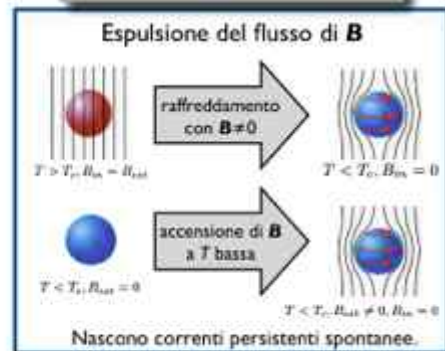




1

Conduttore perfetto, diamagnete perfetto

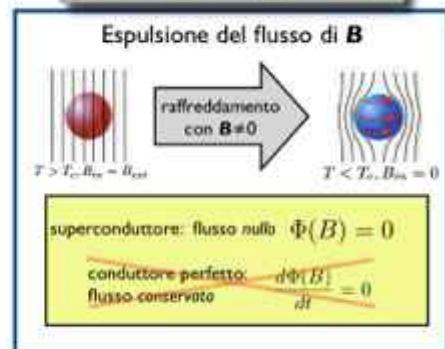
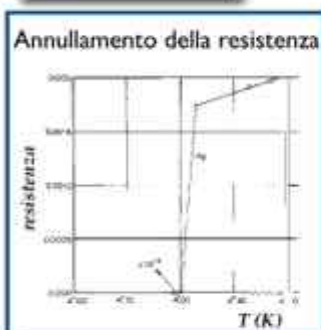
Sotto una ben precisa temperatura “critica”, T_c , caratteristica del materiale:



2

Conduttore perfetto, diamagnete perfetto

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



3

Conduttore perfetto, diamagnete perfetto

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

Annullamento della resistenza



Correnti persistenti

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

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

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

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

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

4

Fenomeno comune

PERIODIC TABLE OF SUPERCONDUCTING ELEMENTS

from Yamashita T, Nakajima K, Chen J, Buzza C, Superconductors - Scientific Basics and Engineering Applications (Springer-Verlag, Heidelberg) 2002 to appear

