



Torino, 21 Febbraio 2017

Il materiali superconduttori: la realizzazione del sogno del moto perpetuo

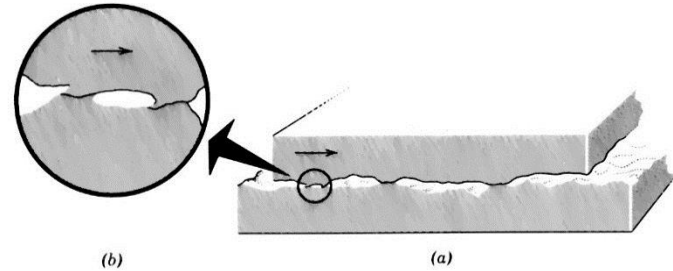
M. Truccato

Dipartimento di Fisica – Università di Torino, NIS e CNISM

marco.truccato@unito.it

L'attrito: un'esperienza quotidiana

❖ Attrito meccanico: interazione frenante tra due superfici a contatto (repulsione elettrostatica tra atomi di corpi interpenetranti)



❖ Effetti talora MOLTO positivi sul nostro movimento

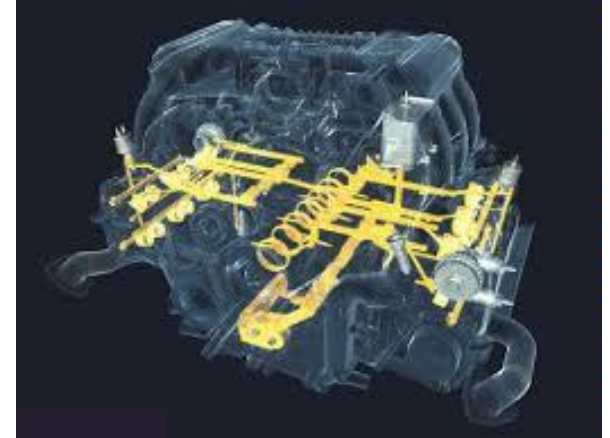


A piedi

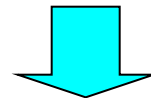


In automobile

❖ Altre volte invece è **ALTAMENTE** desiderabile eliminare o almeno ridurre l'attrito



Nel nostro mondo (macroscopico) **NON** è possibile eliminare completamente l'attrito



L'energia di movimento si disperde SEMPRE in altre forme (calore, ad esempio).

❖ **ESEMPIO IMPORTANTE:** quando la corrente passa in un filo lo scalda (resistenza elettrica, effetto Joule)



E nel mondo microscopico?

- ❖ Qui la mancanza di attrito è la regola !!!!
Infatti valgono leggi fisiche diverse (la *Meccanica Quantistica*)
- ❖ La *Meccanica Quantistica* descrive il moto degli elettroni intorno al nucleo

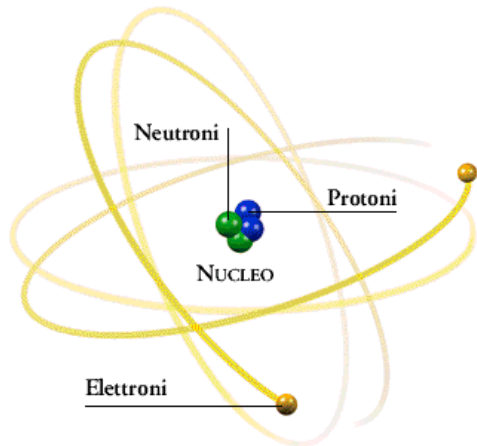


Immagine tradizionale
(inadeguata): ORBITE

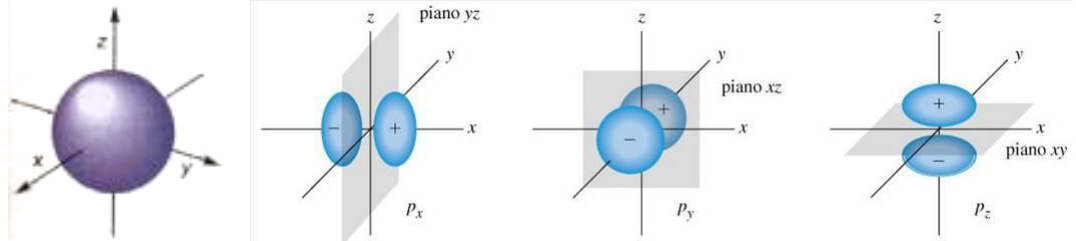
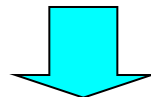
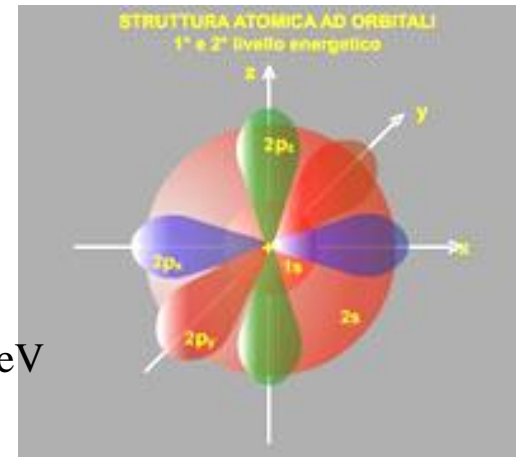


Immagine quantistica
(corretta): ORBITALI

In ogni ORBITALE l'energia
degli elettroni è COSTANTE

Ad es. per l'atomo di H: $E = -13.6 \frac{1}{n^2} \text{ eV}$

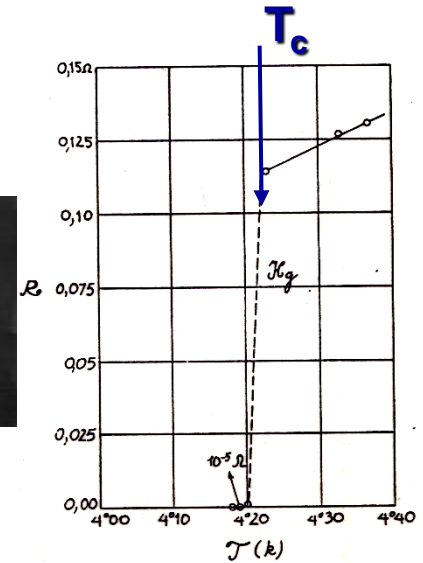


Gli elettroni, nel loro moto intorno al nucleo, si muovono senza perdere MAI energia, cioè senza
ATTRITO

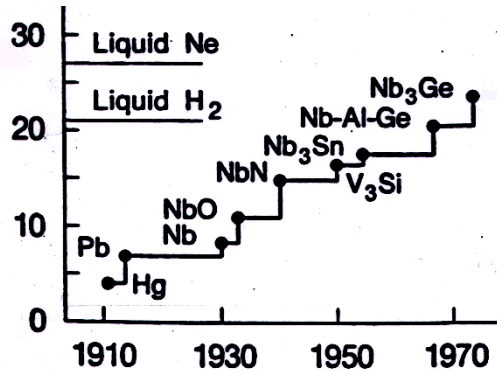
Si può osservare la stessa cosa su scala macroscopica?

❖ Sì, nei materiali SUPERCONDUTTORI, cioè che presentano **ASSENZA DI RESISTENZA ELETTRICA**.

❖ 1911: Kamerlingh Onnes scopre la superconduttività nel mercurio (premio Nobel nel 1913). $T_c = 4.2 \text{ K} \approx -269^\circ\text{C}$.
Freddo ? Dipende: l'Universo ha T media = 2.73 K

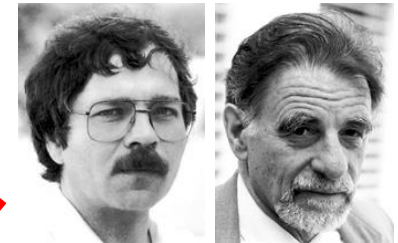
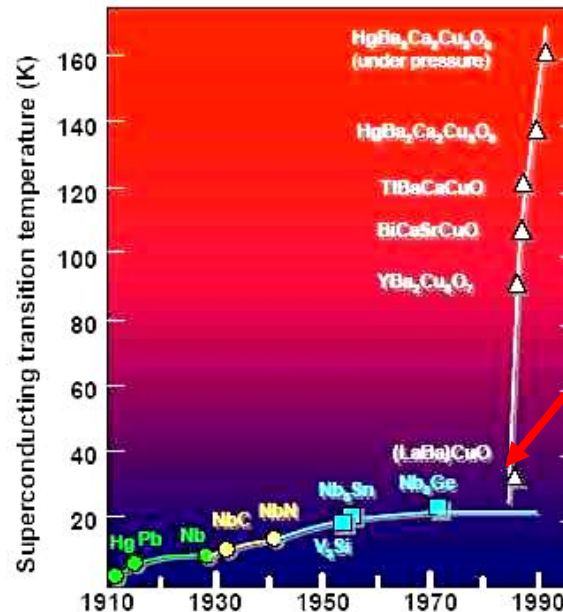


❖ Ma le temperature sono sempre così basse?



