

Perché acceleriamo le particelle?

Il più grande laboratorio al mondo funziona grazie a una piccola bombola contenente idrogeno. È in buona parte sepolto nel sottosuolo a 100 metri di profondità tra la Svizzera e la Francia, nei pressi di Ginevra, e comprende un gigantesco anello lungo 27 chilometri dove scienziate e ricercatori da tutto il mondo studiano le origini della materia, ciò di cui siamo fatti ed è fatta praticamente qualsiasi cosa vi possa venire in mente. Dopo tre anni di manutenzione, il laboratorio è da poco tornato in attività per trovare conferme o smentite ad alcune delle più complesse teorie della fisica.

Il grande anello sotterraneo si chiama Large Hadron Collider (LHC), fa parte del [CERN](#) (Organizzazione europea per la ricerca nucleare) ed è un acceleratore di particelle, una sorta di grande circuito da corsa dove i gruppi di ricerca fanno scontrare tra loro le particelle dopo averle spinte fino a velocità di poco inferiori a quelle della luce. Non lo fanno con spirito sadico, ma per analizzare ciò che resta dopo gli incidenti, in modo da ricostruire le caratteristiche stesse delle particelle, talmente piccole da non poter essere osservate, eppure fondamentali per spiegare l'esistenza di tutto.

Fare un esperimento con LHC significa in un certo senso viaggiare nel tempo, per tornare indietro di circa 13,8 miliardi di anni, cioè ai primissimi istanti di esistenza dell'Universo. Fu in quelle piccole frazioni di secondo, quando era concentrata un'enorme quantità di energia in un volume ridotto, durante la serie di eventi che chiamiamo "Big Bang", che presero forma i pezzetti che avrebbero costituito la materia, rendendo possibile la formazione dei primi elementi come l'idrogeno, ancora oggi l'elemento più

abbondante in tutto l'Universo.

A 13,8 miliardi di anni di distanza dal Big Bang, i gruppi di ricerca del CERN cercano con i loro esperimenti di riprodurre alcune di quelle straordinarie condizioni, derivando informazioni preziose per arricchire le nostre conoscenze nel campo della fisica delle particelle. Dalle loro scoperte non dipende solamente la nostra comprensione dell'Universo, ma anche la possibilità di sviluppare nuove tecnologie in numerosi ambiti, compreso quello sanitario. Questa è la storia di come fanno.



Un'adorabile illustrazione del complesso del CERN, per motivarvi prima di cominciare ([Max Degtyarev](#))

Particelle

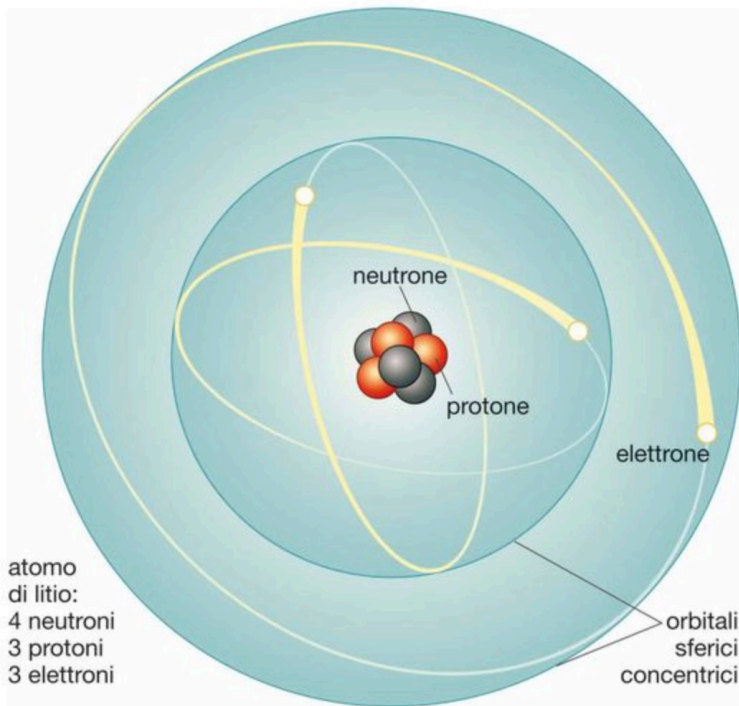
Per capire l'importanza degli scontri all'interno di LHC, occorre prima un rapido ripasso sulle cose che abbiamo scoperto finora sulla materia.

Se prendiamo un foglio di carta e lo strappiamo a metà, e poi ancora a metà, e poi ancora, ottenendo pezzi di foglio sempre più piccoli, arriveremo teoricamente a un punto in cui avremo

una serie di parti invisibili, le cose più piccole dell'Universo: le particelle fondamentali che costituiscono la materia. Le loro caratteristiche e capacità di interazione sono definite dal "Modello standard", la serie di teorie (alcune confermate nella pratica, altre in attesa di esserlo) sviluppate per spiegare in termini matematici il funzionamento di tutto quanto.

Nella propria struttura più intima, il foglio del nostro esempio (come qualsiasi altro oggetto e noi stessi) è costituito da molecole, l'unità più piccola di tutti i composti chimici. Le molecole a loro volta sono formate da atomi, l'unità più piccola di ogni elemento a noi noto, presente nella [tavola periodica degli elementi](#) che si studia a scuola.

Un atomo non è però l'unità più piccola della materia. Se ne accorsero diversi fisici più di un secolo fa, notando la presenza di un nucleo piuttosto denso circondato da una nube di elettroni. Per quanto ne sappiamo finora, l'elettrone è una particella elementare, cioè una particella subatomica indivisibile e non composta da particelle più semplici. Fu la prima particella a essere scoperta di tutto il Modello standard, che negli anni ha mappato la presenza di diversi altri suoi compagni di viaggio.



