

# Superconduttività: dalla Fisica delle Particelle all'Adroterapia

**Lucio Rossi**

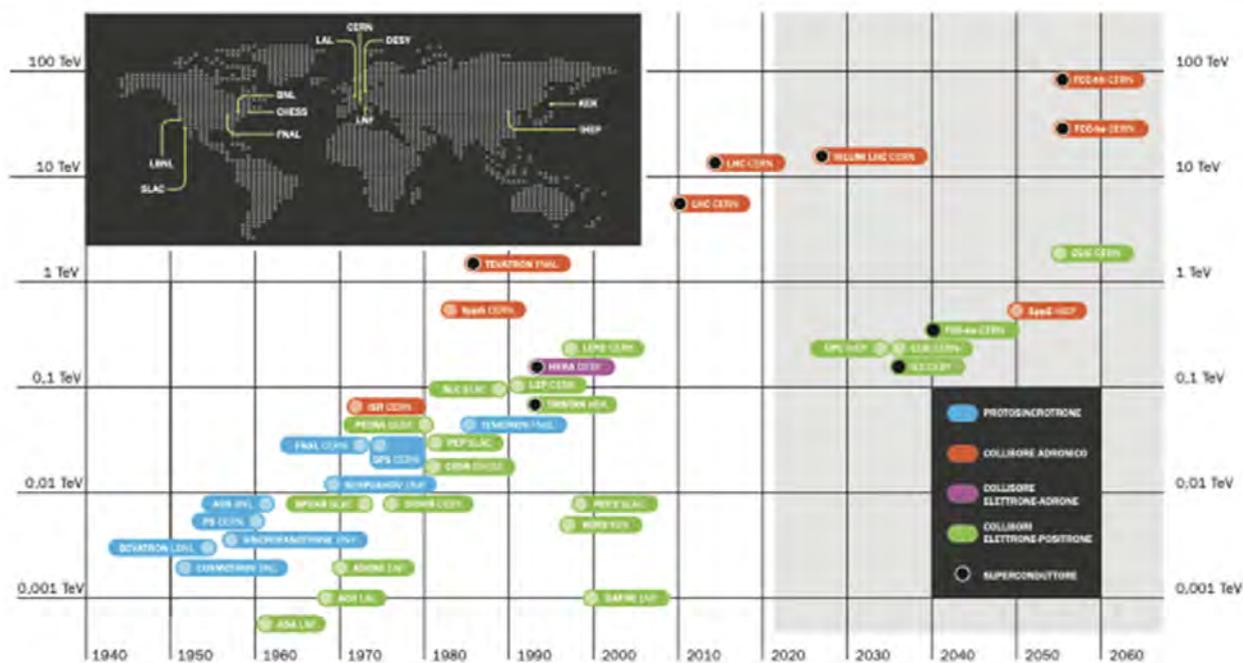
Dipartimento di Fisica, Università di Milano  
Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sez. di Milano, Milano, Italia

---

**L**a superconduttività ha accompagnato la crescita esponenziale dell'energia e della luminosità degli acceleratori di particelle negli ultimi 50 anni e da lì è penetrata nella società. In particolare i magneti superconduttori sono l'applicazione con maggior impatto: basti pensare ai circa 5000 grandi magneti superconduttori che ogni anno vengono costruiti per altrettanti sistemi di diagnostica medica basata su immagine per risonanza magnetica. Gli acceleratori di particelle, in particolare i grandi collisori adronici o i LINAC per elettroni, vanno riconosciuti come un volano che ha generato lo sviluppo della tecnologia superconduttiva.

Lo sviluppo dei magneti superconduttori, ed ugualmente delle cavità a radiofrequenza (RF) superconduttive, [1, 2], richiede uno sforzo costante e continuo per decenni, come tipicamente richiesto dai grandi progetti per fisica delle particelle o per la fusione termonucleare controllata. Per esempio il Large Hadron Collider (LHC) del CERN di Ginevra, è stato il culmine di 40 anni di

