

Magneti dal superfreddo

La macchina che spinge al limite le tecnologie.

di Lucio Rossi

Nella corsa a “vedere” dettagli sempre più fini della materia, il Large Hadron Collider è oggi la macchina più veloce: il limite tecnologico estremo raggiunto dalla comunità scientifica fino a oggi.

Lhc si comporta come un potentissimo microscopio in grado di evidenziare dettagli dell'ordine della lunghezza d'onda associata alle particelle accelerate: per energie dell'ordine del teraelettronvolt (TeV), come quelle raggiunte in Lhc, la lunghezza d'onda delle particelle accelerate è pari a un milionesimo di nanometro (10^{-18} m), un attometro. Lhc è dunque, più che un microscopio, il primo “attoscopio” mai realizzato. Da un punto di vista complementare Lhc può essere visto come una macchina del tempo, poiché le condizioni che si possono creare al

suo interno nelle collisioni tra le particelle, erano presenti solo negli istanti iniziali dopo il Big Bang. Anche in questo caso la capacità di spingersi indietro nel tempo dipende dall'energia delle particelle e per energie di 1 TeV, ad esempio, porta a esplorare scale temporali di circa 1 picosecondo (10^{-12} secondi) dopo il Big Bang. L'energia, quindi, è il parametro primario e in un acceleratore circolare come Lhc essa dipende dal raggio dell'anello e dal campo magnetico prodotto per mantenere le particelle lungo la traiettoria circolare.

Per ottenere campi magnetici sufficientemente elevati si è reso necessario l'uso di materiali e tecnologie sofisticate per la conduzione efficace della corrente elettrica. L'utilizzo della superconduttività, in particolare, ha permesso di raggiungere energie elevatissime con impianti giganteschi ma possibili: Lhc ha una circonferenza di 27 km e una potenza di 50 megawatt, ma se fosse realizzato con tecnologie classiche richiederebbe un tunnel di 90-100 km e 1.000 megawatt di potenza per funzionare! I magneti di Lhc hanno la caratteristica di essere raffreddati con elio superfluido alla temperatura di 1,9 kelvin ($-271,1\text{ }^{\circ}\text{C}$); ogni magnete, quindi, è ermeticamente chiuso per contenere il prezioso fluido. Il cuore di un magnete superconduttore è costituito dai cavi superconduttori, avvolti in bobine, che al passaggio della corrente elettrica generano il campo magnetico. Una coppia di bobine (dipolo superconduttivo) fornisce il campo

magnetico necessario a piegare i fasci per costringerli su una traiettoria circolare. Lhc è dotato di 1.232 magneti di dipolo che, con i loro 15 m e più di lunghezza, occupano oltre i due terzi del tunnel e determinano l'energia di tutta la macchina. Producono in media un campo magnetico di 8,3 tesla, circa 200.000 volte più intenso del campo magnetico terrestre, e un campo massimo teorico stimato intorno a 9,7 tesla (questo margine è necessario per operare in condizioni stabili). Per assicurarne la stabilità meccanica, i cavi superconduttori sono alloggiati in una cavità a forma di arco romano ritagliata su misura con grande precisione e la loro posizione deve essere controllata con un'accuratezza di 30 micron sull'intera lunghezza. Questo parametro è stato tenuto sotto controllo nel corso di tutta la costruzione con sofisticate misure magnetiche integrate nel ciclo di fabbricazione; oltre a verificare la geometria di costruzione, tali misure hanno permesso di identificare i difetti di costruzione inosservati durante i diversi passi di controllo qualità o invisibili con misure meccaniche o elettriche.

