www.dii.unipd.it

Università degli Studi di Padova – Dipartimento di Ingegneria Industriale

Corso di Laurea in Ingegneria dell'Energia Elettrica

Relazione per la prova finale «Superconduttività e vantaggi dei magneti superconduttori negli esperimenti da fusione»

Tutor Universitario: Ing. Nicolò Marconato

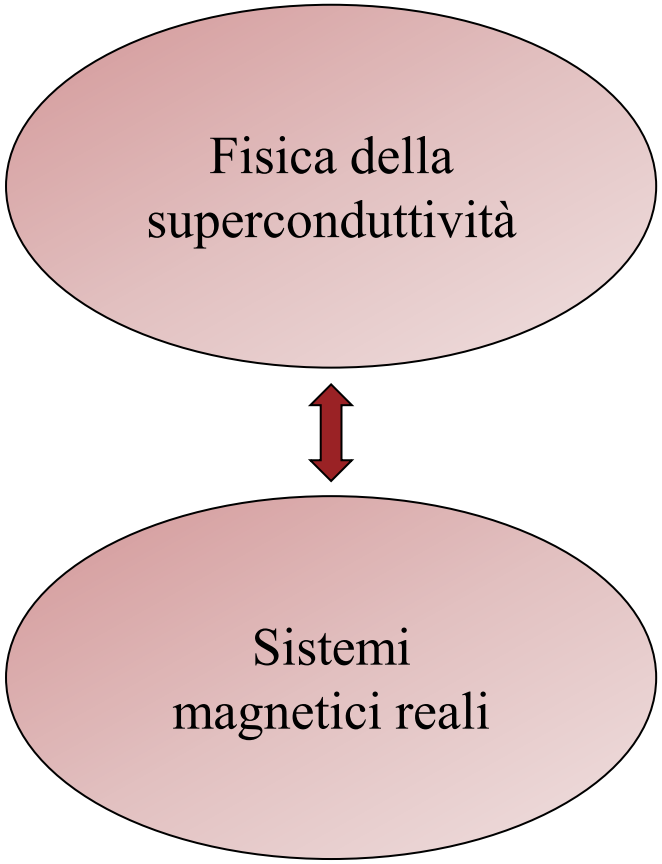
Laureanda*: Giulia Massarelli*

Padova, 10/11/2025

OBIETTIVI DELLA RELAZIONE FINALE

www.dii.unipd.it

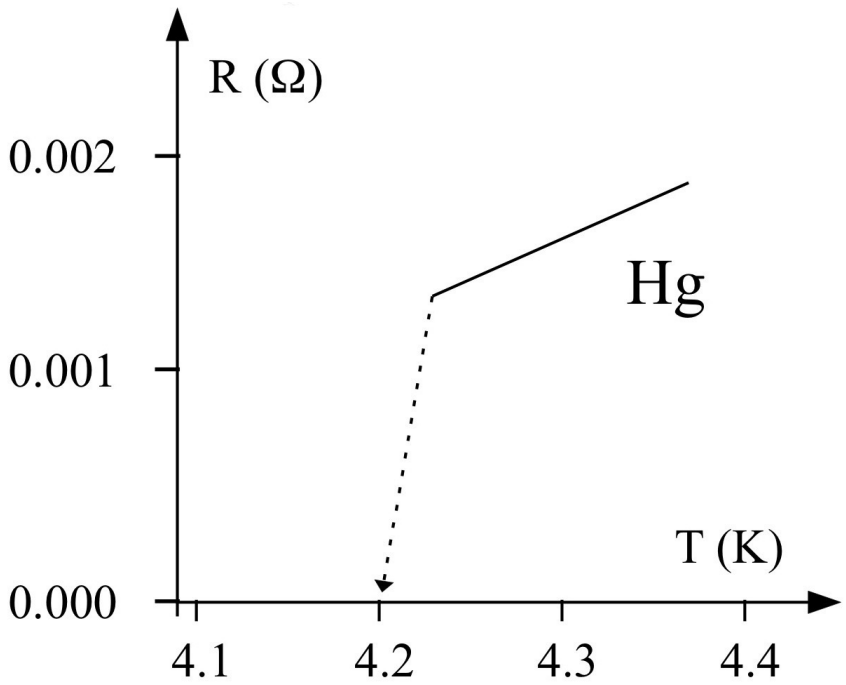
- Proprietà della superconduttività dal punto di vista fisico
- Confronto tra superconduttori a bassa ed alta temperatura (LTS e HTS)
- Sistemi magnetici nei reattori a fusione
- Analisi di due progetti: ITER e ARC