sviluppi, prima per il collisore Tevatron al Fermilab, poi HERA al Desy e infine RHIC a Brookhaven. LHC stesso ha richiesto un R&D specifico di oltre dieci anni e poi altri venti per industrializzazione, costruzione e *commissioning*. Il progetto High Luminosity LHC (HiLumi o HL-LHC), pur essendo solo un upgrade di LHC, ha richiesto ben 15 anni di R&D per poter aumentare i campi magnetici dagli 8 T di LHC ai 12 T necessari nei magneti delle inserzioni ad alta luminosità (ATLAS e CMS) [3]. E già da diversi anni sono iniziati gli studi per il post-LHC collider. Potrebbe essere un circolare basato su magneti superconduttori ancora più potenti, 16 T, inseriti nel tunnel LHC (progetto detto High-Energy LHC o HE-LHC) oppure installati nel nuovo tunnel da quasi 100 km che il CERN e la comunità Europea dei fisici delle Particelle han proposto come Future Circular Collider (FCC). Oppure potrebbe essere un acceleratore lineare tipo l'International Linear Collider (ILC) propugnato dal Giappone con il supporto di numerose altre frange della comunità di fisica delle alte energie. Entrambi i progetti si fondano su tecnologie basate sulla superconduttività: magneti superconduttori potentissimi e possibilmente a basso consumo nel caso dei collisori circolari tipo FCC e cavità RF



**Figura 1:** La storia degli acceleratori e collisori. Energia del centro di massa rispetto all'anno di funzionamento. I cerchi neri indicano le macchine superconduttrici. (INFN-Communication Office: © Infn-Asimmetrie(Hylab))

di basso consumo e grande efficacia nel caso di acceleratori lineari. In figura 1 si mostra come lo sviluppo degli ultimi 30 anni ma anche il futuro nei prossimi 20 anni sia dominato da acceleratori superconduttivi sia per adroni che - quasi sempre - anche per leptoni.

## Dai quark alla medicina

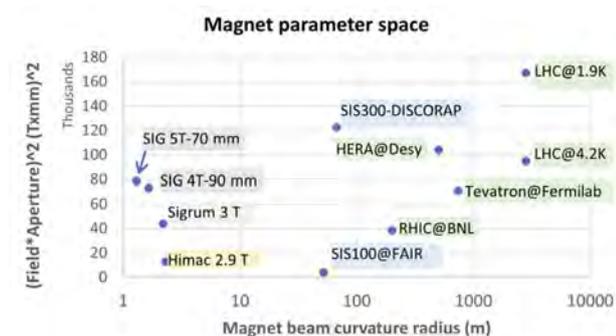
Fino a qualche anno fa la superconduttività aveva una relativa bassa diffusione nelle tecnologie medico-sanitarie, eccetto che per la risonanza magnetica, come sopra citato. Alcuni ciclotroni o sincrociclotroni con magneti superconduttivi sono stati costruiti e utilizzati, principalmente per adroterapia, cioè per uso diretto delle particelle pesanti per eliminare zone tumorali lasciando, quasi, intatto il tessuto circostante. L'uso di particelle di qualche centinaio di MeV per nucleone è una tecnica ben nota per la cura per esempio di tumori radioresistenti e quindi non curabili con i classici raggi X [4]. Ci sono ben 24 centri di adroterapia in Europa (105 nel mondo). Ebbene di questi solo quattro in Europa (e solo 12 nel mondo) utilizzano ioni pesanti, come il carbonio: tutti gli altri usano solo protoni. Questo

nonostante che la maggior efficacia terapeutica degli ioni pesanti rispetto ai protoni sia ben stabilita. La causa di questa difficoltà ad imporsi della cura con ioni pesanti risiede nel fatto che le dimensioni dell'acceleratore e delle linee di fascio sono molto maggiori per gli ioni carbonio che per i protoni (e senza confronto con la piccola taglia, da sala operatoria, di un acceleratore che produce raggi X tramite elettroni).

