



10 dicembre 2018



# Superconduttori ad alta $T_c$ : materiali, processi e applicazioni di potenza

Giuseppe CELENTANO

ENEA Centro Ricerche Frascati

Sezione Superconduttività  
Dipartimento Fusione e Tecnologie per la Sicurezza  
Nucleare

## - **Introduzione**

- perchè gli HTS sono utili;

## - **I Materiali HTS:**

- $MgB_2$ : processi di realizzazione dei conduttori;
  - Applicazioni. **Magneti per NMR/MRI**
- BiSCCO: processi di realizzazione dei conduttori;
  - Applicazioni nel settore energia: **Fault current limiters e cavi per trasporto/distribuzione**
- REBCO: processi di realizzazione dei conduttori;
  - Applicazioni: **I conduttori ad alte correnti per i magneti**

## - **Che facciamo all'ENEA?**

## - **Introduzione**

- perchè gli HTS sono utili;

## - **I Materiali HTS:**

- $MgB_2$ : processi di realizzazione dei conduttori;
  - Applicazioni. **Magneti per NMR/MRI**
- BiSCCO: processi di realizzazione dei conduttori;
  - Applicazioni nel settore energia: **Fault current limiters e cavi per trasporto/distribuzione**
- REBCO: processi di realizzazione dei conduttori;
  - Applicazioni: **I conduttori ad alte correnti per i magneti**

## - **Che facciamo all'ENEA?**

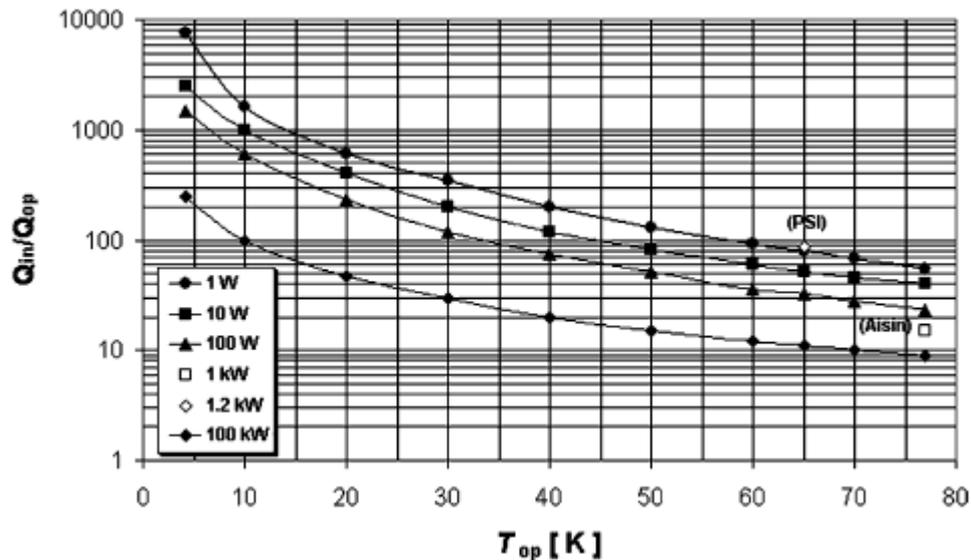


# Che significa operare a $T > 4.2$ K?

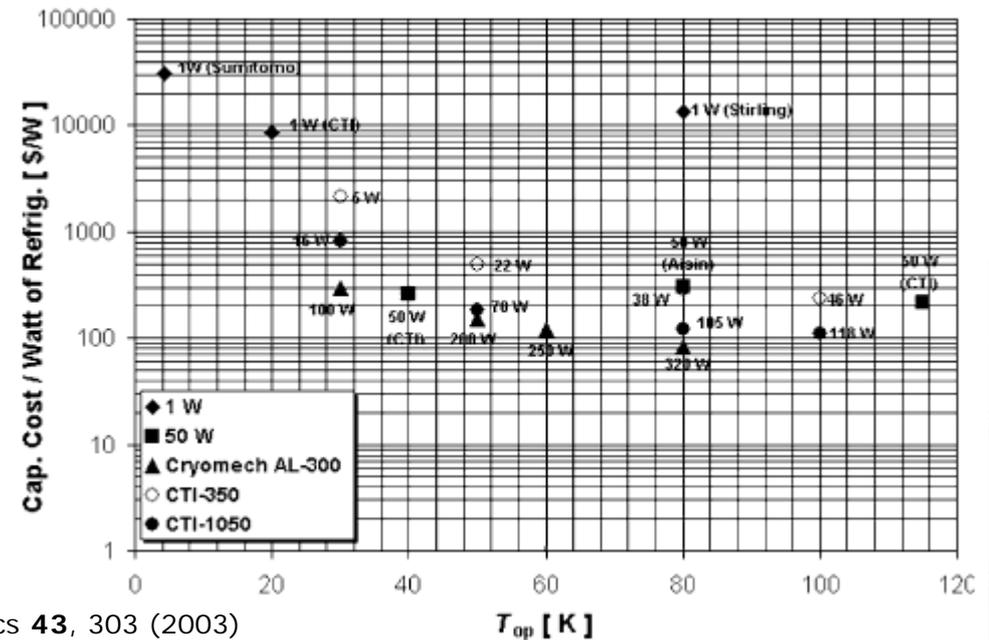
- Possibilità di lavorare a  $T > 4.2$  K significa risparmiare soldi e semplificare
- Raffreddamento con LN2: 0.1 €/litro (10 €/litro per elio)
  - cryocooler:

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

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

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

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

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

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

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

# Cavi elettrici a confronto

## Nb-Ti

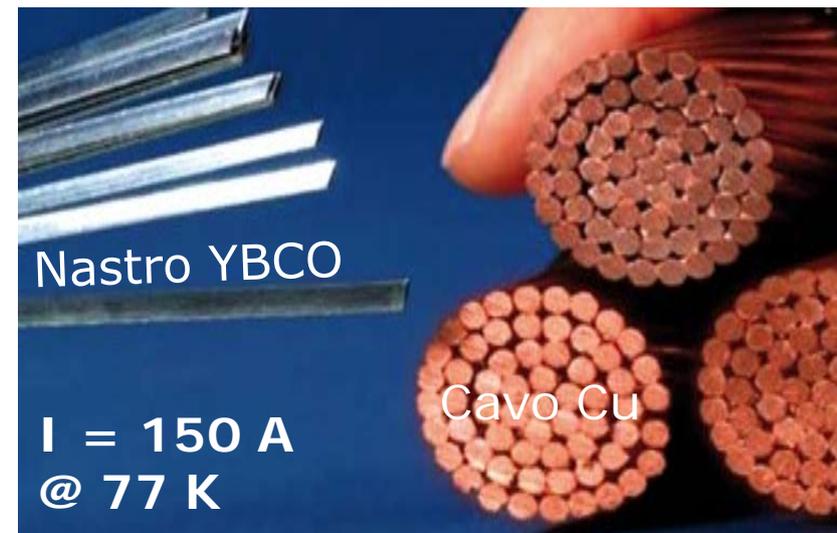
filo diam. 0.82 mm (sezione di 0.5 mm<sup>2</sup>) a 4.2 K – s.f. =  
cavo di Cu di sezione di 900 mm<sup>2</sup> a temperatura ambiente

## YBCO

nastro da 4mm (sezione di 0.4 mm<sup>2</sup>) a 77 K – s.f. = cavo  
di Cu di sezione di 60 mm<sup>2</sup> a temperatura ambiente

## Cavi elettrici a confronto

Photo by Cockcroft Institute



# I superconduttori per i magneti

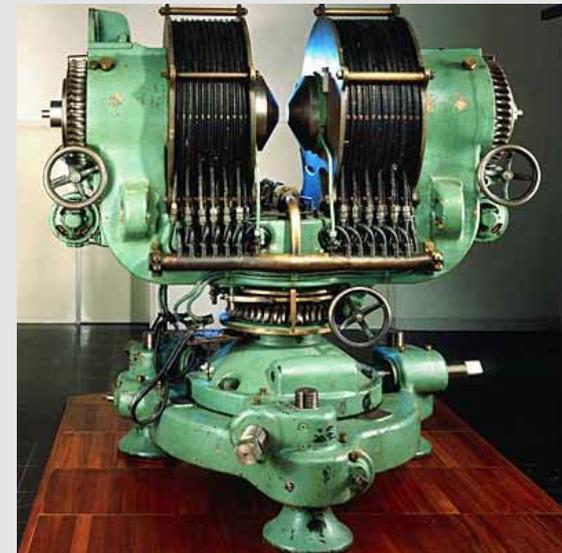
La prima applicazione della superconduttività: **i magneti!**

qualche esempio per confronto:

- Campo magnetico terrestre = **0.4 mT**,
- calimite da "frigorifero" = **0.1 T**,
- MRI = **1 T**

**Kamerling Onnes** predisse che la superconduttività avrebbe permesso di raggiungere **campi anche di 10 Tesla**

La tecnologia dell'epoca era basata su magneti in **rame/ferro**: intensità massima **1.5 Tesla**



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

# I superconduttori per i magneti

## La prima applicazione della superconduttività: i magneti!

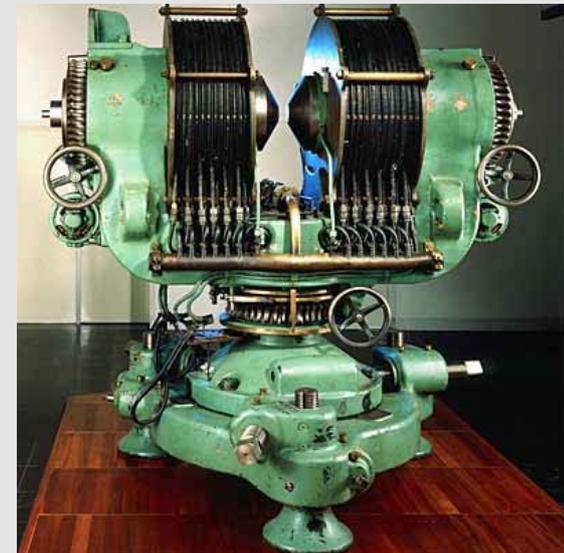
bobina di piombo di 1000 spire  
(diam. 3.5 cm, h. 2 cm), preparata  
dal gruppo di Kamerlingh Onnes nel  
1911



\* Non funzionava!!! Il campo molto ridotto rispetto alle attese (0.1 Tesla). La superconduttività era più complicata di quanto Kamerlingh Onnes potesse immaginare. C'erano ancora troppi aspetti da capire...

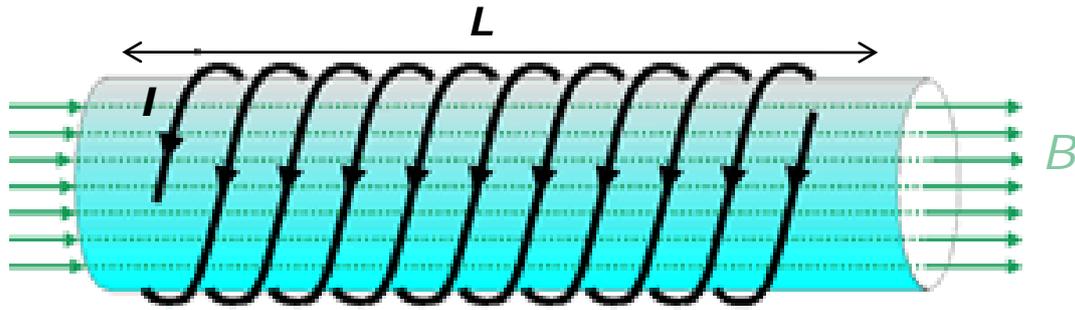
**Kamerling Onnes** predisse che la superconduttività avrebbe permesso di raggiungere **campi anche di 10 Tesla**

La tecnologia dell'epoca era basata su magneti in **rame/ferro**: intensità massima **1.5 Tesla**



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

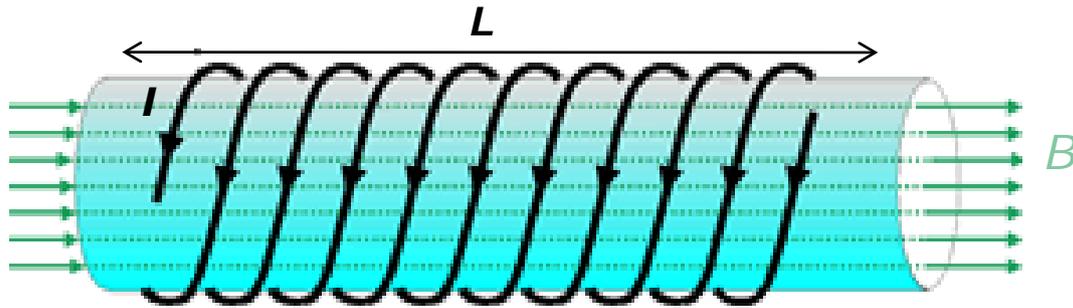
# I magneti: i limiti e i vantaggi dei superconduttori



Il campo magnetico di un solenoide  $B = n\mu_0 I$

$$B \propto I/2a \quad a = \text{raggio del filo}$$

# I magneti: i limiti e i vantaggi dei superconduttori

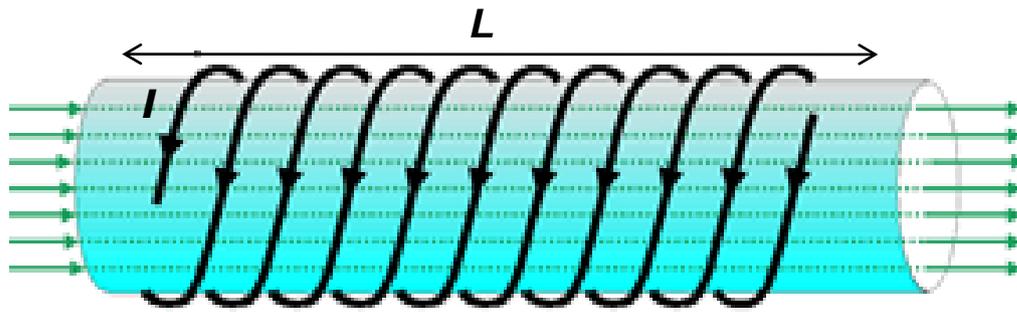


Il campo magnetico di un solenoide  $B = n\mu_0 I$

$$B \propto I/2a \quad a = \text{raggio del filo}$$

- metallo normale,  $\rho$ :  $B$  limitato da potenza dissipata  $W \propto \rho I^2/a^3$ ; per rame  $\sim 10^7 \text{ A/m}^2$ .
- Elettromagneti in rame con nucleo in ferro hanno  $B_{max} \sim 2 \text{ T}$  dettato anche dalla saturazione del ferro

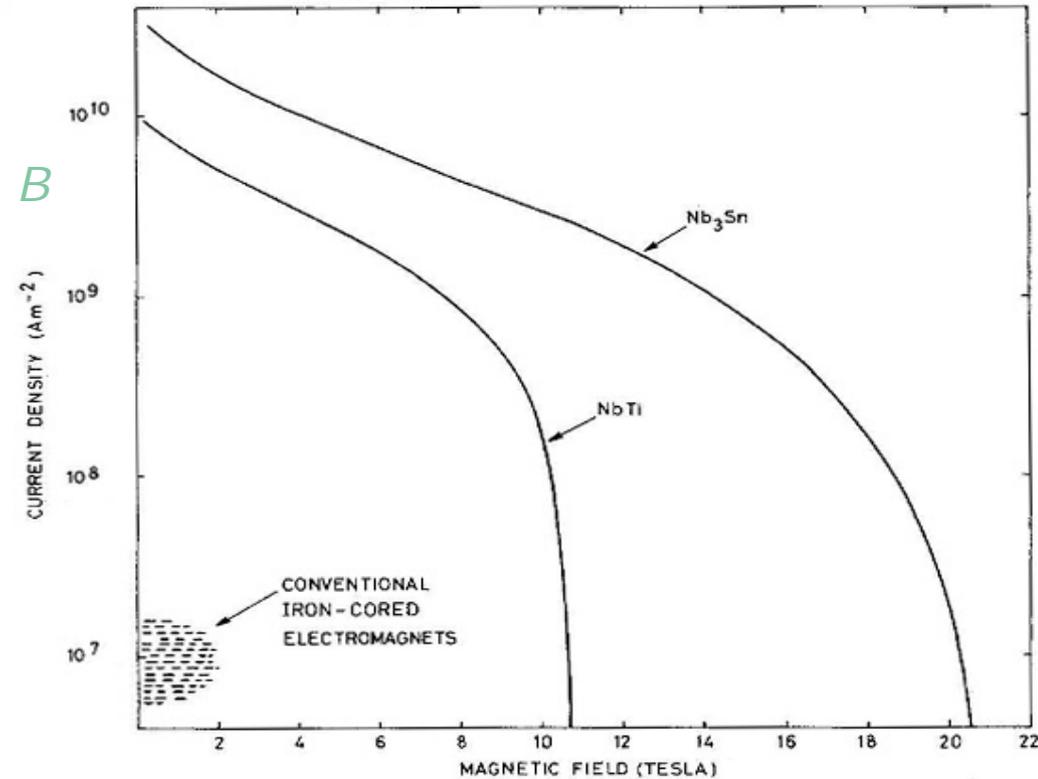
# I magneti: i limiti e i vantaggi dei superconduttori



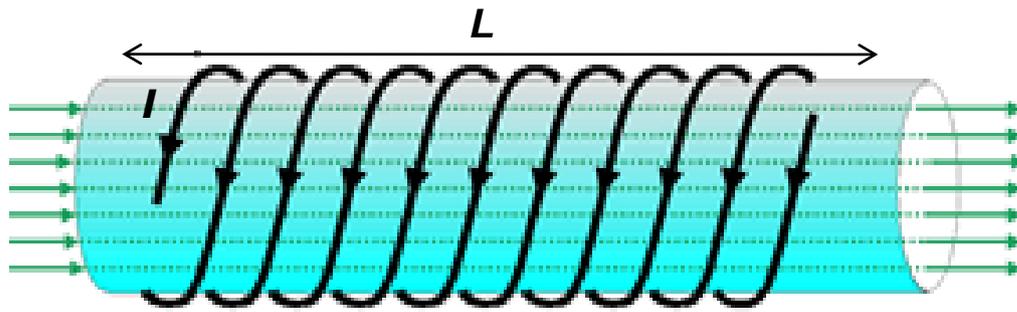
Il campo magnetico di un solenoide  $B = n\mu_0 I$

$$B \propto I/2a \quad a = \text{raggio del filo}$$

- metallo normale,  $\rho$ :  $B$  limitato da potenza dissipata  $W \propto \rho I^2/a^3$ ; per rame  $\sim 10^7 \text{ A/m}^2$ .
- Elettromagneti in rame con nucleo in ferro hanno  $B_{max} \sim 2 \text{ T}$  dettato anche dalla saturazione del ferro



# I magneti: i limiti e i vantaggi dei superconduttori

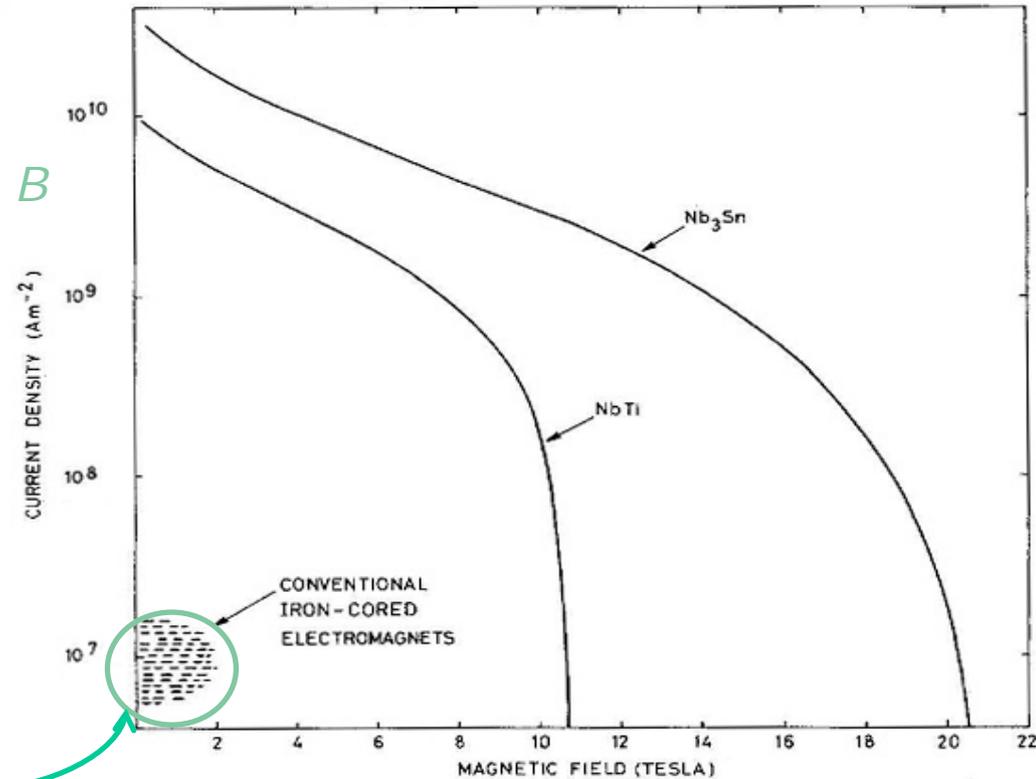


Il campo magnetico di un solenoide  $B = n\mu_0 I$

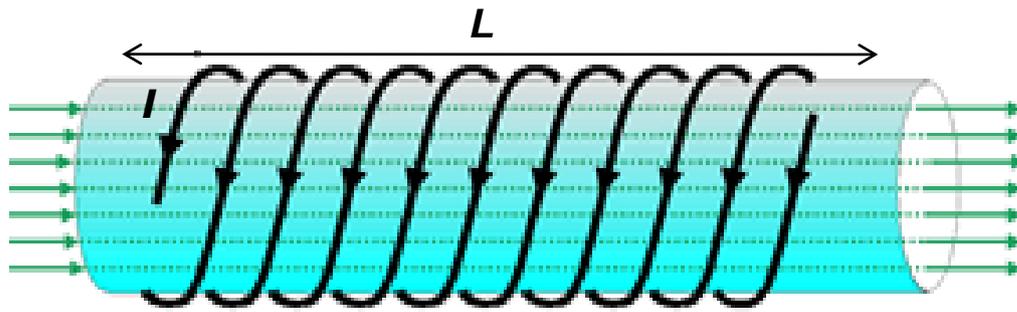
$$B \propto I/2a \quad a = \text{raggio del filo}$$

- metallo normale,  $\rho$ :  $B$  limitato da potenza dissipata  $W \propto \rho I^2/a^3$ ; per rame  $\sim 10^7 \text{ A/m}^2$ .