PERIODIC TABLE OF SUPERCONDUCTING ELEMENTS																		VIII															
I																		2															
H Hydrogen																		He Helium															
from Yamashita T, Nakajima K, Chen J, Buzza C, Superconductors - Scientific Basis and Engineering Applications (Springer-Verlag, Heidelberg) 2002 to appear																																	
3		10										11		12		13		14		15		16		17		18							
Li Lithium		4		Be		B		C		N		O		F		Ne		Na		Mg		Al		Si		P		S		Cl		Ar	
7		9		10		11		12		13		14		15		16		17		18		19		20		21		22		23		24	
25		26		27		28		29		30		31		32		33		34		35		36		37		38		39		40			
39		40		41		42		43		44		45		46		47		48		49		50		51		52		53		54			
55		56		57		58		59		60		61		62		63		64		65		66		67		68		69		70			
71		72		73		74		75		76		77		78		79		80		81		82		83		84		85		86			
87		88		89		90		91		92		93		94		95		96		97		98		99		100		101		102			
103		104		105		106		107		108		109		110		111		112		113		114		115		116		117		118			
119		120		121		122		123		124		125		126		127		128		129		130		131		132		133		134			
135		136		137		138		139		140		141		142		143		144		145		146		147		148		149		150			
151		152		153		154		155		156		157		158		159		160		161		162		163		164		165		166			
167		168		169		170		171		172		173		174		175		176		177		178		179		180		181		182			
183		184		185		186		187		188		189		190		191		192		193		194		195		196		197		198			
199		200		201		202		203		204		205		206		207		208		209		210		211		212		213		214			
215		216		217		218		219		220		221		222		223		224		225		226		227		228		229		230			
231		232		233		234		235		236		237		238		239		240		241		242		243		244		245		246			
247		248		249		250		251		252		253		254		255		256		257		258		259		260		261		262			
263		264		265		266		267		268		269		270		271		272		273		274		275		276		277		278			
279		280		281		282		283		284		285		286		287		288		289		290		291		292		293		294			
295		296		297		298		299		300		301		302		303		304		305		306		307		308		309		310			
311		312		313		314		315		316		317		318		319		320		321		322		323		324		325		326			
327		328		329		330		331		332		333		334		335		336		337		338		339		340		341		342			
343		344		345		346		347		348		349		350		351		352		353		354		355		356		357		358			
359		360		361		362		363		364		365		366		367		368		369		370		371		372		373		374			
375		376		377		378		379		380		381		382		383		384		385		386		387		388		389		390			
391		392		393		394		395		396		397		398		399		400		401		402		403		404		405		406			
407		408		409		410		411		412		413		414		415		416		417		418		419		420		421		422			
423		424		425		426		427		428		429		430		431		432		433		434		435		436		437		438			
439		440		441		442		443		444		445		446		447		448		449		450		451		452		453		454			
455		456		457		458		459		460		461		462		463		464		465		466		467		468		469		470			
471		472		473		474		475		476		477		478		479		480		481		482		483		484		485		486			
487		488		489		490		491		492		493		494		495		496		497		498		499		500		501		502			
503		504		505		506		507		508		509		510		511		512		513		514		515		516		517		518			
519		520		521		522		523		524		525		526		527		528		529		530		531		532		533		534			
535		536		537		538		539		540		541		542		543		544		545		546		547		548		549		550			
551		552		553		554		555		556		557		558		559		560		561		562		563		564		565		566			
567		568		569		570		571		572		573		574		575		576		577		578		579		580		581		582			
583		584		585		586		587		588		589		590		591		592		593		594		595		596		597		598			
599		600		601		602		603		604		605		606		607		608		609		610		611		612		613		614			
615		616		617		618		619		620		621		622		623		624		625		626		627		628		629		630			
631		632		633		634		635		636		637		638		639		640		641		642		643		644		645		646			
647		648		649		650		651		652		653		654		655		656		657		658		659		660		661		662			
663		664		665		666		667		668		669		670		671		672		673		674		675		676		677		678			
679		680		681		682		683		684		685		686		687		688		689		690		691		692		693		694			
695		696		697		698		699		700		701		702		703		704		705		706		707		708		709		710			
711		712		713		714		715		716		717		718		719		720		721		722		723		724		725		726			
727		728		729		730		731		732		733		734		735		736		737		738		739		740		741		742			
743		744		745		746		747		748		749		750		751		752		753		754		755		756		757		758			
759		760		761		762		763		764		765		766		767		768		769		770		771		772		773		774			
775		776		777		778		779		780		781		782		783		784		785		786		787		788		789		790			
791		792		793		794		795		796		797		798		799		800		801		802		803		804		805		806			
807		808		809		810		811		812		813		814		815		816		817		818		819		820		821		822			
823		824		825		826		827		828		829		830		831		832		833		834		835		836		837		838			
839		840		841		842		843		844		845		846		847		848		849		850		851		852		853		854			
855		856		857		858		859		860		861		862		863		864		865		866		867		868		869		870			
871		872		873		874		875		876		877		878		879		880		881		882		883		884		885		886			
887		888		889		890		891		892		893		894		895		896		897		898		899		900		901		902			
903		904		905		906		907		908		909		910		911		912		913		914		915		916		917		918			
919		920		921		922		923		924		925		926		927		928		929		930		931		932		933		934			
935		936		937		938		939		940		941		942		943		944		945		946		947		948		949		950			
951		952		953		954		955		956		957		958		959		960		961		962		963		964		965		966			
967		968		969		970		971		972		973		974		975		976		977		978		979		980		981		982			
983		984		985		986		987		988		989		990		991		992		993		994		995		996		997		998			
999		1000		1001		1002		1003		1004		1005		1006		1007		1008		1009		1010		1011		1012		1013		1014			
1015		1016		1017		1018		1019		1020		1021		1022		1023		1024		1025		1026		1027		1028		1029		1030			
1031		1032		1033		1034		1035		1036		1037		1038		1039		1040		1041		1042		1043		1044		1045		1046			
1047		1048		1049		1050		1051		1052		1053		1054		1055		1056		1057		1058		1059		1060		1061		1062			
1063		1064		1065		1066		1067		1068		1069																					

$$T_c^{(max)} = 9.25 \text{ K [Nb]}$$

5

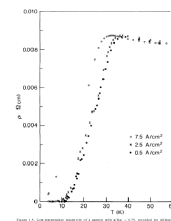
Cuprati



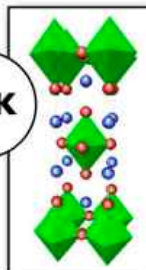
Alex Müller
Georg Bednorz

1986
laboratori IBM
di Zurigo:
Ba-La-Cu-O
(Nobel 1987)

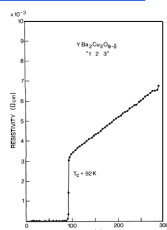
Inizio della "corsa a T_c "



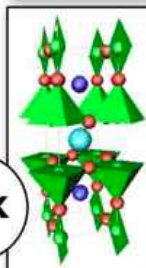
35 K



1987:
Wu (Alabama) & Chu (Houston),
 $T_c = 92 \text{ K}$ in $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$

