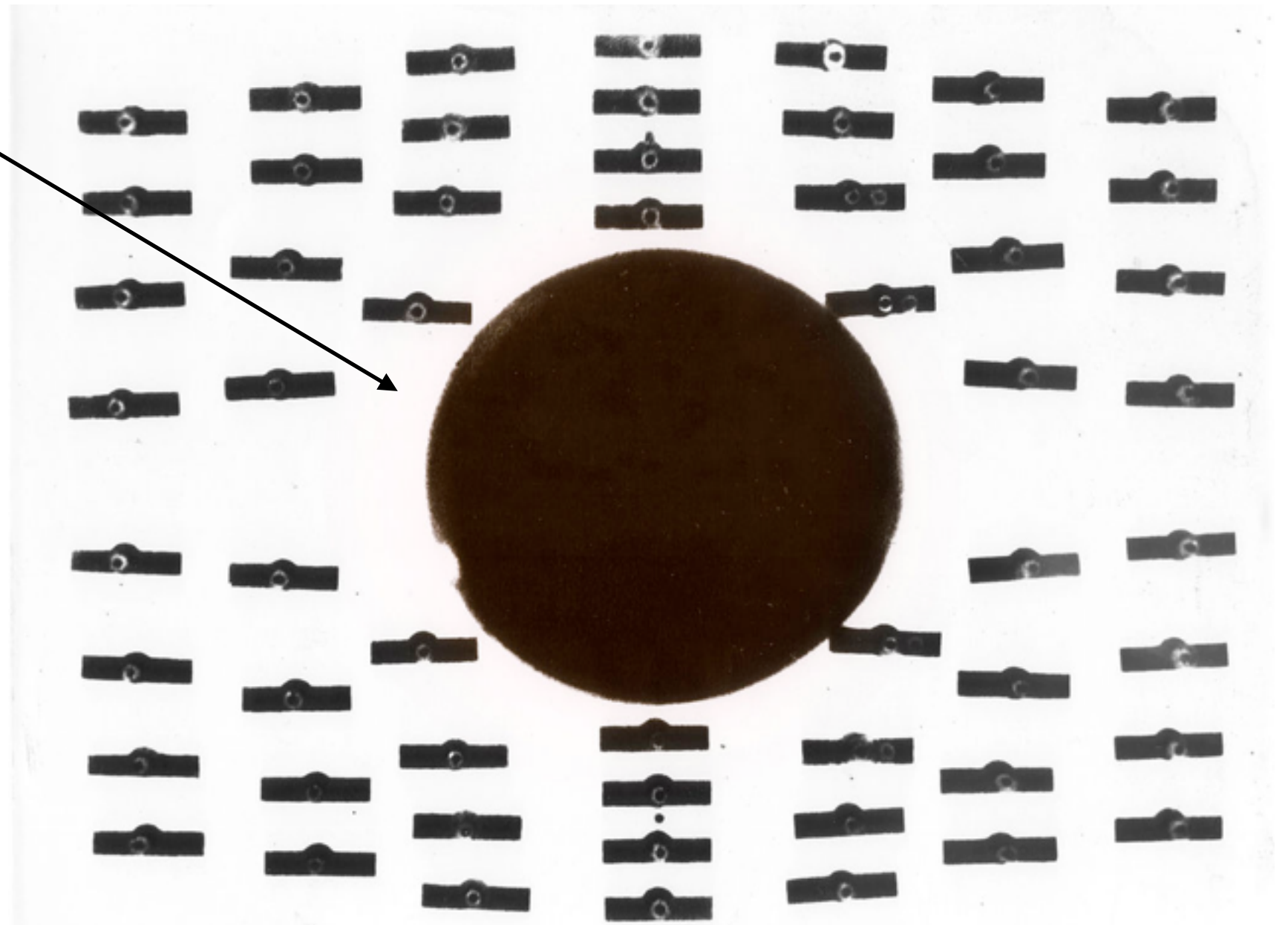
Hogyan mérjük a Meissner-jelenséget?

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



ón (Sn) henger
egy elektromágnesben
folyékony héliummal hűtve

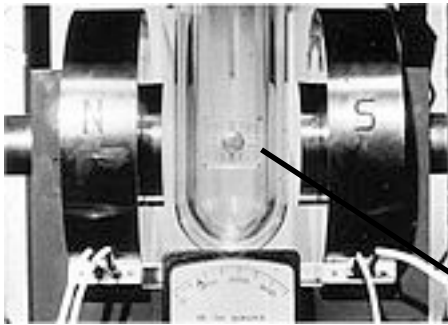
henger körül
sok kis iránytű



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

Hogyan mérjük a Meissner-jelenséget?

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



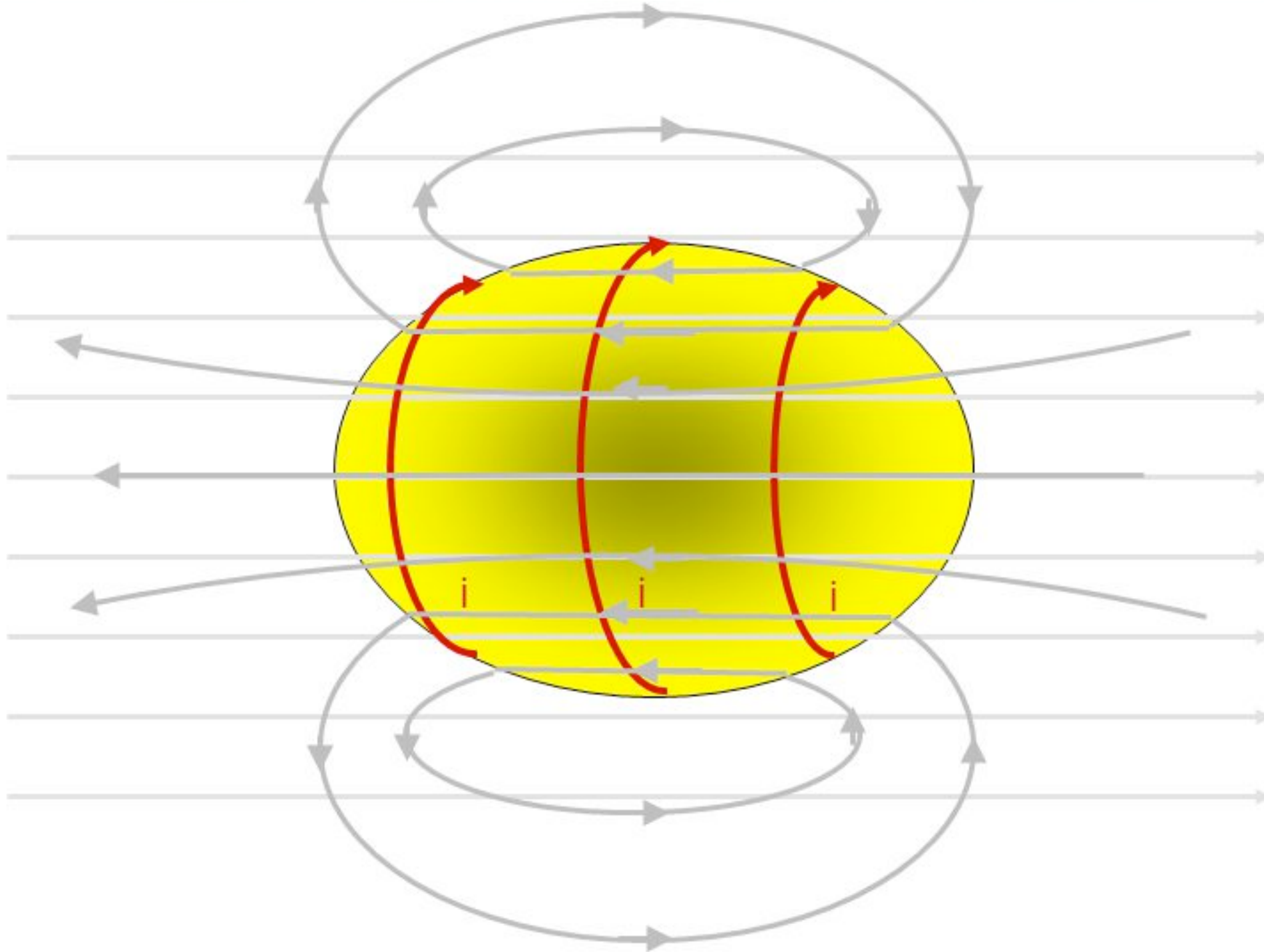
ón (Sn) henger
egy elektromágnesben
folyékony héliummal hűtve

henger körül
sok kis iránytű



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

Hogyan jön létre a Meissner-jelenség?

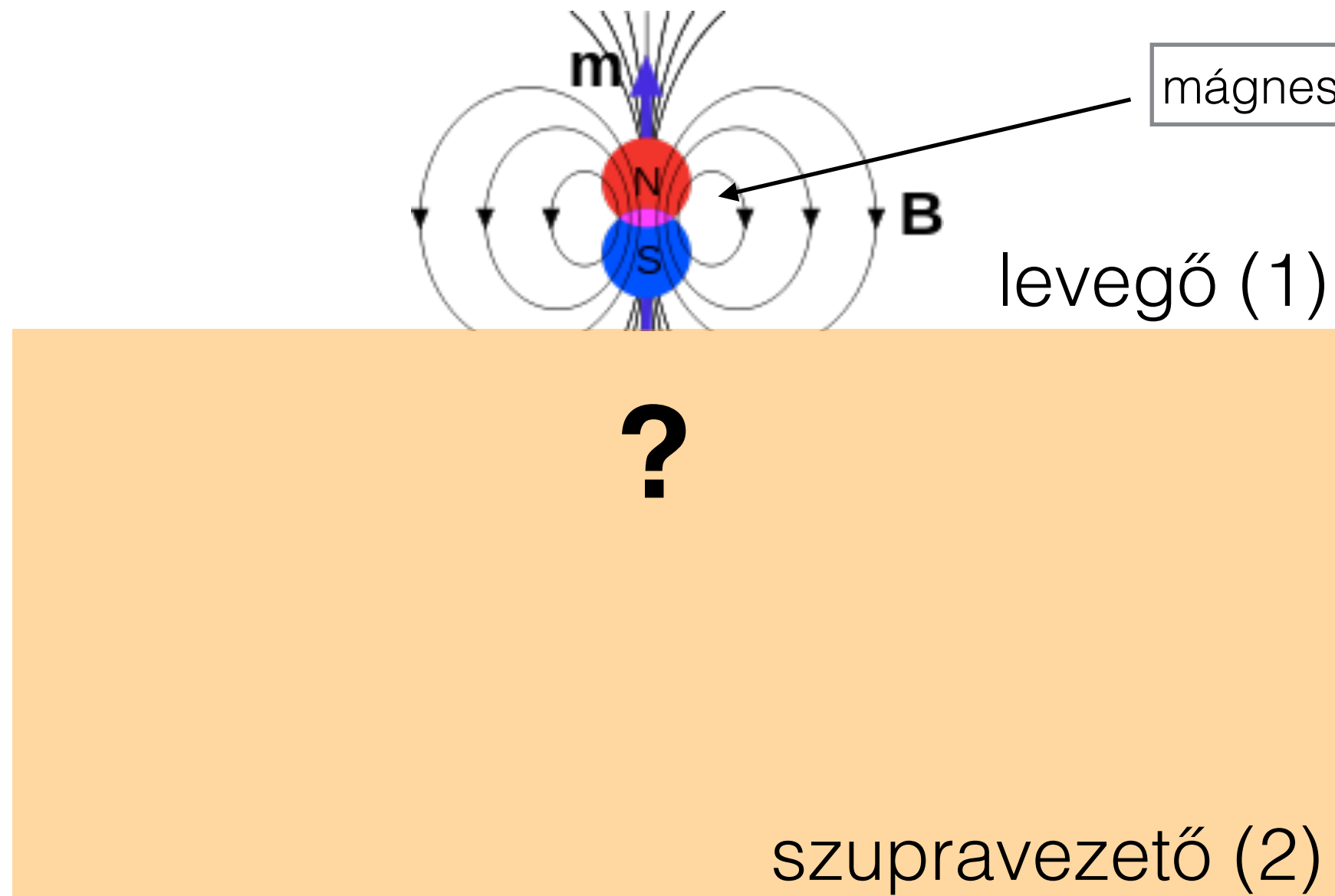


A szupravezető felületén olyan köráramok indulnak, melyek pont a külső B-térrel ellentétes B-teret indukálnak.

Miért lebeg egy mágnes egy szupravezető felett?

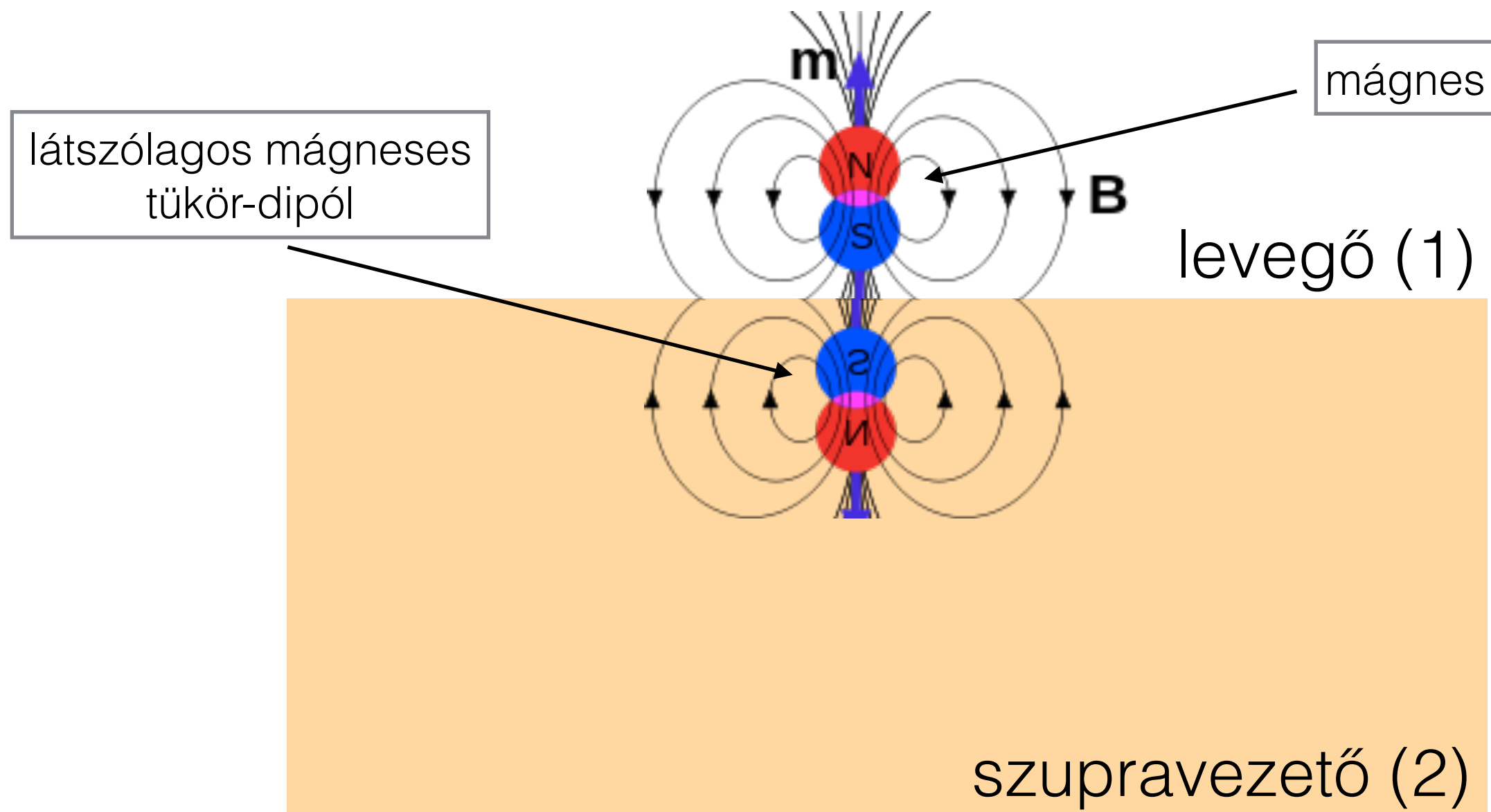


Miért lebeg egy mágnes egy szupravezető felett?