La struttura dell'atomo (Zanichelli)

Gli elettroni sono legati al nucleo atomico e [interagiscono](#) tra loro e con i protoni grazie allo scambio di particelle chiamate fotoni (quanti di luce), grazie all'interazione elettromagnetica, una delle quattro forze fondamentali identificate dal Modello standard.

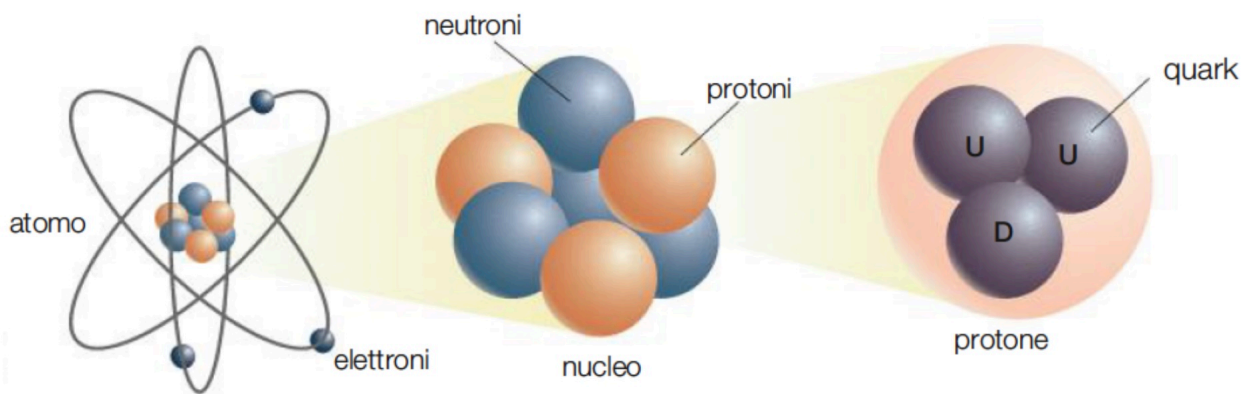
Il nucleo di un atomo contiene al proprio interno protoni e neutroni, che inizialmente si pensava fossero indivisibili. Alla fine degli anni Sessanta le cose cambiarono quando i fisici scoprirono che in realtà protoni e neutroni sono costituiti da quark, che sono invece ritenuti indivisibili (quindi particelle elementari).

I quark sono tipi strani perché non possono essere mai osservati da soli in natura a basse energie, ma esistono solamente come i costituenti di particelle composte che si chiamano adroni. I protoni e i neutroni sono le forme più stabili di adroni, da cui il nome di LHC, cioè in italiano "Grande anello di collisione degli adroni". Ciò che sappiamo sui quark deriva quindi dagli esperimenti che si conducono sugli adroni, anche grazie ai loro scontri altamente

energetici al CERN di Ginevra.

A seconda delle proprie caratteristiche energetiche e di movimento, i quark contenuti in un nucleo atomico possono essere di *tipo up* o di *tipo down*. Il protone contiene due quark di tipo up e uno di tipo down, mentre il neutrone contiene due quark di tipo down e uno di tipo up. Il nucleo atomico è tenuto insieme dall'interazione nucleare forte. Le particelle che si fanno carico di questa forza fondamentale si chiamano gluoni: il loro nome deriva da "glue" cioè colla in inglese, che rende bene l'idea della loro funzione di tenere "incollati" insieme i quark per formare gli adroni.

Se inizia a girarvi la testa, vi basta ricordare che allo stato attuale delle conoscenze gli elettroni e i quark di tipo up e down sono sufficienti per costruire un atomo e di conseguenza per descrivere le caratteristiche generali della materia.