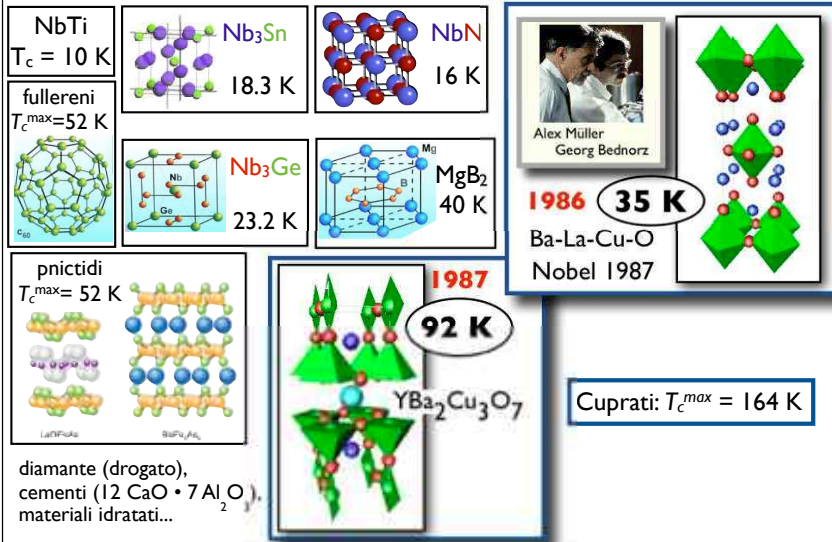


92 K

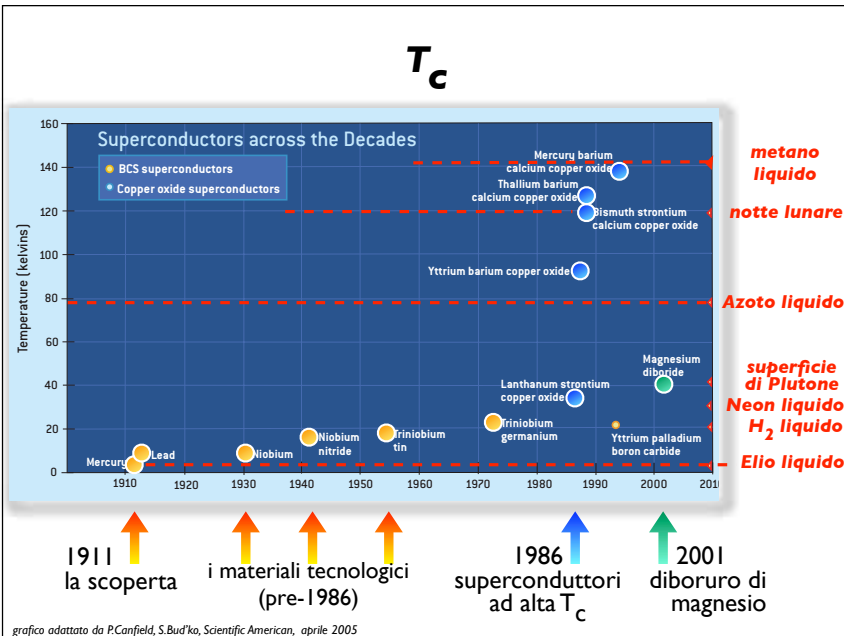


6

Leghe, intermetallici, esotici, ...



7



8

La soglia dell'Azoto liquido

Elio liquido
(4.2 K = -269 C)



Costoso

Di difficile
conservazione:
piccolissime quantità di
energia (anche la luce!)
ne determinano
l'evaporazione

Azoto liquido
(77 K = -196 C)



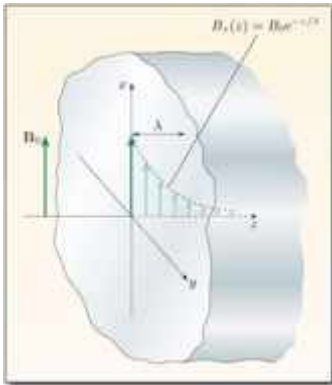
Economico

Di facile conservazione.

9

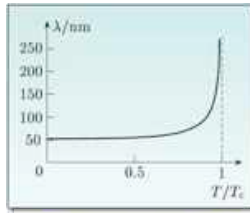
Lunghezza di penetrazione

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 magnetooptica.