Forse sì

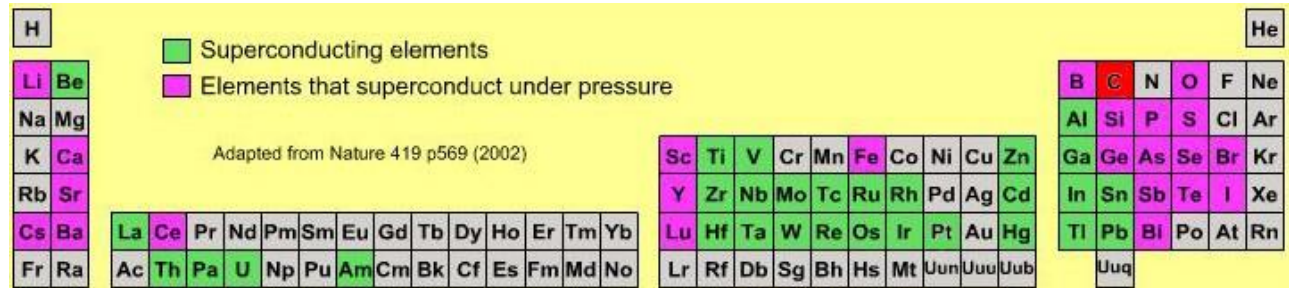
Forse no



1986: Bednorz & Müller (premio Nobel 1987):

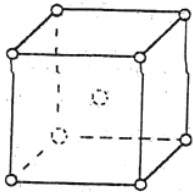
Quali sono i materiali ?

❖ La maggior parte degli elementi in forma pura

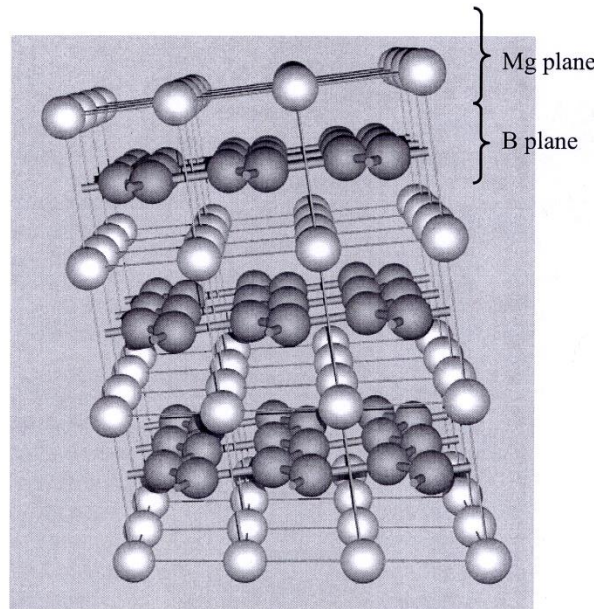


Ma complicando la struttura del materiale....

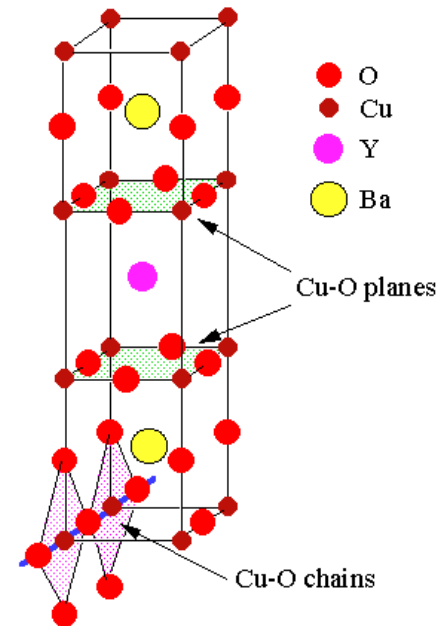
Nb ($T_c=9.25$ K)



Niobio: $T_c \approx -264^\circ\text{C}$



MgB_2 : $T_c \approx -233^\circ\text{C}$ (40K)

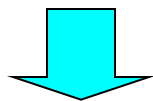


$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$: $T_c \approx -181^\circ\text{C}$ (92K)
(YBCO)

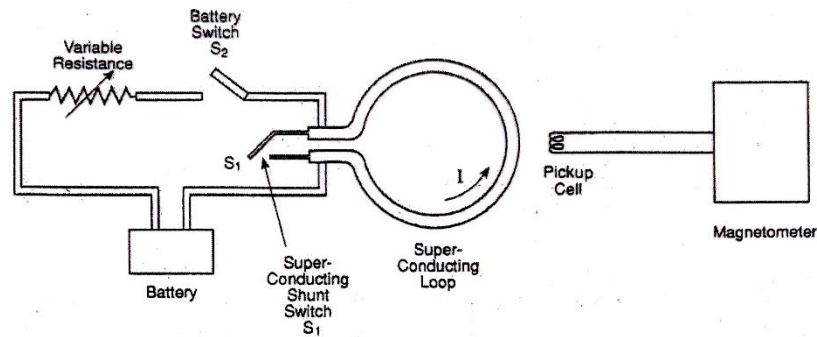
Ma è veramente senza attrito ?



❖ Tempo di decadimento non rilevabile (maggiore di un anno)

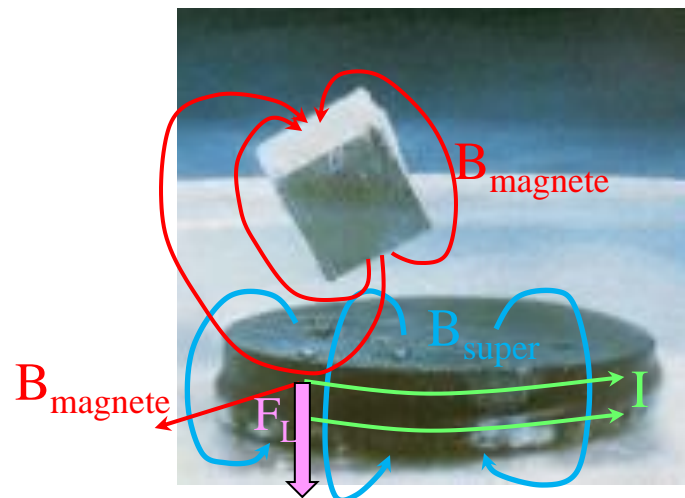
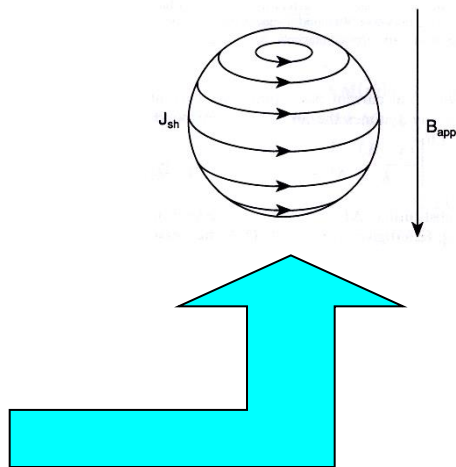
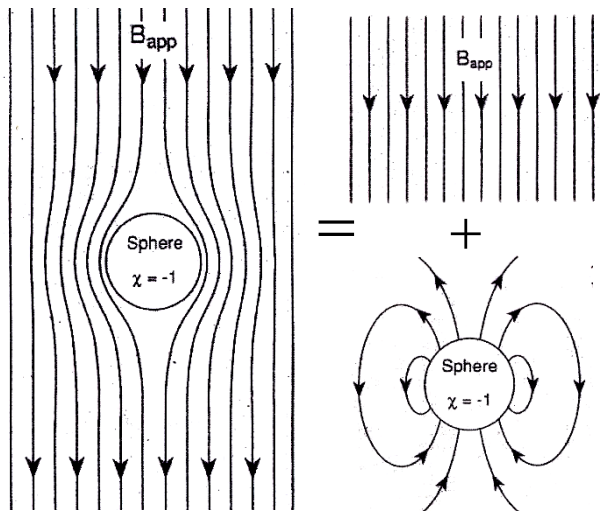


La resistenza (se c'è) è 10^{17} volte più piccola che nel rame → **R=0**



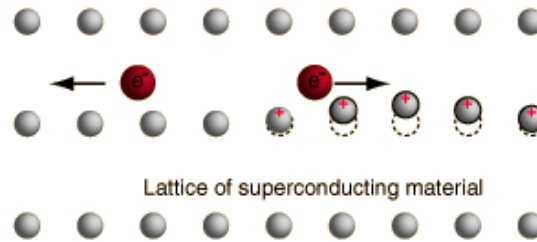
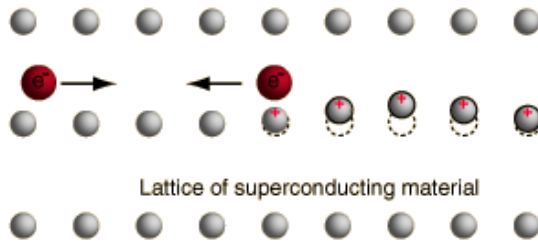
Altro fatto sorprendente: l'effetto Meissner