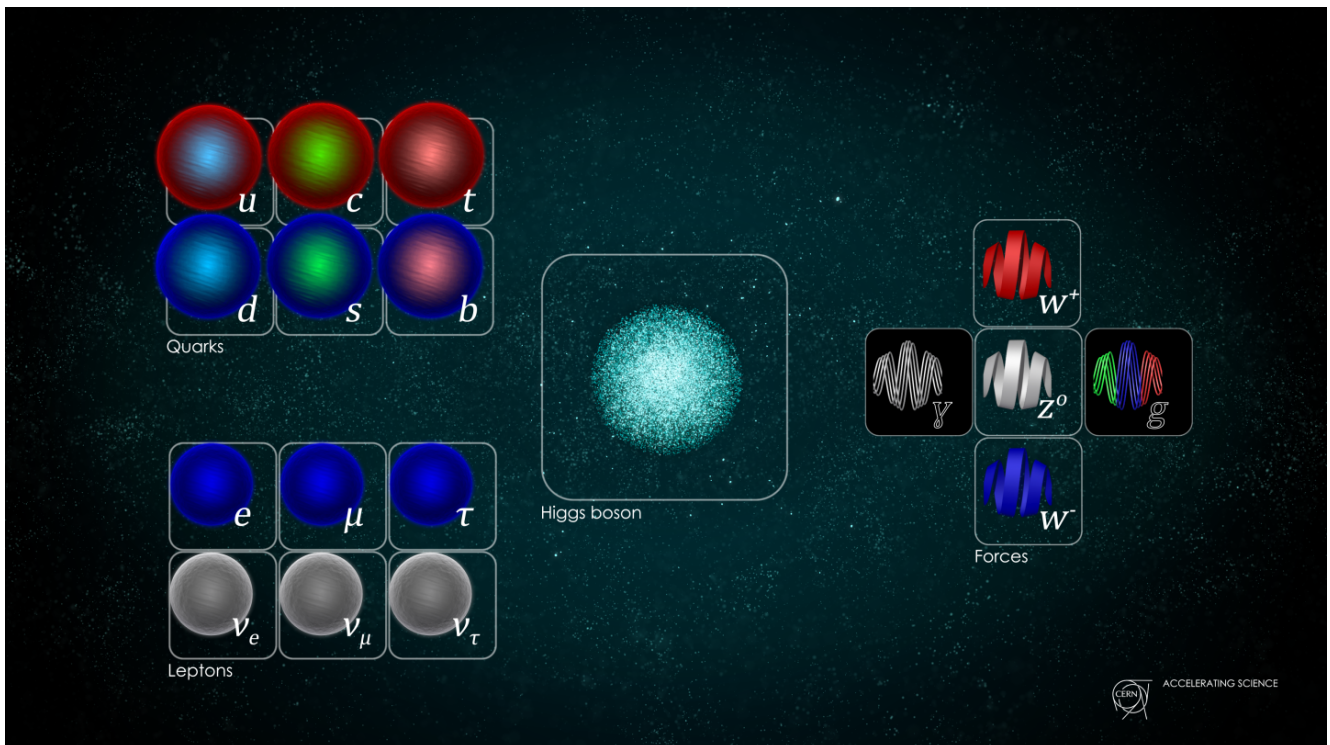


(Zanichelli)

Le cose in fisica, però, si complicano sempre, soprattutto se ci si mette a compiere esperimenti altamente energetici come avviene al CERN e in altri centri di ricerca in giro per il mondo. Negli anni, i gruppi di ricerca hanno scoperto che in realtà i tipi di quark sono sei. Oltre a top e down, ci sono strange/charm e bottom/top. E hanno poi scoperto che ci sono parenti stretti degli elettroni, ma con caratteristiche un po'...

diverse, che si chiamano muoni e tauoni.

In generale si è scoperto che esistono tre versioni diverse di ciascuna di queste particelle. Perché siano sempre tre non è ancora chiaro e rimane una delle domande più complicate cui dare risposta, per proseguire negli studi sui componenti più intimi della materia.



Rappresentazione grafica del modello standard, i leptoni ("leptons" nell'immagine) sono costituiti da due gruppi: quelli carichi come gli elettroni e quelli neutri come i neutrini (CERN)

Sappiamo comunque che queste particelle, definite "pesanti" perché con una massa superiore alle altre, esistono per pochissimi istanti come prodotti di impatti ad alta energia, perché decadono poi molto velocemente in particelle più leggere e a noi più familiari. Nel loro decadimento è coinvolto lo scambio di altre particelle che si chiamano W e Z e che a differenza dei fotoni hanno una loro massa. La forza di cui si occupano si chiama interazione debole, altra forza fondamentale indicata dal Modello standard (la quarta è l'interazione gravitazionale).

W e Z possono essere studiate solo nelle collisioni che avvengono grazie agli acceleratori di particelle. È grazie all'interazione debole che i protoni possono trasformarsi in neutroni e viceversa, il processo che fa parte della [fusione nucleare](#), grazie alla quale possiamo goderci una calda giornata di Sole e in ultima istanza esistere, perché è ciò che fa funzionare il Sole e le stelle.

Nel Modello standard sono poi comprese altre particelle piuttosto sfuggenti, come i neutrini (ce ne sono diversi tipi) che interagiscono con il resto della materia solamente attraverso l'interazione debole.

Antiparticelle

Tutte queste particelle hanno inoltre una versione alternativa – le antiparticelle – con carica opposta rispetto all'originale, ma per il resto identiche: il protone ha l'antiprotone, l'elettrone il positrone e così via. Costituiscono l'antimateria, ormai presente in quantità molto esigue nell'Universo e che può essere prodotta sperimentalmente per pochi istanti. Non è ancora chiaro che cosa abbia portato la materia a prevalere sull'antimateria, e anche a questo servono gli studi del CERN.

In tempi recenti è stata poi [confermata l'esistenza del bosone di Higgs](#), probabilmente l'esperimento per cui è diventato più famoso il CERN anche tra chi non si occupa quotidianamente di giocare a biliardo con le particelle. È coinvolto nei meccanismi che consentono ad alcune particelle elementari di avere una massa.

