



Superconduttori nel futuro

Penelope Matilde Quassolo

Technology Department

European Organization for Nuclear Research (CERN)

Riferimenti

- P. Ferracin, E. Todesco, S. Prestemon, “*Superconducting accelerator magnets*”, US Particle Accelerator School, www.uspas.fnal.gov.
- E. Todesco, “*Masterclass -Design of superconducting magnets for particle accelerators*”,
• <https://indico.cern.ch/category/12408/>
- S. Izquierdo Bermudez “*Accelerator Technology Challenges: Superconducting magnets*”, CERN Summer Student Lecture -2023, <https://indico.cern.ch/event/1254879>

Un grazie speciale a Susana I.B. and Ezio T. per il materiale usato per questa presentazioni e per tutte le cose interessanti che sto imparando sui superconduttori!

Sommario

- Elementi di fisica
- Storia della superconduttività
- Superconduttività applicata
 - Linee elettriche
 - Motori e generatori
 - Magneti superconduttori
- Cosa portare a casa

Sommario

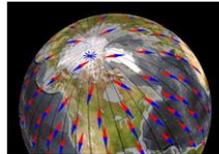
- Elementi di fisica
- Storia della superconduttività
- Superconduttività applicata
 - Linee elettriche
 - Motori e generatori
 - Magneti superconduttori
- Cosa portare a casa

Magnetismo

- Il campo magnetico, studiato fino dall'antichità, fu descritto dal Maxwell nella seconda metà dell'Ottocento
Magnetismo e elettricità sono facce della stessa medaglia



Il filosofo greco Talete di Mileto, nel **VI secolo a.C.**, notò le proprietà attrattive della magnetite e del suo effetto sul ferro.



Nel **1600**, William Gilbert pubblica "De Magnete", proponendo che la Terra sia un grande magnete.



Nella **seconda metà del XIX secolo**, Maxwell formulò le sue celebri equazioni, unificando elettricità e magnetismo in un'unica teoria dell'elettromagnetismo.

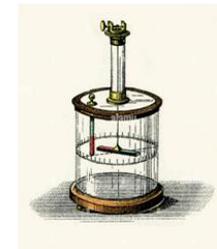
Intorno al **600 a.C.**, i cinesi scoprirono che i pezzi di magnetite potevano attrarre piccoli pezzi di ferro e furono i primi a utilizzare la bussola magnetica per la navigazione.



Intorno al **XII secolo**, la bussola magnetica fu introdotta in Europa dai mercanti e marinai arabi, rivoluzionando la navigazione.



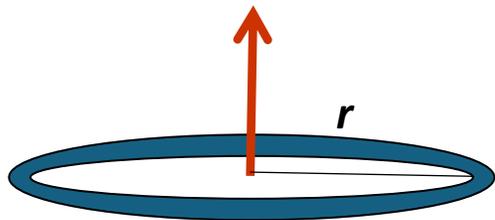
Coulomb, nel **XVIII secolo**, formulò la legge di Coulomb per descrivere la forza tra cariche elettriche e magneti.



Magnetismo

- **Un campo magnetico viene generato da una corrente elettrica**
 - Il campo è proporzionale alla corrente
 - Con 1 A (corrente del filo di casa) in un cerchio di 10 cm di raggio, si ottiene 0.006 mT (La Terra ha un campo magnetico di 0.050 mT)

$$B = \frac{\mu_0 I}{2r}$$



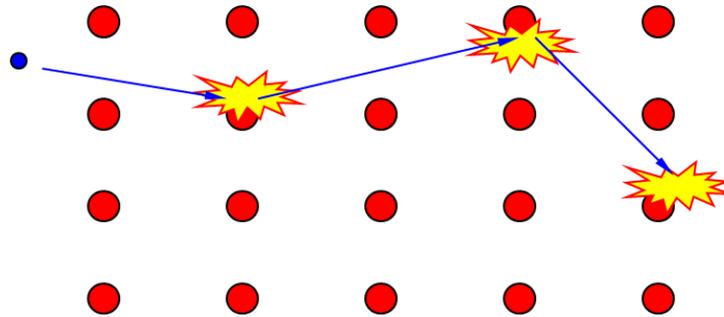
Félix Savart,
French
(June 30, 1791-March 16, 1841)



Jean-Baptiste Biot,
French
(April 21, 1774 – February 3, 1862)

Resistenza

- Per fare grandi campi magnetici, occorrono grandi correnti
 - **La corrente è un flusso di elettroni che attraversano un conduttore**
 - Anche negli migliori conduttori, il **moto è con attrito**, a causa delle collisioni con gli atomi del conduttore – c'è dissipazione



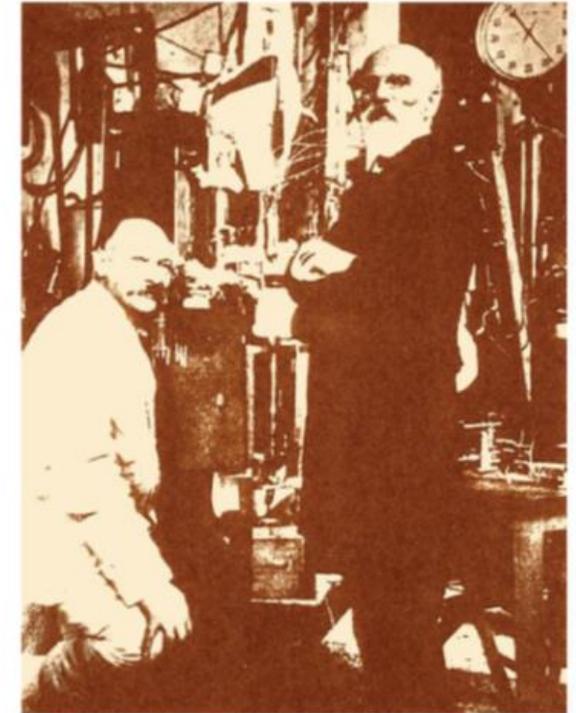
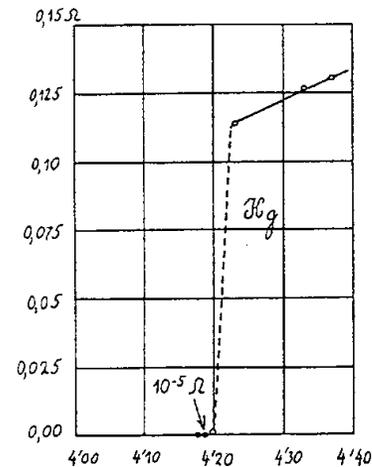
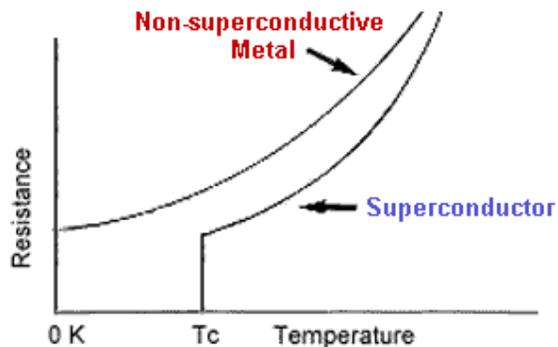
- L'energia dissipata è dipende dalle vibrazioni degli atomi, la cui ampiezza aumenta con la temperature
- A basse temperature, l'ampiezza delle vibrazioni diminuisce e così anche la resistenza
- Il rame può portare fino a 1 A/mm^2 (se raffreddato a aria) poi si scalda troppo.
 - Per fare **1 T**, (200.000 volte il campo terrestre) servono 100 kA, ovvero un conduttore di una sezione di un quadrato di **30 cm** che pesa **800 kg al metro** !

