

Superconduttività

Conduttore perfetto, diamagnete perfetto

Sotto una ben precisa temperatura “critica”, T_c , caratteristica del materiale:



1911

H. Kamerlingh-Onnes
(Nobel 1913)

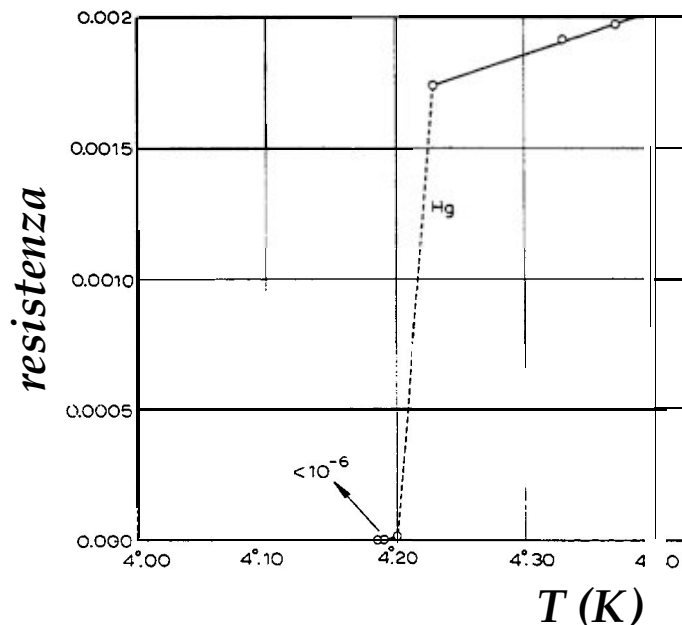


1933

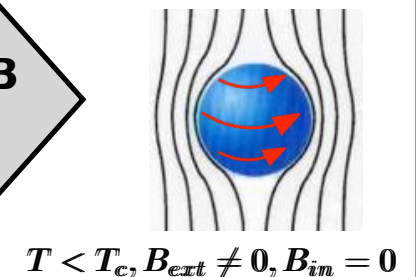
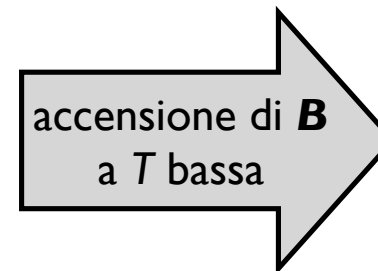
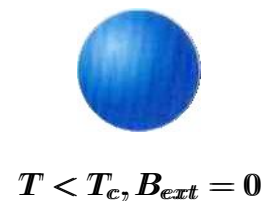
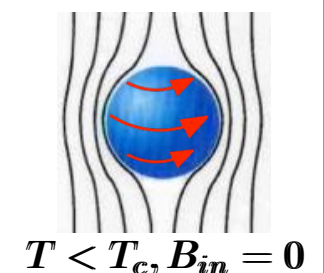
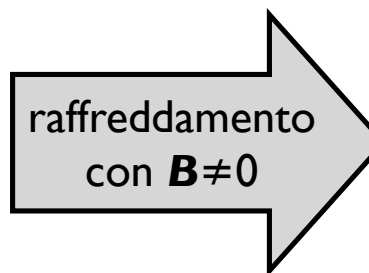
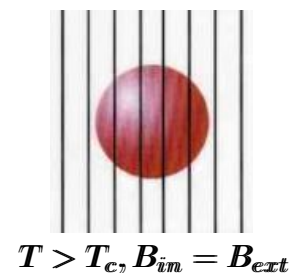
Walter Meißner Robert Ochsenfeld



Annullamento della resistenza




Espulsione del flusso di B



Nascono correnti persistenti spontanee.

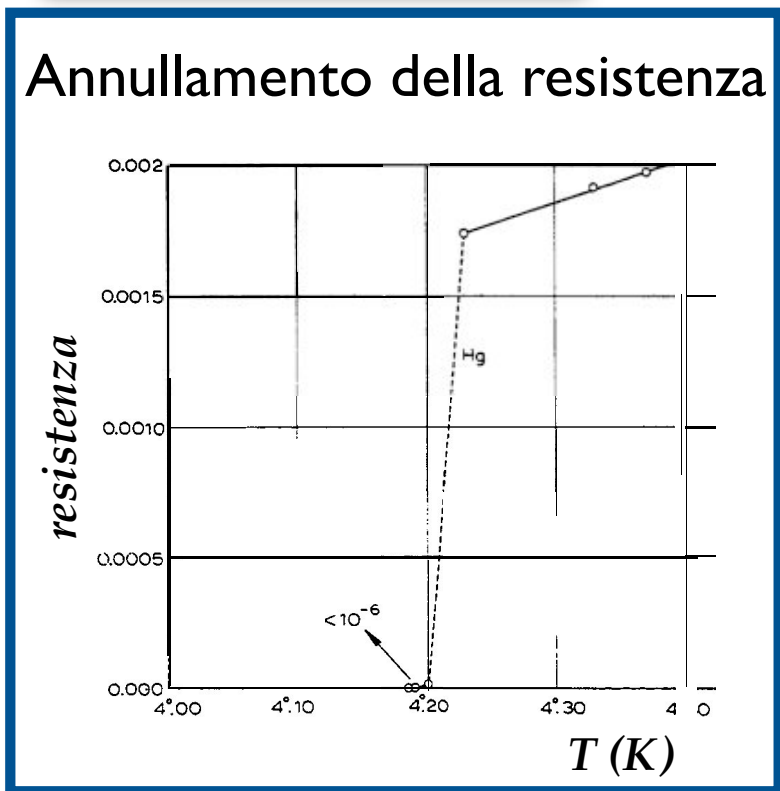
Conduttore perfetto, diamagnete perfetto

Sotto una ben precisa temperatura “critica”, T_c , caratteristica del materiale:

1911

 H. Kamerlingh-Onnes
 (Nobel 1913)

1933

 Walter Meißner Robert Ochsenfeld

Espulsione del flusso di B

raffreddamento con $B \neq 0$

$T > T_c, B_{in} = B_{ext}$

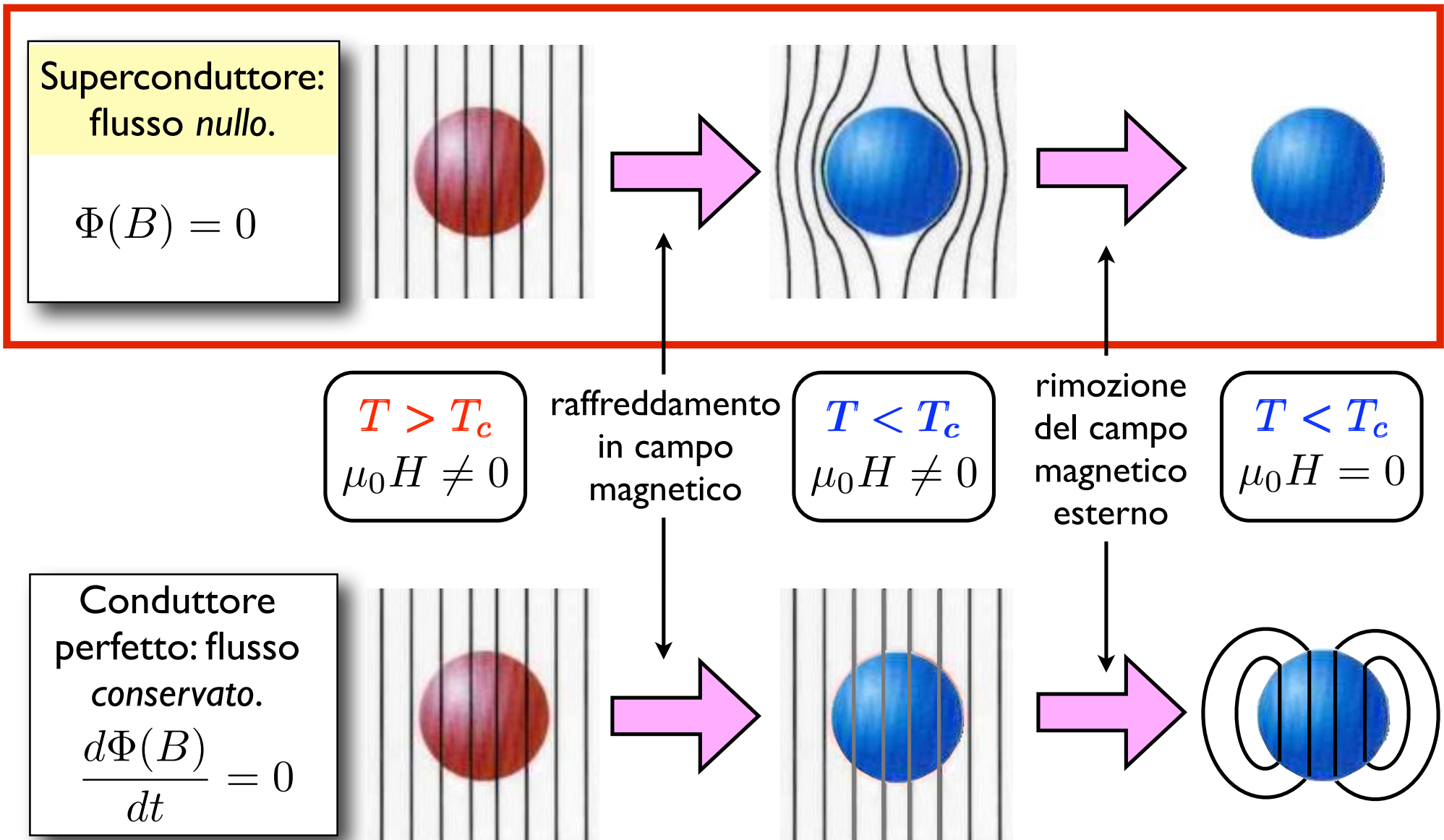
$T < T_c, B_{in} = 0$

superconduttore: flusso nullo $\Phi(B) = 0$

~~conduttore perfetto: $\frac{d\Phi(B)}{dt} = 0$~~

~~flusso conservato~~

Superconduttore \neq conduttore perfetto



Conduttore perfetto, diamagnete perfetto

Sotto una ben precisa temperatura “critica”, T_c , caratteristica del materiale:

Annullamento della resistenza



Correnti persistenti

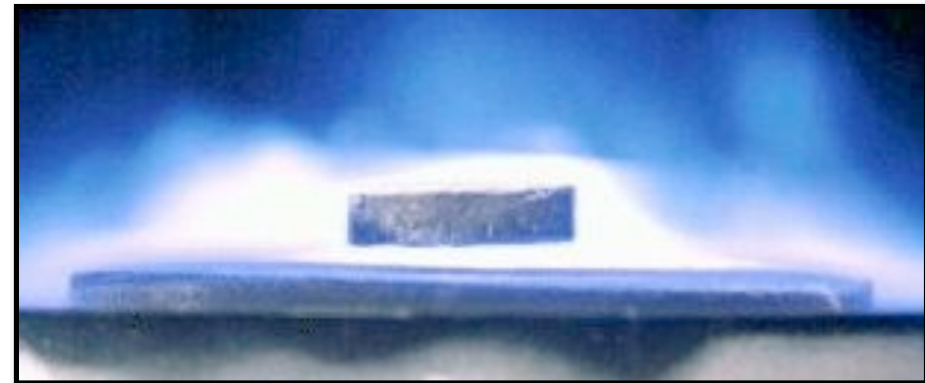
$$I(t) \stackrel{?}{=} I_0 e^{-t/\tau}$$

$$\tau > 10^5 \text{ anni}$$

$$\rho < 10^{-23} \Omega\text{cm}$$

$$[\text{Ag}, T = 4 \text{ K}: \rho \simeq 10^{-13} \Omega\text{cm}]$$

Espulsione del flusso di B

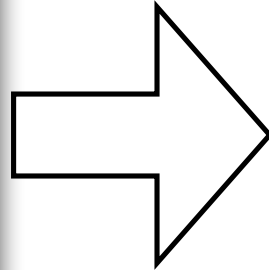
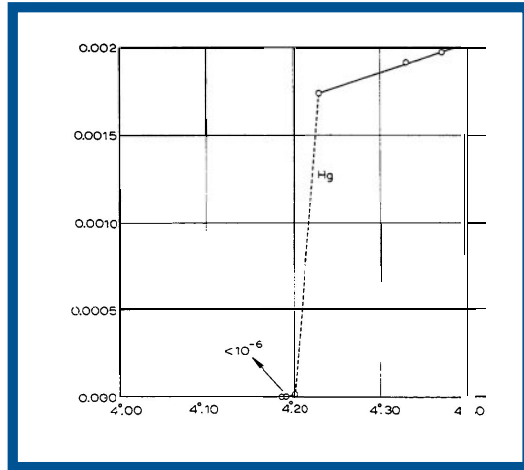


Levitazione magnetica

L'interazione è repulsiva: la levitazione “Meissner” è *instabile*.

Levitazione Meissner stabile richiede sagomature del superconduttore o del magnete

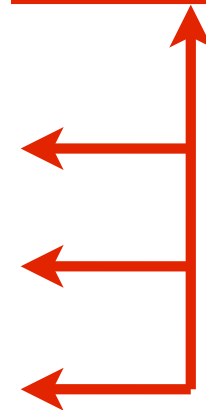
Correnti persistenti



$$I(t) = I_0 e^{-t/\tau}$$

per confronto:
 Ag, $T = 4 \text{ K}$
 $\rho \simeq 10^{-13} \text{ } \Omega\text{cm}$

| | tempo di osservazione | tempo di decadimento (limite inferiore) | resistività (limite superiore) |
|---------------------------|-----------------------|---|---|
| Quinn, Irtner JAP 1962 | 7 hr | | $3.6 \cdot 10^{-23} \text{ } \Omega\text{cm}$ |
| Broom Nature 1961 | 3 hr | $5 \cdot 10^4 \text{ s}$ | $10^{-21} \text{ } \Omega\text{cm}$ |
| File, Mills PRL 1963 | 21+37 d | $1.5 \cdot 10^5 \text{ yr}$ | $4.3 \cdot 10^{-22} \text{ } \Omega\text{cm}$ |
| Collins 1954 | 2.5 yrs | non stimato | |



Cuprati



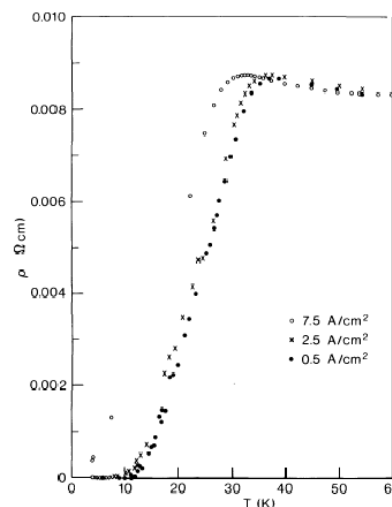
Alex Müller

Georg Bednorz

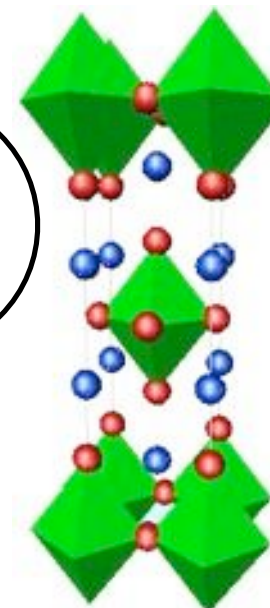
1986

laboratori IBM
di Zurigo:
Ba-La-Cu-O

(Nobel 1987)