La cavità che alloggia le bobine è formata dai *collari*, laminazioni di un particolare acciaio inox di grande qualità, detto *austenitico*, tale da non diventare magnetico neanche a basse temperature. Oltre ad assicurare la precisione voluta, i collari devono sostenere gli sforzi elettromagnetici. Il campo magnetico, infatti, genera una pressione di circa 400

- a. Disegno del magnete dipolo di 15 m di Lhc, inserito nel criostato per elio superfluido.
- b. Spostamento a distanza di un magnete (*cold mass*), prima dell'inserimento nel criostato al Cern.
- c. Le bobine superconduttive dei dipoli di Lhc in fase di produzione presso Ansaldo Superconduttori Genova (ASG- Gruppo Malacalza).





d.

atmosfera, corrispondente a una forza di circa 4 meganewton (pari al peso di un corpo di 400 tonnellate) per ogni metro di lunghezza: una forza simile potrebbe anche indurre le bobine ad aprirsi. Anche il più piccolo movimento, tuttavia, deve essere impedito per evitare ogni causa di dissipazione di energia. Alle temperature di operazione di 1,9 gradi kelvin, infatti, è sufficiente un millijoule di energia rilasciata (l'energia acquisita da una massa di un grammo dopo una caduta libera di dieci centimetri) per fare *transire* il cavo superconduttore, facendogli perdere le peculiari caratteristiche e portandolo a dissipare per effetto Ohm come un qualsiasi conduttore. Questo fenomeno di improvviso ritorno dallo stato superconduttore allo stato normale viene chiamato *quench*.

Il design del magnete è fatto in modo da evitare il quench incrementando la stabilità del cavo. Nonostante i diversi accorgimenti, tuttavia, il quench non è raro nei magneti di tipo dipolare. Essi devono essere così protetti da pericolosi eccessi di tensione elettrica e danneggiamenti meccanici dovuti alle variazioni brusche e non omogenee di temperatura. Il quench deve essere individuato nel tempo massimo di 0,01 secondi e il segnale, di pochi millivolt, deve essere distinto dal rumore elettrico di fondo. Una volta scoperto il quench, è necessario azionare i riscaldatori inseriti nelle bobine e scaricare l'energia, ossia la corrente, del magnete. Un ritardo anche di soli 0,1 secondi può essere fatale per il magnete.

Quasi tutti i grandi magneti sono stati costruiti dall'industria europea: il Cern ha fornito i principali componenti e il prezioso cavo superconduttore, fino ai collari e il giogo in ferro dolce. Lo sforzo logistico per la loro collocazione è stato impressionante: complessivamente, sono state consegnate, ispezionate e collaudate circa 150.000 tonnellate di materiale ad alta tecnologia. Questo materiale ha quindi viaggiato per l'Europa impegnando in media dieci grandi trasporti al giorno per cinque anni. Dopo essere stati consegnati al Cern, i magneti sono stati inseriti nel loro alloggiamento criogenico e collaudati singolarmente in condizioni operative (a 1,9 gradi kelvin di temperatura e 8,3 tesla di campo magnetico). Per stabilire la qualità del campo magnetico, inoltre, sono state condotte misure magnetiche in condizioni operative su circa il 10% dei magneti.

Tutti i magneti sono stati quindi installati nella macchina e interconnessi per formare gli otto settori, lunghi 3,3 km ciascuno, che formano Lhc. Il collaudo della macchina, incluso il test d'iniezione e circolazione dei fasci di protoni, avvenuto con esito positivo il 10 settembre scorso, sembrava coronare un successo che ha percorso tutto il 2008. Tuttavia, proprio al termine della prima fase del collaudo, a un'energia di 5 TeV, un difetto elettrico in una interconnessione ha causato un grave incidente. La connessione era caratterizzata da una resistenza di quattrocento volte superiore

d.

Produzione dei dipoli magnetici in industria: fase di chiusura del recipiente a elio nella stazione di saldatura dei dipoli. La saldatura è completamente automatica: è effettuata sotto pressa (struttura blu) e guidata da tecnici saldatori (a sinistra, ai loro computer) tramite software di gestione.



e.