Sommario

- Elementi di fisica
- **Storia della superconduttività**
- Superconduttività applicata
 - Linee elettriche
 - Motori e generatori
 - Magneti superconduttori
- Cosa portare a casa

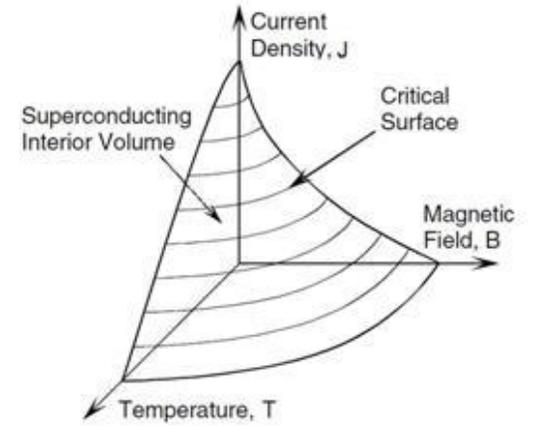
Scoperta della superconduttività

- Nel **1911**, Kamerlingh Onnes scopre la **superconduttività**
 - Il mercurio, al disotto di **-269°** ha zero resistenza!
 - Scoperta grazie alla sua invenzione di un frigorifero che riesce a rendere l'elio liquido
 - L'elio è l'unico elemento che non ghiaccia mai
- 1913: premio Nobel, ma per il frigorifero



Heike Kamerlingh Onnes
(1853 – 1928) Nobel prize 1913

Superconduttività



- La superconduttività, fenomeno quantistico, è distrutta da tre fattori
 - Grandi **campi magnetici**
 - Grandi **densità di corrente** (ma 1000-10000 volte piú del rame)
 - Alte **temperature**
- Mentre non è (così) difficile raffreddare, la tolleranza al campo magnetico nei materiali scoperti da Kamerlingh Onnes e negli anni successivi è minima (meno di 1 T)
 - Per questo (e per altro) passeranno 50 anni dalla scoperta della superconduttività ai primi magneti superconduttori che danno più di un tesla
- Solo nel 1957 viene proposta la **teoria BCS** (Bardeen–Cooper–Schrieffer) che dà il modello oggi affermato della superconduttività
 - Premio Nobel nel 1972



John Bardeen, American
23 May 1908 – 30 Janvier 1991



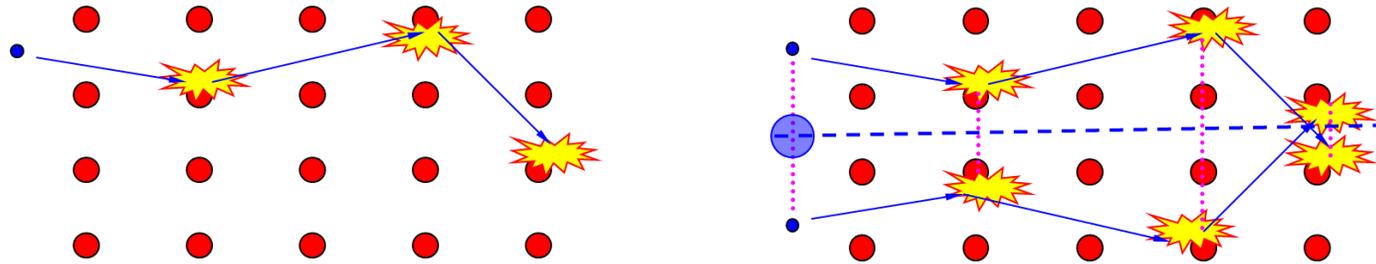
Leon Cooper, American
28 February 1930



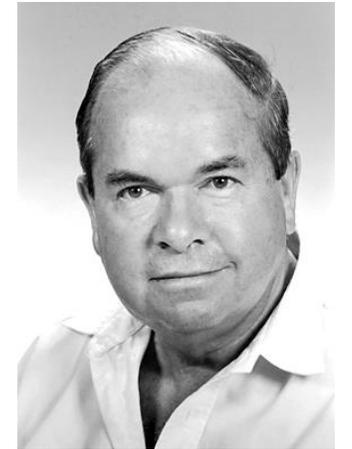
John Robert Schrieffer, American
31 May 1931

Superconduttività – coppie e difetti

- Secondo la teoria, gli elettroni si accoppiano raggiungendo un nuovo stato che gli permette di viaggiare nel materiale senza interagire con gli atomi (coppie di Cooper).



- Negli anni '50 si sviluppa la teoria dei superconduttori di tipo II, che tollerano grandi campi magnetici
 - Premio Nobel 2003 a Abrikosov
 - Elemento essenziale: il materiale deve avere difetti



Alexei Abrikosov, Russian

(25 June 1928)

Superconduttività - Temperature

- L'esistenza dello zero assoluto (-273 C) viene ipotizzata per la prima volta nel **1702** (Guillame Amontons)
 - Allo zero assoluto i movimenti atomici sono congelati
- Fino agli **anni ottanta**, la **temperatura massima alla quale si osserva la superconduttività è 25 K**, ovvero -250°
 - **77 K (-200° C)** è una temperatura speciale: quella dell'**azoto liquido** – un metodo semplice per raffreddare (lo vedrete nel laboratorio)
- Nel **1986** vengono scoperti **superconduttori a temperature al disopra di -200° C (High Temperature Superconductors)**
 - Premio Nobel nel 1986 (rapido!)