SCOPERTA DELLA SUPERCONDUTTIVITÀ E CLASSIFICAZIONI

www.dii.unipd.it

>> Esperimento di **Heike Kamerlingh Onnes**



Superconduttori di tipo I

- corrente confinata vicino alla superficie
- superconduttività distrutta da campi magnetici deboli

Superconduttori di tipo II

- penetrazione di flusso tramite vortici magnetici
- restano superconduttori anche in campi elevati

LTS vs HTS

www.dii.unipd.it

	LTS	HTS
Materiale	NbTi/Nb_3Sn	YBCO/Bi-2223
Temperatura critica	≈ 9 K (NbTi)/18 K (Nb_3Sn)	≈ 90 K (YBCO)/ 110 K (Bi-2223)
Temperatura operativa	≈1,9 – 4,5 K	$\approx 20 - 77\ K$
Raffreddamento	elio liquido	elio gassoso/azoto liquido
Campo critico	fino a ~ 12 T	> 20 T
Maturità	consolidata	in rapido sviluppo

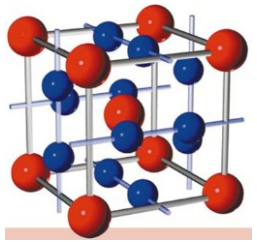
>> Candidati ideali per i magneti di nuova generazione: HTS, **ma…**

STRUTTURA CRISTALLINA E TECNICHE COSTRUTTIVE

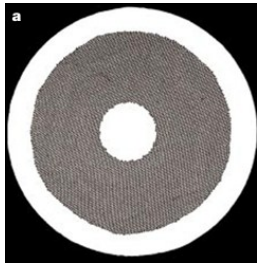
www.dii.unipd.it

NbTi - BCC

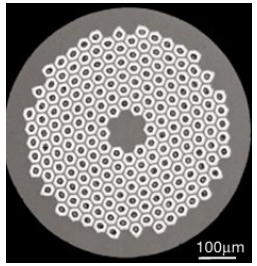
ISOTROPIA



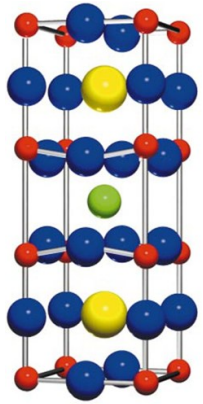
Nb_3Sn – Struttura cubica



Migliaia di filamenti incorporati in una matrice di rame

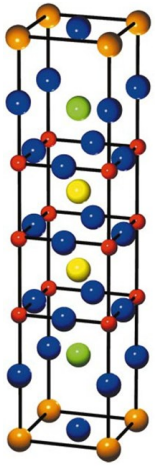


Filamenti realizzati mediante la tecnica «powder-in-tube»

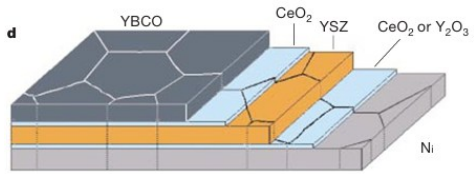


YBCO – Struttura a «perovskite»