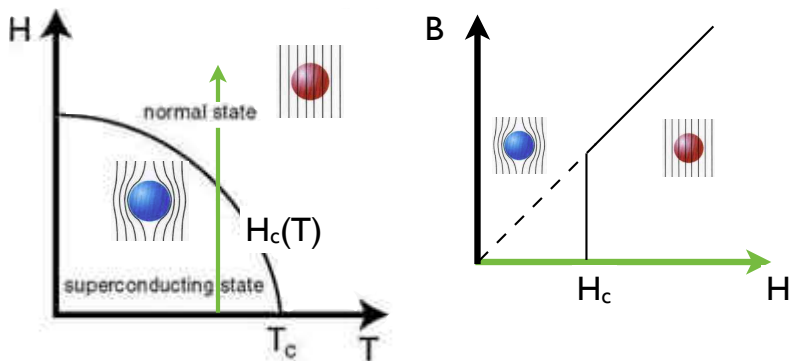
Univ. di Oslo



10

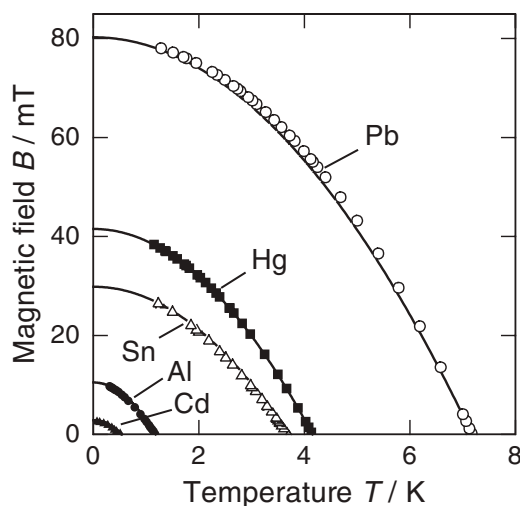
Campo critico

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



11

Campo critico



Campo magnetico
terrestre: 0.5 mT

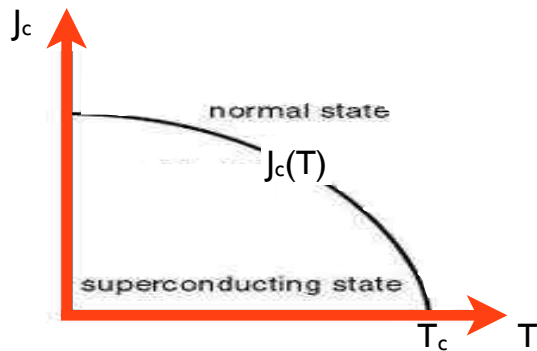
Magnete permanente
al Nd (es.:
altoparlanti) 0.5 T

Risonanza magnetica
nucleare: 0.5-3 T

12

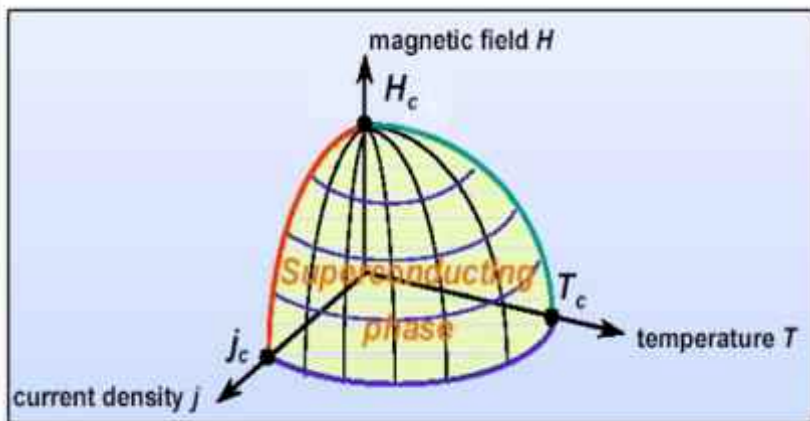
(Densità di) corrente critica

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



13

"Superficie critica"



14

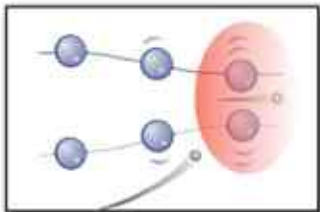
Risultati della teoria microscopica

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.



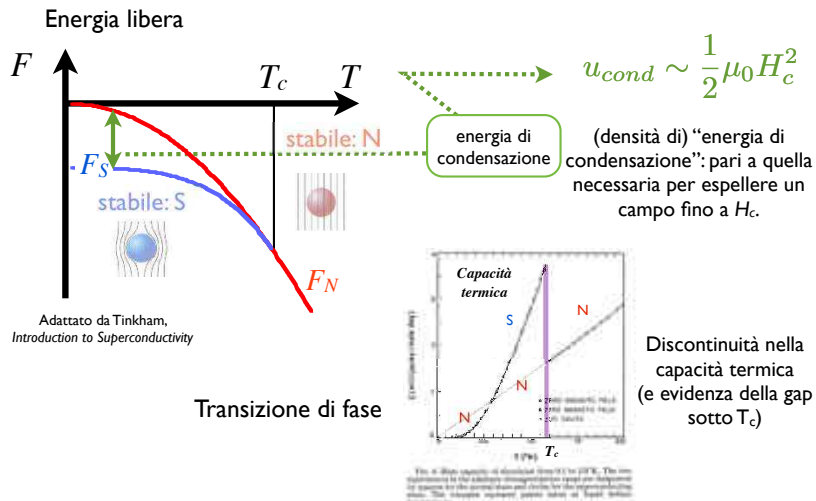
Meccanismo: distorsioni (ritardate) del reticolo.
Più efficiente a basse T (vibrazioni termiche ridotte).



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

15

Energia di condensazione



16

Teoria Ginzburg-Landau

densità di energia libera di Gibbs:

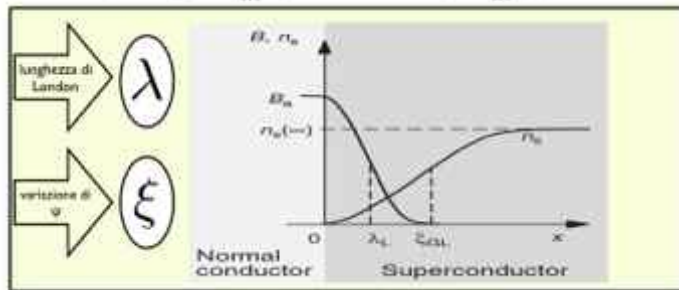
$$g_s = g_n + \alpha |\Psi(\mathbf{r})|^2 + \frac{1}{2} \beta |\Psi(\mathbf{r})|^4 + \frac{1}{2\mu_0} |B_a - B_i|^2 + \frac{1}{2m} |(-i\hbar\nabla + 2e\mathbf{A})\Psi(\mathbf{r})|^2$$

parametro d'ordine: f.d.o. macroscopica $\Psi = \Psi_0 e^{i\varphi(\mathbf{r})}$ (Gor'kov)

equazioni di G-L

$$\frac{1}{2m} (-i\hbar\nabla + 2e\mathbf{A})^2 \Psi + \alpha \Psi + \beta |\Psi|^2 \Psi = 0,$$

$$\mathbf{j}_s = \frac{ie\hbar}{m} (\Psi^* \nabla \Psi - \Psi \nabla \Psi^*) - \frac{4e^2}{m} |\Psi|^2 \mathbf{A}$$