- Elettromagneti in rame con nucleo in ferro hanno  $B_{max} \sim 2 \text{ T}$  dettato anche dalla saturazione del ferro



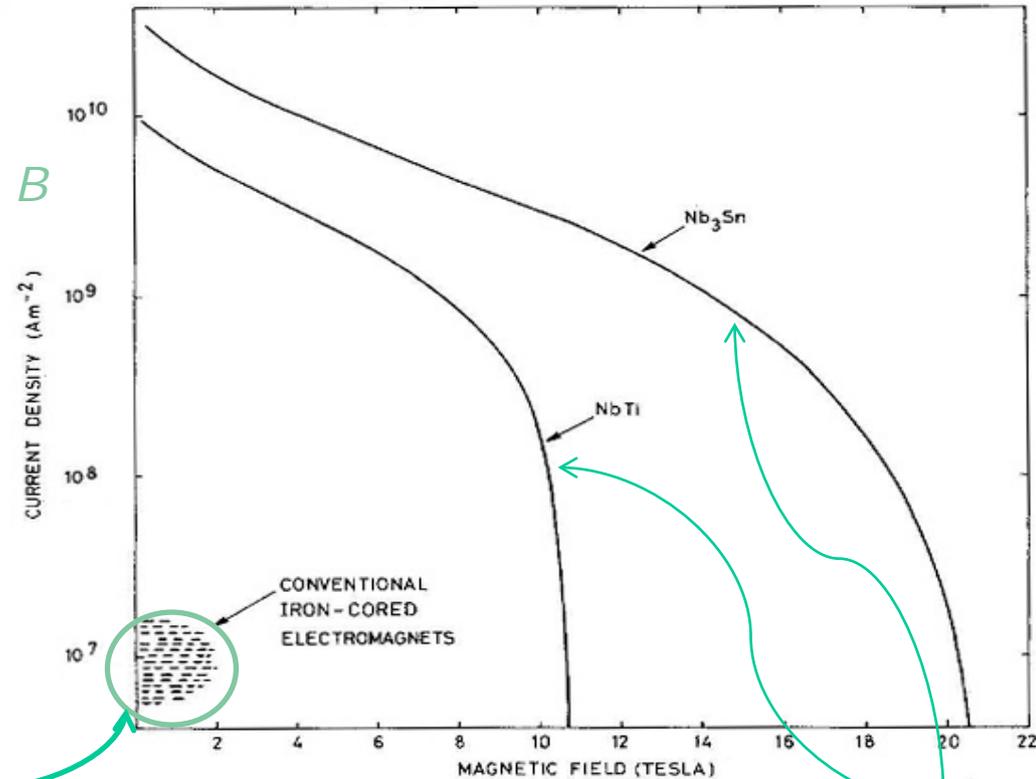
# I magneti: i limiti e i vantaggi dei superconduttori



Il campo magnetico di un solenoide  $B = n\mu_0 I$

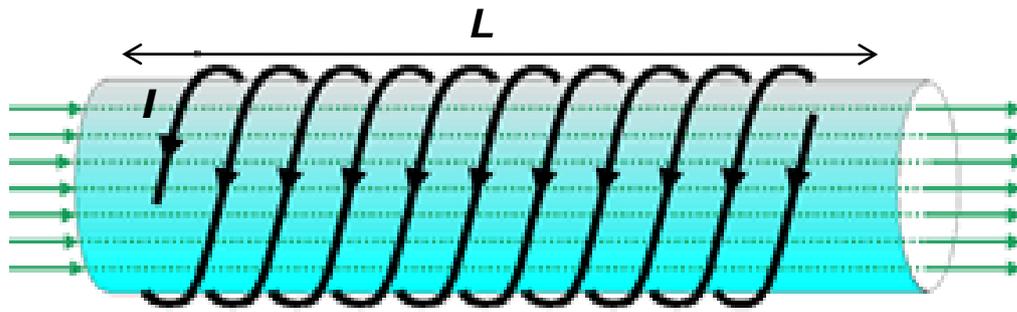
$$B \propto I/2a \quad a = \text{raggio del filo}$$

- metallo normale,  $\rho$ :  $B$  limitato da potenza dissipata  $W \propto \rho I^2/a^3$ ; per rame  $\sim 10^7 \text{ A/m}^2$ .
- Elettromagneti in rame con nucleo in ferro hanno  $B_{max} \sim 2 \text{ T}$  dettato anche dalla saturazione del ferro



- superconduttore:  $B$  limitato dalla  $J_c$
- Nb-Ti e il Nb<sub>3</sub>Sn, a 4.2 K possono generare, rispettivamente, oltre 10 T e 20 T ( $> 10^8 \text{ A/m}^2$ )

# I magneti: i limiti e i vantaggi dei superconduttori

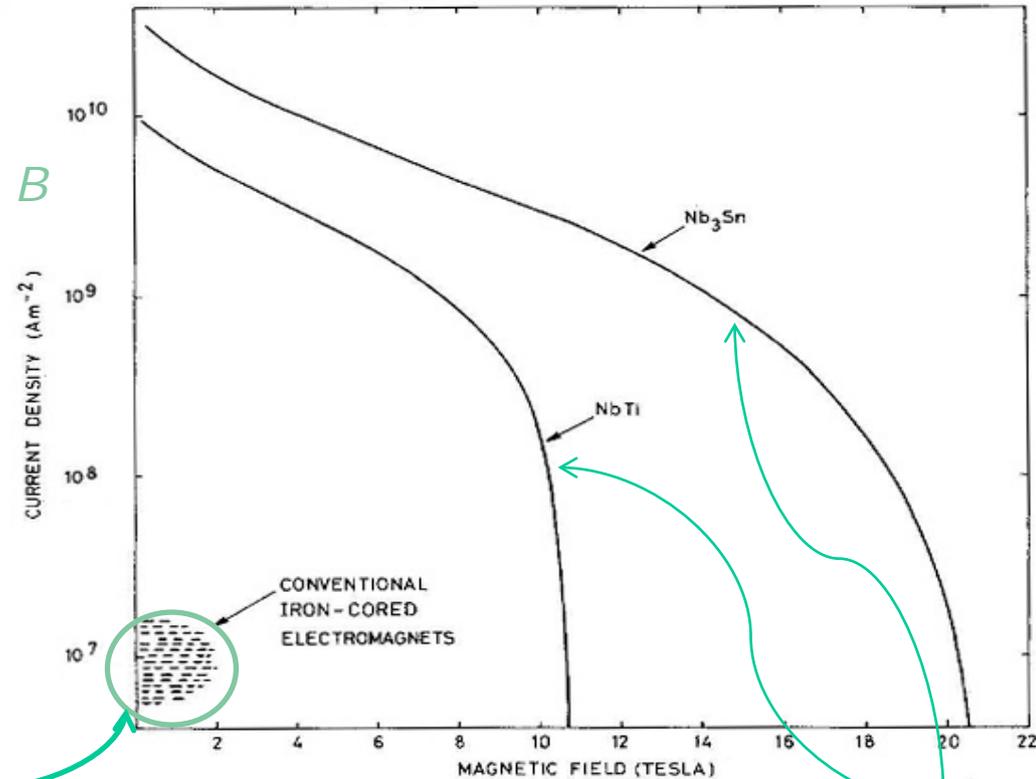


Il campo magnetico di un solenoide  $B = n\mu_0 I$

$$B \propto I/2a \quad a = \text{raggio del filo}$$

- metallo normale,  $\rho$ :  $B$  limitato da potenza dissipata  $W \propto \rho I^2/a^3$ ; per rame  $\sim 10^7 \text{ A/m}^2$ .
- Elettromagneti in rame con nucleo in ferro hanno  $B_{max} \sim 2 \text{ T}$  dettato anche dalla saturazione del ferro

I superconduttori permettono di raggiungere campi magnetici desiderati con una perdita di energia ridotta e migliore efficienza ( $W = 0$ )

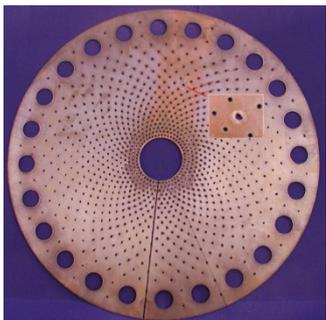
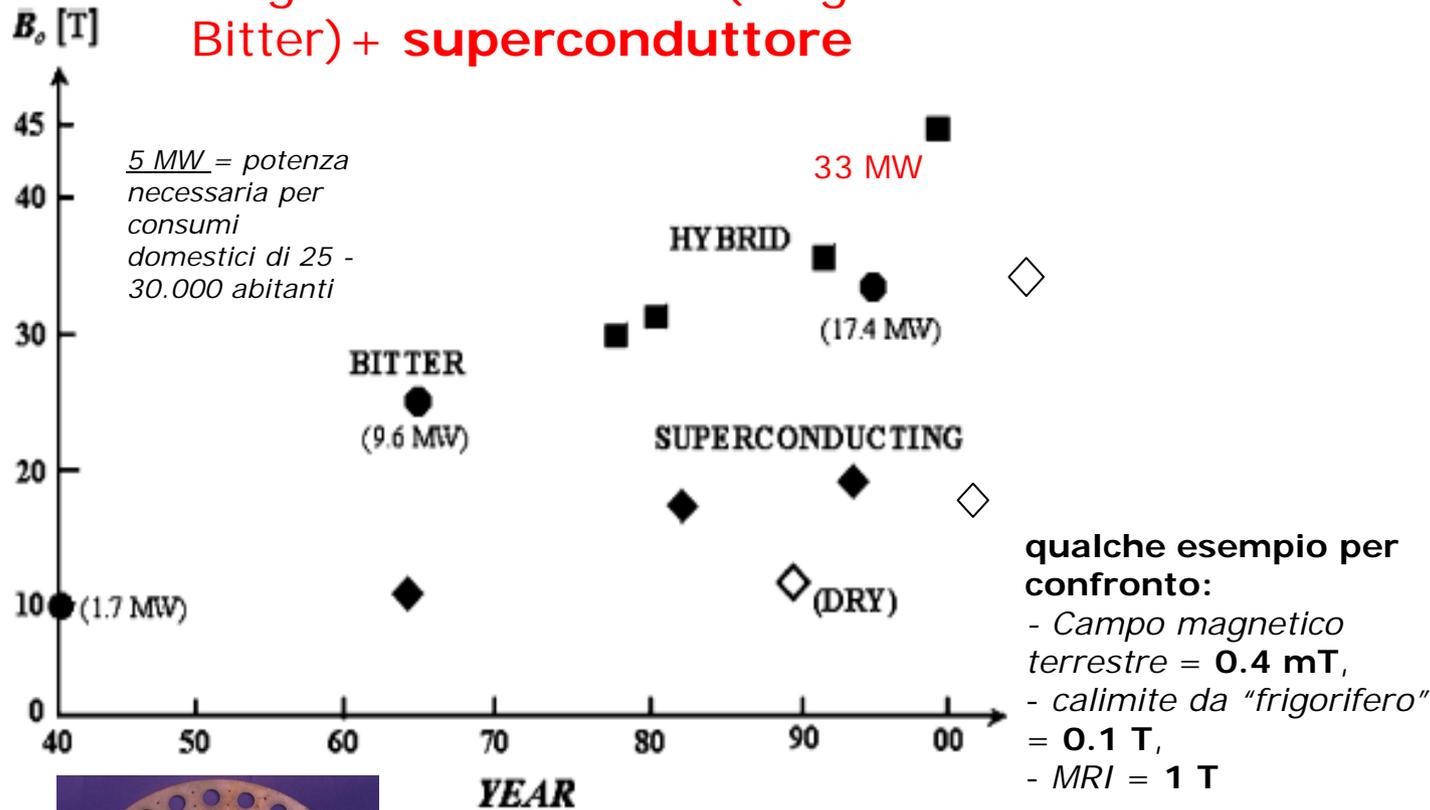


- superconduttore:  $B$  limitato dalla  $J_c$
- Nb-Ti e il Nb<sub>3</sub>Sn, a 4.2 K possono generare, rispettivamente, oltre 10 T e 20 T ( $> 10^8 \text{ A/m}^2$ )

Abilitano applicazioni che richiedono campi magnetici troppo elevati per essere generati dai comuni elettromagneti a rame

# I magneti: alcuni "numeri"

magneti ibridi: **rame** (magneti Bitter) + **superconduttore**



Magneti Bitter: a piatti di rame impilati raffreddati ad acqua

## I record

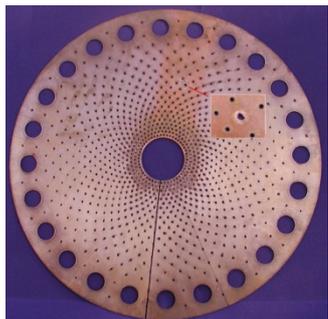
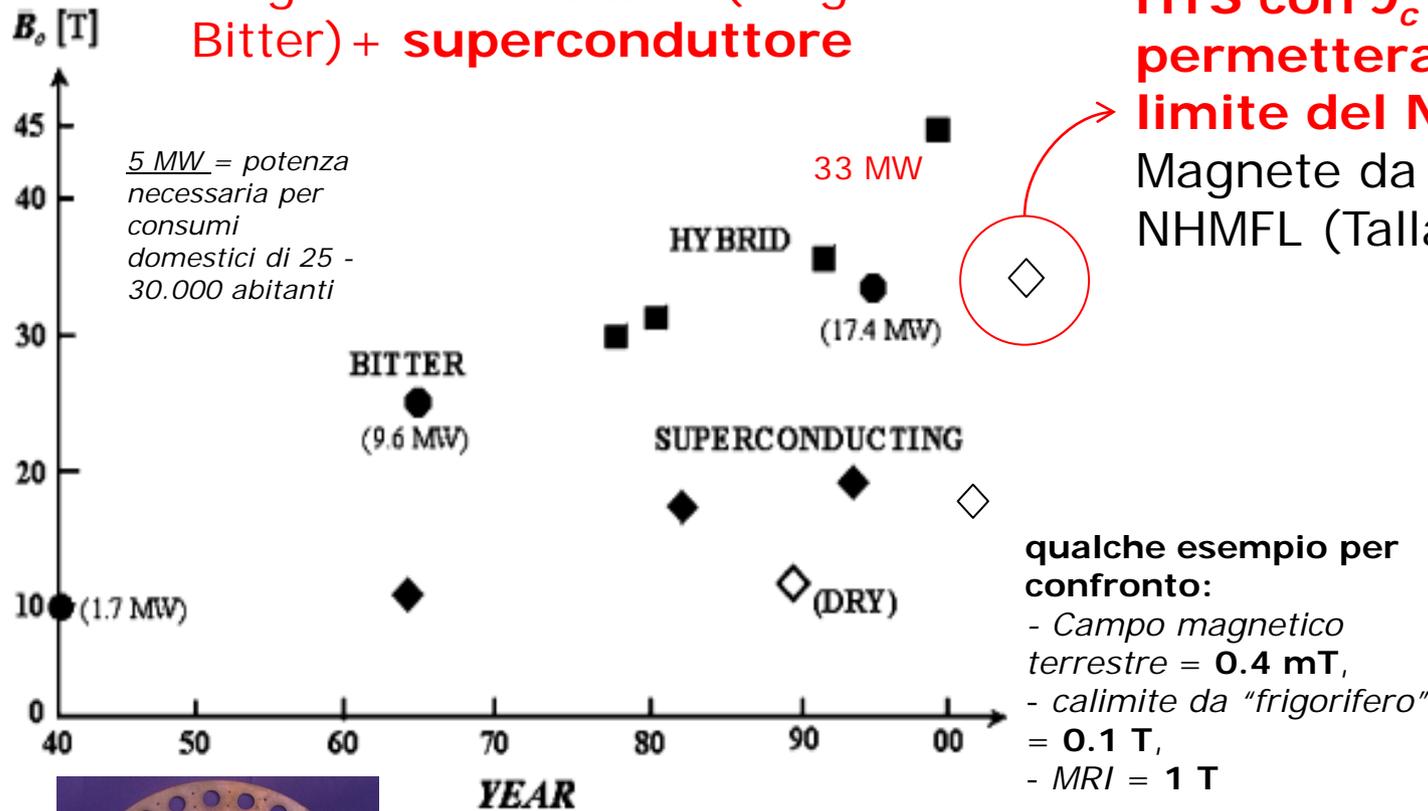
- magnete ibrido: 44 T;
- superconduttore LTS: 20 T;

# I magneti: alcuni "numeri"

magneti ibridi: **rame** (magneti Bitter) + **superconduttore**

**HTS con  $J_c$  più elevate di LTS permetteranno di superare il limite del  $Nb_3Sn$ .**

Magnete da **33.8 T** realizzato a NHMFL (Tallahassee, FL – USA, 2008)



Magneti Bitter: a piatti di rame impilati raffreddati ad acqua

## I record

- magnete ibrido: **44 T**;
- superconduttore LTS: **20 T**;
- **superconduttore LTS + HTS: 33.8 T**

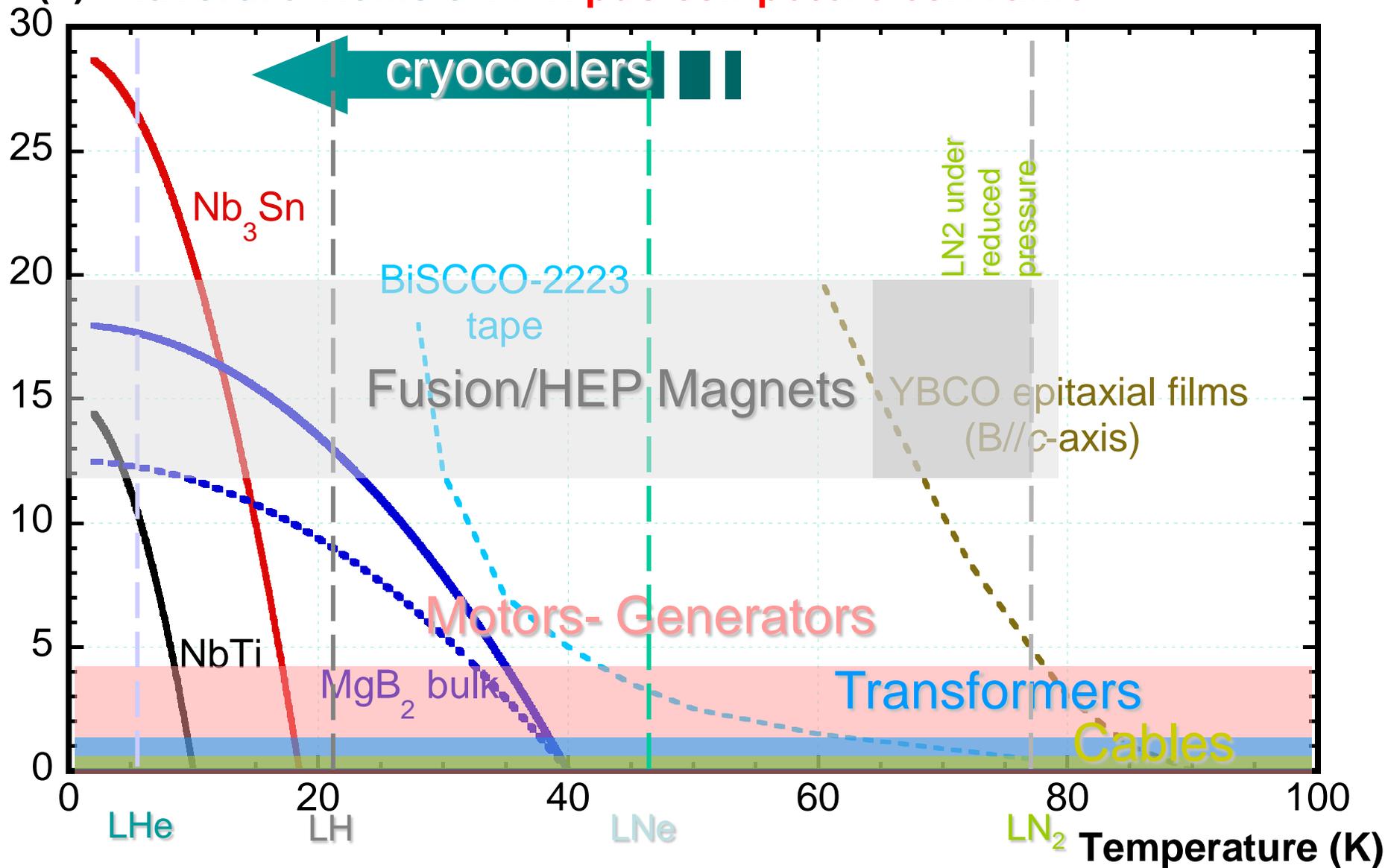


Solenoido con nastri 2G YBCO coated conductors

# Le applicazioni di potenza: le prospettive degli HTS

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

Field (T)



# 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

Nb<sub>3</sub>Sn

18

MgB<sub>2</sub>

39

BiSCCO-2212

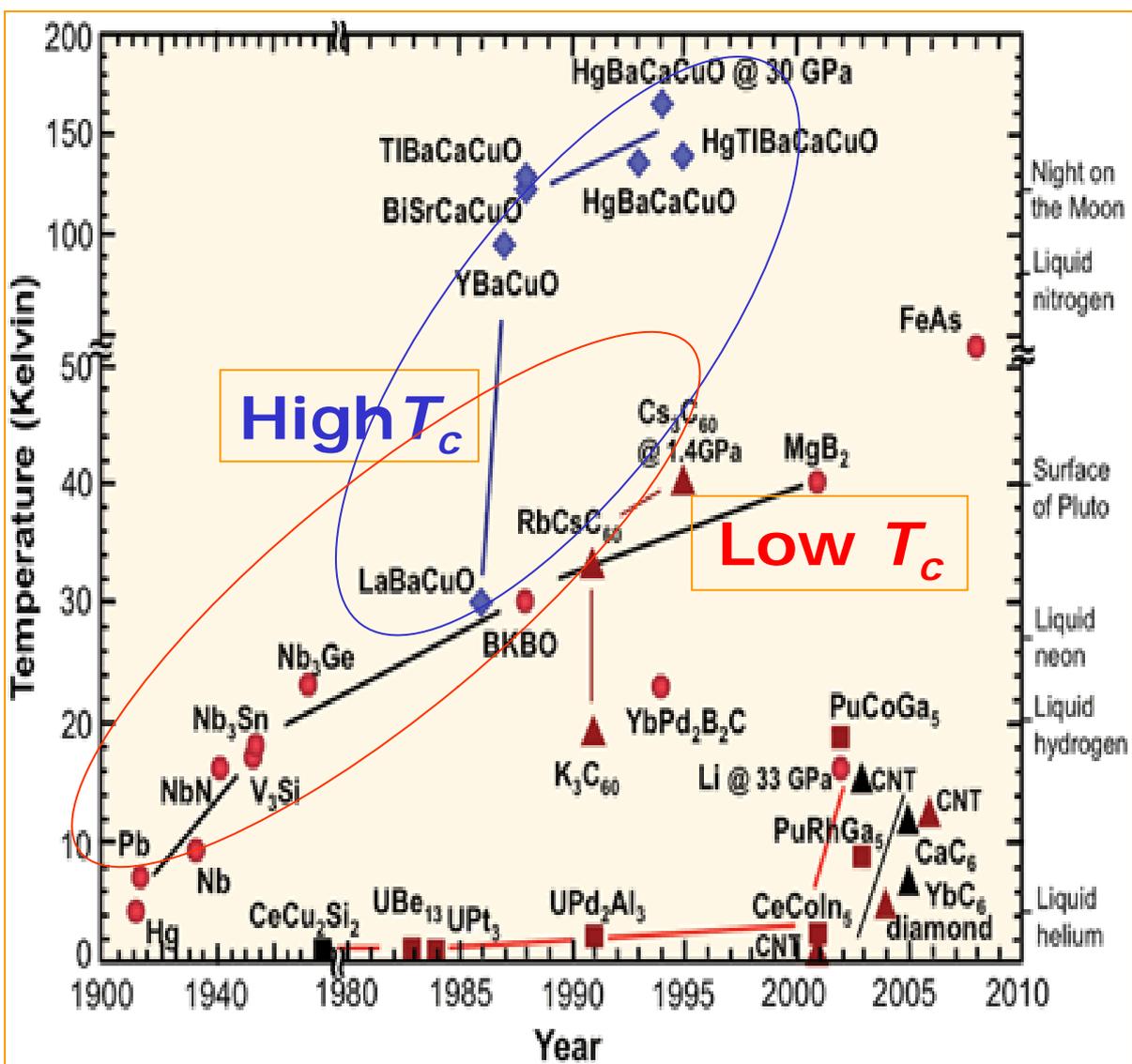
90

BiSCCO-2223

110

YBCO (ReBCO)

92 (92 – 94)<sup>19</sup>



# La Superficie Critica

lo stato superconduttivo è regolato da **3 grandezze**:  
**temperatura, campo magnetico e corrente** (o densità)  
( $T, H, I (J)$ )

