



Università Roma TRE
18 dicembre 2012

Superconduttori ad alta T_c : materiali, processi e applicazioni di potenza Parte II

Giuseppe CELENTANO

ENEA Centro Ricerche Frascati

Sezione Superconduttività – Unità Tecnica Fusione

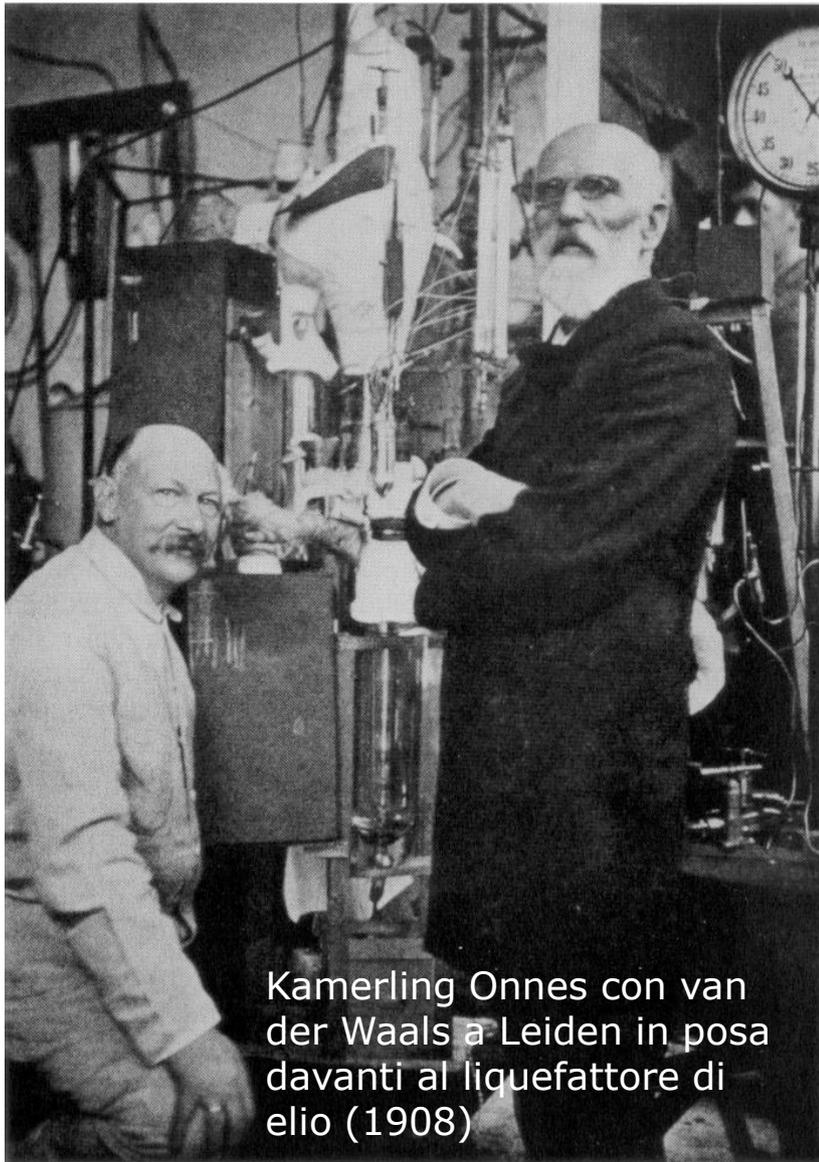
La superconduttività è un fenomeno affascinante che potrebbe/avrebbe potuto avere un impatto molto più significativo sulla società ma le possibili applicazioni sono/sono state limitate da problemi ancora solo parzialmente risolti (per es. complessità data dal raffreddamento). Le applicazioni a cui è stata accostata la superconduttività sono tantissime probabilmente anche in maniera poco rigorosa e forse alcune rimarranno solo delle proposte "stravaganti".

Comunque la superconduttività si è guadagnata un ruolo dominante nel settore dei magneti, in particolare i magneti per NMR/MRI e magneti per alte energie e la fusione per i quali la superconduttività è stata ed è vitale. La superconduttività ad alta T_c potrebbe permettere di entrare in competizione con le tecnologie tradizionali in rame se il trend di miglioramento sia dei processi di produzione sia delle prestazioni dei materiali verrà confermato nel prossimo futuro.

Alcune applicazioni di carattere più commerciale (cioè di maggiore diffusione) come i limitatori di corrente, potrebbe essere a portata di mano.

Senza scendere nel dettaglio elencando le applicazioni, cercheremo (spero!) di cogliere questi aspetti nel corso di questo seminario.

Kamerling Onnes e le sue ricerche



a inizio secolo c'era molto interesse sulle proprietà a basse temperature dei metalli. La necessità di raggiungere temperature sempre più basse lo portò a impegnarsi nella liquefazione dell'elio che ottenne con successo per la prima volta nel 1908.



Insignito del Premio NOBEL (1911)

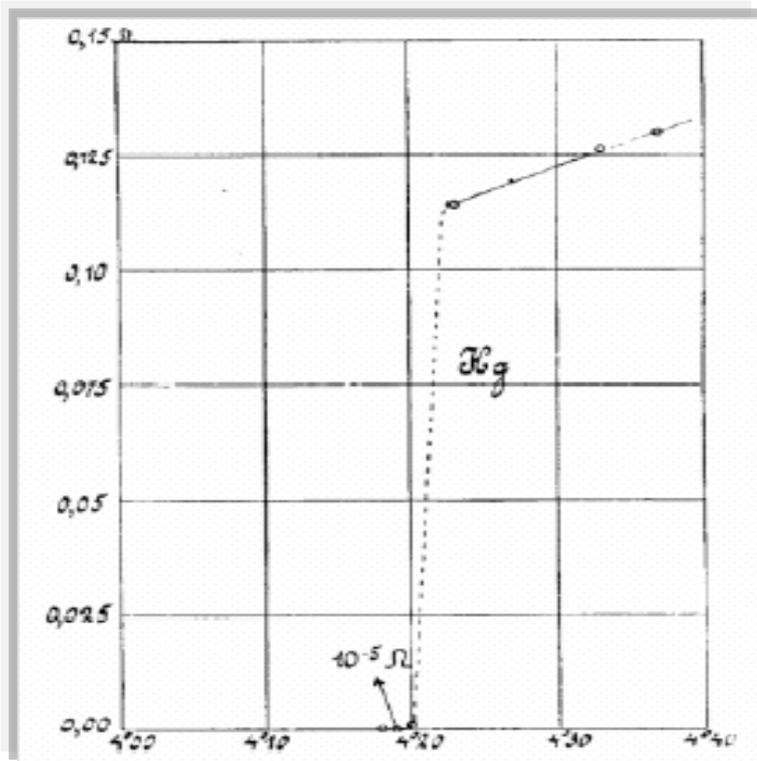
"per le sue indagini sulle proprietà della materia a basse temperature che ha portato, tra l'altro, alla produzione di elio liquido"

La scoperta...

grazie all'elio liquido poteva osservare le proprietà a bassissime temperature e notò che nel **mercurio (Hg)** la resistenza diventava immisurabile ($< 10^{-6} \Omega$)

would not yet be independent of the temperature, and 3. that at very low temperatures such as could be obtained by helium evaporating under reduced pressure the resistance would, within the limits of experimental accuracy, become zero. *Proceedings 13 II (1911) 1274.*

Lo storico grafico della $R(T)$ del **mercurio**. (1911)



@ 4.2 K, la resistenza “salta” in 0.01 K da 10^{-6} a $10^{-1} \Omega$

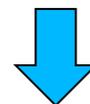
incontro annuale della Royal Netherlands Academy of Arts and Sciences

solo due anni dopo, a seguito di verifiche e ulteriori studi, comprende di avere scoperto un nuovo stato, **la superconduttività**

Mercury has passed into a new state, which on account of its extraordinary electrical properties may be called the superconductive state... The behavior of metals

H. Kamerlingh Onnes, Comm. Physical Lab., Univ. of Leiden, Suppl. 34b to 133-144, 37 (1913).

subito pensò allo sfruttamento dei superconduttori per realizzare elevati campi magnetici



La prima applicazione (prevista) della superconduttività: i magneti!

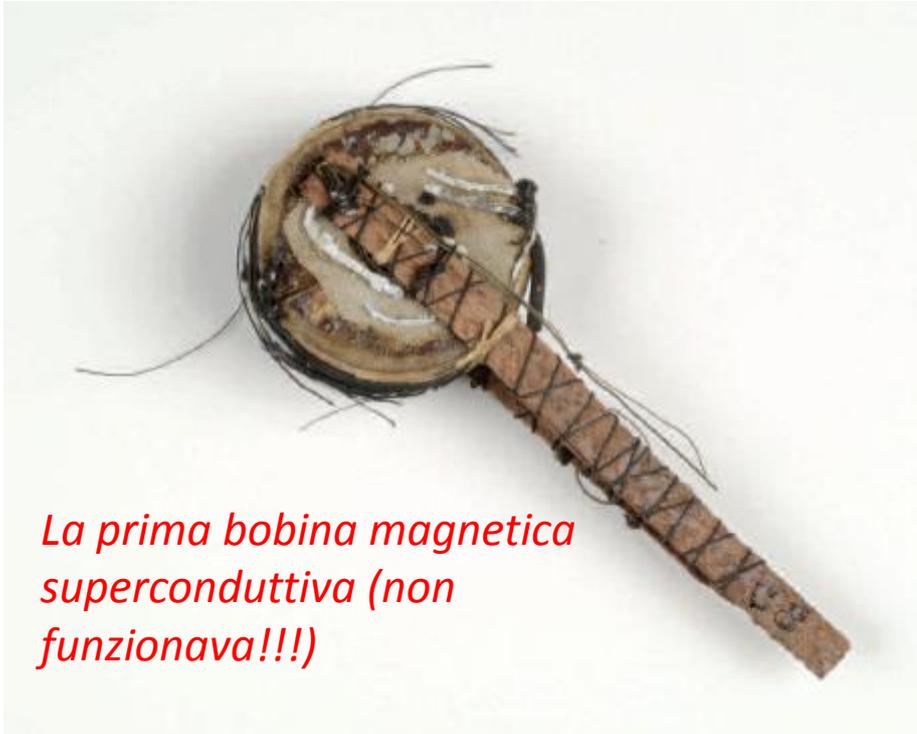
the projected contrivance succeeds and the current through the coil can be brought to 8 amperes . . . we shall approach to a field of 10 000 gauss. The solution of the problem of obtaining a field of 100 000 gauss could then be obtained by a coil of say 30 centimeters in diameter and the cooling with helium would require a plant which could be realized in Leiden with a relatively modest financial support. . . . When all outstanding questions

intervenendo al *Third International Congress of Refrigeration*, Chicago 1913, predisse che la superconduttività avrebbe permesso di raggiungere campi anche di 10 Tesla

N.B. la tecnologia dell'epoca era basata su magneti in rame/ferro: intensità massima 1.5 Tesla

non appena risolto qualche inconveniente

le prime prove fatte senza successo da Kamerlingh Onnes: aumentando la corrente si generava calore per correnti inaspettatamente basse...



La prima bobina magnetica superconduttiva (non funzionava!!!)

bobina di piombo di 1000 spire (d. 3.5 cm, h. 2 cm), preparata dal gruppo di Kamerlingh Onnes nel 1912

The insulation of the wire was obtained by putting silk between the windings, which being soaked by the liquid helium brought the windings as much as possible into contact with the bath. The coil proved to bear a current of 0.8 ampere without losing its superconductivity. There may have been bad places in the wire, where heat was developed which could not be withdrawn and which locally warmed the wire above the vanishing point of resistance. . . .

I think it will be possible to come to a higher current density . . . if

...dovuto a problemi di cattivo raffreddamento della bobina, facilmente risolvibili...