Ricapitolando

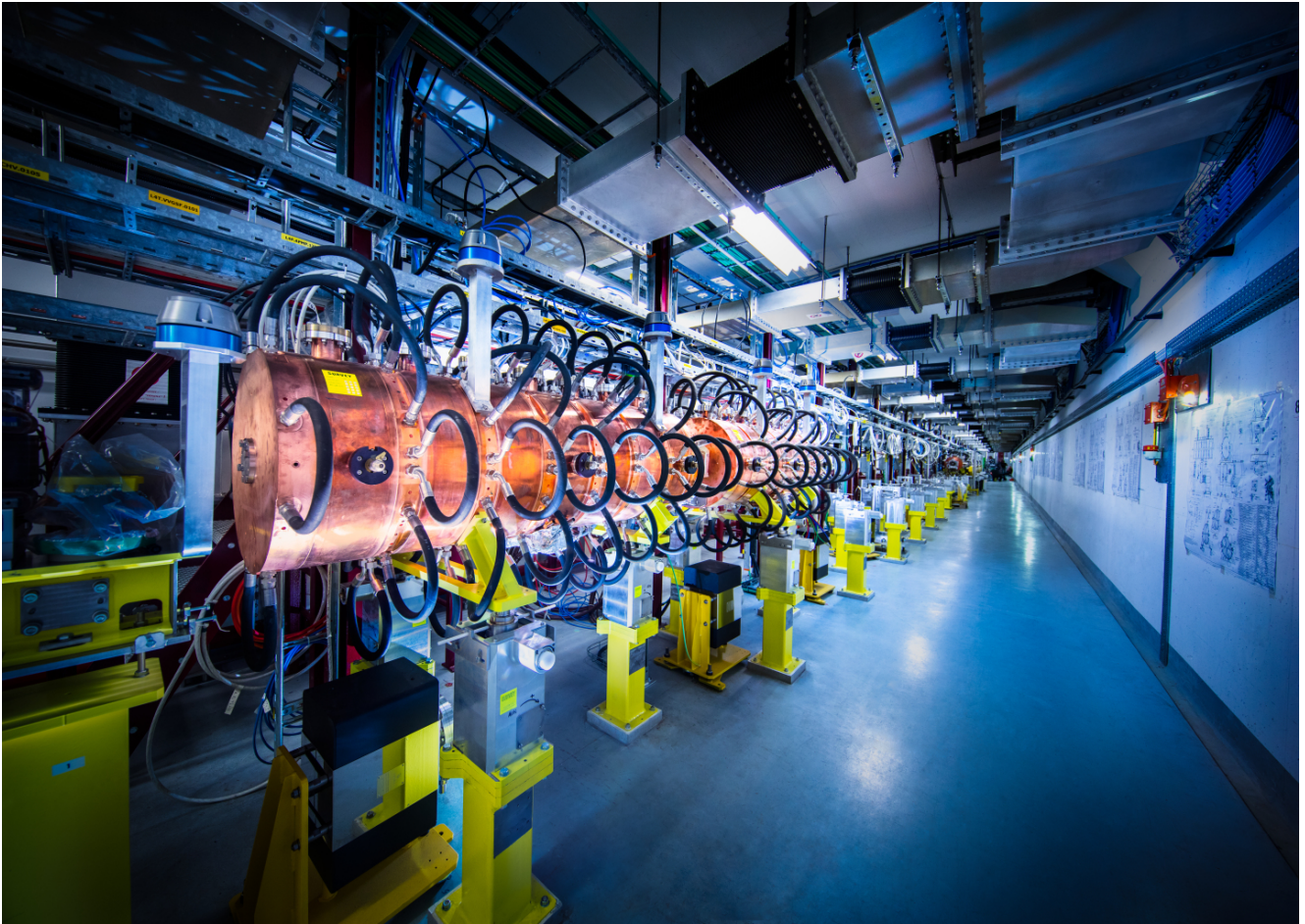
La materia è costituita da molecole che a loro volta sono formate da atomi, che a loro volta sono costituiti da particelle di vario tipo, elementari (indivisibili) o composte, cioè costituite da altre particelle. Le quattro

forze fondamentali stabiliscono cosa le particelle possono e non possono fare, e ricevono molte di queste informazioni dai bosoni, come se fossero gli arbitri in campo.

Molte di queste conoscenze sono derivate dalle teorie elaborate nei decenni dai fisici e confluite nel Modello standard, messe poi alla prova nella pratica nei centri di ricerca, e qui entra in gioco LHC.

Accelerare le particelle

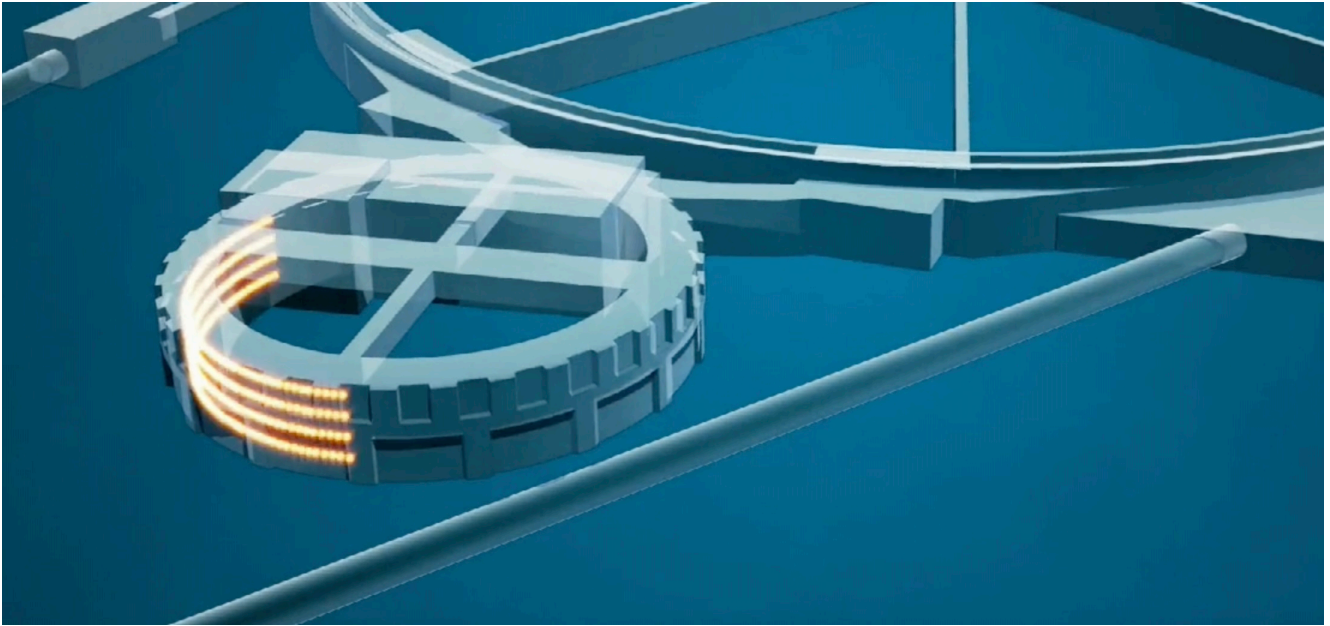
Le “cavie” solitamente utilizzate nel più grande acceleratore di particelle al mondo sono conservate nella piccola bombola carica di idrogeno. Gli atomi di idrogeno vengono trasferiti dalla bombola a un primo acceleratore di particelle lineare (Linac4), che potete immaginare come un tubo lungo quasi 90 metri: ogni atomo viene privato del proprio elettrone, lasciando solamente il nucleo costituito da un protone (si impiegano anche altre particelle a seconda degli esperimenti, ma seguiremo l'esempio dei protoni).