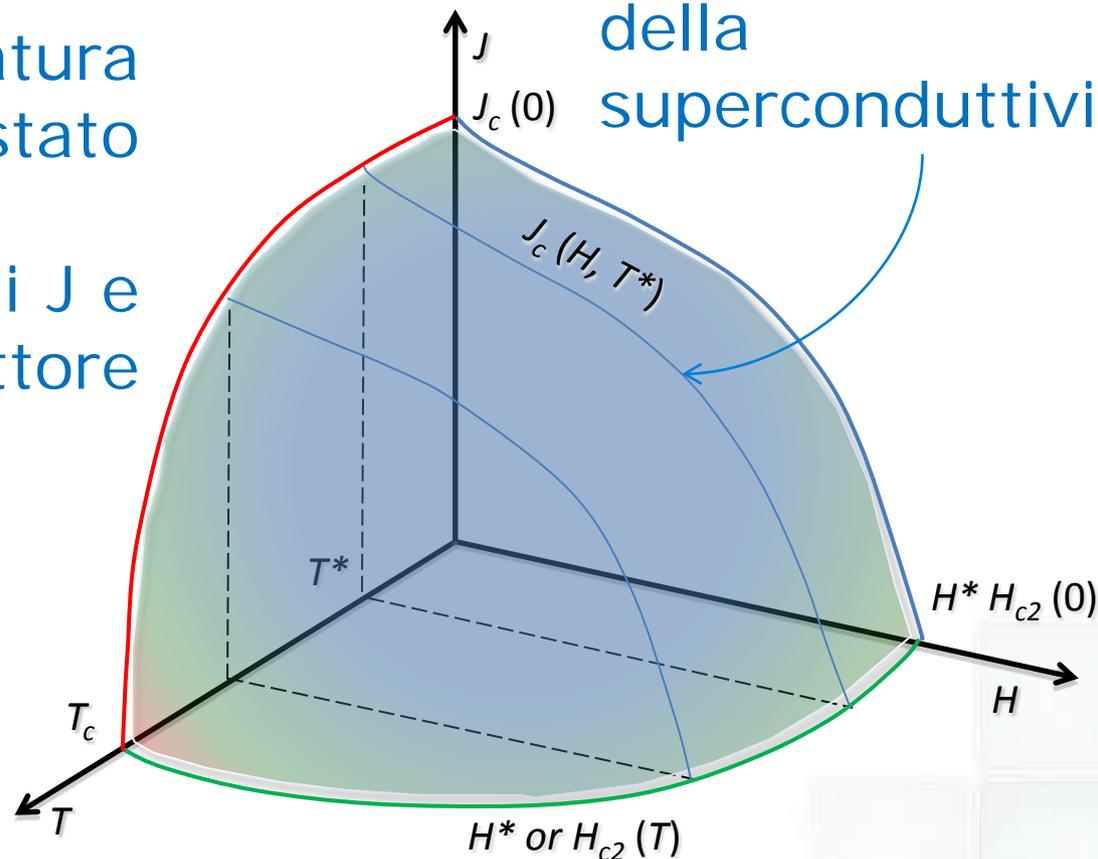
## Parametri critici(\*)

$T_c$ , massima temperatura per cui si manifesta stato superconduttivo;

$J_c, H_{c2}$  massimi valori di  $J$  e  $H$  che un superconduttore può sostenere

(\*) **caratteristici di ogni superconduttore**

**Superficie Critica**  
delimita dominio della superconduttività



# I superconduttori «tecnologici»



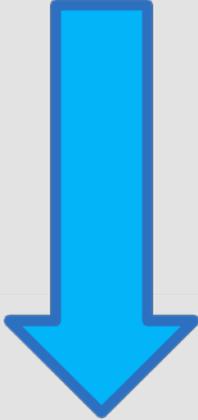
per applicazioni elettrotecniche (più che la  $T_c$ ) contano  $J_c$  e  $H_{c2}$

**Superconduttori tecnologici:** si possono ottenere sotto forma di fili/nastri con  $J > 100 \text{ A/mm}^2$  (10  $\text{A/mm}^2$  per Cu)

# I superconduttori «tecnologici»

per applicazioni elettrotecniche (più che la  $T_c$ ) contano  $J_c$  e  $H_{c2}$

Superconduttori tecnologici: si possono ottenere sotto forma di fili/nastri con  $J > 100 \text{ A/mm}^2$  (10  $\text{A/mm}^2$  per Cu)

	$T_c$ (K)	$B^*$ (4.2 K)	Prestazioni	Fili & nastri	Applicazioni	
<b>NbTi</b>	9.2	10.5 T	Ottimizzate, vicino ai massimi valori teorici	Tecnologia matura – <b>economica &lt; del rame</b>	MRI, magneti per HPE & Fusione	
<b>Nb3Sn</b>	18	24 T		Tecnologia matura - <b>più costosa</b>	magnetni alto campo per HPE & Fusione	
<b>MgB<sub>2</sub></b>	39	8 T		Tecnologia matura – <b>economica &lt; del rame</b>	MRI, trasporto energia (?)	
<b>BSCCO-2212(2223)</b>	90 (110)	> 40 - 50 T (0.2 @ 77 K)		Tecnologia matura. <b>Molto costosa</b>	trasporto energia (?), magnetni alto campo per HPE & Fusione (?)	
<b>YBCO</b>	92	> 40 - 50 T (7 T @ 77 K)		<b>Da ottimizzare. Spazio per ulteriori miglioramenti</b>	Tecnologia in sviluppo. <b>In prospettiva molto economica ≈ rame</b>	motori, trasformatori (?) – magnetni alto campo per HPE & Fusione (?)

## - Introduzione

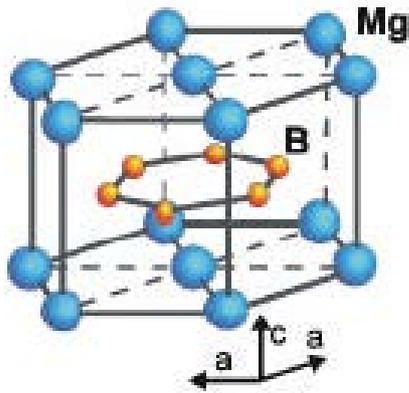
- perchè gli HTS sono utili;

## - I Materiali HTS:

- $MgB_2$ : processi di realizzazione dei conduttori;
  - Applicazioni. **Magneti per NMR/MRI**
- BiSCCO: processi di realizzazione dei conduttori;
  - Applicazioni nel settore energia: **Fault current limiters e cavi per trasporto/distribuzione**
- REBCO: processi di realizzazione dei conduttori;
  - Applicazioni: **I conduttori ad alte correnti per i magneti**

## - Che facciamo all'ENEA?

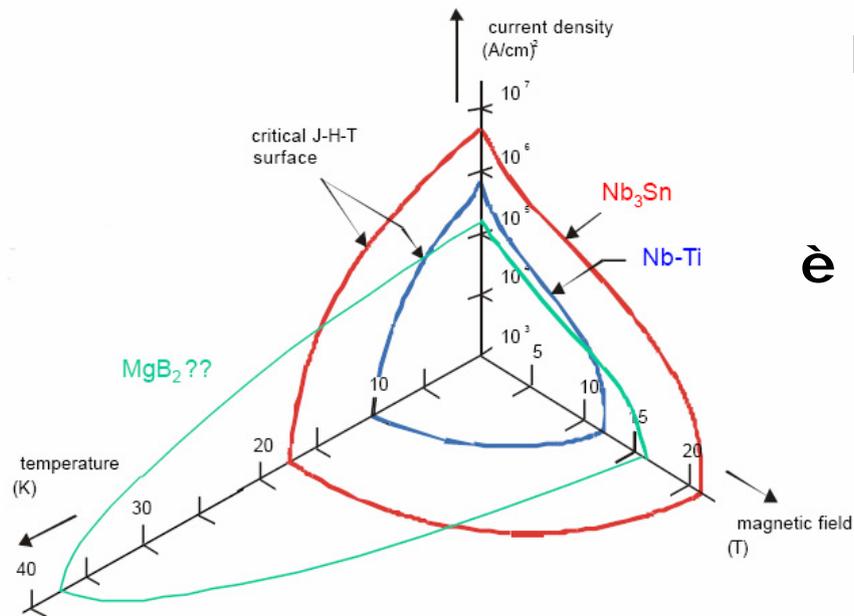
# MgB<sub>2</sub>



Nome	T <sub>c</sub> (K)	B <sub>c2</sub> (T)	γ
MgB <sub>2</sub>	~39	>50 (film) ~19 (bulk)	1.5

Scoperto nel 2001 (J. Akimitsu)

Struttura cristallina AlB<sub>2</sub>-type  
 $a = 3.08 \text{ \AA}$   $c = 3.51 \text{ \AA}$

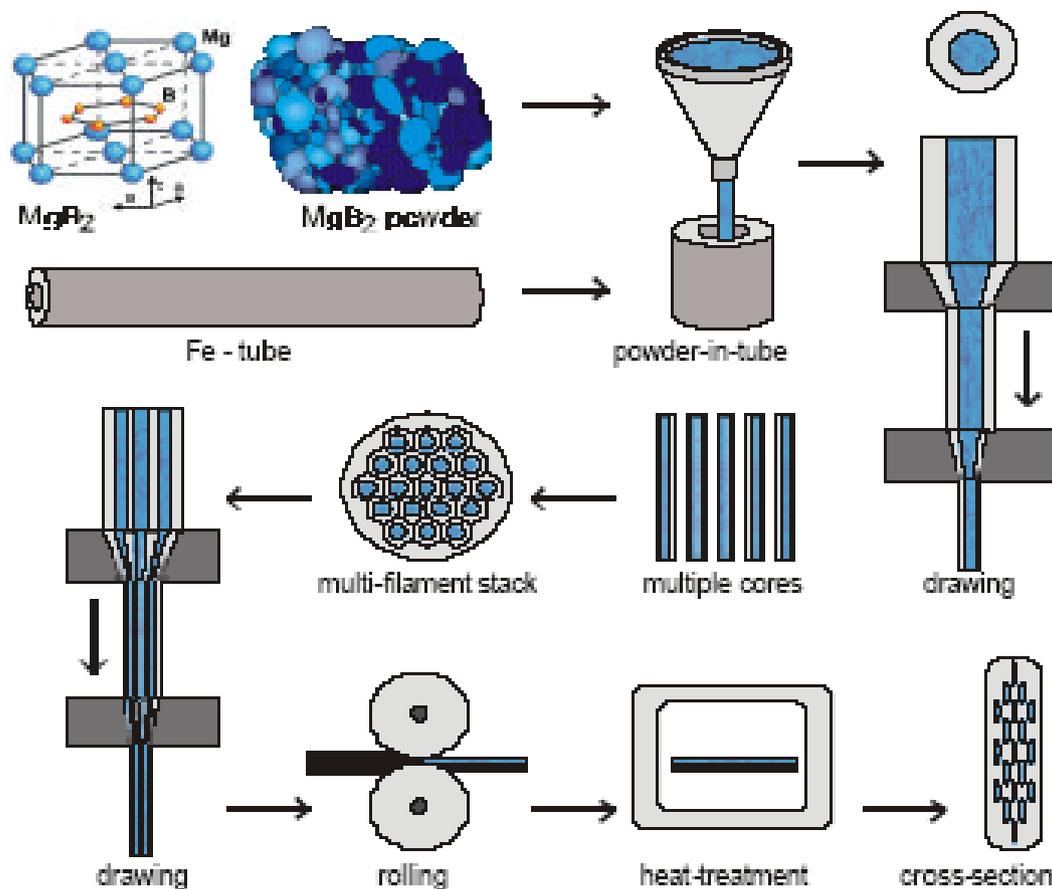


Limitato ad applicazioni solo a  $T > 10 \text{ K}$

**è molto facile da fabbricare (poco costoso)**

# MgB<sub>2</sub>: Tecniche di produzione dei fili

La tecnica di fabbricazione dei cavi MgB<sub>2</sub> è detta **PIT (Powder In Tube)**



**3 metodologie collaudate  
(produzioni di Km di fili con ottime  
proprietà)**

Consiste nel mettere il materiale di partenza (in polvere) in un tubo metallici

I tubi vengono sottoposti a processi di **estrusione** che ne riducono la sezione fino a farlo diventare filamenti

I filamenti vengono posti in una **matrice metallica** con l'aggiunta di rame per la stabilizzazione termica

La matrice **multi-filamentare** viene nuovamente estrusa fino a raggiungere le dimensioni desiderate e poi twistata per ridurre le perdite a.c. (ed eventualmente appiattita)

Il passo finale è un **trattamento termico** per la formazione della fase giusta del composto e il rilascio degli stress meccanici

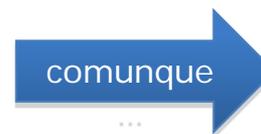
# MgB<sub>2</sub>: Tecniche di produzione dei fili

Il processo di produzione dei fili in MgB<sub>2</sub> presenta alcune criticità...

- purezza dei materiali di partenza (ex-situ)
- scelta dei materiali metallici della matrice (Fe e Ni buoni, Nb, Ta e Ti meglio)

...e qualche limite

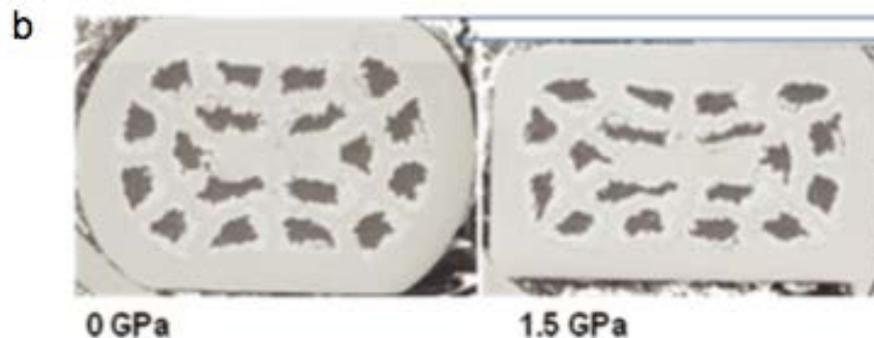
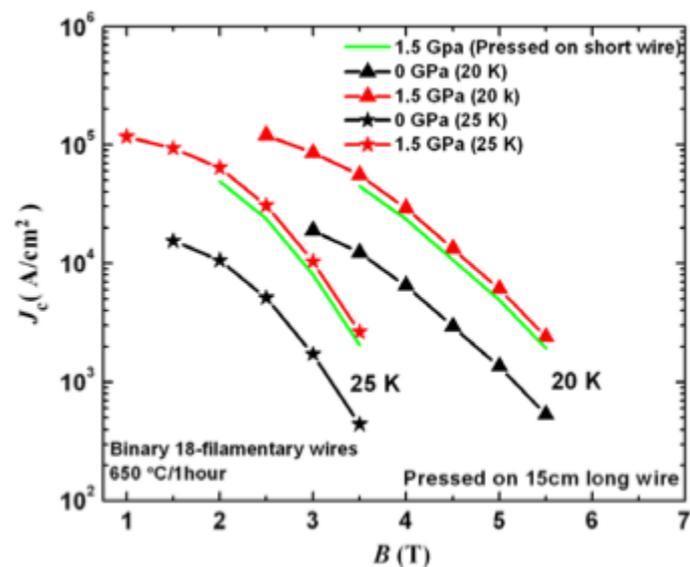
**bassa densità di MgB<sub>2</sub>** (tra il 45 e il 70%) che limita la connessione tra i grani (e quindi la  $J_c$ )



**Work in progress**

## Cold High Pressure Densification (CHPD)

C. Senatore, R. Flukiger, Univ. Ginevra



Riduzione spessore  
=  
Aumento densità

$J_c$  aumenta di circa 5 volte

# MgB<sub>2</sub>: Le applicazioni

## Sistema MRI a secco (no elio liquido) con Cryocooler

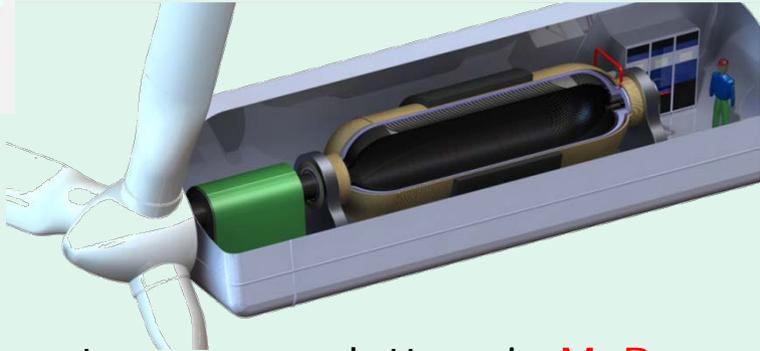
Main Magnet Parameters	
Nominal Field	0.5 T
Peak Field on the Conductor	1.3 T
Overall Dimensions	2 x 2 x 2.4 m
Patient Available Gap	0.6 m
Weight	25'000 Kg



cortesia di M. Tropeano

Installato e operante in strutture ospedaliere in EU e USA

## Generatori per Wind turbine

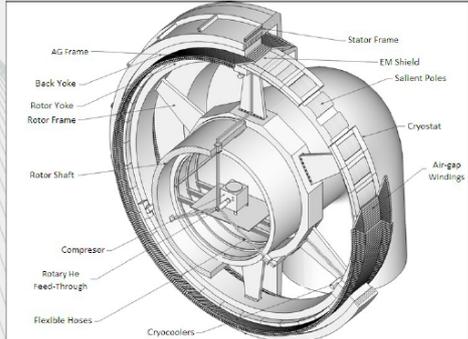



**AML Energy**

- 10 MW
- 10 RPM
- Completamente superconduttore in MgB<sub>2</sub>

**GENERAL CONCEPT**  
**SUPER**conducting, **RELI**able, lightweight, **AND** more **POWER**ful offshore wind turbine.

- ✓ 10 MW turbine based on a SC generator
- ✓ Direct Drive
- ✓ Considered aspects: electric conversion, integration and manufacturability
- ✓ Allow scaling to 10 MW and beyond by radical reduction of the head mass



SC wind turbine according to Tecnalia concept (PTC/ES2009/070639)



## Cavi DC per trasmissione/distribuzione di potenza

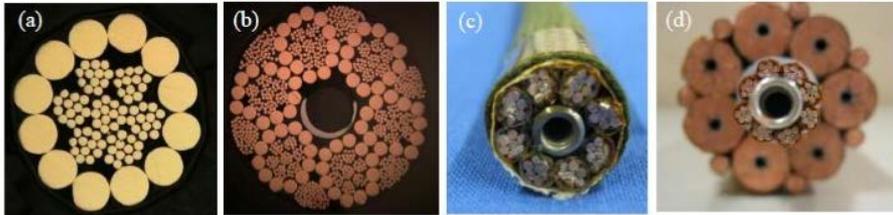
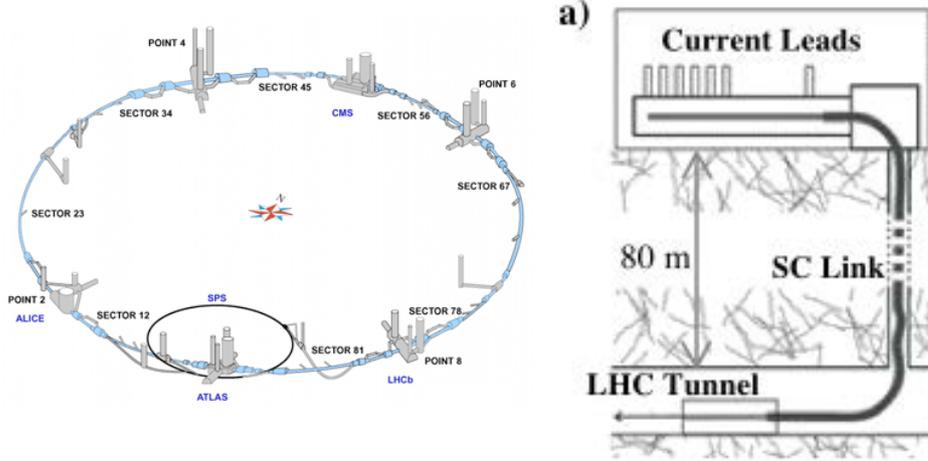


Figure 2. Mock-up of: 3 kA cable (a), 14 kA cable (b), group of  $8 \times 0.6$  kA cables (c), configuration of  $7 \times 14$  kA,  $7 \times 3$  kA and  $8 \times 0.6$  kA cables (d). The external diameter of each assembly is reported in Figure 1.

G. Grasso - Columbus, A. Ballarino - CERN



Linee di alimentazione dei magneti LHC (CERN, **High-Luminosity**)

Aprile 2104, **WORLD-RECORD** al CERN **20 kA a 24 K** in un cavo di 20 m;

**Best Paths (CERN – IASS)** : Linee di trasmissione innovative in MgB<sub>2</sub> raffreddate in H<sub>2</sub> liquido (HVDC, 320 kV)

# 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  $\Delta E$ :

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

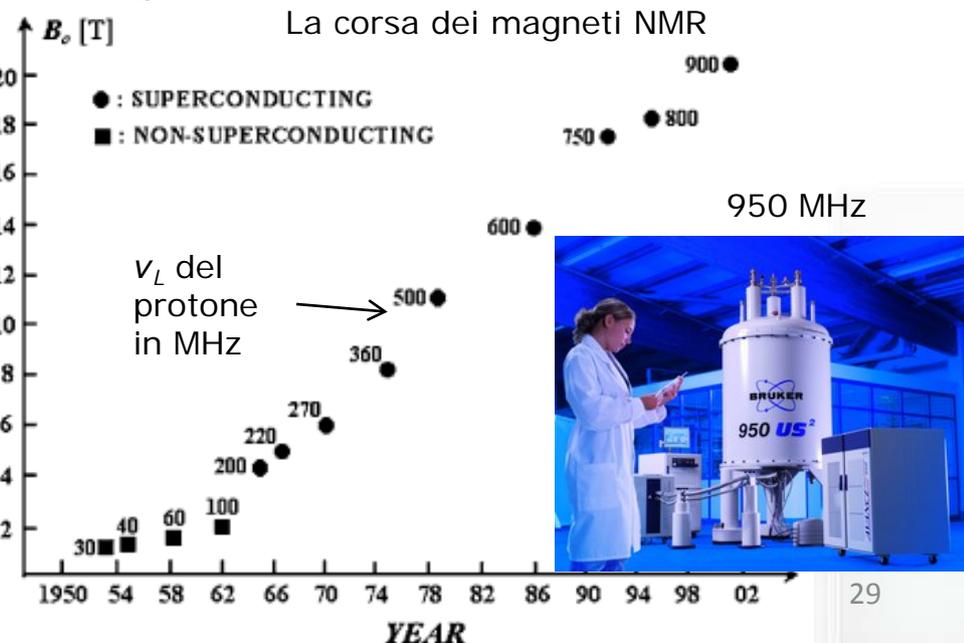
$$\nu_L = \gamma B_0 / 2\pi = \text{frequenza di Larmor}$$

$\gamma$  = 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

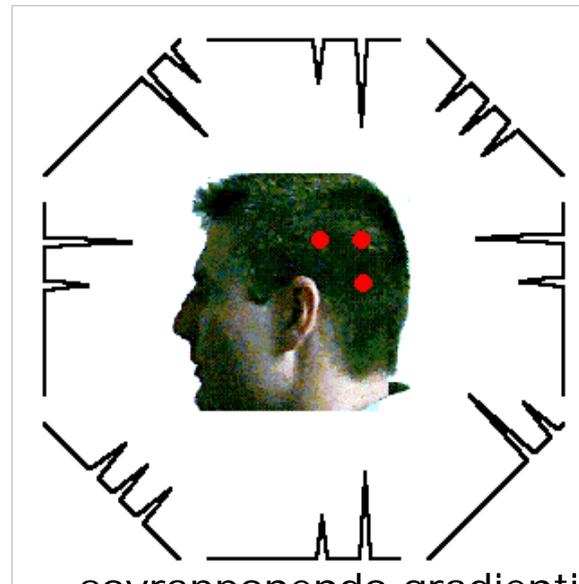
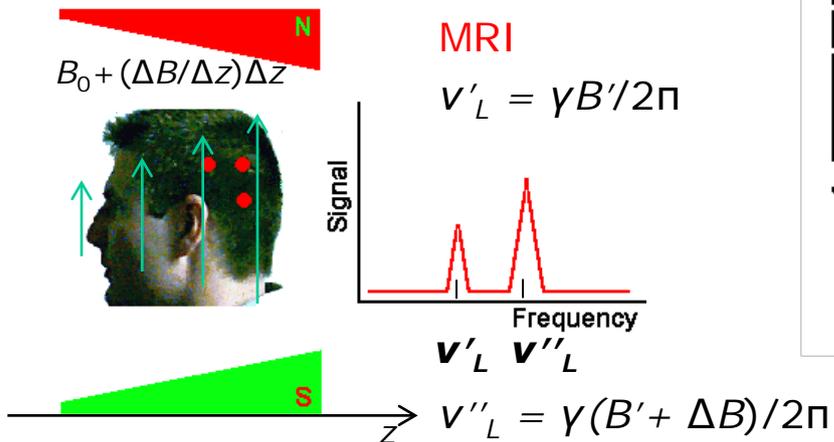
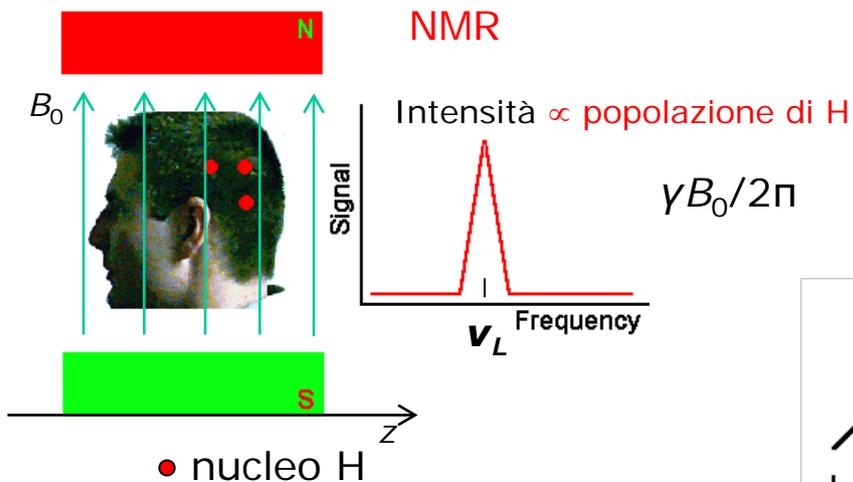
Magneti per NMR  
Superconduttore  $Nb_3Sn$



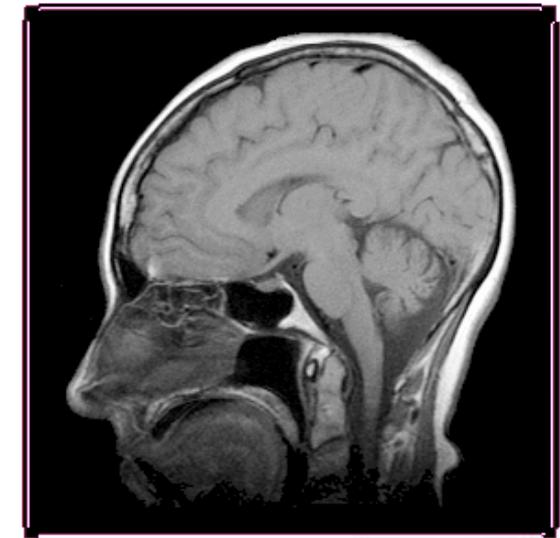
# I magneti per il biomedicale

## NMR/MRI

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



sovrapponendo gradienti in diverse direzioni e rielaborando...