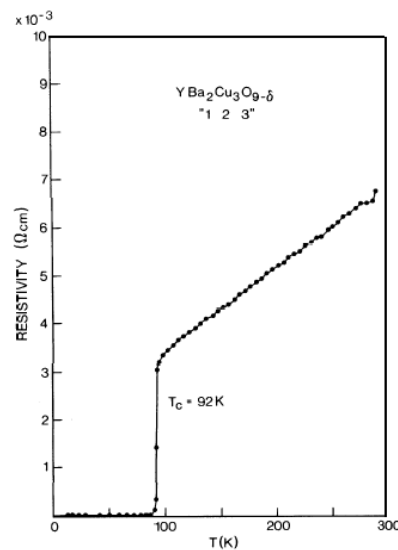
35 K



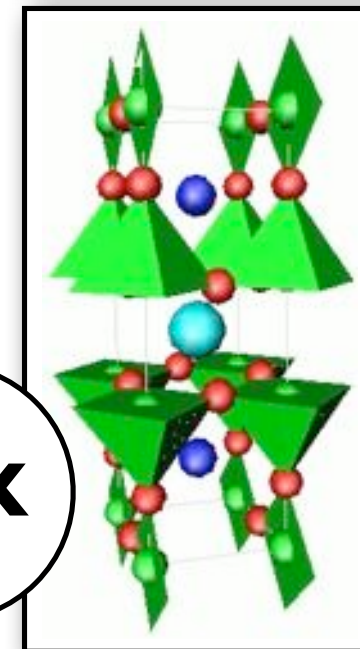
Inizio della "corsa a T_c"

1987:

Wu (Alabama) & Chu (Houston),
T_c = 92 K in YBa₂Cu₃O₇

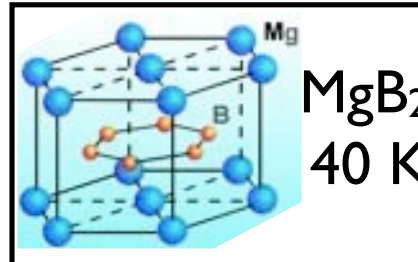
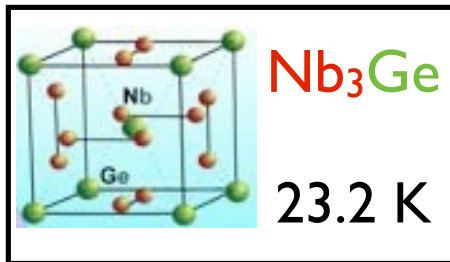
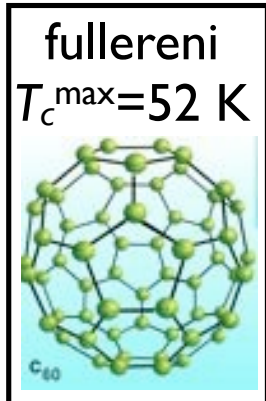
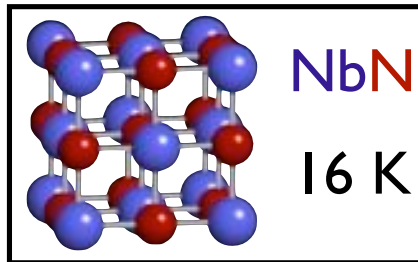
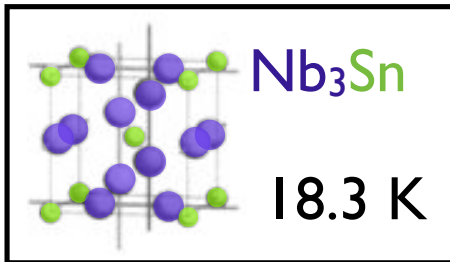


92 K



Leghe, intermetallici, esotici, ...

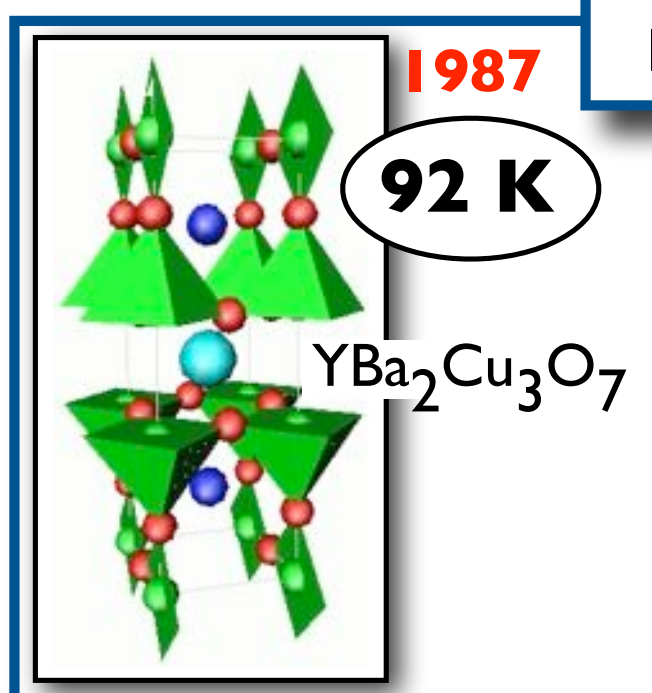
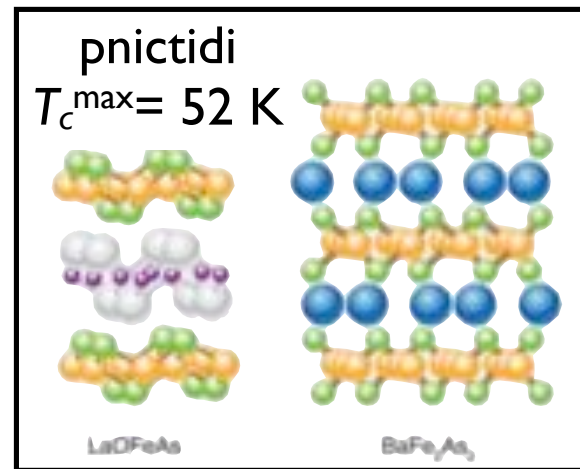
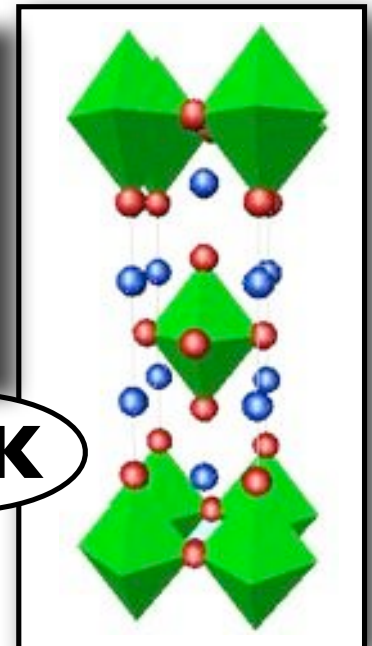
NbTi
 $T_c = 10 \text{ K}$