Meissner-jelenség: a mágneses tér nulla a szupravezetőben.

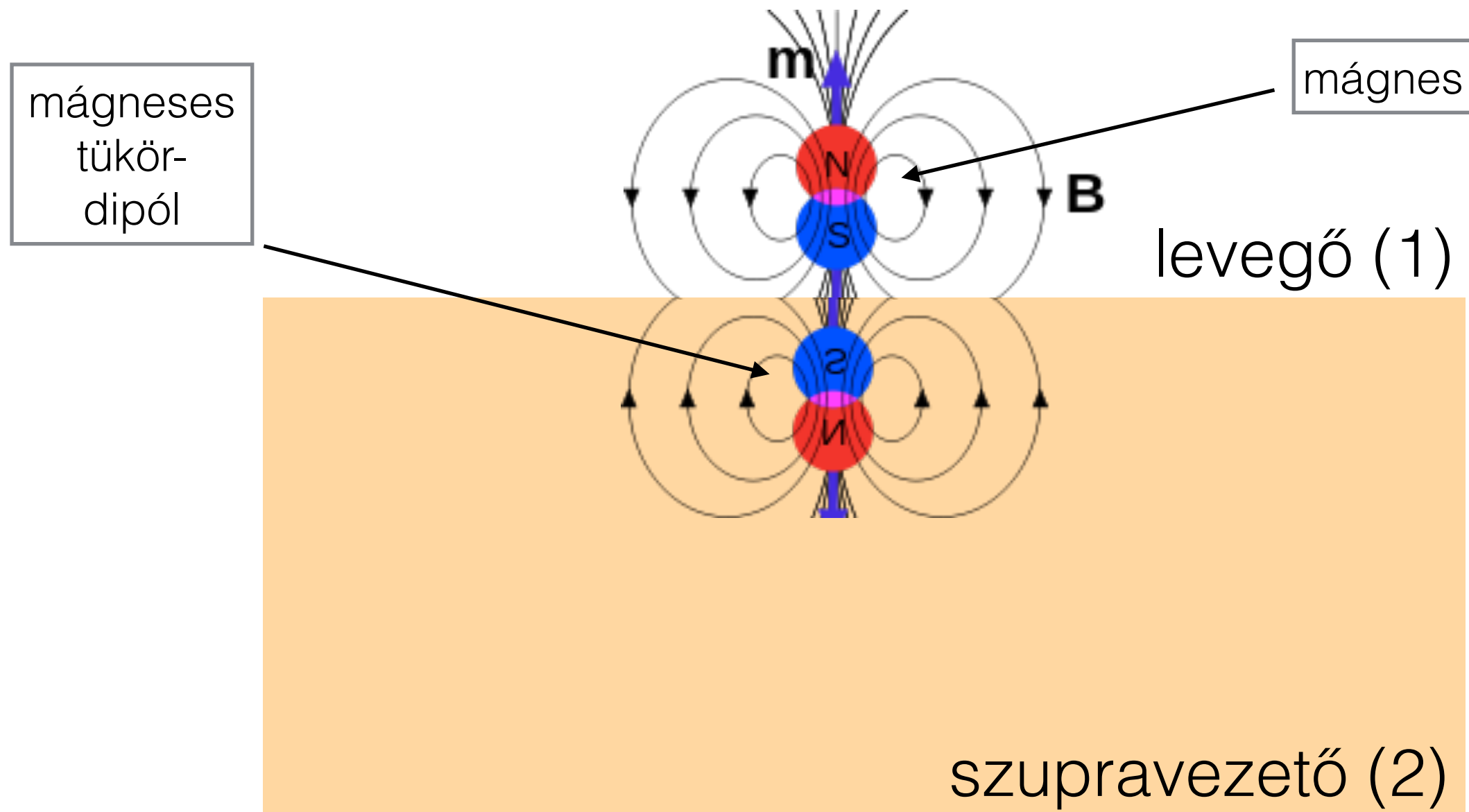
Miért lebeg egy mágnes egy szupravezető felett?



“Tükörtöltés”-elv: olyan látszólagos tükör-mágnes keletkezik a szupravezetőben, ami kielégíti a B -re vonatkozó határfeltételt:

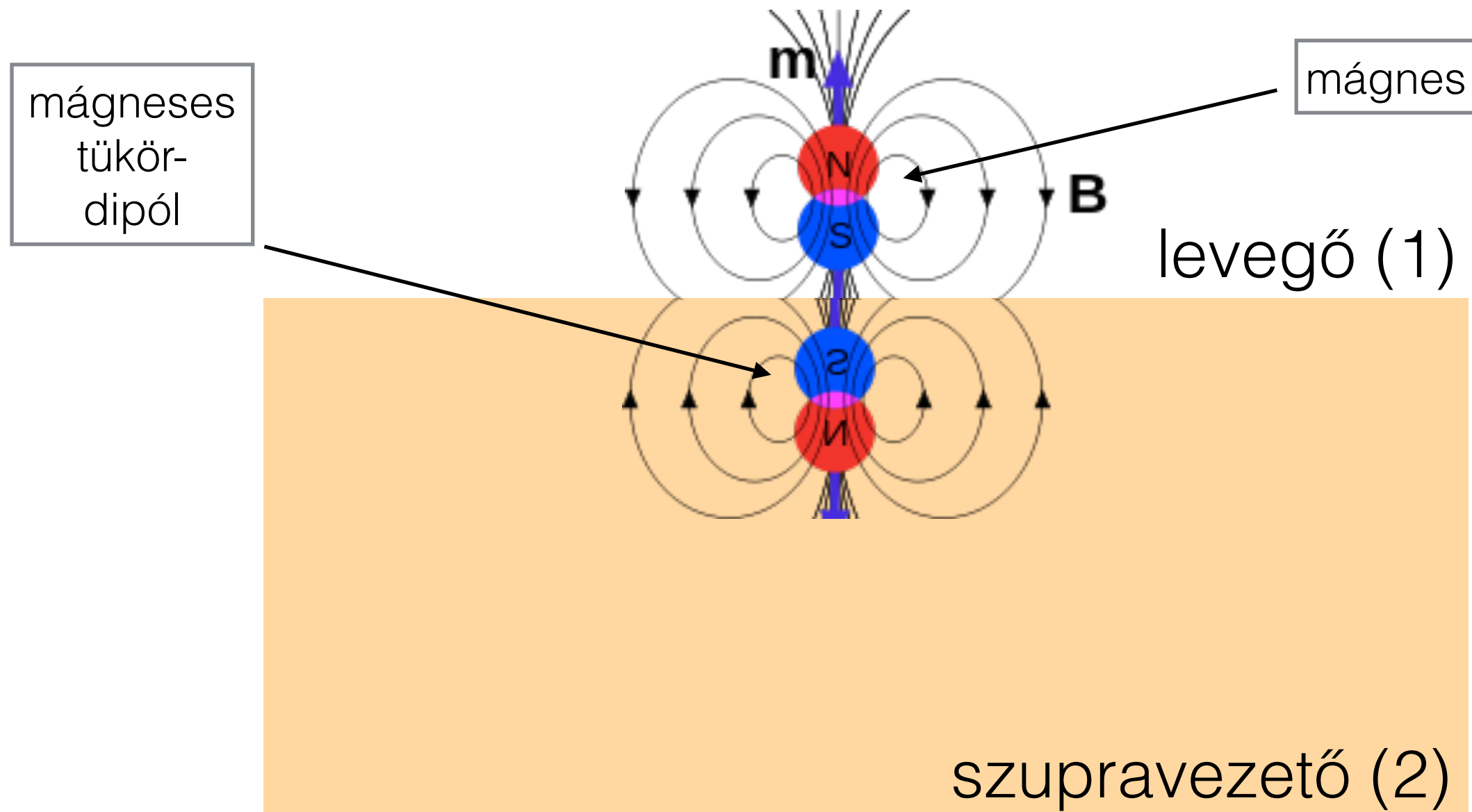
$$\mathbf{n}_{12} \cdot \mathbf{B} = 0$$

Miért lebeg egy mágnes egy szupravezető felett?



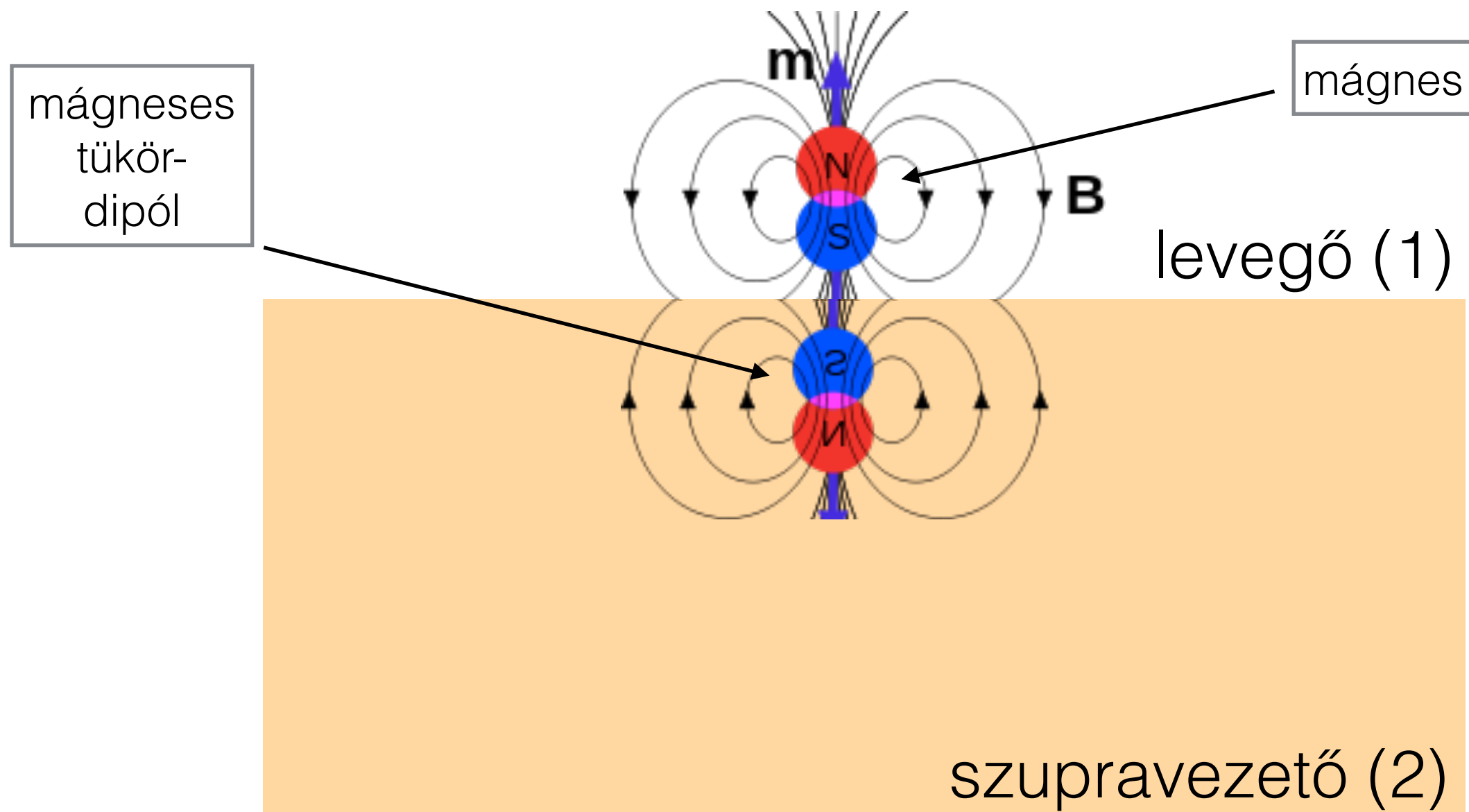
Az igazi déli pólus és a virtuális déli pólus taszítja egymást.

Miért lebeg egy mágnes egy szupravezető felett?



Érdekes (nem zh-)kérdés:
stabil-e ez az egyensúlyi helyzet?

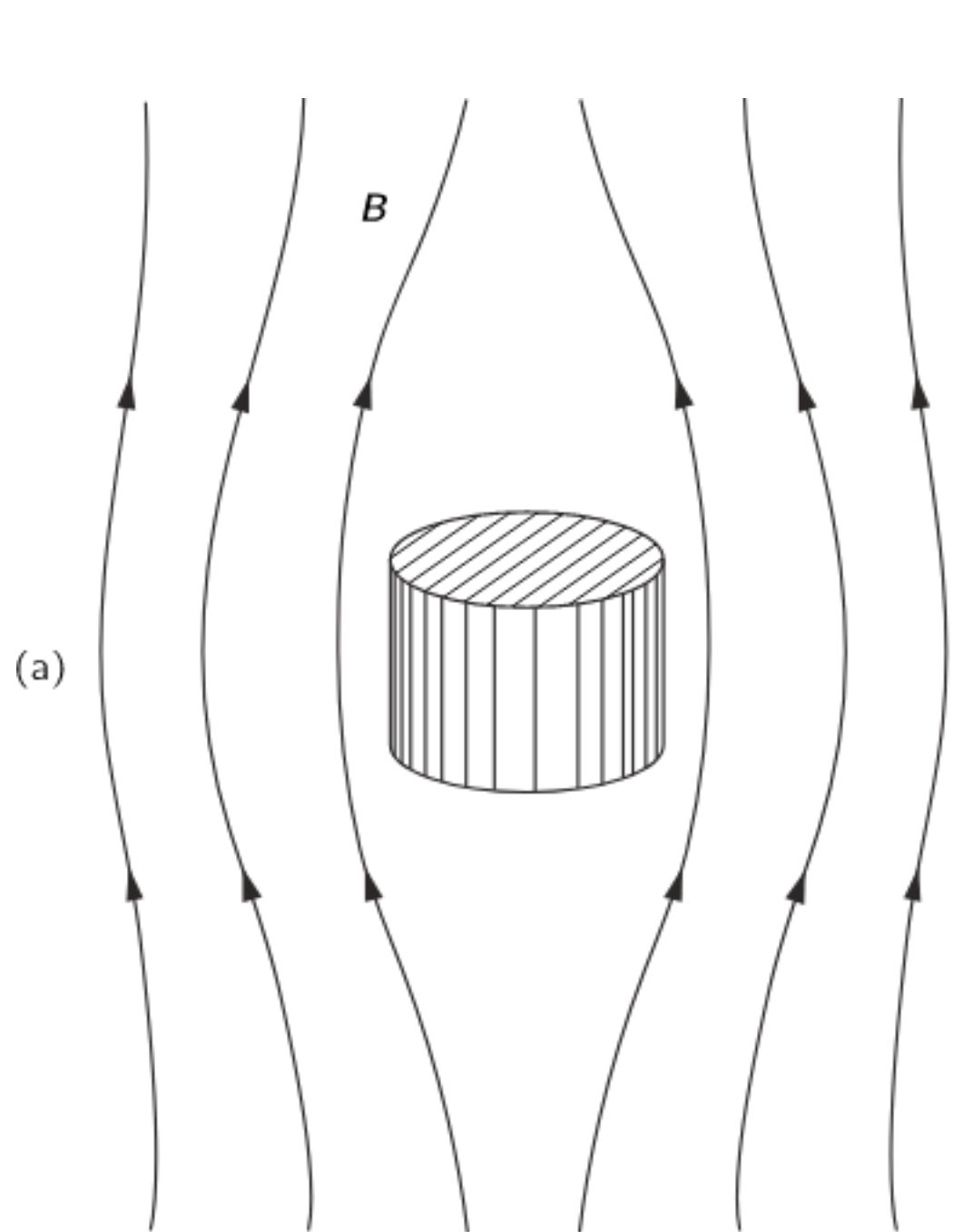
Miért lebeg egy mágnes egy szupravezető felett?