...in 50 anni!

i problemi non erano di natura tecnologica, ma più profondi di comprensione fisica dello stato superconduttivo:

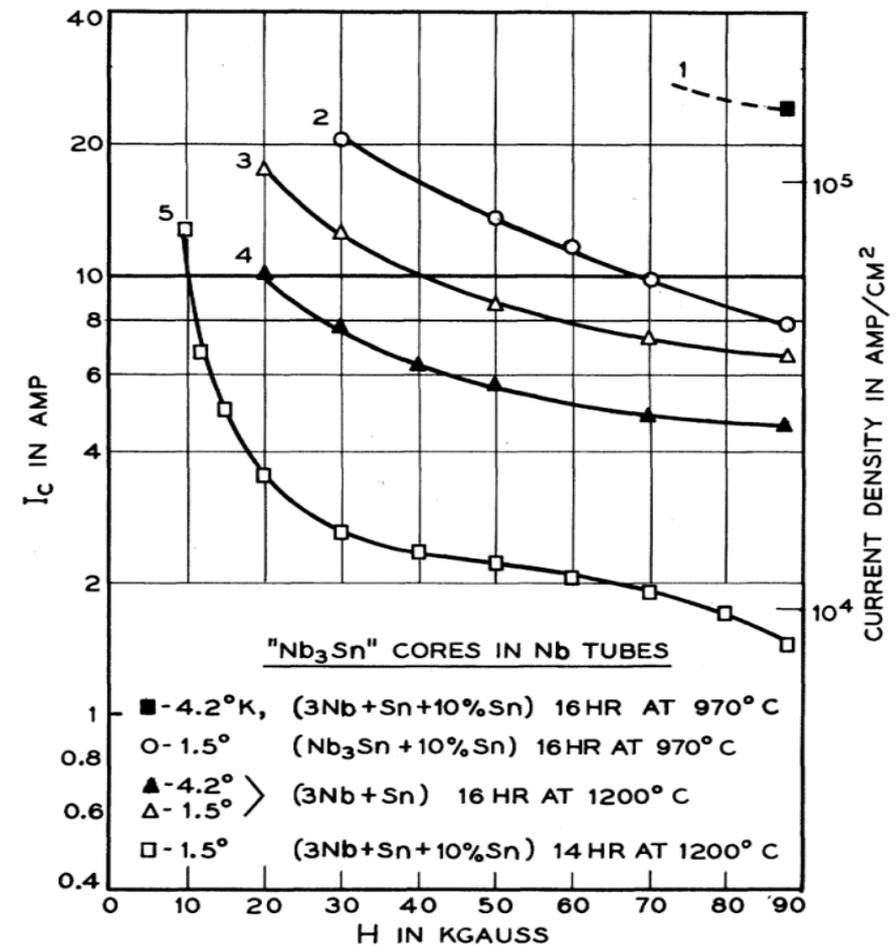
- *proprietà magnetiche;*
- *la teoria microscopica BCS (coppie di Cooper);*
- *i quanti di flusso magnetico (flussoni);*
- *il trasporto di corrente elettrica;*
- *sintesi dei materiali*

nel 1961 fu la prima evidenza di un filo superconduttore in Nb_3Sn

SUPERCONDUCTIVITY IN Nb_3Sn AT HIGH CURRENT DENSITY IN A MAGNETIC FIELD OF 88 kgauss

J. E. Kunzler, E. Buehler, F. S. L. Hsu, and J. H. Wernick
Bell Telephone Laboratories, Murray Hill, New Jersey
(Received January 9, 1961)

Phys. Rev. Lett. **6**, 89



Centinaia di superconduttori

ma solo pochi utili per le applicazioni

cuprati (a base di CuO) primi con $T_c > 77$ K

T_c (K)

Nb-Ti

9.2

Nb₃Sn

18

MgB₂

39

BiSCCO-2212

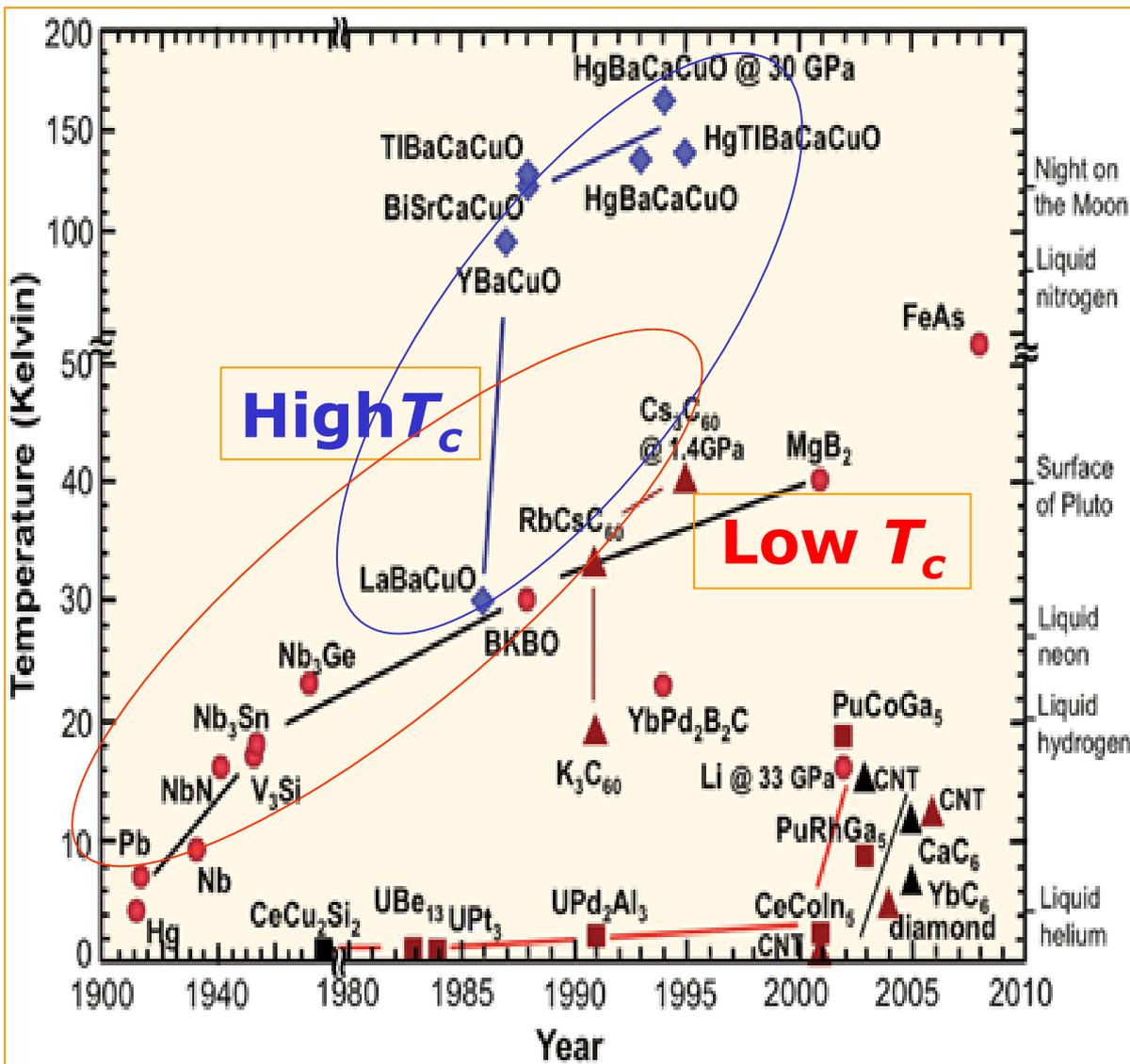
90

BiSCCO-2223

110

YBCO (ReBCO)

92 (92 – 94)⁸



I superconduttori utili per le applicazioni: « tecnologici »

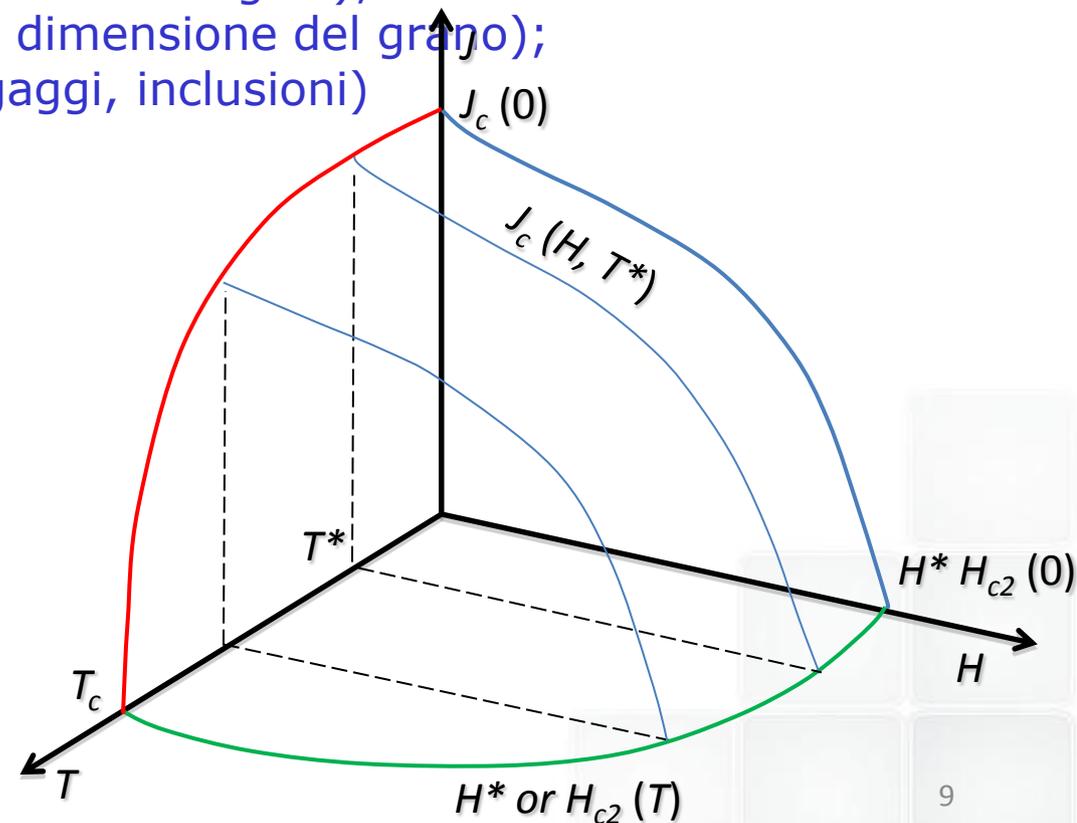
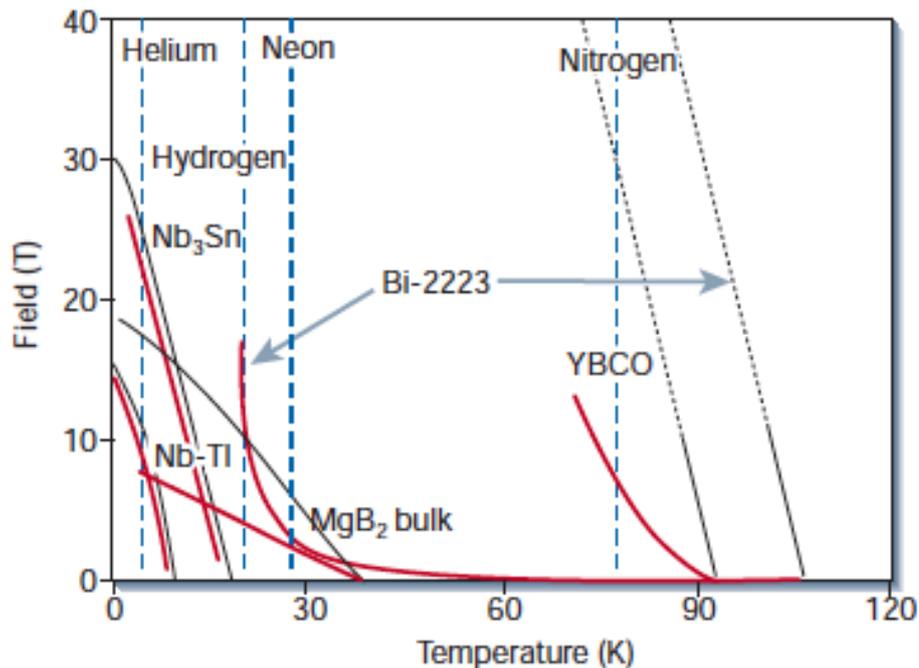
elevate prestazioni in forma di conduttore

$$J_c(T, H)$$

$H_{c2}(T)$ (per HTS, $H^*(T)$ **linea di irreversibilità**)