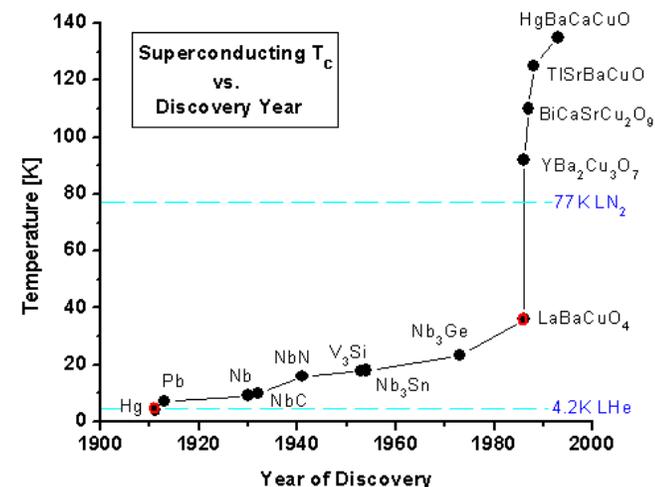
George Bednorz, German

(16 May 1950)



Karl Alexander Muller , Swiss

(27 April 1927)



Superconduttività

Nb and Ti(1961) → ductile alloy

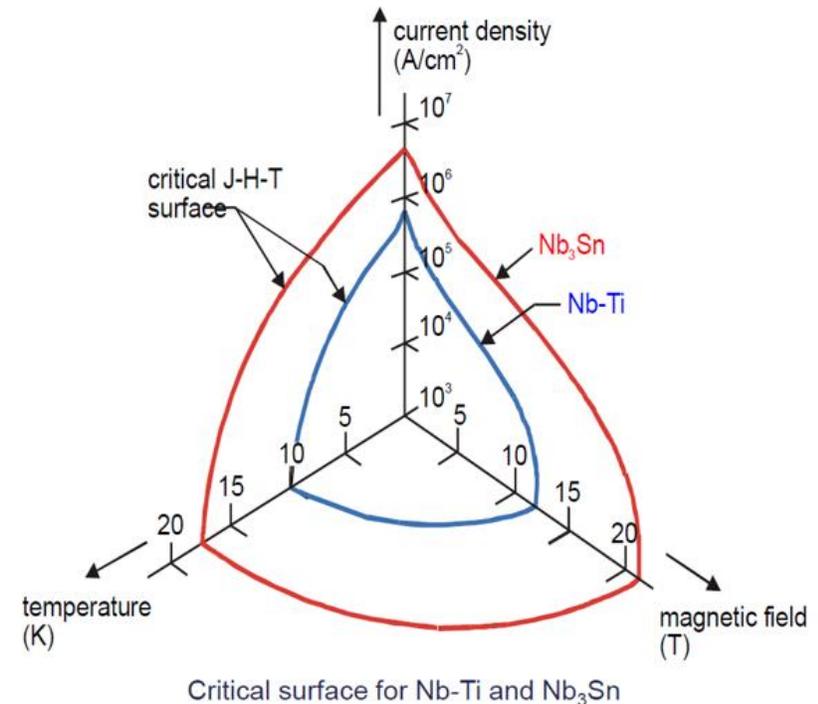
Extrusion + drawing

- T_c is ~ 9.2 K at 0 T
- B_{C2} is ~ 14.5 T at 0 K
- Use in **Tevatron**(80s), then all the other
- ~ 50 -200 US\$ per kg of wire (1 euro per m)

Nb and Sn (1954) → intermetallic compound

Brittle, strain sensitive, formed at ~ 650 -700°C

- T_c is ~ 18 K at 0 T
- B_{C2} is ~ 28 T at 0 K
- Used in **NMR, ITER, now HL-LHC**
- ~ 700 -1500 US\$ per kg of wire (5 euro per m)



Sommario

- Elementi di fisica
- Storia della superconduttività
- **Superconduttività applicata**
 - Linee elettriche
 - Motori e generatori
 - Magneti superconduttori
- Cosa portare a casa

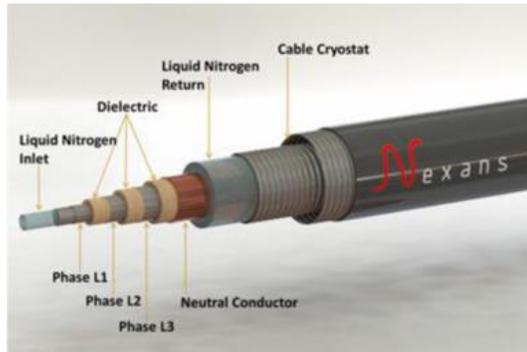
Linee elettriche: no

- Perchè oggi, più di cento anni dopo la scoperta della superconduttività, abbiamo ancora delle **linee elettriche in alluminio che dissipano energia?**
 - Le perdite nelle linee elettriche sono rese minime da alti voltaggi
 - Alti voltaggi → basse correnti e piccole dissipazioni
 - Inoltre, le più grandi dissipazioni sono nell'ultimo chilometro
- Non è conveniente dal punto di vista dei **costi!**
 - Sia del superconduttore
 - Sia della infrastruttura per raffreddarlo



Linee elettriche:si

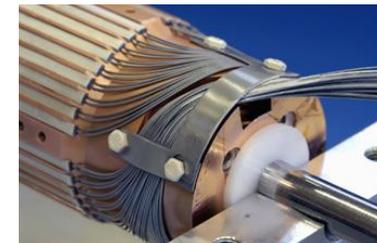
- D'altro canto, i **superconduttori possono portare alte densità di corrente** (100 volte piu' del rame o dell'alluminio)
 - Interessanti per casi in cui lo spazio è limitato
 - Applicazioni pilota a trasmissione di corrente



Long Island Power Authority,
with a 574 MW
superconducting power line

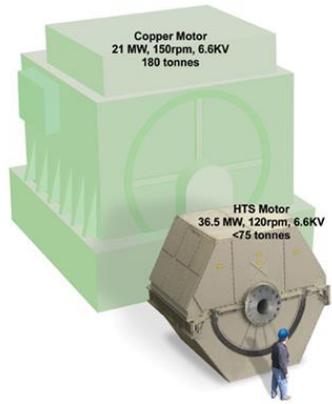
- I superconduttori possono portare la corrente da temperatura ambiente a -270° (current leads) riducendo le perdite
 - Applicazioni in acceleratori di particelle (LHC, HL-LHC) e in magneti per la fusione nucleare (ITER)

HTS current leads in LHC

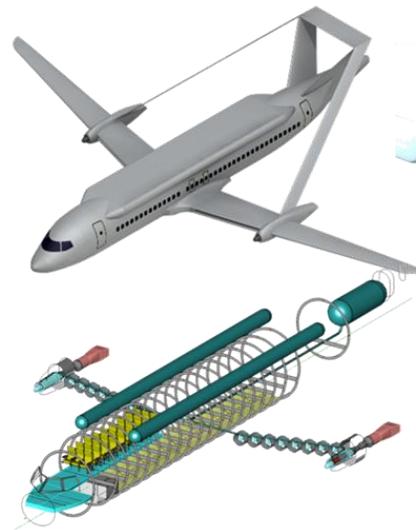


Motori e generatori

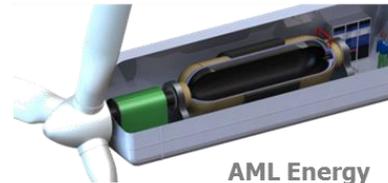
- La compattezza permessa dalla superconduttività rende interessanti applicazioni dove il peso del sistema è un parametro importante: motori e generatori di navi, aerei, ...