Linac4 (CERN)

Applicando una carica elettrica, il fascio di protoni viene fatto muovere sempre più velocemente all'interno del Linac4, in modo che all'uscita dall'acceleratore la sua velocità sia di circa 100mila chilometri al secondo, più o meno un terzo della velocità della luce. Il fascio viene quindi indirizzato verso un primo acceleratore circolare (PSB) formato da quattro anelli tubolari con un diametro di 50 metri: il fascio viene diviso in quattro parti, una per anello, in modo da rendere più efficiente l'accelerazione.

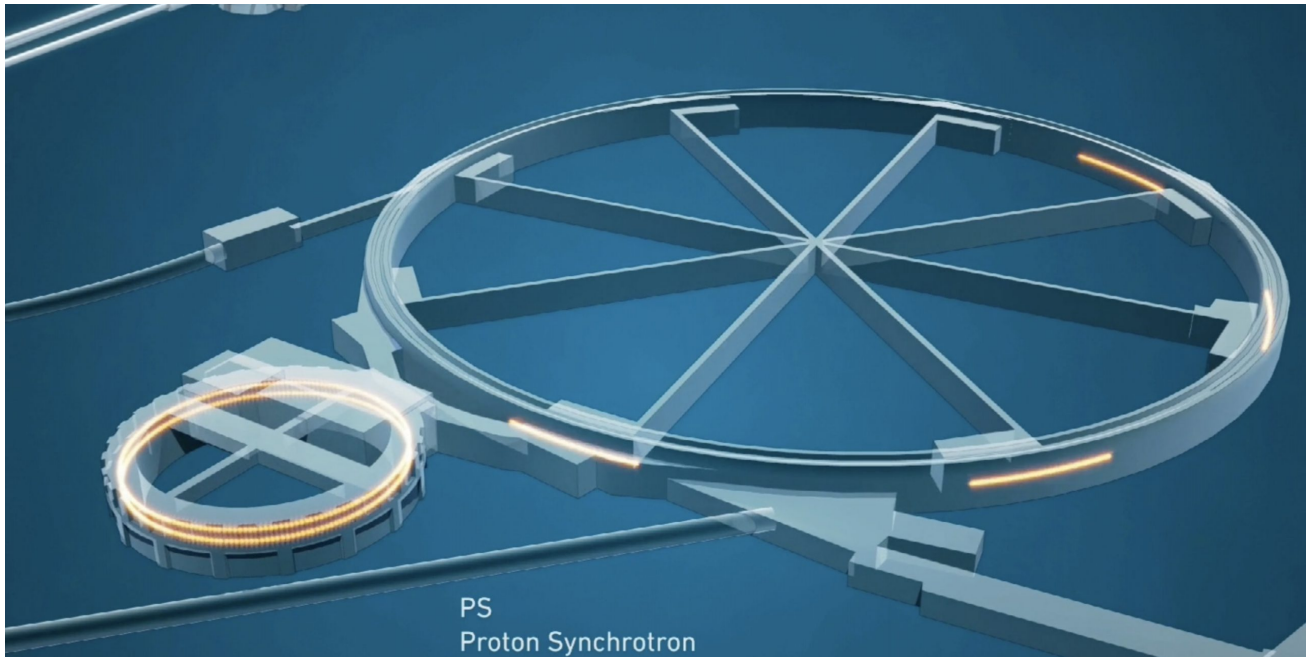
Sopra una certa misura, gli acceleratori circolari sono più pratici di quelli lineari perché consentono di risparmiare spazio, facendo girare intorno le particelle, come se fossero su una pista di atletica. L'accelerazione viene impressa applicando ciclicamente un impulso elettrico, un po' come si fa quando si spinge qualcuno su un'altalena per fargli via via raggiungere una maggiore velocità.



PSB (CERN)

Seguire un percorso in curva ad alta velocità non è però semplice, perché si rischia di sbandare. Per questo intorno al tubo ci sono potenti elettromagneti che spingono i protoni in modo da non farli finire fuori pista. Lo stesso principio è poi applicato, molto più in grande, nei successivi acceleratori.

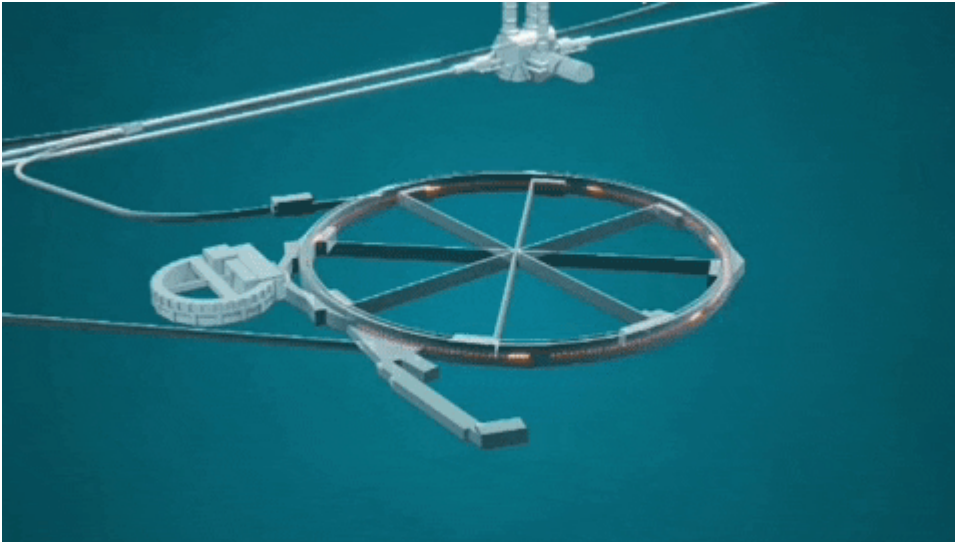
Gira, impulso, gira, impulso, gira... i quattro fasci di protoni raggiungono alla fine una velocità pari al 91,6 per cento della velocità della luce, compattandosi. Vengono poi ricondotti in un unico fascio che lascia il PSB e raggiunge il PS, il primo acceleratore di particelle circolare (sincrotrone) costruito al CERN negli anni Cinquanta. Ha un diametro di 140 metri circa e ha il compito di accelerare ogni fascio di protoni fino al 99,9 per cento della velocità della luce, in appena 1,2 secondi.