...si ottiene l'immagine

# I magneti per il biomedicale

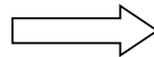
## NMR/MRI

### 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 per MRI: Nb-Ti**



**PARAMed**  
MEDICAL SYSTEMS



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

**Columbus**  
Superconductors  
GRUPPO MALACALZA

## - Introduzione

- perchè gli HTS sono utili;

## - I Materiali HTS:

- $MgB_2$ : processi di realizzazione dei conduttori;

- Applicazioni. **Magneti per NMR/MRI**

- BiSCCO: processi di realizzazione dei conduttori;

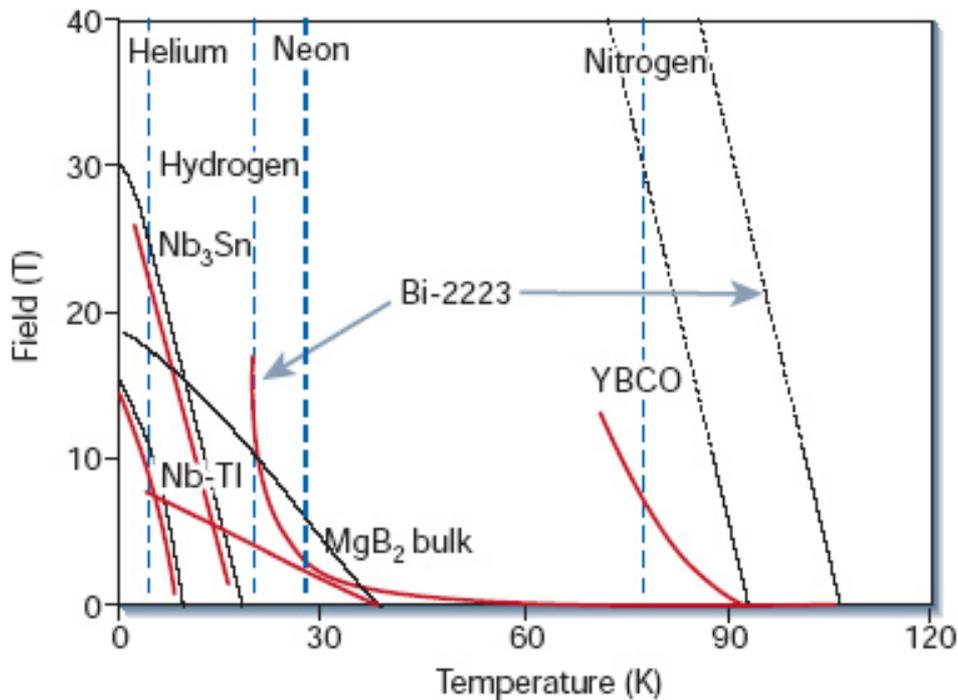
- Applicazioni nel settore energia: **Fault current limiters e cavi per trasporto/distribuzione**

- REBCO: processi di realizzazione dei conduttori;

- Applicazioni: **I conduttori ad alte correnti per i magneti**

## - Che facciamo all'ENEA?

Tutti i cuprati sono superconduttori con campi critici elevati (>100 T)



Principali condizioni di operazione

**Bi-2223** -> s.f @ 77K, in f. <50 K

**Bi-2212** -> <20 K

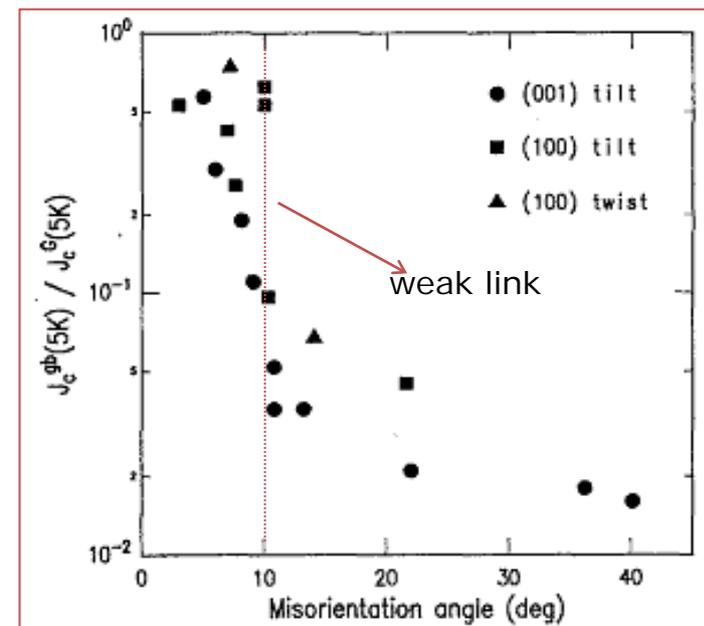
**YBCO** -> 77 K

Nei cuprati le proprietà di trasporto sono limitate fortemente dalla forte **dipendenza della  $J_c$  da angolo** tra i grani

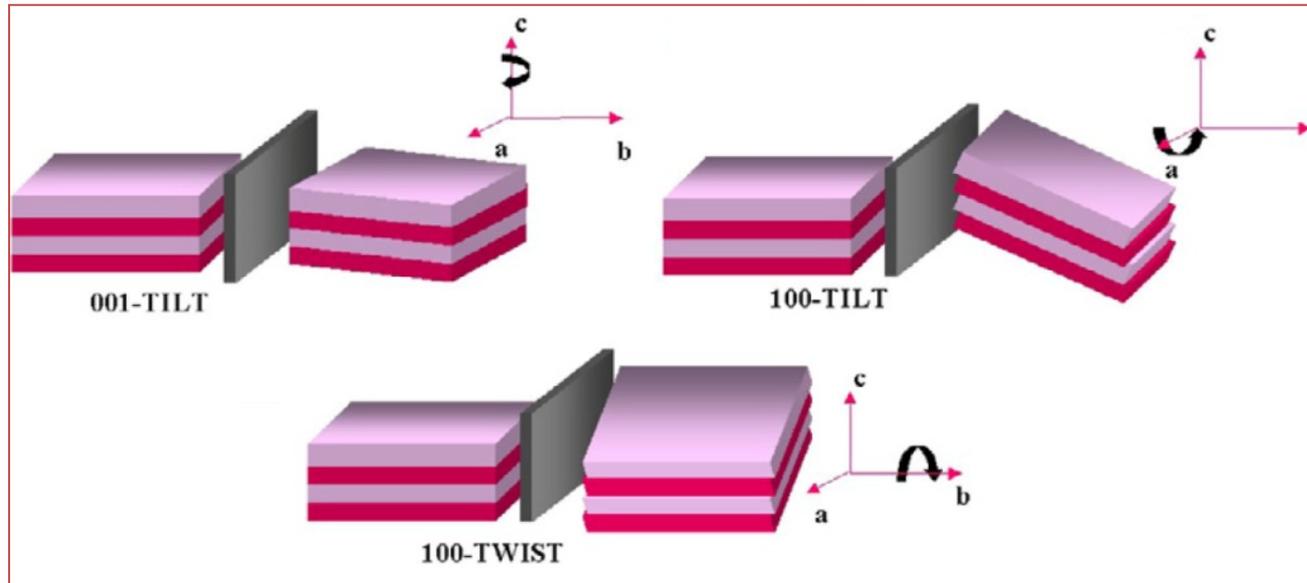
## E' possibile fabbricare fili HTS per applicazioni?

Sono tutti materiali ceramici, quindi duri, **fragili e poco resistenti alle trazioni** ma soprattutto alla **curvatura**

Effetto del **bordo grano**: importanza dell'orientazione e della **tessitura dei materiali**



# I Cuprati: Il bordo grano e la tessitura



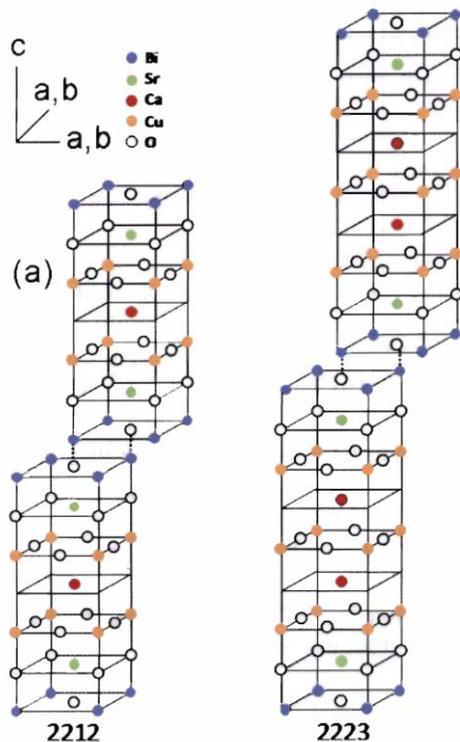
Se due grani contigui sono disallineati tra loro,  
la zona di **bordo grano** diventa **un difetto**  
dove la superconduttività si "indebolisce"

(Problema tecnologico)

il bordo grano (weak link) limita la  $J_c$

I cuprati devono avere grani con  
orientazione controllata = **Tessitura**

# BiSrCaCuO 2223-2212



Nome	$T_c$ (K)	$B_{c2}$ (T)	$\gamma$
Bi-2223	~110	>150	50/100
Bi-2212	~95	>100	40/60

Molte fasi possibili nella famiglia  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_{n-1}\text{Cu}_n\text{O}_{2n+4}$ ,  
 $n=0, 1, 2, 3, \dots$

Nel 1989 è stato realizzato il primo filo con la fase 2212  
(Heine)

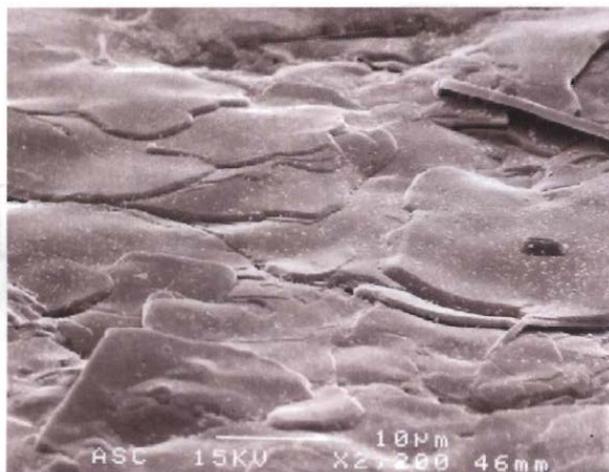
Oggi i cavi a base di 2223 sono detti: **1G HTS conductors**

Come è possibile realizzare fili di BSCCO?

Nel BSCCO è sufficiente  
una buona orientazione  
lungo l'asse  $c$  per avere  
buoni valori di  $J_c$

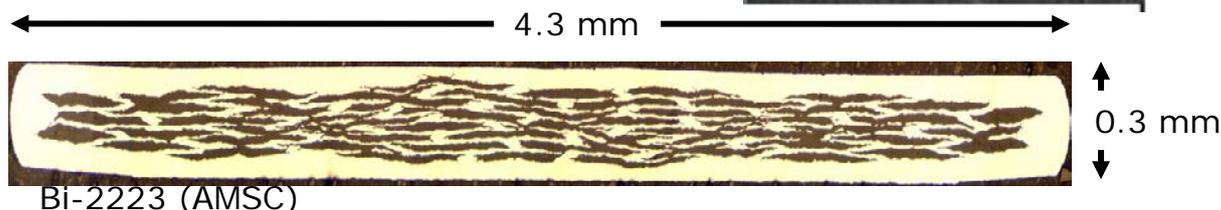
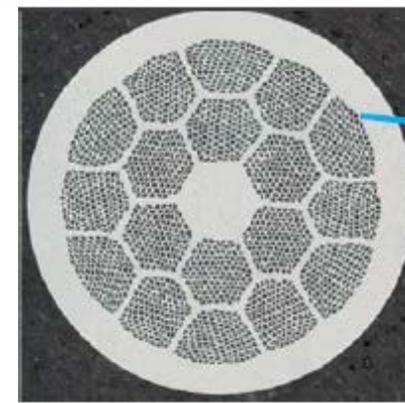
La tessitura lungo  
l'asse  $c$  è promossa  
dall'anisotropia  
della cella e da  
trattamenti  
meccanici

Il BSCCO ha una  
crescita lamellare  
che favorisce le  
proprietà meccaniche



Struttura lamellare del BSCCO

$$I_c > 300 \text{ A @ 77K s.f.}$$



Come per l'MgB<sub>2</sub>,

- ottenuti mediante tecnica **PIT**
- **multifilamentari**
- in forma appiattita – **nastro (per il 2223)** o anche **tonda (solo per il 2212)**



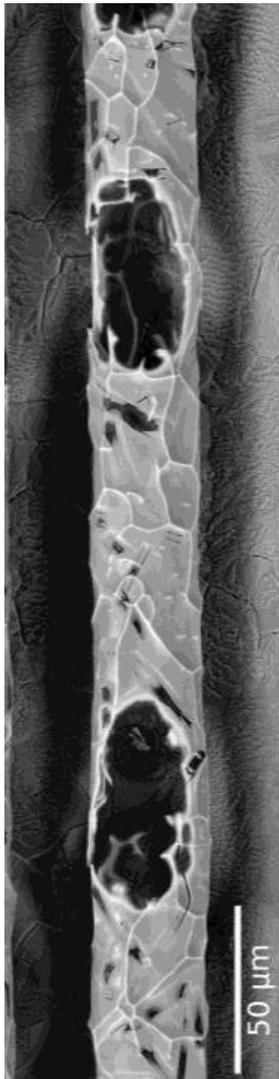
Sia le barriere di diffusione sia la **matrice metallica sono in Ag**

### Perchè Ag

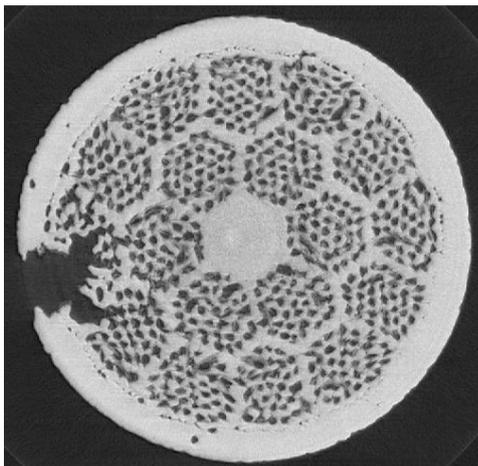
- Unico materiale che esibisce:
- compatibilità chimica con BSCCO
  - permeabilità all'ossigeno

il 60% del materiale in un cavo di BSCCO è Ag!!

→ **COSTO ELEVATO!** (200 €/kA•m)



**Problema**  
purezza e densità  
di impaccettamento  
delle polveri: spazio  
vuoto si espande per  
pressione del gas  
durante trattamento  
termico.



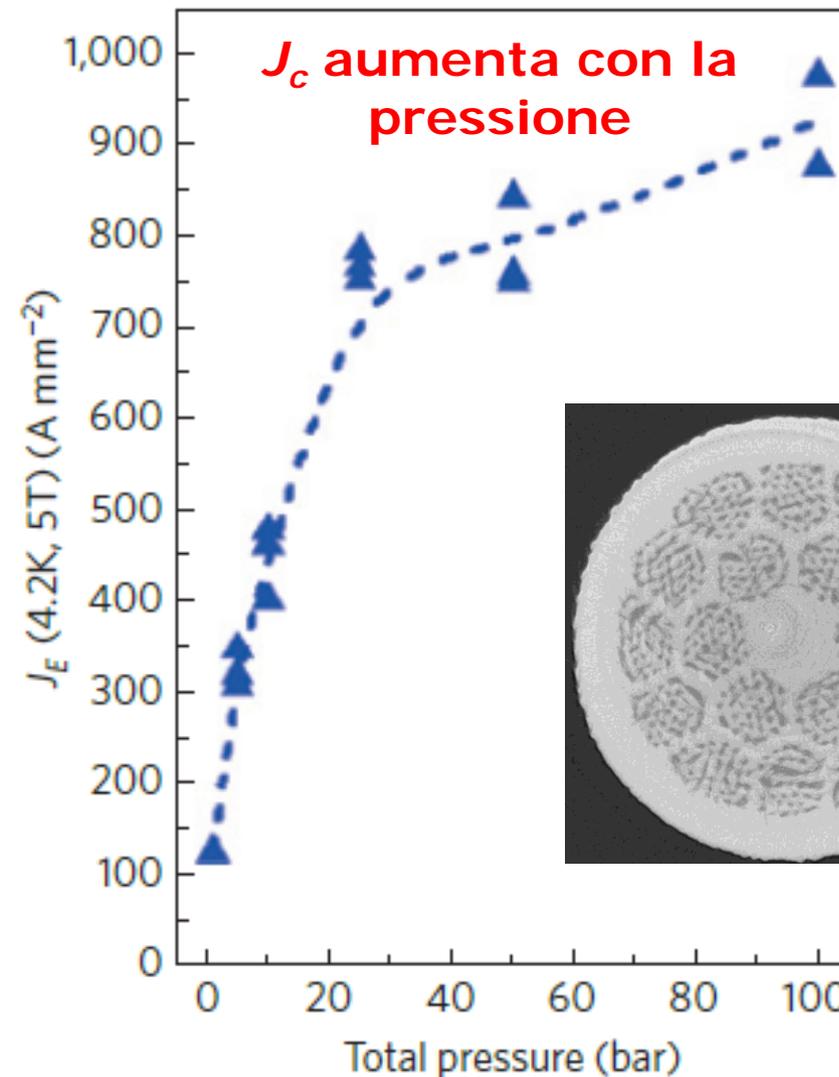
Kametani et al., SuST **24** (2011)

Larbalestier et al., *Nature Materials* **13** (2014)

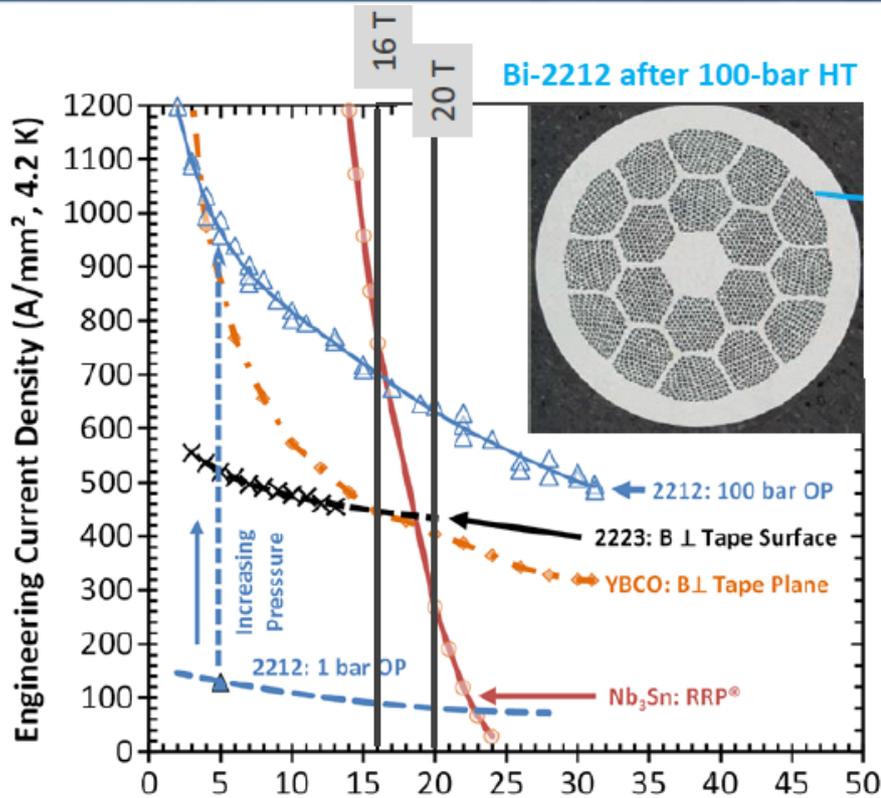
G. Celentano, 10 dicembre 2018

## Densificazione

processo termico in sovrappressione  
(fino a 100 bar): riduzione della  
formazione di bolle



# BiSrCaCuO 2212: Le applicazioni



## Magneti per acceleratori

Sì

- Densità ingegneristica  $J_E = 500 - 1000 \text{ A/mm}^2$ ;
- è un filo tondo (no anisotropia)

No

(**Wind&react**) processo termico delicato dopo avvolgimento del magnete ( $890^\circ \text{ C} \square 1^\circ \text{ C in O}_2$ )