❖ I superconduttori espellono SEMPRE il campo magnetico: è la presenza di ENTRAMBI i fenomeni a definire la superconduttività. → **B=0**

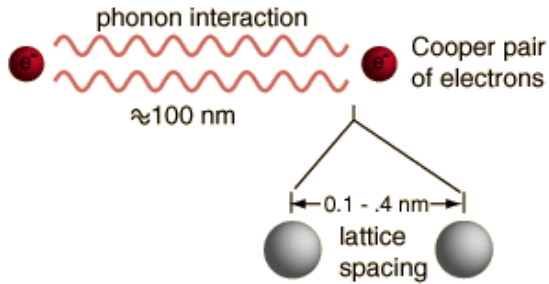


Forza di Lorentz origina repulsione:
Levitazione magnetica

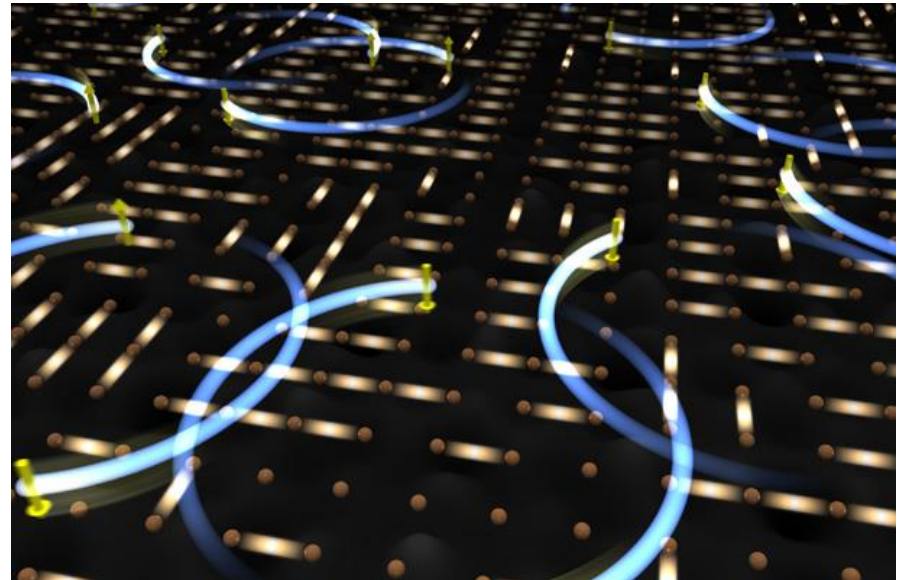
❖ INASPETTATO: in un solido gli elettroni si possono **ATTRARRE** !



❖ Così formano una coppia di Cooper

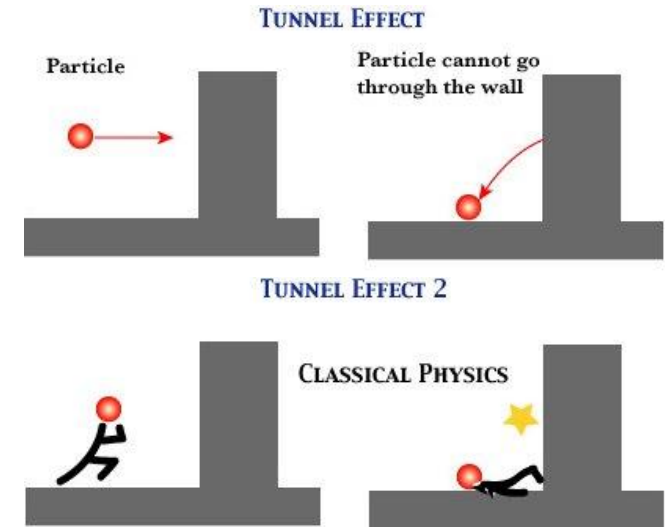
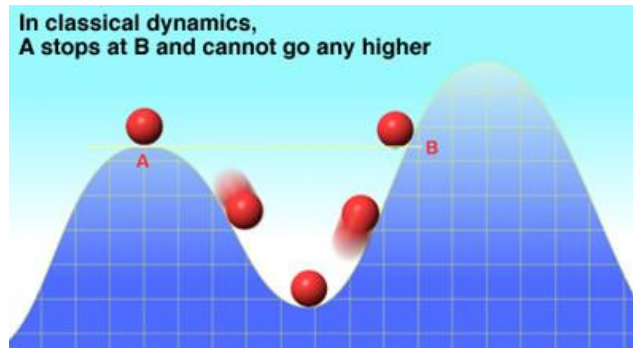


❖ In un superconduttore ce ne sono **MILIARDI** che si incrociano e si sovrappongono

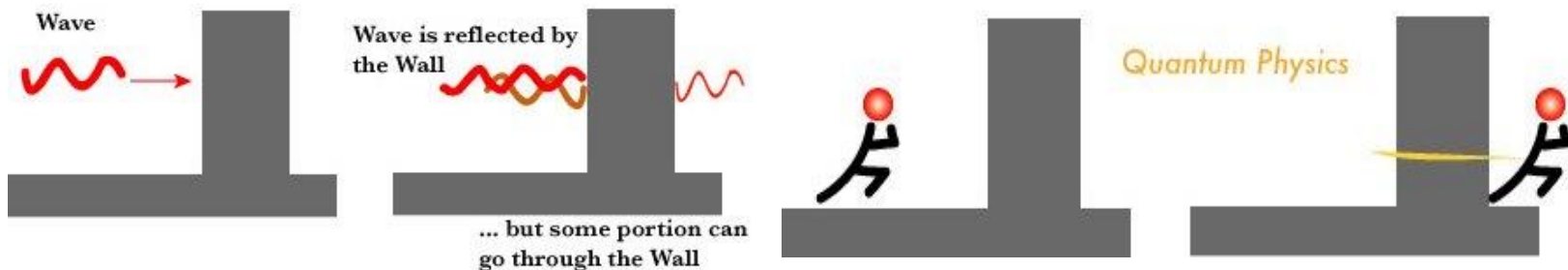


Un effetto puramente quantistico: l'effetto tunnel

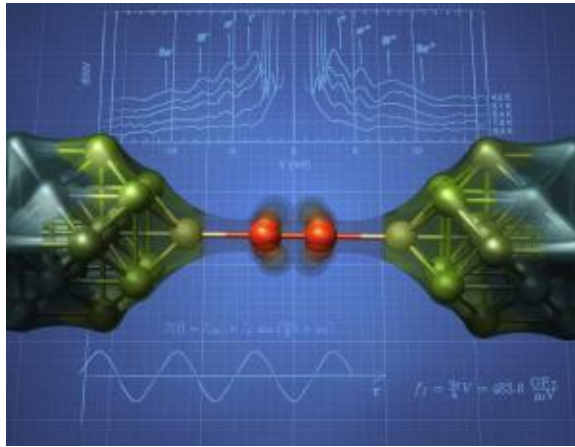
❖ L'esperienza quotidiana (fisica classica):



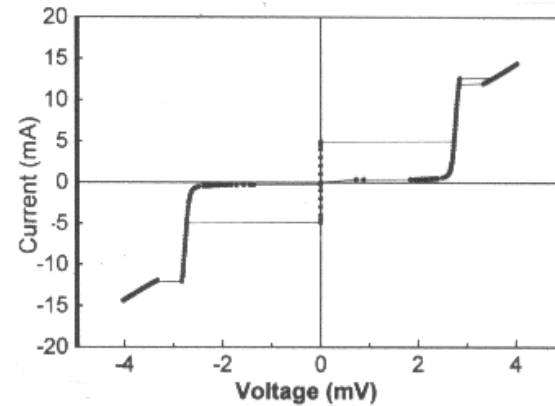
❖ L'esperienza a livello atomico (*Meccanica Quantistica*):



❖ L'effetto Josephson:

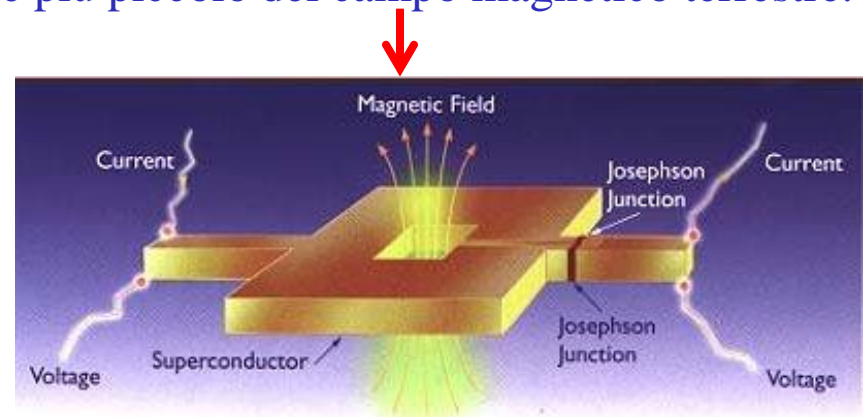
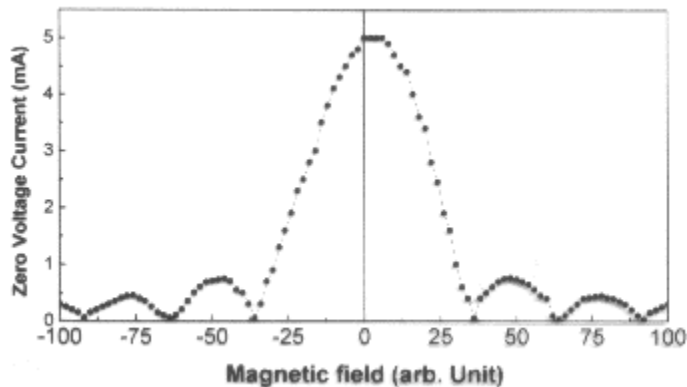