<http://www.amsc.com/products/motorsgenerators/shipPropulsion.html>



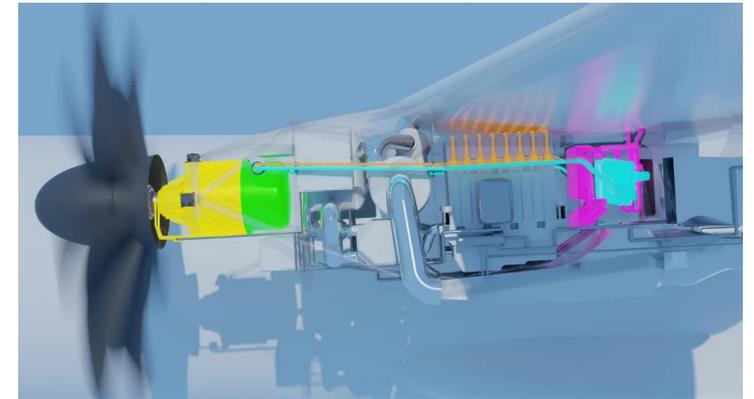
AML – ESAero – NASA GRC



AML Energy



American Superconductor

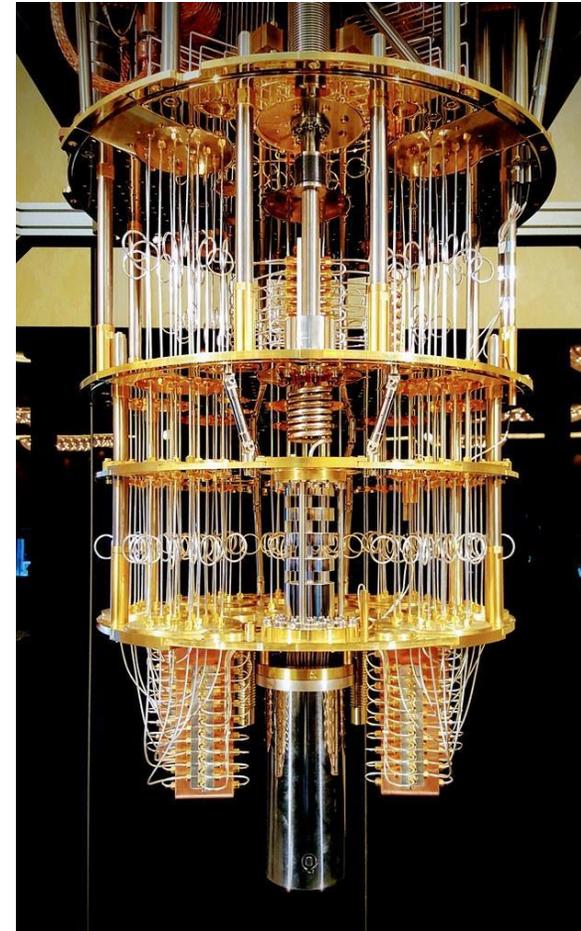


[Airbus takes superconductivity research for hydrogen-powered aircraft a step further | Airbus](#)

Treni e Quantum Computing



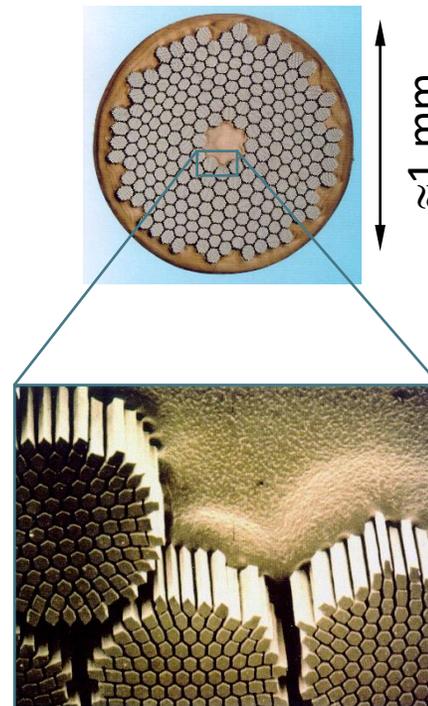
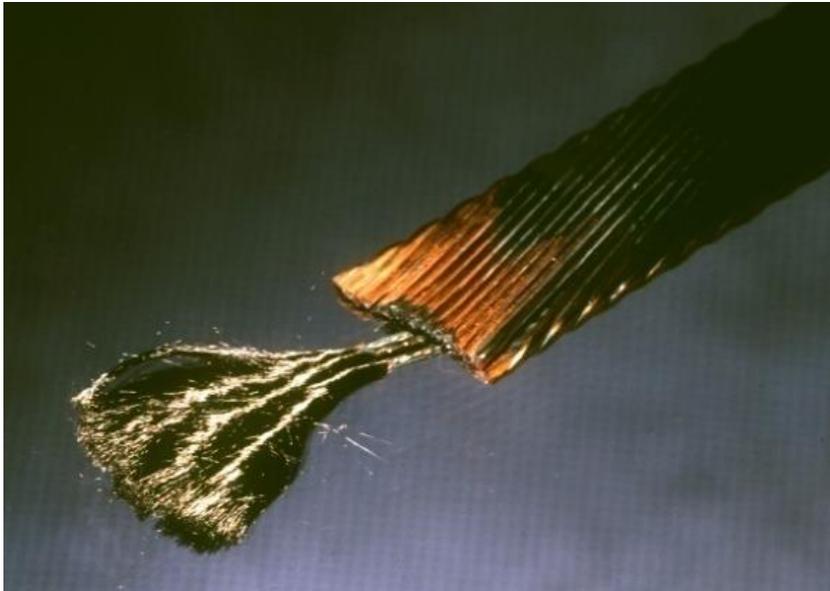
Treno a levitazione magnetica



Computer quantistico

Magneti superconduttori

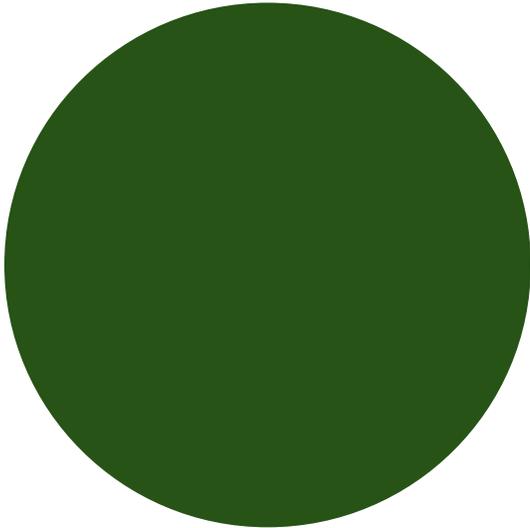
- A partire dagli anni sessanta, si riescono a costruire magneti superconduttori (di tipo II) con campi al di sopra di 1 tesla
- Un ulteriore problema che viene risolto è che un superconduttore massiccio (come un filo di rame) non funziona: bisogna avere filamenti sottili in una matrice di rame
- I filamenti sono di un diametro di 10-100 micron!