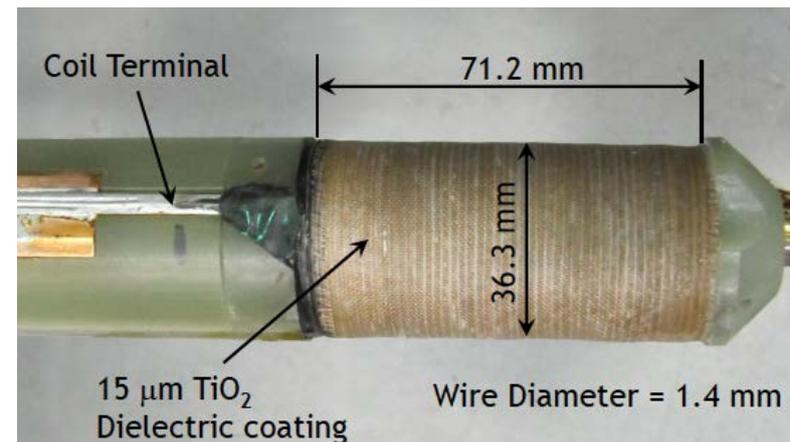
Cooley, WAM-HTS (2014) Applied Field (T)

Godeke, WAM-HTS (2014)

Hellstrom, WAM-HTS (2014)

## Magneti: inserti per alto campo

33.8 T (2.6 T in background 31.2 T);



# BiSrCaCuO 2223: Le applicazioni

meno attraente di BSCCO 2212: applicazioni solo a bassi campi e alte T (LN2):

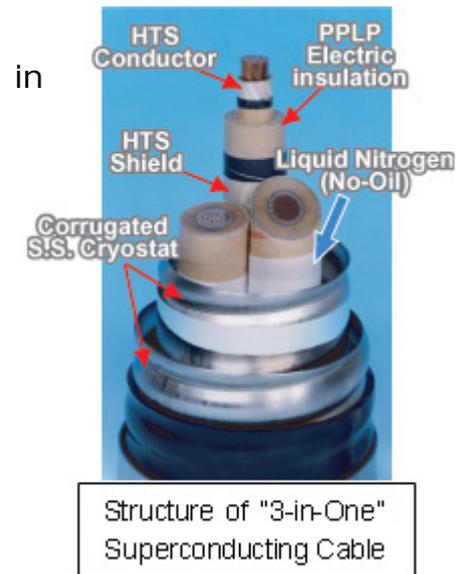
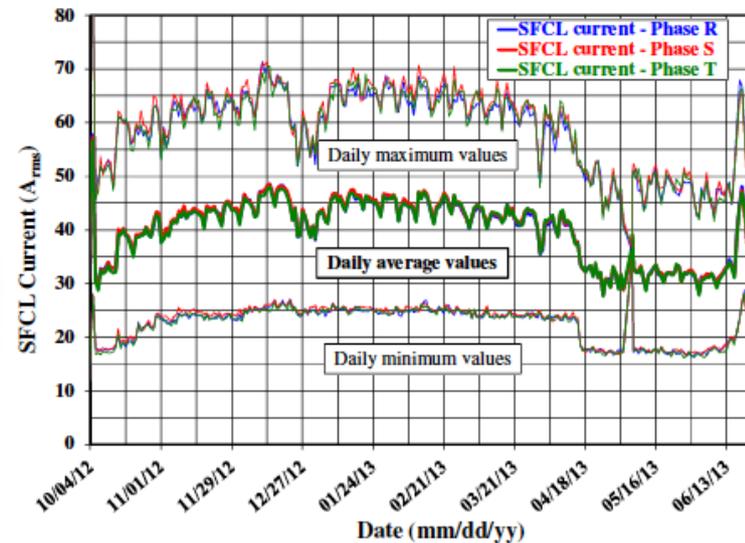
- SCFCL;
- cavi trasmissione/distribuzione in AC;

Primo cavo HTS 34.5kV/0.8kA  
installato in rete presso Albany (NY) in  
USA 2006 –  
Impiega 70 Km di DI- BiSCCO  
*Sumitomo Industries* tape

## SC Fault Current Limiter



Martini, EUCAS 2012



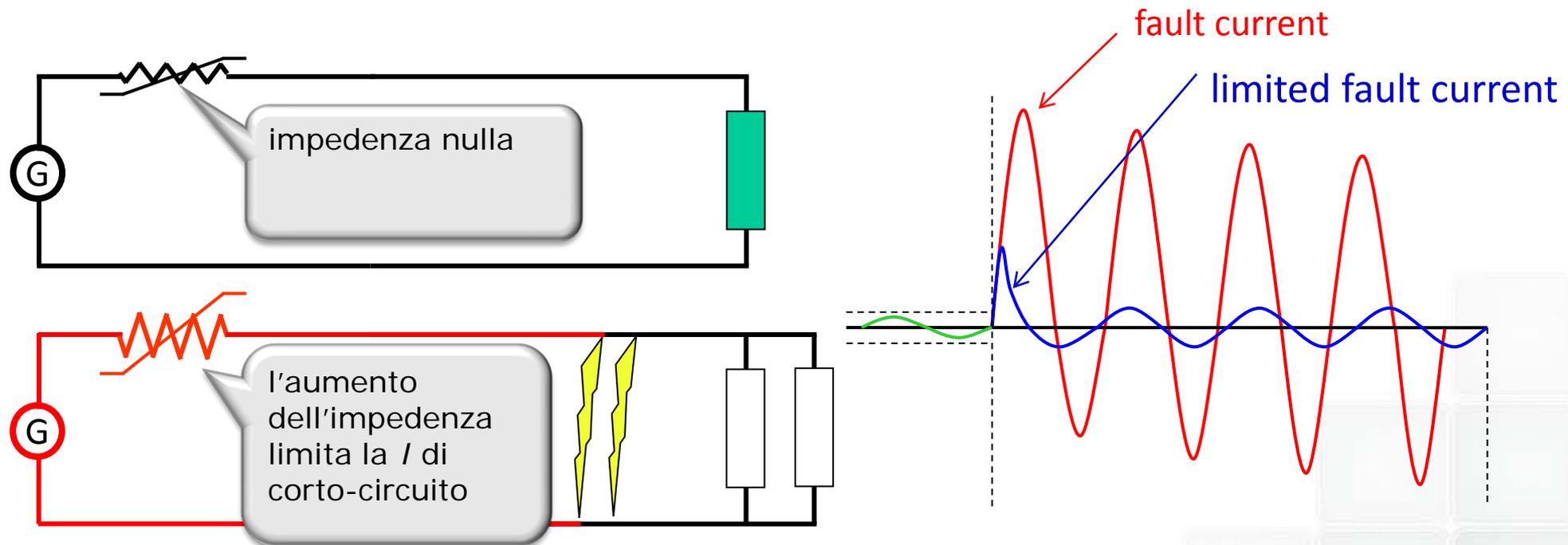
Installazione e test di un SC FCL 9kV/220A in  
sottostazione S. Dionigi a Milano da A2A Milano e RSE

# 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:**

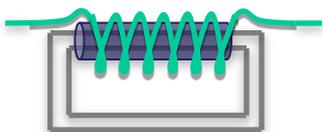
- in condizioni operative normali, il FCL deve avere impedenza trascurabile nella rete
- in caso di corto circuito, l'impedenza deve aumentare rapidamente riducendo la corrente che circola nel rete
- Sfruttano la rapida variazione resistiva e magnetica dei superconduttori nella transizione superconduttore/normale.





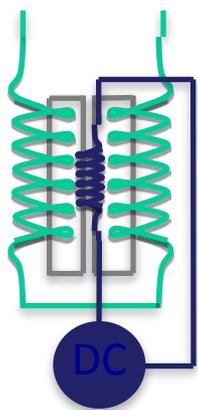
Resistivo

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



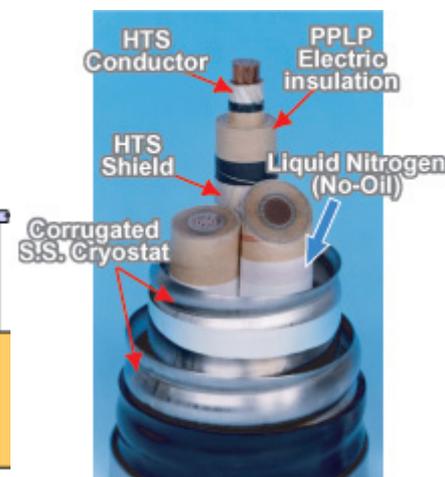
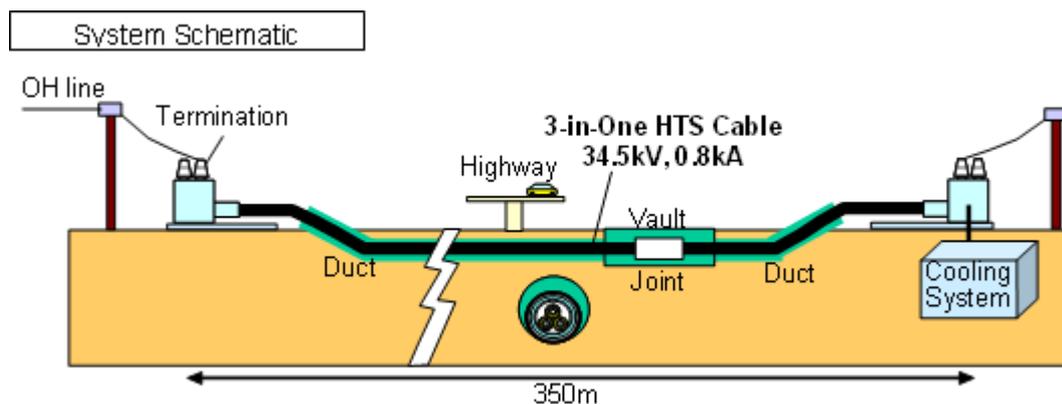
Induttivo a nucleo pre-saturato

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

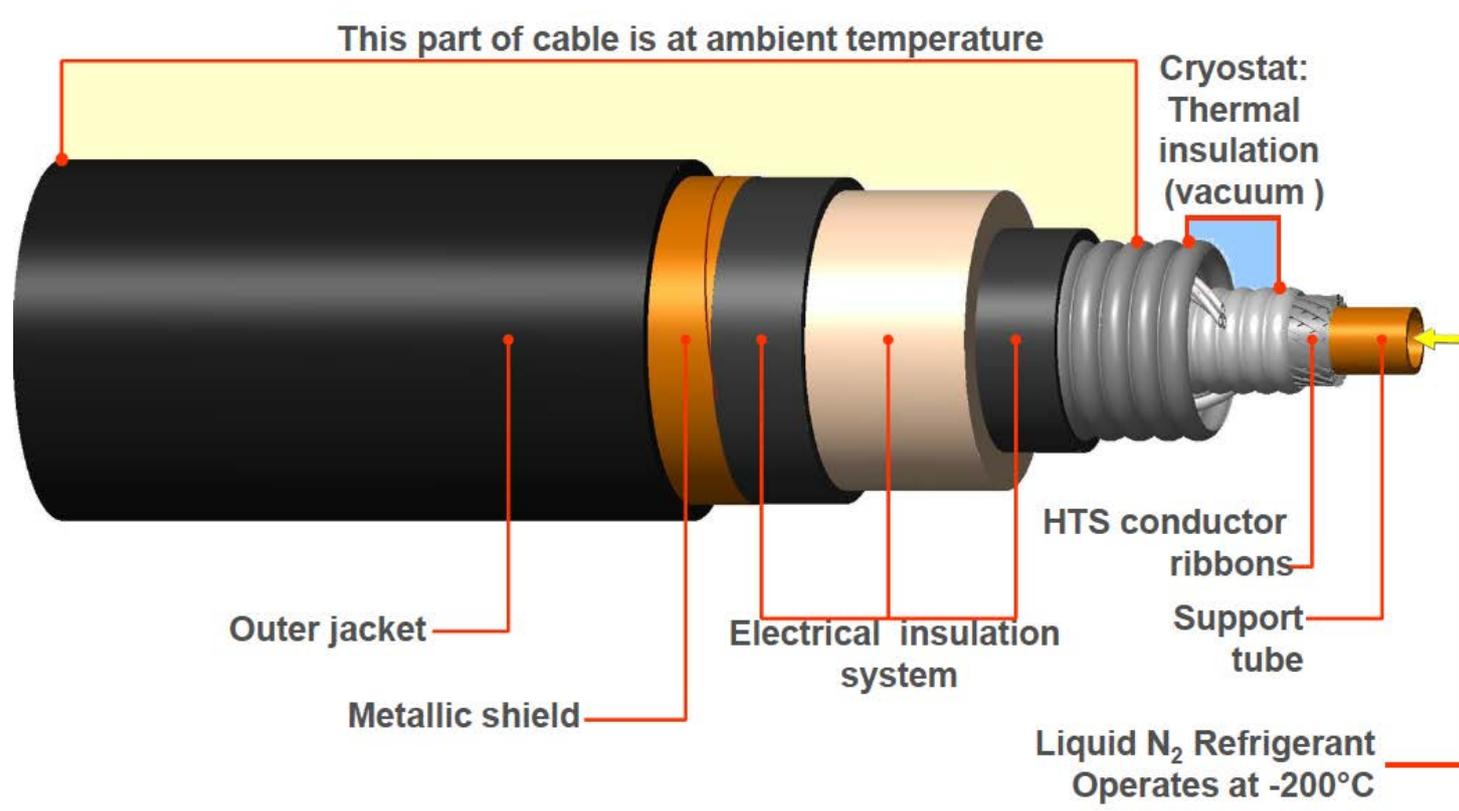
L'attuale *rete di distribuzione e trasmissione* (D&T) dell'energia elettrica è inadeguata per **crescente domanda di energia elettrica**;

- **Elevato valore della potenza trasmissibile** (Potenza trasmissibile fino a 4-10 volte superiore rispetto ai cavi tradizionali installati)
- **Compattezza** (a parità di potenza elettrica trasmessa)
- **Ridotto valore della tensione di trasmissione** (è possibile pensare a sistemi che non utilizzano trasformatori elevatori)
- **Perdite elettriche ridotte** (riduzione delle perdite di circa il 40% in alternata, e ancora maggiori in continua, ma bisogna tenere conto della potenza per la refrigerazione)
- **Problemi: costo ed affidabilità**

Primo cavo HTS installato in rete presso Albany (NY) in USA 2006 – Impiega 70 Km di BiSCCO Sumitomo Industries tape



Structure of "3-in-One" Superconducting Cable



I nastri HTS sono avvolti a spirale attorno al tubo centrale (di raffreddamento) a strati sovrapposti e con verso opposto di avvolgimento

**Campo magnetico esterno si annulla.** Quello interno è parallelo all'asse.  
**No componenti perpendicolari ai nastri HTS**

## - Introduzione

- perchè gli HTS sono utili;

## - I Materiali HTS:

- $MgB_2$ : processi di realizzazione dei conduttori;

- Applicazioni. **Magneti per NMR/MRI**

- BiSCCO: processi di realizzazione dei conduttori;

- Applicazioni nel settore energia: **Fault current limiters e cavi per trasporto/distribuzione**

- REBCO: processi di realizzazione dei conduttori;

- Applicazioni: **I conduttori ad alte correnti per i magneti**

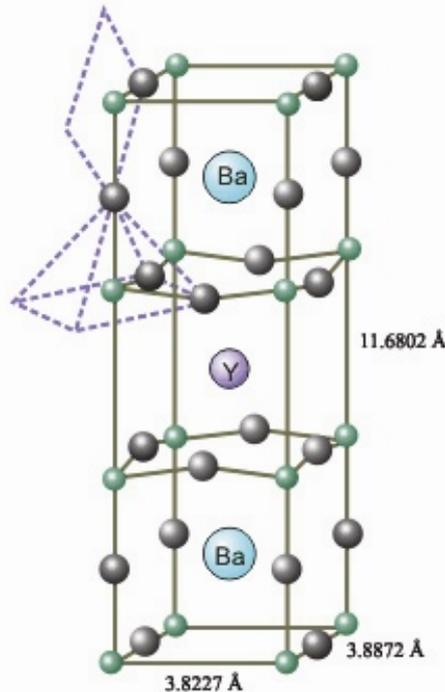
## - Che facciamo all'ENEA?

# YBCO 123

Nome	$T_c$ (K)	$B_{c2}(T)$ @ 4.2 K	$B_{c2}(T)$ @ 77 K	$\gamma$
YBCO	~92	>100	7	5÷7

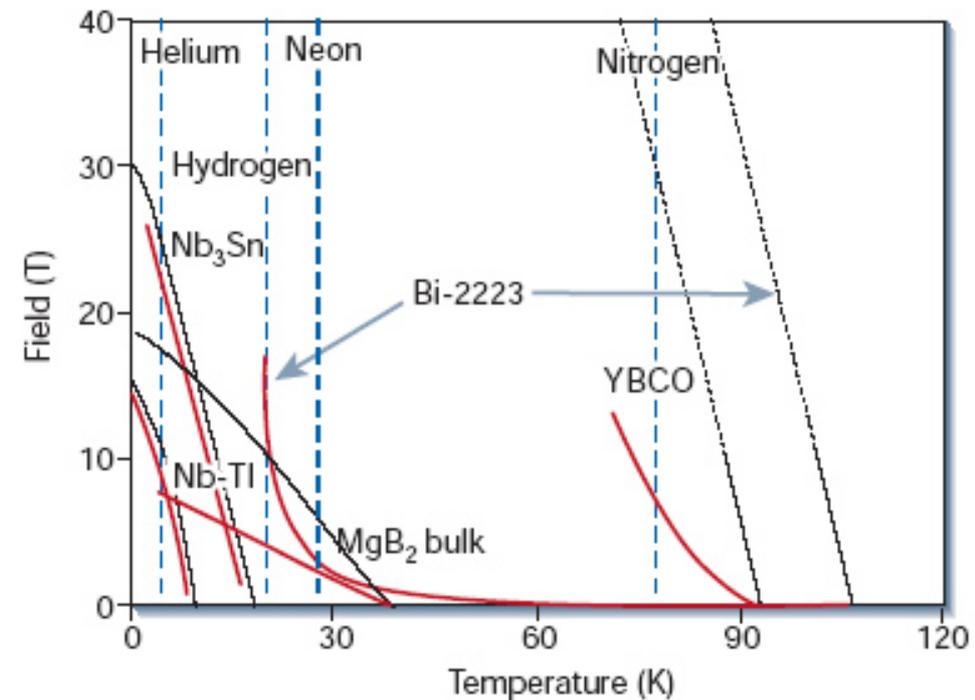
E' l'unico HTS che può operare in campo medio/alto a LN2 (7 – 10 T)

E' stato il primo superconduttore con temperatura critica sopra i 77 K ad essere stato scoperto



E' caratterizzato da una cella più semplice di quella del BSCCO con 2 piani  $\text{CuO}_2$

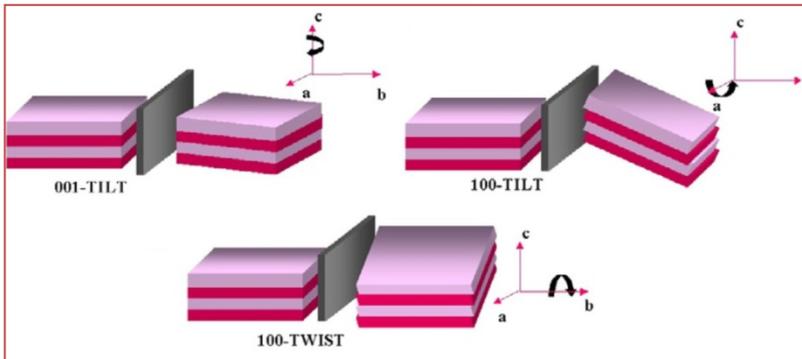
Ha **minore anisotropia del BSCCO**



Basta trovare il processo per ottenere conduttore con alte  $J_c$

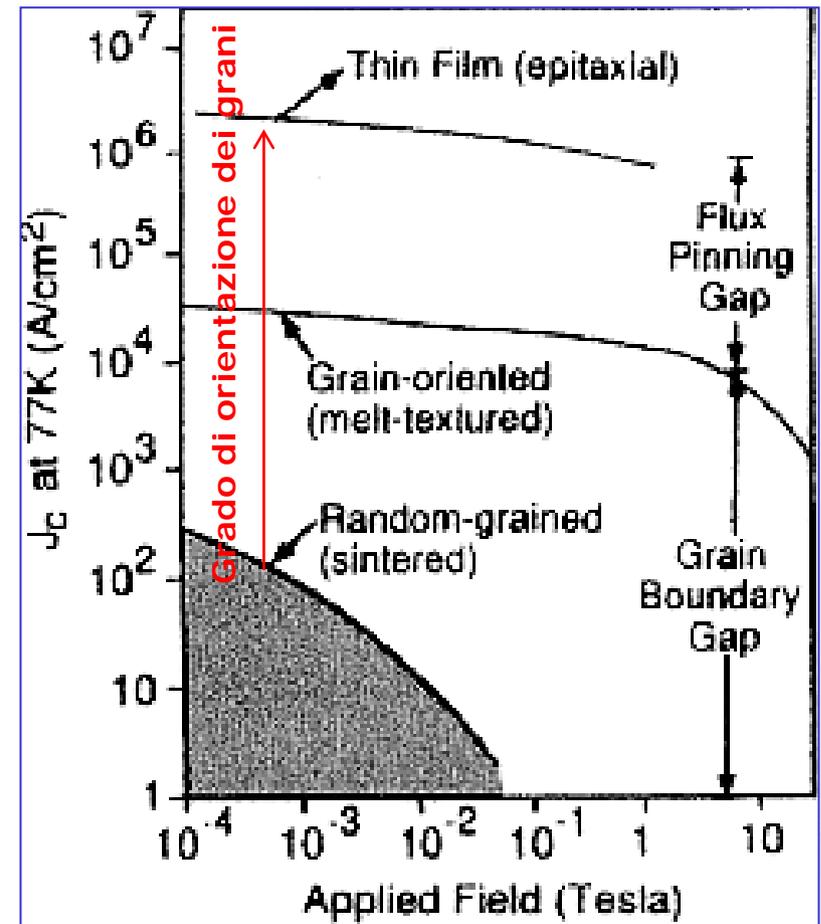
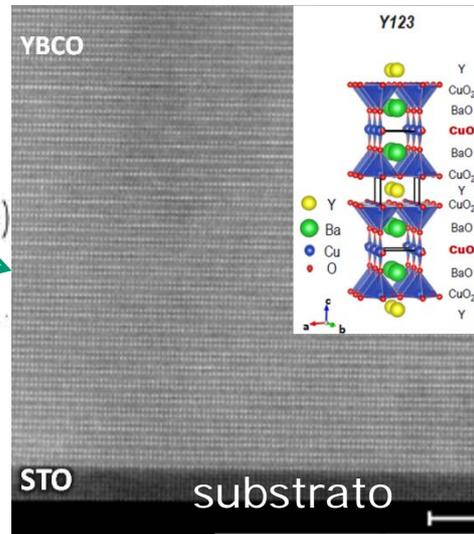
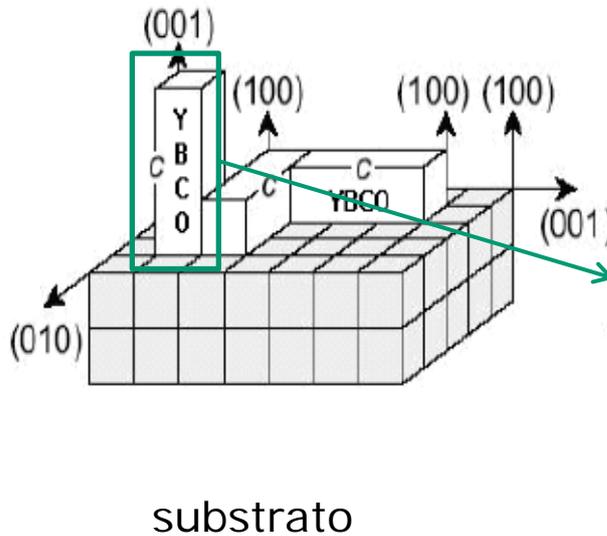
Ba Barium  
 Y Yttrium  
 ● Oxigen  
 ● Copper

