

Anello dopo anello

L'evoluzione degli acceleratori al CERN

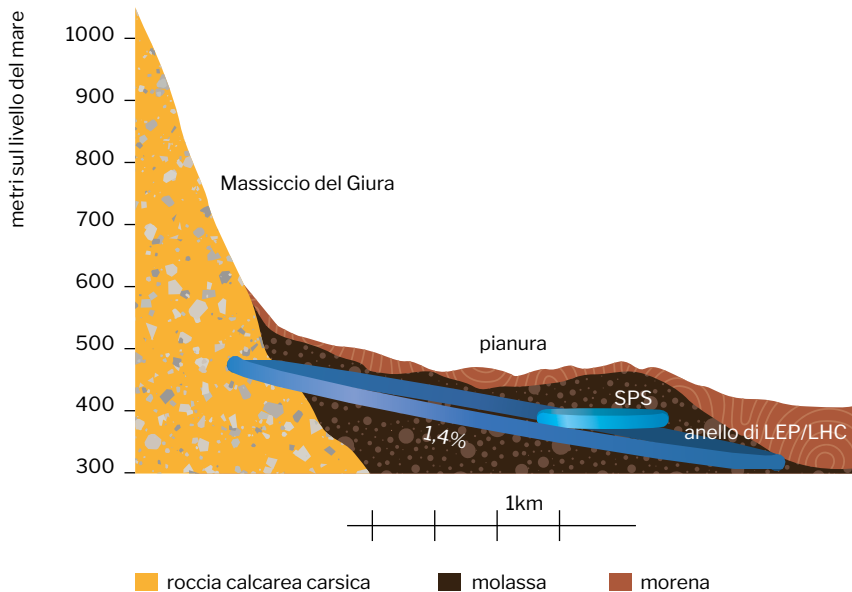
di Roberto Tenchini



a.
Il tunnel di LEP/LHC nel
sottosuolo tra Ginevra
e il Giura. Le linee dei
fasci passano all'interno
del tubo blu.

Dagli anni '80, la regione che si trova a nord di Ginevra, tra l'altopiano svizzero e la catena del Giura francese, ha avuto uno straordinario sviluppo urbanistico, tecnologico e di servizi. Il viaggiatore che dopo quasi mezzo secolo si trovasse a passare per il Pays de Gex, così si chiama la zona, non potrebbe evitare di notare gli effetti di questo sviluppo, sempre in un contesto paesaggistico pedemontano, di cui sono state preservate le caratteristiche ambientali. Lo stesso viaggiatore però non noterebbe che la stessa regione ospita la maggiore costruzione di ingegneria civile europea degli anni '80, costruita nel sottosuolo dal 1983 al 1988: il tunnel circolare di 26,7 km del CERN (vd. fig. a.), che ha ospitato per 12 anni l'acceleratore di particelle LEP (Large Electron Positron

collider) e che ora ospita LHC (Large Hadron Collider). La costruzione del complesso sotterraneo ha implicato lo scavo di 1,4 milioni di metri cubi di roccia, di cui meno della metà hanno riguardato il tunnel stesso e il resto quattro caverne sperimentali, pozzi di accesso, alcove per apparati tecnici e 3 km di tunnel secondari che collegavano il LEP, e attualmente LHC, agli altri acceleratori del CERN, necessari per la iniezione dei fasci di particelle. Il posizionamento del tunnel, a una profondità massima di 150 m, è stato fatto con particolare cura per rendere minima la porzione di scavo nella roccia carsica e porosa del Giura, mantenendosi per quanto possibile nelle marne e arenarie che formano la cosiddetta "molassa", di più facile scavo. Per questo motivo il tunnel del LEP e poi