Una ulteriore considerazione è che quasi tutti i centri che usano protoni hanno un sistema ruotante di puntamento del fascio sul paziente (chiamato gantry), che permette di irraggiare la zona tumorale da direzioni multiple e non complanari, esattamente come il trattamento a raggi X, mentre pochissimi centri per ioni pesanti hanno un gantry. Per ora solo un centro in Europa (Heidelberg, Germania) ha installato un gantry ruotante per ioni. Il suo esempio non è stato seguito per la sua mole enorme (660 tonnellate, per 26 m di diametro) e i conseguenti costi altissimi sia per lo strumento in sé sia per l'impianto (ingegneria civile, potenza elettrica, impianti tecnici). Una soluzione parziale è stata recentemente trovata in Giappone, un paese all'avanguardia nelle tecnologie fisiche per la medicina, anche a causa

della elevata età media (l'unico a superare l'Italia tra i grandi paesi). La soluzione sperimentata dall'industria Toshiba qualche anno fa al centro HIMAC (a sud di Tokyo) è basata sull'uso di magneti superconduttori con un numero notevole di cryocooler (27) per evitare l'uso di elio liquido. Il gantry pesa solo 300 tonnellate sviluppate su 13 m ed è stato riprodotto con miglioramenti graduali recentemente con l'installazione alla Yamagata University (50 km nord di Fukushima) sempre per opera di Toshiba.

In Europa si è recentemente formata una collaborazione per esplorare la possibilità di utilizzare magneti superconduttori con tecnologie derivate dai collisori adronici per fisica delle particelle, tipo LHC. Infatti i magneti per collisori sono relativamente sottili e lunghi e si sono dimostrati molto affidabili (basti pensare alle migliaia di magneti installati e funzionanti quotidianamente in LHC: quasi 2 mila da 5 a 15 m di lunghezza, 8T, e quasi 8 mila di più piccola taglia da 2-3 T).



**Figura 2:** Vari magneti del passato e del futuro (SIG and Sigrum) in uno speciale spazio dei parametri.

## Il gantry superconduttore europeo per ioni pesanti

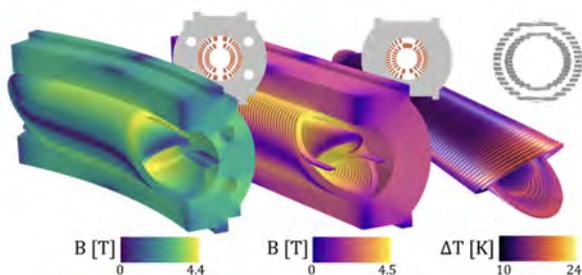
Lo sforzo europeo è volto a progettare e costruire un gantry avanzato entro il presente decennio, di tipo innovativo: la taglia dovrebbe essere minore di 100 tonnellate e il diametro di 7-10 m. Il gantry è basato su magneti superconduttori da 4 T, con una apertura magnetica di 80 mm su una lunghezza di 1.5 m ciascuno e con curvatura ridotta, circa 1.5 m, per tenere il gantry molto compatto. Quest'ultima caratteristica, la curvatura così piccola, è la grande novità rispetto ai collisori per

fisica fondamentale, talmente e lunghi da avere raggi di curvatura da 100 m (FAIR SIS100) a 3000 m (LHC), quindi praticamente dritti. Non solo un raggio di curvatura così serrato richiede uno studio e una ingegneria del magnete molto complessi, ma anche il *ramping rate* che passa dai 0.01T/s di LHC a 0.4 T/s richiesto dall'adroterapia pone una sfida addizionale notevole perché non si vuole utilizzare elio liquido in un ambiente con pazienti (inoltre l'elio liquido bifasico mal si adatta a un sistema ruotante). Nella Figura 2 è visualizzato nello spazio dei parametri il punto operativo del magnete dipolare SIG studiato in collaborazione da INFN e CERN da un lato e da CNAO (Pavia) e MedAustron (Vienna) dall'altro, questi ultimi essendo due tra i maggiori centri di adroterapia con ioni nel mondo. SIG è situato nel punto più difficile, dove l'energia del magnete (proporzionale al quadrato dell'apertura per il campo) è alta e il raggio di curvatura piccolissimo. A parte la curvatura e il *ramping rate*, SIG è basato su tecnologie LHC, con magneti detti CosTheta e cavo superconduttore tipo Rutherford. Si vuole arrivare a collaudare un dimostratore<sup>1</sup> SIG entro due anni [5].