Superconduttori in pratica

Diametro 0.85mm

Cu

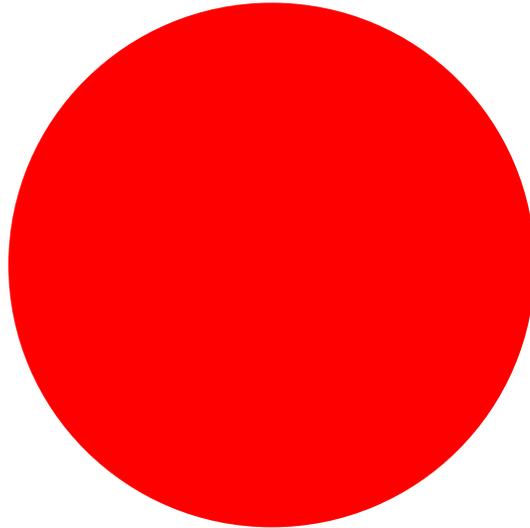


$$J_e \sim 5 \text{ A/mm}^2$$

$$I \sim 3 \text{ A}$$

$$B = 2 \text{ T}$$

Nb-Ti

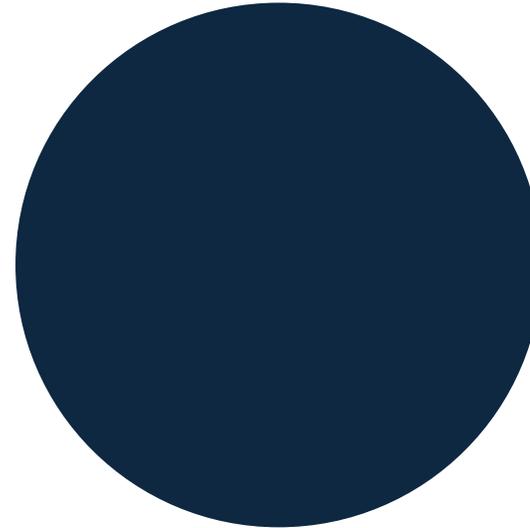


$$J_e \sim 600-700 \text{ A/mm}^2$$

$$I \sim 300-400 \text{ A}$$

$$B = 8-9 \text{ T}$$

Nb₃Sn



$$J_e \sim 600-700 \text{ A/mm}^2$$

$$I \sim 300-400 \text{ A}$$

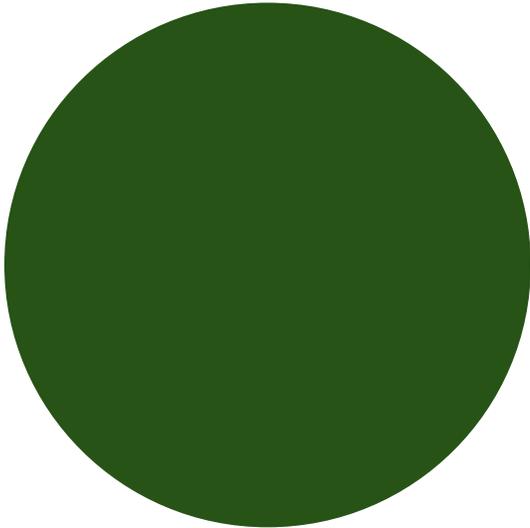
$$B = 12-13 \text{ T}$$

by P. Ferracin

Superconduttori in pratica

Diametro 0.85mm

Cu

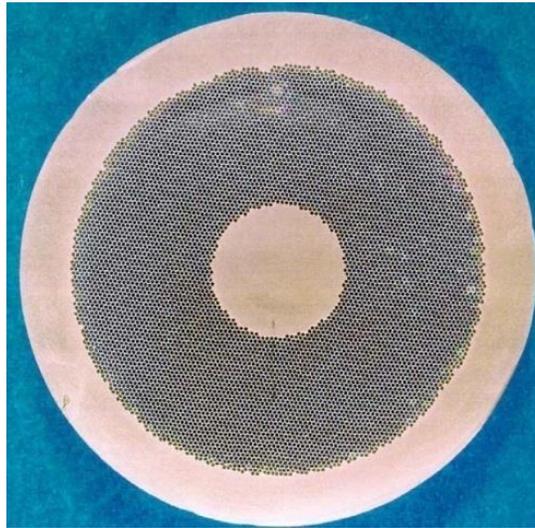


$$J_e \sim 5 \text{ A/mm}^2$$

$$I \sim 3 \text{ A}$$

$$B = 2 \text{ T}$$

Nb-Ti

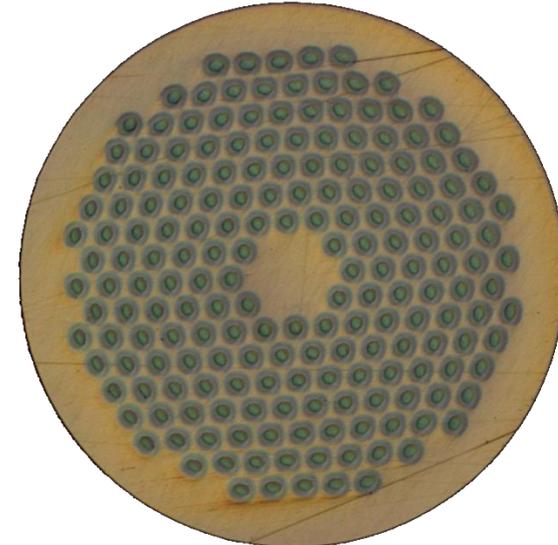


$$J_e \sim 600\text{-}700 \text{ A/mm}^2$$

$$I \sim 300\text{-}400 \text{ A}$$

$$B = 8\text{-}9 \text{ T}$$

Nb₃Sn



$$J_e \sim 600\text{-}700 \text{ A/mm}^2$$

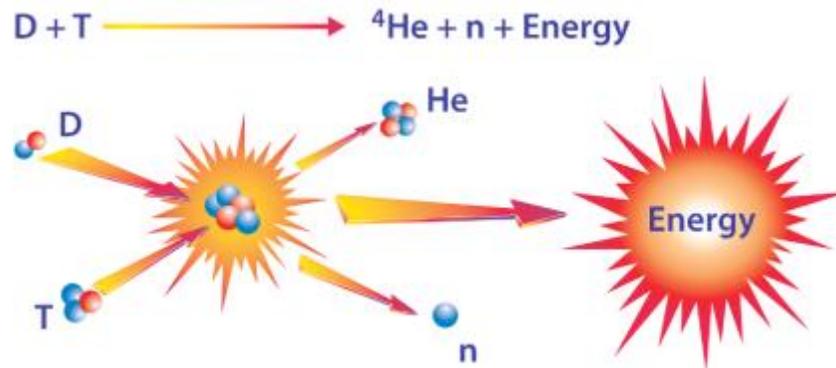
$$I \sim 300\text{-}400 \text{ A}$$

$$B = 12\text{-}13 \text{ T}$$

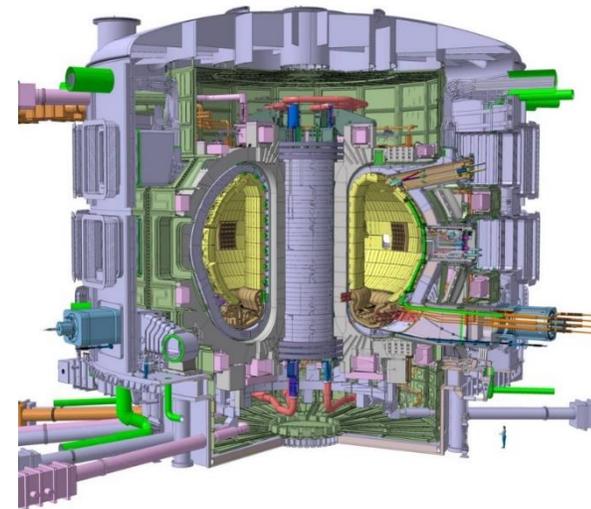
by P. Ferracin

Magneti superconduttori - fusione

- Nei tokamak, proposti negli anni '50 da Sakarov e Tamm, un campo magnetico confina un plasma che viene scaldato per produrre energia di fusione nucleare, come nel Sole
- ITER è l'ultima generazione di questi progetti, lanciato nel 1985, operativo nel 2030 – magneti in Nb₃Sn fino a 13 T
- SPARC è un progetto che grazie a magneti in HTS di 20 T dovrebbe permettere un reattore molto più compatto



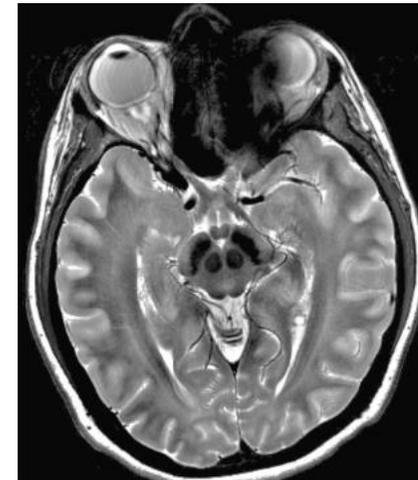
Fusione nucleare



ITER

Magneti superconduttori - medicina

