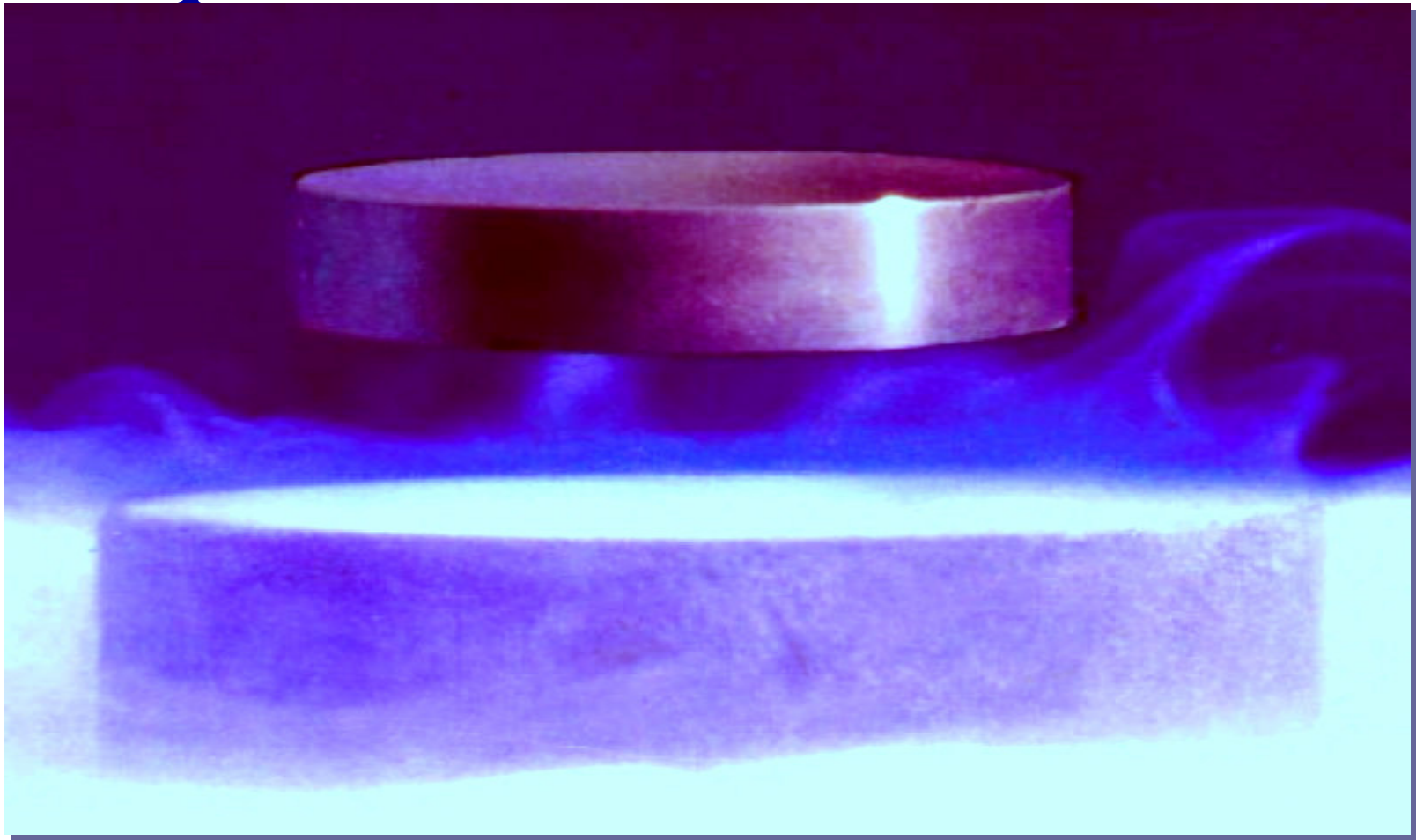

A szupravezetés elmélete és alkalmazásai

Előadás a „Fizikus napok” látogatói számára

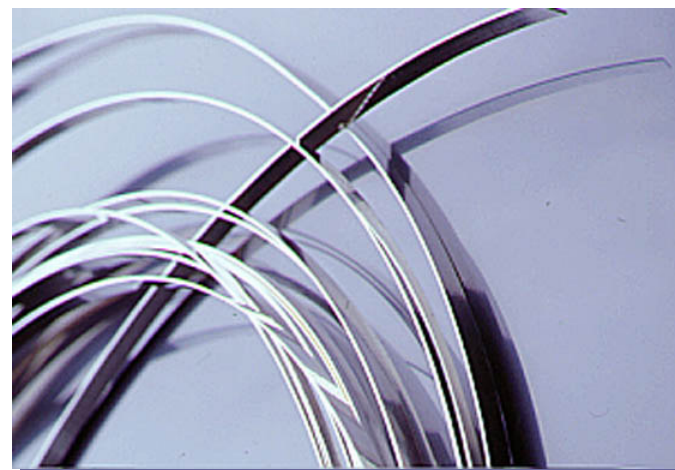
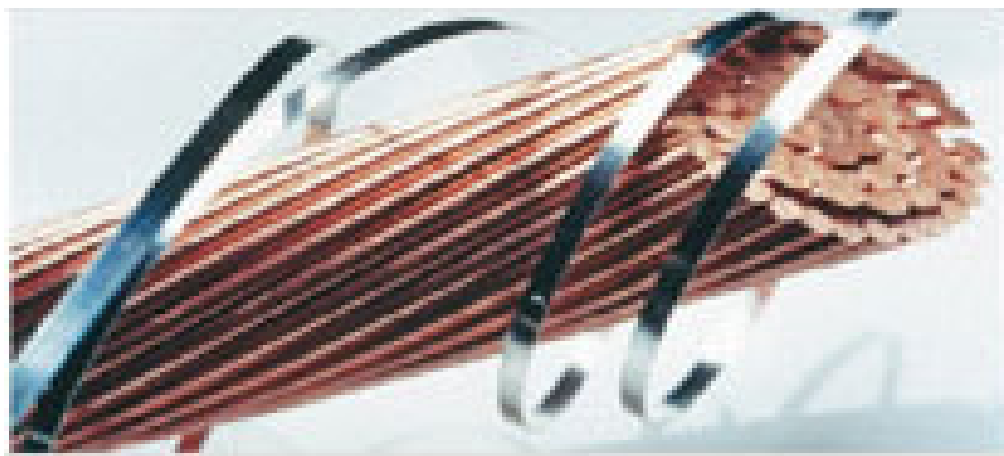
Dr Vajda István egyetemi tanár
Budapest Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Supertech Laboratórium
vajda@supertech.vgt.bme.hu

Szupravezetés

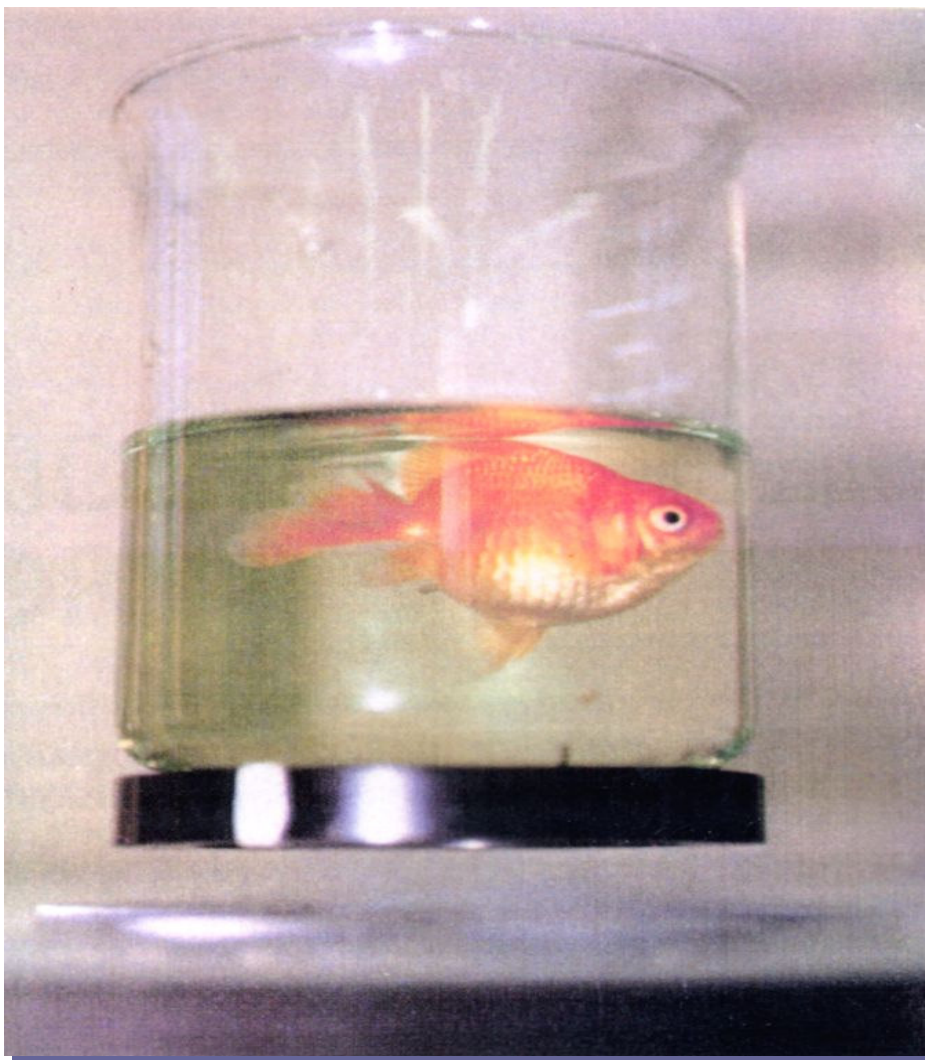


Mire jó a szupravezető?

Különleges vezető



Mire jó a szupravezető?



Különleges mágnes

Mire jó a szupravezető?

Különleges mágnes



Szupravezetés

Ma hozzuk létre a holnapot!

High Temperature Superconducting Underground Power Transmission Cables
High Temperature Superconducting Underground Power Transmission Cables will carry electricity from the utility station to transformer substations. Since the cables are composed of superconducting wire there is no resistance and very little loss of electricity. This transmission cable can carry 10 times the amount of conventional power cables. This capacity will be of great value in places where new rights-of-way are restricted.

Superconducting Magnetic Levitating Train
(MAGLEV) can reach speeds of over 500 mph. This method of transportation could be used to connect cities which are from 200 to 500 miles apart, relieving congested highways and airports. The superconducting magnetic coils on-board the train and on the sides of the guideway provide levitation, keep the vehicle in the center of the guideway and propel the MAGLEV along the track.

High Temperature Superconductors
(HTS) are perfect carriers of electricity. When strung together, these cables of multi filamentary wires are strong, flexible, durable and capable of carrying 10 times more electrical current than wires made of copper.

High Temperature Superconducting Transformers
After utilities and industry is highly efficient, light weight, compact and economically friendly alternative to today's oil-filled transformers.

A Fault Current Limiter
(FCL) can protect power transmission, cable and operating equipment from surges of excess electricity caused by lightning strikes, short circuits and power fluctuations. The high temperature superconducting coils in the fault current limiter control the high current surge just long enough for the circuit breaker to open.

The 200 Horsepower Motor
uses high temperature superconducting rotor coils. The high temperature superconducting rotors are much smaller, lighter and more efficient when compared to a conventional motor. Utilities and industry will be able to lower their electricity costs by using these motors.

Magnetic Resonance Imaging
(MRI) is used in many hospitals to obtain pictures of human soft tissue and organs. The patient lies on a bed that slides into the MRI. The superconductive magnetic coils are an important portion of the whole body scanner. Since these coils are capable of producing very stable, large magnetic field strengths, they generate high quality images.

Generator Racetrack Coils
are made from the high temperature superconductor bismuth-strontium-calcium-copper oxide (BSCCO). The coils will be used in high efficiency, low cost generators for electric utilities.