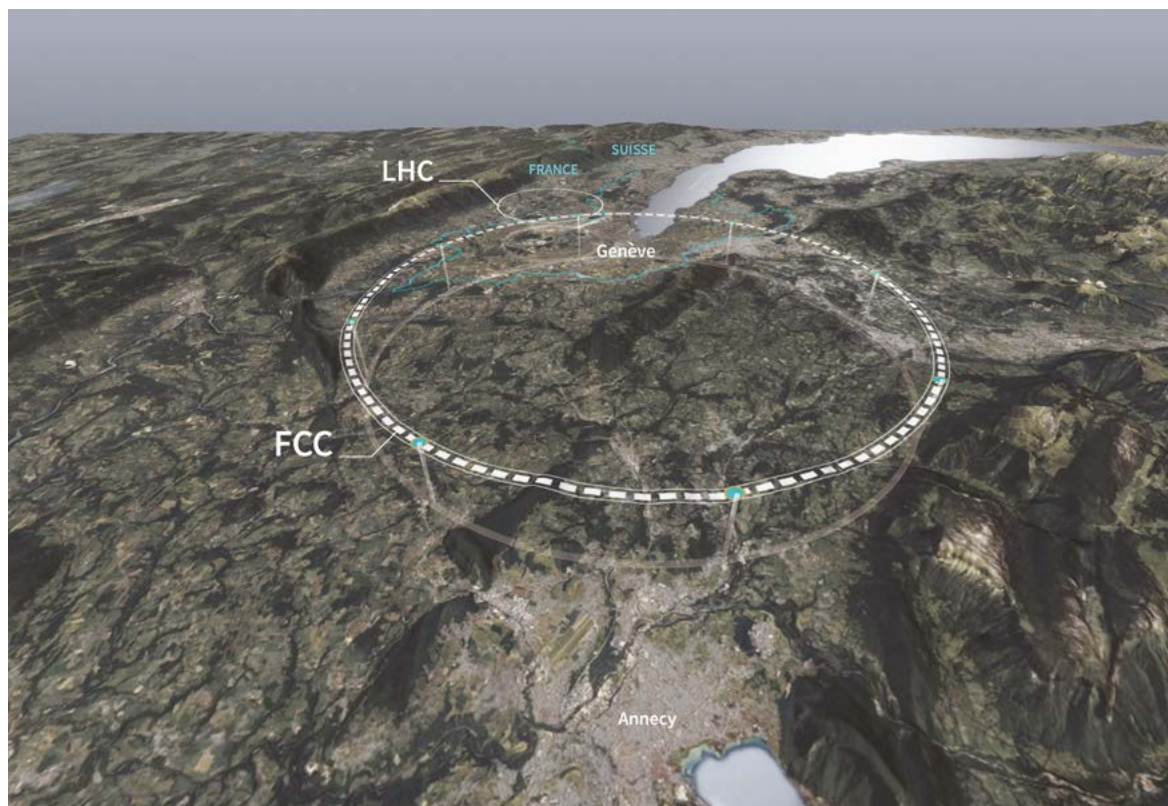
b.

La posizione del tunnel di LEP/LHC rispetto alla stratigrafia rocciosa nei pressi della catena del Giura. È indicata la roccia calcarea carsica (*limestone*), la molassa e la morena. È anche indicata la posizione dell'acceleratore SPS, precedente a LEP e che attualmente fa parte della catena di pre-accelerazione che fornisce i fasci di protoni a LHC.

LHC presenta un'inclinazione di circa 1,4% (vd. fig. b), che massimizza la presenza della molassa, a scapito della roccia carsica. Nonostante questo, lo scavo dei 3,5 km che si trovano nella roccia del Giura è stato difficoltoso, per la formazione di una fonte carsica sotterranea di acqua ancora esistente ai tempi dell'installazione degli esperimenti del LEP, e con frequenti inondazioni, la cui portata è stata via via ridotta. Al di là di queste difficoltà, il tunnel è stato completato nel 1988 con una precisione di circa 1 cm rispetto al progetto iniziale, a cui è seguito l'allineamento dei componenti dell'acceleratore di particelle a meno di 0,1 mm sulla scala di molti chilometri! La precisione in ingegneria civile è stata un pre-requisito e un buon auspicio per i successivi record di precisione delle misure del LEP e di LHC. La misura della massa del bosone Z è stata misurata dagli esperimenti del LEP con una precisione di 2 parti su 10^5 e per far questo si è anche dovuto tener conto dell'effetto delle maree lunari sulla circonferenza del tunnel. In seguito, gli esperimenti a LHC hanno misurato la massa del bosone W e del bosone di Higgs con una precisione di 10^{-4} e 10^{-3} , rispettivamente. I risultati sperimentali del LEP sono stati fondamentali per determinare il successo del modello standard delle particelle elementari, per il quale storicamente esiste un "prima" e un "dopo LEP". In particolare, l'uso della meccanica quantistica (tecnicamente delle correzioni radiative) per esplorare nuove particelle, al di là della possibilità di produzione diretta all'acceleratore, ha rappresentato un successo del LEP e del modello standard. L'esistenza di un quark top pesante, di massa attorno ai 175 GeV era indicata dai dati del LEP prima della scoperta diretta al Tevatron (al Fermilab) nel 1995. In maniera analoga è stato possibile indicare la presenza del bosone di Higgs nella zona di massa dove poi è stato effettivamente scoperto a LHC nel 2012. Questo modo di usare la meccanica quantistica per esplorare nuovi territori è parte integrante dei progetti delle nuove macchine di frontiera (in particolare del Future Circular Collider – FCC).