# Film di YBCO: l'epitassia



Le tecniche di crescita di **film sottili** permettono un accurato **controllo della tessitura** tramite il processo di epitassia

Film epitassiale di YBCO (immagine TEM)



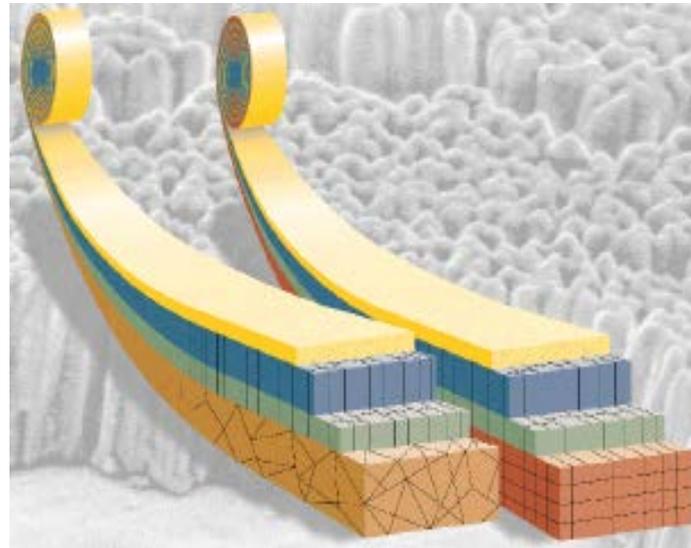
# YBCO 123: coated conductors

**Idea**  
(Ijima)



Crescere epitassialmente l'YBCO in forma di FILM su un lamina metallica biassialmente tessiturata

2G HTS conductors  
**COATED CONDUCTOR**



YBCO e strati intermedi (buffer layer) sono film depositati con tecnica di crescita di film sottile

**Controllo della tessitura con processi epitassiali**

**Nastro metallico**



**Buffer layers**



**YBCO**



**Strati metallici stabilizzatori**  
(Cu, Ag)

- deve conferire al conduttore flessibilità
- non deve essere magnetico

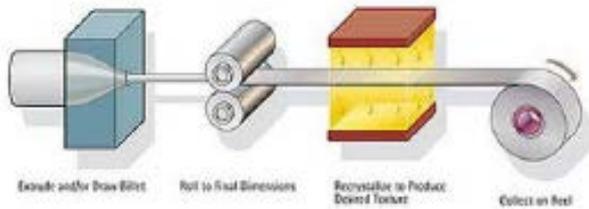
- deve essere biassialmente tessiturato
- deve favorire la crescita epitassiale dell'YBCO
- deve agire come barriera alla diffusione del metallo dal substrato
- deve essere chimicamente compatibile con l'YBCO

- devono fornire un percorso alternativo alla corrente (shunt elettrico)
  - devono stabilizzare la temperatura (shunt termico)

# YBCO 123: coated conductors. Il substrato

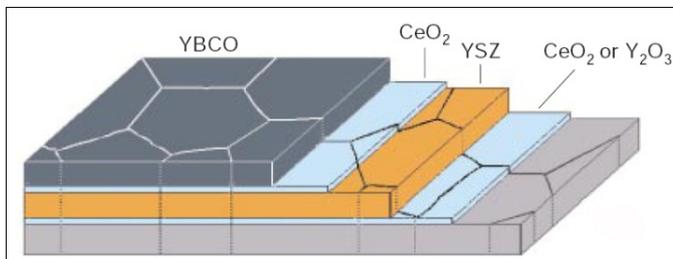
Due tecniche per la tessitura della lamina metallica di supporto (substrato)

Tecnica **RABiTS** (Rolling Assisted Bi-Axially Textured Substrate)



Substrate Production

Il substrato viene preparato con processi meccanici (laminazione) e termici (ricristallizzazione). Processo metallurgico ben assodato da più di un secolo per ottenere una tessitura biassiale nei metalli fcc (Cu, Al, Pd, Pt, ecc...)



La tessitura del substrato metallico viene trasferita all'YBCO, tramite i buffer layer, mediante crescite epitassiali

Il **nichel** è un buon candidato: costa poco, ha struttura cubica ed è flessibile ma non troppo

Purtroppo però la sua tessitura non è stabile sopra i 600 ° C, e soprattutto è un materiale ferromagnetico con temperatura di Curie di circa 627 K

Le leghe del Ni con una percentuale dal 5 al 13% di V, W o Mo pur mantenendo le caratteristiche positive del nichel hanno una temperatura di Curie sotto i 77K e sono stabili ad alte temperature

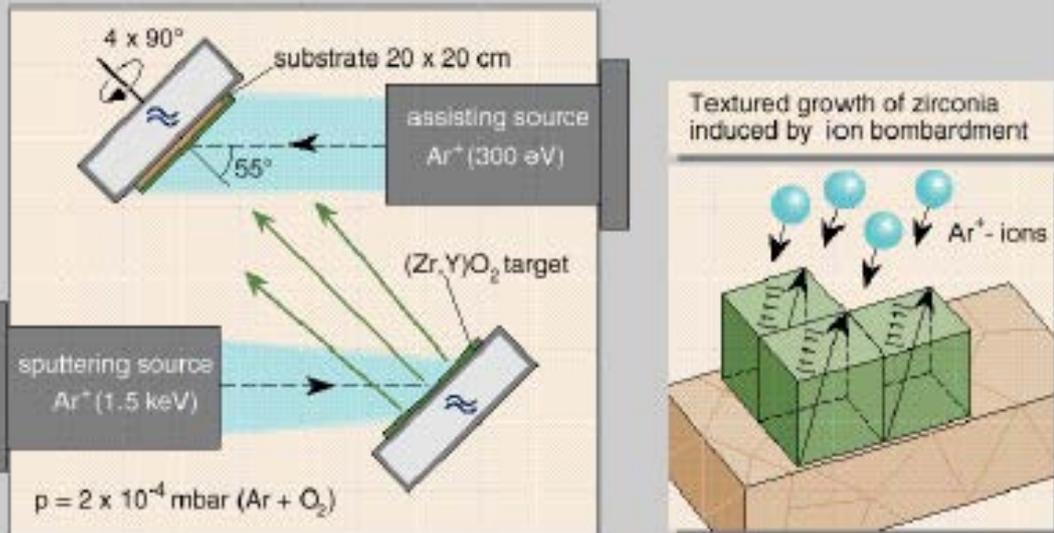
# YBCO 123: coated conductors.

## Il substrato

### Tecnica **IBAD** (Ion Beam Assisted Deposition)

Nella tecnica IBAD il substrato metallico è **non tessiturato** (random) - Hastelloy (lega di Ni), Stainless Steel

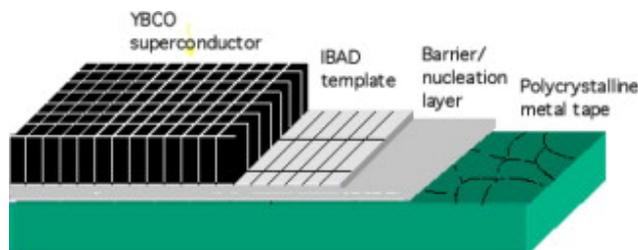
La **tessitura viene forzata** su uno dei buffer layer e trasferita fino all'YBCO mediante crescite epitassiali



Lo si fa mediante 2 sorgenti sputtering :

- la prima incide sul target di materiale da depositare;
- la seconda è diretta sul materiale depositato secondo un angolo preciso.

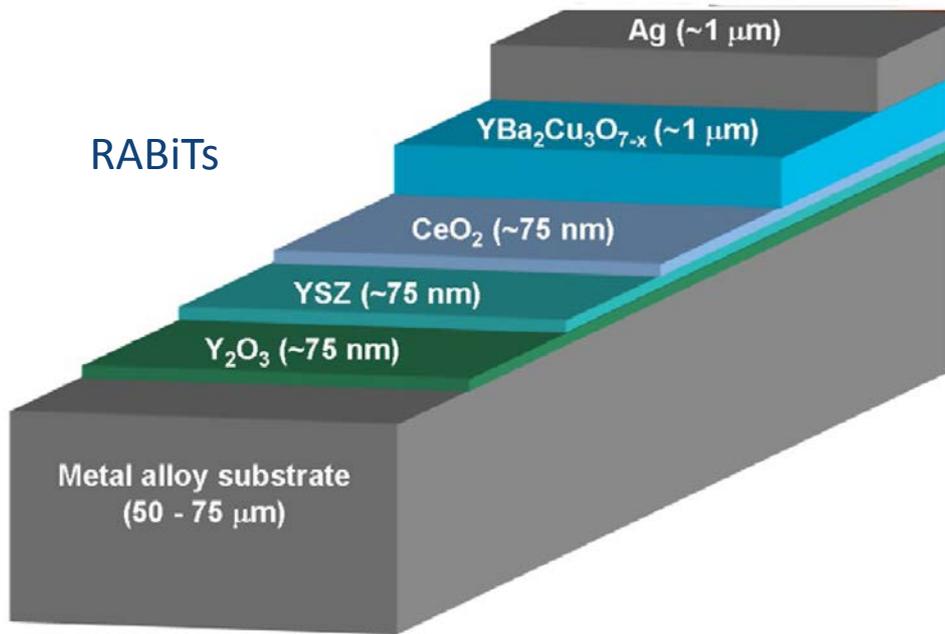
In questo modo si ottiene uno **sputtering selettivo** del materiale depositato che induce una crescita tessiturata



Tipicamente i layer depositati IBAD sono YSZ e MgO

Tutti gli altri layer prima e dopo l'IBAD sono depositati con le tecniche standard per i film sottili (PLD, sputtering, e-beam, CVD etc ...)

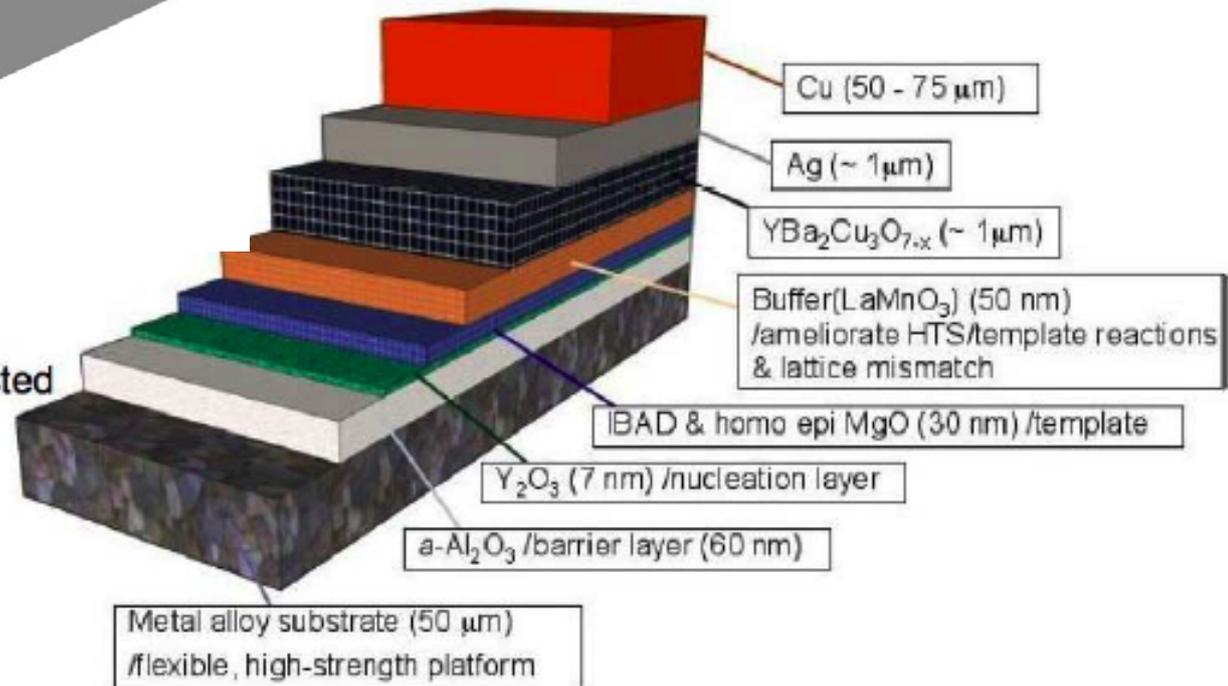
# YBCO 123: coated conductors. L'architettura e i produttori



- AMSC (USA)
- D-Nano (D)

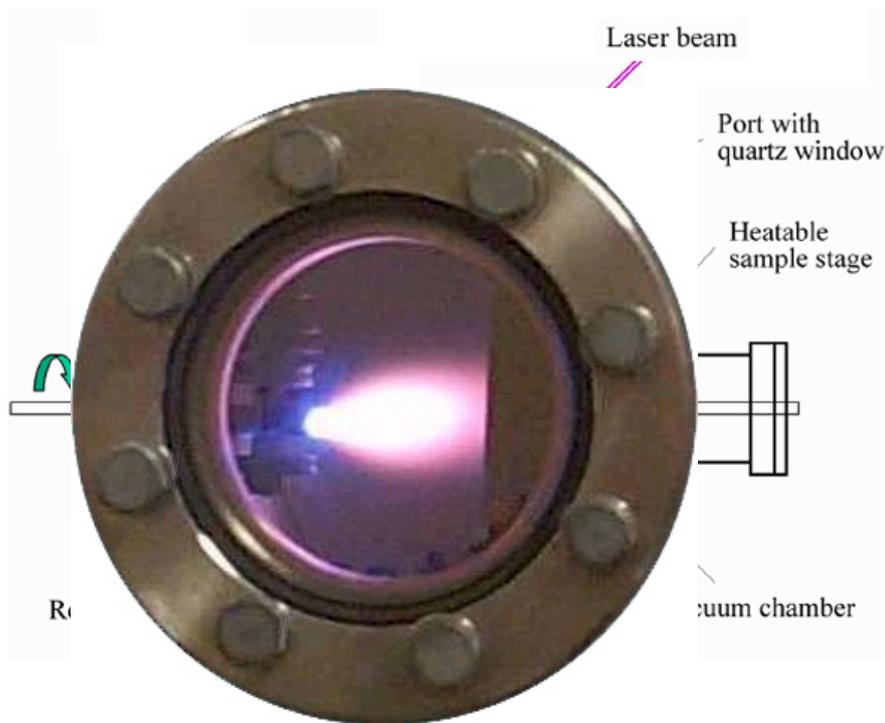
- Superpower (USA)
- Fujikura (J)
- Bruker (D)
- SuNam (S. Korea)

**Ion Beam Assisted Deposition (IBAD)**



# YBCO 123: coated conductors. Deposizione dell'YBCO

## PLD (Pulsed Laser Deposition)



La PLD sfrutta un **raggio laser** che incide su un target di materiale stechiometrico (polveri sinterizzate) e lo riscalda localmente. Si forma una nuvola di evaporazione detta *piuma* che condensa sul substrato posto di fronte e forma il film.

I principali meriti di questa tecnica sono:

- è una tecnica che permette **rate di evaporazioni molto alte**;
- è una tecnica che **trasferisce la stechiometria del target** sul film;

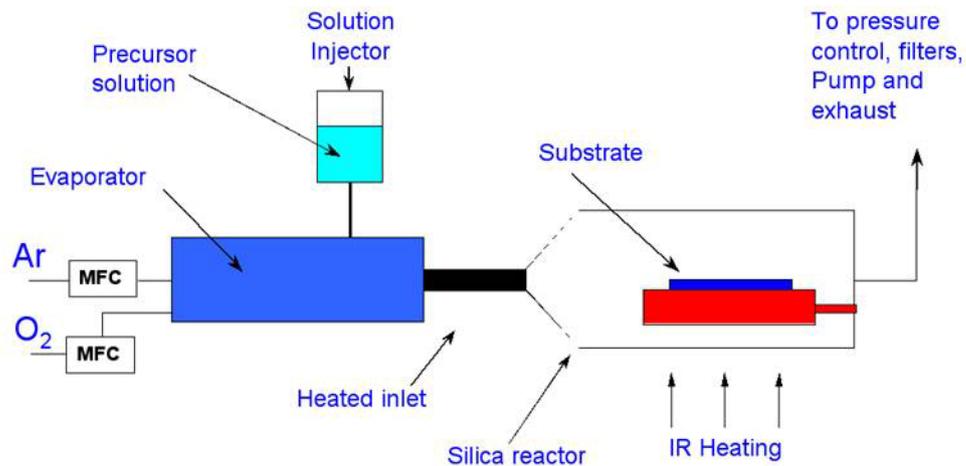
Il laser emette negli ultravioletti: eccimeri XeCl ( $\lambda \sim 308$  nm) o KrF ( $\lambda \sim 248$  nm) o Nd:YAG ( $\lambda \sim 266$  nm)  
La lunghezza d'onda così corta assicura il riscaldamento localmente del materiale fino a  $2000^\circ\text{C}$

Al di sopra di un valore di soglia della potenza dell'impulso, il riscaldamento provoca l'evaporazione di macromolecole (cluster) stechiometriche di target (ablazione)



# YBCO 123: coated conductors. Deposizione dell'YBCO

## MOCVD (Metal-Organic Chemical Vapor Deposition)



Il precursore organico del composto che si vuole depositare viene portato nella camera di reazione da un flusso lamellare di gas

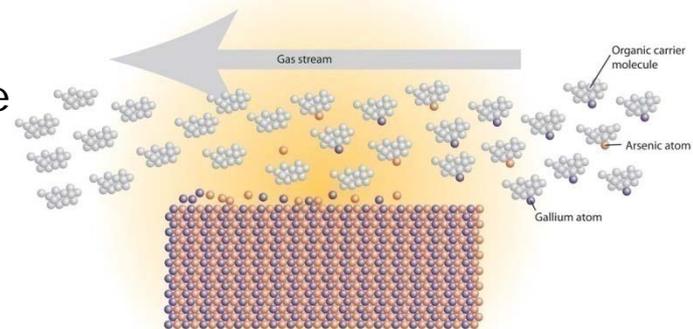
L'energia termica del substrato è sufficiente a decomporre il precursore causando la deposizione del materiale e l'evaporazione del solvente organico

Per l'YBCO il precursore è un liquido unico contenente

M(Tetramethyl HeptaDionate)  
con M=Y, Ba, Cu

e il gas che trasporta il precursore è un inerte

Attualmente i migliori coated conductor in commercio sono prodotti con la MOCVD



**SuperPower** Inc.  
A Furukawa Company

# YBCO 123: coated conductors. Deposizione dell'YBCO

## MOD (Metal-Organic Decomposition)

E' un metodo potenzialmente molto più semplice e economico degli altri

Si prepara una soluzione organica di precursore per la crescita dell'YBCO



Si stende la soluzione su di un substrato fino a formare un film precursore



Una serie di processi termici convertono il film precursore nel film di YBCO

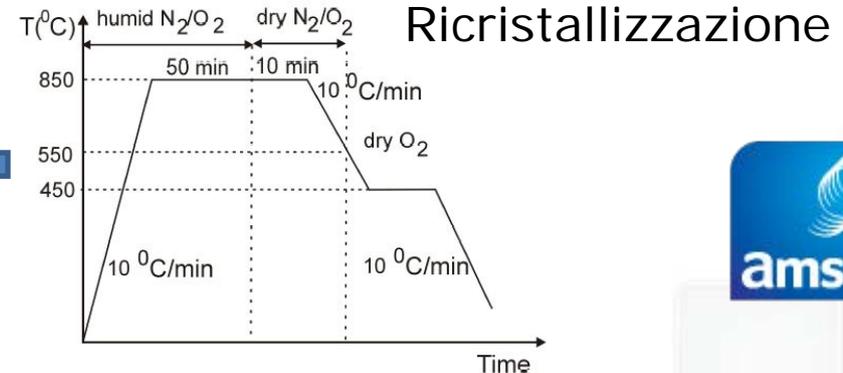
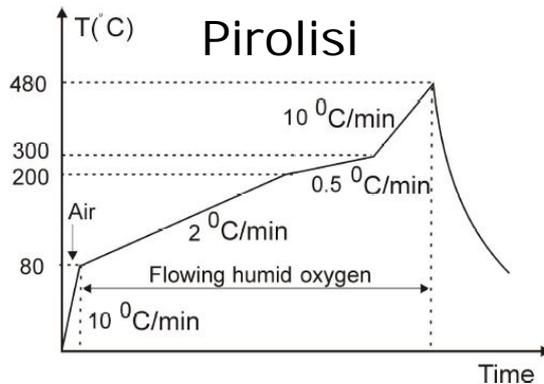
La tecnica standard (TFA-MOD) utilizza



Oggi si tende a evitare l'uso intensivo del fluoro per ragioni di sicurezza, ambientali ma anche di processo

dispersi in metanolo, acido trifluoroacetico

Trattamenti termici



# YBCO 123: coated conductors

Ormai i coated conductors conductor **sono una realtà commerciale**, ma il principale problema da risolvere è il **COSTO**

**I processi di crescita sono molto costosi.** Essi comprendono complessi metodi di deposizione chimico-fisici. Un'intensa attività di R&D del processo è in corso a livello accademico ed industriale

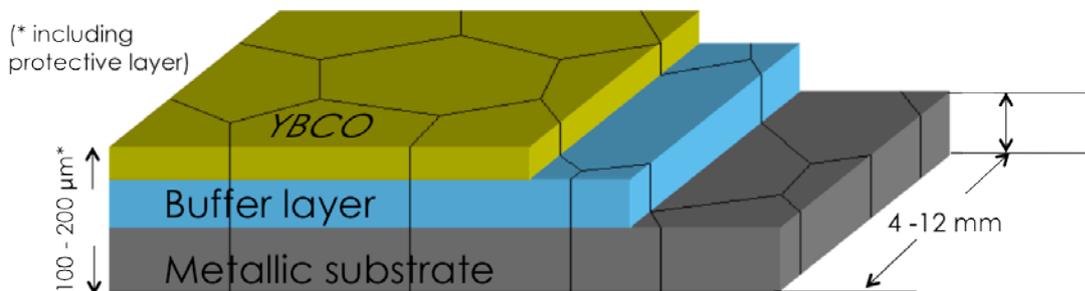
**COSTO ELEVATO!** (300 €/kAm)

Ciò nonostante... il **COATED CONDUCTOR** è il futuro perché i margini di miglioramento sono ancora ampi

Il costo di un conduttore in rame?

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

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



•  $I_c = 120 - 150\text{ A}$  on 4 mm wide tape @ 77 K, s. f.