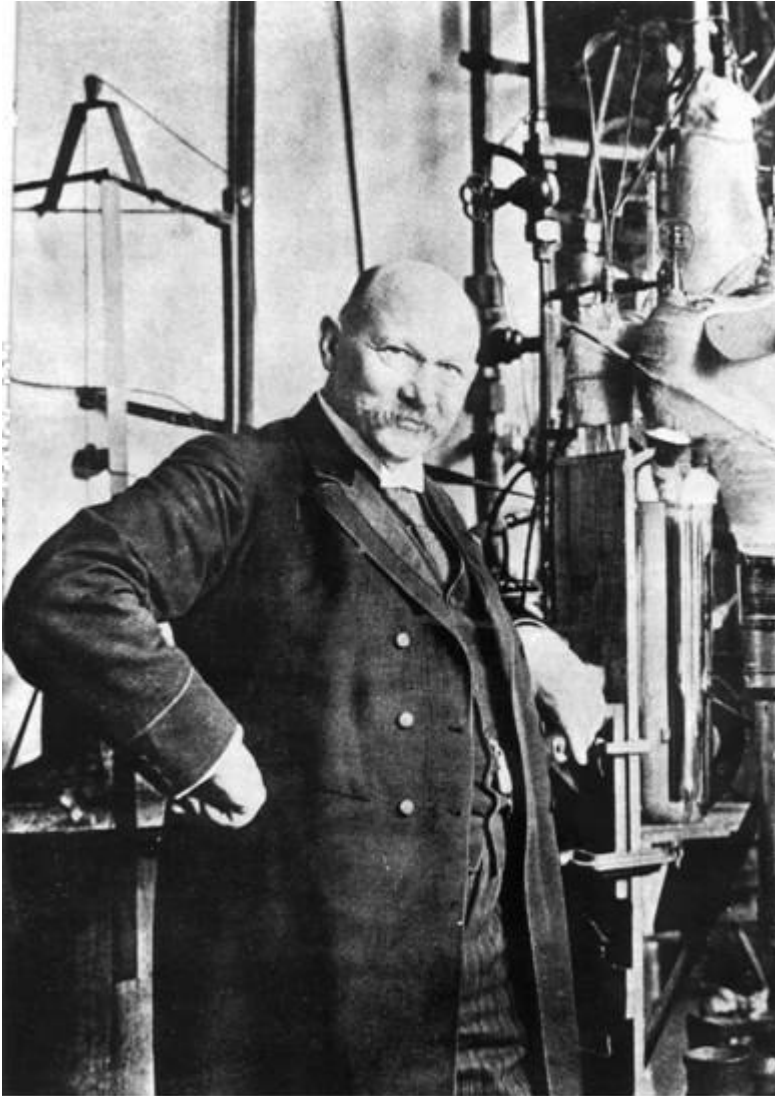
Large Current HTS Cable Coil

700 Horsepower Motor Cross Section

Superconductivity
CREATING THE FUTURE
TODAY

Sponsored by
The U.S. Department of Energy
Office of Energy Efficiency and Renewable Energy

2 A szupravezetés alapjai



1877 – folyékony oxigén

1898 – folyékony hidrogén

1908 – folyékony hélium

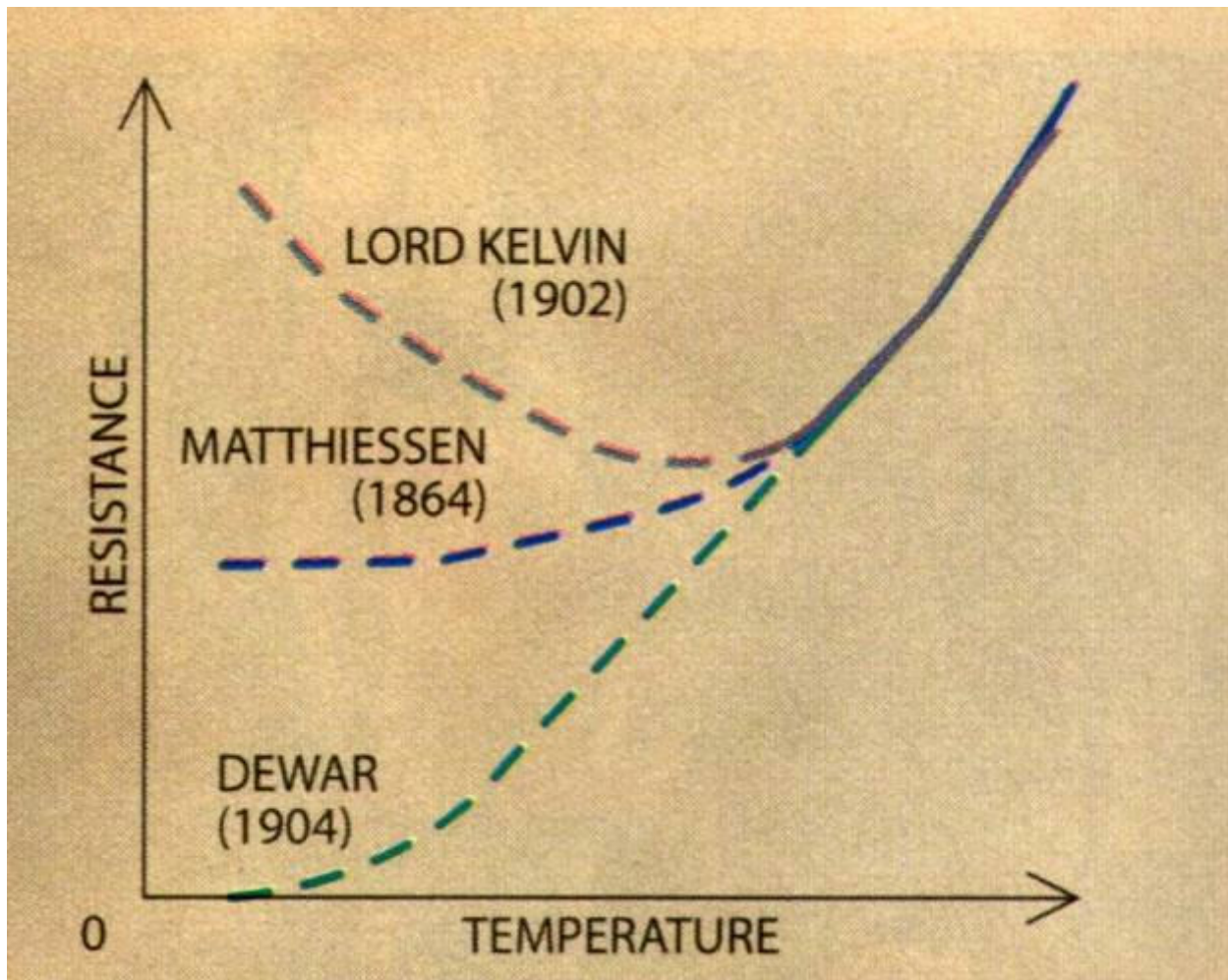
1911 – szupravezetés

1913 – Nobel Díj

Heike Kamerlingh Onnes

1853-1926

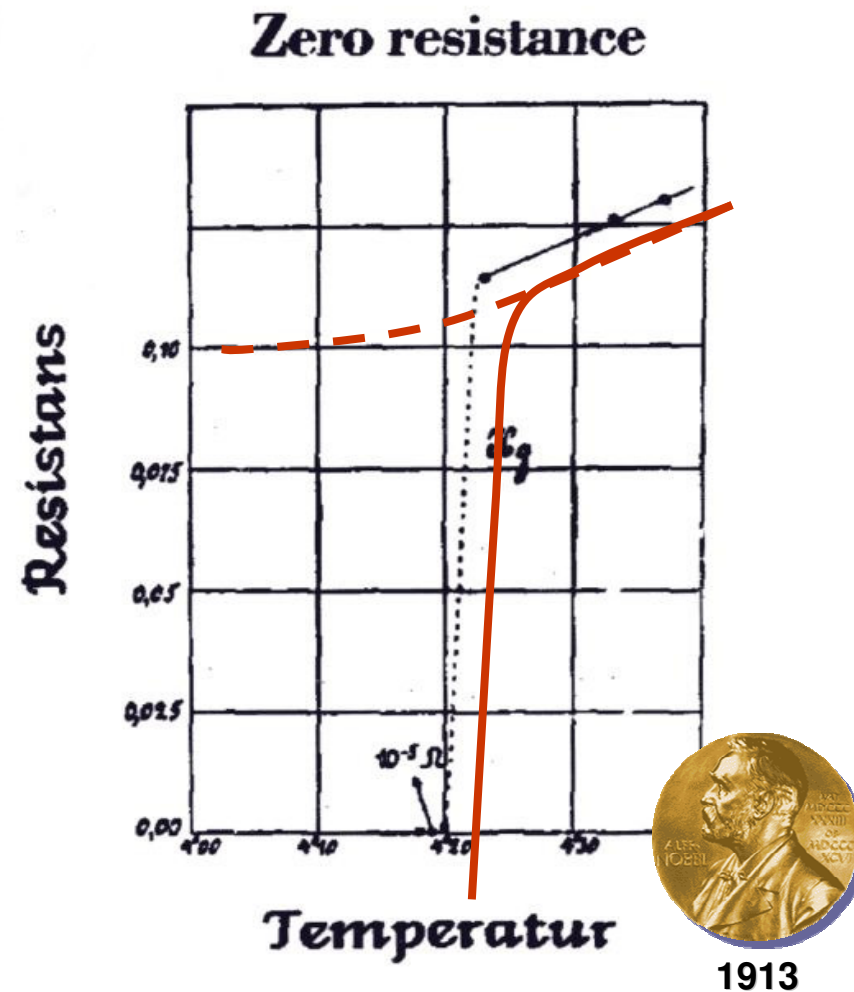
Elméletek a fémek ellenállásáról



A szupravezetés felfedezése



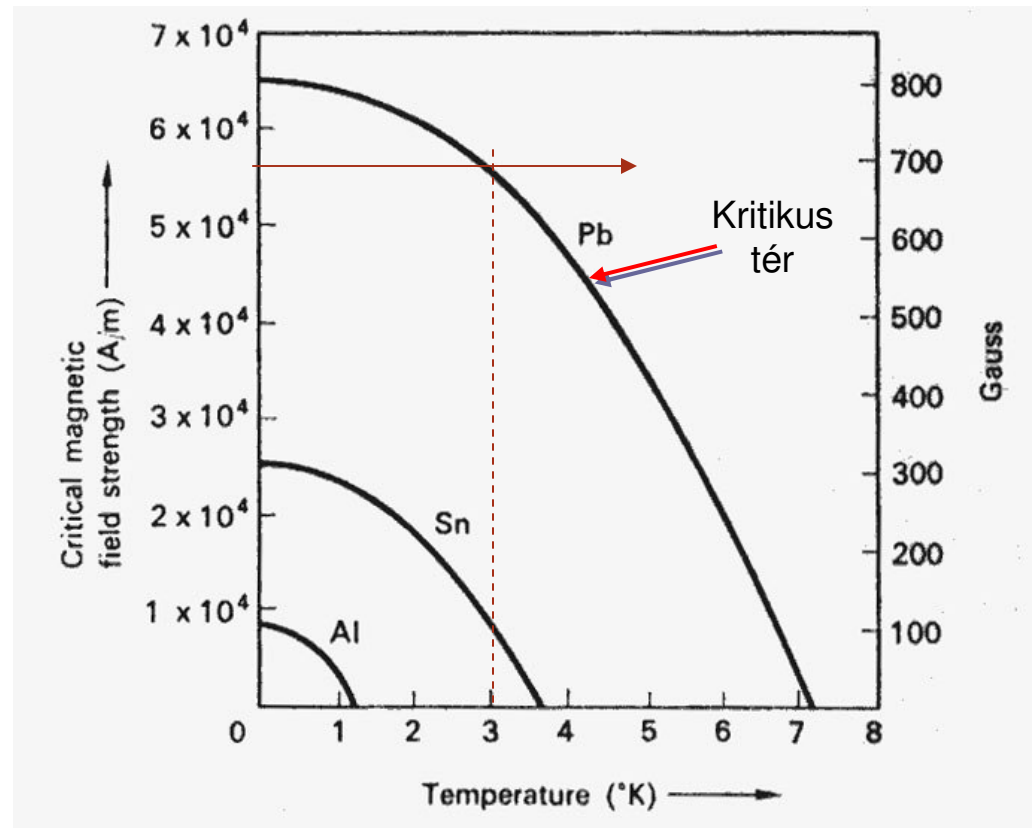
- **H. Kamerlingh Onnes** fedezte fel 1911-ben a LHe-n végzett első kísérletei során.
- „Tiszta” Hg-on végzett mérései feltárták, hogy az ellenállás 4.2K-en zérusra csökkent.
- 1912-ben megállapította, hogy a rezisztív állapot elég nagy mágneses terekben illetve nagy áramok esetén visszaáll.