Alex Müller
 Georg Bednorz

1986 **35 K**

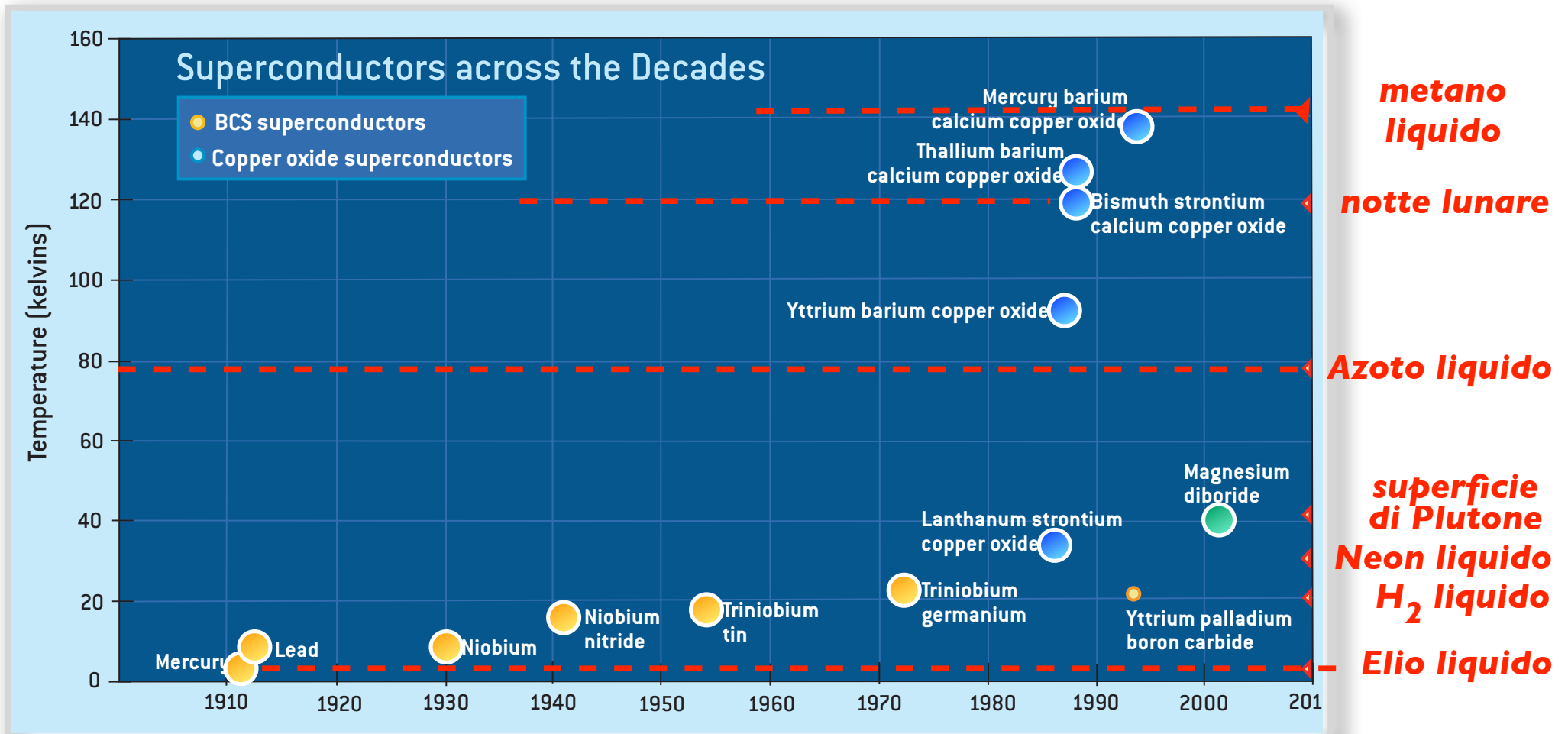
Ba-La-Cu-O
 Nobel 1987



Cuprati: $T_c^{\text{max}} = 164 \text{ K}$

diamante (drogato),
 cementi ($12 \text{ CaO} \cdot 7 \text{ Al}_2\text{O}_3$),
 materiali idratati...

T_c



1911
la scoperta

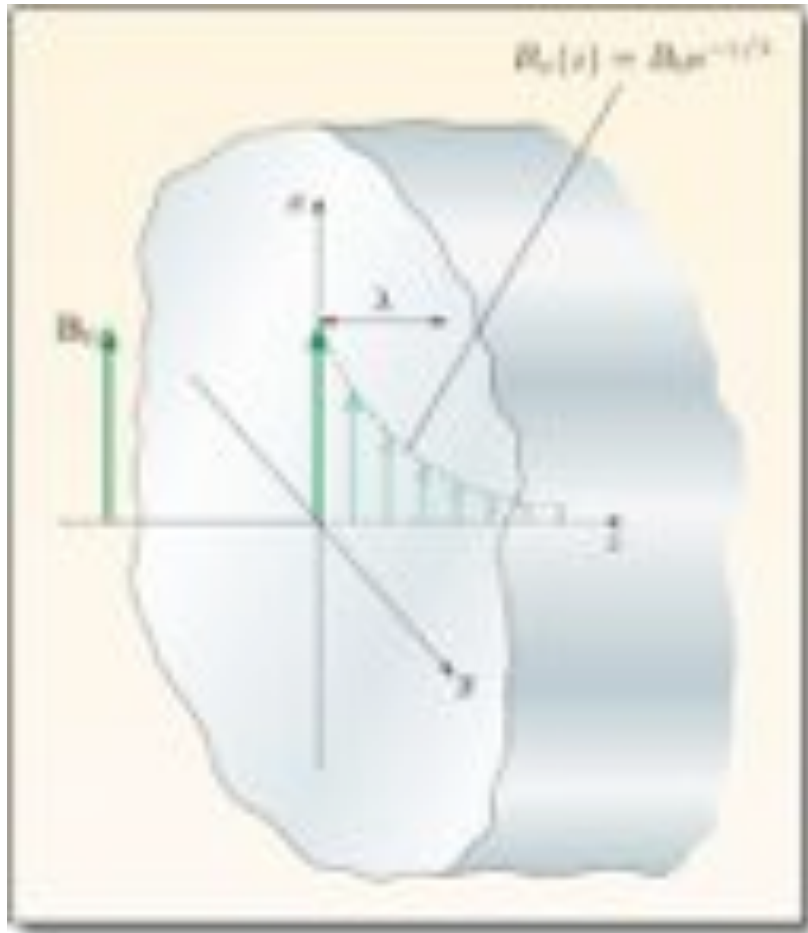
i materiali tecnologici
(pre-1986)

1986
superconduttori
ad alta T_c

2001
diboruro di
magnesio

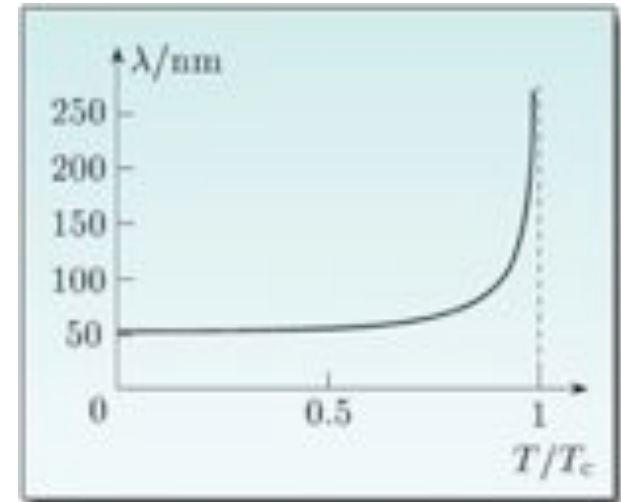
Lunghezza di penetrazione

Il campo magnetico è espulso dal superconduttore decadendo su una lunghezza tipica: lunghezza di penetrazione di London