a quella prevista. In queste condizioni, la dissipazione di energia a circa 8.700 ampère di corrente è diventata insostenibile per il sistema di raffreddamento e una deriva termica molto rapida ha causato la fusione della connessione stessa, con la conseguente generazione di un *arco elettrico*, una scarica elettrica persistente. La potenza dell'arco, mantenuto dall'enorme energia magnetica immagazzinata nella catena di magneti, pari a 600 megajoule, ha fuso la camicia di acciaio che racchiudeva la connessione e che conteneva l'elio superfluido: l'elio si è così riversato in grande quantità nel criostato, all'interno del quale è vaporizzato in breve tempo causando un rapido aumento di pressione, ben oltre i valori controllabili previsti in fase di progetto. Nonostante ogni dipolo abbia una massa di 30 tonnellate, la crescita incontrollata di pressione ha causato lo spostamento di numerosi magneti, provocando un danno meccanico di notevole entità. L'incidente mostra la complessità tecnologica della macchina e le difficoltà che si incontrano nel tentativo di prevedere ogni possibile inconveniente. Ha costretto a rivedere criticamente due aspetti della macchina: l'uno è il sistema di protezione elettrico, la cui sensibilità sarà migliorata di circa 1.000 volte in modo da rivelare i precursori di guasti e quindi evitarli; il secondo è il meccanismo di scarico dell'elio dal criostato. Non solo il numero delle valvole di scarico dovrà essere aumentato di molto,

ma dovrà essere drasticamente aumentata la capacità di sfogo verso di esse per evitare ogni sovrappressione. Lhc è ora in corso di riparazione: i circa 60 magneti coinvolti devono essere riparati o controllati nuovamente. Inoltre, le modifiche dei sistemi di sicurezza devono essere applicate lungo tutta la macchina. Conseguentemente i tempi di riparazione sono valutati in diversi mesi e la messa in servizio è prevista ora per l'autunno 2009.

e.
Operazioni nel tunnel di Lhc: chiusura con saldatura delle interconnessioni tra due dipoli (cilindro blu). A sinistra è visibile la linea di distribuzione criogenica (cilindri bianchi) che corre lungo i 27 km a fianco dai magneti.

Biografia

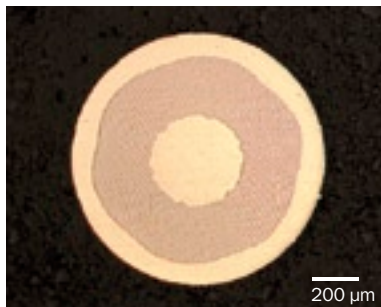
Lucio Rossi è professore in congedo all'Università di Milano e dal 2001 è responsabile al Cern del gruppo in carica dei superconduttori e dei magneti per Lhc. È stato responsabile dei primi dipoli superconduttori (collaborazione Cern-InfN), del superconduttore e delle bobine del toroide per l'esperimento Atlas.

Link sul web

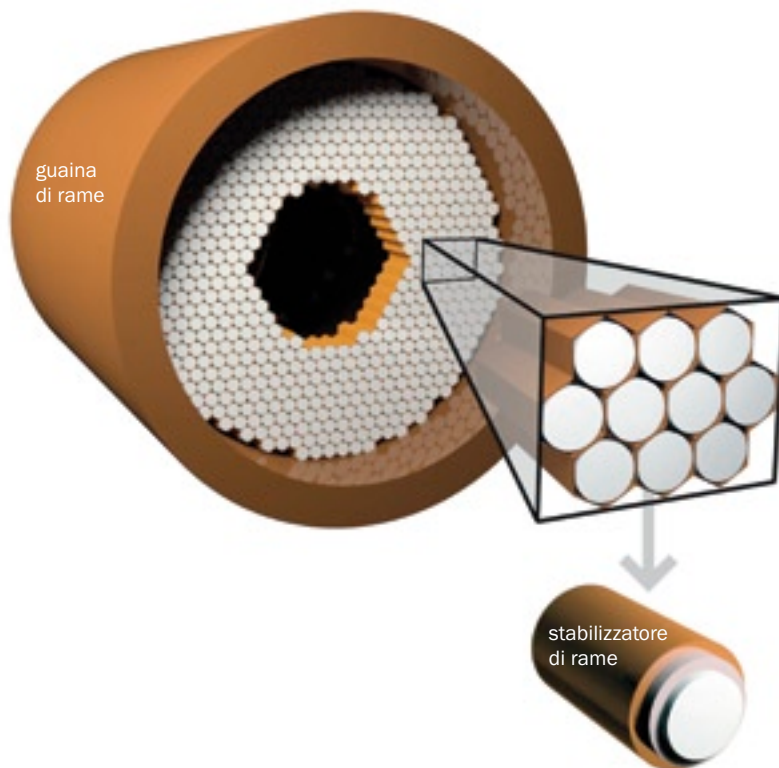
<http://public.web.cern.ch/public/en/Research/Accelerator-en.html>