Kritikus tér hőmérséklet-függése

A kísérleti tapasztalat:

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



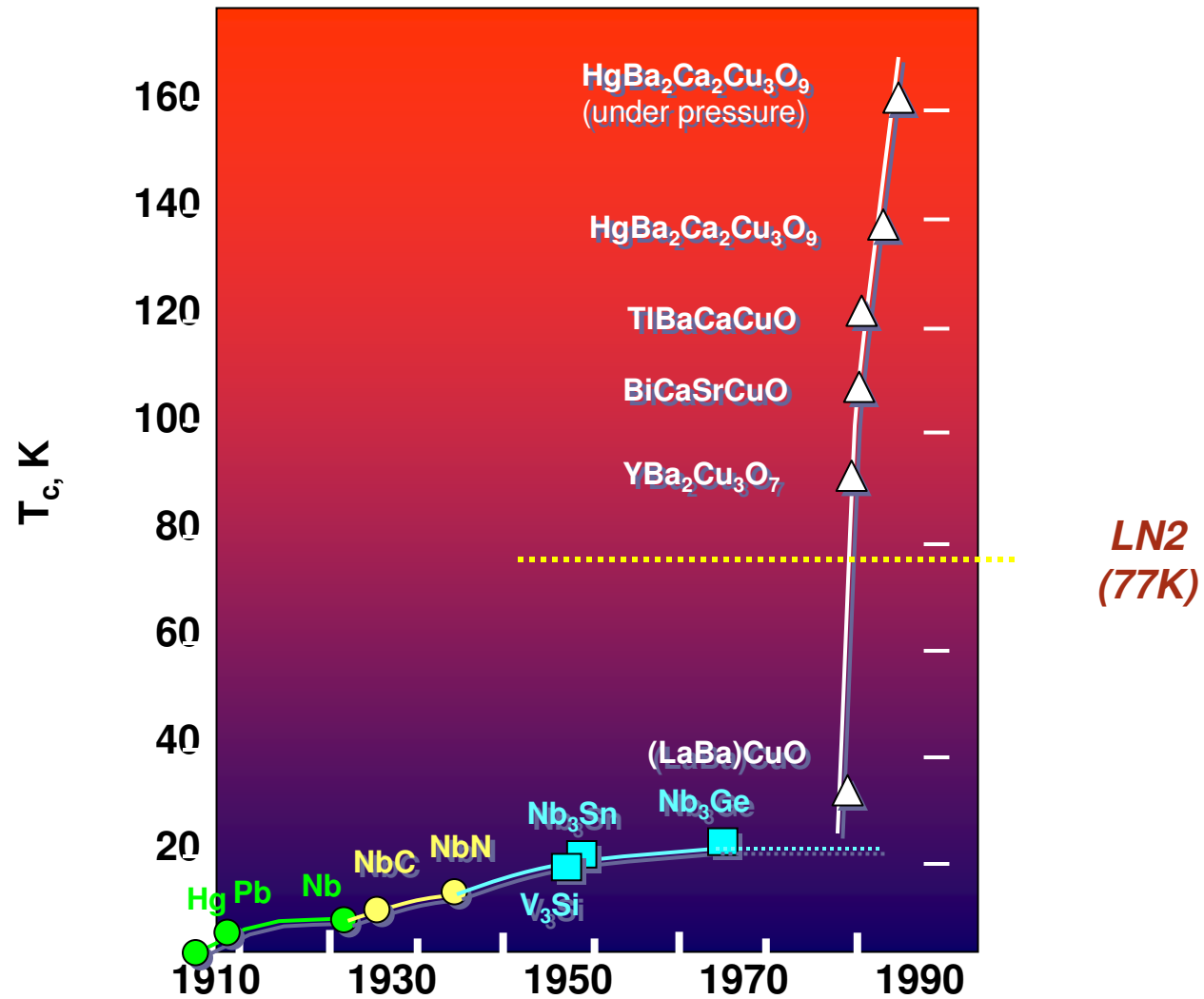
Szupravezető elemek

										T_c (K) $B_c @ T=0$ (mT)											
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne				
	0.026											Al	Si	P	S	Cl	Ar				
Na	Mg											1.14									
											10										
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr					
										0.875	1.091										
										5.3	5.1										
Rb	Sr	Y	Nb (Niobium) $T_c=9K$ $H_c=0.2T$			Fe (iron) $T_c=1K$ (at 20GPa)		Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe				
							0.03				0.56	3.4	3.72								
							5				3	29.3	30								
Cs	Ba	La	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn							
		6.0	1.4	0.655	0.14			4.153	2.39	7.19											
		110	20	16.5	1.9			41	17	80											

- T_c és B_c általában kis értékek.
- Legjobban vezető fémek általában nem-szupravezetők
- A mágneses 3d elemek nemszupravezetők

...legalábbis így gondoltuk 2001-ig

Szupravezetés ötvözetekben és oxidokban



Definíciók

Korábban:

“A folyamatos ellenállásmentes áramvezetés jelensége, melyet meghatározott fémekben és ötvözetekben észlelünk, ha az abszolút zérus hőmérséklet közelébe hűtjük.”

Ma:

“Az anyag elektron-állapota, melyet a zérus ellenállás, a tökéletes diamágnesség, valamint a hosszútávú kvantum-rendezettség jellemez.”

Valóban nincs ellenállása a szupravezetőnek?

Meghatározható-e a szupravezető ellenállásának felső korlátja?

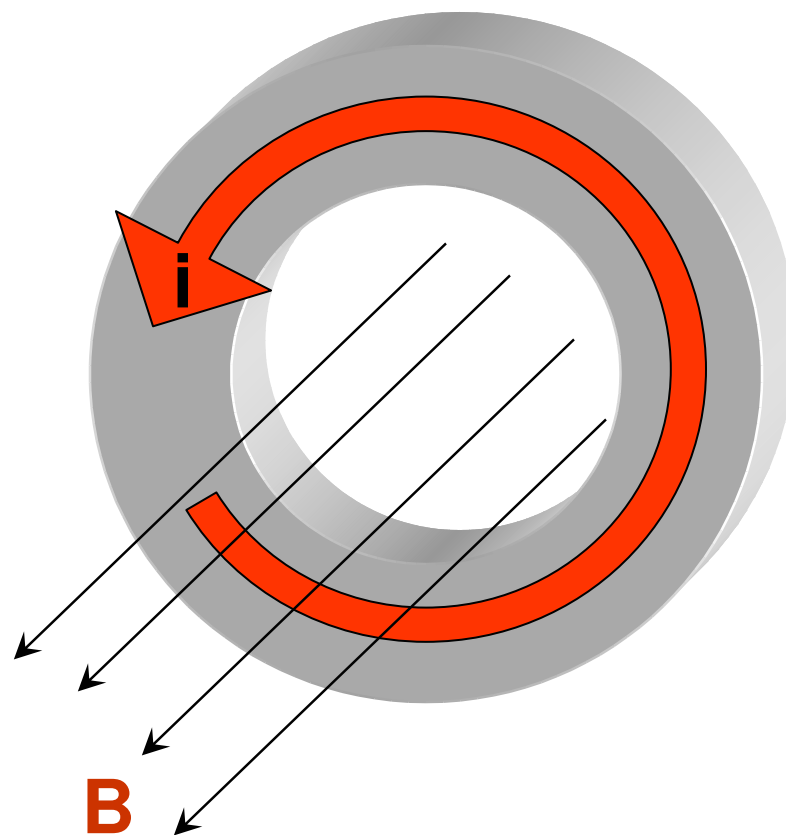
Ez például úgy lehetséges, hogy áramot hozunk létre egy zárt szupravezető gyűrűben.

Az áram által létesített mágneses tér időbeni változása mérhető.

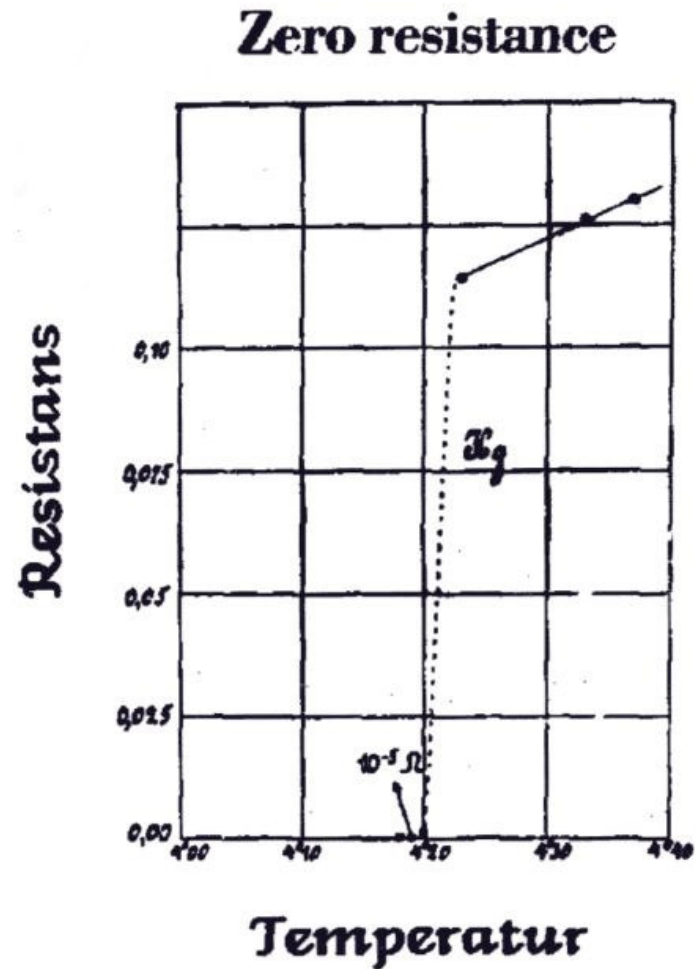
$$B(t) \propto i(t) = i(0)e^{-(R/L)t}$$

A több mint két évig tartó mérés azt mutatta, hogy

$$\rho_{sc} \leq 10^{-25} \Omega m \quad !!$$



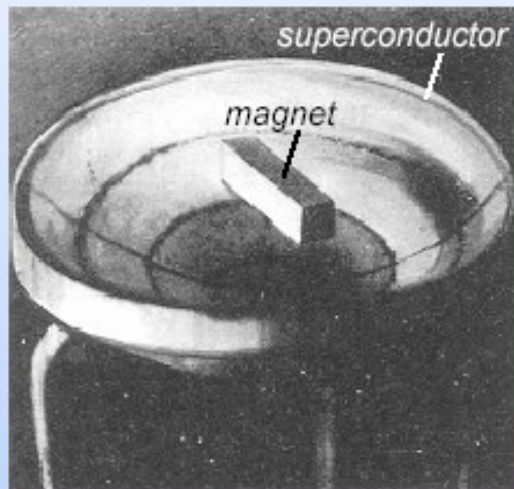
Szupravezető = Ideális villamos vezető



Szupravezető (I. Típus) = ideális diamágnes

1933: Walter Meissner and Robert Ochsenfeld (Berlin)

Meissner-effect: Superconductor expels magnetic flux (supercurrents)



superconducting Pb crucible at 4.2 K

Induced field compensates externally applied field

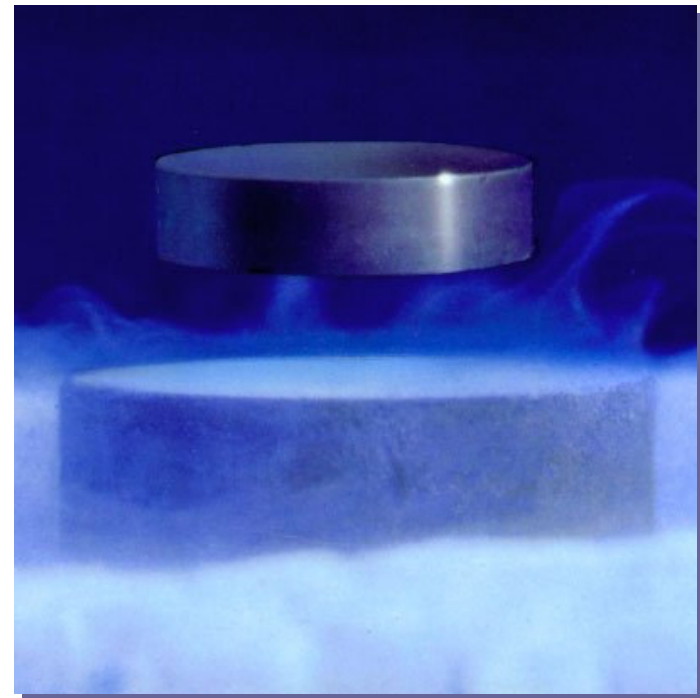
A Meissner-effektus

Az eddigiekben tárgyaltak “**ideális vezetőre**” és a “**szupravezetőre**” egyaránt vonatkoztak.