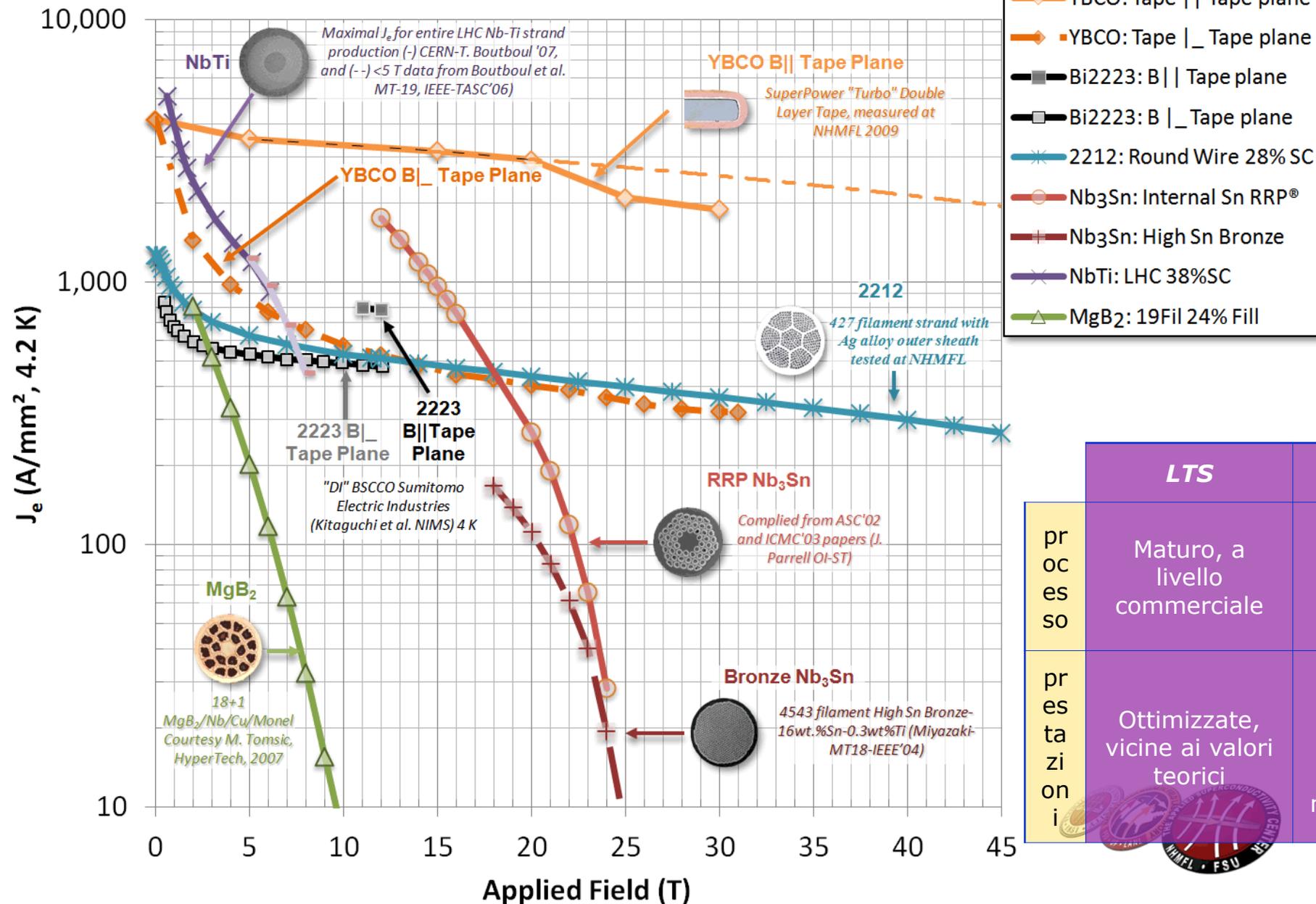
J_c in parte dipendente dal processo di formazione del materiale (processing)

- ✓ Forma (film, policristallino, cristallo singolo);
- ✓ micro-struttura (strain, bordi grano, dimensione del grano);
- ✓ difetti (difetti reticolari, drogaggi, inclusioni)



I superconduttori utili per le applicazioni: « tecnologici »

Current Density Across Entire Cross-Section



	LTS	HTS
processo	Maturo, a livello commerciale	Da ottimizzare
prestazioni	Ottimizzate, vicine ai valori teorici	Da ottimizzare, spazio per ulteriori miglioramenti

I magneti: i limiti e i vantaggi dei superconduttori

L'utilizzo dei magneti superconduttori permette di raggiungere i campi magnetici desiderati con una perdita di energia ridotta, migliore efficienza e uniformità.

es. Magnet per MRI, fatti in NbTi che lavorano a 2T

Ci sono delle applicazioni che non sarebbero possibili senza l'utilizzo di magneti superconduttori poiché richiedono campi magnetici troppo elevati per essere generati dai comuni elettromagneti a rame

Il campo magnetico generato da un solenoide è $B = n\mu_0 I$

Dove $n = N/L$ è la densità lineare di spire, N è il numero di spire totali e L è la lunghezza del solenoide

se il filo conduttore ha raggio a , si ottiene $N = L/2a$ quindi $n = 1/2a$

da cui $B \propto I/2a$

La potenza dissipata per ottenere questa intensità $W = RI^2$

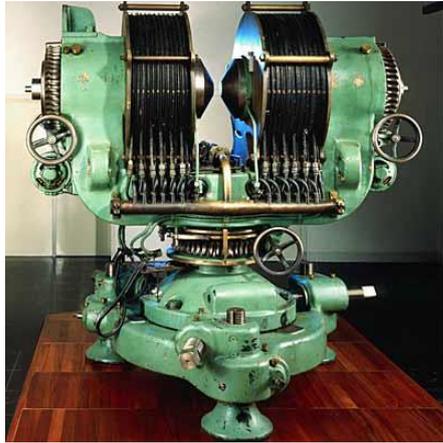
$R = \rho_{Cu} l/S$, con l e S lunghezza e sezione del filo conduttore

Esprimendo l e S in funzione del raggio a del filo mediante

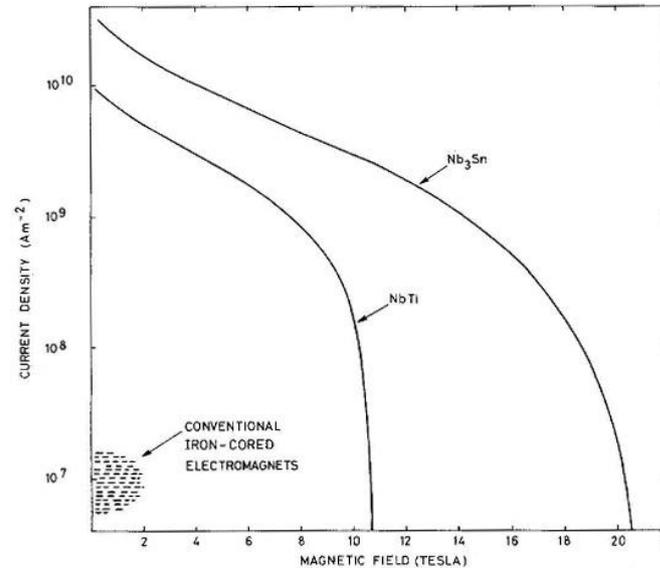
$$l = 2\pi R/2a \quad \Rightarrow \quad R = \rho_{Cu} (2\pi RL/a) / \pi a^2 \quad W \propto I^2/a^3$$
$$S = \pi a^2$$

Le dissipazioni ($\propto I^2$) crescono più velocemente del campo ($\propto I$)

I magneti: alcuni "numeri"



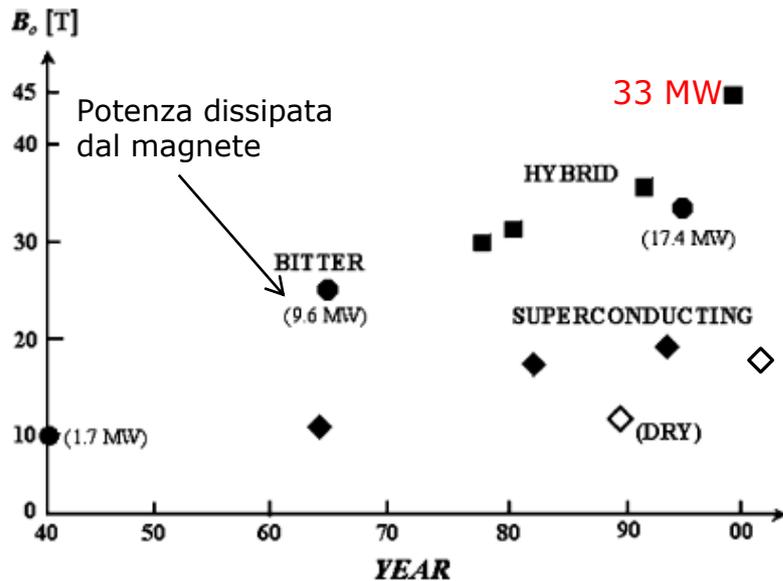
I comuni elettromagneti in rame hanno $B_{max} \sim 2$ T dettato dal limite di densità di corrente $\sim 10^7$ A/m² e per la saturazione del ferro



I materiali LTS usati per la costruzione di magneti superconduttori sono il NbTi e il Nb₃Sn che, alla temperatura dell'elio liquido (4.2 K) possono generare, rispettivamente, oltre 10 T e oltre 20 T.

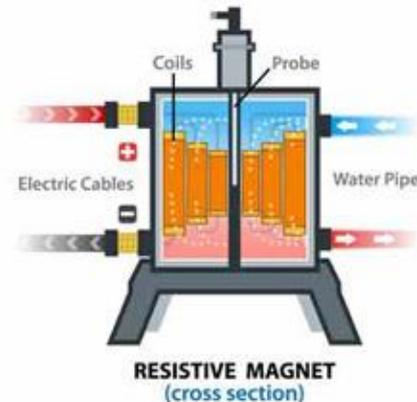
Elettromagnete con giogo in ferro (Leida 1930, 2.5 m x 2.5 m x 2.0 m, peso 14 t)

magneti ibridi non pulsati: resistivi (magneti Bitter)+ superconduttore

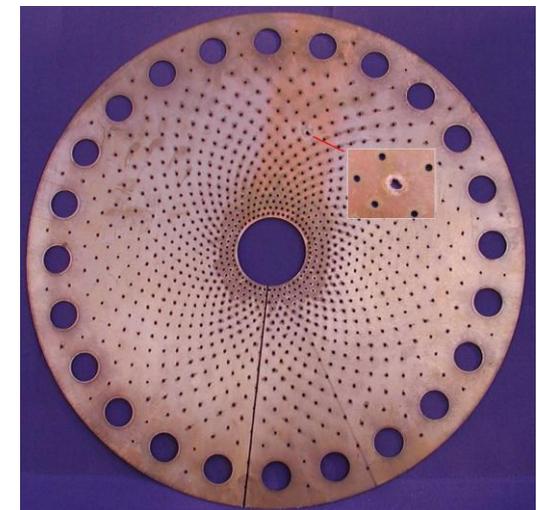


I magneti Bitter (Francis Bitter) sono magneti resistivi in cui si usano dischi di rame su cui la corrente scorre con un percorso a spirale. Il magnete è realizzato da più dischi impilati, isolati tra loro. Sono raffreddati ad acqua

5 MW = potenza necessaria per consumi domestici di 25 - 30.000 abitanti



Bitter plate per magnete da 16 T; 20 kA



I magneti: alcuni "numeri" aggiornati

HTS permetteranno di superare il limite del Nb_3Sn .