Comportamento speciale: una corrente CONTINUA non produce tensione; una tensione CONTINUA produce una corrente ALTERNATA (effetto AC);



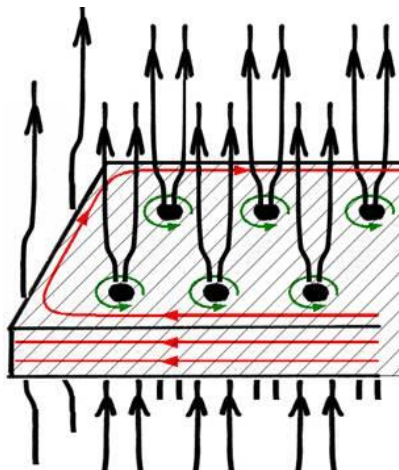
❖ Questo comportamento è modificato dal campo magnetico e ciò può essere sfruttato per misurarlo.

Lo **SQUID** ha la possibilità nominale di misurare $1\text{fT} = 10^{-15}$ T, cioè 10^{11} volte più piccolo del campo magnetico terrestre.

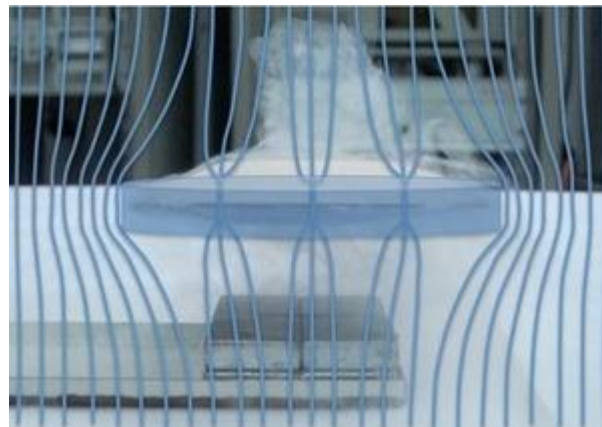


Una prima applicazione (di laboratorio): la levitazione magnetica

❖ I superconduttori includono spesso anche delle zone normali al loro interno, detti VORTICI.



❖ Spostare i vortici richiede energia:
ANCORAGGIO MAGNETICO.



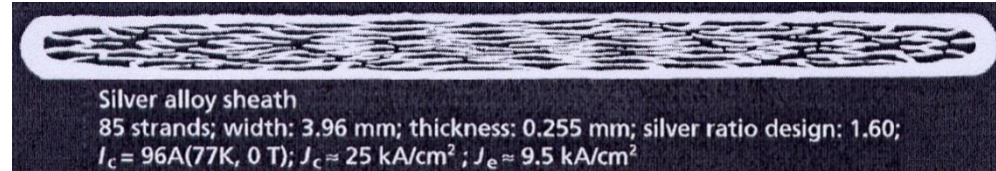
❖ Vediamoli all'opera:



Superconduttori_levitazione_corto.mp4

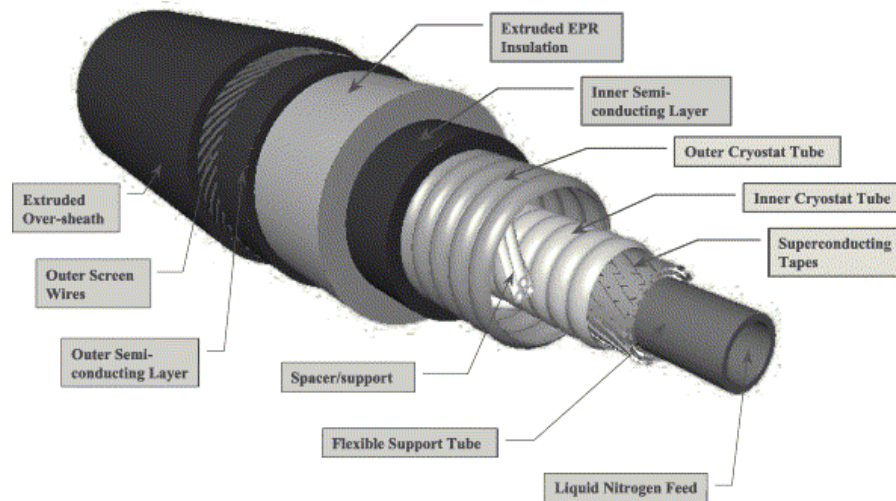
➤ **NASTRI** (per esempio Silver-Sheathed BSCCO tapes)

Nastri di prima generazione (1G): cavi di trasmissione ad alte correnti per erogazione di potenza nelle **reti urbane**



Progetto dimostrativo della sottostazione Frisbie a Detroit, Michigan (2001):

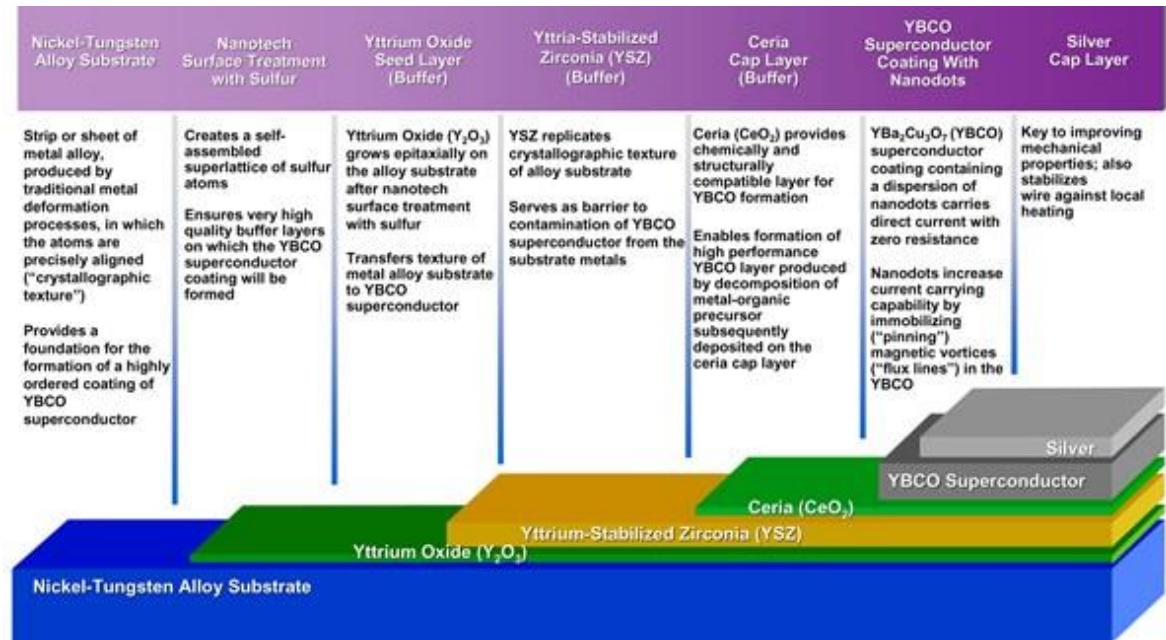
- nastri della American Superconductor Corporation (AMSC) assemblati in cavi dalla Pirelli Cavi e Sistemi (single core, warm dielectric design);
- tre cavi trasportano 2400A rms a 24 kV each su un tratto lungo 120 m, corrispondenti a una potenza trasmessa di più di 100 MVA



Nastri di seconda generazione (2G o Coated Conductor Composites): più simili alla tecnologia dei film sottili → 5 volte più economici della 1G: LS Cables (Corea) ha ordinato 3000 Km di tape Amperium ad AMSC (USA) nell'Ottobre 2010. Consegnati a partire dal 2012.



Sezione: $4.4 \times 0.2 \text{ mm}^2$



Testato nell'Aprile 2007 ad Hannover, Germania.
Cavo assemblato da Nexans e costituito di 33 nastri superconduttivi AMSC mod.344 : operativo a 138kV per una distanza di 30 metri, trasmette potenza per 435 MVA, cioè l'elettricità sufficiente per più di 250'000 case.