- Imaging a **risonanza magnetica** – solenoidi da 3 a 7 T prodotti commercialmente e usati negli ospedali
- Dispositivi a campo più alto sono sviluppati in via sperimentale (progetto Neurospin, a 11.7 T), e fino a 17 T
- Costituiscono oggi il mercato principale per la superconduttività
- Sono una applicazione particolare della NMR (risonanza magnetica nucleare), usata con campi magnetici fino a 23 T



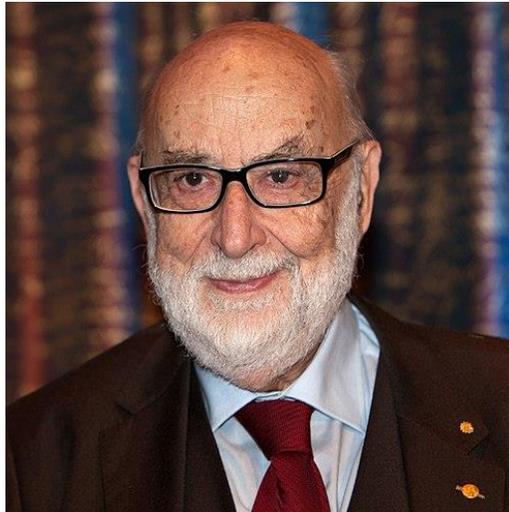
Immagini ottenute grazie alla risonanza magnetica

Magneti superconduttori - acceleratori

- Negli acceleratori di particelle, l'energia di collisione è il prodotto tra il campo dei magneti e la dimensione dell'anello
- Alti campi magnetici \diamond grandi energie
- Tevatron con 4 T (Nb-Ti) e 6.28 km sfiora 1 TeV per protone negli anni '80
- Anni prima, magneti con 4 T di campo vengono usati al CERN-ISR
- Negli anni '10, LHC con 8 T (Nb-Ti) e 27 km raggiunge 6.8 TeV, e un premio Nobel per la scoperta del bosone di Higgs



I dipoli di LHC



François Englert



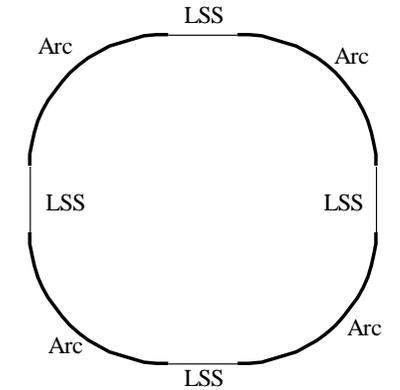
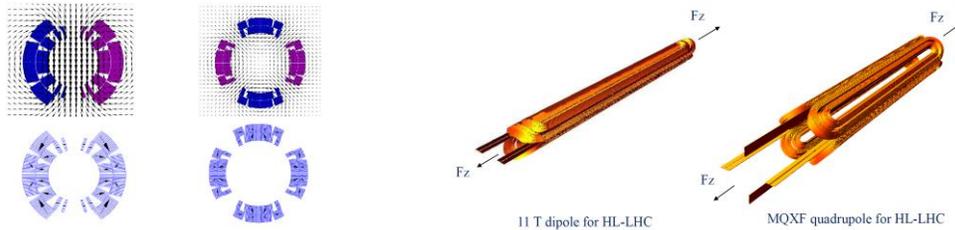
Peter Higgs

Magneti superconduttori - acceleratori

- L'arco (20.7 km)

- **Dipoli** : campo magnetico responsabile di deviare (curvare) il fascio di particelle
- **Quadrupoli**: campo magnetico che genera forze necessarie per stabilizzare il moto lineare
 - Focus del fascio
 - Previene la "caduta" dei protoni nel fondo dell'apertura(succederebbe in meno di 60 ms)

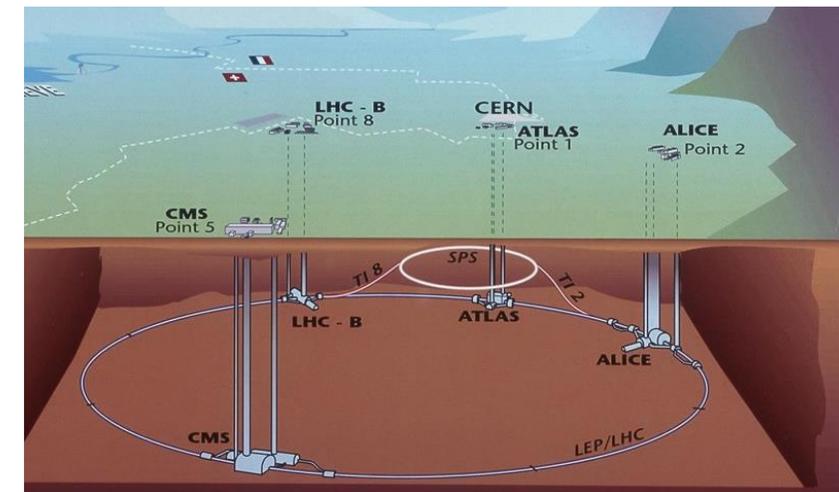
- **Correttori**



A schematic view of a synchrotron

- Long straight sections (7.2)