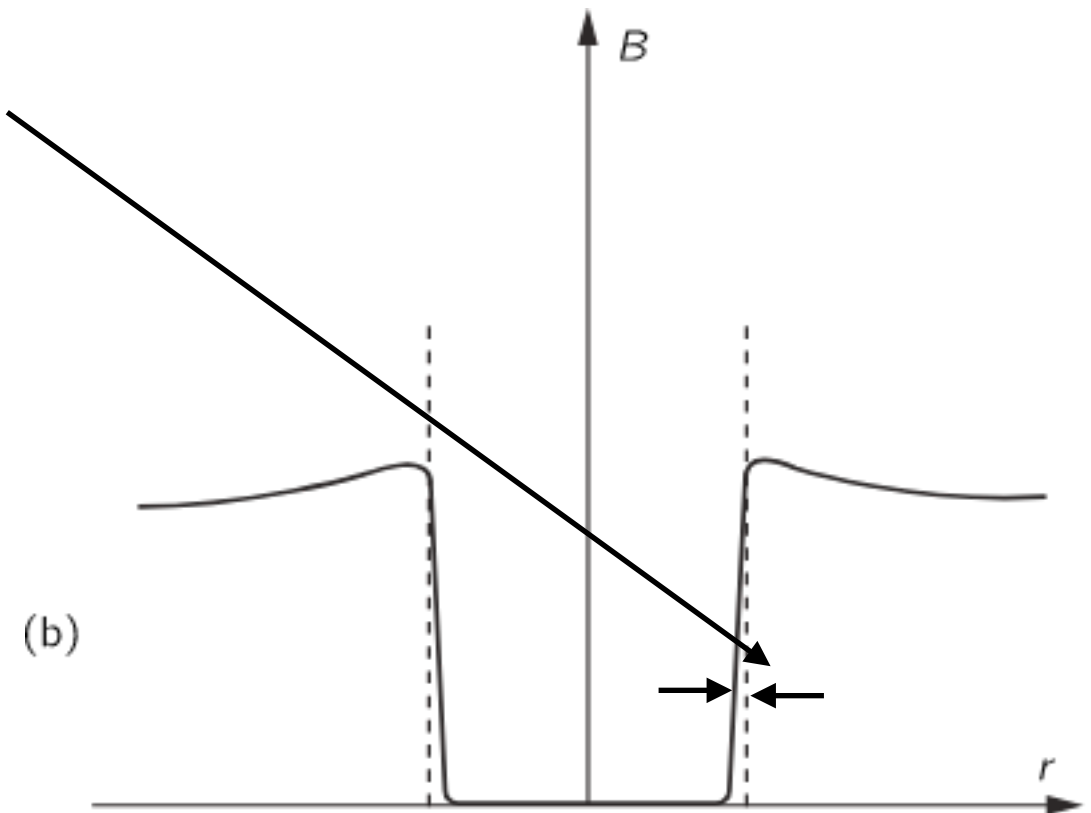
Érdekes (nem zh-)kérdés:

milyen felületi áramsűrűség-vektormező alakul ki az 12 felületen?

A mágneses tér egyáltalán nem hatol be a szupravezetőbe?



De.

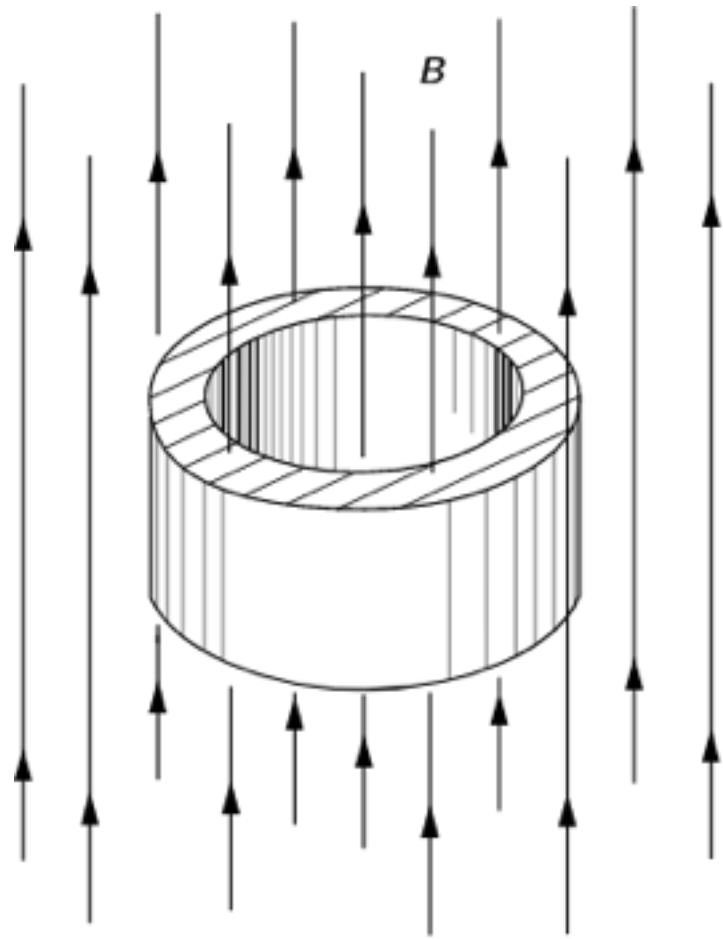


mágneses tér exponenciálisan cseng le a felülettől való d távolság függvényében:
 $B(d) \propto e^{-d/\lambda}$

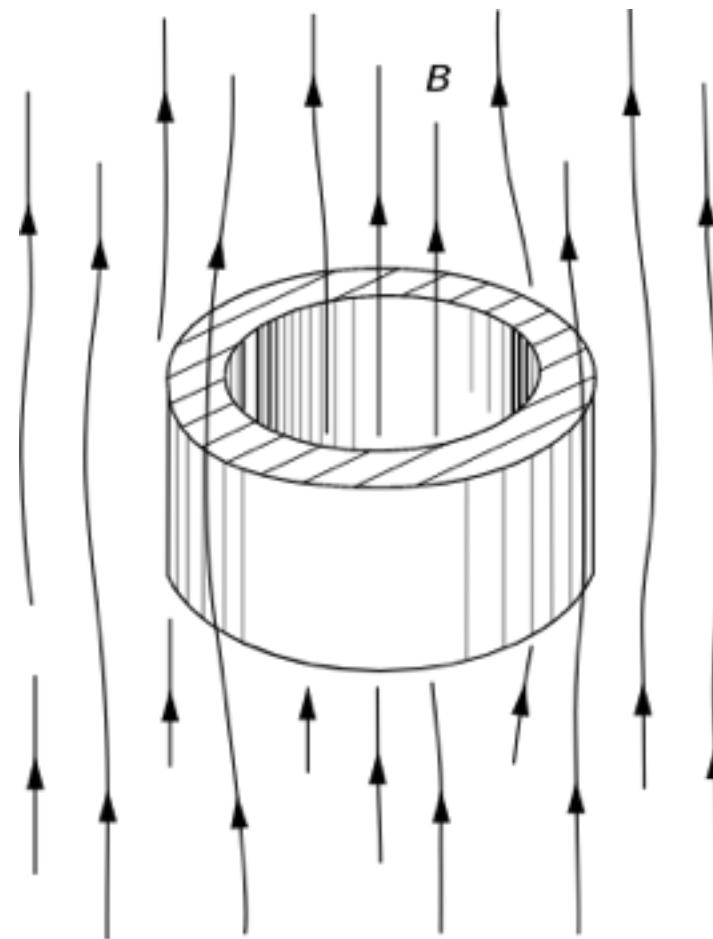
London-féle behatolási mélység, λ

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

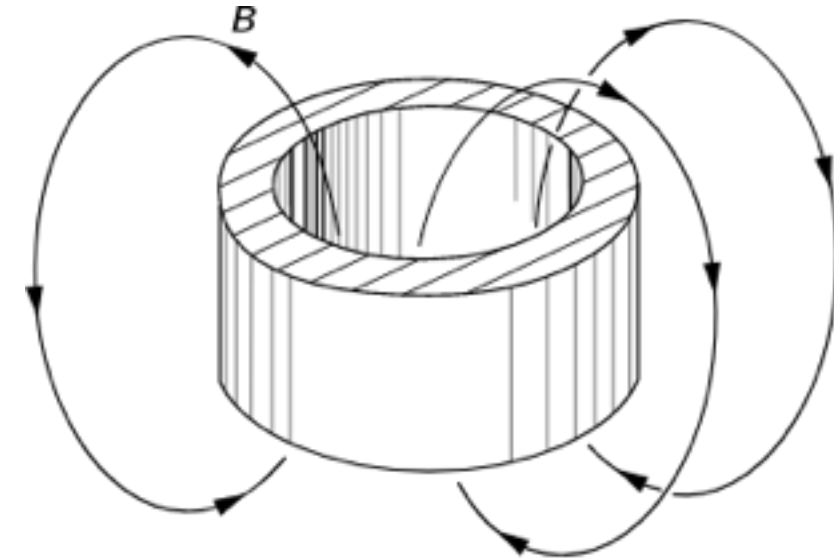
Mi történik egy szupravezető gyűrűben?



(a)



(b)



(c)

kritikus hőmérséklet felett
külső B-térben



kritikus hőmérséklet alatt
külső B-térben



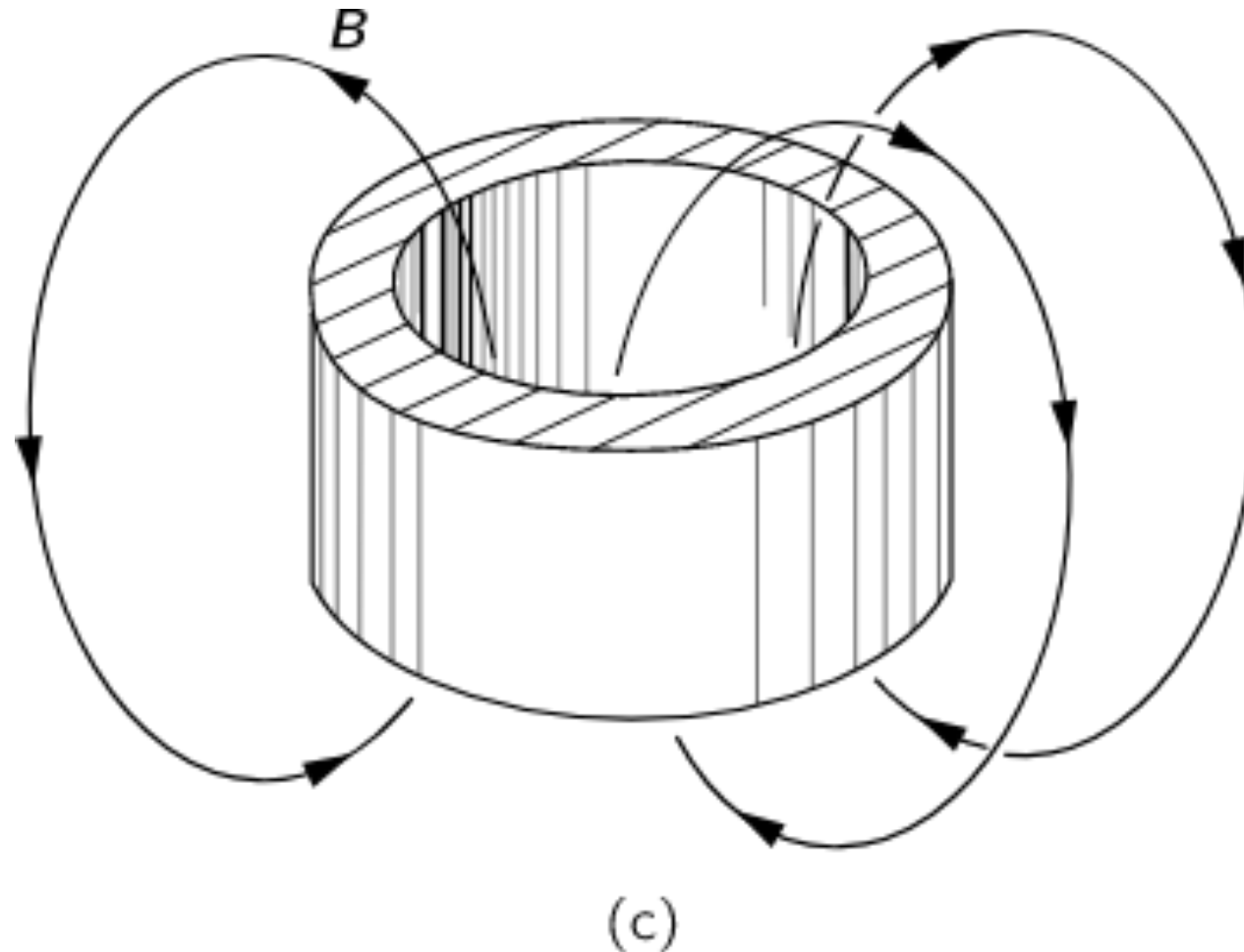
kritikus hőmérséklet alatt
B-tér kikapcsolva

B-tér behatol az anyagba

B-tér kiszorul az anyagból
gyűrűben köráram indul

köráram megmarad
(perzisztens áram)

Mi történik egy szupravezető gyűrűben?