Il recente magnete da laboratorio avvolto e testati a NHMFL (Tallahassee, FL - USA) lo dimostrano

- 2008 MagLab coil – **33.8T** in 31T (Denis Markiewicz and Ken Pickard)
 - YBCO coated conductors

Specifiche tecniche

ID della spira: 25 mm;

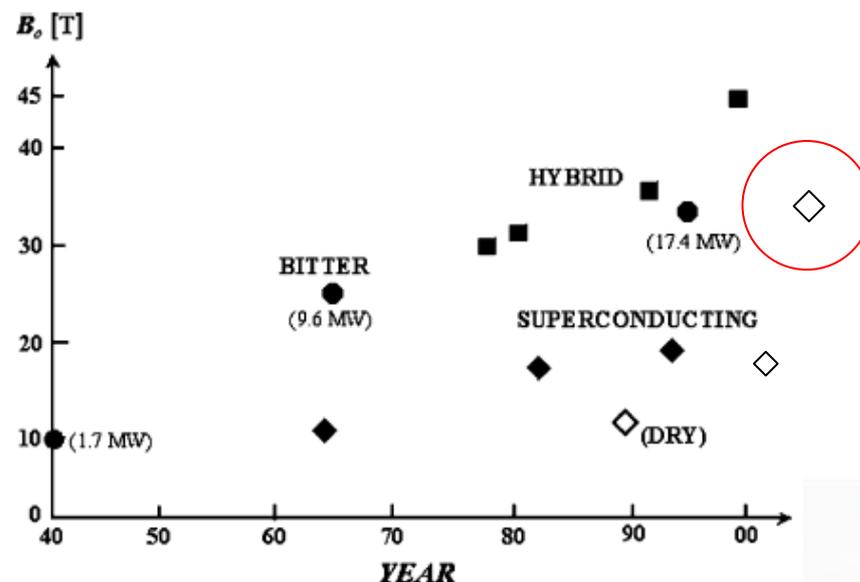
OD: 36.5 mm;

Altezza: 46.6 mm;

38 spire x 36 m di nastro

Corrente: 325 A

Prestazioni: 2.78 T in campo di background di 31 T a 4.2 K



Le applicazioni di potenza dei superconduttori



L'uso di superconduttori in dispositivi che sfruttano le elevate correnti elettriche è stato rallentato ed è ancora limitato da diversi fattori:

- la sintesi del materiale nella forma utile per l'utilizzo (fili, cavi, ecc., ecc...);
- le difficoltà tecnologiche dettate dal raffreddamento (criogenia);
- competizione con tecnologie già consolidata (rame).

Le applicazioni di potenza dei superconduttori: LTS



- Nelle applicazioni in cui la tecnologia superconduttiva è proposta per migliorare le prestazioni di un dispositivo (*replacing technology*) il parametro su cui si valuta è il costo del dispositivo;
- In alcune applicazioni la superconduttività è invece *abilitante* (contano le prestazioni, no competizione con rame), cioè ne rende possibile la realizzazione.

I superconduttori **LTS** operano a 4.2 K. A causa dei costi di raffreddamento **sono una tecnologia abilitante**

- Grandi magneti per: (applicazione di nicchia)
 - *i reattori per la fusione a confinamento magnetico;*
 - *esperimenti fisica delle alte energie* (acceleratori, LHC);
- *magneti per NMR/MRI*: unica vera applicazione commerciale (fatturato 2011 4G€, Siemens, General Electric, Bruker)

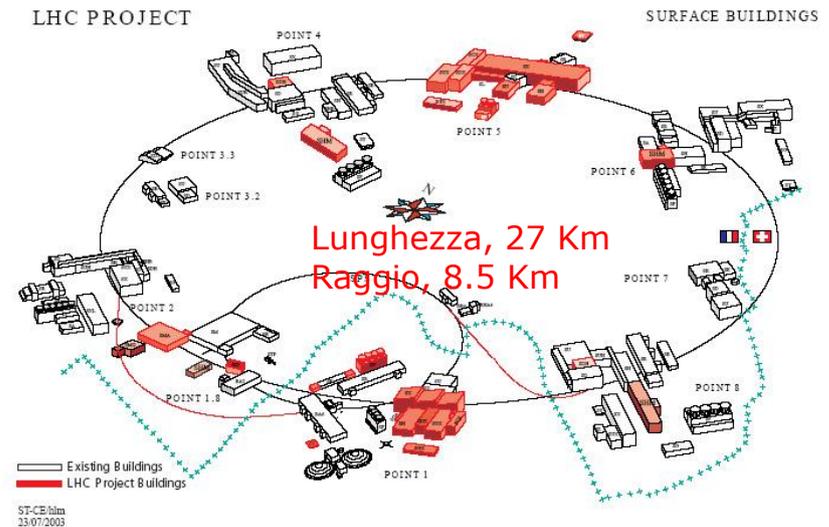
applicazioni	Abilitante ?
Magneti per la Fusione	Sì
SMES	Sì
Generatori/motori	No
Trasmissione/cavi	No
Trasformatori	No
Fault current limiter	No
MRI/MRI	Sì
High energy Physics	Sì

I magneti per LHC

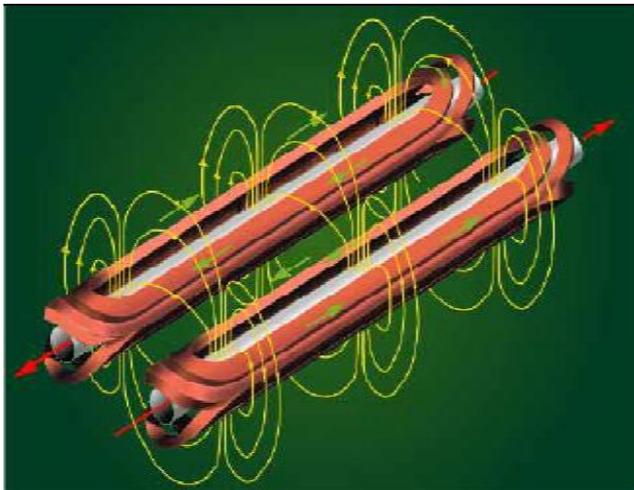
Il Large Hadron Collider (LHC) rappresenta **lo strumento più potente mai costruito per l'indagine delle particelle elementari.**

LHC

- L'energia più alta fra tutti gli acceleratori di particelle
- I fasci di particelle più intensi

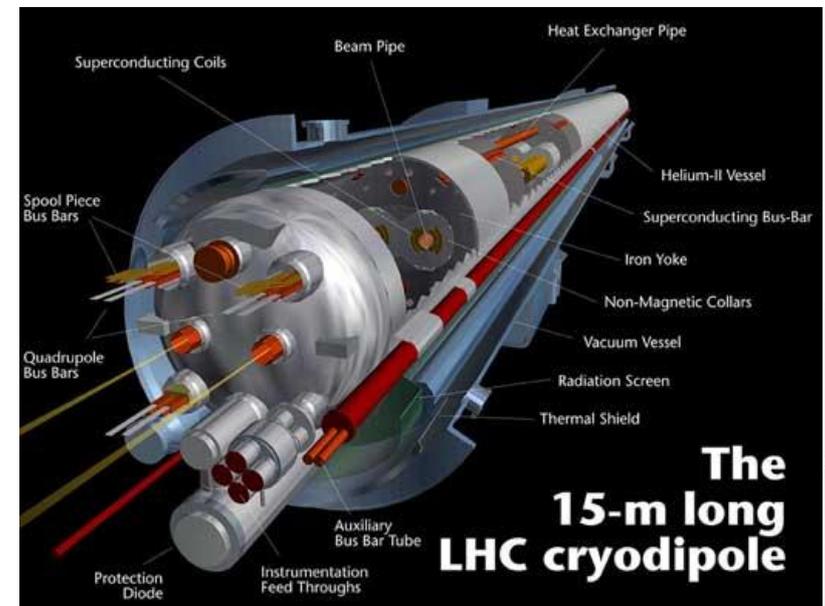


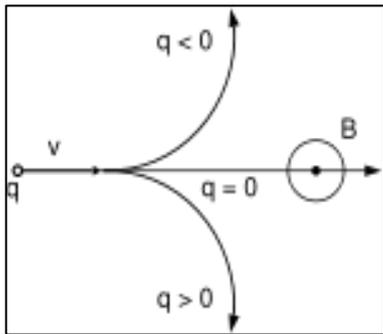
Dipoli per la curvatura



La parte più importante del sistema magnetico consiste di **1232** dipoli magnetici

Materiale: **Nb-Ti**
Temperatura: **1.9 K**
Lunghezza: **16 m**
Peso: **35 t**
Max campo: **8.33 T**





Le particelle sono curvate mediante l'applicazione di un campo magnetico per effetto della forza di Lorentz

Il raggio di curvatura della particella è inversamente proporzionale al campo magnetico applicato

$$R = mv/qB$$

La criogenia consuma circa 40 MW di potenza elettrica.

Un ipotetico LHC in metallo normale:

- utilizzerebbe magneti resistivi funzionanti a **1.8 T** (limite posto dalla saturazione del ferro);
- la circonferenza dovrebbe essere circa **100 km**;
- consumo elettrico raggiungerebbe **900 MW** (una centrale nucleare...), portando a costi proibitivi per le infrastrutture e la gestione.

I magneti per il biomedicale NMR/MRI

NMR: tecnica spettroscopica molto potente per lo studio e l'identificazione dei materiali

MRI: tecnica di immagine basata sulla spettroscopia NMR

Si basa sullo split degli orbitali nucleari quando sottoposti ad un campo magnetico costante B_0 (**Effetto Zeeman**). I livelli degeneri si separano in livelli energetici con ΔE :

$$\Delta E = h\gamma B_0 / 2\pi = h\nu_L$$

$$\nu_L = \gamma B_0 / 2\pi = \text{frequenza di Larmor}$$

γ = rapporto giroscopico = 42 MHz/T per il nucleo dell'idrogeno (protone)

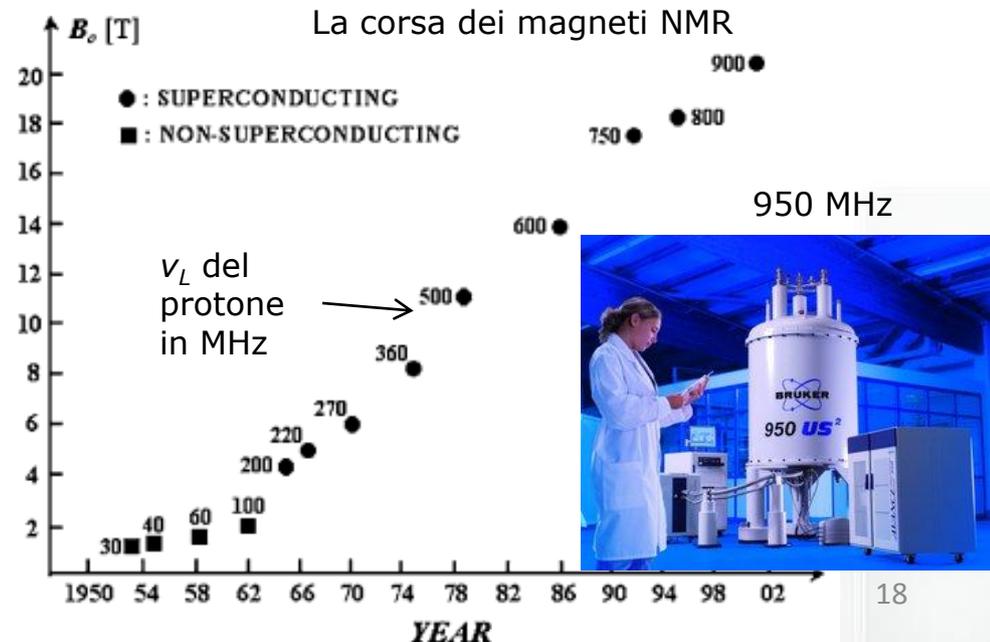
Si misura l'assorbimento di una radiazione incidente al variare della frequenza