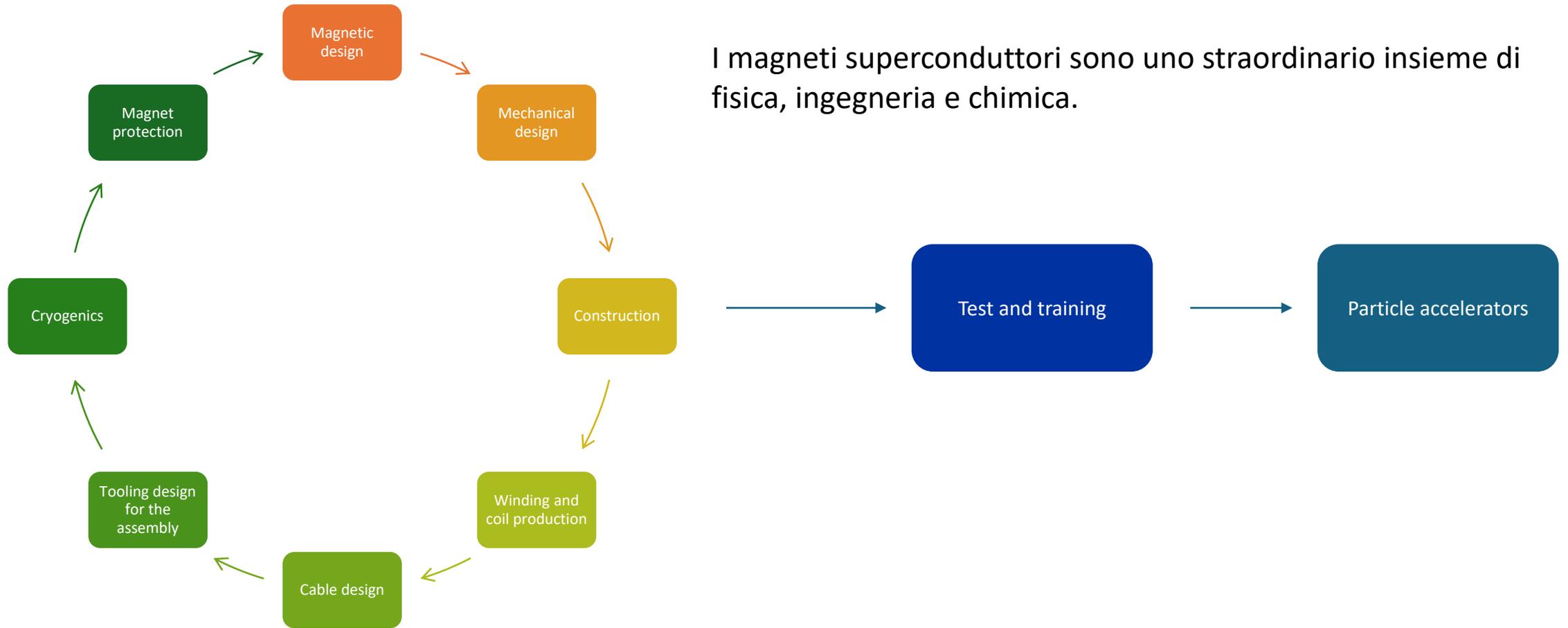
- **Zona di interazione** (IR) dove troviamo gli esperimenti
 - Quadrupoli per il focus del fascio
 - Dipoli per il passaggio nei dipoli a doppia apertura
- **Altri dispositivi**
 - Beam injection (dipole kickers)
 - Accelerating structure (RF cavities)
 - Beam dump (dipole kickers)
 - Beam cleaning (collimators)



The lay-out of the LHC

Magneti superconduttori - acceleratori

I magneti superconduttori sono uno straordinario insieme di fisica, ingegneria e chimica.

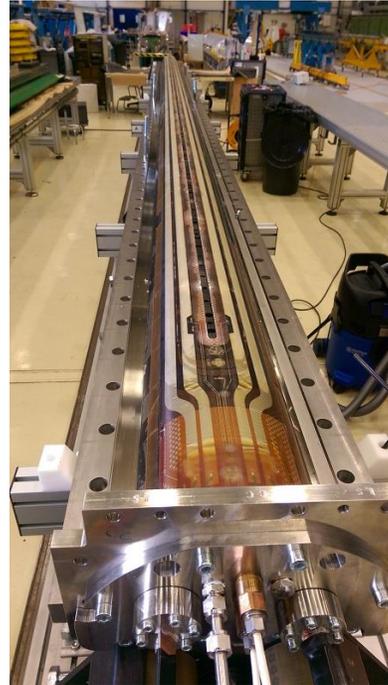


Magneti superconduttori - acceleratori

- Nell'upgrade di LHC, al CERN stiamo costruendo magneti di nuova generazione (Nb₃Sn) con campo di picco di 11.5 T – installazione nel 2026-28
- Campi di 14 T o 20 T sono considerati negli studi del prossimo collisionatore al CERN, con un nuovo tunnel di 90 km



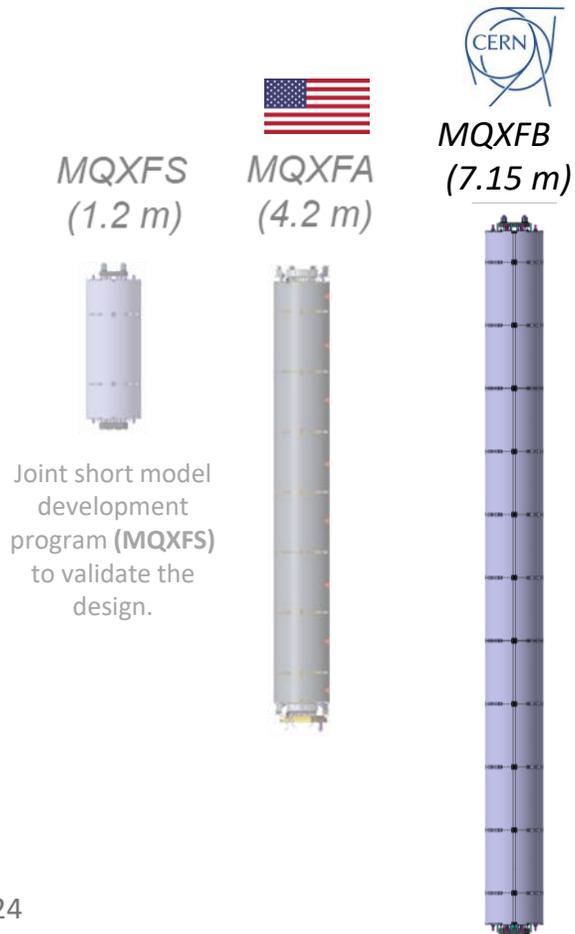
Il primo magnete in Nb₃Sn di 7 m nel criostato rosso, e le bobine