17

Quantizzazione del flusso

$$\mathbf{j}_s = \frac{ie\hbar}{m} (\Psi^* \nabla \Psi - \Psi \nabla \Psi^*) - \frac{4e^2}{m} |\Psi|^2 \mathbf{A}$$

$\Psi = \Psi_0 e^{i\varphi(\mathbf{r})}$ stato quantistico macroscopico

$$\mu_0 \lambda_L^2 \mathbf{j} = \left(\frac{\hbar}{e} \nabla \varphi - 2\mathbf{A} \right)$$

$$\Phi = p \frac{h}{2e} = p \Phi_0$$

$$\Phi_0 = 2.07 \cdot 10^{-15} \text{ Tm}^2$$

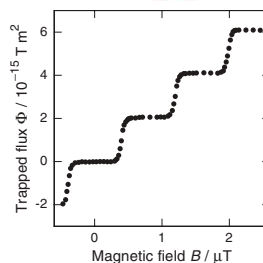
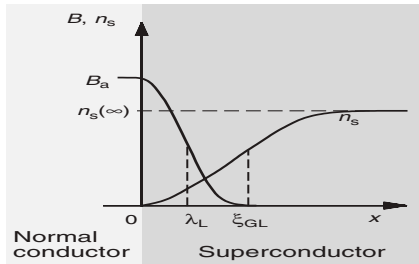


Fig. 10.45. Magnetic flux trapped by a thin hollow cylinder made of tin (length 24 mm, diameter 56 μm) as a function of the cooling field [497]

18

Energia di interfaccia



Espulsione del flusso: richiede energia

$$\sim \lambda \frac{1}{2} \mu_0 H^2$$

Stato SC: favorito (guadagno di energia)

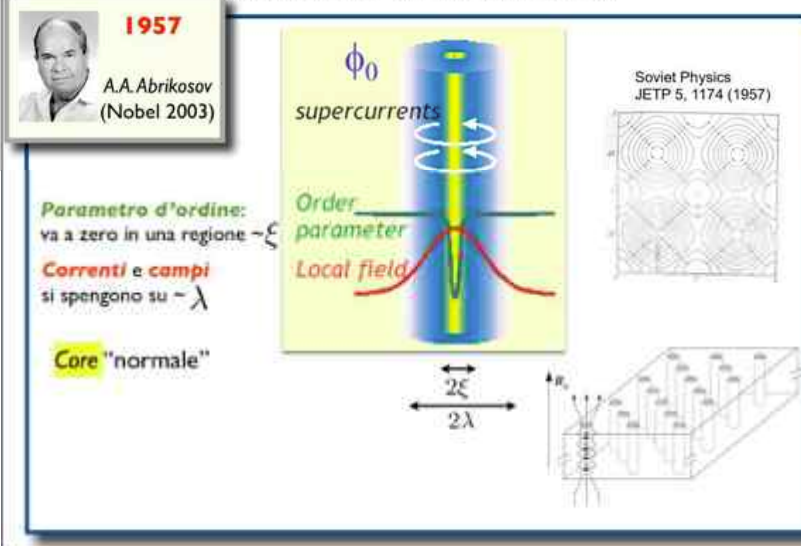
$$\sim \xi \frac{1}{2} \mu_0 H_c^2$$

per $\lambda H^2 \gtrsim \xi H_c^2$: formazione di numerose interfacce;
penetrazione del campo a $H_{c1} < H < H_c$
penetrazione in forma di filamenti, sostenuti da correnti superconduttive

Il numero di filamenti è limitato dal fatto che ciascun filamento non può portare meno di Φ_0