La qualità della misura è proporzionale a B_0 (risoluzione e rapporto segnale/rumore), stabilità e uniformità

Magnet per NMR

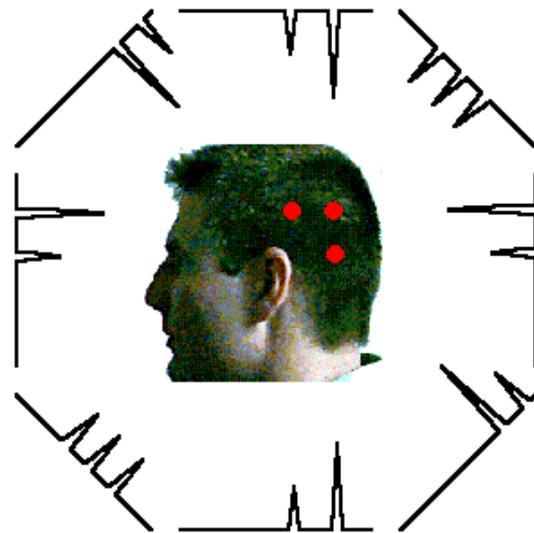
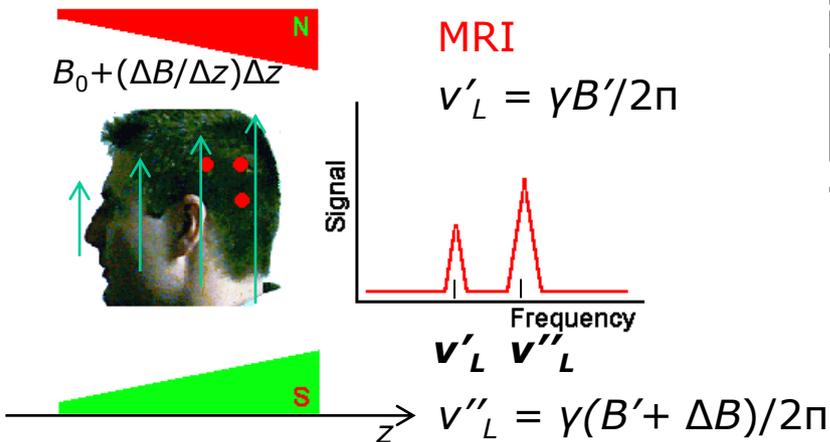
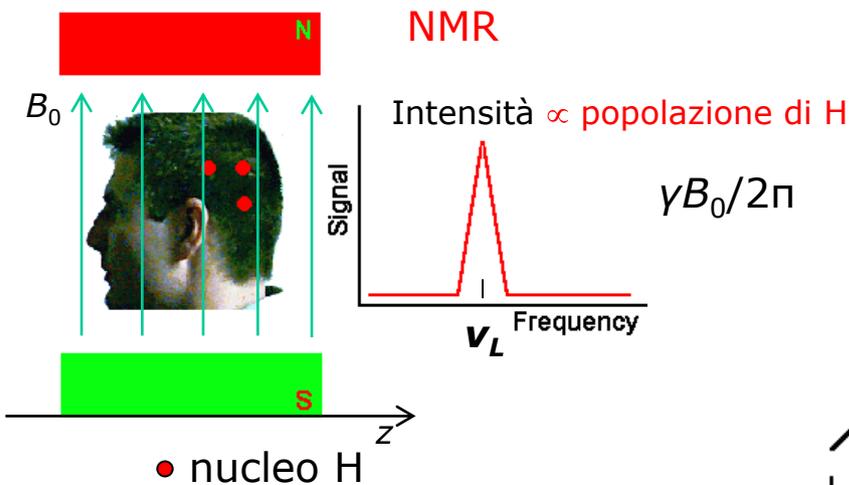
Superconduttore **Nb₃Sn**

In una *visione classica* l'effetto Zeeman è dovuto all'allineamento del momento magnetico del nucleo nella direzione del campo esterno per cui vengono a crearsi due stati uno, ad energia più alta, in cui il suo momento magnetico si oppone al campo esterno e l'altro, ad energia più bassa, in cui è allineato.

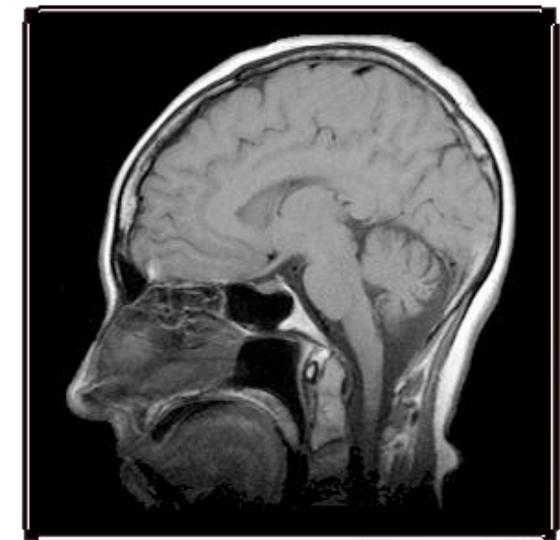


I magneti per il biomedicale NMR/MRI

Per ottenere immagini dalla NMR c'è bisogno di un gradiente del campo magnetico in modo di rendere la frequenza di risonanza ν_L dipendente dalla posizione



sovrapponendo gradienti in diverse direzioni e rielaborando...



...si ottiene l'immagine

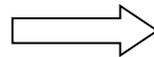
I magneti per il biomedicale NMR/MRI

Tipici valori

$$\Delta B/\Delta z = 20 - 100 \text{ mT/metro}$$

$$\text{area di indagine} = 0.5 \text{ m}$$

$$\text{risoluzione spaziale} < 1 \text{ mm}$$



$$\text{variazione di } B \text{ nell'area di indagine } \Delta B/\Delta z \\ \times 0.5 = 10 \text{ mT}$$

per cui per poter apprezzare variazioni su scala di 1 mm bisogna risolvere un campo pari a

$$\delta B < 10 \text{ mT} / 0.5 = 2 \times 10^{-5} \text{ T}$$

il campo B_0 deve, quindi, essere uniforme e stabile a meno di $\delta B = 2 \times 10^{-5} \text{ T}$. Questo grado di qualità per le intensità richieste è raggiungibile solo con i superconduttori

Costo: 1 M€/T

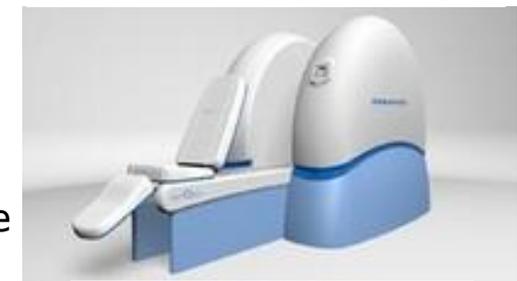
campi magnetici: 0.5 - 1.5 T (a breve 3 T)

magneti superconduttori: NbTi



MRI da 0.5 T prodotto e commercializzato da ditta Italiana!!

PARAMed
MEDICAL SYSTEMS



Columbus
Superconductors
GRUPPO MALACALZA

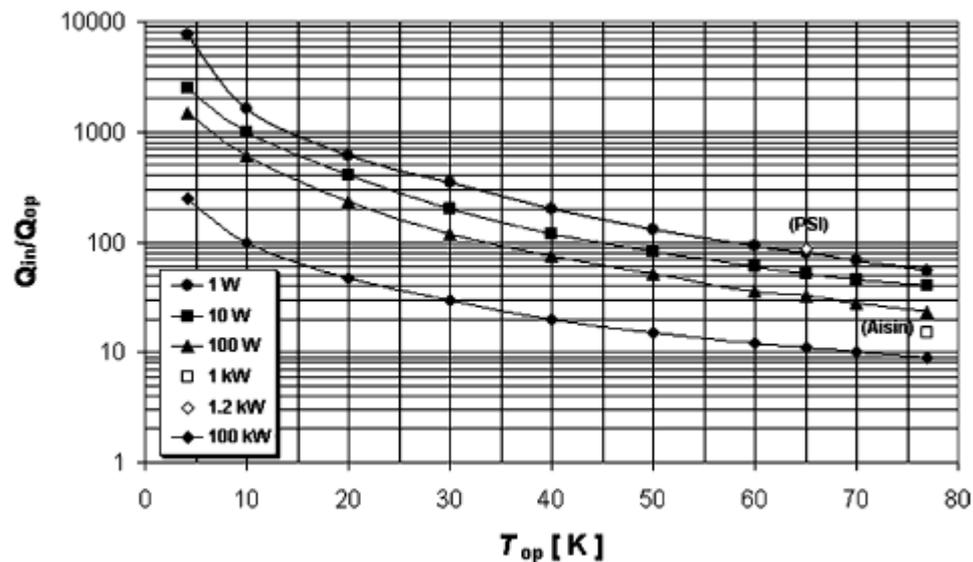
Che significa operare a $T > 4.2$ K?

Possibilità di lavorare a $T > 4.2$ K significa risparmiare soldi e semplificare

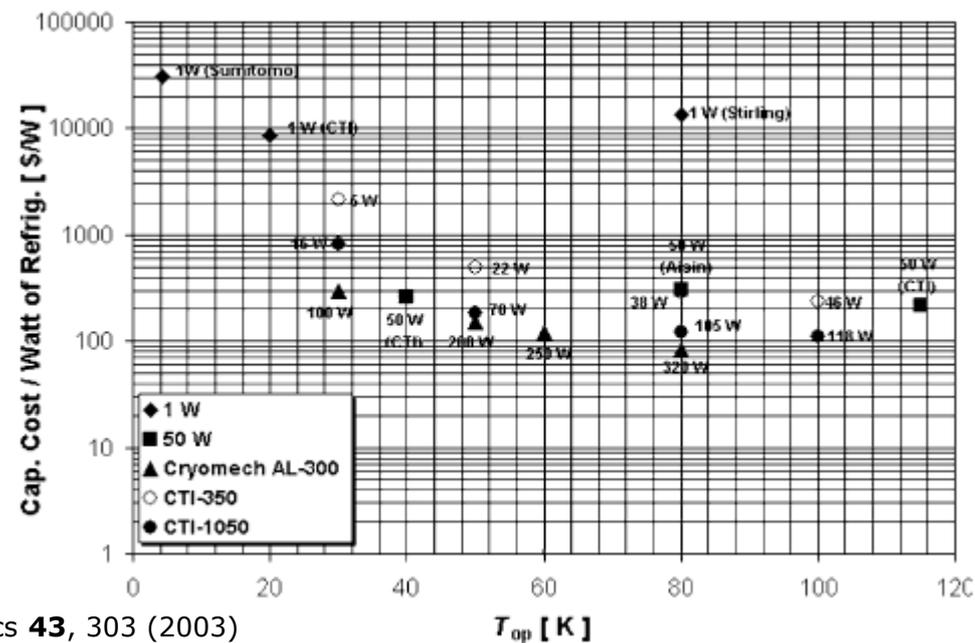
- Raffreddamento con LN2: 0.1 €/litro (10 €/litro per elio)
- cryocooler:

- cryocooler sono molto più efficienti se T aumenta (a parità di potenza refrigerante)
- semplificazione del dispositivo: minori problemi criogenici