Nel PS inizia a succedere una cosa molto particolare e che può apparire controintuitiva. Superato un certo punto, l'energia aggiunta tramite gli impulsi non si può più trasformare in un aumento di velocità, perché i protoni sono ormai prossimi al limite della velocità della luce. Ed essendo energia (E), massa (m) e velocità della luce (c) strettamente legate, come dimostrò Albert Einstein con il suo $E=mc^2$, l'[energia](#) che si aggiunge si manifesta attraverso un aumento della massa dei protoni.

Detta un poco brutalmente: i protoni non possono andare più veloci di così e di conseguenza diventano più pesanti.

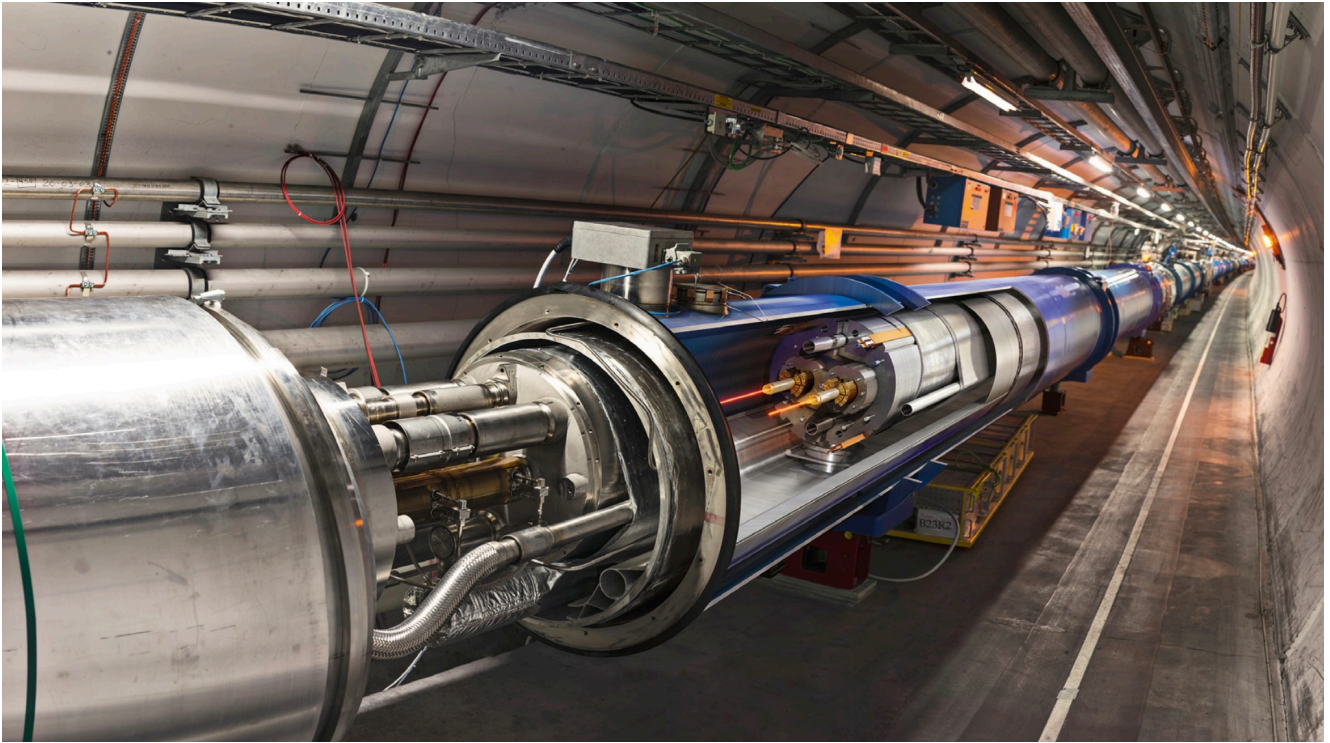
La loro energia cinetica (cioè l'energia che possiedono a causa del loro movimento) viene misurata in elettronvolt e in questa fase è pari a 25 gigaelettronvolt (GeV). Superato il PS, i fasci di protoni raggiungono un altro acceleratore ancora più grande (SPS) con una circonferenza di 6,9 chilometri, che porta i protoni a 450 GeV. A questo punto i fasci di protoni sono pronti per la loro ultima corsa e per il punto cruciale del nostro viaggio nella materia: il Large Hadron Collider (LHC).



Large Hadron Collider

LHC ha una circonferenza di 27 chilometri e la sua struttura è formata da due tubi, che potete immaginare come due strutture circolari che si incrociano in quattro punti. In uno i fasci di protoni circolano in senso orario e nell'altro in senso antiorario. Due dispositivi (*kicker*) si occupano di sincronizzare i fasci di protoni con quelli già presenti nell'acceleratore, in modo che non si creino accidentalmente tamponamenti tra i vari trenini di protoni, che arrivano a compiere 11mila giri al secondo.