FCC: un tunnel di 90 km

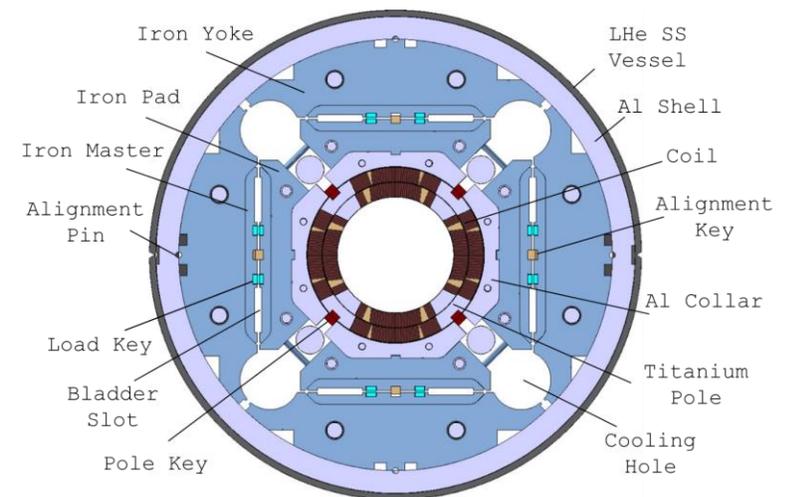
Magneti per HL-LHC Nb₃Sn

Il progetto High Luminosity Large Hadron Collider (**HL-LHC**) ha lo scopo di migliorare l'LHC aumentando la luminosità (collisioni)

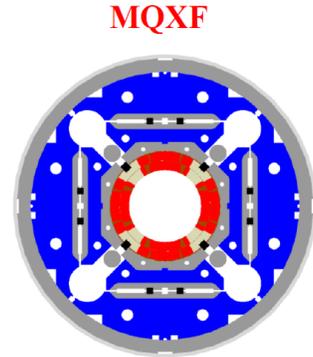


Una parte importante di questo progetto è la zona di interazione per gli esperimenti di ATLAS e CMS.

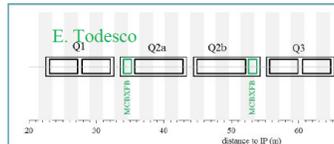
New **MQXF** low- β quadrupole magnets (**Nb₃Sn**)



Magneti per HL-LHC Nb3Sn



30 large aperture and more powerful quadrupoles around ATLAS and CMS to decrease the beam size and increase the integrated luminosity by a factor 10
Construction of pre-series and series magnets on-going, joint effort between CERN and US-AUP



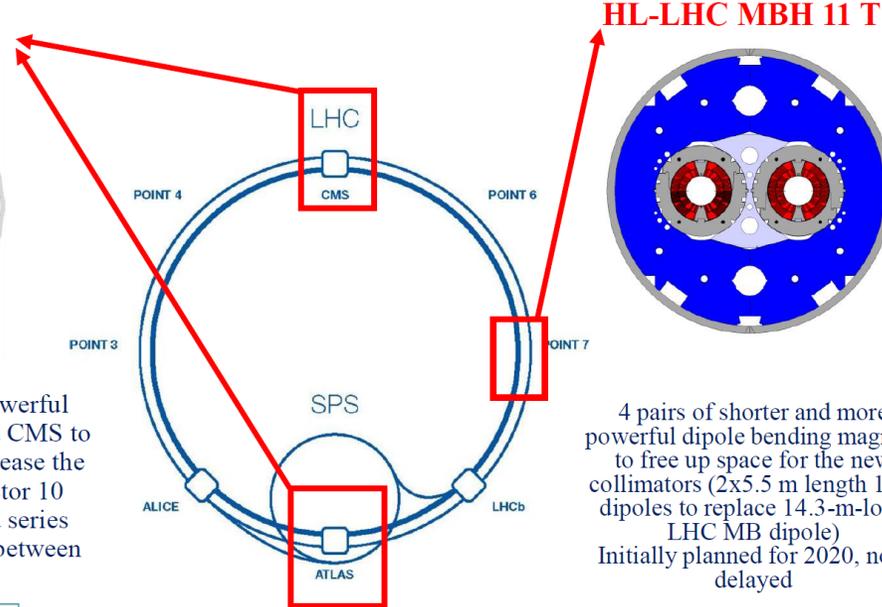
HL-LHC MQXF

Nb₃Sn, B_p=11.3T

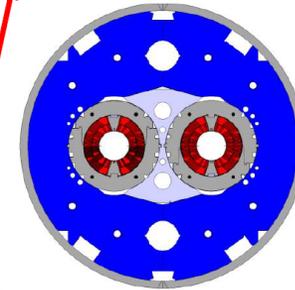
F_x=6.8 MN/m (585 t per m)

~510 compact cars

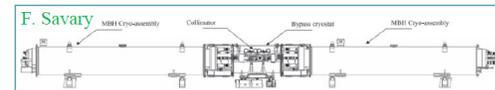
F_z=1.2MN



HL-LHC MBH 11 T



4 pairs of shorter and more powerful dipole bending magnets to free up space for the new collimators (2x5.5 m length 11 T dipoles to replace 14.3-m-long LHC MB dipole)
Initially planned for 2020, now delayed



HL-LHC MQXF

Nb₃Sn, B_p=11.7T

F_x=7.2 MN/m (620 t per m)

~550 compact cars

F_z=0.45MN

Attività in Italia

- La ricerca italiana è in prima linea in queste attività
- Università
- Enti pubblici di ricerca e laboratori (INFN, ENEA, ...)
- Ricerca privata (ENI, ...)



**Università
di Genova**



**Politecnico
di Torino**



Sommario

- Elementi di fisica
- Storia della superconduttività
- Superconduttività applicata
 - Linee elettriche
 - Motori e generatori
 - Magneti superconduttori
- Cosa portare a casa

Cosa portare a casa

- La superconduttività è un **dono** della meccanica quantistica
- Si basa sulle **coppie e sui difetti**
- I tempi della ricerca sono lunghi, e lo sforzo della comunità è a livello **planetario**
- Collaborazione nello spazio ... **accettate le diversità** (e imparate le lingue)
- ... e nel tempo, come le cattedrali del medioevo – **siate pazienti**
- Le applicazioni nate dalla ricerca di base sono molteplici e sorprendenti
- Dallo studio delle proprietà della materia a basse temperature nascono magneti per la medicina, come dalle ricerche di Marie Skłodowska (Curie) sui raggi X nacquero le radiografie
- **Se sceglierete questo lavoro, non vi annoierete mai**



Grazie!!!!