Efficienza effettiva



Costo



Y. Ywasa, Cryogenics **43**, 303 (2003)

Che significa operare a $T > 4.2 \text{ K}$? un esempio



Sistema che dissipa $P = 100 \text{ W}$ quanto consumo di liquido? E quanto costa?

a) $\lambda_{\text{He}} = 21 \text{ kJ/kg}$
 $\rho_{\text{LHe}} = 0.125 \text{ kg/litro}$

$$\Delta m / \Delta s = P / (\lambda_{\text{He}} \rho_{\text{LHe}}) = 0.038 \text{ litri/s} = 2.28 \text{ litri/minuto}$$

$$\text{Costo} = 23 \text{ €/minuto} = 1380 \text{ €/ora}$$

b) $\lambda_{\text{N}_2} = 200 \text{ kJ/kg}$
 $\rho_{\text{LN}_2} = 0.808 \text{ kg/litro}$

$$\Delta m / \Delta s = P / (\lambda_{\text{N}_2} \rho_{\text{LN}_2}) = 0.004 \text{ litri/s} = 0.24 \text{ litri/minuto}$$

$$\text{Costo} = 0.024 \text{ €/minuto} = 1.4 \text{ €/ora}$$

c) Cryocooler

$$\text{@ } 80 \text{ K} = (8 - 15 \text{ k€} +) 20 * 0.1 * \text{costokWh} = 0.21 \text{ €/ora}$$

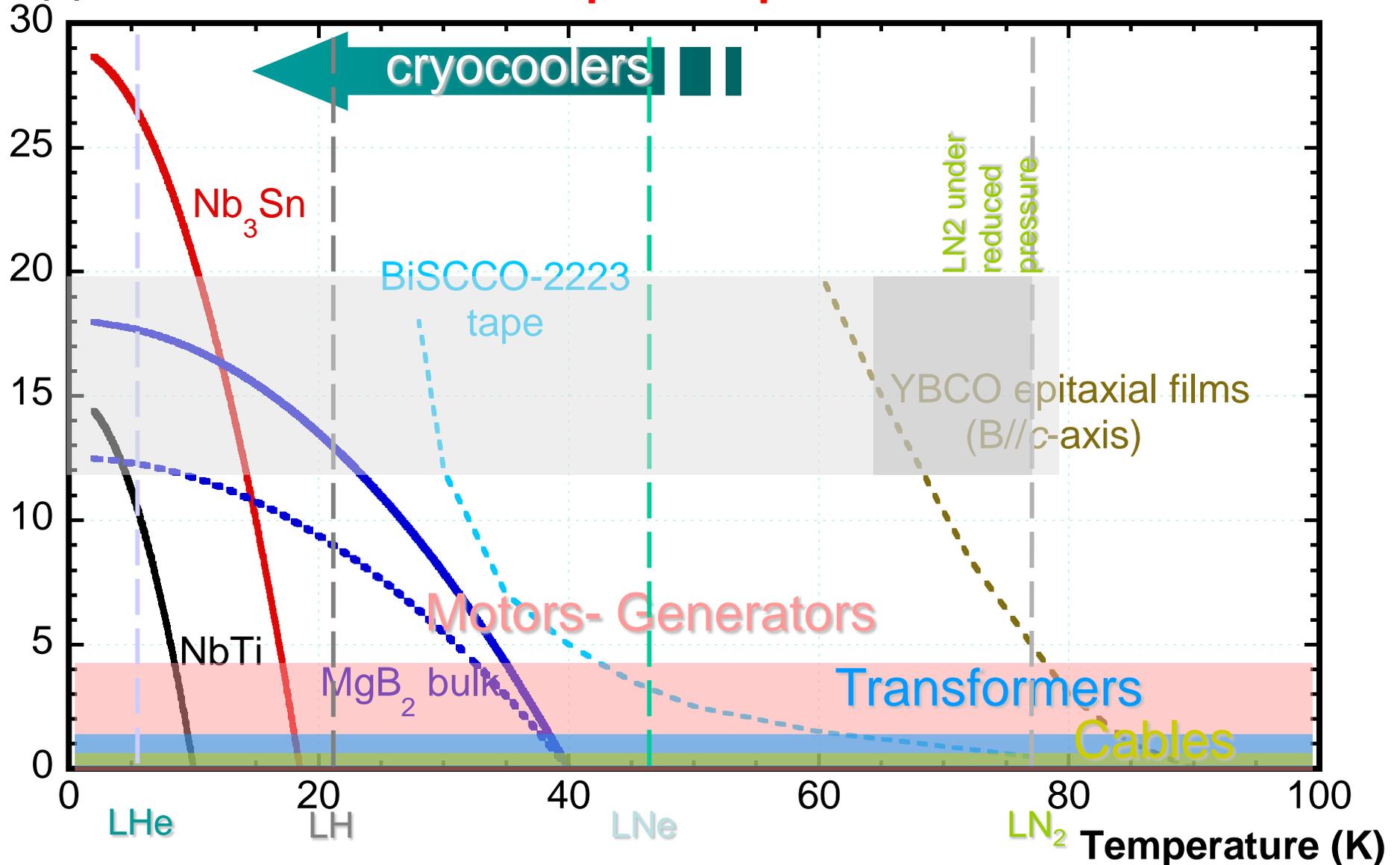
$$\text{@ } 30 \text{ K} = (22 - 30 \text{ k€} +) 100 * 0.1 * \text{costokWh} = 1.16 \text{ €/ora}$$

F1: 0.116 €/kWh

Le applicazioni di potenza dei superconduttori: le prospettive degli HTS

HTS (YBCO coated conductors) unica tecnologia che può lavorare vicino a 77 K può competere con rame

Field (T)



Le applicazioni di potenza dei superconduttori: le prospettive degli HTS



HTS (YBCO coated conductors) tecnologia che può competere con rame

Il costo del processo di produzione nastro diventa un parametro fondamentale

Navigant Consulting, Burlington, MA, USA www.navigantconsulting.com

Application	J_c (Acm ⁻²)	H (T)	T (K)	I_c (A)	Wire length h (m)	Strain (%)	Bending radius (m)	Cost (\$/kA·m)
Transmission power cable	10^5	0.15	67-77	200	> 500	0.4	2 (cable)	10 - 50
Synchronous condenser	10^5	2 - 3	30-77	100 - 500	> 1000	0.2	0.1	30 - 70
Fault current limiter	10^4 - 10^5	0.1 - 3	70-77	300	> 1000	0.2	0.1	30 - 70
Motor	10^5	4 - 5	30-77	100 - 500	> 1000	0.2 - 0.3	0.1	10 - 25
Generator	$> 10^4$	2 - 3	50-65	125 @ T_{opr} 3 T	> 1000	0.4 - 0.5	0.1	5 - 10
Transformer	$> 10^6$	0.15	70-77	100 @ 0.15 T	> 1000	0.3	0.05	10 - 25

Il costo di un conduttore in rame?

$$J(300\text{ K}) = 2 - 4\text{ A/mm}^2$$

$$\text{Costo} = 10 - 20\text{ €/kA}\cdot\text{m}$$

se il costo richiesto > di quello del rame:

- maggiore probabilità di successo;
- ingresso in commercio per FCL e condensatori sincroni è previsto per tempi più brevi (circa 5 anni);

Richieste formulate da diversi possibili "users" per rendere i nastri YBCO competitivi con tecnologia del rame

Il costo dei conduttori

per confrontare i prezzi di conduttori bisogna normalizzarli per unità di prestazioni e di lunghezza

$\text{costo}/I_c \square L = \text{costo di produzione per unità di lunghezza/prestazioni}$

- YBCO e BiSCCO hanno costo simile a 77 K ma l'YBCO è più conveniente a 4.2 K dovuto a J_c più elevata;
- MgB_2 è a stesso livello di Nb-Ti;

YBCO molto lontano da costo richiesto per diffusione delle applicazioni ma le prospettive di riduzione dei costi di produzione sono buone (< 50 - 100 €/k•Am nei prossimi 5 anni)

materiale	costo unitario (€/kAm)
Nb-Ti	1 - 7* (@ 6 T & 4.2 K)
Nb ₃ Sn	10 - 44** (@ 11.8 T & 4.2 K)
YBCO	160 @ 4.2 K & 12 T; 100 @ 30 K & 2 T; 400 @ 77 K & s.f.
BiSCCO-2223	400 @ 77 K & s.f.

* dati estratti da Cooley *et. al.*, SuST 18 (2005)

* ITER PF cable

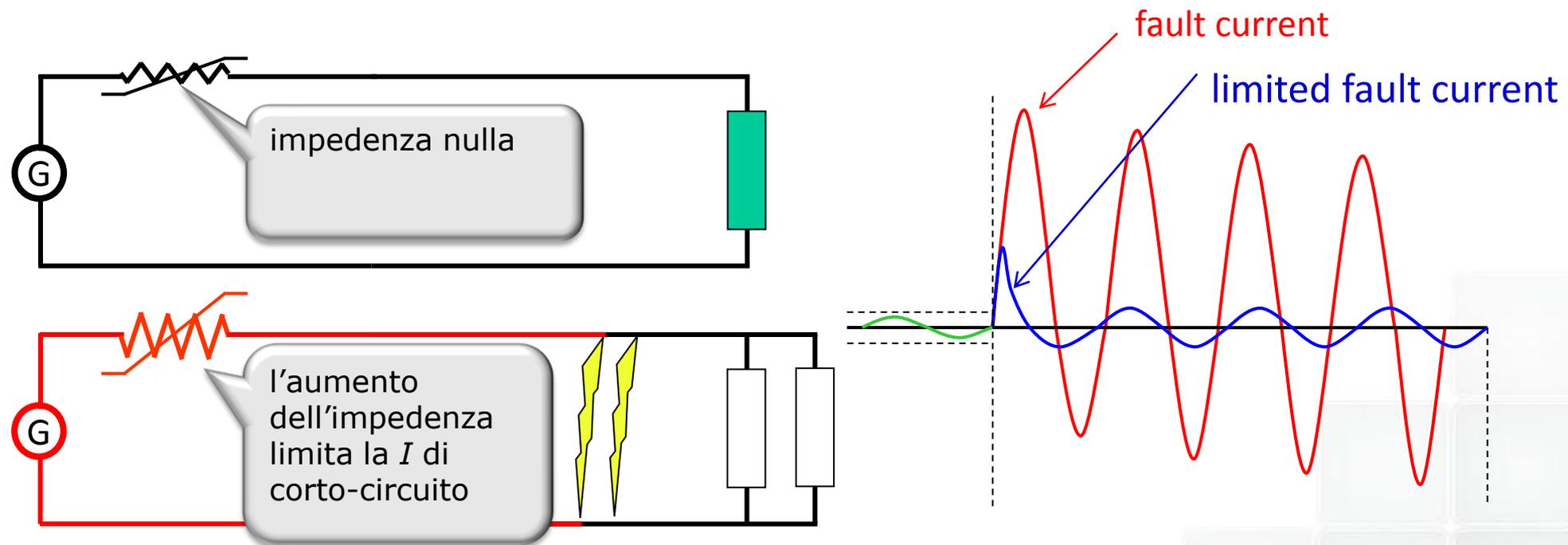
** ITER TF cable

I limitatori di corrente (*Fault current limiters - FCL*)

E' un elemento attivo a impedenza che varia in caso di evento di crto-circuito.

Caratteristiche principali di un FCL sono:

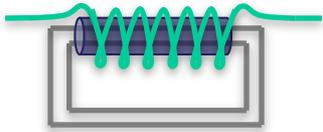
- in condizioni operative normali, il FCL deve avere impedenza trascurabile nella rete
- in caso di corto circuito, l'impedenza deve aumentare rapidamente riducendo la corrente che circola nel rete
- Sfruttano la rapida variazione resistiva e magnetica dei superconduttori nella transizione superconduttore/normale.