Altre  
questioni  
aperte

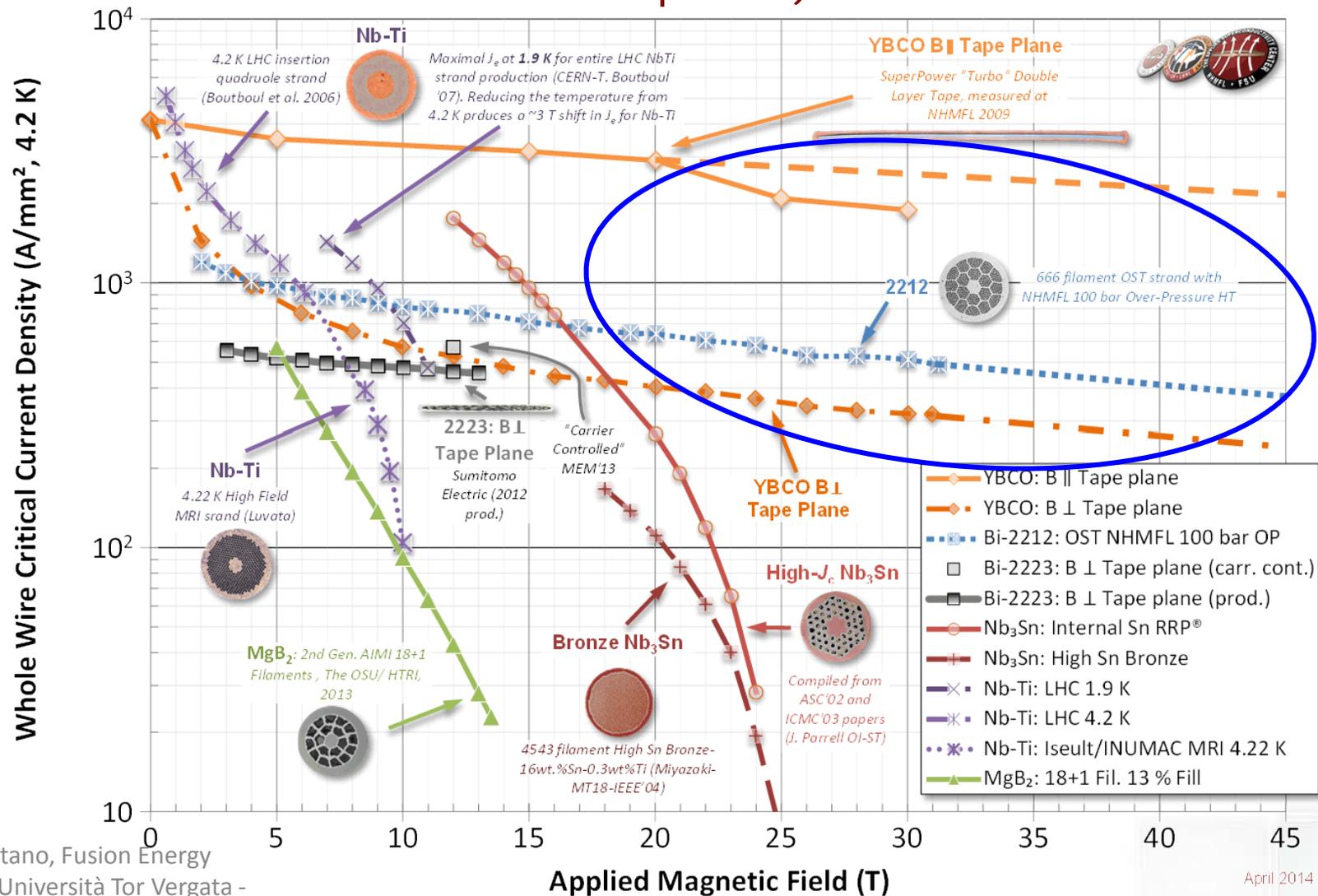
- Struttura troppo complessa;
- YBCO fill factor ~ 1%;

- anisotropia di  $J_c$ ;
- perdite ac;
- margini di miglioramento di  $J_c$  ampi (pinning e nanocompositi)

# Perché gli HTS sono utili per i magneti?

Possibilità di accedere a campi > 20 T

→ grande vantaggio per acceleratori e per la fusione nucleare (plasma confinement and fusion power).

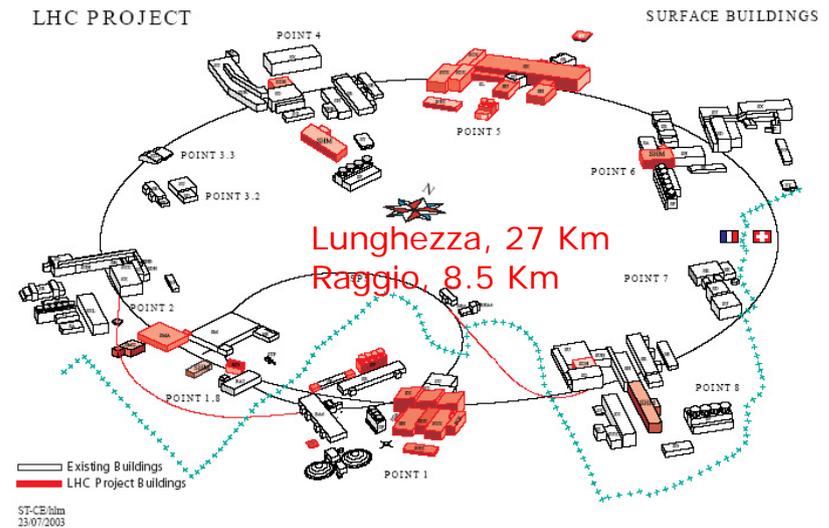


# I magneti per gli acceleratori: LHC

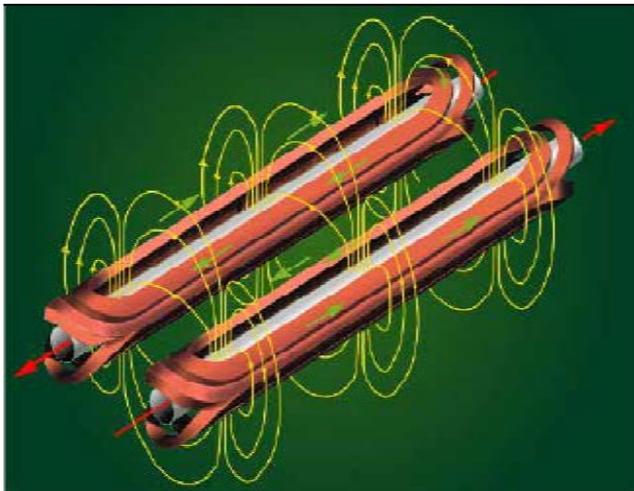
Il Large Hadron Collider (LHC) rappresenta lo strumento più potente mai costruito per l'indagine delle particelle elementari.

## LHC

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

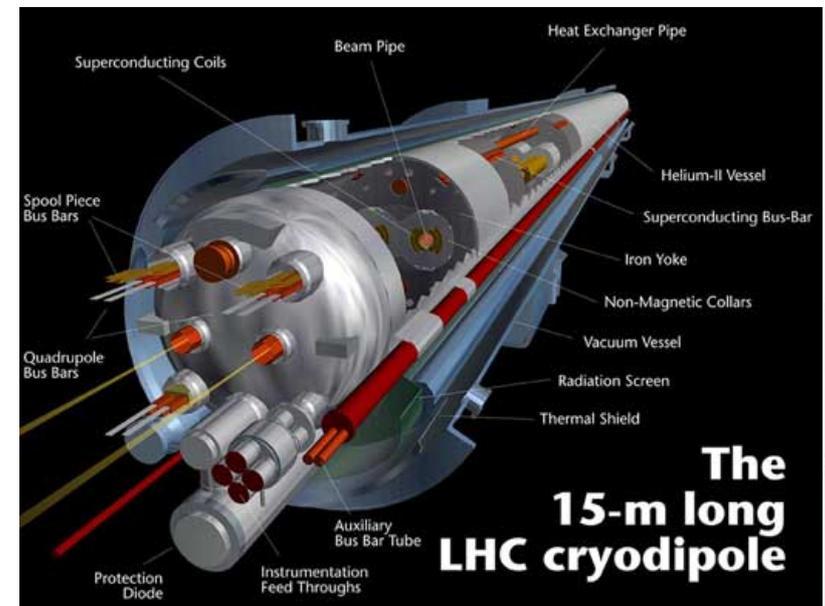


## Dipoli per la curvatura

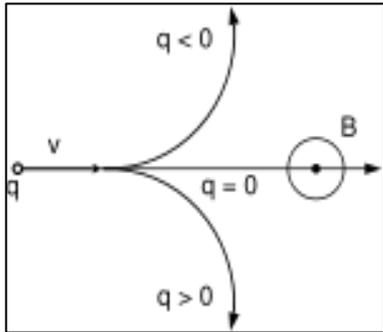


La parte più importante del sistema magnetico consiste di 1232 dipoli magnetici

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



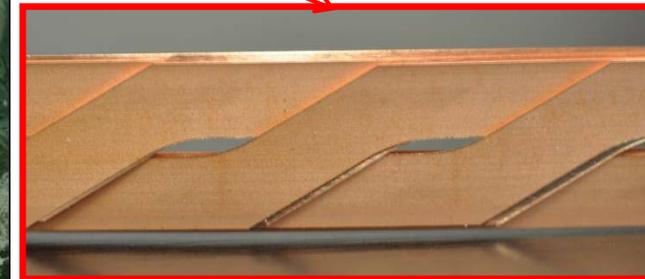
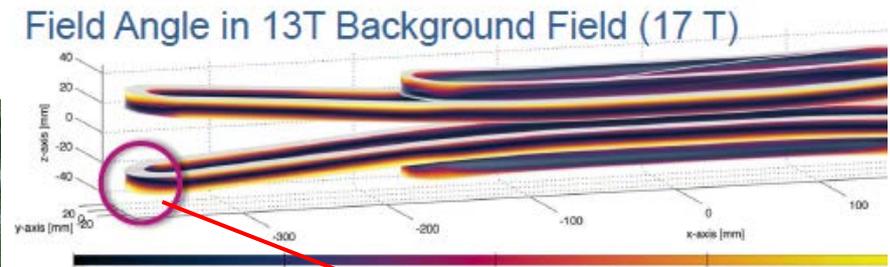
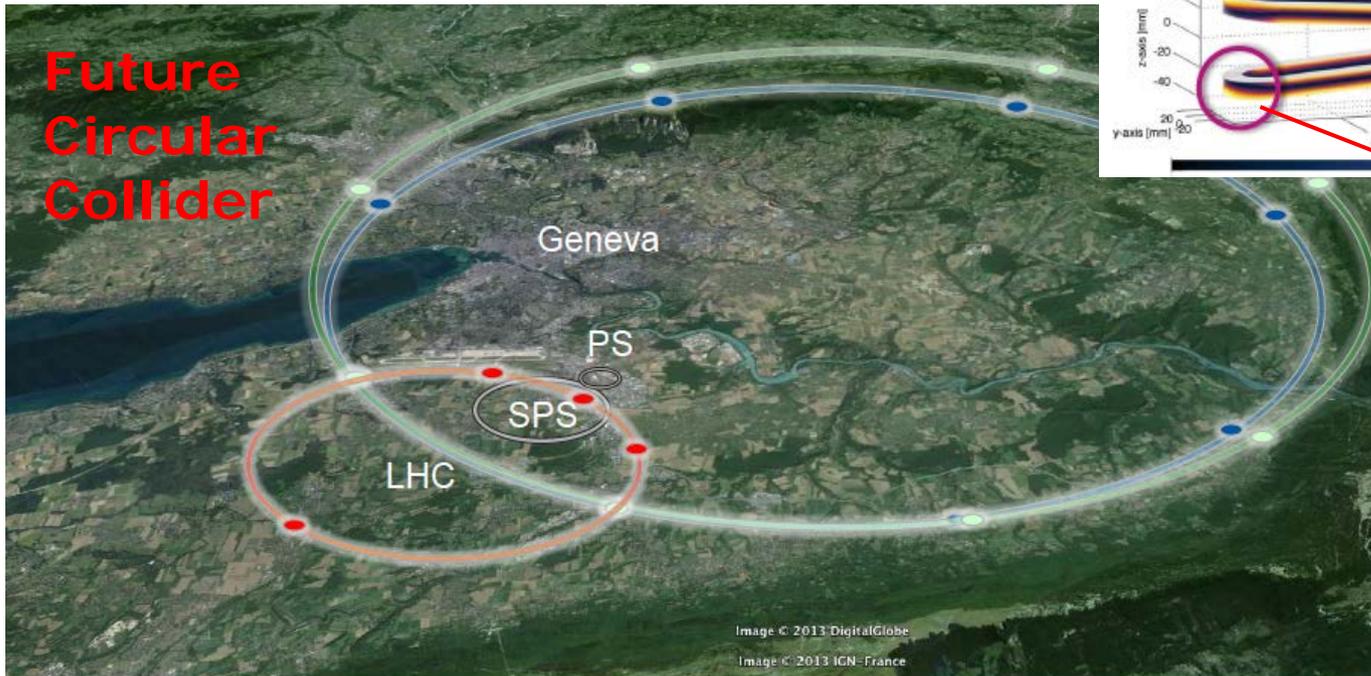
# I magneti HTS per gli acceleratori: FCC



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

$$R = mv/qB$$



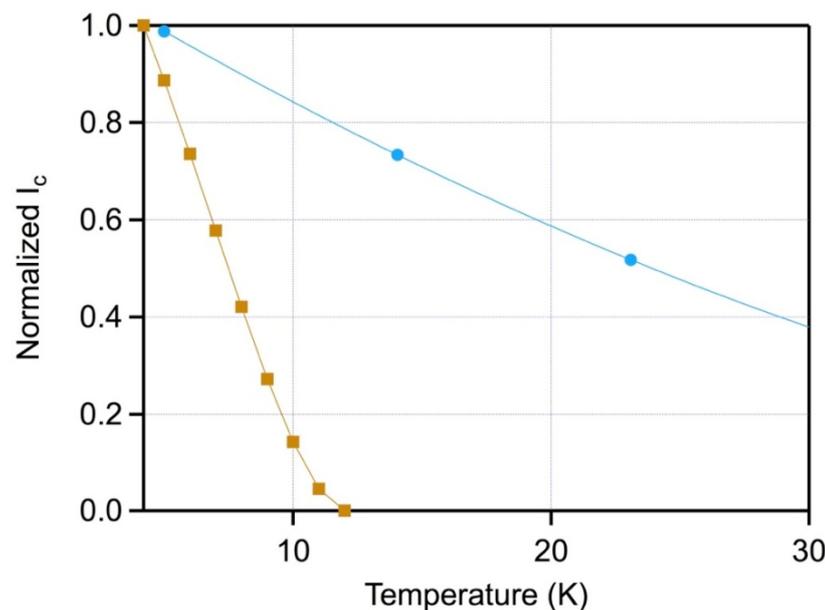
**Roebel cable**

LHC	HE-LHC	FCC-hh	FCC-hh
27 km, 8.33 T 14 TeV (c.o.m.)	27 km, <b>20 T</b> 33 TeV (c.o.m.)	80 km, <b>20 T</b> 100 TeV (c.o.m.)	100 km, <b>16 T</b> 100 TeV (c.o.m.)



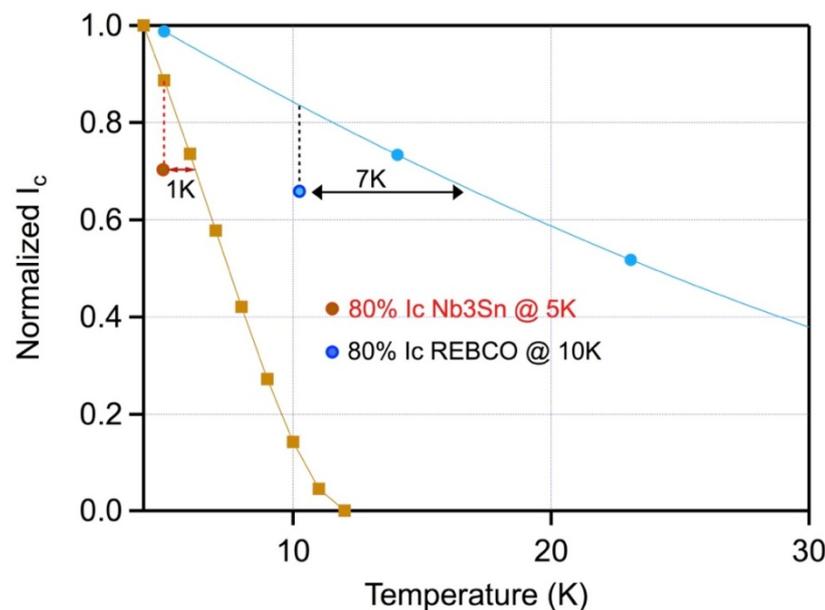
# I possibili vantaggi dei magneti HTS per la fusione

- campi più intensi: **più elevate potenze di fusione** ( $P \sim B_t^4$ );
- Temperature di lavoro  $T_0$  operative più elevate : **maggiore efficienza nel raffreddamento e minore complessità e dimensioni del reattore**
  - (efficienze ideale del ciclo Carnot):  $\eta_c = T_0/(RT - T_0)$ 
    - @ 77 K  $\eta_c = 0.34$ ; @ 4.2 K  $\eta_c = 0.015$
    - La potenza elettrica risparmiata circa 40%  
(EFDA Contract TW4-TMS-HTSMAG)
  - Possibilità di lavorare a **niù elevate  $I_c/I_c$  con niù ampio margine di Temperatura**



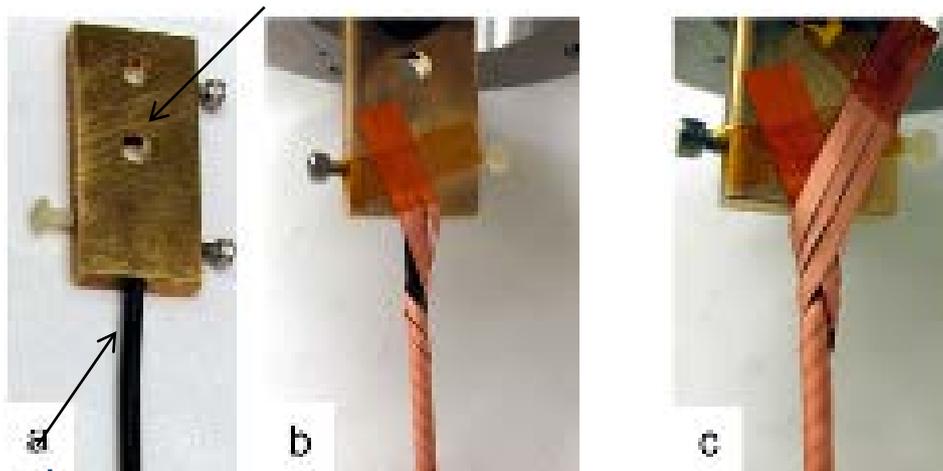
# I possibili vantaggi dei magneti HTS per la fusione

- campi più intensi: **più elevate potenze di fusione** ( $P \sim B_t^4$ );
- Temperature di lavoro  $T_0$  operative più elevate : **maggior efficienza nel raffreddamento e minore complessità e dimensioni del reattore**
  - (efficienze ideale del ciclo Carnot):  $\eta_c = T_0/(RT - T_0)$ 
    - @ 77 K  $\eta_c = 0.34$ ; @ 4.2 K  $\eta_c = 0.015$
    - La potenza elettrica risparmiata circa 40%  
(EFDA Contract TW4-TMS-HTSMAG)
  - Possibilità di lavorare a **temperature più elevate**  $I_{c,HTS}/I_{c,Cu}$  con **più ampio margine di Temperatura**



# Cable On Round Conductor

terminale di corrente



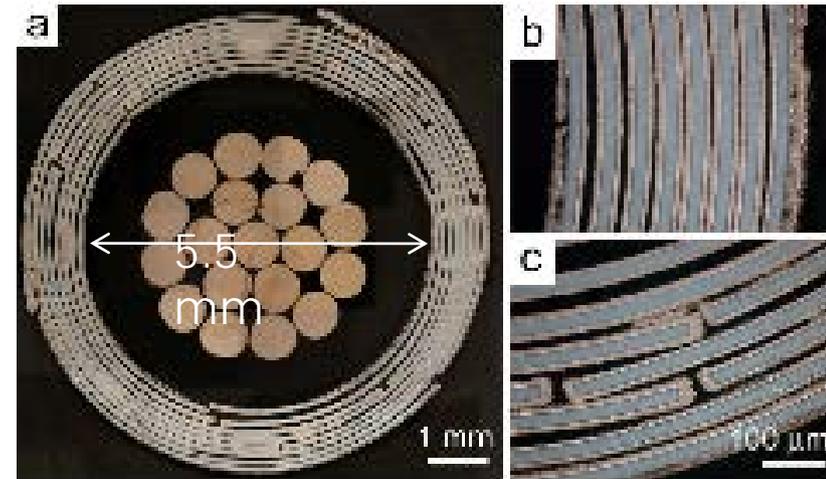
nucleo

primo strato (3 nastri), ...

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

van der Laan, et al., *SuST* 24, (2011)

sezione di un cavo a 8 strati



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

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

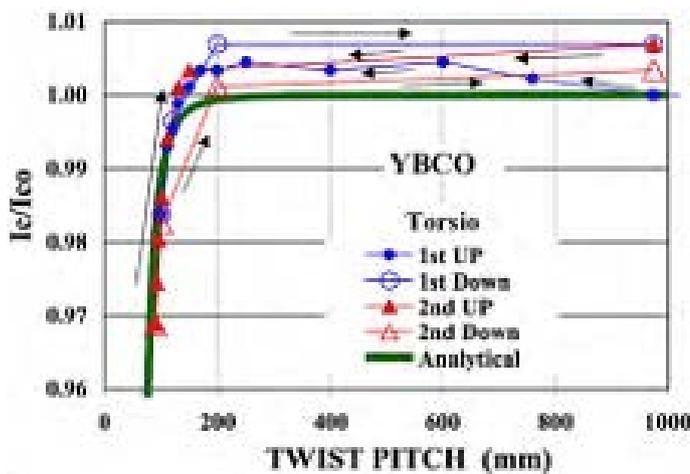
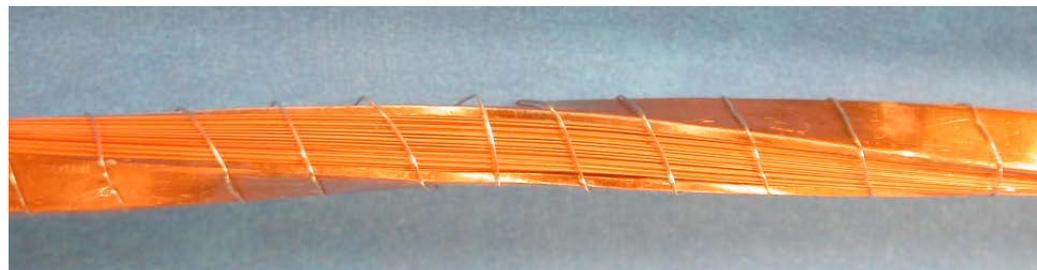
- ☺  $J_e$  è promettente
- ☺ facile da trasferire a cavi con numero di strati maggiori cioè per correnti più elevate
- ☺  $J_c$  è isotropa

# Twisted Stacked Tape Conductor

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

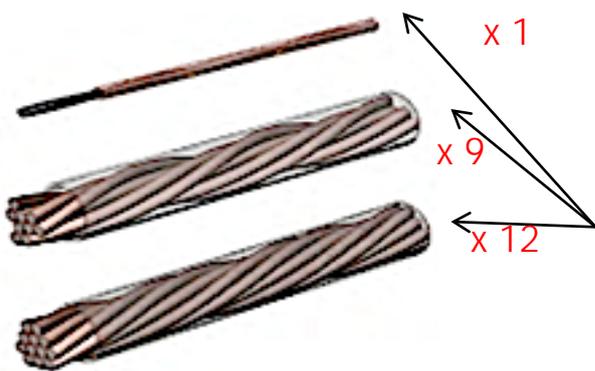
nastri di YBCO hanno ottima tenuta per torsioni longitudinali :

- 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

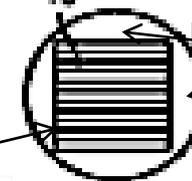
- nastri impilati (sezione rettangolare o quadrata);
- twistati longitudinalmente;
- inseriti in un tubo di contenimento
- raffreddamento per flusso forzato nel tubo (come LTS CICC)



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

area per flusso del refrigerante



40 tapes (4 x 4 mm<sup>2</sup>)

# Roebel assembled coated conductor

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



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

Tape (CC)	MOCVD-YBCO/IBAD-MgO
Filaments	1
Cross section (mm <sup>2</sup> )	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 <sup>-2</sup> )	332
No. of strands: $N_{st}$	15 (threefold CC = 45 tapes)
$N_{st} \times I_c$ (strand)	6727
Self-field degradation	60%
$I_c$ (A) measured (5 $\mu$ V cm <sup>-1</sup> )	2628 (77 K/s.f.)
Cable cross sect. (mm <sup>2</sup> )	27.6
$J_c^{cable}$ (A cm <sup>-2</sup> )	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