Struttura dei cavi MVAC (2G):



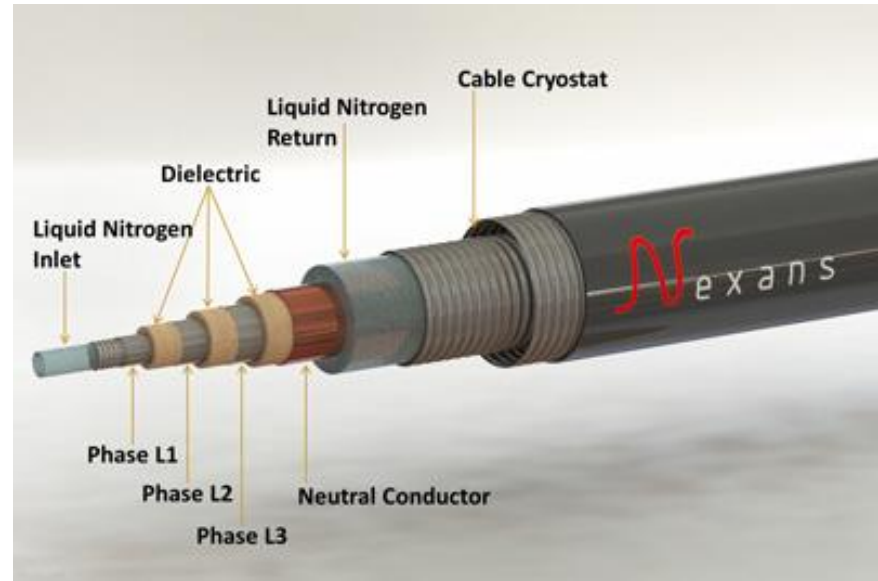
Sistema *triple core, cold dielectric design*

Vantaggi:

1. Tensioni piu' basse, cioe' minori costi per trasformatori (115kV o 69 kV invece di 230 kV o 345 kV)
2. Vita dei cavi piu' lunga (riduzione degrado dell'isolamento per riscaldamento)
3. Perdite energetiche piu' basse
4. Installazione piu' semplice: in condutture sotterranee gia' esistenti o lungo autostrade, etc, quindi tempi piu' brevi
5. Riduzione rapida congestione reti, benefici al consumatore
6. Eliminazione campi elettromagnetici

9 Aprile 2013: Test su sistema da 10 kV e 40 MW nel centro di Essen, Germania, sulla rete commerciale tra due stazioni di trasformazione distanti 1 Km.

(installazione piu' lunga al mondo, progetto AmpaCity)



Non solo trasporto, anche produzione...

Sistemi di generazione idroelettrica

Progetto HYDROGENIE:

- ❖ Generatore idroelettrico asincrono da 1.7 MW a 214 giri/min e 50 Hz
- ❖ Avvolgimenti rotore in HTSC invece che in Cu, T operativa circa 40 K
- ❖ Efficienza di conversione pari al 99% (invece del 92-93% circa)
- ❖ Riduzione dimensioni e peso fino al 70%
- ❖ Risparmi del 20% dei costi sull'intero ciclo di vita del generatore
- ❖ Messa in opera nella centrale idroelettrica di Hirschaid, Germania, nell'estate 2013
- ❖ Partner principali: CONVERTEAM Ltd, ZENERGY Power GmbH (Trithor), E.ON Wasserkraft GmbH Germany, Stirling Cryogenics & Refrigeration BV, General Electric



Centrale eolica offshore “London Array”: la piu’ grande del mondo (20 Km dalla costa).
Generatori di tipo convenzionale:

- ❖ 175 turbine Siemens SWT da 3.6 MW ciascuna
- ❖ 630 MW di potenza totale installata



Limite attuale della tecnologia convenzionale
con Cu: 6 MW per turbina



Uso di superconduttori risulta economicamente conveniente

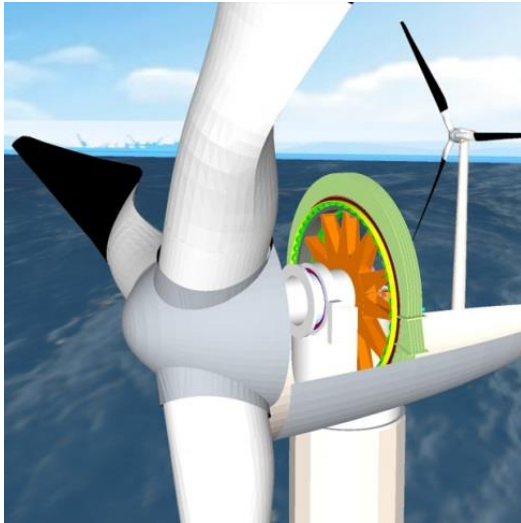
	Conventional 6MW	HTS 6MW
Generator diameter	9 m	3 m
Generator weight	450 t	120 t
Generator & Blades costs (€000)	2,000	1,820
Tower weight	800 t	345 t
Tower costs (€000)	1,360	700
Foundation weight	2,600 t	1,075 t
Foundation costs (€000)	770	675
Total costs (€000)	4,130	3,195



Sistemi di generazione eolica offshore superconduttori



Progetto SUPRAPOWER (SUPERconducting, Reliable, lightweight, And more POWERful offshore wind turbine)



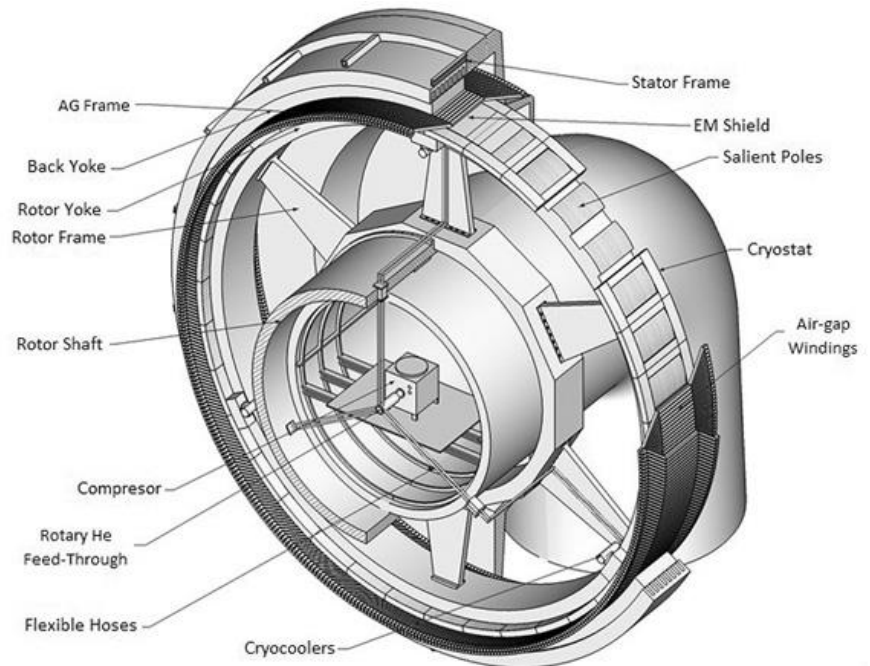
Generatore in MgB_2 , con peso di circa 200t (-30% rispetto a tecnologia tradizionale), potenza di **10 MW**, alla velocità di 10 giri/min e momento torcente di 10 $\text{MN}\cdot\text{m}$

Vantaggio:

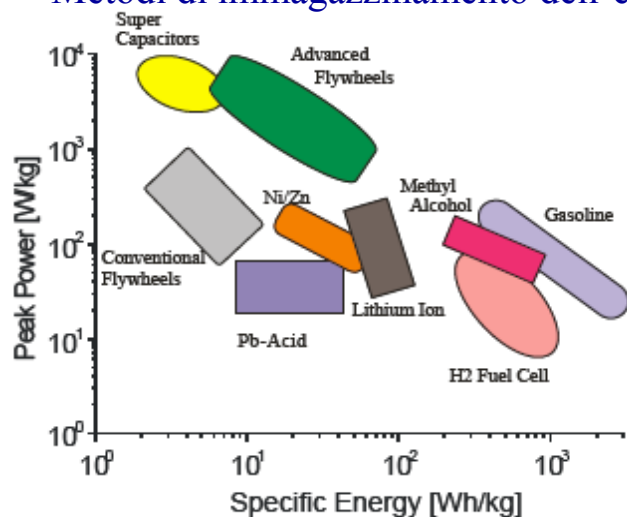
- ❖ MgB_2 : minori costi e maggiore affidabilità
- ❖ Aumento del ciclo di vita e riduzione costi operativi attraverso nuovo sistema di trasmissione diretto

Sfida:

- ❖ Nuova tecnologia di raffreddamento per elementi rotanti basata sull'assenza di liquidi refrigeranti



Metodi di immagazzinamento dell'energia



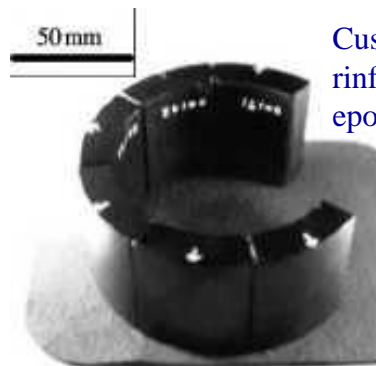
Sistemi di immagazzinamento dell'energia a volano:

- livellamento del carico: possono eliminare fluttuazioni momentanee in tensione dovute alla variabilità del carico
- Gruppi di continuità (UPS): per fornire potenza a breve termine in caso di guasti alla rete. I grandi consumatori industriali possono riportare perdite dell'ordine di **un milione di \$** per ogni interruzione di potenza

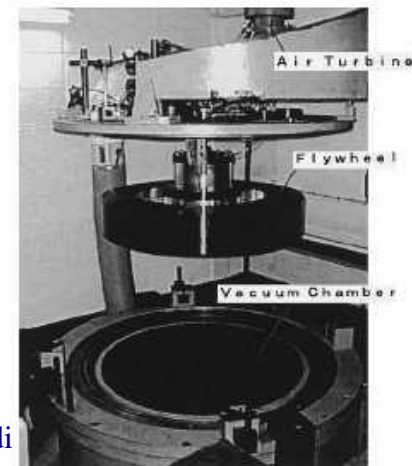
I volani tradizionali non possono essere usati a causa dell'attrito e dei sistemi di controllo troppo complessi: perdite di energia dell'ordine del 3-5% all'ora.