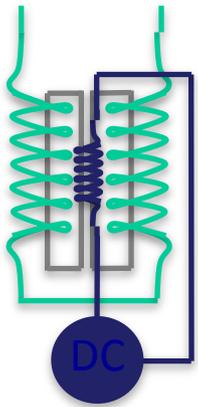
Resistivo

Superconduttore "quencha", cioè repentinamente torna nella fase normale a causa della eccessiva corrente di corto-circuito



Induttivo a nucleo schermato

Le correnti indotte nel cilindro cavo superconduttivo, schermano il core in ferro finché, per effetto di sovracorrente, il superconduttore quencha e l'effetto di schermaggio termina



Induttivo a nucleo pre-saturato

Un nucleo in ferro è saturato dal campo generato da una bobina superconduttiva in maniera tale che la corrente di corto circuito si opponga alla saturazione del nucleo e faccia variare rapidamente l'impedenza

L'attuale **rete di distribuzione e trasmissione** (D&T) dell'energia elettrica è minacciata da

- *Crescente domanda di energia elettrica* (particolarmente importante in paesi con elevato tasso di crescita come Cina e India).
- Le *linee di distribuzione attuali sono sottodimensionate* per un tale sviluppo e anche in presenza di investimenti adeguati il consolidamento e l'ammodernamento della linea sarebbe troppo lento

Le reti di D&T attuali saranno sovraccaricate fino a lavorare al loro limite termico

**Aumento delle perdite
lungo le reti di D&T**

(contrarie alle politiche di riduzione dell'impatto ambientale delle centrali)

**Diminuzione
dell'affidabilità della rete
di D&T**

(particolarmente importante nell'era digitale)

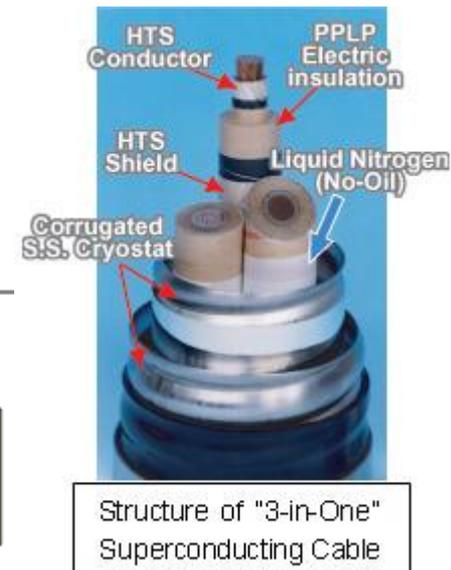
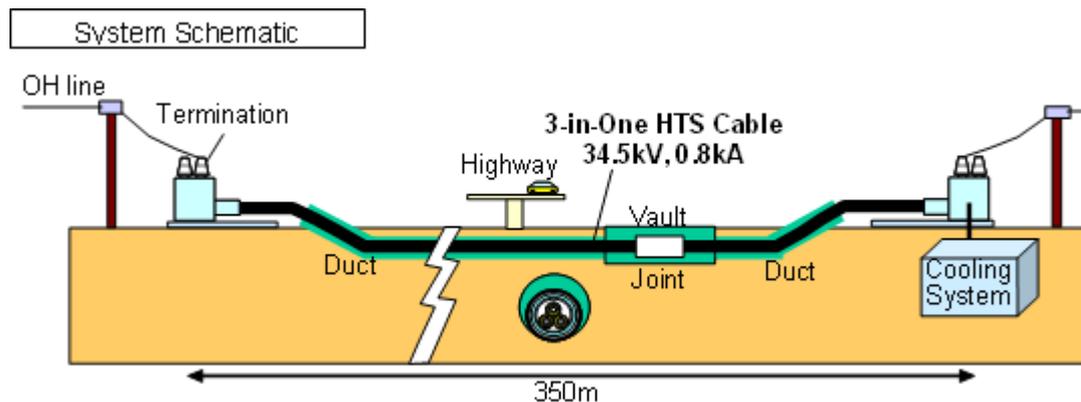
La superconduttività offre la possibilità di migliorare l'efficienza delle reti di D&T adeguate al futuro energetico mondiale

Si stima (fonte: US Dep. Energy) che circa l'8% dell'energia totale erogata venga persa durante la distribuzione, di cui il 60% nelle linee e il 40% nelle trasformazioni

Rete di distribuzione elettrica

La sostituzione delle attuali linee in rame con cavi superconduttori permetterebbe il trasporto di potenze 3-5 volte superiori a parità di sezione dei cavi con perdite trascurabili

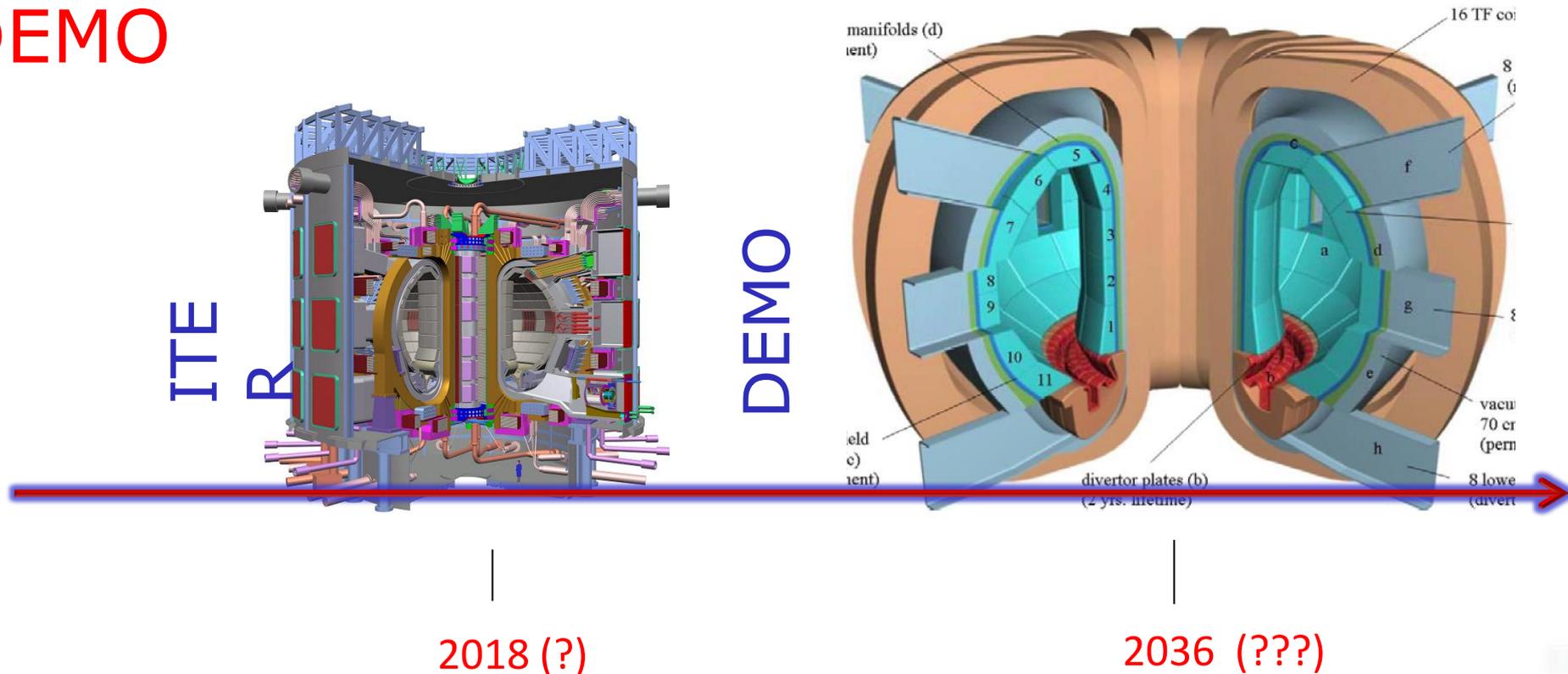
Primo cavo HTS installato in rete presso Albany (NY) in USA finanziato da DoE e New York State Energy Research and Development Authority (NYSERDA) 2006 –
Impiega 70 Km di DI- BiSCCO *Sumitomo Industries* tape



La road-map del programma per la fusione

reattore per impianto dimostrativo:

DEMO



- è possibile pensare per DEMO temperature e/o campi magnetici più intensi?
- ci sono superconduttori adatti a questa prospettiva?

I possibili vantaggi dei magneti HTS per la fusione



- campi più intensi: più elevate potenze di fusione ($P \sim B_t^4$);
- Temperature di lavoro T_o operative più elevate : maggiore efficiente nel raffreddamento e minore complessità e dimensioni
 - (efficienze ideale del ciclo Carnot): $\eta_c = T_o/(RT - T_o)$
 - @ 77 K $\eta_c = 0.34$; @ 4.2 K $\eta_c = 0.015$

La potenza elettrica risparmiata circa 40%

(EFDA Contract TW4-TMS_HTSMAG)

I cavi di YBCO per la fusione



Ad oggi uno schema consolidato di cavo ad alte corrente adatto a magneti per la fusione non esiste, esistono solo delle proposte. Comunque, grazie all'esperienza dei cavi LTS, si possono definire dei criteri (o *desiderata*) che i cavi HTS per magneti ad alto campo devono soddisfare

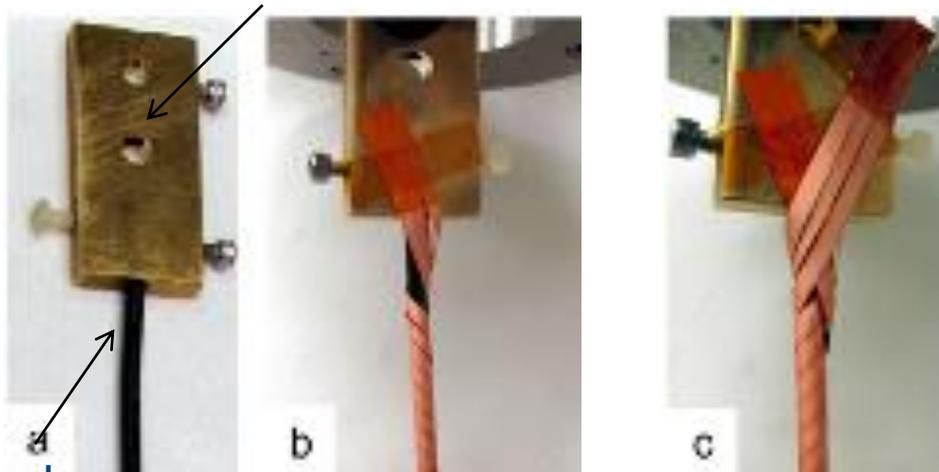
- elevate J_e (densità di corrente ingegneristica = $I_c /$ sezione totale del conduttore);
- sezione circolare (cioè, fili), flessibili e robusti;
- J_c isotropa e ridotte perdite in regimi *ac*;
- preferibilmente processo il più possibile convenzionale (simile a processo di cablatura per LTS).

Ad oggi 3 proposte:

assiale, nastri impilati (CIC) and Roebel

Cavo assiale

terminale di corrente

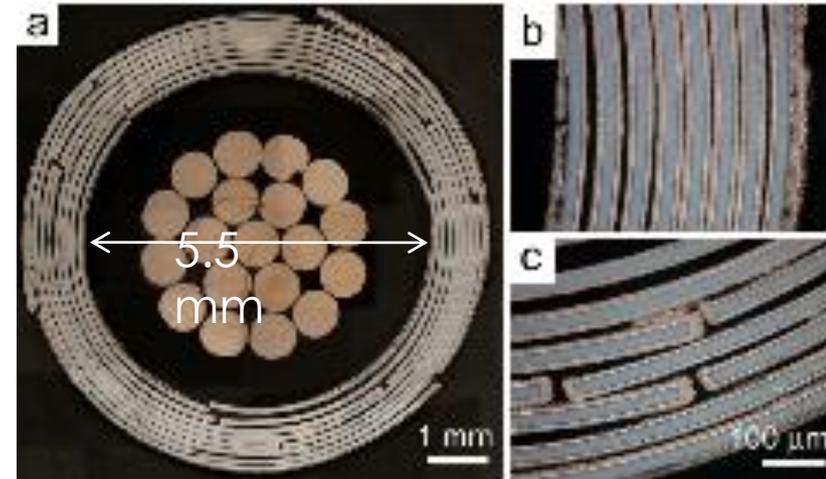


nucleo

primo strato (3 nastri),...