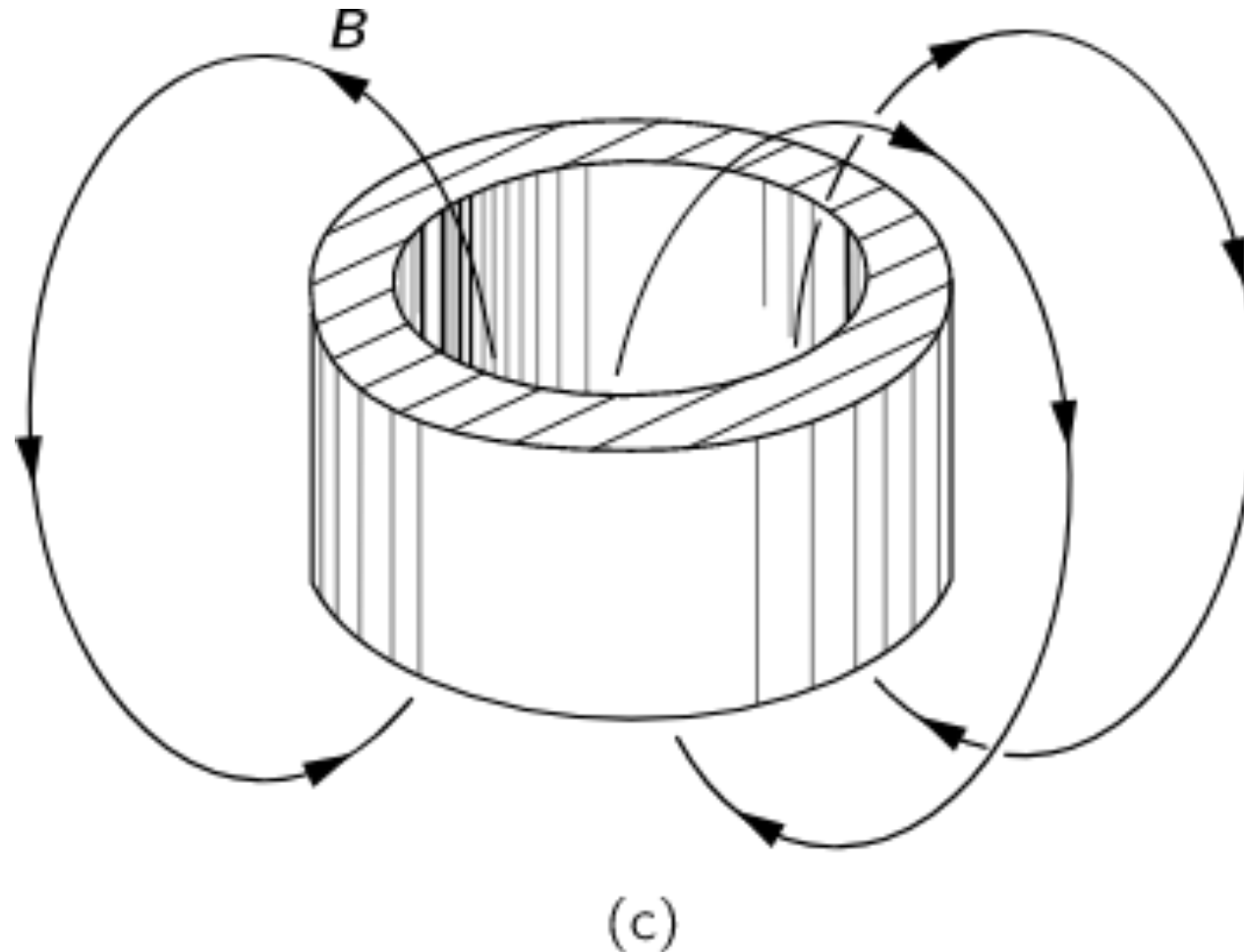


- köráram nagyon sokáig (akár több ezer év) fennmarad (perzisztens áram)
- bezárt fluxus kvantált: a fluxuskvantum egész számszorosa

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

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

Hogyan mérjük a zérus ellenállást?

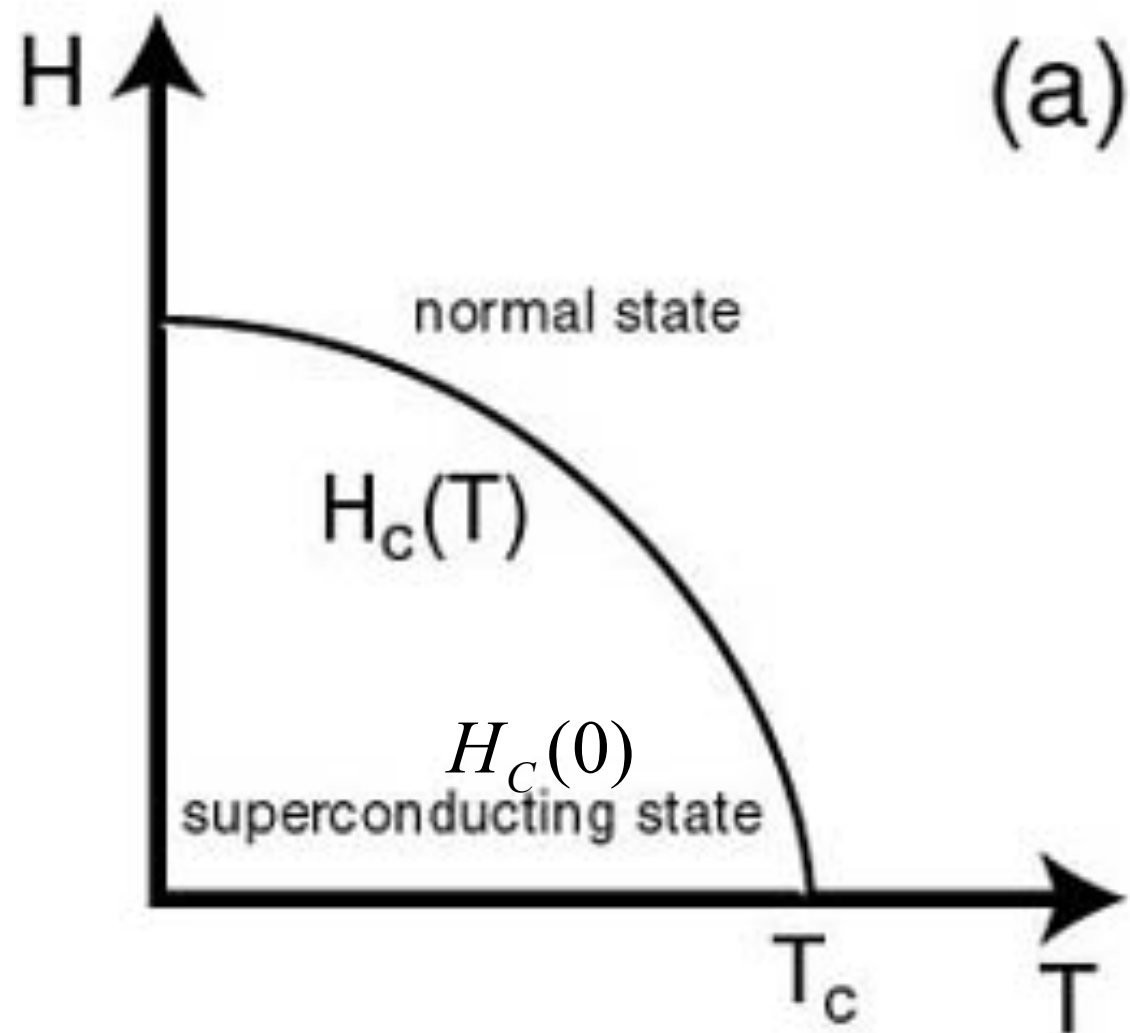


- köráram nagyon sokáig (akár több ezer év) fennmarad (perzisztens áram)
- áram időfüggésének méréséből a gyűrű R ellenállása megkapható:

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

Egy szupravezető bármekkora mágneses teret kitaszít?

Nem. Erős mágneses tér megöli a szupravezetést.



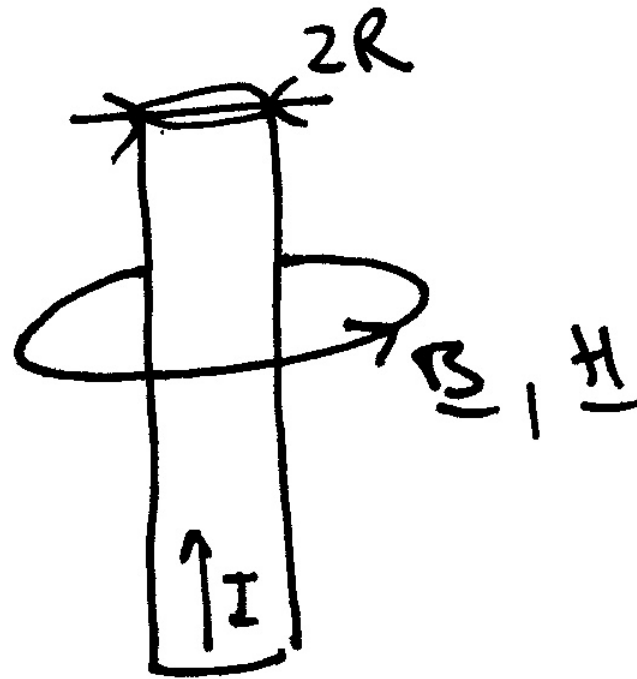
$$H_c(T) = H_c(0) \left[1 - \left(\frac{T}{T_c} \right)^2 \right]$$

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.

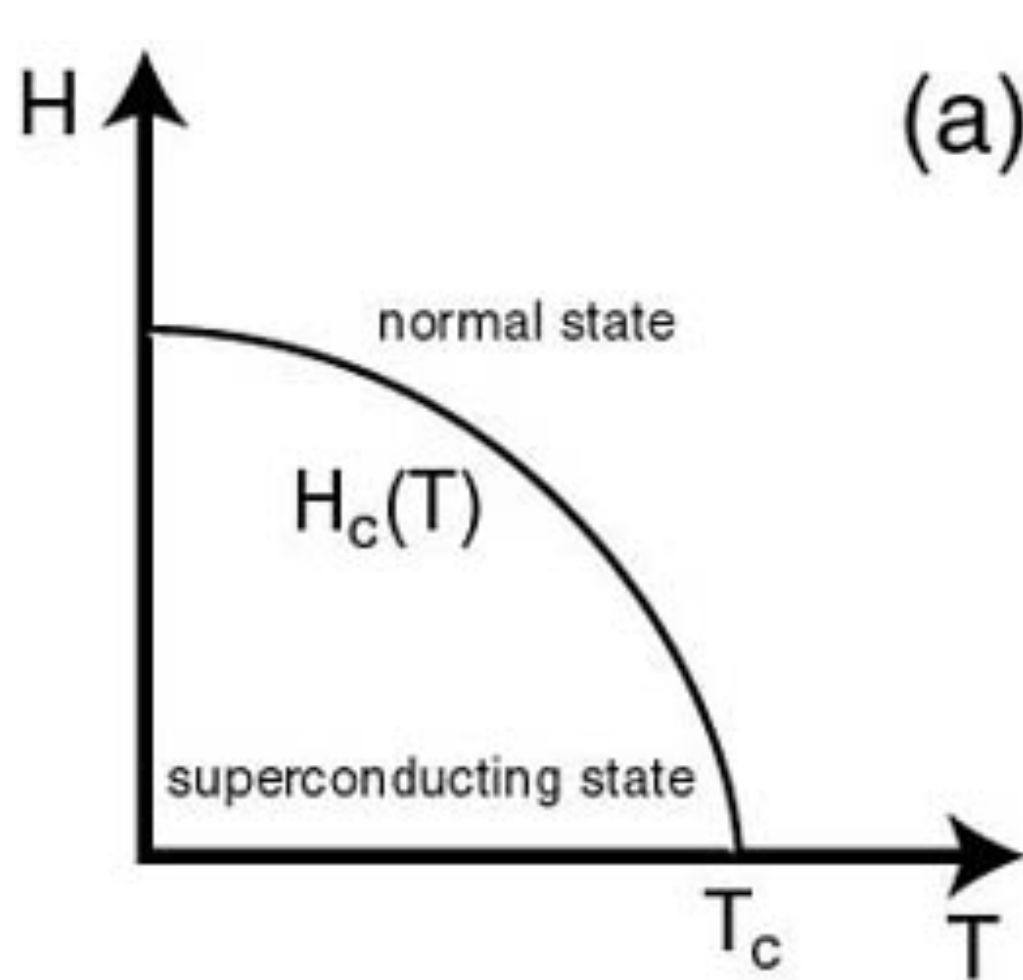


Áramjárta (I), hengeralakú, R sugarú szupravezető felületén a tér:

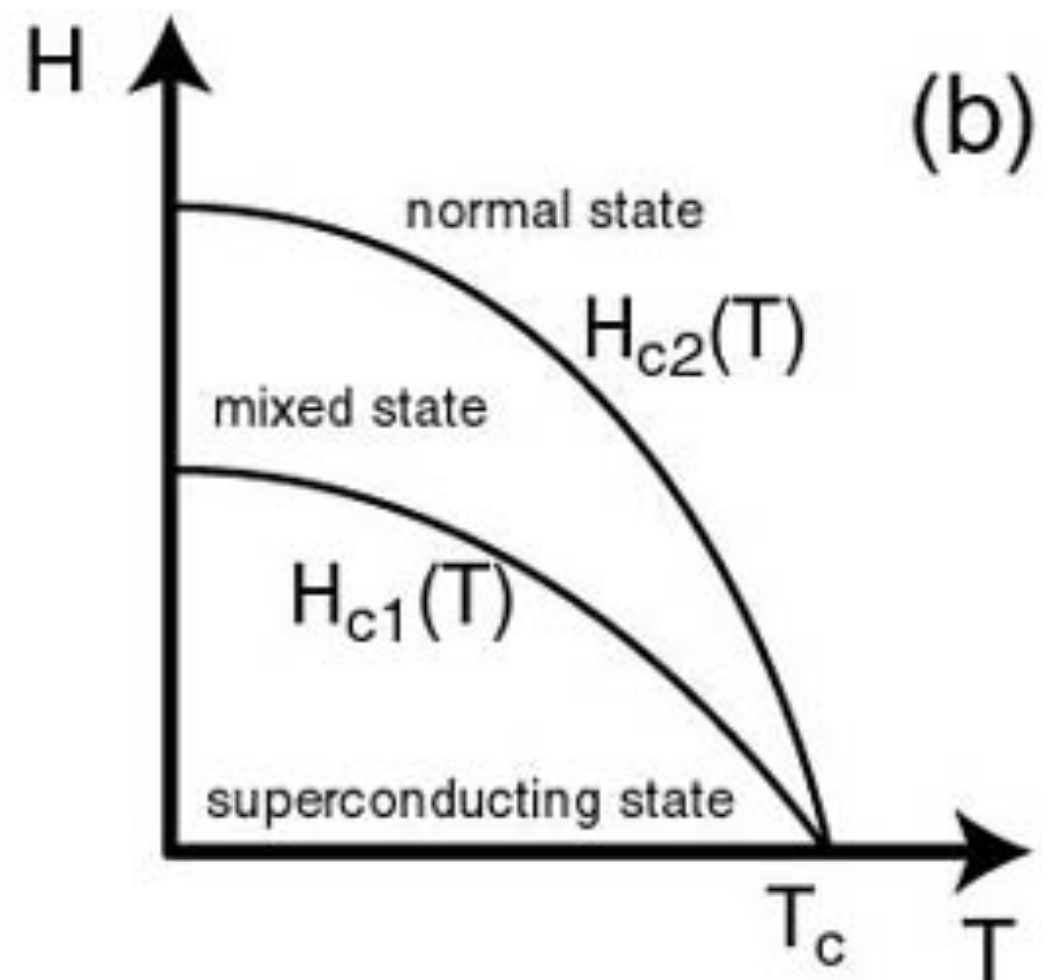
$$H = I / (2\pi R)$$

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

Elsőfajú és másodfajú szupravezetők



elsőfajú
(pl. higany, alumínium)