ANISOTROPIA



Bi-2223



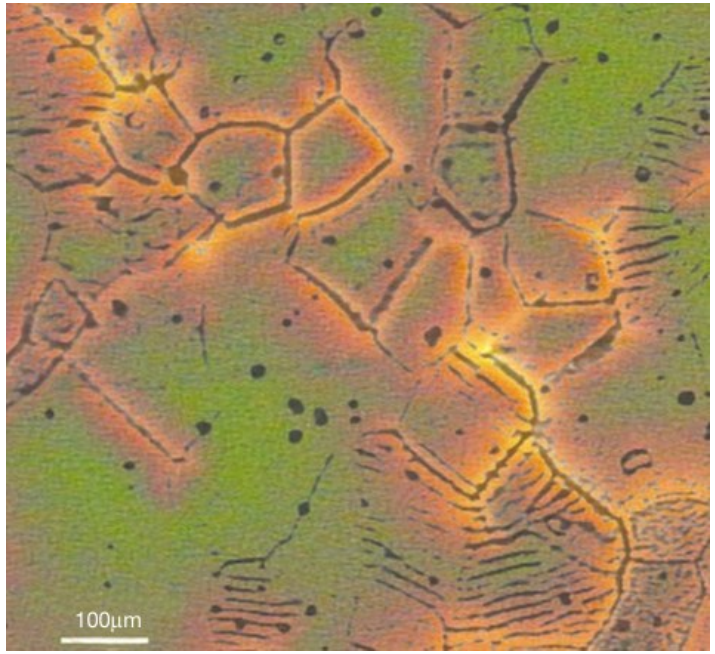
Strato superconduttore depositato su un substrato metallico con strati tampone

Superconduttore con matrice d'argento

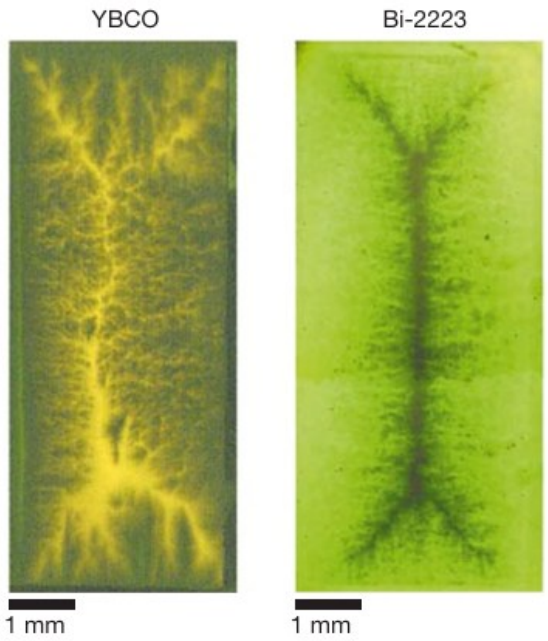
LIMITI NEI HTS

www.dii.unipd.it

- **Confini di grano**



- **Percolazione della corrente**



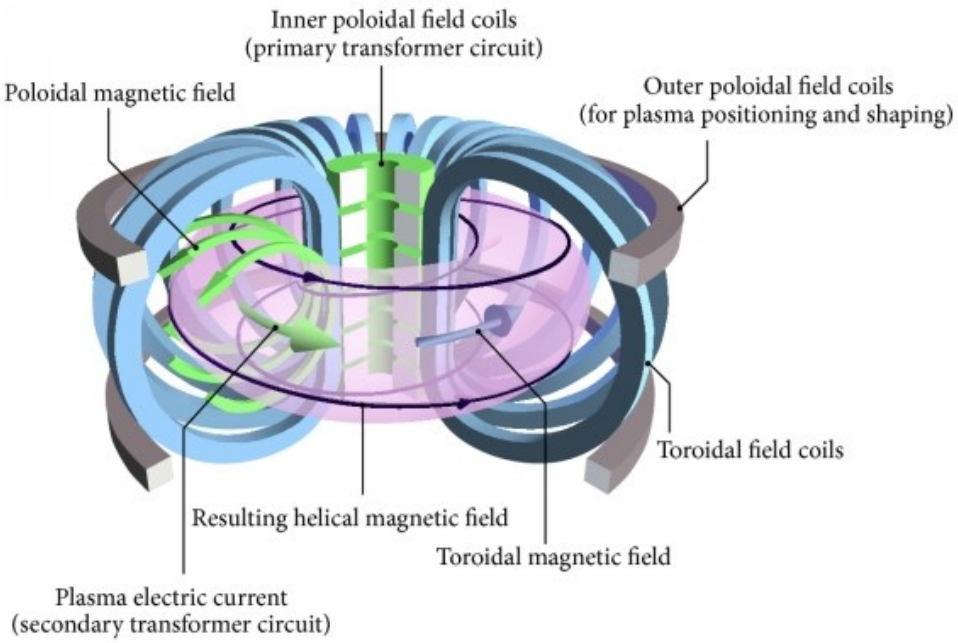
- **Movimento dei vortici → *Flux pinning***