19

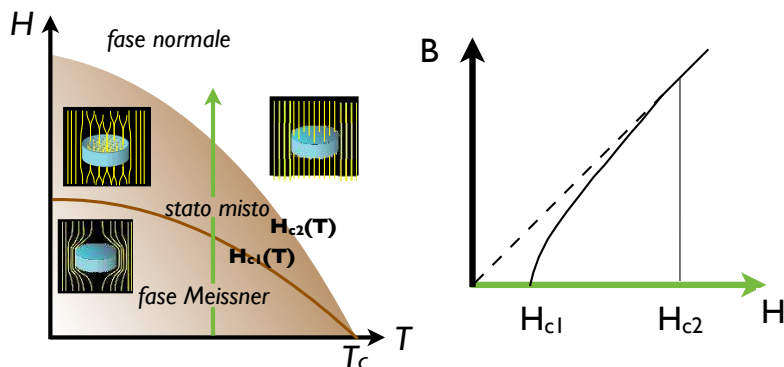
Reticolo di Abrikosov



20

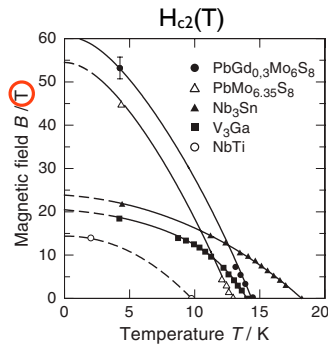
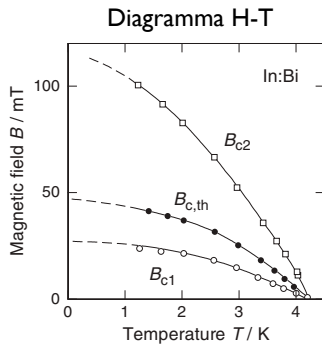
Superconduttori di tipo II

Parziale penetrazione del flusso in forma di quanti di flusso o *flussoni*.
Due campi critici.



21

Superconduttori di tipo II



cuprati: $H_{c2}(0) \sim 100\text{-}300 \text{ T}$

22

Reticolo di Abrikosov

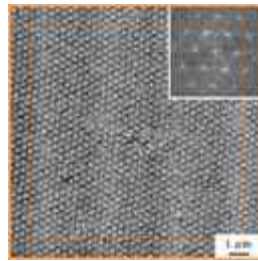


U. Essmann and H. Trauble
 Max-Planck Institute, Stuttgart
 Physics Letters 24A, 526 (1967)
 Bitter Decoration
 Pb-4at%In rod, 1.1K, 195G



Scanning Tunneling Microscopy
 NbSe2, 1T, 1.8K

H. F. Hess et al.
 Bell Labs
 Phys. Rev. Lett. 62, 214 (1989)

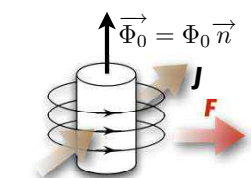


Bitter Decoration
 MgB2 crystal, 200G

L. Ya. Vinnikov et al.
 Institute of Solid State Physics,
 Chernogolovka
 Phys. Rev. B 67, 092512
 (2003)

23

Corrente e reticolo di Abrikosov

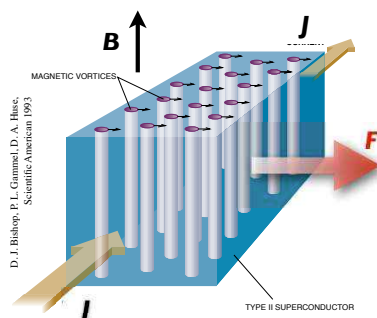


Forza (per unità di lunghezza)
 sul singolo flussone

$$\vec{F} = \vec{J} \times \vec{\Phi}_0$$

(analogia idrodinamica,
 energia corrente/corrente)

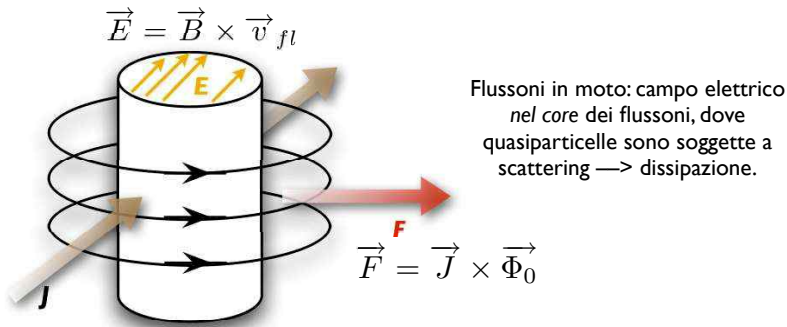
Una corrente di trasporto determina forze sui
 flussoni.
 Il reticolo si muove perpendicolarmente a \vec{B} e \vec{J} .



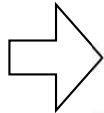
Sull'intero reticolo $\vec{F} = \vec{J} \times \vec{B}$

24

Flussoni in moto: dissipazione



Flussoni in moto: dissipazione
Flussoni immobili: resistenza nulla



Non è la corrente critica di depairing che limita il trasporto, ma il "depinning" dei flussoni

25

Ancoraggio (pinning)

Flussoni in moto: dissipazione
Flussoni immobili: resistenza nulla

Impedire il moto dei vortici:
"pinning"

Ogni flussone "paga" energia di condensazione (per unità di lunghezza):

$$\sim \frac{1}{2} \mu_0 H_c^2 \xi^2$$

Difetti: il parametro d'ordine è naturalmente depresso.
=> si risparmia energia di condensazione
=> centri preferenziali per i flussoni



Observation of Dynamic Interaction
of Vortices with Pinning Centers
by Lorentz Microscopy

Tsuyoshi Matsuda, Ken Harada, Hiroto Kasai, Osamu Kamimura, Akira Tonomura
Advanced Research Laboratory, Hitachi Ltd., Japan

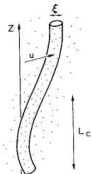
Movement of magnetic vortices around defects (Figure 5 of Matsuda et al.).
Sample is cooled to 4.5 kelvin and the magnetic field is 80 gauss. The vortices can be seen flowing around the defects (dark spots) and occasionally being trapped by the defects.