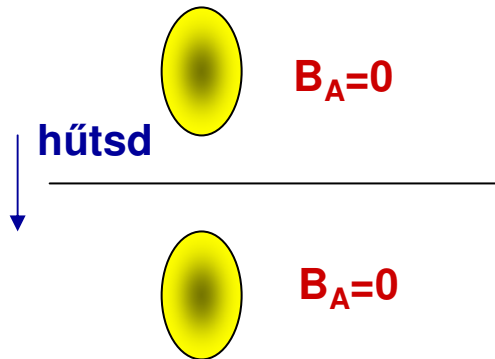
1933-ban Meissner és Oschenfeld olyan felfedezést tette, ami alapján feltárult és két vezetési állapot közötti különbség:

A Meissner Effektus

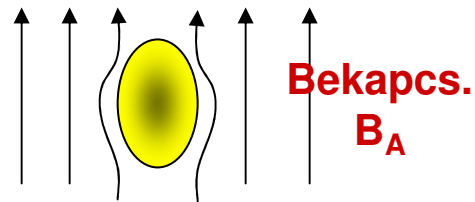
“A szupravezető a minta belsejéből az teljes fluxust kizorítja.”



“Tökéletes vezető” - zérus térben lehűtve.



Hűtsük a tökéletes vezetőt zérus mágneses térben T_c alá”



dB/dt értéke **zérus** egy ellenállásmentes szupravezető gyűrűben, amelyben ellenállásmentesen folyik az áram.



Ha B_A értékét zérusig csökkentem, akkor dB/dt is köteles zérus maradni, vagyis az árnyékoló áramok is zérusra csökkennek.

“Tökéletes vezető” - mágneses térben hűtve

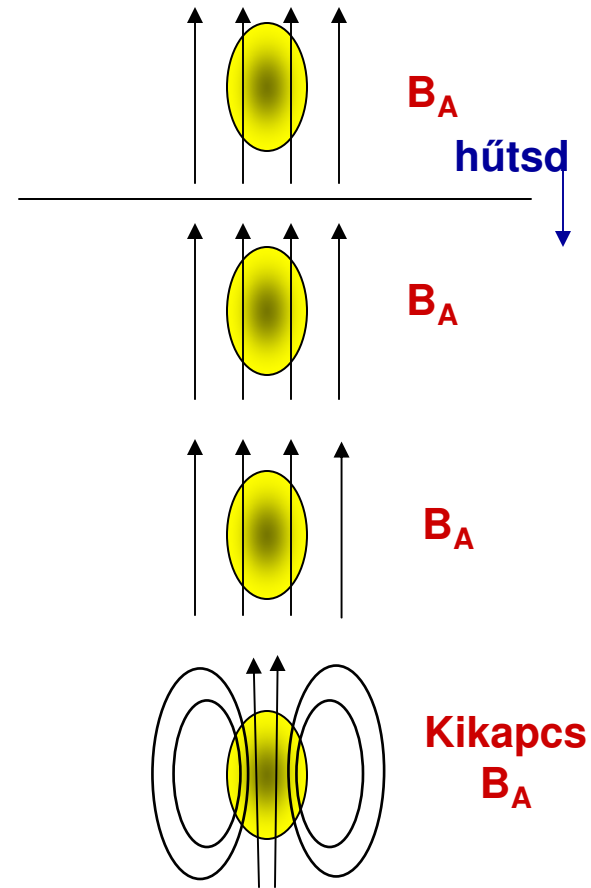
Kapcsoljunk B_A teret a tökéletes vezetőre szobahőmérsékleten.

Így hűtsük le a mintát “ T_c ” alá,

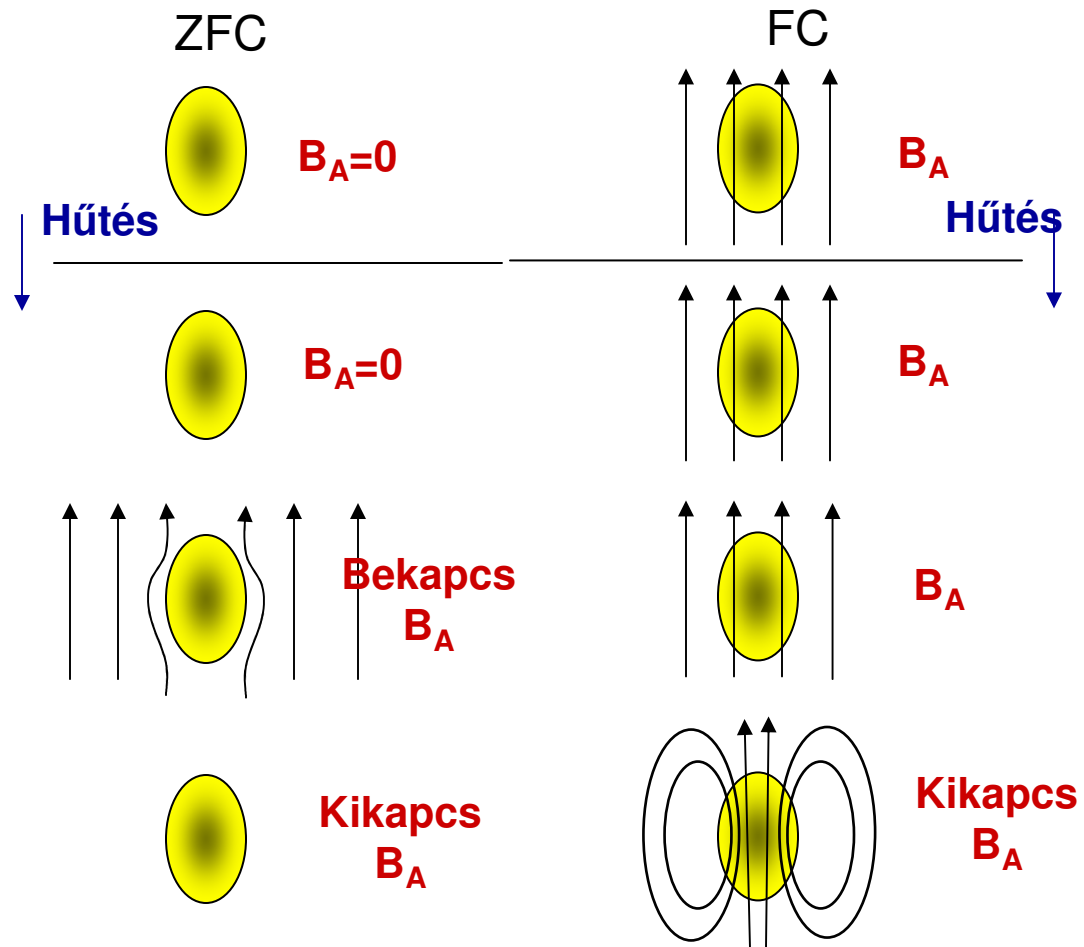
Nincs változás $dB/dt=0$ értékében a tökéletes vezető belsejében, és nem folynak árnyékoló áramok sem. B_A nem változik a mintában.

Ha B_A értékét zérusra csökkentjük, akkor árnyékoló áramok keletkeznek. $dB/dt=0$ fennmarad, így a szupravezető belsejében fennmarad az B_A tér.

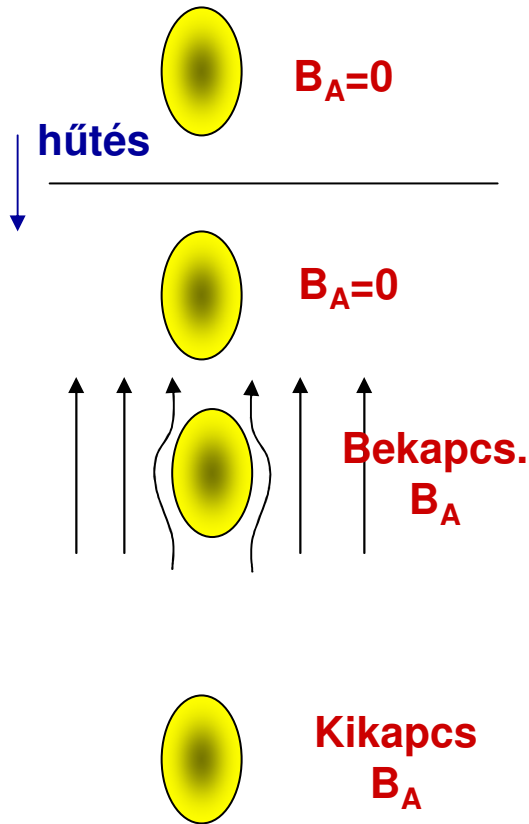
Az árnyékoló áramok fennmaradnak akkor is, ha külső tér zérusra van csökkentve: a minta **felmágneseződik!**



A "Tökéletes vezető"



Szupravezető- ZFC



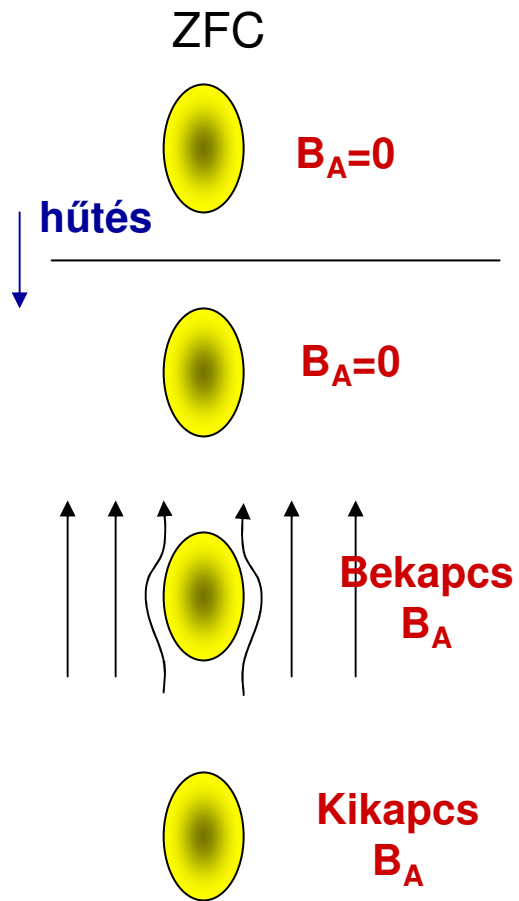
A szupravezető zérus mágneses térben van lehűtve T_c alá.

dB/dt értéke **zérus** egy zárt ellenállásmentes hurokban, így árnyékoló áramok indukálódnak, amelyek gerjesztése ellentétes és kompenzálja a külső mágneses tér gerjesztését, így a mintán belül a mágneses tér zérus értékét fenntartják.