Cuscinetti HTSC riducono drasticamente le perdite per attrito e per correnti parassite: sono state raggiunte perdite inferiori allo 0.1% all'ora (Boeing, 2003)

Progetto giapponese di immagazzinamento di circa 10 kWh. Temperatura di lavoro di 77K e tempo minimo di rilascio tra 5 e 10 minuti.



Cuscinetti in YBCO rinforzati con resina epossidica



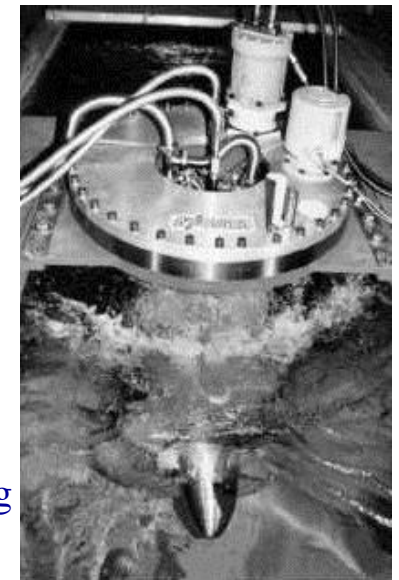
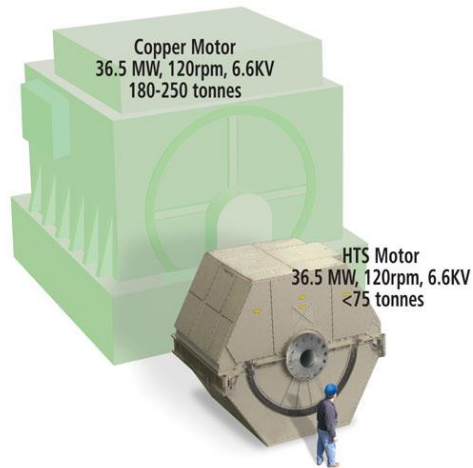
Esempio di volano con rotore rinforzato in fibra di carbonio



Sistemi di trasporto

Marittimo: **Motore AC sincrono (AMSC)**

- *Dimensioni contenute*: peso pari al 20-35% di quello di motori convenzionali di eguale potenza
- *Efficienza superiore*: fino al 98% per carichi tra il 15% e il 30% della massima potenza (15% più alto dei motori convenzionali) → riduzione significativa dei costi operativi (carburante)
- *Grande affidabilità e lunga vita operativa*: opera sempre a temperatura quasi costante, eliminando una causa tipica di guasti presenti nei motori AC non-HTSC.
- *Intrinsecamente silenzioso*
- Manutenzione e riparazione equivalenti ai motori con tecnologia standard
- Contributo alla *riduzione delle emissioni* di CO₂ dai mezzi di trasporto (25-30% delle emissioni totali)



(49000 CV, temperatura operativa < 30K fornita da **circuito di He**)
Completato il 28 Marzo 2008
Costo: 90 milioni di \$

Versione portatile che lavora con **azoto liquido**: motore da 400 KW (Japanese consortium for developing superconducting motors)

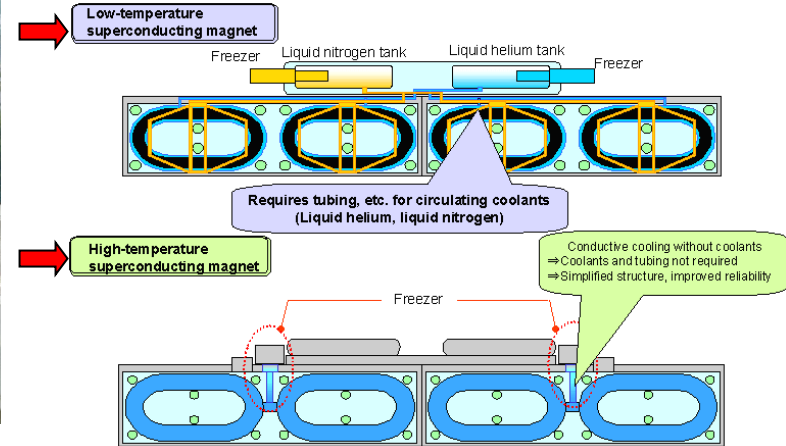
- Manovrabilità
- Assenza di marce e frizione.

MAGLEV: Attualmente, bobine di NbTi a 4.2K

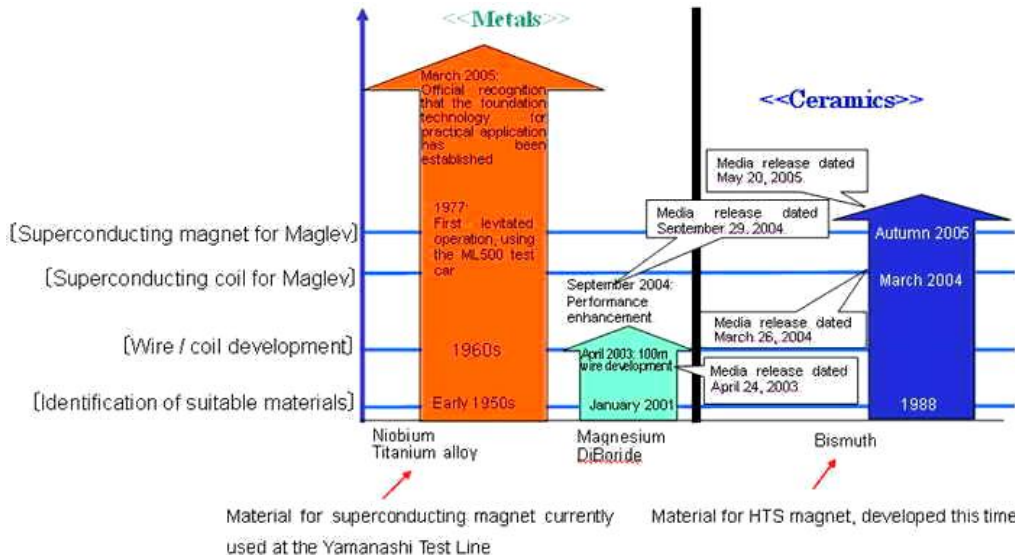


Treno MagLev
Yamanashi L0:
603 Km/h con
equipaggio il
21 Aprile 2015

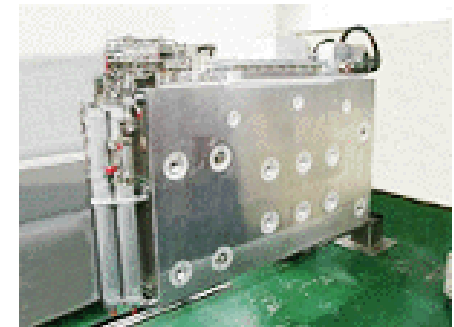
➔ Prossima generazione: magneti HTSC da 5T ($1 \times 0.5 \text{ m}^2$) che lavorano a 20 K



Confronto dei vari stadi di sviluppo dei vari materiali superconduttori:



Central Japan Railway Company



Magnete HTSC ad avvolgimento singolo (Marzo 2004)

Elettromagneti

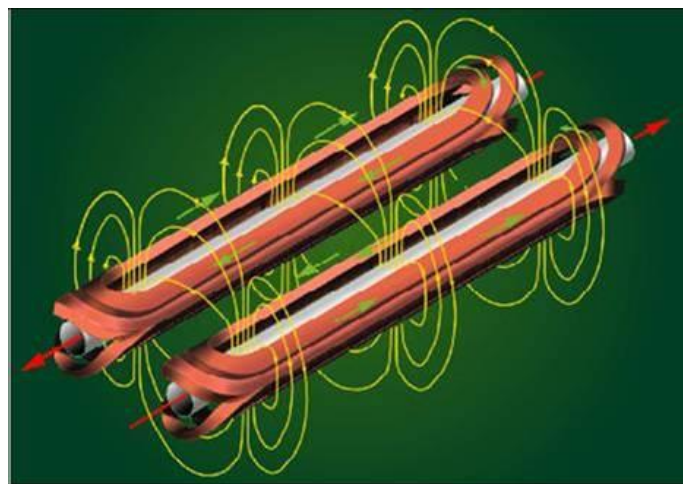
Uno degli usi piu' diffusi: quando servono campi da 1 T in su' (fino a 20-40 T)