Il tunnel sotterraneo nel Pays de Gex, dopo aver visto circolare e collidere elettroni e positroni, ha iniziato a ospitare collisioni di protoni, con LHC, dal 2009. A differenza degli elettroni, i protoni sono particelle composite, formati da due quark up e un quark down. Le loro collisioni formano eventi più complessi, ma permettono di arrivare a energie più alte, grazie alla molto minore radiazione di sincrotrone. I fasci di LHC raggiungono un'energia 35 volte superiore all'energia massima raggiunta dal LEP e una luminosità due ordini di grandezza superiore. Dopo tre anni di funzionamento del collisore, gli esperimenti ATLAS e CMS a LHC hanno accumulato abbastanza dati da permettere l'osservazione del bosone di Higgs, ovvero il quanto corrispondente al campo di Higgs attraverso il quale le particelle elementari acquistano massa. Nel corso di 16 anni i due esperimenti hanno conseguito innumerevoli altri risultati di alto profilo, tra i più recenti ricordiamo l'osservazione dell'*entanglement* quantistico in coppie di quark top. Nell'estate del 2026 LHC e i suoi esperimenti hanno iniziato un lungo periodo di manutenzione dedicato a un notevole potenziamento dell'acceleratore che entrerà, all'alba della prossima decade, nella fase di altissima luminosità (High-Luminosity LHC, ovvero HL-Lumi LHC o anche HL-LHC) con una produzione di collisioni di protoni almeno 5 volte superiore a quella attuale.

Questo sarà possibile grazie al potere focalizzante di nuovi quadrupoli superconduttori con un campo magnetico di ben 11 T, a nuovi deflettori chiamati *crab cavities* (utilizzati per la prima volta al collisore Dafne ai Laboratori Nazionali INFN di Frascati) e ad altri componenti innovativi. L'altissima luminosità di Hi-Lumi LHC, prevista dal 2030 al 2042, richiede considerevoli miglioramenti degli apparati sperimentali, che necessitano di aumentata granularità per trattare fino a 200 eventi contemporanei, maggiore resistenza alle radiazioni e nuove soluzioni per la selezione in tempo reale degli eventi interessanti.



c.
La posizione prevista per il tunnel di FCC, è indicato anche l'anello di LHC.

E il dopo LHC? Si è recentemente concluso un processo di circa due anni che ha coinvolto la comunità dei fisici delle alte energie e ha portato all'aggiornamento della European Strategy for Particle Physics (ESPP). La ESPP raccomanda la costruzione di un tunnel di 90,6 km adiacente a LHC, che ospiterebbe, nella prima fase, un collisore elettrone-positrone (FCC-ee) seguito da un collisore di protoni (FCC-hh), con un passaggio di testimone simile a quello avvenuto tra il LEP e LHC. La differenza sostanziale riguarda, per FCC-ee, l'altissima luminosità che sorpasserebbe il LEP fino a cinque ordini di grandezza, la possibilità di produrre bosoni di Higgs e, nella fase finale, coppie di quark top. FCC-hh permetterebbe di raggiungere energie dei fasci sette volte superiori a quelle di LHC, fornendo un'energia nel centro di massa attorno ai 100 TeV. Il tunnel di FCC (vd. fig c) è previsto estendersi nella regione di Ginevra, passando sotto il lago, arrivando a lambire le Alpi a una profondità media di 240 m, giungendo fino a 560 m sotto il livello del suolo. La progettazione del tunnel ha fatto tesoro dell'esperienza costruttiva del tunnel di LEP/LHC,

evitando la problematica roccia carsica, che interesserebbe solo il 2,5% del tunnel posizionato essenzialmente nella molassa. La roccia estratta rappresenta un fattore quattro rispetto a quella estratta per LEP/LHC; sono in corso vari studi per il suo riutilizzo, sia per nuove costruzioni che per l'agricoltura.

Con FCC-ee si utilizzerà la grande mole di dati relativa ai bosoni W, Z, Higgs e al quark top per effettuare misure di precisione che permettano l'utilizzo della meccanica quantistica per esplorare la fisica al di là del modello standard ad alte scale di energia. Nella fase successiva (FCC-hh) il programma di misure continuerà e sarà accompagnato da un notevole incremento della potenzialità di produzione diretta di nuove particelle. Grazie a FCC il viaggiatore che tra vent'anni si troverà a passare nella regione a nord del Monte Bianco avrà "sotto" i suoi piedi una straordinaria opera scientifica, che manterrà la *leadership* europea nella fisica delle alte energie nella seconda metà del secolo.

Biografia

Roberto Tenchini è dirigente di ricerca della sezione di Pisa dell'INFN. È stato presidente della Commissione Scientifica Nazionale per la fisica delle particelle tra il 2019 e il 2025, *spokesperson* dell'esperimento ALEPH al LEP e responsabile dei gruppi di ricerca sulla fisica elettrodebole e del quark top dell'esperimento CMS a LHC.