26

Difetti e reticolo

Collocandosi sul difetto
il vortice risparmia
energia di condensazione
(per unità di lunghezza):

$$\sim \frac{1}{2} \mu_0 H_c^2 \xi^2$$



difetto efficace: $\sim \xi$

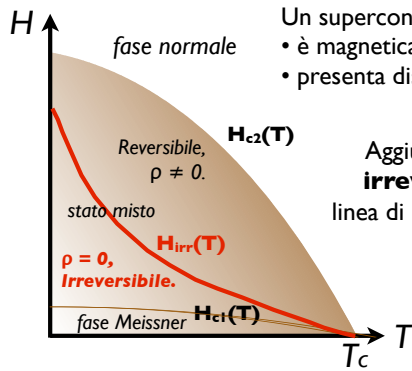
difetto non efficace: $\ll \xi$

Compete con l'energia elastica del reticolo e
del singolo flussone (deformazione dovuta alla
distribuzione non commensurata dei difetti):

=> *reticolo*: pinning puntiforme è conveniente. Il reticolo è completamente
ancorato con (relativamente) pochi centri di pinning.
[per un insieme "liquido" ogni singolo flussone dovrebbe essere individualmente ancorato]

27

Ancoraggio e irreversibilità. 1: LTS



Un superconduttore ideale nello stato misto:

- è magneticamente reversibile
- presenta dissipazione

Aggiungendo centri di pinning:
irreversibilità magnetica
linea di irreversibilità H_{irr} : prossima a H_{c2}

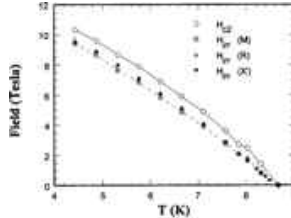


FIG. 6. Temperature dependence of H_{c2} (determined from the measured dc magnetization) and H_{irr} (determined from dc magnetization, ac susceptibility and resistivity) for a NbTi multifilamentary wire sample. Zheng et al., PRB 61 (2000)

LTS: utilizzabili per applicazioni (quasi) fino a H_{c2} .

28

Irreversibilità e levitazione

Sotto la linea di irreversibilità il flusso magnetico è bloccato dai centri di pinning:

Levitazione **stabile**



29

Irreversibilità e levitazione

Sotto la linea di irreversibilità il flusso magnetico è bloccato dai centri di pinning:

Rotazione **stabile**



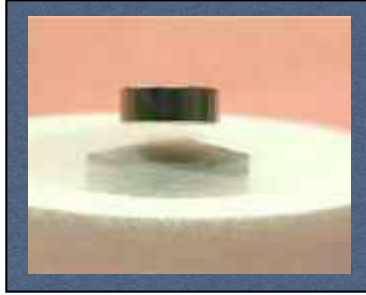
30

Irreversibilità e levitazione

Sotto la linea di irreversibilità il flusso magnetico è bloccato dai centri di pinning:

Raffreddamento in campo: il flusso viene "congelato" nei centri di pinning

Sospensione



31

Levitazione non Meissner



32

È l'ancoraggio dei flussoni che determina:

- alte correnti critiche (di "depinning")
- levitazione stabile

I difetti possono favorire l'ancoraggio.

È necessario poter ingegnerizzare i difetti.

Scala di lunghezze:
devono bloccare un flussone, diametro $\sim \xi$

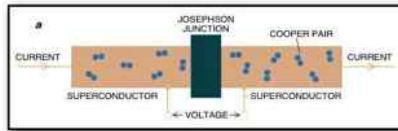
cuprati: $\xi \sim 2-5$ nm
tradizionali: $\xi \sim 10-50$ nm

33

Effetto Josephson

B. D. Josephson, 1962:

Nobel 1973



può esistere una supercorrente attraverso uno strato isolante (sottile), che dipende dalla sola differenza della fase della funzione d'onda

$$I_s = I_c \sin(\varphi_2 - \varphi_1)$$

Differenza di fase variabile nel tempo \longleftrightarrow tensione!

$$\hbar(\dot{\varphi}_2 - \dot{\varphi}_1) = -(\mu_2 - \mu_1) = 2eV$$

e la corrente superconduttiva varia nel tempo (irraggiamento!)

$$I_s = I_c \sin(\omega_J t + \varphi_0)$$

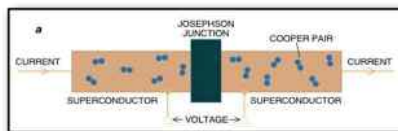
34

SQUID

Superconducting Quantum Interference Device

B. D. Josephson, 1962:

Nobel 1973



può esistere una supercorrente attraverso uno strato isolante (sottile)

Un campo magnetico anche modestissimo abbassa di molto la capacità di portare supercorrente dello strato: a un certo punto nasce una tensione.