$$\lambda = \sqrt{\frac{m_s}{\mu_0 n_s e_s^2}}$$

Dipende da T



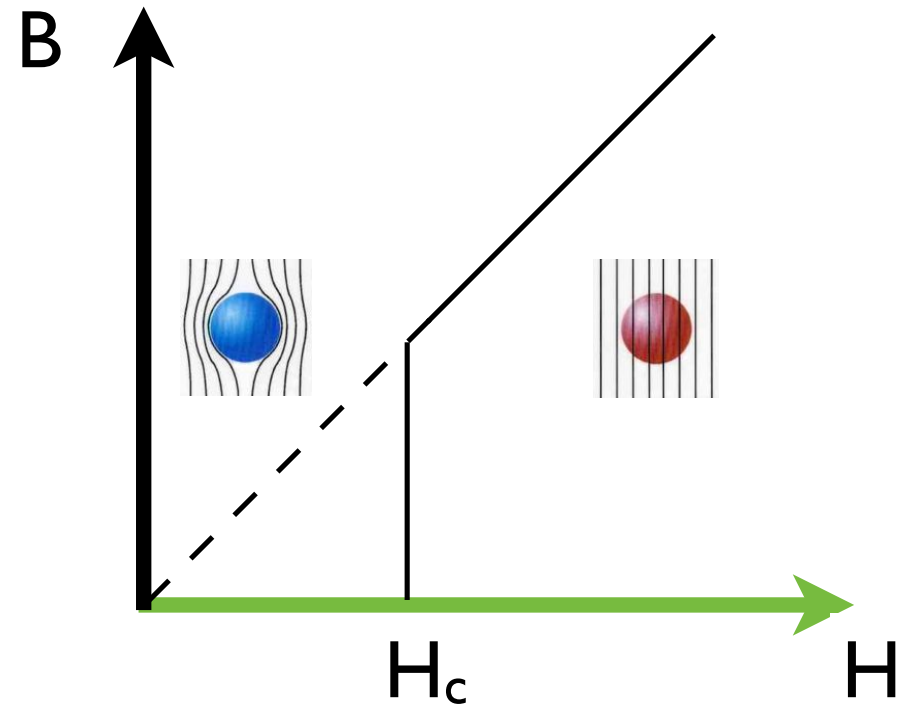
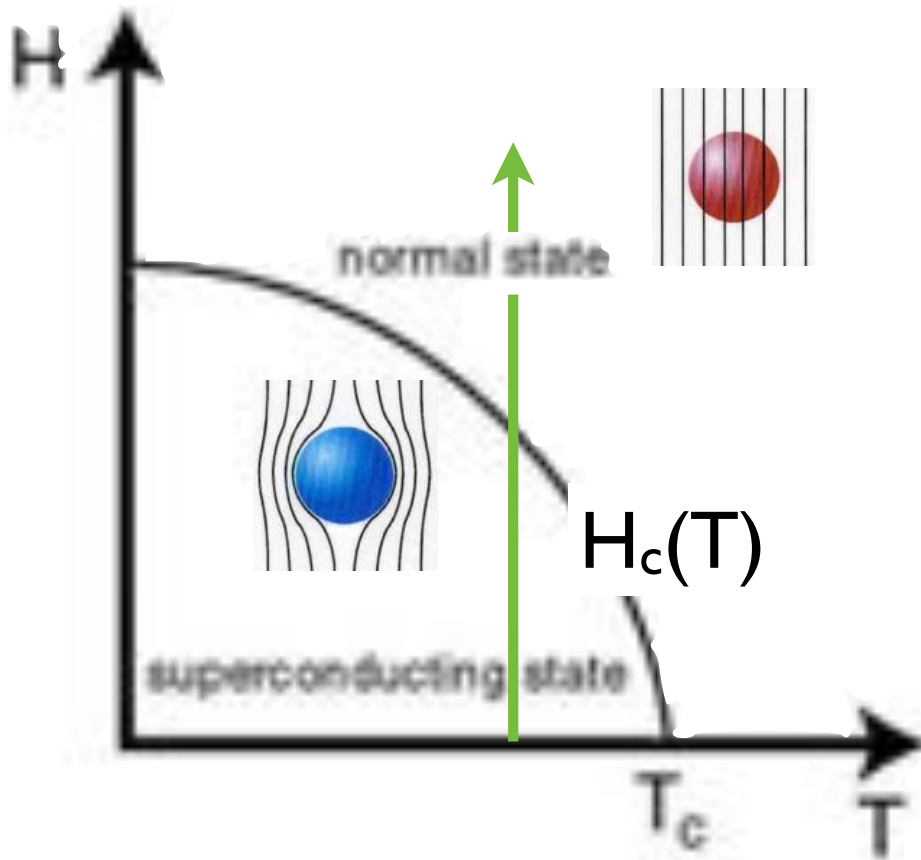
Osservazione
magnetoottica.

Univ. di Oslo

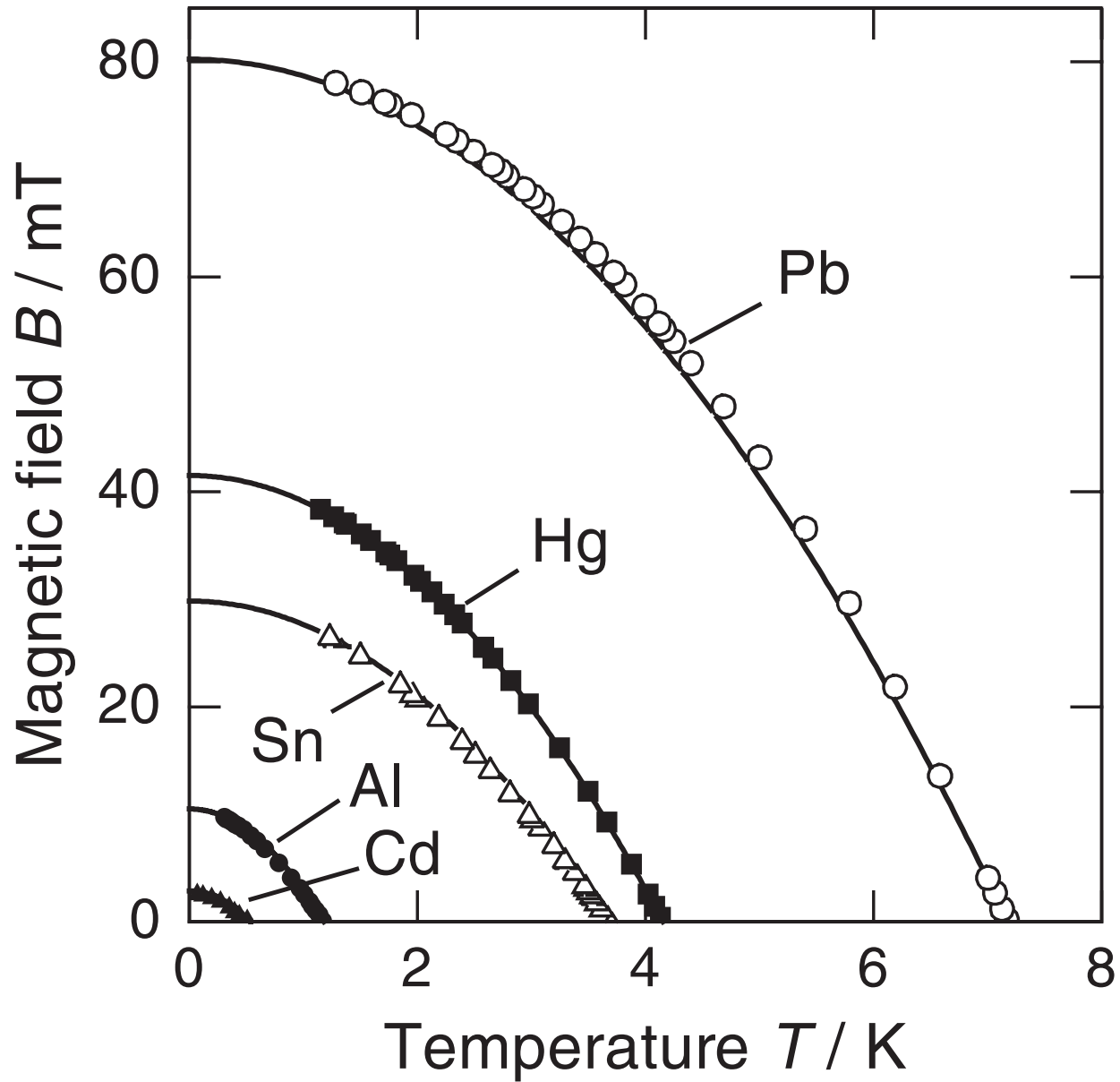


Campo critico

Un campo magnetico sufficientemente intenso
- dipendente da T -
distrugge la superconduttività.