SISTEMI MAGNETICI NEI REATTORI A FUSIONE

www.dii.unipd.it

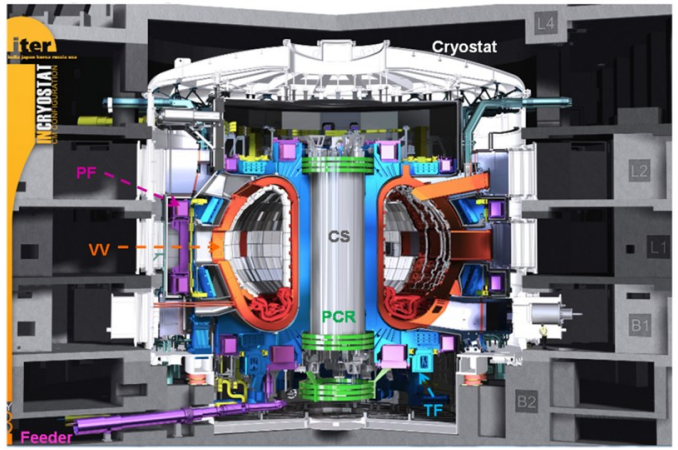
- Confinamento del plasma per T > 10^8 K attraverso **campi magnetici**
- Combinazione di **campo toroidale e poloidale** → linee di campo elicoidali
- $P_{fus} \propto B^4$
- Utilizzo di **magneti superconduttori** → alimentazione delle bobine con correnti intense senza dissipazione resistiva
- **Sollecitazioni meccaniche** legate a $F_L = J \times B$

Schema tridimensionale di un Tokamak



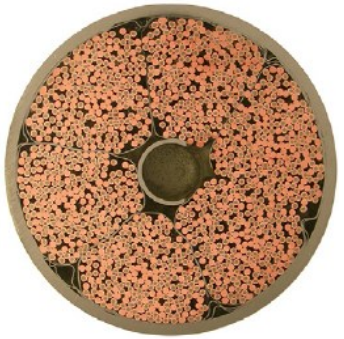
PROGETTO ITER

www.dii.unipd.it

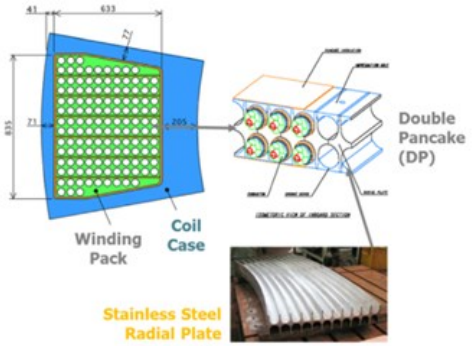


- **NbTi** → bobine poloidali
  Nb_3Sn → bobine toroidali e solenoide centrale

- Conduttori realizzati con la tecnologia ***CICC***



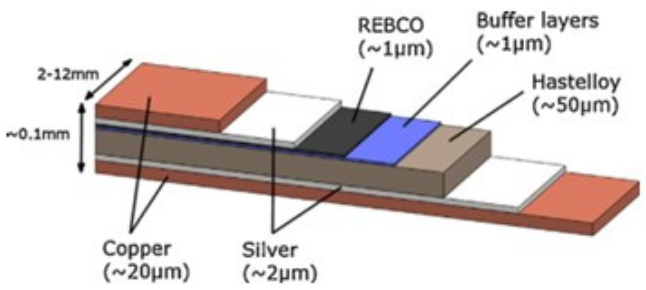
- Bobina toroidale costituita da ***double pancakes***