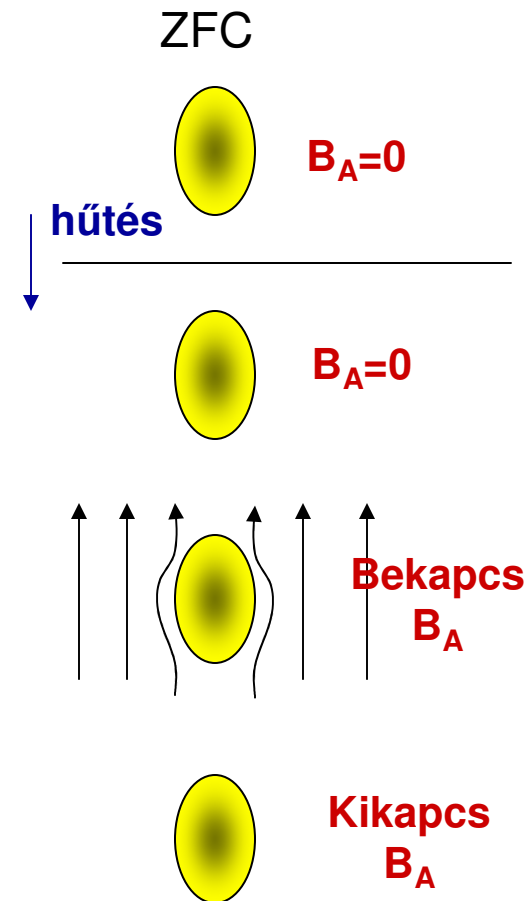
Ha B_A teret kikapcsoljuk, dB/dt továbbra is zérus kell maradjon, így az árnyékoló áramok is zérusra csökkennek.

Tökéletesen egyező viselkedés a tökéletes (ideális) vezetőével.

Szupravezető



Ideális vezető



Mágneses térben hűtött szupravezető

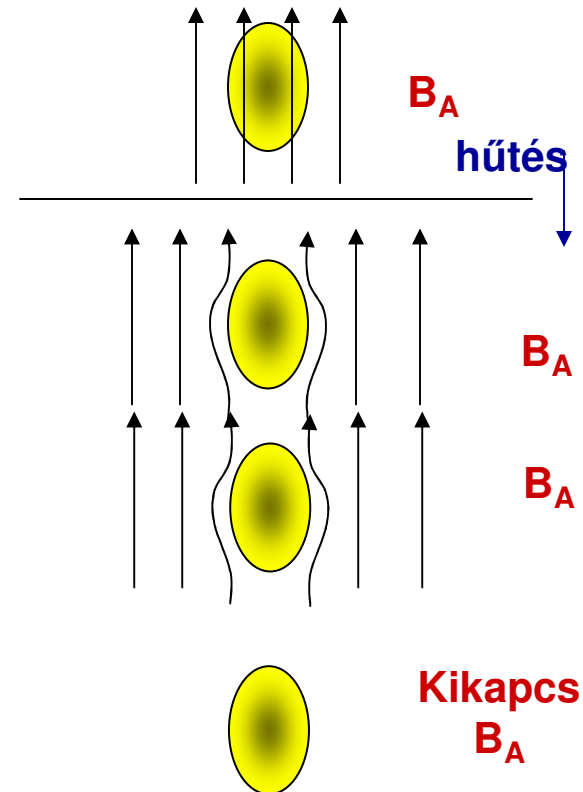
Kapcsoljuk a B_A mágneses teret szobahőmérsékleten a szupravezetőre (SzV normál állapotban).

Ezt követően hűtjük le a B_A térben a T_c hőmérséklet alá.

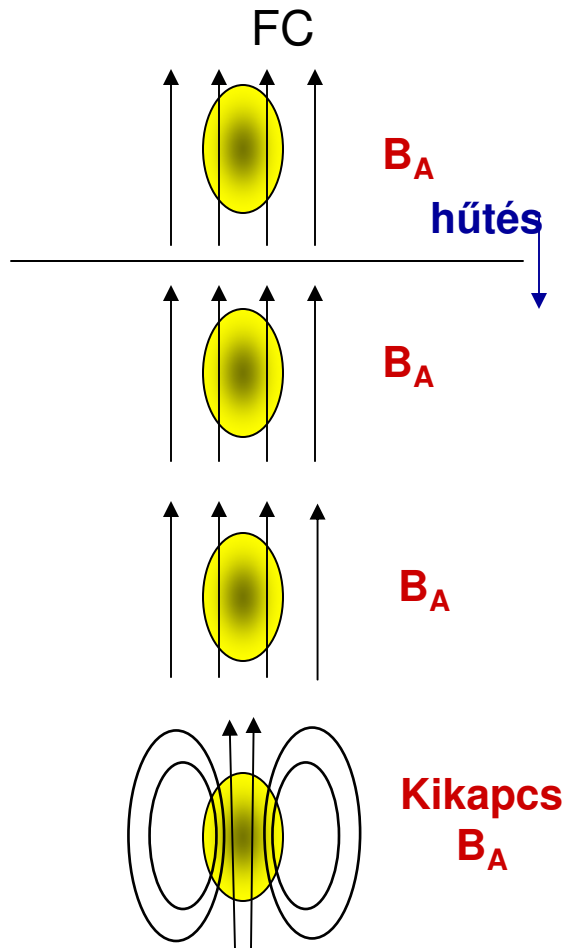
A mágneses fluxus spontán módon kiszorul a szupravezetőből, noha a mágneses tér értéke változatlan, és $dB/dt=0$. Tehát az árnyékoló áramok időben állandó térben is kialakulnak, és kompenzálják a külső mágneses teret a szupravezető minta belsejében.

Ha a külső teret zérusra csökkentjük, az árnyékoló áramok úgyszintén zérusra csökkennek, hogy a $dB/dt=0$ feltétel teljesüljön a szupravezető belsejében.

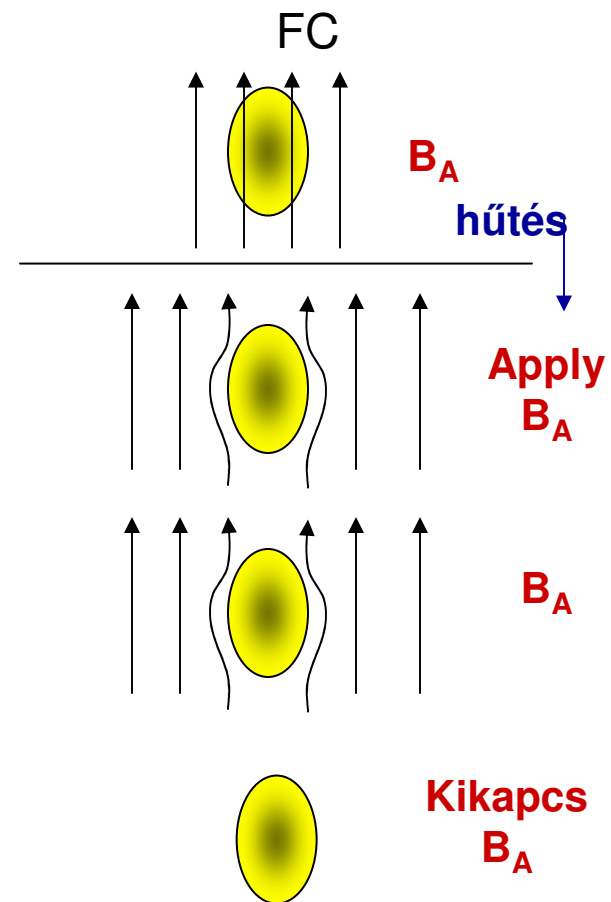
Ez a Meissner effektus: azt mutatja, hogy a szupravezető belsejében nemcsak $dB/dt=0$, hanem B maga köteles zérus lenni.