Operazione in modalita' permanente

- ❖ Contributo alla scoperta del bosone di Higgs



Superconduttore Nb-Ti (8.3 T)



Ciascun elemento:

Lungo 14.3 m

Largo 1.2 m

Pesa 35 t



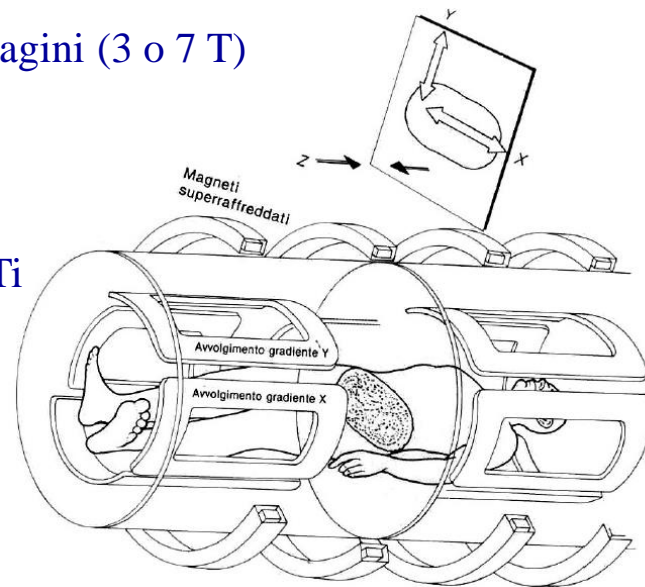
Sistemi di imaging a risonanza magnetica nucleare



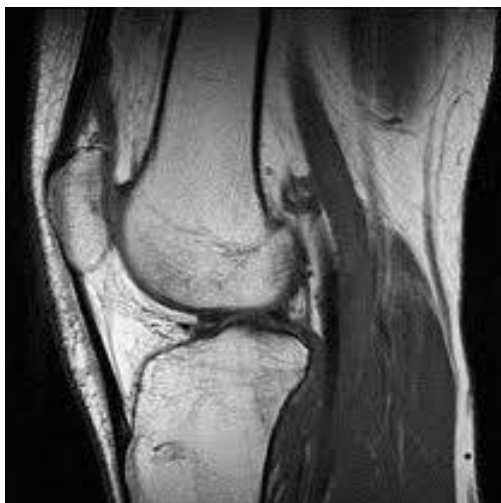
- ❖ Campi attuali sono di circa 1.5 T
- ❖ Campi piu' alti danno migliore risoluzione delle immagini (3 o 7 T)



Magneti in Nb-Ti



Ottima risoluzione

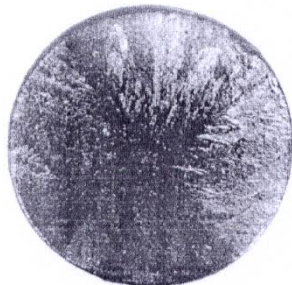


Nuovi magneti in MgB_2 : architettura aperta e niente LHe



Magneti permanenti portatili :

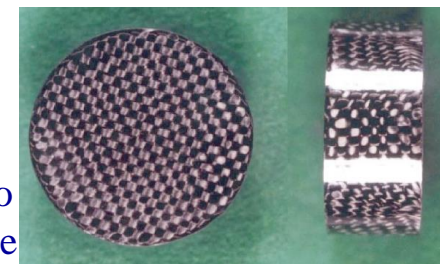
Magneti a cristallo singolo: 2 T a 77K per $\text{GdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ (diverse volte il campo dei magneti permanenti ordinari e 20000 volte il campo terrestre)



OCMG-processed Gd-Ba-Cu-O Bulk (Single-domain 48 mm ϕ sample)
 Mixing ratio Gd123:Gd211=10:5
 Trapped magnetic field 2.2T at 77K

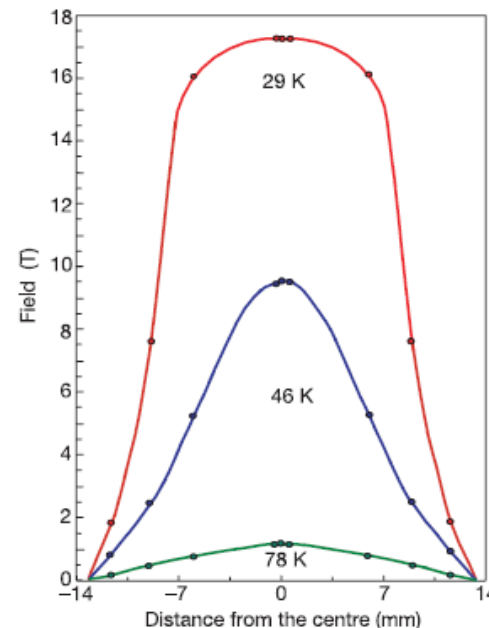
Magneti compositi:

- Impregnati di resina epossidica per migliorare la resistenza meccanica
- Avvolti in fibra di carbonio per compensare le differenze di coefficiente di espansione termica tra resina e YBCO
- Fili di Al e impregnati di lega basso fondente $\text{Bi}_{0.5}\text{-Pb}_{0.27}\text{-Sn}_{0.13}\text{-Cd}_{0.1}$ per migliorare la stabilità magnetotermica



2.65 cm di diametro, spessore 1.5 cm

Campo fornito: 17 T a 29K

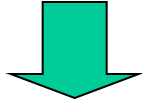


Applicazioni possibili:

1. Semplificazione dei sistemi di depurazione delle acque. Si può evitare il pretrattamento con polveri ferromagnetiche se si hanno a disposizione campi maggiori di 10 T.
2. Magneti per macchine elettriche compatte e di alta potenza

Circuiti logici :

- ❖ Tecnologia del Si ha raggiunto il limite (14nm, 3-5 GHz): problemi di dissipazione termica
- ❖ Dispositivi a quanto di flusso: velocissimi (≈ 1 ps) e a bassissima dissipazione (≈ 1 nW)

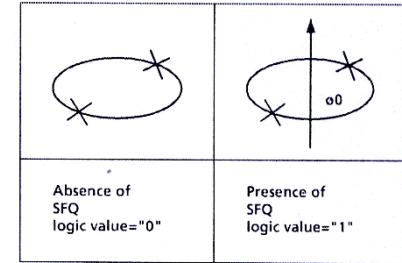


Operatività a 100 GHz e dissipazione a $0.1 \mu\text{W}$ per gate (100 volte meglio dei semiconduttori)

Attualmente:

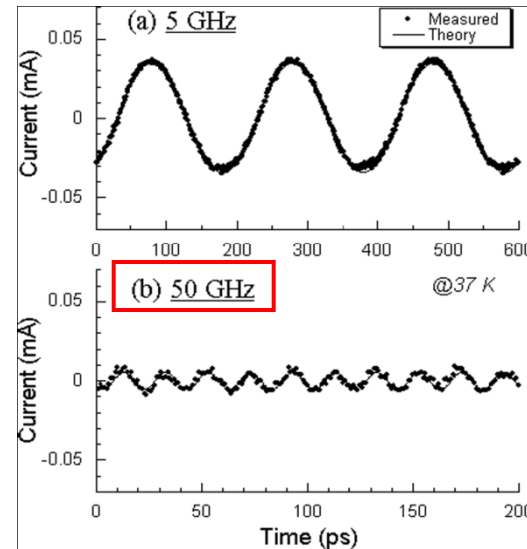
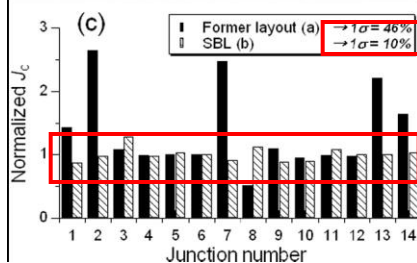
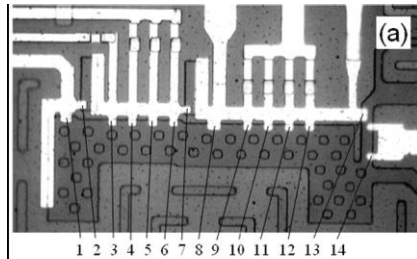
• Tecnologia al Nb ha prodotto circuiti con più di 10,000 giunzioni

• Tecnologia YBCO (Ion-beam assisted):
Campionatore a 50 GHz



Comparison between Semiconductor and Superconductor circuits

	Semiconductor	Superconductor
1. Line Width	$< 0.1 \mu\text{m}$	$0.8 \mu\text{m}$
2. Lithography	after 2005	completed
3. Structure	Three Dimensional	Two Dimensional
4. Number of Marks	> 20	≈ 10
5. Wiring	Multi-layered ; high resistance heating	Multi-layered ; no resistance no heating
6. Wafer	8 inches ; surface roughness several nm's	3 inches ; surface roughness several nm's
7. Design	Efficient Tool ; Margin. large	Small Tool ; Margin. small
8. Frequency	5 GHz (2005)	50-100 GHz
9. Output	$\approx 1\text{V}$	$\approx 0.1\text{mV}$