# I cavi di REBCO per i magneti per la fusione/acceleratori



## Roebel

*KIT*



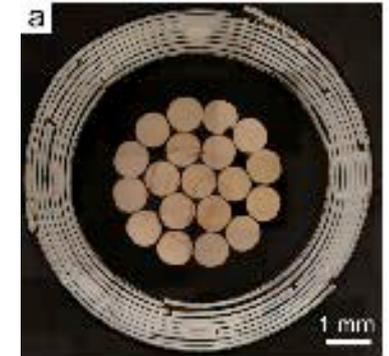
fully  
transposed  
tapes

*Advanced Conductor  
Technologies*

## CORC

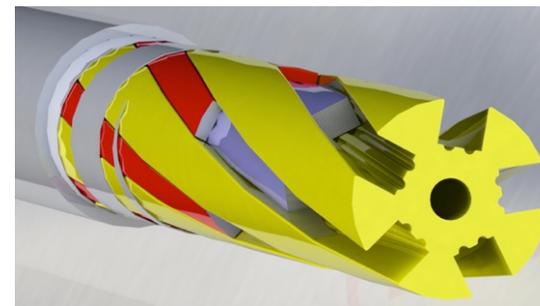
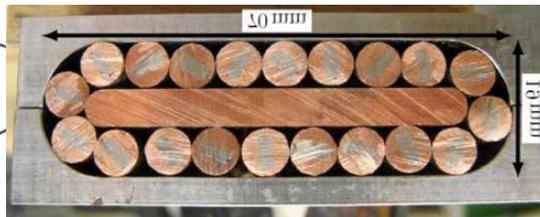
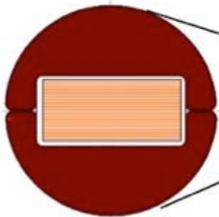


high flexibility



## Round strand

*SPC*

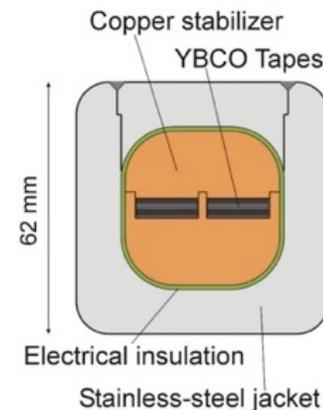


## Al-slotted core

*ENEA*

## Twisted stacked-tape

*MIT*



*NIFS*



## - Introduzione

- perchè gli HTS sono utili;

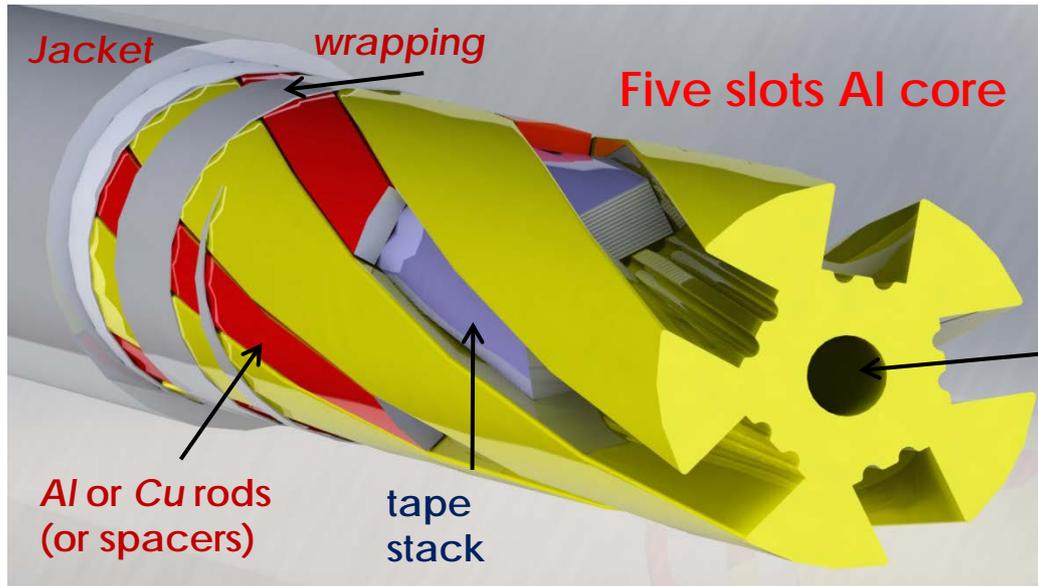
## - I Materiali HTS:

- $MgB_2$ : processi di realizzazione dei conduttori;
  - Applicazioni. **Magneti per NMR/MRI**
- BiSCCO: processi di realizzazione dei conduttori;
  - Applicazioni nel settore energia: **Fault current limiters e cavi per trasporto/distribuzione**
- REBCO: processi di realizzazione dei conduttori;
  - Applicazioni: **I conduttori ad alte correnti per i magneti**

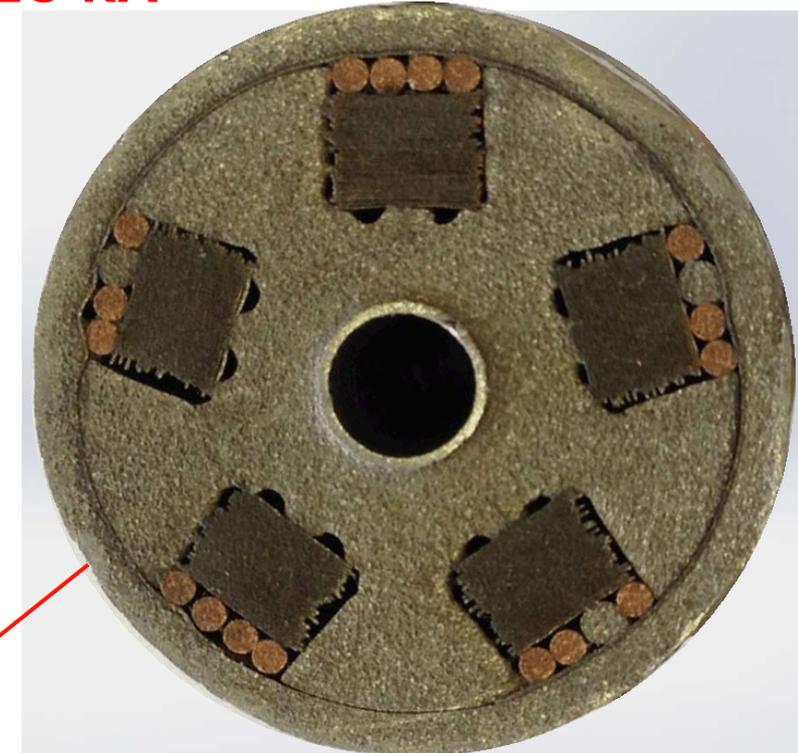
## - **Che facciamo all'ENEA?**

# HTS Cable-In-Conduit-Conductor

HTS CICC ENEA – TRATOS cavo di classe **20 kA** Sezione totale = 360 mm<sup>2</sup>



cooling central channel



20 Tape (150 um)

**duplice meccanismo di raffreddamento:**  
 - nel canale centrale;  
 - nelle cave a diretto contatto dello stack di nastri per un più efficiente raffreddamento in caso di eccesso di calore

Central Channel  $D_h = 4.0 \text{ mm}$   
 Slots  $D_h = 4 A_{ch}/P_w = 2.4 \text{ mm}$

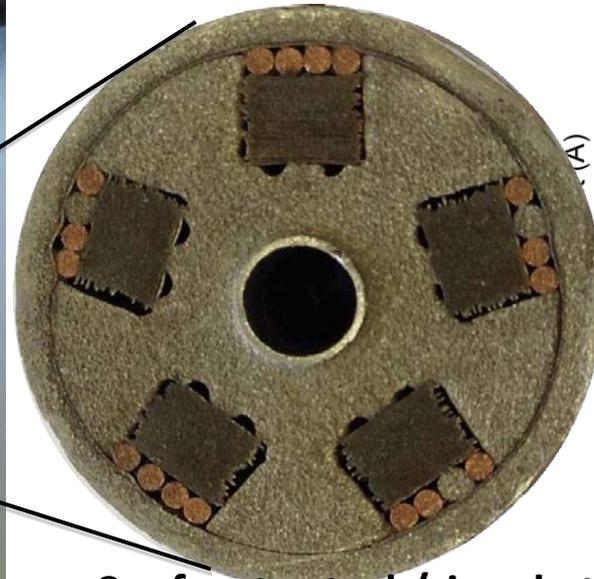
SC/non SC = 1.5 ‰

Attesa  $J_e \approx 70 \text{ A/mm}^2$

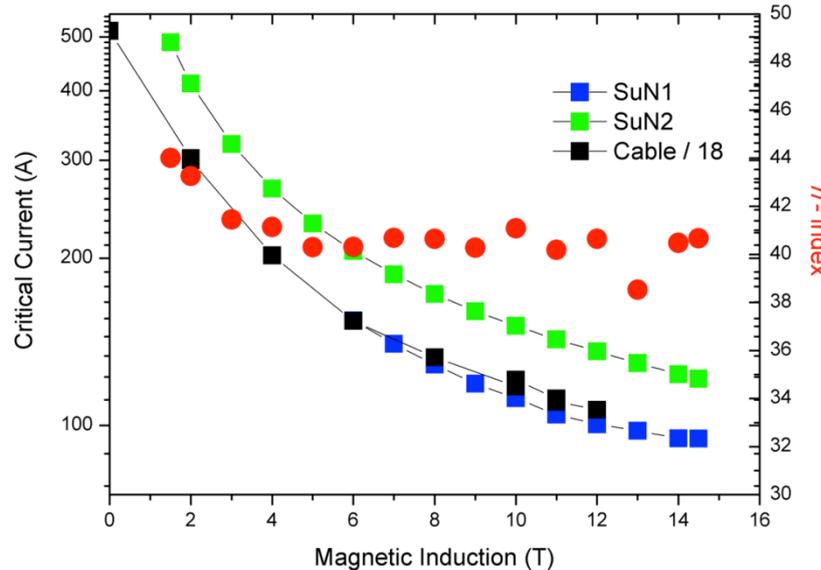
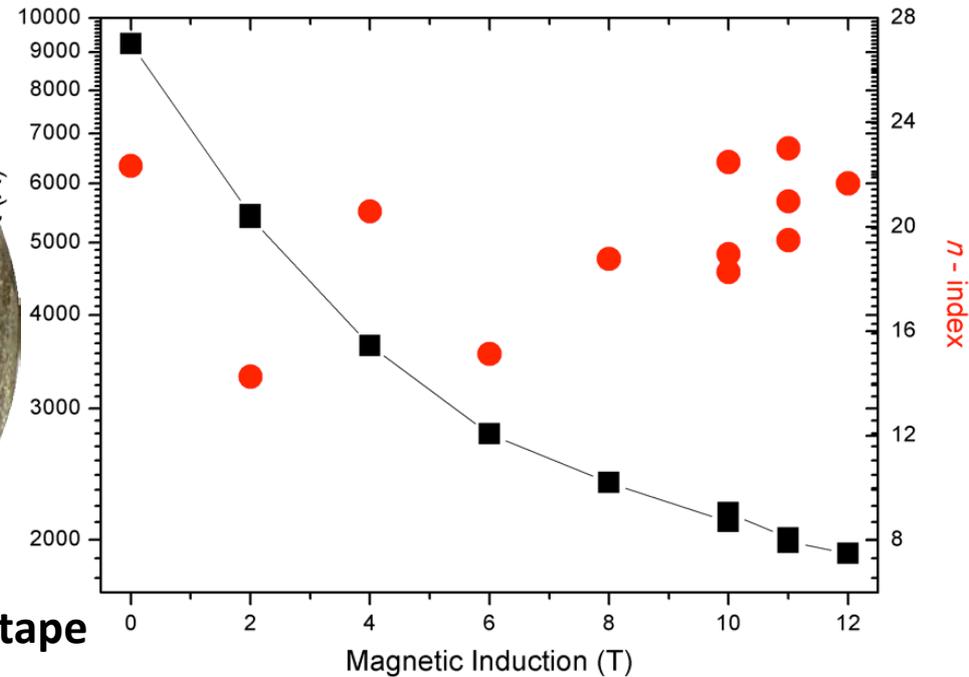
Tot Stab.	= 206.49 mm <sup>2</sup>	<b>57.4%</b>
Al	= 47.4%	Cu <sub>rods</sub> = 4.4%
		Cu <sub>tapes</sub> = 5.6%
Void	= 38.9 mm <sup>2</sup>	<b>10.8%</b>
SS tot	= 40.0 mm <sup>2</sup>	<b>11.1%</b>
Jacket	= 74.6 mm <sup>2</sup>	<b>20.7%</b>

# HTS Cable-In-Conduit-Conductor

## Test @ 4.2 K



Confronto stack/singolo tape



**Stack  $I_c = 9366$  A s.f.**  
(518.6 each tape)

**Stack  $I_c = 1952$  A 12 T**  
(108.4 each tape)

# DTT – Additional High Temperature Superconducting Insert for the CS coil

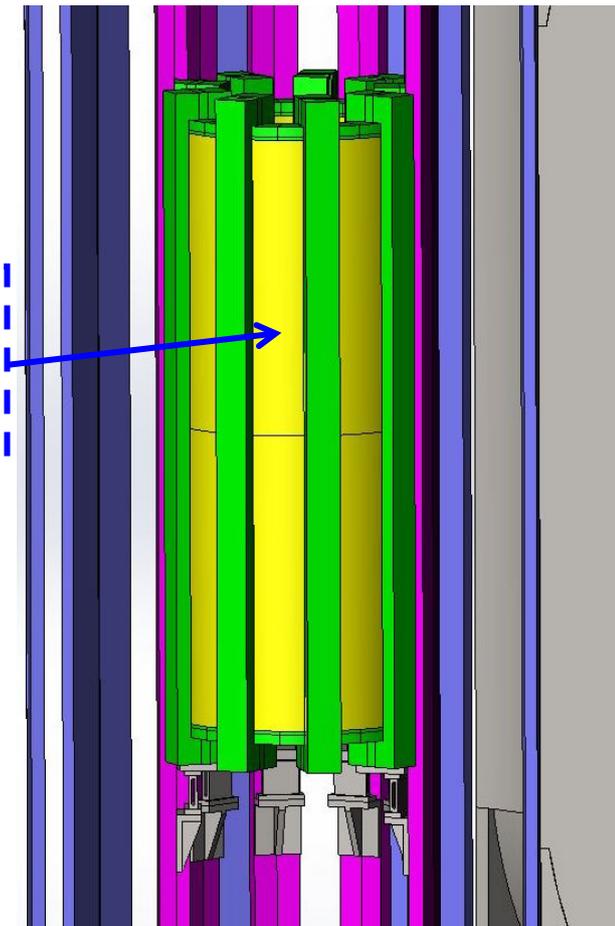
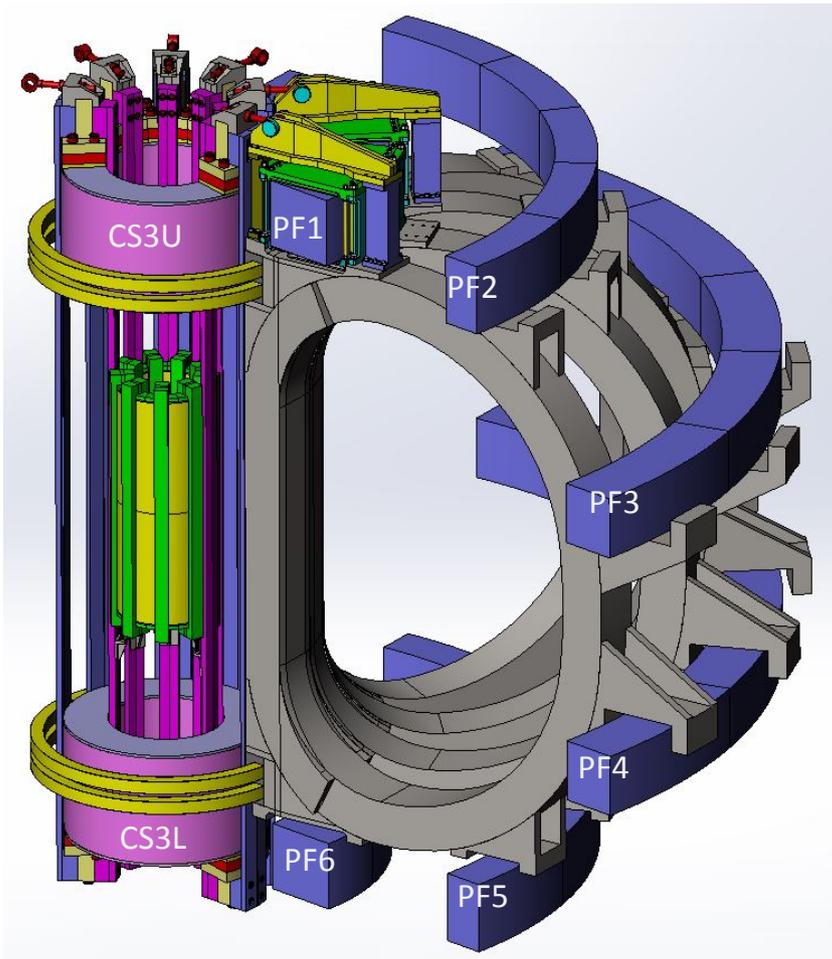
Use DTT also as a test-bed for next generation fusion magnets

→ improved machine performance

→ *fundamental technology demonstration*

Implemented at a later stage, but to be foreseen since the beginning

**additional HTS insert** to raise CS flux and for technology development



# Nano-engineered REBCO Superconducting tapes for High Field Applications



Superconductivity Laboratory



Engineering Department



C4S Centre



SuMaN Department

Improve the REBCO performances in fusion relevant conditions:

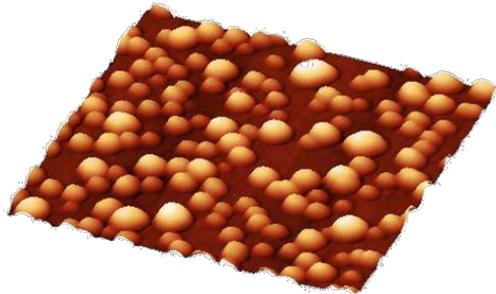
The goal is fixed at:

$J_c = 10 \text{ MA/cm}^2$  for  $B > 10 \text{ T}$  at  $4.2 \text{ K}$ , ( $I_c = 1000 \text{ A}$  in  $1 \text{ cm}$  width and  $1 \mu\text{m}$  thick tape).

$J_c = 6.25 \text{ MA/cm}^2$  for  $B = 17 \text{ T}$ , ( $I_c = 625 \text{ A}$  in  $1 \text{ cm}$  width and  $1 \mu\text{m}$  thick tape) **DTT HTS insert**

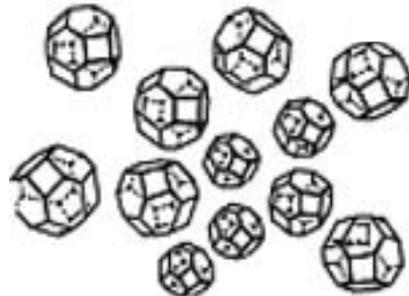


## Approach of the project for deposition of APC REBCO films



Surface decoration of the substrate by nanoparticles

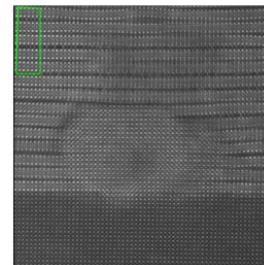
~ 20 nm



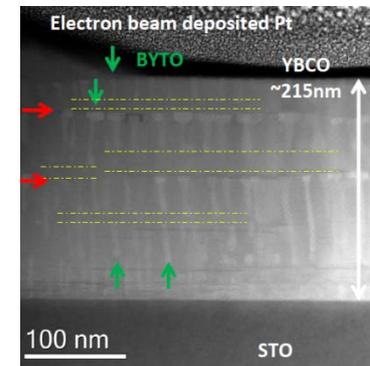
Nanodiamond introduction

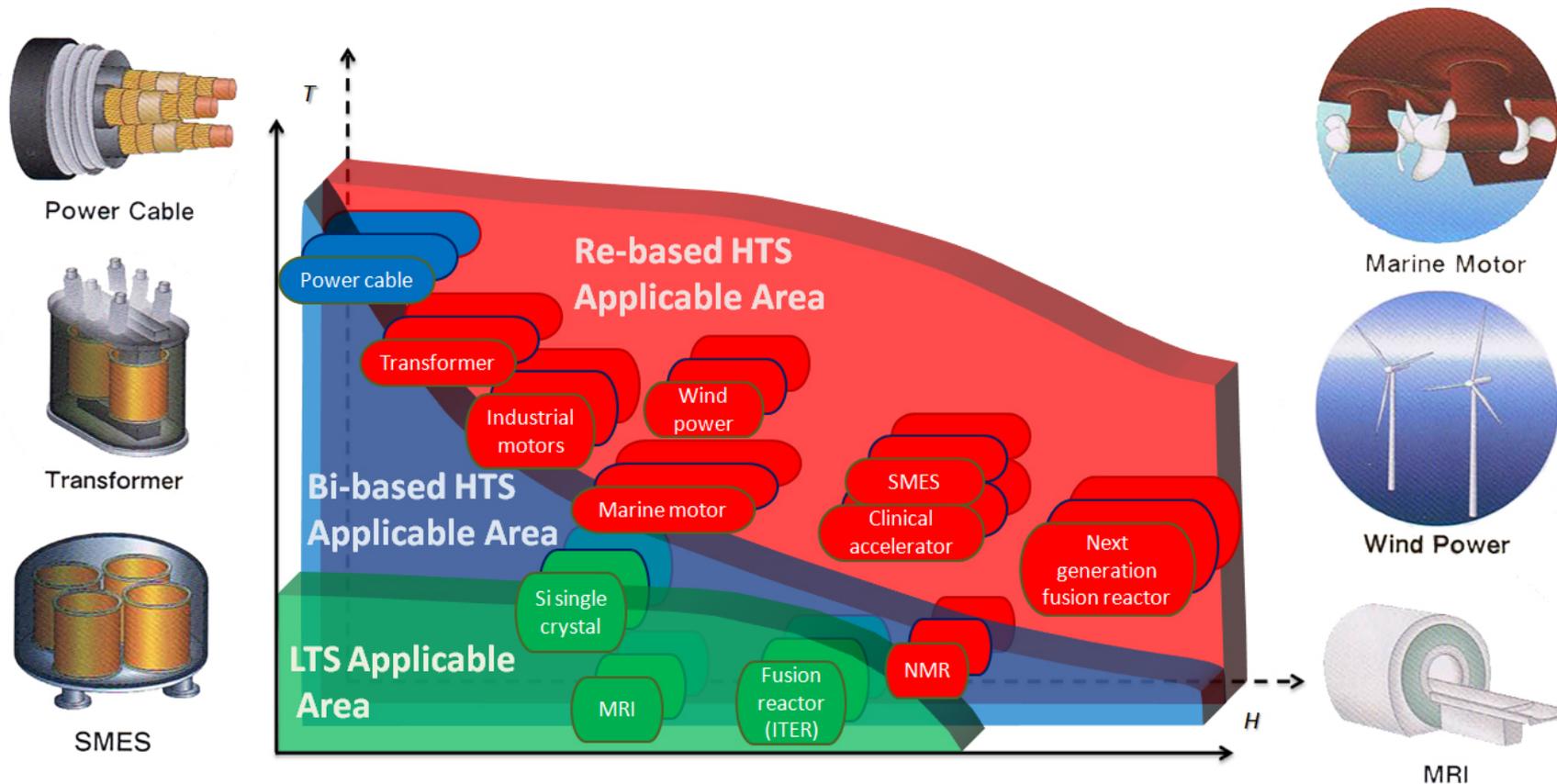
~ 5-10 nm

Nanoparticles  
~ 20 nm



Mixed self-assembled columnar (nanorod) structures/c – axis correlated defects + nanoparticles





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