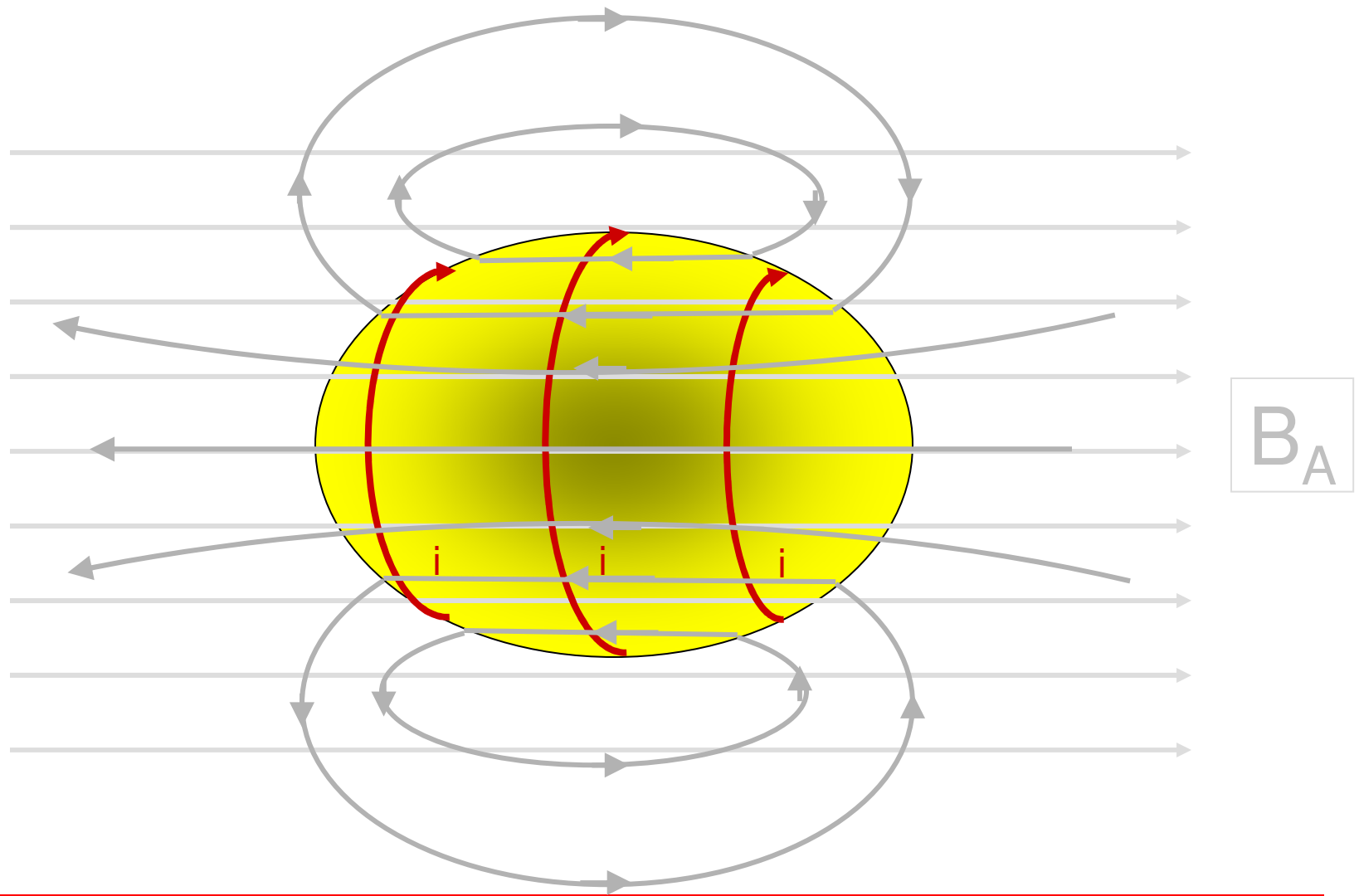
Ideális vezető



Szupravezető



Az árnyékoló áramok tömör anyagban



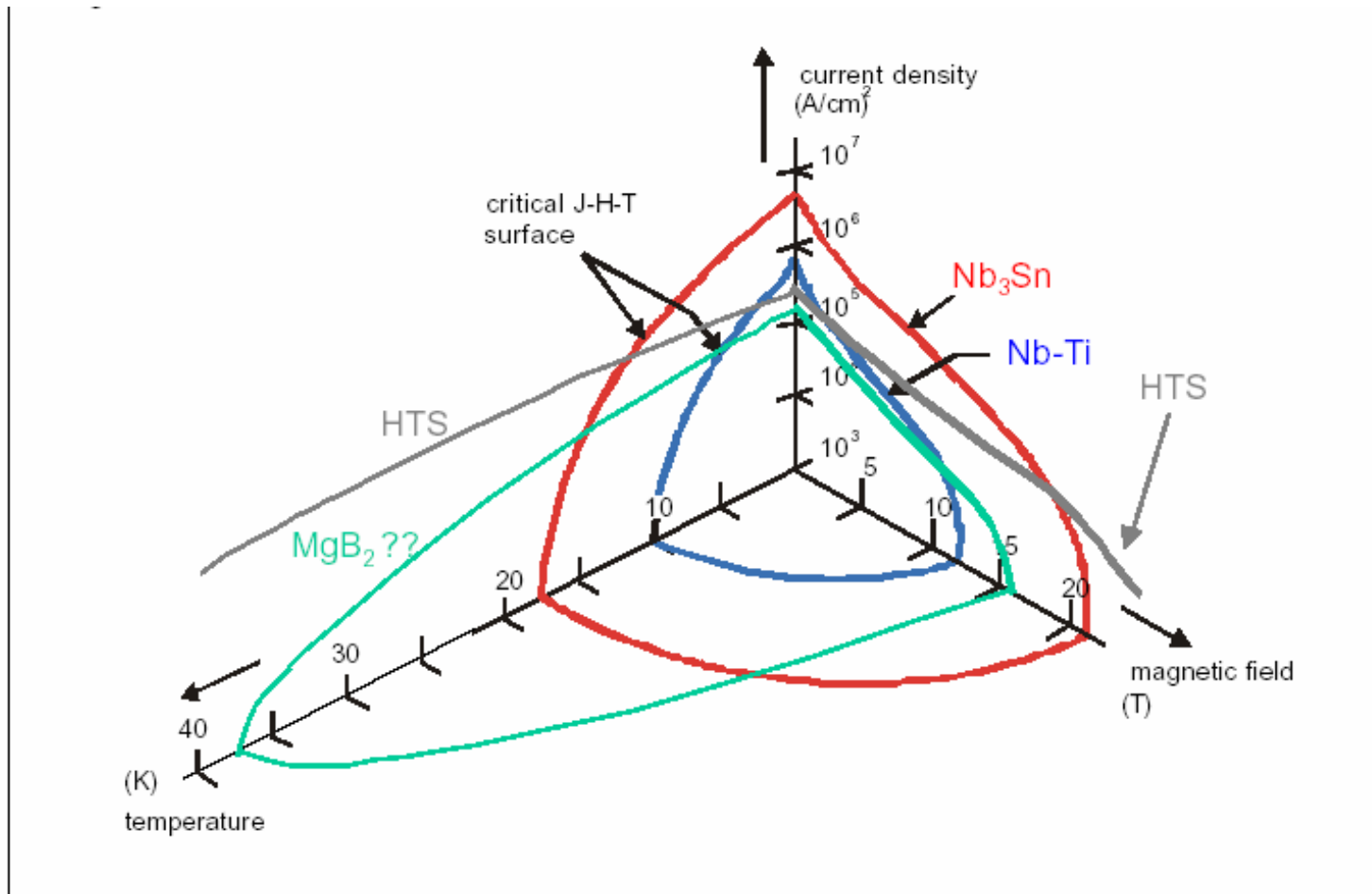
Szupravezetők osztályozása #1

AHS	KHS	MHS	SzHS
Fémes Példák: NbTi, Nb ₃ Sn	Fémes Példa: MgB ₂	Kerámia Példák: YBCO, BSCCO	???
$T_{c, \max} = 23,2 \text{ K}$	$T_{c, \max} = 39 \text{ K}$	$T_{c, \max} = 138 \text{ K}$	Nincs elméleti korlát (USO)
Elméleti: < 30 K Gyakorlati $T_{c, \text{határ}} < 77 \text{ K}$	$T_c \approx 40 \text{ K}$	Elméleti: > 30 K Gyakorlati $T_{c, \text{határ}} > 77 \text{ K}$	Hűtés nélkül (?)

Szupravezetők osztályozása #2

Típus	Állapot	Feltétel	Megjegyzés
I. típus	Meissner állapot	$B < B_c$	London-féle behatolási mélység
	Normál állapot	$B_c < B$	
II. Típus	Meissner állapot	$B < B_{c1}$	Ideális: pinning-mentes Nemideális: pinningelt
	Kevert állapot	$B_{c1} < B < B_{c2}$	
	Normál állapot	$B_{c2} < B$	

II. Típusú szupravezetők kritikus felülete



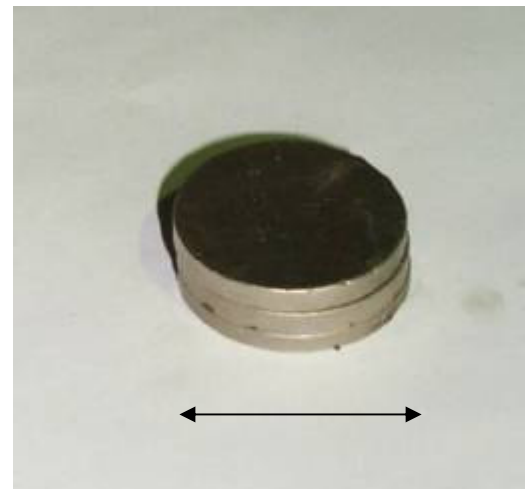
Lebegtetési kísérletek

Az alkalmazott szupravezetők és állandó mágnesek



25,4 mm

YBCO lebegtető



36 mm

NdFeB állandó mágnes

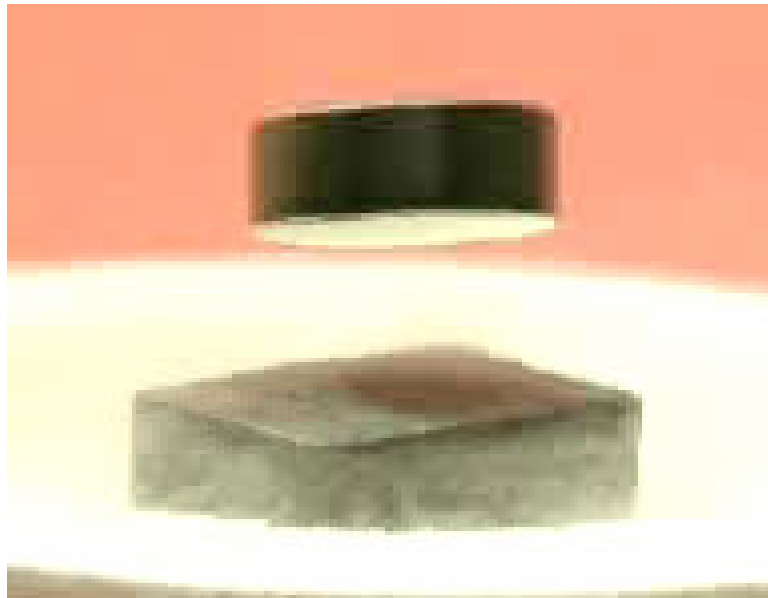
Lebegtetési kísérlet #1

- **ZFC = Zero Field Cooled** (mágneses tér mentes hűtés)
- **ZFC \Rightarrow lebegtetés**



Lebegtetési kísérlet #2

- **Stabil pozíció keresése**



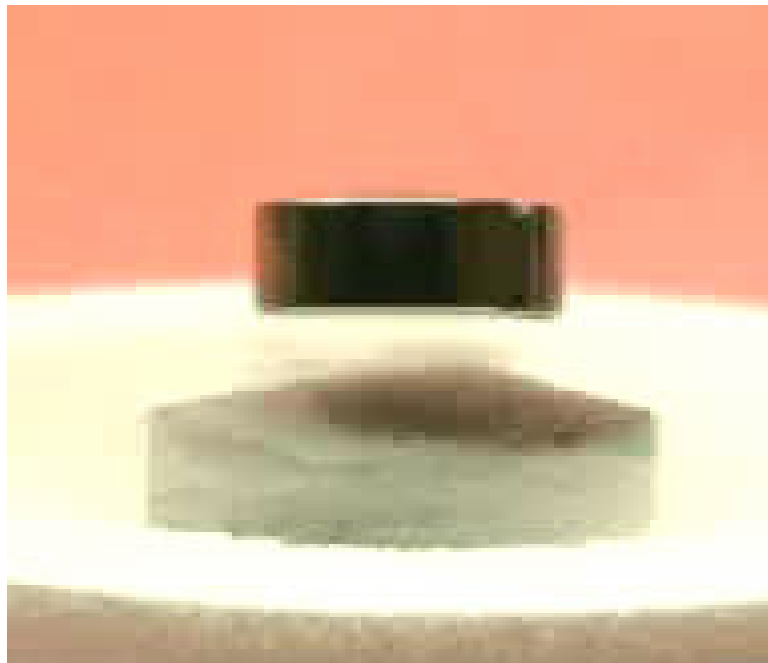
Lebegtetési kísérlet #3

- **FC = Field Cooled** (hűtés mágneses térben)
- **FC \Rightarrow felfüggesztés, a fluxus befagyasztása**



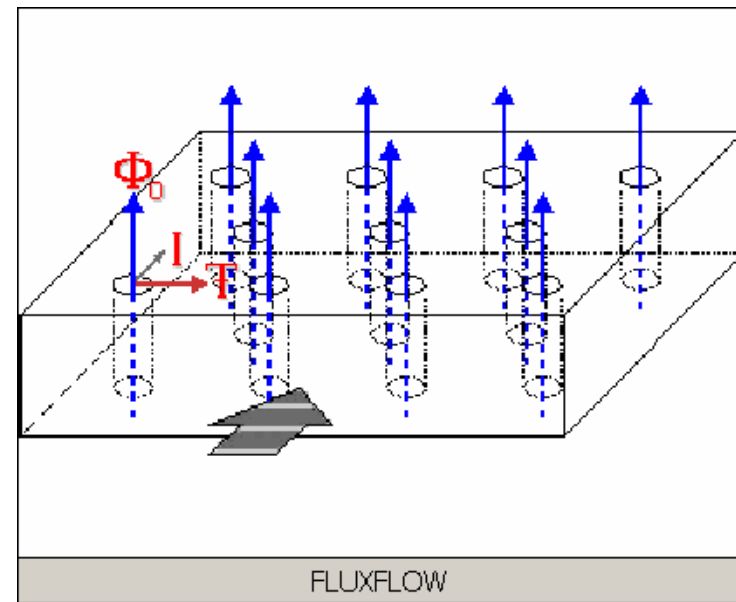
Lebegtetési kísérlet #4

- Felmelegedés (S→N átmenet folyamata)



Ideális II. típusú szupravezető

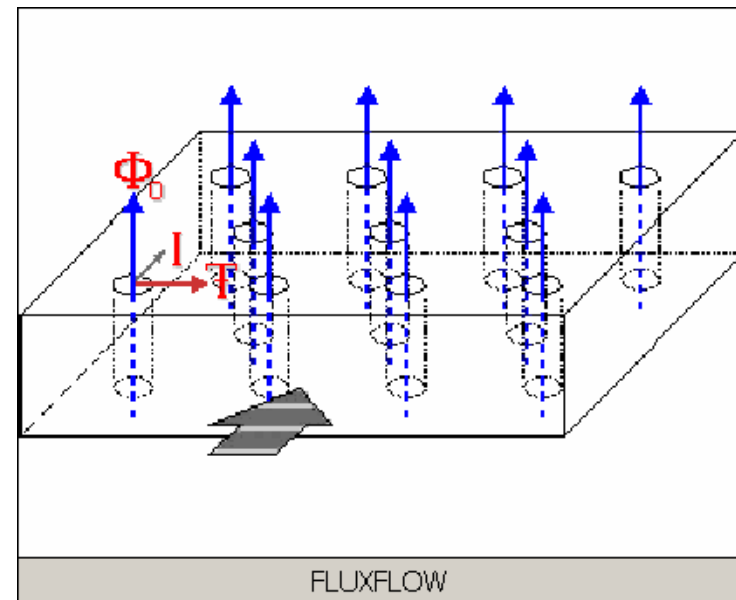
Ideális, szennyeződésektől és rácshibáktól mentes homogén anyagi minőségű (ideális) II. típusú szupravezetőben az örvényrács szabadon mozoghat.