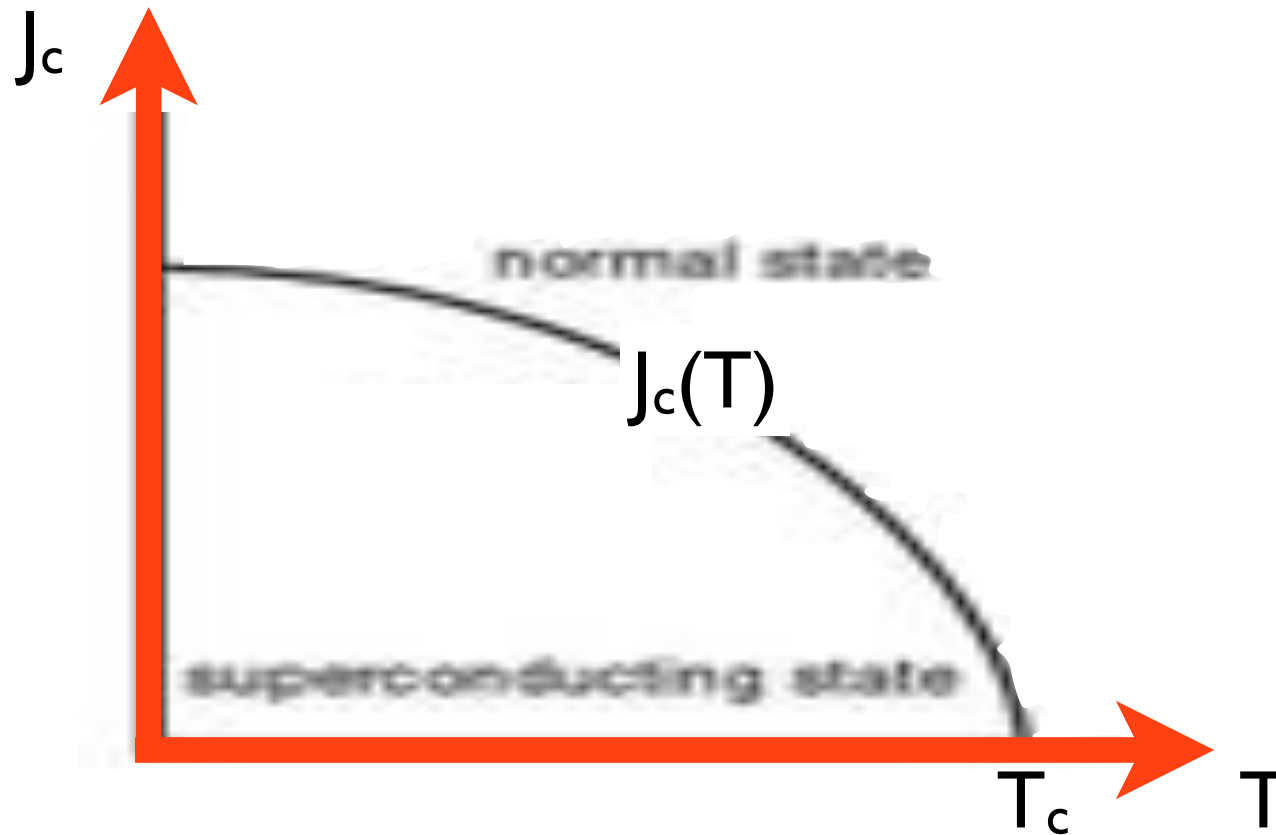


Campo critico

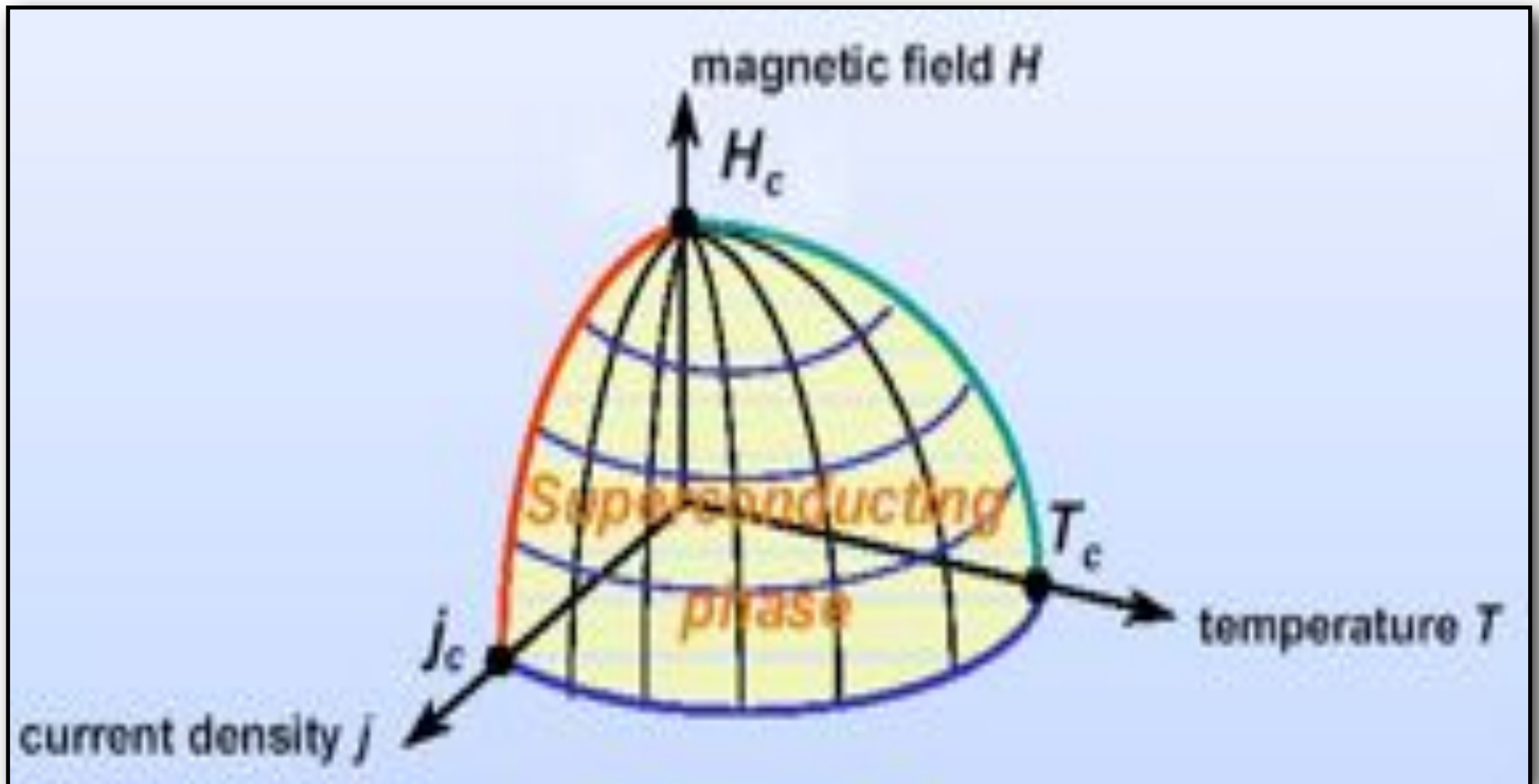


(Densità di) corrente critica

Una densità di corrente sufficientemente intensa
- dipendente da T -
distrugge la superconduttività (“corrente di depairing”)



“Superficie critica”



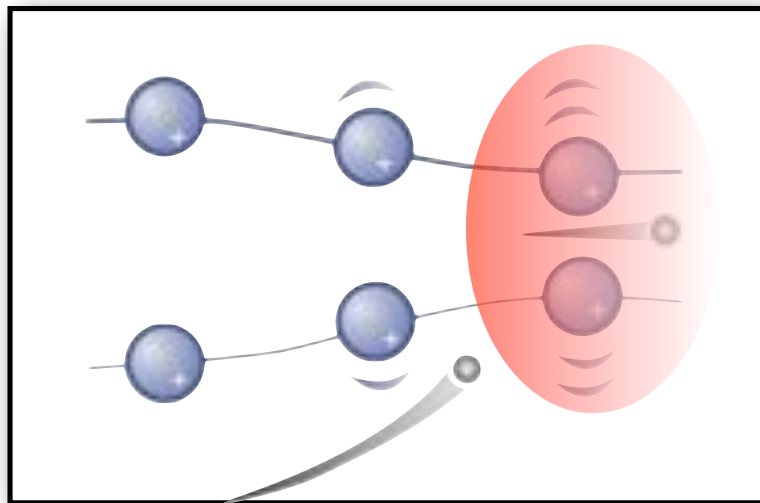
Risultati della teoria microscopica

Cooper (1956): una interazione attrattiva fra due elettroni, comunque piccola, in presenza di una sfera di Fermi occupata determina uno stato legato con $E_{2e} < 2E_F$

BCS (1957): esiste uno stato fondamentale in cui tutti gli elettroni formano *coppie*, con coerenza di fase (stato più ordinato), con una gap nella densità degli stati di singola particella .



Meccanismo: distorsioni (ritardate) del reticolo.
Più efficiente a basse T (vibrazioni termiche ridotte).