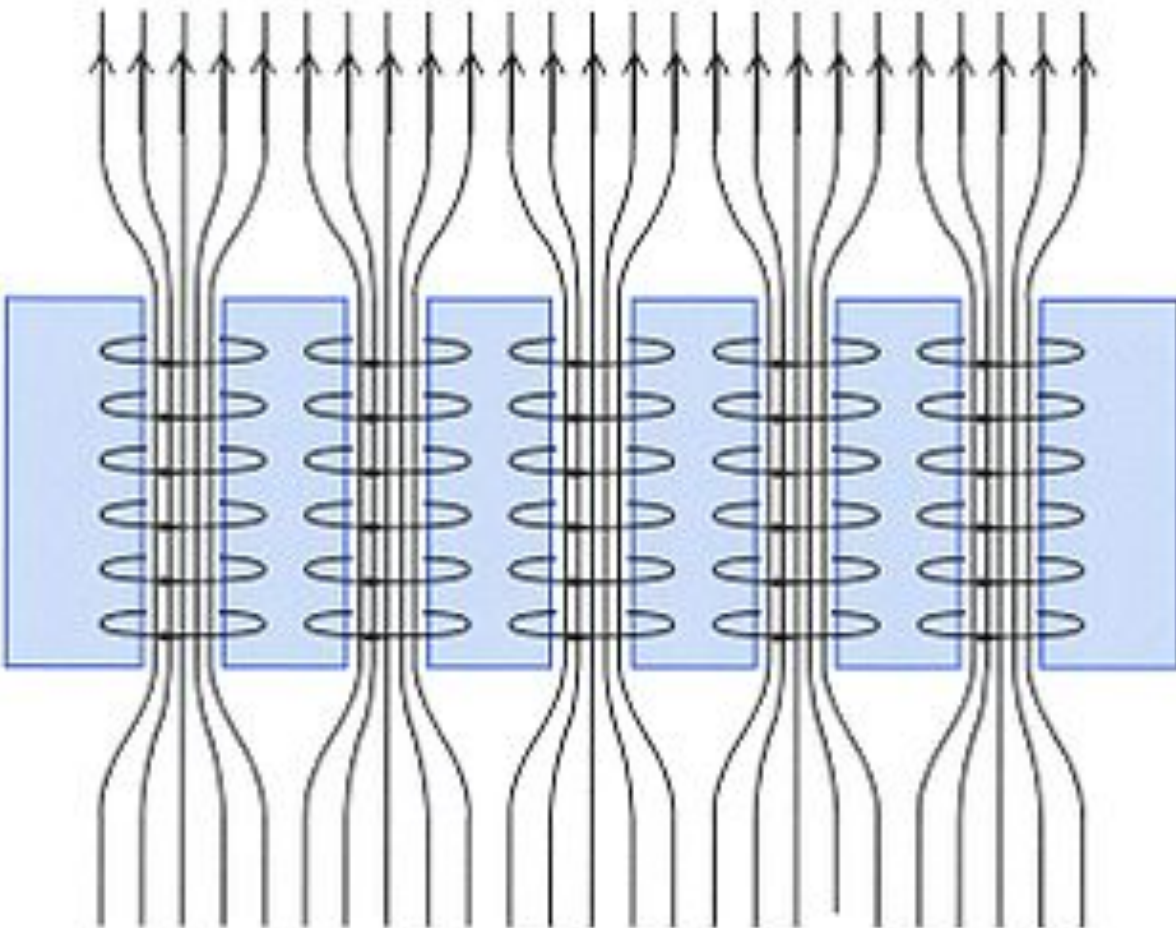
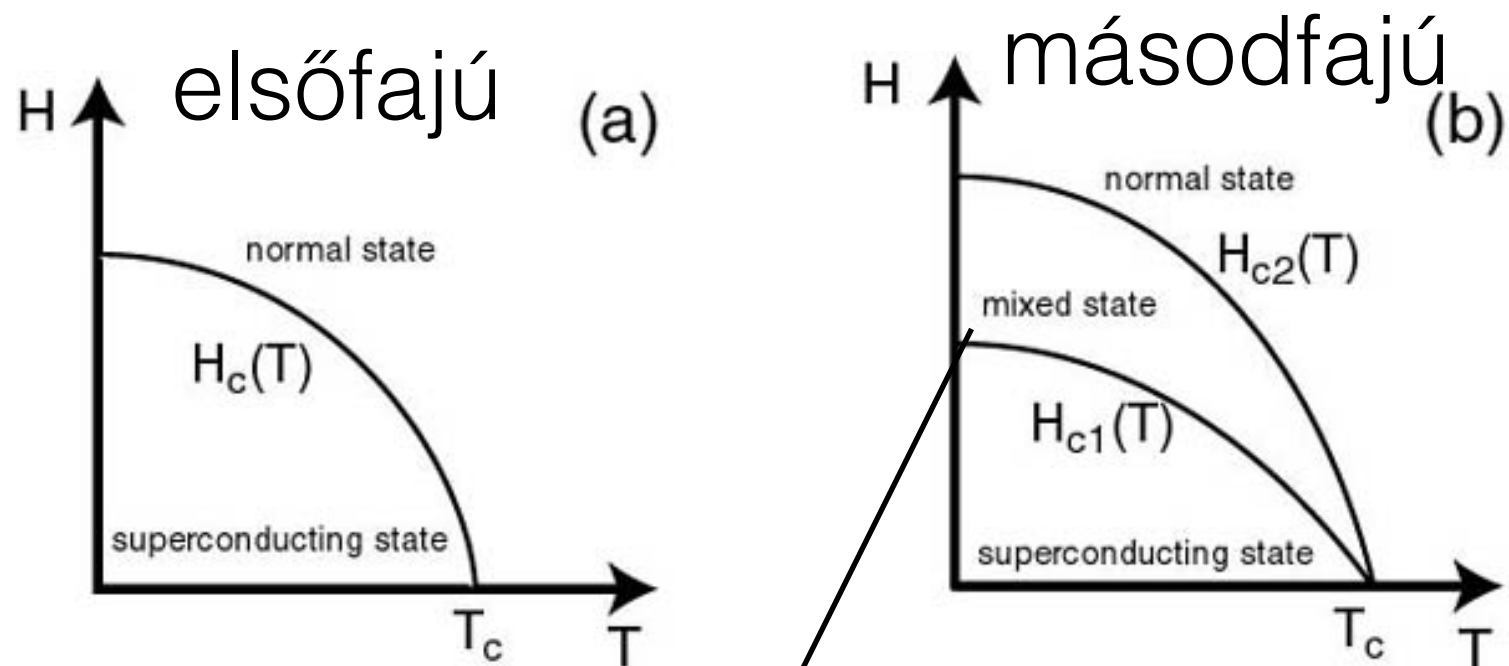


másodfajú
(pl. kuprátok)

$$H = \frac{I}{2r\pi}$$

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

Elsőfajú és másodfajú szupravezetők

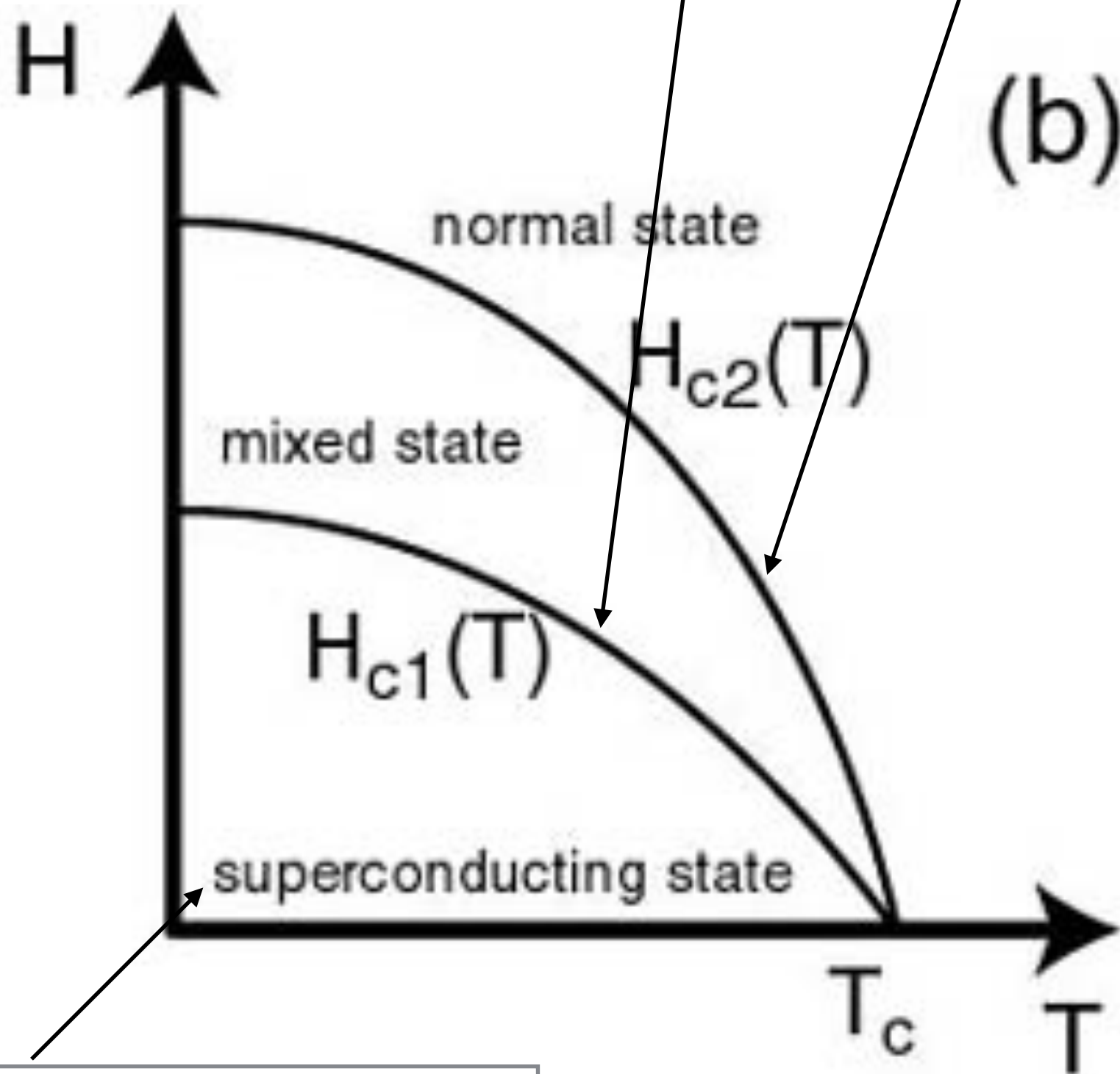


kevert fázis vagy vortex fázis:

$I = \frac{2r\pi}{\Phi_0}$

- 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

Másodfajú szupravezetők alsó és felső kritikus tere



szupravezető fázis vagy Meissner-fázis

Meissner-fázis: tökéletes diamágnes

mágneses indukció

mágneses térerősség

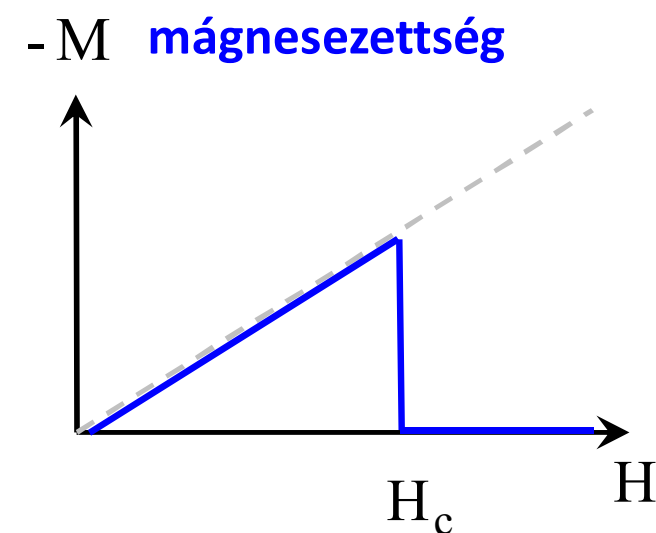
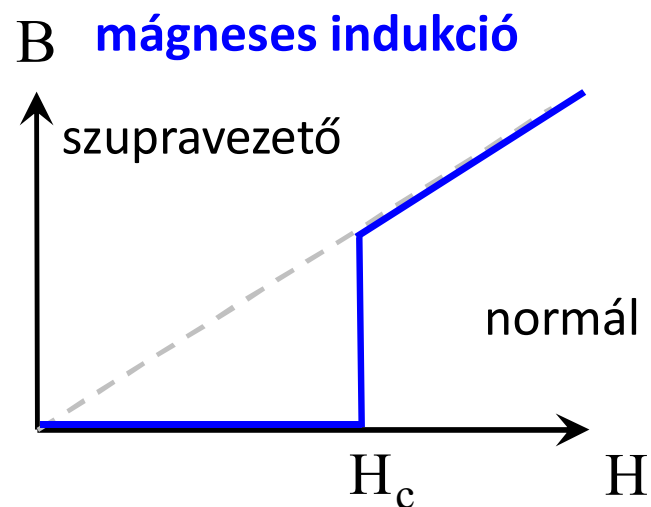
relatív mágneses permeabilitás

mágneses szuszceptibilitás

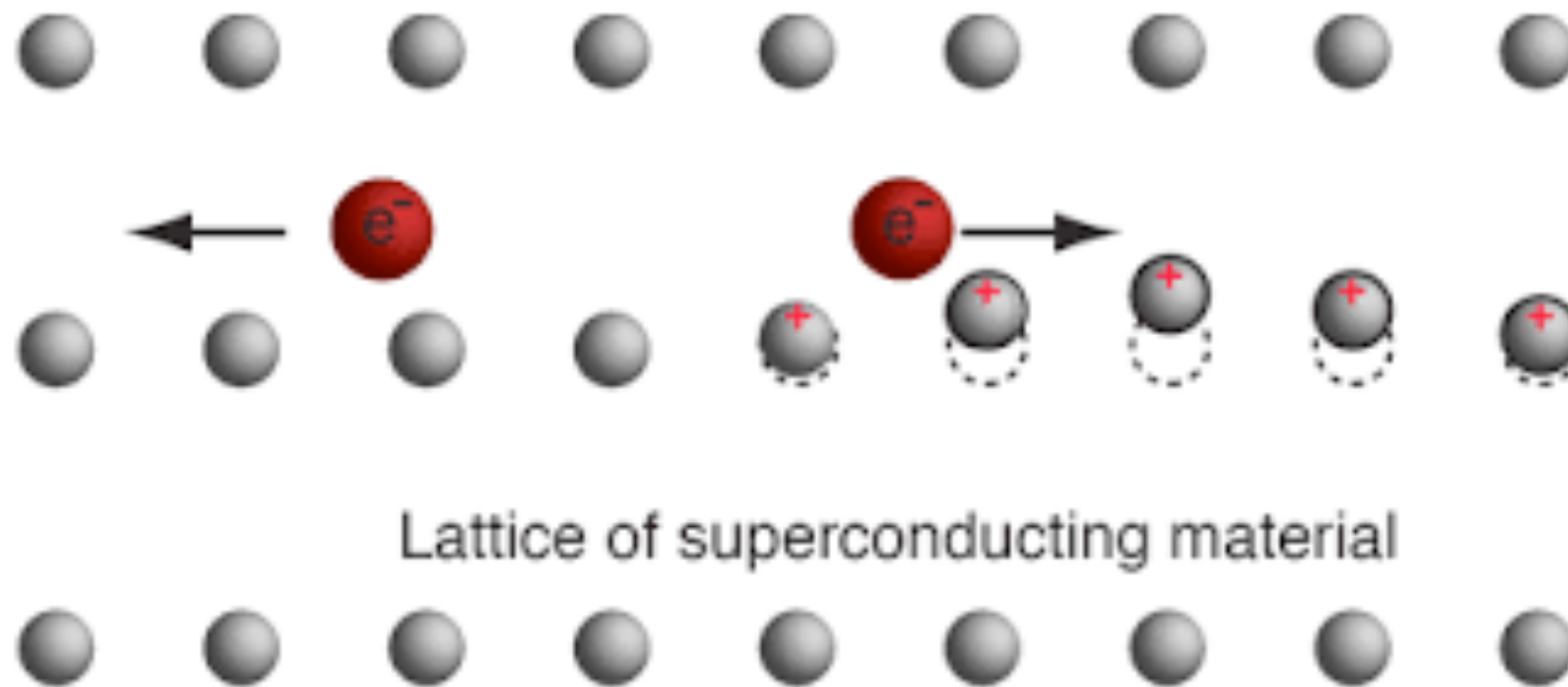
mágnesezettség

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} = \mu_0 \mu_r \mathbf{H} = \mu_0 (1 + \chi_m) \mathbf{H} = \mu_0 \mathbf{H} + \mathbf{M}$$

tökéletes diamágnes: teljes leárnyékolás, $\chi_m = -1 \mapsto \mathbf{B} = 0$



Miért van szupravezetés? (Elsőfajú esetben)



Elektron-fonon-kölcsönhatás miatt.