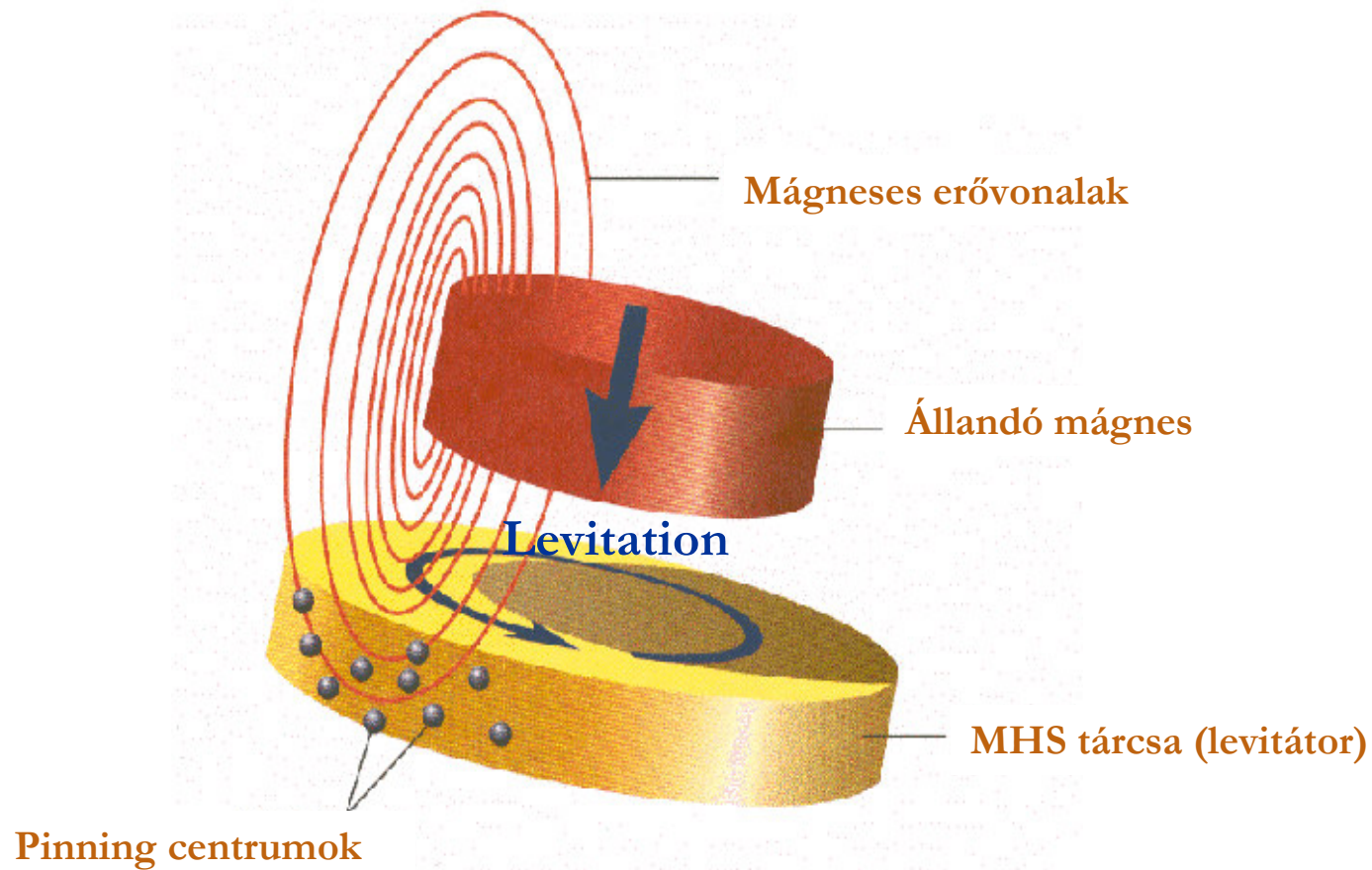
A fluxus-kvantum

A mágneses tér a szupravezetőbe ún. fluxus-örvények (fluxus-szálak, örvények) formájában hatol be.

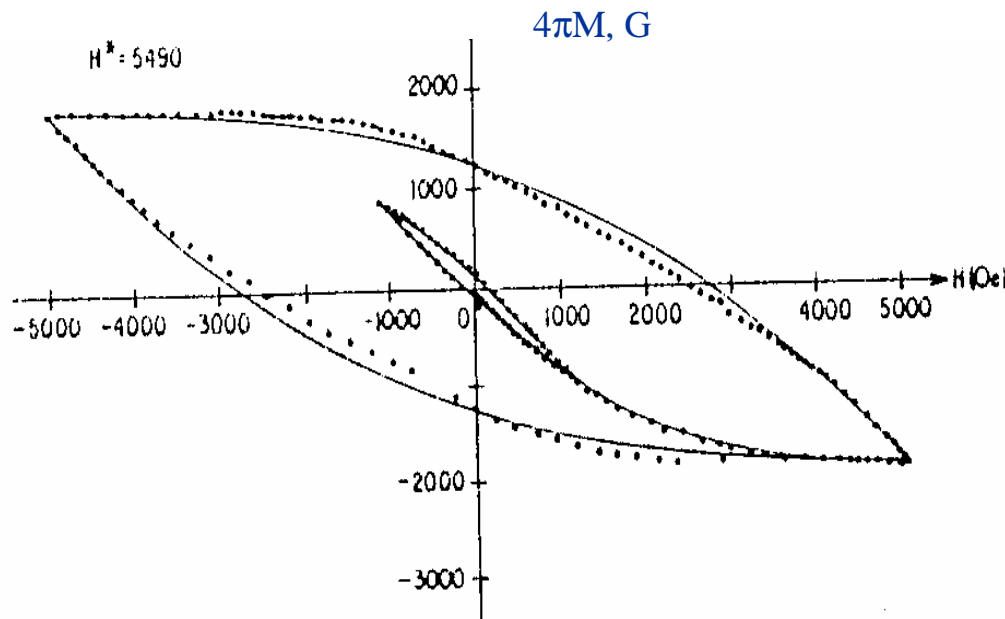
Minden egyes fluxus-szál ugyanakkora fluxust tartalmaz, az ún. **fluxus-kvantumot**, amelynek értéke $\phi_0 = h/2e = 2.07 \cdot 10^{-15} \text{ Vs}$, ahol h a Planck-állandó, e az elektron töltése.



Lebegtetési kísérlet magyarázata



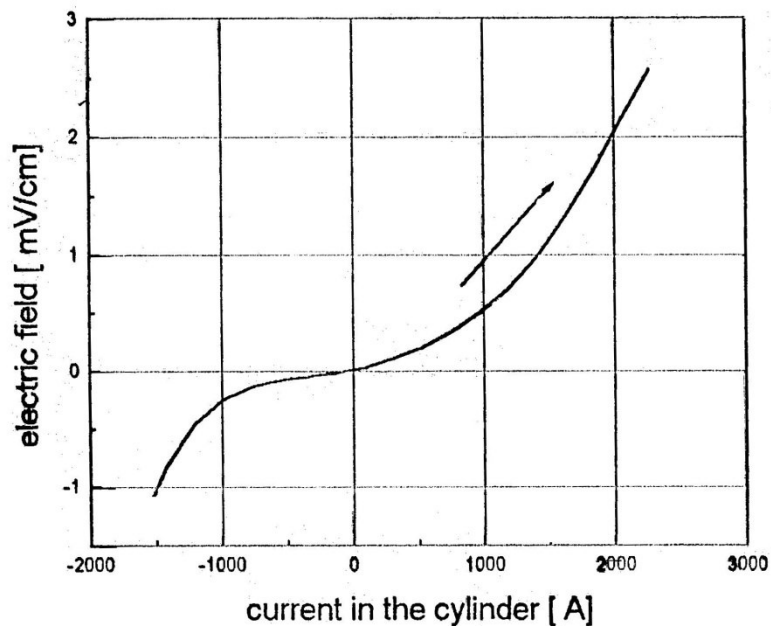
II. Típusú szupravezető mágneses viselkedése



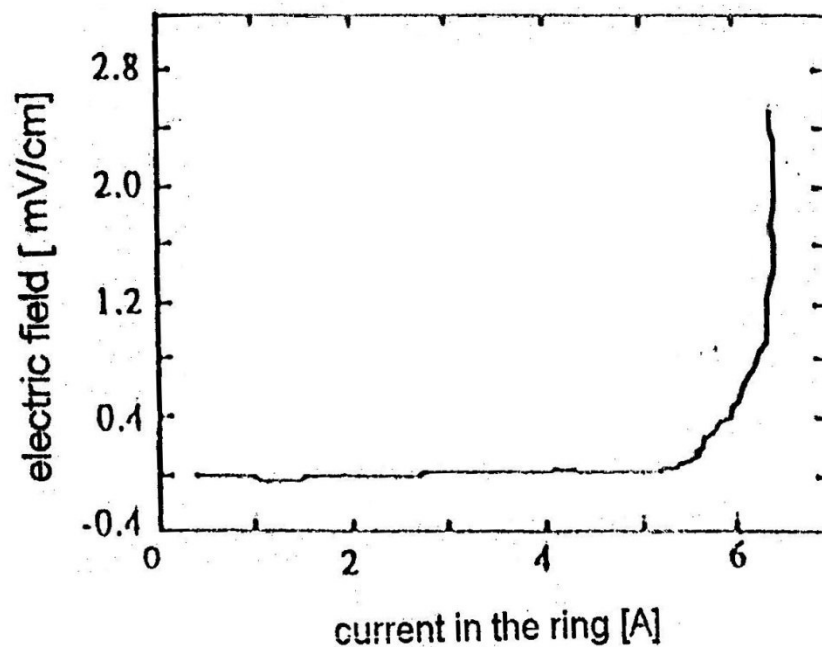
$$\langle M \rangle = \frac{1}{\Delta} \int_0^{\Delta} (H - H_e) dx$$

Mánesezési görbe

II. Típusú szupravezető villamos viselkedése

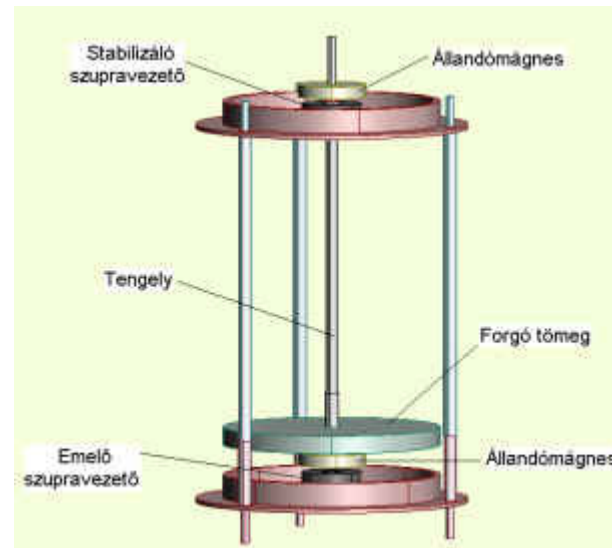


BSCCO cylinder



YBCO ring

A lebegtetés alkalmazása



Az alacsony hőmérséklet előállítása

Forráspontok és párolgáshők

Hűtőanyag	T_{boiling} [K]	$T_{\text{min}} \sim T_{\text{max}}$ [K]	$p_{\text{min}} \sim p_{\text{max}}$ [torr]	h_L [J/cm ³]
Helium	4.22	1.6 ~ 4.5	6 ~ 984	2.6
Hydrogen (?)	20.39	14 ~ 21	59 ~ 937	31.4
Neon	27.09	25 ~ 28 (?)	383 ~ 992	104
Nitrogen	77.39	64 ~ 80 (!)	109 ~ 1026	161
Oxygen	90,18	55 ~ 94 (!)	1.4 ~ 950	243

Y. Iwasa, „Case studies in superconducting magnets...”

A hűtés hatásfoka (fajlagos hűtőteljesítmény)