Coppia correlata.
Scattering con dissipazione (trasferimento netto di momento) \rightarrow rottura della coppia.
Energie troppo piccole rispetto alla gap
 \rightarrow supercorrente

Applicazioni (alcune)

Small scale

| Application | Technical Points |
|--|--|
| Microwave filters in cellular stations | Low losses, smaller size, sharp filtering |
| Passive microwave devices, Resonators for oscillators | Lower surface losses, high quality factors, small size |
| Far-infrared bolometers | nonlinear tunneling SIS curves, high sensitivity |
| Microwave detectors | Uses nonlinear tunneling SIS curves, high conversion efficiency for mixing |
| X-ray detectors | High photon energy resolution |
| SQUID Magnetometers: Magneto-encephalography, NDT | Ultra-high sensitivity to magnetic fields |
| Voltage Standards | Quantum precision |
| Digital Circuits (SFQ) | Up to 750 GHz, ultra-fast, low-power |



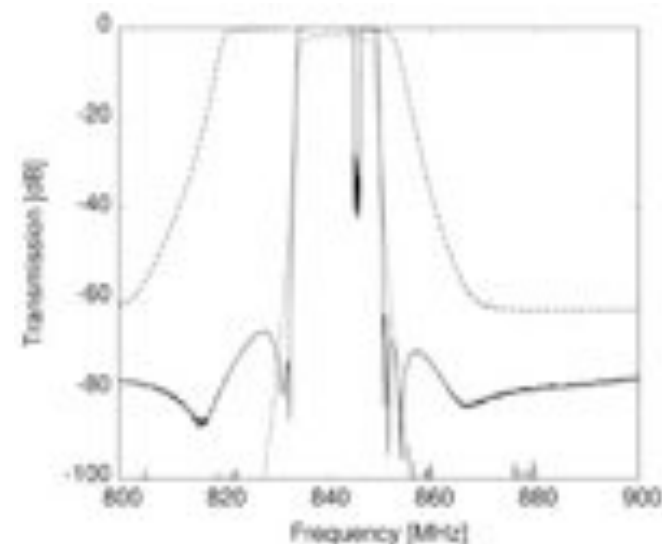
Filtri per comunicazioni satellitari

basse perdite a microonde

Reti wireless: dispositivi a elevata
selettività per sfruttare la banda.
Filtri superconduttori: basse perdite.
Alta T_c : criogenia “semplice”.

Risposta tipica di
un filtro HTS in uso
nelle stazioni
cellulari statunitensi

*Simon et al, IEEE Proc.
92, 1585 (2004)*



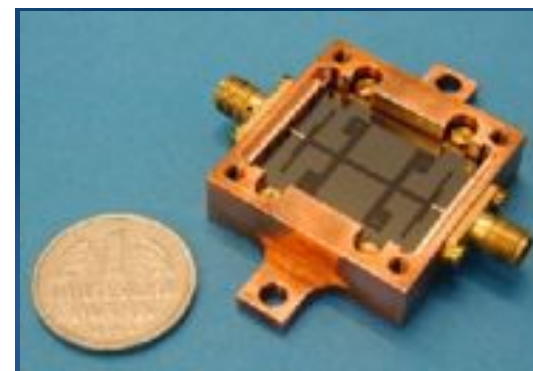
Comunicazioni satellitari:

Vantaggi dei componenti HTC: miniaturizzazione, selettività

Aspetto critico: tenuta in potenza (nonlinearità →
generazione di armoniche → disturbi)

Nonlinearità: dovute alla generazione e moto di flussoni con
il campo rf.

—> importanza del controllo artificiale del pinning.



Roma Tre: presentato un progetto regionale per la realizzazione in YBCO/BaZrO (2009)

Large scale

| Application | Technical Points |
|---|--|
| Power cables | High current densities |
| Current Limiters | Uses highly nonlinear nature of transition |
| Transformers | High current densities and magnetic fields, has lower losses |
| Motors/Generators | Smaller weight and size, lower losses |
| Energy Storage Magnets | Need high fields and currents Smaller weight and size, lower losses |
| NMR magnets (MRI) | Ultra high field stability, large air gaps |
| Cavities for Accelerators | High microwave powers |
| Magnetic bearings | Low losses, self-controlled levitation |
| Large magnetic fields for fusion reactors | Mechanical stress, current carrying |



Produzione di alti campi magnetici.

Elevata corrente critica di depinning.

Immagini da
risonanza magnetica
(diagnostica medica).

Alti campi = più contrasto.

*Non esistono
tecnologie alternative*



Produzione di alti campi magnetici.

Elevata corrente critica di depinning.

Magneti da laboratorio e per usi biomedici senza liquidi criogenici. Attualmente in vendita magneti in tecnologia “alta Tc”

Possibili installazioni in ambienti difficili, o “sul campo”



Magnete da 5 Tesla

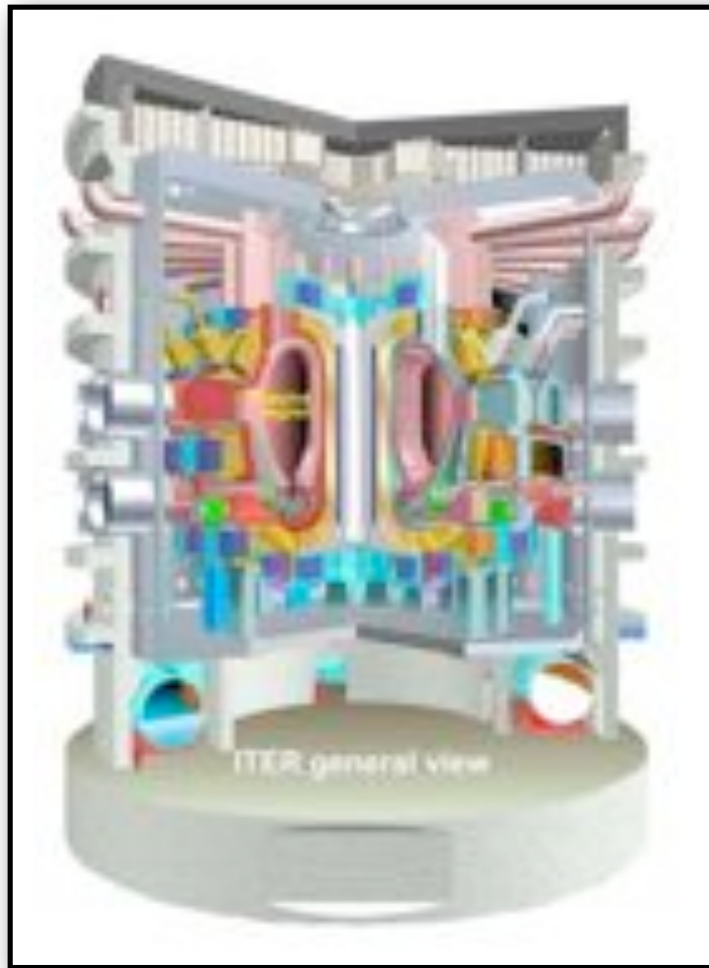
(con criogeneratore)

www.hts-110.com

Produzione di alti campi magnetici.

Elevata corrente critica di depinning.

Cavi superconduttori per i magneti nei reattori per fusione nucleare...