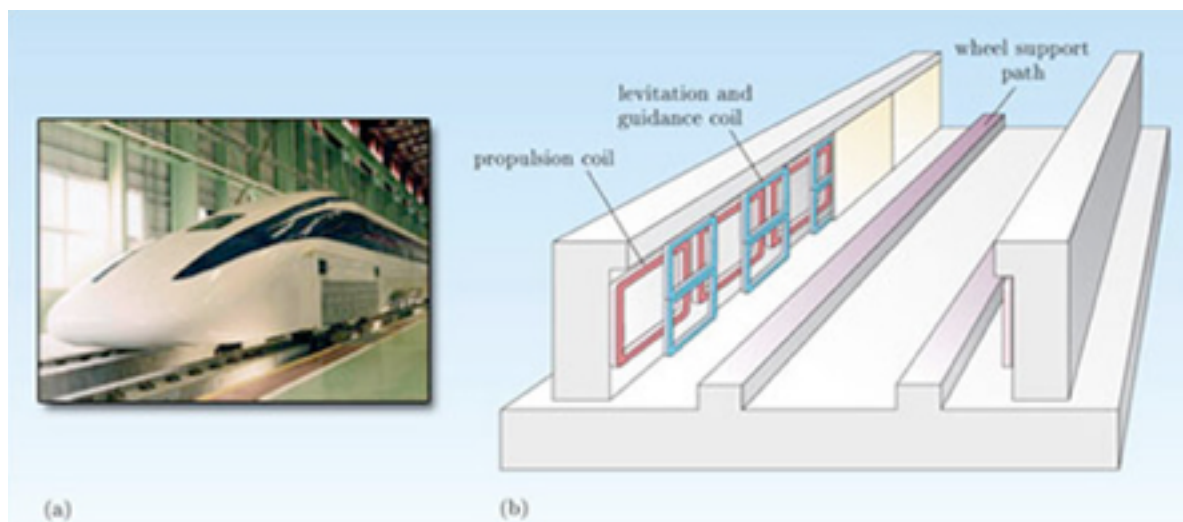
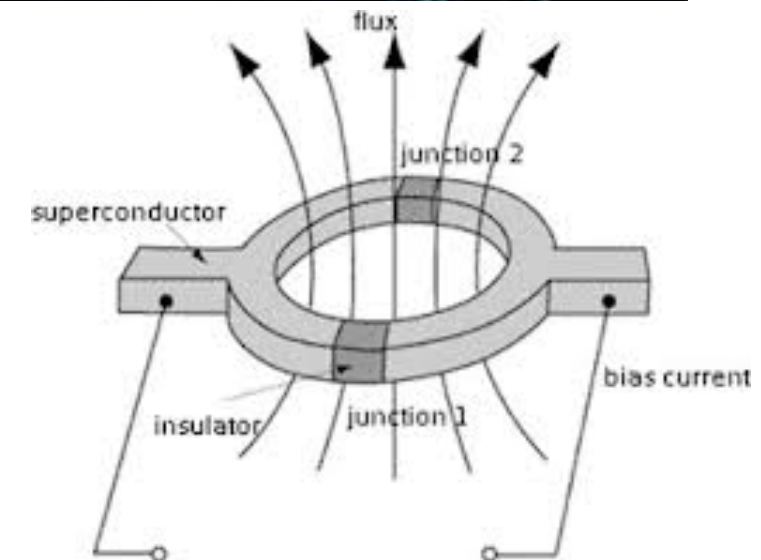
Honnan tudjuk? Izotóp-effektusból.

$$T_c \sqrt{M} = \text{állandó}$$

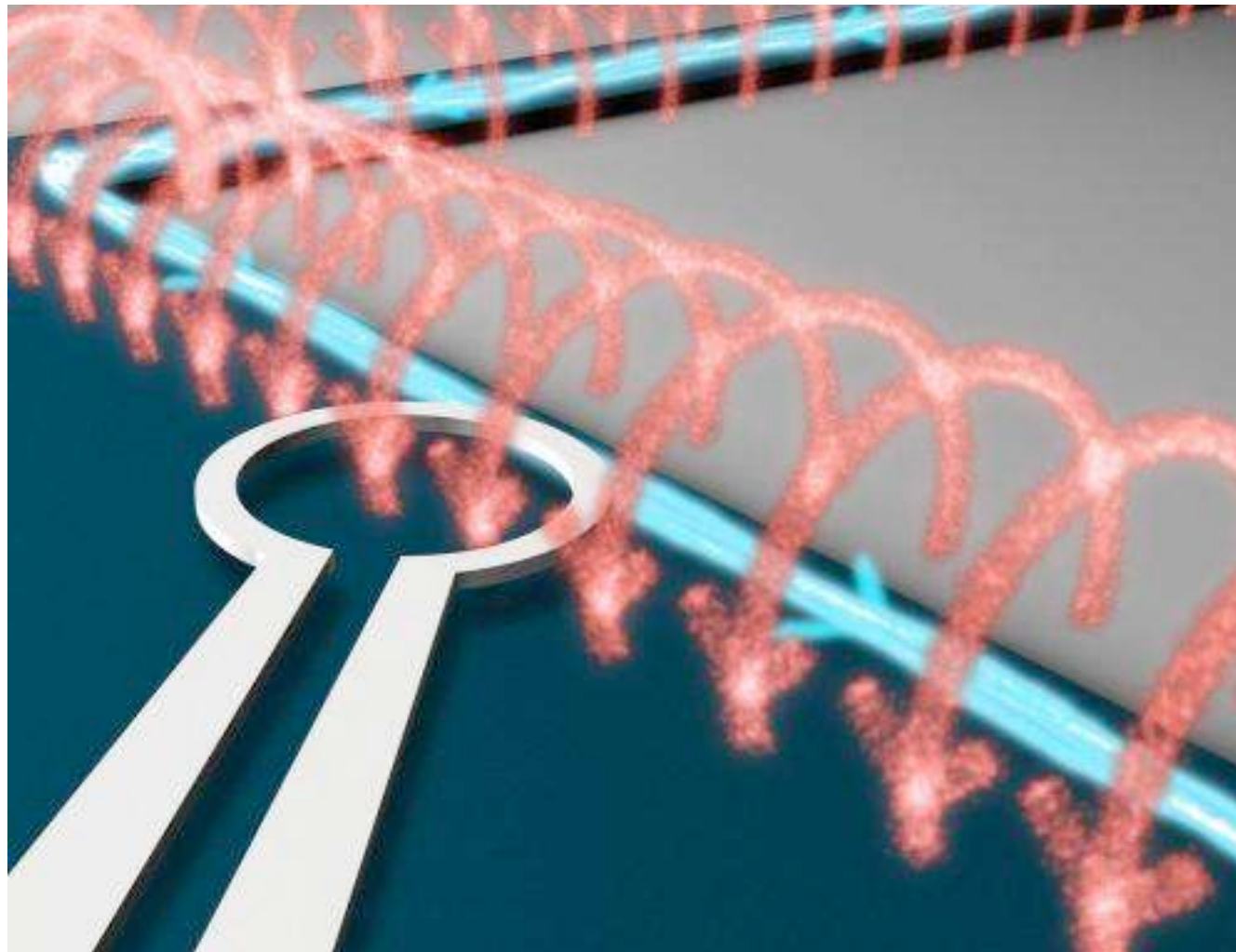
Elektron-fonon-kölcsönhatás
elektronpárokat (Cooper-párokat) hoz létre.

Van a szupravezetésnek technológiai jelentősége?

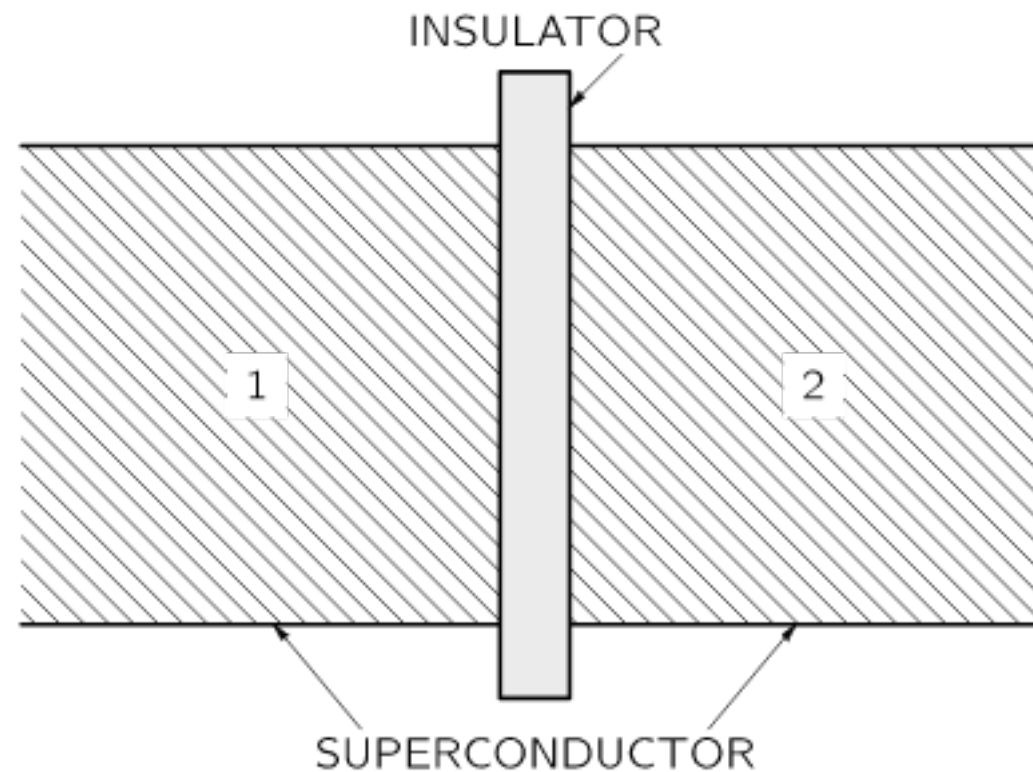
1. Veszteségmentes vezetés
2. Elektromos biztosíték
3. Szupravezető elektromágnesek
például MRI, NMR, ESR méréshez
4. Mágneses levitáció (pl. MagLev vonat)
5. Mágneses tér érzékeny mérése
6. Klasszikus információtechnológia: RSFQ
7. Kvantuminformáció-technológia



Josephson-jelenség

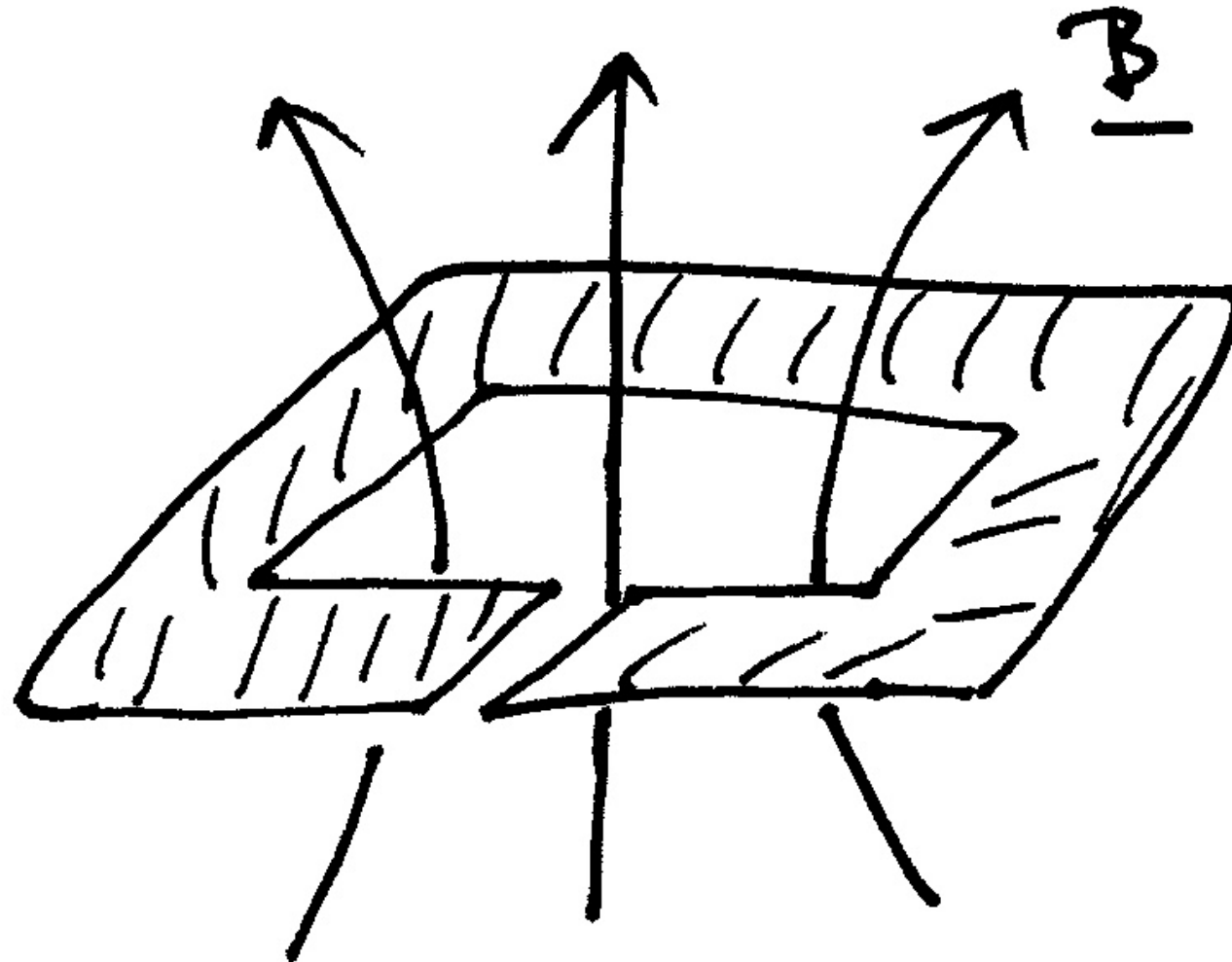


Josephson-jelenség I: megszakított gyűrű



Szupravezető-szigetelő-szupravezető szendvics = „Josephson-átmenet”