I punti in cui i due tubi di LHC si incrociano corrispondono a dove si trovano i rivelatori di particelle dei vari esperimenti che vengono condotti al CERN (tecnicamente, i fenomeni si individuano *rivelandoli*, quando se ne misura la quantità o se ne fa una descrizione si *rilevano*). I fasci di protoni hanno ormai raggiunto un'energia di 6,5 teraelettronvolt e può sembrare tantissimo, [visto che il prefisso tera- indica mille miliardi](#). In realtà tutto è relativo: l'energia equivale più o meno a quella che impiegano sei mosche per volare, ma visto che parliamo di particelle minuscole e con poca massa, per loro è una quantità di energia enorme.



Una sezione di LHC, al centro sono visibili i due tubi in cui circolano i fasci di protoni, rappresentati nell'immagine come due linee luminose (CERN)

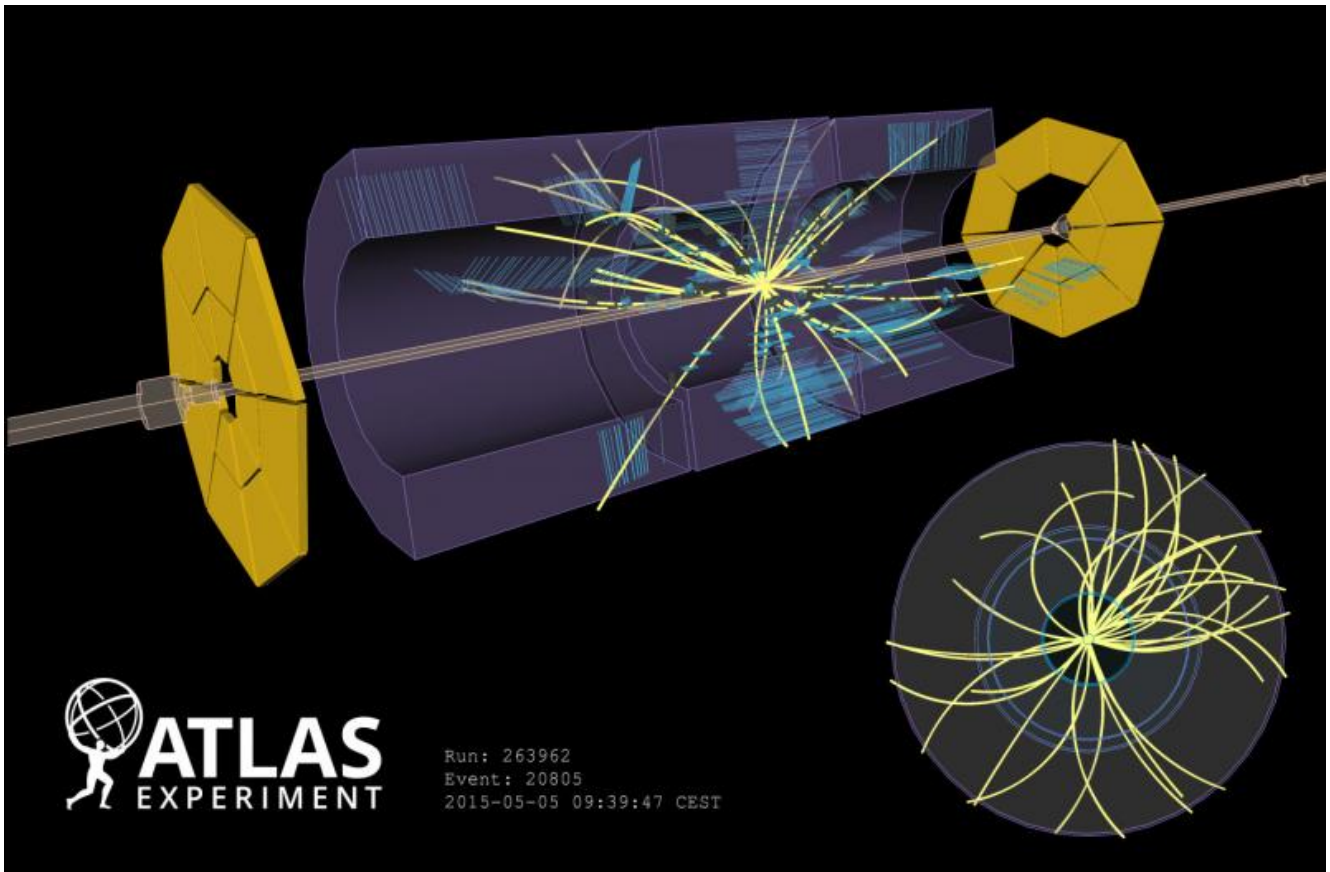
Oltre a esserci il vuoto pressoché totale nei tubi, per tenere nel circuito i fasci di protoni vengono utilizzati oltre 1.200 magneti superconduttori, che vengono mantenuti a una temperatura di $-271\text{ }^{\circ}\text{C}$. In un certo senso LHC è quindi il più grande frigorifero al mondo.

Collisione

Poco prima dello scontro tra due fasci che girano in senso opposto l'uno rispetto all'altro, viene impiegato un particolare tipo di magnete per *spremere* i protoni e farli rimanere allineati e vicini, in modo da rendere più probabile la possibilità di farli scontrare. Riuscirci non è per nulla semplice.

Immaginate per un momento di avere una fionda in mano e di sparare uno spillo in direzione di un vostro amico, che a dieci chilometri di distanza ha fatto la stessa cosa sparandone uno verso di voi. Lo scopo del gioco è di lanciare

gli spilli con una precisione tale da fare in modo che si scontrino l'uno con l'altro esattamente a metà del percorso. Qualcosa di simile deve avvenire dentro LHC per ottenere una collisione, tra particelle che viaggiano quasi alla velocità della luce. E tutto deve avvenire dove i tubi dell'acceleratore si incrociano, in corrispondenza dei rivelatori dei quattro principali esperimenti e collaborazioni condotti al CERN: [ALICE](#), [ATLAS](#), [CMS](#) e [LHCb](#).