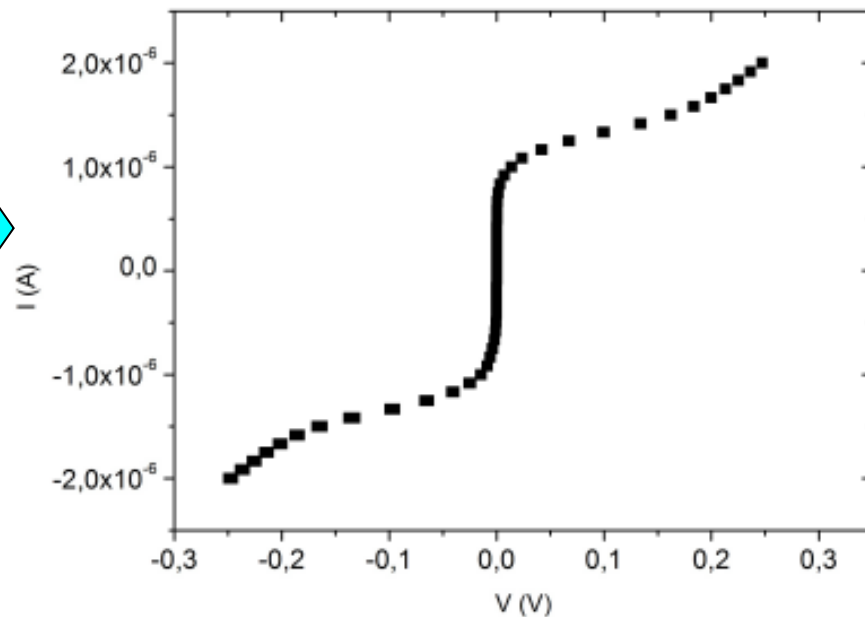
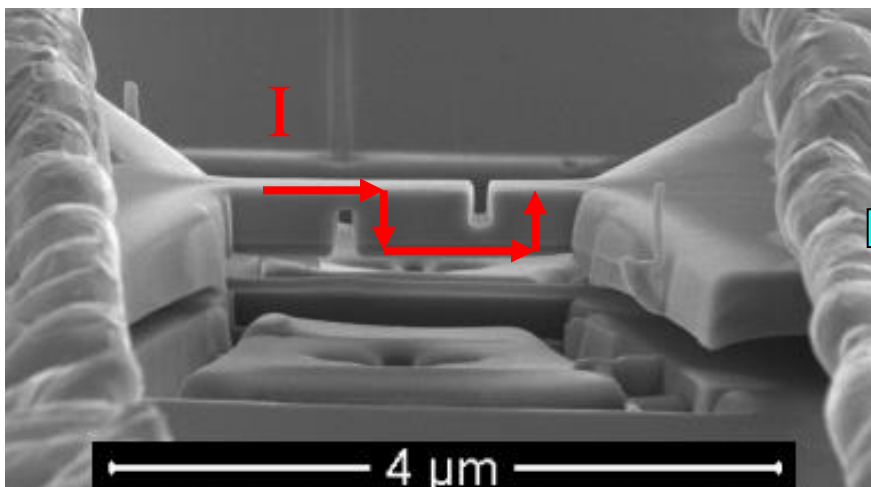
Standard di tensione :

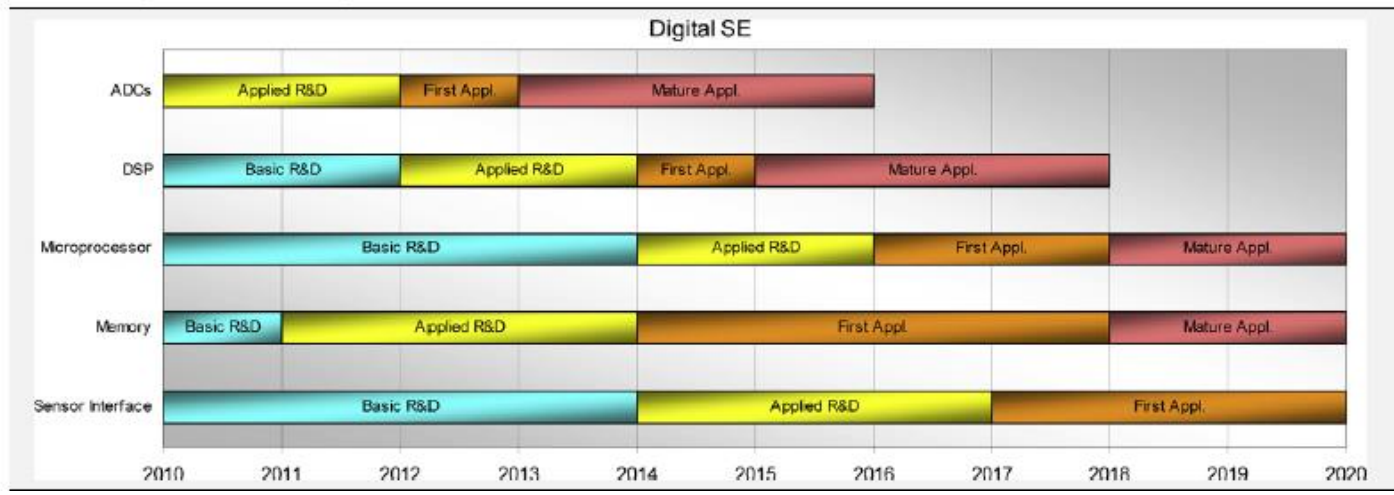


Tecnologia attuale usata negli istituti metrologici (es. INRIM a Torino) : giunzioni Josephson con superconduttori a bassa temperatura (Nb-Al₂O₃-Al-Al₂O₃-Nb)



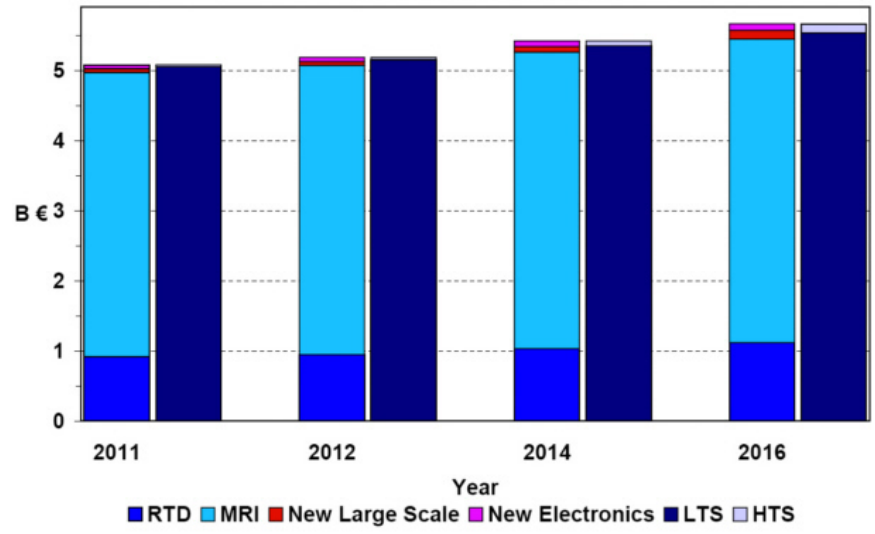
Verso una nuova tecnologia ad alta temperatura: necessari processi fotolitografici (lift-off) e nanotecnologici (FIB)





European roadmap for Superconductive Electronics (2010)

Global Market for Superconductivity Conectus, March 2012



New Markets for Large Scale & Electronics Applications of Superconductivity Conectus, March 2012

Application	2012	2013	2014	2015	2016
Magnets for New Medical Applications	Established	Established	Established	Established	Established
Fault Current Limiters	Pre-commercial	Emerging	Emerging	Emerging	Established
Power Cables	Pre-commercial	Pre-commercial	Pre-commercial	Emerging	Established
Rotating Electric Machines	Pre-commercial	Pre-commercial	Pre-commercial	Pre-commercial	Emerging
Magnetic Bearings & Levitation	Pre-commercial	Pre-commercial	Pre-commercial	Pre-commercial	Emerging
Magnetocardiography	Pre-commercial	Pre-commercial	Emerging	Emerging	Emerging
Digital Circuits	Pre-commercial	Pre-commercial	Emerging	Emerging	Emerging
Other Electronic Devices & Sensors	Pre-commercial	Pre-commercial	Emerging	Emerging	Emerging

New Large Scale & New Electronics Applications:

- Pre-commercial orders related to RTD activities, field tests and prototype operation
- Emerging market
- Established market



Eventuali approfondimenti:



Scuola di Scienze della Natura, Università di Torino (UniTo):

- ❖ Corso di laurea in Fisica
(<http://fisica.campusnet.unito.it>)
- ❖ Corso di laurea in Scienza e Tecnologia dei Materiali
(<http://stmateriale.campusnet.unito.it>)
- ❖ Gruppo di ricerca in Fisica dello Stato Solido
(<http://www.ph.unito.it/dfs/solid/>)



marco.truccato@unito.it
Dipartimento di Fisica
Via P. Giuria 1- Torino

Grazie per l'attenzione !