..., il secondo strato è avvolto in senso opposto, e così via...

sezione di un cavo a 8 strati



7.5 mm



0.5 m

Cable #	Number of layers	Number of conductors	Batch number	I_c (A) (76 K)
1	1	1	1	98.5
2	4	12	1	1232
3	8	24	2	2796

$$J_e = 64 \text{ A/mm}^2$$

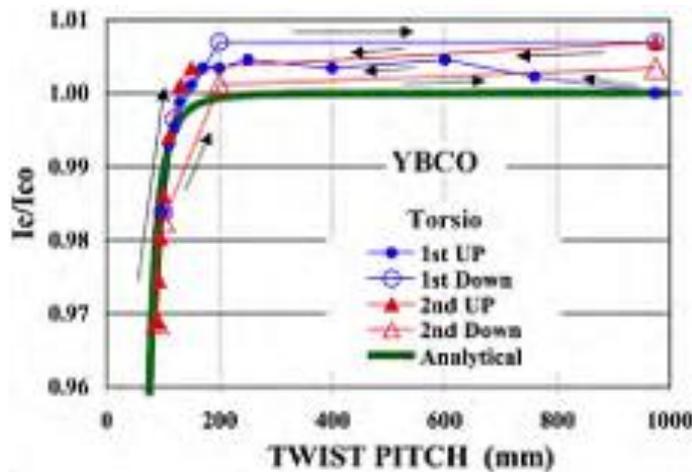
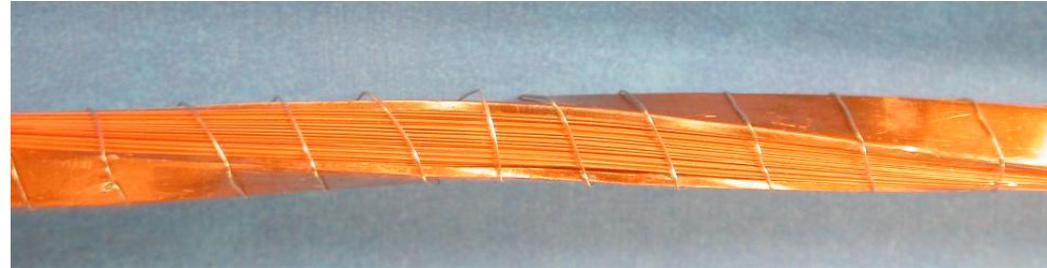
- ☺ J_e è promettente
- ☺ facile da trasferire a cavi con numero di strati maggiori cioè per correnti più elevate
- ☺ J_c è isotropa

HTS Cable In Conduit Conductor

MIT group, M. Takayasu, J. V. Minervini, L. Bromberg

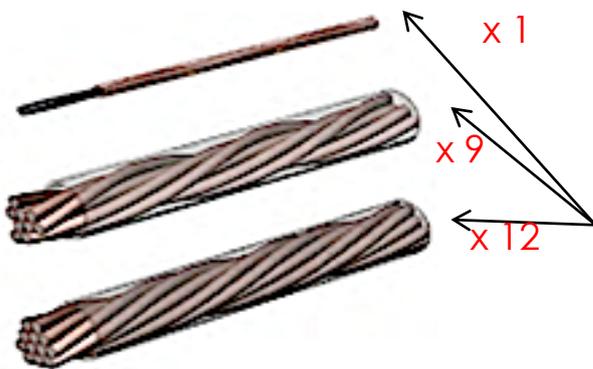
nastri di YBCO hanno ottima tenuta per torsioni longitudinali :

- 3 - 4 % di riduzione di I_c per torsioni molto elevate (100 mm twist pitch);
- l'effetto su I_c non è permanente.



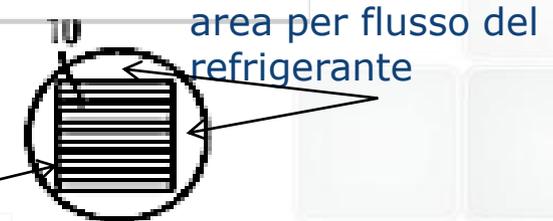
processo di produzione:
dal nastro al cavo da kA

- nastri impilati (sezione rettangolare o quadrata);
- twistati longitudinalmente;
- inseriti in un tubo di contenimento
- raffreddamento per flusso forzato nel tubo (come LTS CICC)



a questo punto, cavi da amperaggio kA, si possono ottenere intrecciando un insieme di cavi basi utilizzando le stesse procedure per cavi LTS

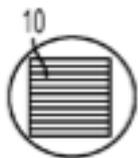
sezione del cavo base



40 tapes
(4 x 4 mm²)

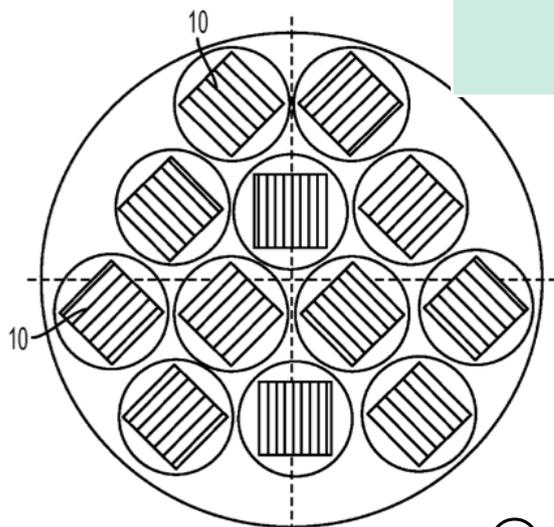
HTS Cable In Conduit Conductor

Che prestazioni ci possiamo aspettare da un cavo così realizzato?



1 cavo base

sezione (mm ²)	1 cavo base	I_c @ 77 K & s.f.	J_e (A/m ²)	I_c @ 4.2 K 15 T	J_e (A/mm ²)
4 x 0.1	40 nastri (4 x 4 mm ²), r = 3.5 mm	3 kA	78	4.5 kA	116



12 elementi

12 elementi	I_c @ 77 K & s.f.	J_e (A/m ²)	I_c @ 4.2 K 15 T	J_e (A/mm ²)
r = 15 mm	32 kA	45	54 kA	77

☺ J_e prevista migliore di Nb₃Sn per ITER TF (45 A/mm² @ 4.2 12 T)

☹ non ci sono ancora molti studi sperimentali

Roebel assembled coated conductors RACC

Goldacker, et al., SuST 22, (2009)

FZK-RACC No.4
Superpower



il nastro viene sagomato in nastro Roebel



nastro originale

e poi assemblati in modo da essere sovrapposti

Tape (CC)	MOCVD-YBCO/IBAD-MgO
Filaments	1
Cross section (mm ²)	0.45
I_c tape (average)	359 A
I_c strand (T, B) (A)	149.5 (299 A per cm-width) calculated from CC tape
J_c strand (A cm ⁻²)	332
No. of strands: N_{str}	15 (threefold CC = 45 tapes)
$N_{str} \times I_c$ (strand)	6727
Self-field degradation	60%
I_c (A) measured	2628 (77 K/s.f.)
(5 μ V cm ⁻¹)	
Cable cross sect. (mm ²)	27.6
J_c^{cable} (A cm ⁻²)	9520
Twist pitch (mm)	188

$$J_e = 95 \text{ A/mm}^2$$

☺ Best J_e @ 77 K

☺ ac losses minime

☹ troppi scarti di nastro

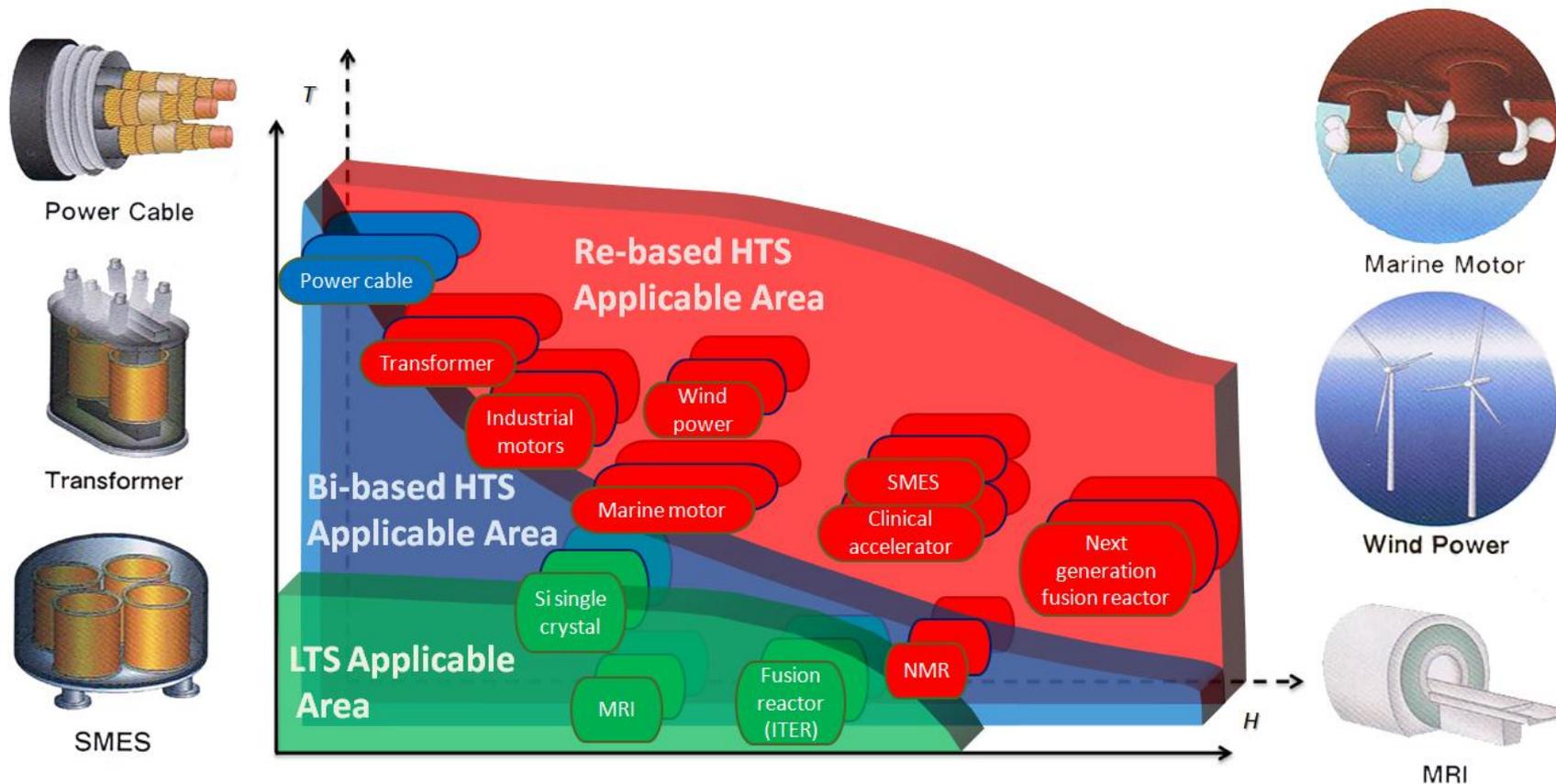
☹ procedura molto complessa

☹ J_e è anisotropa

☹ bubbi sulla tenuta agli sforzi meccanici



per ridurre le perdite in regime ac I nastri sono trasposti cioè intrcciati tra loro



Grazie per l'attenzione
giuseppe.celentano@enea.it