Rappresentazione al computer di una collisione (CERN)

L'energia totale dei due fasci di protoni al momento dello scontro è di circa 13 TeV, un impatto ad altissima energia paragonabile a quelli che avvennero nei primissimi istanti dell'Universo, per come lo conosciamo ora. Le condizioni riprodotte sono quindi ideali per scoprire che cosa ci fosse all'epoca e quali furono i processi che portarono alla materia con cui abbiamo a che fare tutti i giorni. Le particelle che si ottengono facendo scontrare altre particelle durano però pochissimo, perché come abbiamo visto decadono molto in

fretta, quindi i rivelatori devono essere sensibili e collegati a computer potenti per raccogliere in poche frazioni di secondo il maggior numero possibile di dati.

Rivelatori

I rivelatori di particelle usati al CERN sono enormi e formati da vari rivelatori più piccoli, che si occupano di particolari tipi di particelle o di proprietà della materia. Alcuni sistemi rivelano il percorso seguito dalle particelle, altri misurano la loro energia e altri ancora impiegano varie tecniche per identificare il tipo di particelle. Mettendo insieme tutte queste informazioni, i gruppi di ricerca possono creare una sorta di istantanea degli effetti dello scontro, un po' come fanno gli artificieri quando partendo da ciò che è rimasto dopo un'esplosione ricostruiscono le dinamiche dell'onda d'urto e le caratteristiche di ciò che l'ha causata.



Parte del rivelatore di CMS (CERN)

Il lavoro di analisi è lungo e complesso e pieno di spiacevoli

sorprese, come errori di lettura di alcuni strumenti o la presenza di collisioni che non sono andate per il verso giusto. I dati devono essere rifiniti, confrontati e poi sottoposti a revisioni e a calcoli dei margini di errore. Se una anomalia viene rilevata in più esperimenti fatti partendo dalle stesse condizioni, si effettuano ulteriori verifiche e si può infine arrivare ad annunci molto attesi, come quello del 2013 sul bosone di Higgs. La ricerca può inoltre portare alla scoperta di particelle insolite, o ancora a risultati che contraddicono parti delle teorie della fisica formulate finora e comprese nel Modello standard.

Costi e opportunità

Mantenere una struttura così grande e complessa richiede molte energie, in tutti i sensi, e finanziamenti di miliardi di euro resi possibili dal coinvolgimento dei [12 paesi fondatori del CERN](#), che comprendono l'Italia, e di decine di altri paesi che collaborano ai progetti. Oltre ai costi per effettuare gli esperimenti, ci sono quelli per fare manutenzione e aggiornare i sistemi, in modo da renderli più potenti e accurati nelle rivelazioni. Il CERN ha inoltre [in programma](#) di costruire un acceleratore ancora più grande, con una circonferenza di 100 chilometri.

Oltre a estendere le nostre conoscenze sui più grandi misteri dell'esistenza, i cospicui investimenti nel settore degli acceleratori hanno comunque importanti ricadute nella nostra vita di tutti i giorni. Le tecnologie sviluppate per farli funzionare sono impiegate, su scale più piccole, per esempio per produrre fasci di particelle per attaccare in maniera mirata alcuni tipi di tumori, oppure per ottenere immagini ad alta risoluzione degli organi e di altre strutture del nostro organismo.

Gli acceleratori di particelle sono presenti in alcuni tipi di scanner per vedere all'interno dei bagagli ai controlli di sicurezza degli aeroporti, così come in alcuni macchinari

industriali per la produzione di semiconduttori, componenti fondamentali per i dispositivi elettronici. Altri impieghi riguardano il trattamento delle acque reflue, il controllo dei livelli di inquinamento dell'aria e in futuro applicazioni in campo energetico, per esempio legate alla fusione nucleare. E possiamo dire che questo articolo non esisterebbe se non fosse per il CERN, dove fu ideato il World Wide Web proprio per facilitare le comunicazioni e lo scambio di dati tra i ricercatori dei vari laboratori.

Anni e istanti

LHC è rimasto spento per circa tre anni, nei quali sono state effettuate varie modifiche per produrre una quantità maggiore di collisioni e per effettuare analisi più accurate degli scontri tra particelle. L'[aggiornamento](#) dovrebbe rendere possibile una quantità di collisioni superiore a quelle prodotte nelle precedenti due fasi sperimentali di LHC degli scorsi anni, interrotte per altri lavori di manutenzione. L'acceleratore potrà inoltre essere impiegato per due nuovi esperimenti – [FASER](#) e [SND@LHC](#) – per esplorare nuovi aspetti della fisica oltre il Modello standard.

La nuova fase di esperimenti dovrebbe fornire qualche risposta su alcune anomalie riscontrate nei dati delle precedenti sperimentazioni, che potrebbero indicare la presenza di un altro tipo di bosone, che potrebbe far rivedere le nostre conoscenze sulle forze fondamentali del Modello standard. Le ricerche saranno inoltre dedicate allo studio della materia oscura, una parte ipotetica della materia che non emette radiazione elettromagnetica e la cui esistenza aiuterebbe a spiegare le caratteristiche della massa dell'Universo in relazione alle leggi della gravitazione.

A fine aprile sono iniziati i primi test per LHC con alcuni fasci di protoni e i lavori di messa a punto proseguiranno nel corso dell'estate, prima di avviare la fase di ricerca vera e propria che durerà fino alla fine del 2025. I gruppi di

ricerca potranno raccogliere una grande quantità di dati che li terrà impegnati anni per studiare ciò che accade in una minuscola frazione di secondo, nel laboratorio più grande del mondo.

[Read More](#)