Josephson-jelenség I: megszakított gyűrű



Szupravezető-szigetelő-szupravezető szendvics = „Josephson-átmenet”

Josephson-jelenség I: megszakított gyűrű

(perzisztens, nem csillapodó) elektromos áram I

mágneses tér $\mathbf{B}$
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 I: megszakított gyűrű

(perzisztens, nem csillapodó) elektromos áram I

mágneses tér B

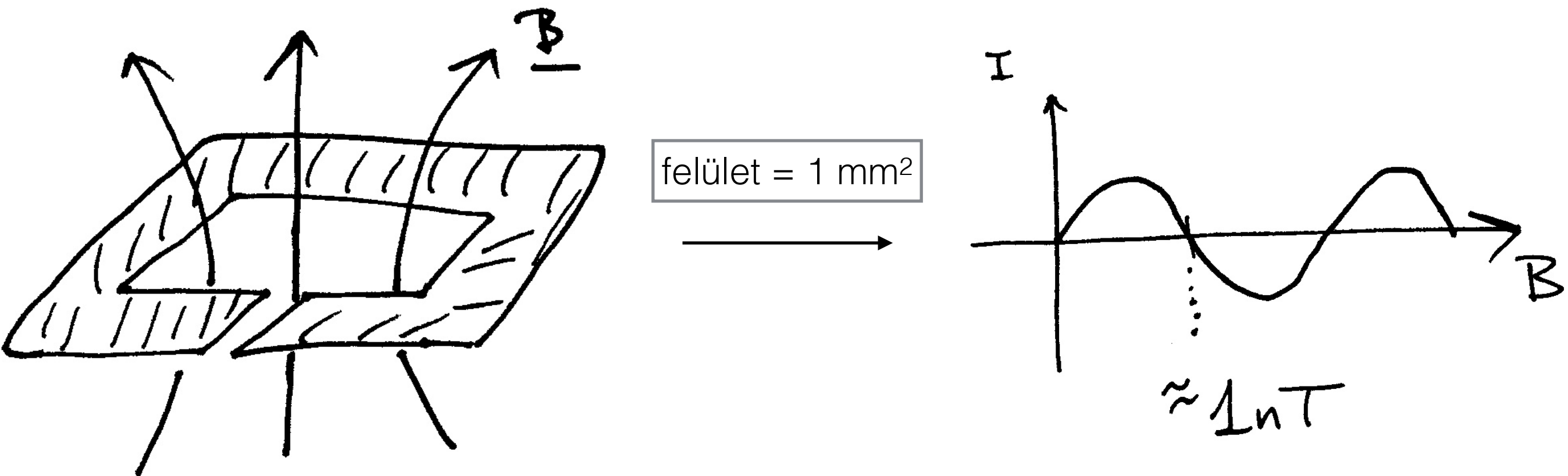
mágneses fluxus $\Phi = \int d\mathbf{F} \cdot \mathbf{B}(\mathbf{r})$

INSULATOR

SUPERCONDUCTOR

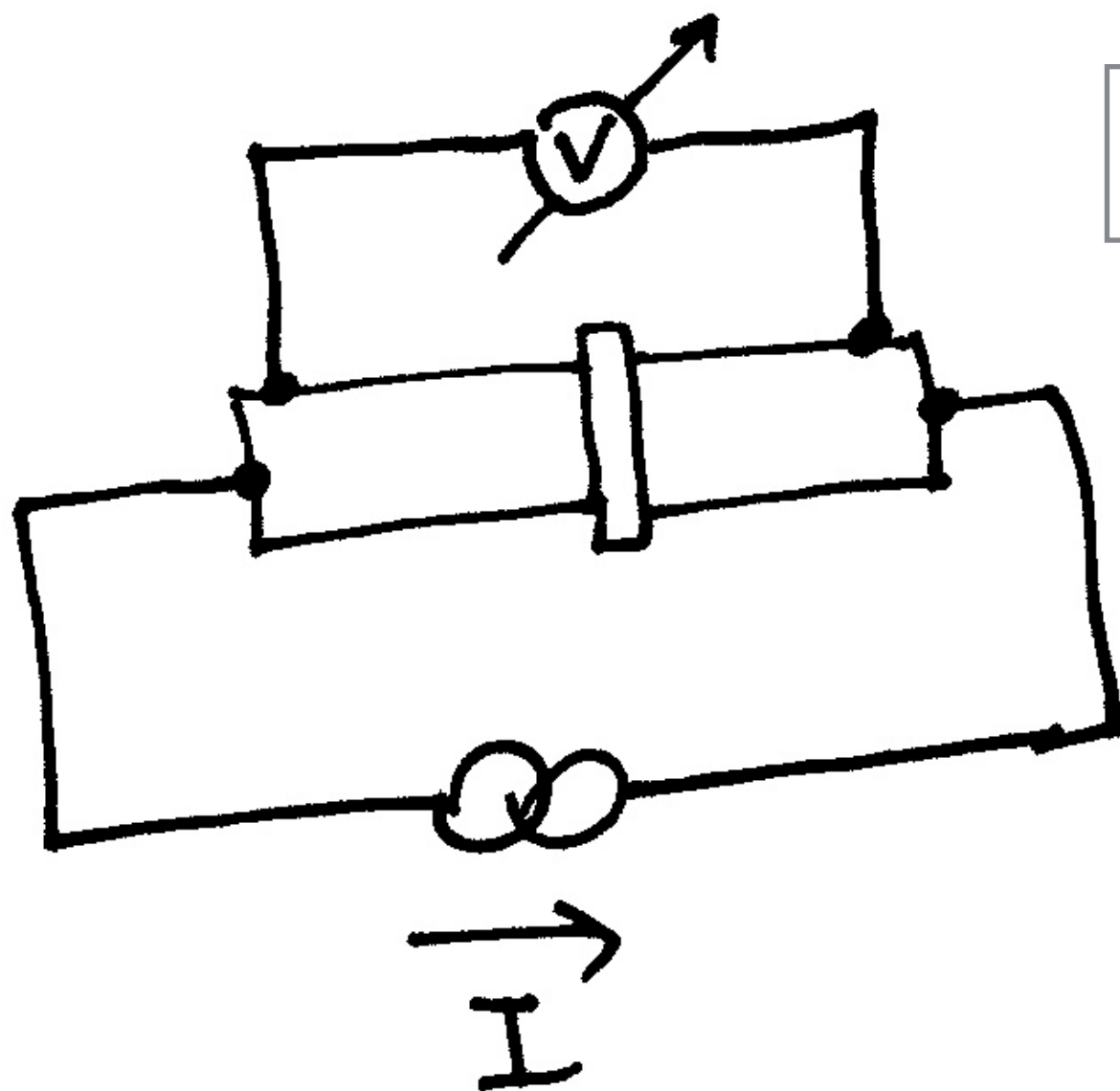
A Föld mágneses tere kb. 0.5 Gauss = 0.05 mT.
Ez egy 1 mm² területű hurokban kb. 25000 fluxuskvantumot jelent.

Josephson-jelenség I: megszakított gyűrű

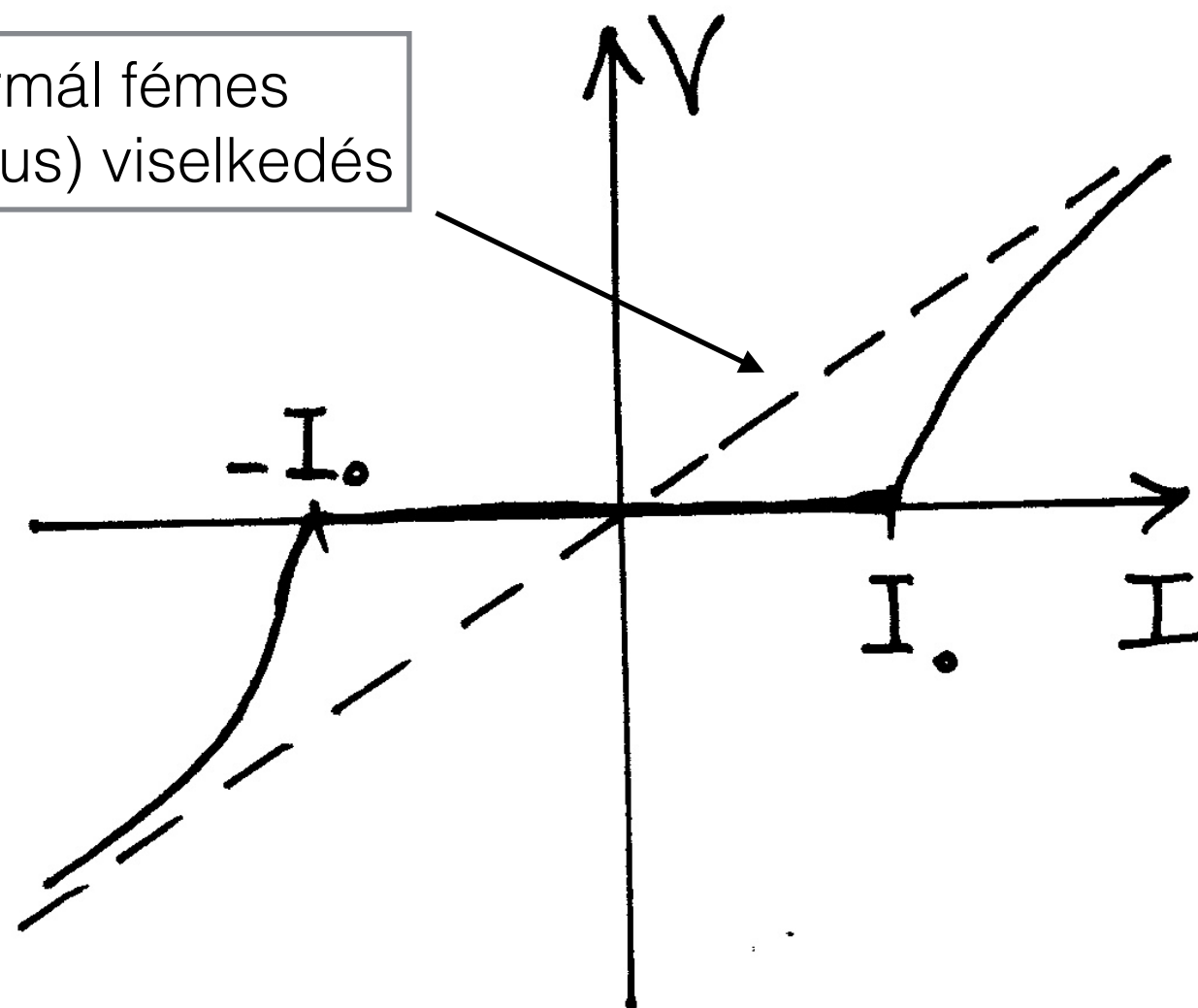


A Josephson-jelenség alkalmazható nagyon gyenge mágneses terek mérésére.

Josephson-jelenség II: alagútátmenet árammal hajtva

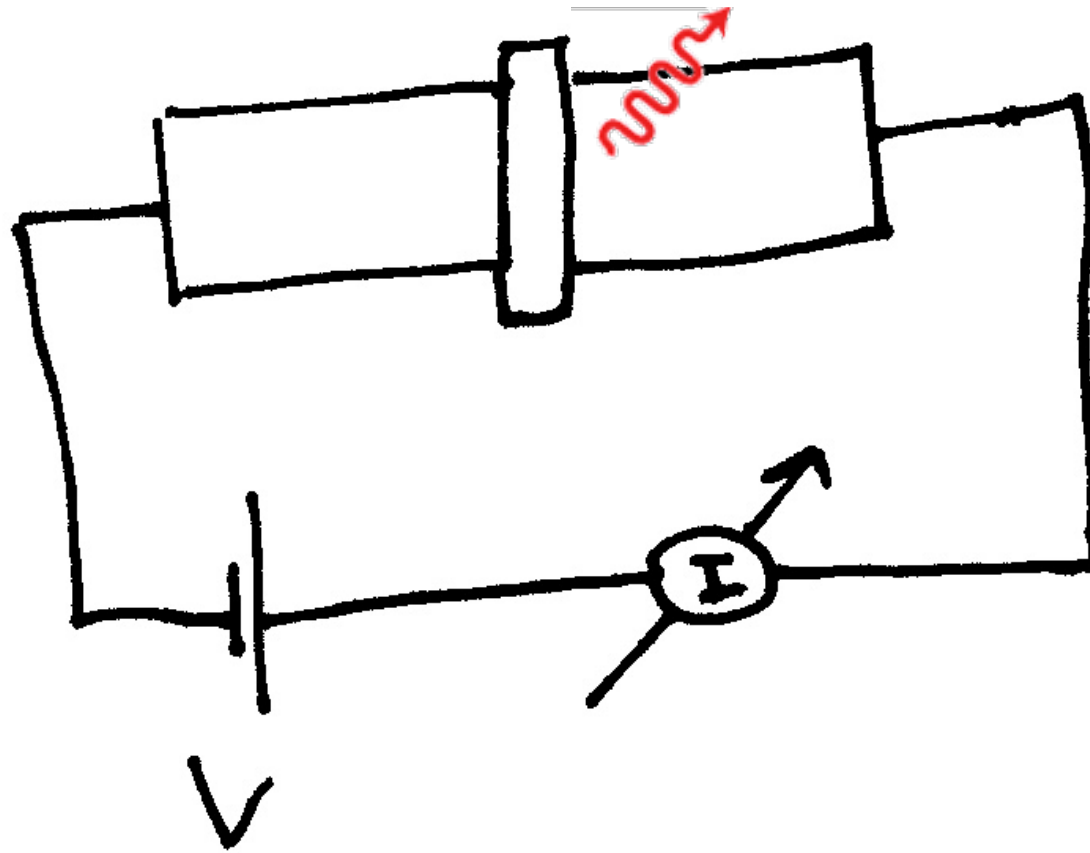


Normál fémes
(Ohmikus) viselkedés



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: $I = I(t) = I_0 \sin\left(\frac{2eV}{\hbar}t\right)$