<http://public.web.cern.ch/public/en/LHC/HowLHC-en.html>

<http://microcosm.web.cern.ch/microcosm/LHCGame/LHCGame.html>



1. 3.
2.



[as] box

Cavi superconduttori

L'elemento base della superconduttività in Lhc è la lega di niobio e titanio (Nb-Ti). Il niobio, estratto quasi esclusivamente in Brasile, è essenziale per il tipo di superconduttività che si manifesta alla temperatura critica di 9 gradi kelvin (-264 °C). Ha però bisogno del titanio per formare una lega caratterizzata da un campo magnetico critico elevato (13 tesla) e correnti critiche a loro volta molto elevate (oltre 1.000 ampère per mm²).

Partendo dagli elementi base, con un processo di fusione sotto vuoto, sono prodotti lingotti di Nb-Ti molto puri e di grande omogeneità: la concentrazione relativa dei due elementi può variare localmente al massimo dell'1%, per evitare un degrado delle proprietà superconduttive.

Le barre ottenute, quindi, sono poi trafilate a freddo ($T < 100$ °C) fino a ottenere dei fili di diametro dell'ordine di 1 mm e lunghezza di 10-20 km.

In questo modo i lingotti originari di Nb-Ti sono trasformati in filamenti finissimi di 6-7 micron di diametro, perfettamente spazati di 1 micron gli uni dagli altri. Un filo di 1 mm è formato da circa 8.000 filamenti di Nb-Ti immersi in una matrice di rame.

Tutto il processo è stato applicato a quantità "industriali" di materiale (per Lhc sono state prodotte 1.200 tonnellate di filo superconduttore) ma deve essere svolto con grande cura e precisione soprattutto

per evitare la minima contaminazione: particelle o inclusioni di pochi μm possono rovinare il processo causando rotture dei fili durante la fase di trafilatura. In totale per Lhc sono stati prodotti circa 300 mila km di filo superconduttore di alta qualità, una quantità che potrebbe coprire quasi l'intera distanza tra la Terra e la Luna. Le grandezze fisiche veramente decisive dal punto di vista delle prestazioni superconduttive sono la corrente critica, la magnetizzazione e la stabilità. Per quanto riguarda la corrente critica, cioè la massima corrente che si può utilizzare, essa è ottenuta alternando la trafilatura a freddo con trattamenti termici opportuni. Questi trattamenti sono una parte critica del *know-how* dalle varie industrie del settore; condotti intorno a 400 °C per 30 ore circa, questi trattamenti favoriscono la precipitazione della fase α -titanio; l'insieme del processo termo-meccanico fornisce il sistema di ancoraggio dei flussoidi (i quanti di flusso magnetico circondati da un vortice di corrente superconduttiva) che è basilare nel meccanismo di corrente critica. Il cavo superconduttore pur essendo un composito ha una escursione di soli 6 μm sullo spessore su tutta la lunghezza e deve risultare assolutamente senza difetti: una imperfezione di cavo superconduttore ha infatti costituito uno dei due soli casi di rigetto totale di un magnete (sui 1.700 grandi magneti costruiti per Lhc).

1. / 2.

Filo superconduttore di Lhc.

Sezione completa (fig. 1). Zoom della sezione (fig. 2).

I filamenti di 6 μm di Nb-Ti (lega niobio-titanio) sono immersi in una matrice di rame puro, spazati di circa 1 μm .

3.

Schema del processo di fabbricazione del filo: composizione del mono-filamento e inserimento del gruppo a esagoni.