- **5,3 T** all'interno del plasma / **11-12 T** nel conduttore

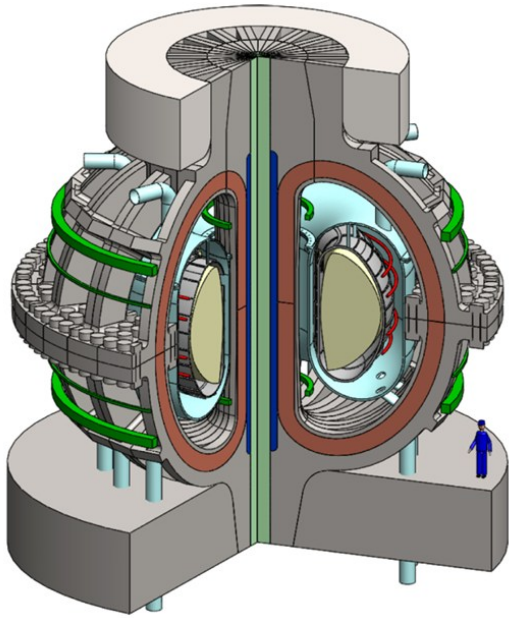
PROGETTO ARC

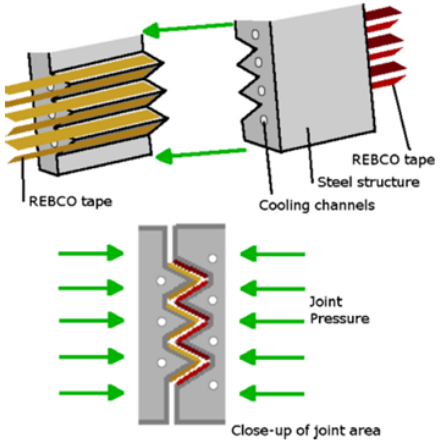
www.dii.unipd.it



- Nastri ***REBCO***

- $J_C \uparrow$
  B oltre i 20 T
  $P_{fus} \propto B^4 R^3$
  T ~ 20 K



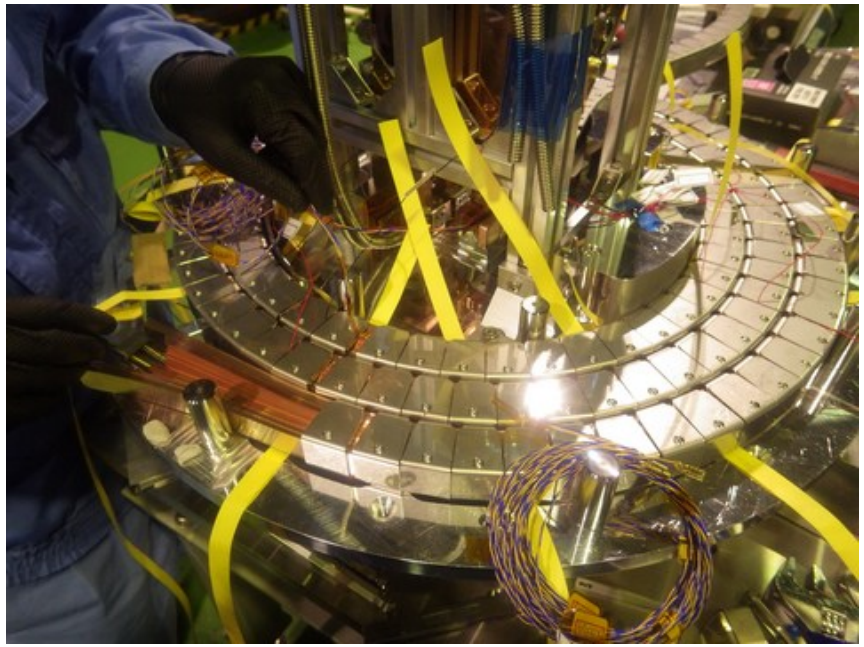


- Bobine toroidali progettate in moduli removibili grazie a **giunti superconduttori**

CONCLUSIONI

www.dii.unipd.it

In sintesi:

- **ITER** come approccio consolidato basato su LTS, infrastrutture criogeniche complesse ma affidabili.
- **ARC** come sperimentazione basata su HTS per magneti più potenti, tokamak più piccoli e criogenia semplificata.

>> Nuova importante pietra miliare raggiunta dalla startup giapponese ***Helical Fusion***: successo per il primo test al mondo di un magnete superconduttore ad alta temperatura su scala paragonabile a quella di un reattore a fusione.