⇒ Sensori di campo magnetico sensibilissimi ("limite quantistico")

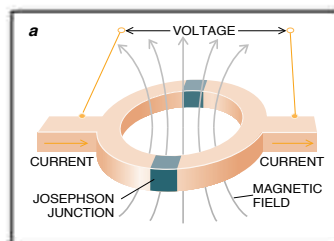


figure da J. Clarke, Scientific American, agosto 1994

35

Applicazioni (alcune)

36

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

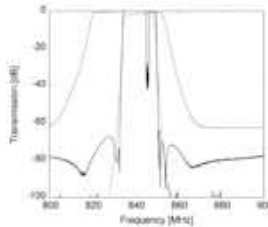
37

Filtri per comunicazioni satellitari

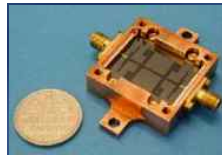
basse perdite a microonde

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.



38

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

39

Produzione di alti campi magnetici.

Elevata corrente critica di depinning.

Immagini da
risonanza magnetica
(diagnostica medica).

Alti campi = più contrasto.

*Non esistono
tecnologie alternative*



40

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

41

Produzione di alti campi magnetici.

Elevata corrente critica di depinning.

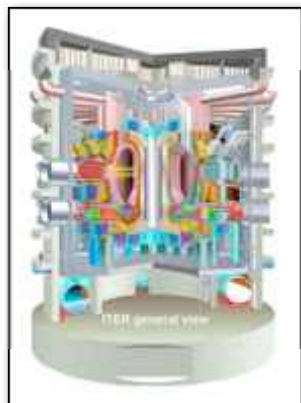
Cavi superconduttori per i magneti
nei reattori per fusione nucleare...



ENEA

sviluppo di YBCO/
BaZrO in corso

... nei grandi acceleratori

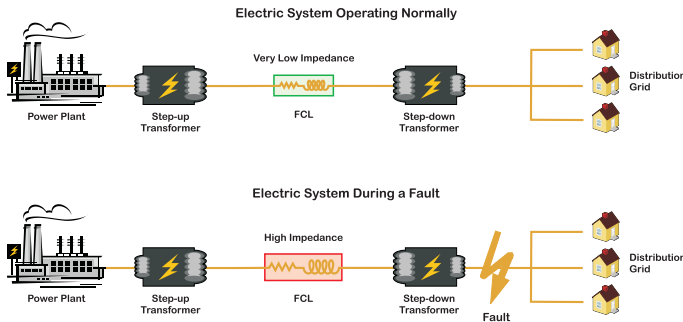


Non esistono tecnologie alternative

42

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.

43

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)
...



Non esistono tecnologie con stesse performance

44

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.

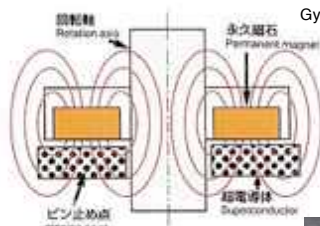
problemi:

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

45

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

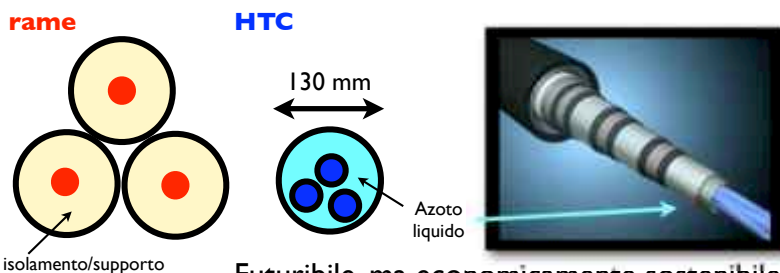
46

"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



Futuribile, ma economicamente sostenibile.

fonte: Tokyo Electric Power Company (TEPCO)

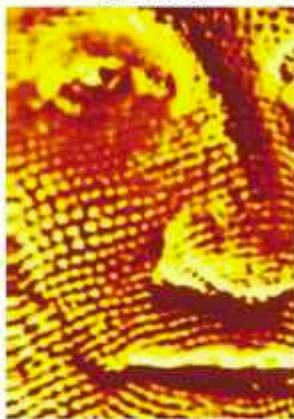
fonte: American Superconductors

47

SQUID

Superconducting Quantum Interference Device

Scansione di una banconota. Il contrasto è dato dalla diversa conducibilità elettrica dell'inchiostro.



Focolaio di epilessia individuato mediante il diverso campo magnetico generato dal cervello, e rivelato da un insieme di sensori SQUID

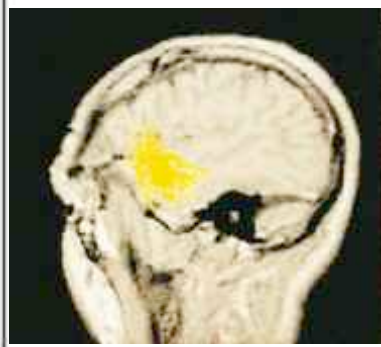


figure da J. Clarke, Scientific American, agosto 1994

48