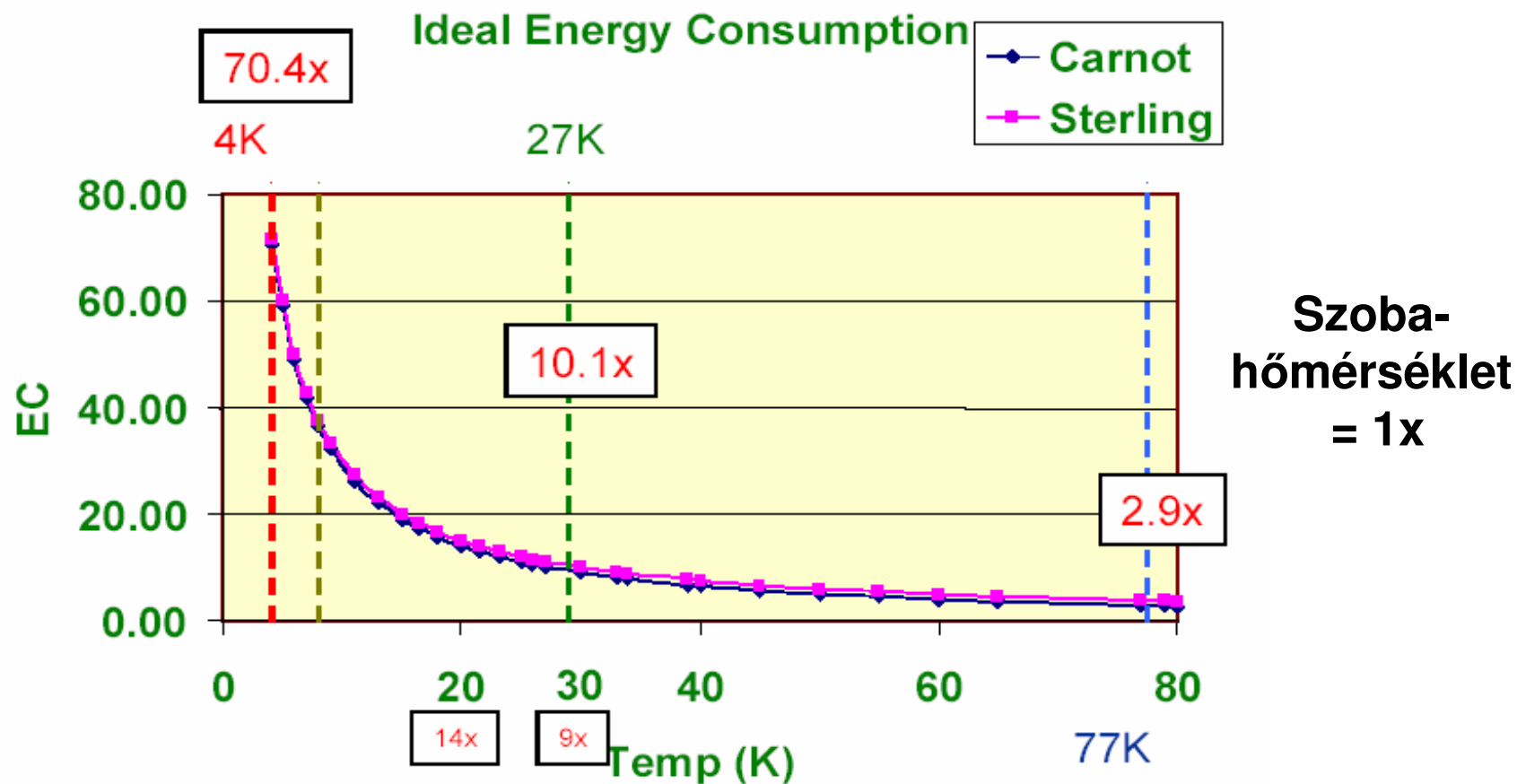
1 W teljesítmény (alacsony hőmérsékleten) elszállításához szükséges hűtőteljesítmény

Hűtőgép hatásfoka	$\eta = 100\%$	$\eta = 20\%$
T_{low}, K		
77.3	2.8	14
75	2.9	14.5
70	3.2	16
65	3.5	17.5
40	6.3	31.5
4.2	68.8	344

Tipikus

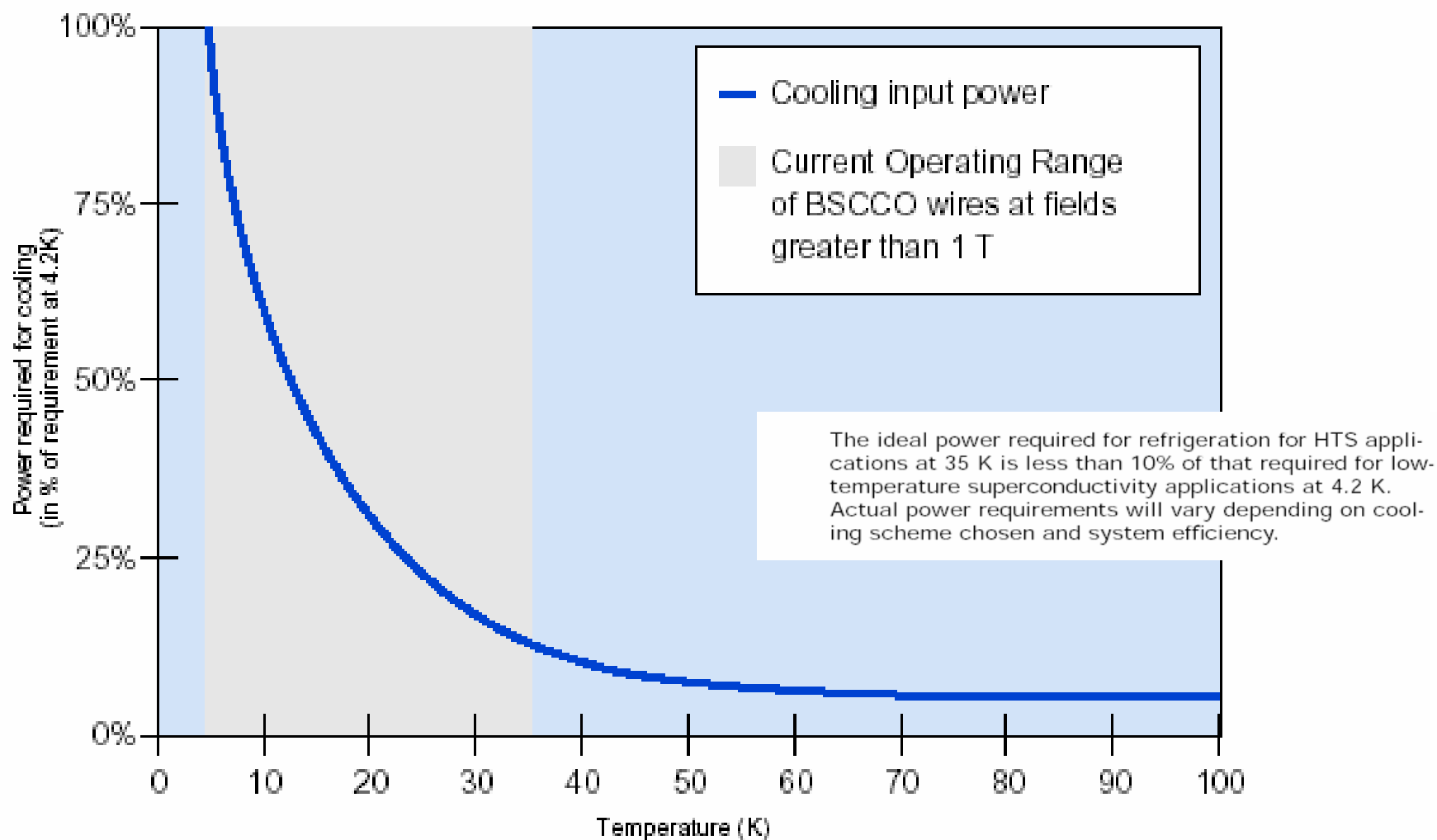
4,2 K	1000 W
25 K	125 W
77 K	6-10 W

A hűtés költségei



K. Salama, Lecture notes at ASSE 2004

A hűtés költségei



A hűtés költségei

Tétel	Units	Cu	BSCCO	BSCCO	YBCO CC	MgB ₂
Üzemi hőm.	K	300	77	77	68	25
Mágneses tér	T	2	0	2	2	2
Villamos veszt.	W/kA x m	60	0.25	0.25	0.25	0.125
Effektív Carnot hatásfok	W_t/W_e	1	20	20	23.6	76
Villamos terhelés akriorendszerben	W/kA x m	0	5	5	5.9	9.5
A veszteségek teljes költsége @ 1\$/W	\$/kA x m	60	5	5	5.9	9.5
A hűtőrendszer ára @ 5\$/W	\$/kA x m	0	25	25	29.5	47.5
Huzal ára (T, H)	\$/kA x m	5	50	150	50	2
Teljes költség	\$/kA x m	65	80	180	85	59

A szupravezetős erősáramú alkalmazások osztályozása

Az erősáramú alkalmazások osztályai

1. Az előállított mágneses tér nagysága alapján
2. Az áramnem alapján
3. Az alkalmazások jellege alapján

1. Az előállított **mágneses tér** nagysága alapján

- **Nagy mágneses terű** (high field, HF), > 1 T alkalmazások, úgymint generátorok, motorok, fúziós erőművek, magnetohidrodinamika (MHD) és mágneses energiatárolás;
- **Kis mágneses terű** (low field, LF), < 1 T alkalmazások, úgymint erősáramú kábelek, transzformátorok, áramkorlátozók.

2. Az áramnem alapján

- **Egyenáramú (DC)** alkalmazások, úgymint gerjesztő tekercsek, egyenáramú kábelek, homopoláris gépek;
- **Váltakozóáramú (AC)** alkalmazások, úgymint váltakozóáramú kábelek, armatura-tekercselések, transzformátorok, áramkorlátozók, stb..

3. Az alkalmazások **jellege** alapján

- **Versenyző alkalmazások**, amelyeknek létezik “hagyományos”, nem-szupravezetős megoldása (alternatívája, variánsa), a szupravezetős megoldás a hagyományos alternatívánál jobb műszaki paraméterekkel (tipikus példák a nagyobb hatásfok, kisebb méret és súly) és versenyképes árral kell rendelkezzen; versenyző alkalmazásokra példák a generátorok, transzformátorok, kábelek.
- **Résekre illeszkedő alkalmazások**, amelyeknek – legalábbis az ipari gyakorlatban – nem létezik hagyományos, nem-szupravezetős alternatívája. A szupravezetős megoldás olyan rést tölt be, amely hagyományos módon lényegében nem megoldott. Résekre illeszkedő megoldásokra példák a mágneses energiatároló, a stabilis passzív mágneses csapágyazás, illetve az ilyen csapágyazású energiatároló lendkerék, az áramkorlátozó, továbbá az igen nagy mágneses terek előállítása ..

Erősáramú gyakorlatban alkalmazott szupravezetők

Anyag	T_c	Alak
Nb-Ti	9 K	Huzal
Nb ₃ Sn	18 K	Huzal
MgB ₂	39 K	Huzal és tömb
YBCO	93 K	Szalag és tömb
BSCCO	110 K	Szalag és tömb

Szupravezetős erősáramú alkalmazások

Alkalmazások áttekintése

A szupravezetők előnyei

- Nagy áramok veszteségmentes vezetése
 - Nagy hatásfok (csökkent CO₂ emisszió)
 - AC Veszteségek minimalizálhatók
- Kis méret és súly
 - Nagyon nagy áramsűrűségek csökkentik a méretet és súlyt
- Alacsony hőmérsékletű üzem
 - Környezeti szigetelés
 - Olajmentes - környezetkímélő
 - Állandó hőmérséklet – nagyobb élettartam
- Új, növelt funkciójú eszközök lehetősége
- **DE:**
 - Komplex technológia
 - Az MHS gyártása ma még korlátozott
 - Költséges
 - Az eszközök megbízhatósága még nem kellően bizonyított

Motorok és Generátorok

Super-GM MHS 70 MW generator

Japán (?)

Vajda István: szupravezetők és alkalmazásai

"Mágikus vonzás", BME, 2004. november 22-25.

Vajda István: A szupravezetők alkalmazásai

"Fizikus Napok", Debrecen, 2008. március 6.

ZÁK

MHS Zárleti Áramkorlátozók

Istvan Vajda: Szupravezetők és alkalmazásai

"Mágikus vonzás", BME, 2004. november 2-25

Vajda István: A szupravezetők alkalmazásai

"Fizikus Napok", Debrecen, 2008. március 6.

Teljesen szupravezetős rendszerek

Teljesen szupravezetős rendszerek

Tekintsünk a jövőbe!

Istvan Vajda: Szupravezetők és alkalmazásai

"Mágikus vonzás", BME, 2004. november 2-25

Vajda István: A szupravezetők alkalmazásai

"Fizikus Napok", Debrecen, 2008. március 6.