ENEA

sviluppo di YBCO/
BaZrO in corso

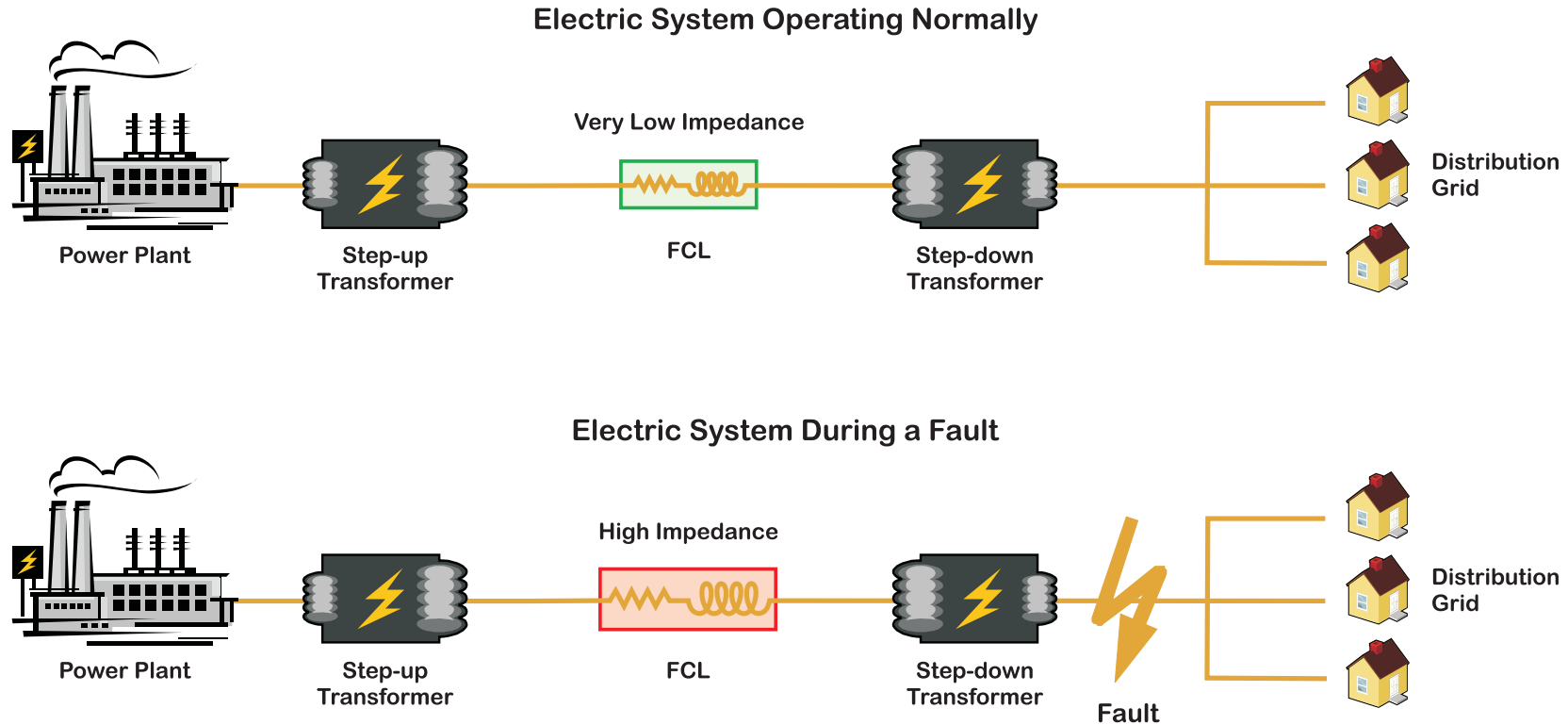
... nei grandi acceleratori



Non esistono tecnologie alternative

Superconducting Fault Current Limiters

Corrente critica finita



Switch da impedenza bassa (idealmente nulla) a impedenza alta in caso di guasto sulla rete: gli spike di corrente non danneggiano gli impianti.

Superconducting Fault Current Limiters

Corrente critica finita

Sfruttando la transizione allo stato normale, bobine superconduttrici ad alta T_c possono assorbire picchi di corrente lunghi vari millisecondi, evitando che porzioni di rete vengano isolate (black out). Si autoripristinano ritornando nello stato super.

Installazioni nella rete:
Germania (2004)
USA (Southern California Edison)

...



Zenergy,
prodotto
commerciale

Limitatore da 10 MVA.
Accel, Germania.



Non esistono tecnologie con stesse performance

Accumulatori: flywheels

Sospensione per ancoraggio di flussoni

Accumulatori meccanici: energia viene immagazzinata in corpi rigidi rotanti, e può essere trasformata in energia elettrica.

Possibilità di accumulare energia nei periodi di minor uso.
Più efficienti delle batterie.

problemi:

- attriti sui punti di contatto
- centraggio dei sistemi rotanti

Superconduttori (stato misto)
con forte pinning:

- sospensione magnetica
- auto centranti!

Numerosi progetti nel mondo.
Boeing + Argonne National Labs



Gyrobus G3 (1955)

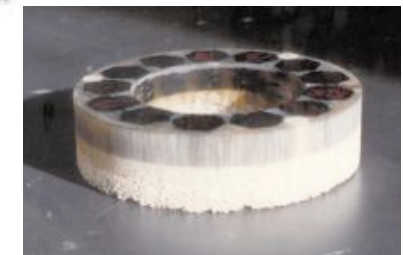
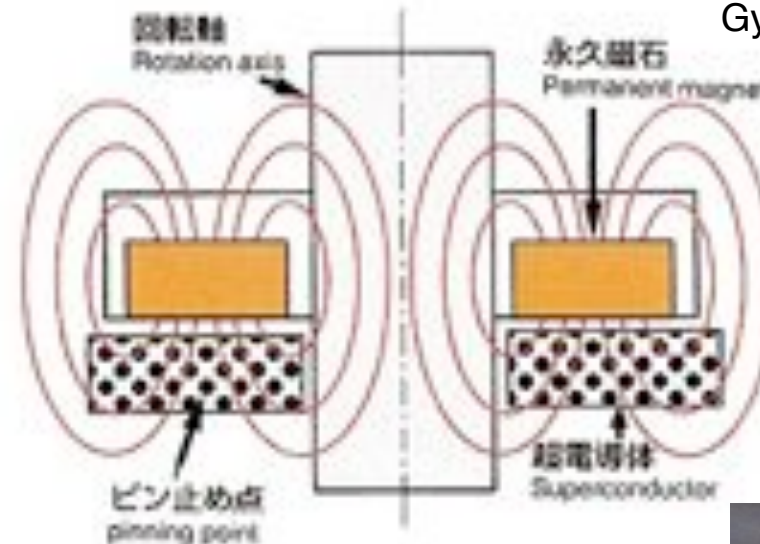


Figure 5. A HTS array for levitation systems requiring more than one high-temperature superconductor.

Trasformatori

basse perdite ac

Tecnologia in rame:

- 3-6 % energia persa
- oli di raffreddamento infiammabili
- molto voluminosi

Tecnologia “alta Tc”:

- <1 % energia persa
- “amichevoli per l’ambiente” (azoto)
- 50% meno massivi e voluminosi

Numerose installazioni pilota (~10-40 MVA) attualmente operative nella rete elettrica statunitense, giapponese e europea.



41 kVA superconducting transformer
European project READY

“Retrofit” di reti elettriche esistenti.

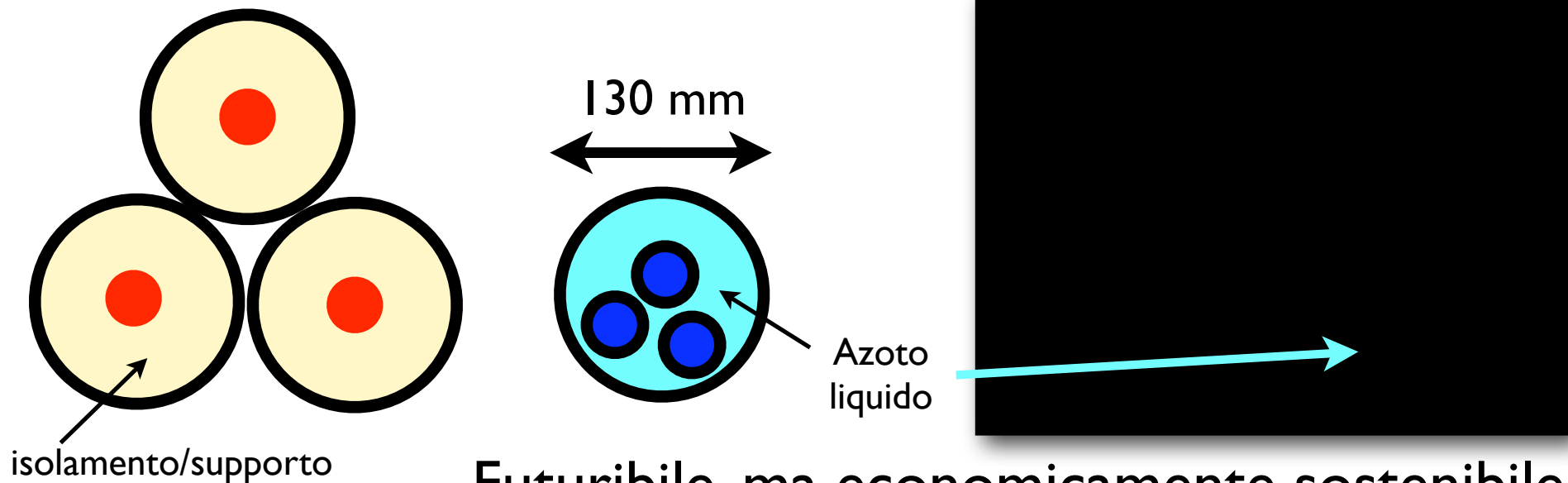
resistenza nulla

Parità di diametro: cavi superconduttori trasportano corrente migliaia di volte maggiore di cavi in rame.

Confronto dimensionale cavi 1000 MVA

rame

HTC



Futuribile, ma economicamente sostenibile.