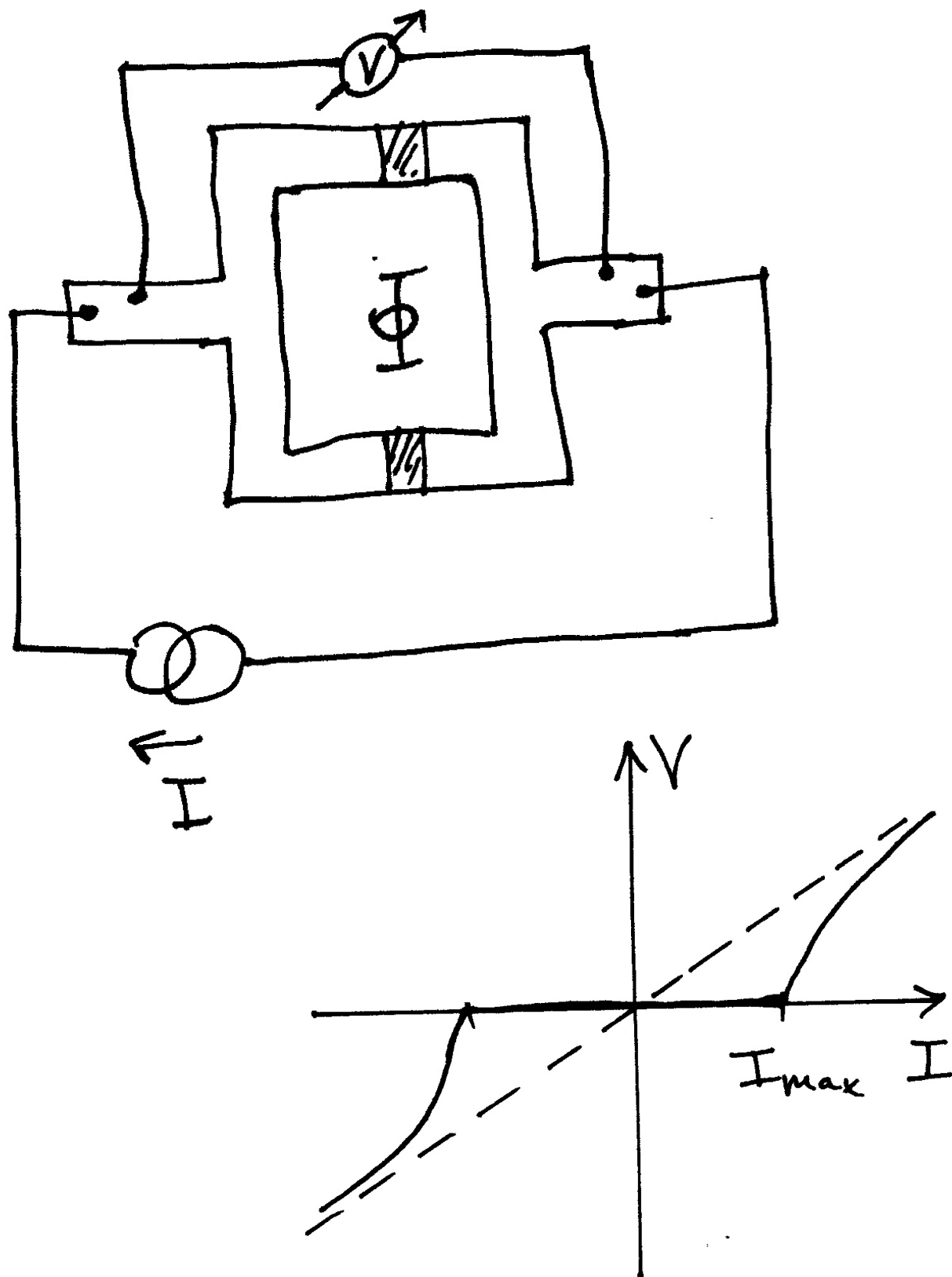
I_0 ugyanaz, mint a Josephson-jelenség I. és II. esetében.

Feladat

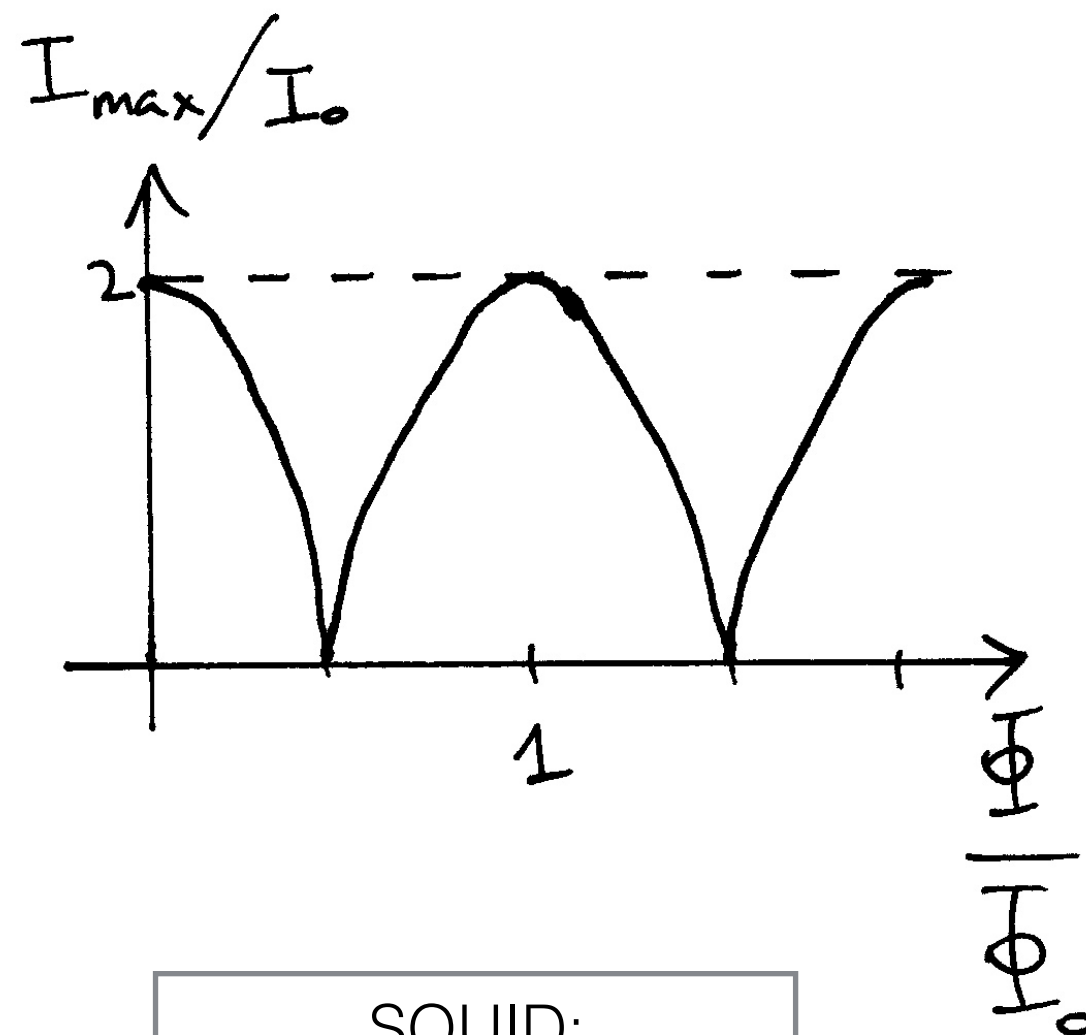
Milyen frekvenciájú váltóáramot hoz létre egy 1 millivolttal hajtott Josephson-átmenet?
(Válasz: kb. 500 GHz)

Josephson-jelenség IV: SQUID

SQUID = Superconducting QUantum Interference Device



$$I_{\max} = 2I_0 |\cos(e\Phi/t)|$$



SQUID:
Mágneses téreret
elektromos jellé alakít

SQUID-ek orvosi alkalmazása

Magnetoencephalography

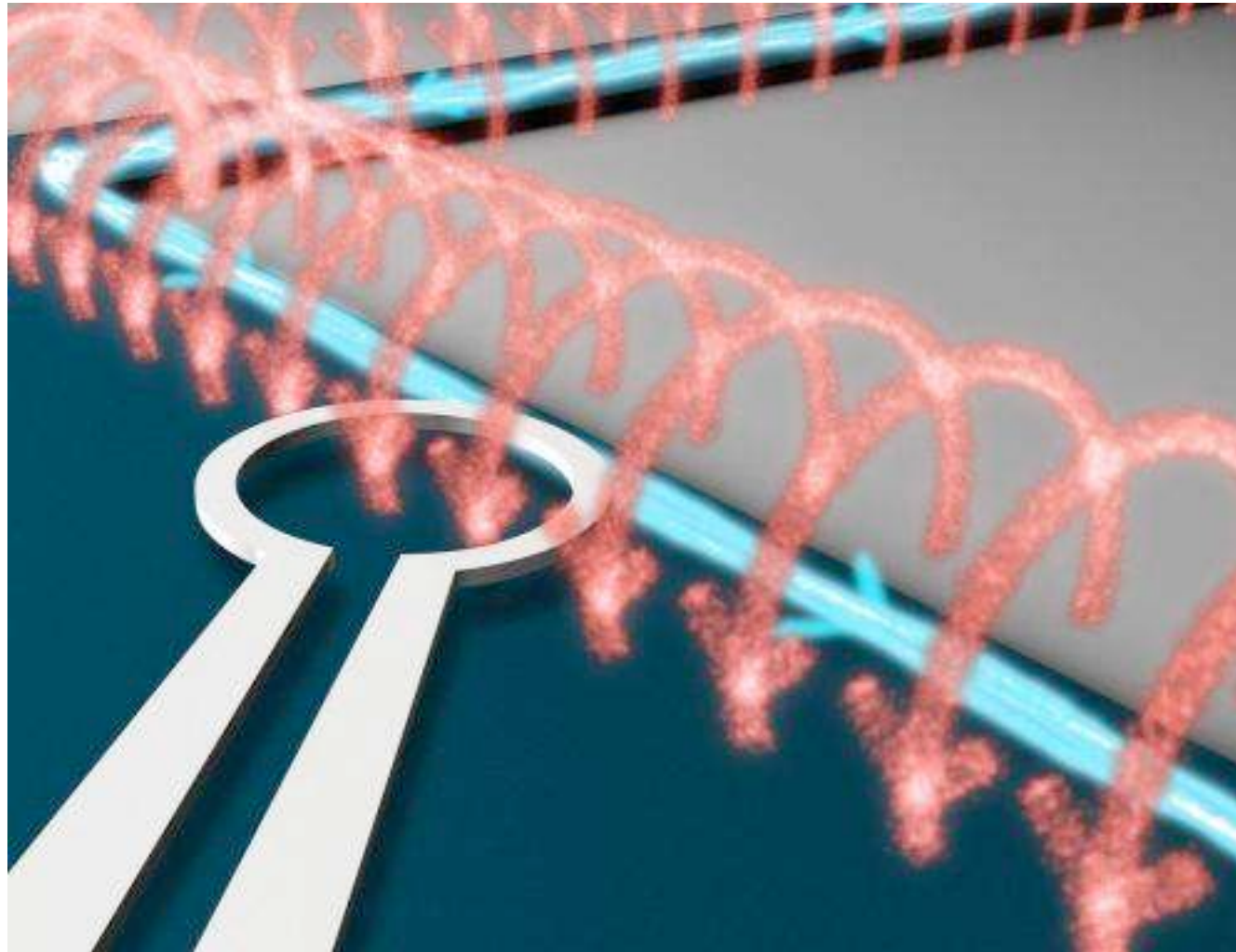
From Wikipedia, the free encyclopedia

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

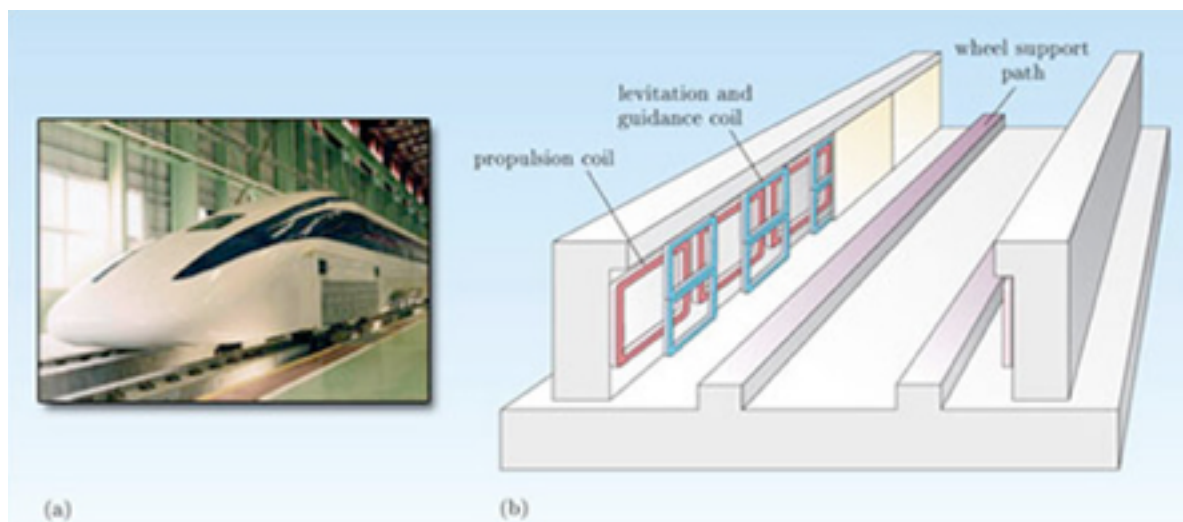
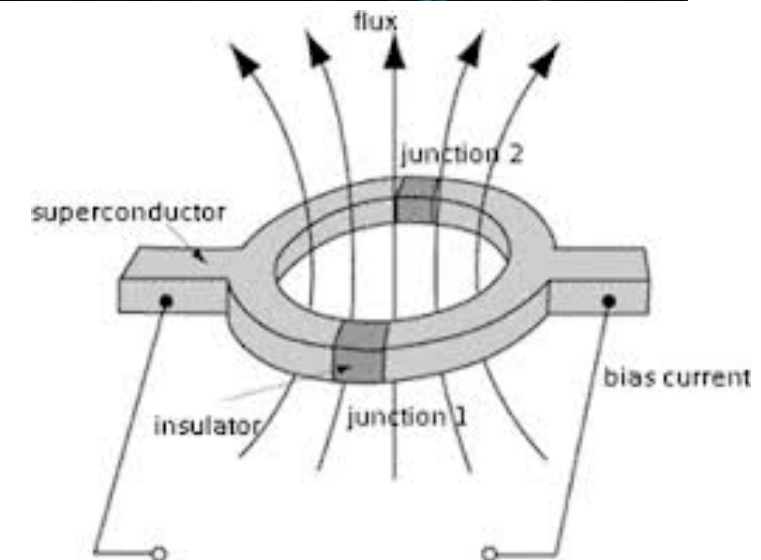
Pásztázó SQUID mikroszkóp



Képalkotás
nano- és mikroskálás mágneses mintázatokról
és áramsűrűségekről

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



Források

1. dr. Kovács Endre: Szilárdtestfizika
2. Wikipedia
3. Feynman Lectures, http://www.feynmanlectures.caltech.edu/III_21.html
4. <http://felvi.phy.bme.hu/index.php/Szupravezet%C3%A9s>
5. <https://www.open.edu/openlearn/ocw/mod/oucontent/view.php?id=2685&printable=1>