Oltre a questa collaborazione ristretta e molto focalizzata, una vasta collaborazione europea cofinanziata da EC-H2020 con i programmi HITRplus e IFAST, sta esplorando una via parallela per raggiungere lo scopo che ci si è prefisso: la via del CCT (Canted CosTheta) [8]. Questa nuova configurazione è stata messa a punto per la prima volta per l'uso in un acceleratore per il progetto HiLumi [9], ad un livello di campo di 3 T, per campi statici e in configurazione dritta. Se funzionasse a 4 T e con raggi di curvatura e *ramping rate* come SIG, la configurazione a CCT avrebbe il vantaggio di essere meno costosa e più facile da attuare che non la classica CosTheta di SIG. Proprio per questa promessa di aprire un nuovo filone per magneti superconduttori meno costosi e più semplici, la collaborazione HITRplus e IFAST per il CCT, guidata da INFN-Milano-LASA come per SIG, è molto più vasta, comprendendo 8 Istituti e diverse industrie. Anche qui son previsti entro il 2025 ben tre dimostratori, di cui uno in HTS (High Temperature Superconductors) come test tecnologico. Questi

<sup>1</sup>Un dimostratore è un prototipo dell'apparato ma in scala ridotta

dimostratori in CCT saranno comunque meno vicini a un impiego diretto in un gantry di quanto non lo sia il dimostratore SIG. In Figura 3 sono condensati schematicamente i tre dimostratori dei programmi HITRIPlus e IFAST [10].



**Figura 3:** Sezioni trasversali e prospetto 3D dei campi magnetici dei CCT Nb-Ti HITRIplus curvi (sinistra), diretto combinato CCT Nb-Ti IFAST (centro), e margini di temperatura di CCT basato su HTS IFAST (destra).

Comunque vada, attraverso un magnete CosTheta oppure CCT, il futuro e sviluppo di una terapia di punta come l'adroterapia con ioni pesanti passa quindi da un trasferimento tecnologico dalle fisica delle particelle alla medicina, a ulteriore dimostrazione di come la ricerca fondamentale sia anche un volano tecnologico senza pari.



- [1] L. Rossi: *Technical Challenges for Future Accelerators* In: Bonolis, L., Maiani, L., Pancheri, G. (eds.) Bruno Touschek 100 Years. Springer Proceedings in Physics, vol 287 (2023), Springer, Berlino (2023). [https://doi.org/10.1007/978-3-031-23042-4\\_14](https://doi.org/10.1007/978-3-031-23042-4_14)
- [2] L. Rossi, L. Bottura: *Superconducting Magnets for Particle Accelerators*, Review of Accelerator Science and Technology, 5 (2012) 51.
- [3] O. Brüning, L. Rossi: *The High-Luminosity Large Hadron Collider*, Nature Reviews - Physics, Comments, 11 (2019) 241.
- [4] A. Degiovanni, U. Amaldi: *History of Hadron Therapy Accelerators*, Physica Medica, 31 (2015) 322.
- [5] M. Prioli et al.: *Design of a 4 T Curved Demonstrator Magnet for a Superconducting Ion Gantry*, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 33 (2023) 1.
- [6] <https://www.hitriplus.eu/>
- [7] <https://ifast-project.eu/>
- [8] E. De Matteis et al.: *Straight and Curved Canted Cosine Theta Superconducting Dipoles for Ion Therapy: Comparison Between Various Design Options and Technologies for Ramping Operation*, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 33 (2023) 4401205.

[9] O. Brüning, Lucio Rossi eds.: *The High Luminosity Large Hadron Collider - The New Machine for Illuminating the Mysteries of Universe*, WORLD SCIENTIFIC, Singapore (2015).

[10] L. Rossi et al.: *Magnet technology and design of superconducting magnets for heavy ion gantry for hadron therapy*, Presented at Int. Particle Accelerator Conference IPAC2023, Venezia 8-12 May 2023,



**Lucio Rossi:** è Professore Ordinario di Fisica Sperimentale all'Università di Milano dove si è laureato nel 1980 e ha iniziato gli studi lavorando su superconduttività per acceleratori e rivelatori di particelle. Dal 2001 al 2020, al CERN di Ginevra, ha diretto la costruzione dei magneti superconduttori per LHC e ha fondato e diretto il progetto High Luminosity LHC. Dal 2020, tornato all'Università di Milano, al laboratorio LASA dell'INFN, conduce diversi progetti per l'adroterapia, per il Muon Collider, e ha proposto e coordina il progetto PNNR-IRIS, una infrastruttura di ricerca per la superconduttività distribuita in sei centri, di cui uno è all'Università del Salento.