

Sottosopra

La fisica studiata in profondità

di Fernando Ferroni



a.
Il gruppo che scoprì l'antiprotone al Lawrence Radiation Laboratory dell'Università della California, a Berkeley, in una foto di ottobre 1955. Da sinistra: Emilio Segrè, Clyde Wiegand, Edward Lofgren, Owen Chamberlain e Tom Ypsilantis. La scoperta fu realizzata grazie al Bevatron, l'acceleratore diretto da Lofgren. Nel 1959 Segrè e Chamberlain ricevettero il premio Nobel per la fisica per questo risultato.

L'evoluzione della fisica delle interazioni fondamentali ha visto succedersi tre fasi. Dopo l'era dei raggi cosmici si è affiancata, e poi affermata con strepitoso successo, quella delle macchine acceleratrici. Ora in campo c'è la fisica delle astroparticelle, con il suo tentativo di sintesi tra fisica nucleare e delle particelle, astrofisica e cosmologia.

Laddove la tecnologia unifica questi diversi modi di scrutare il mondo dell'infinitamente piccolo e spesso ci permette di connettere questi fenomeni alle scale immense dell'universo, uno dei tratti caratteristici di questa esplorazione è la necessità di luoghi silenziosi che proteggano esperimenti e misure dal rumore che a suo tempo fu fonte di importanti scoperte: i raggi cosmici. Questi, sotto forma di particelle cariche, in maggioranza muoni, bombardano la terra continuamente e interagiscono con i nostri rivelatori impedendo misure di fenomeni che avvengono molto raramente.

Per ricordare gli ordini di grandezza, circa un centinaio di muoni al secondo al metro quadro piovono sulla superficie terrestre a livello del mare. In un esperimento grande come SuperKamiokande (50.000 tonnellate di acqua ultrapura) solo circa 10 neutrini solari al giorno vengono rivelati. E ne arrivano ben 65 miliardi al secondo su ogni centimetro quadro.

I raggi cosmici sono stati per lungo tempo l'unico strumento di indagine per quel mondo misterioso

che andasse al di là del protone, del neutrone e dell'elettrone: il positrone (la prima particella di antimateria), il muone (come disse Isaac Rabi dopo la sua scoperta, "la particella che nessuno aveva comandato!"), il pione, i mesoni K, con la stranezza a loro associata e il mistero del loro decadimento, che avrebbe condotto alla scoperta della violazione di parità. L'epoca trionfale delle scoperte fatte nell'atmosfera terrestre e sui laboratori ad alta quota termina con la scoperta dell'antiprotone a Berkeley (1955) nel nuovo potente acceleratore lì costruito (vd. fig a). Il testimone passa alle macchine acceleratrici. E questa è una storia impetuosa fatta di continue scoperte (nuovi leptoni, i quark e le loro tre generazioni, la violazione di CP, la nascita del modello standard), ultima delle quali il tassello mancante, il creatore delle masse delle particelle, il bosone di Higgs.

Siamo passati dal cielo alla terra. Però ci sono questioni irrisolte, domande che non hanno ancora avuto risposta o che la avranno e la hanno avuta solo andando "sotto": la natura del neutrino (Majorana o Dirac), la massa del neutrino (non prevista nel quasi onnipotente modello standard), il funzionamento del Sole (la comprensione delle reazioni nucleari al suo interno), la formazione delle stelle (i processi che Gamow ha previsto, ma che prevedono il superamento della barriera coulombiana mediante il "tunneling" quantistico), il meccanismo di esplosione delle supernovae, la



b.

L'esperimento sui neutrini solari del Brookhaven National Laboratory, allestito a circa 1.500 metri di profondità nella Homestake Gold Mine. Il serbatoio, lungo 15 metri e con un diametro di 6 metri, conteneva 380.000 litri di percloroetilene, utilizzato per rivelare i neutrini provenienti dal Sole attraverso la produzione di argon-37.

ricerca delle sorgenti capaci di produrre particelle di enorme energia e che possano arrivare sulla terra non deviate lungo il loro viaggio e la ricerca di quel 27% di materia diversa da quella di cui siamo fatti noi e che è oscura in tutti i sensi (non fa luce e non sappiamo cosa sia). Per la sua ricerca, una componente essenziale, anche se non unica, è tutta la tecnologia sviluppata per la fisica agli acceleratori e impiegata nello spazio e nei laboratori sotterranei. Poi c'è il nuovo capitolo dell'astronomia multimessaggera, dove gli strumenti di fisica delle particelle "sopra" uniscono il loro sforzo a quello degli interferometri che riveleranno le onde gravitazionali "sotto". Insomma, un bel po' da fare. Vediamo di ricapitolare la nascita del mondo di "sotto", la via verso i laboratori "underground". Era evidente che per misurare alcuni processi non c'era altra via che andare a nascondersi nelle profondità della terra. La particella che inevitabilmente viene associata alla necessità di protezione dal mondo malvagio dove piovono muoni, è il neutrino. In particolare, quello prodotto nelle reazioni nucleari che fanno del Sole la nostra fonte di vita.

La teoria di come potesse funzionare il Sole era

stata formulata da John Bahcall nel 1964 e di come potessero essere osservati i neutrini prodotti nelle reazioni di fusione da Ray Davis nello stesso anno. L'esperimento fu condotto nella Homestake Gold Mine in South Dakota (proprio dove domani ci sarà l'esperimento DUNE che intercetterà i neutrini prodotti dal Fermilab!) e iniziò nel 1967. Il risultato fu del tutto inaspettato. Solo 1/3 dei neutrini che si aspettava fu misurato. Il famoso "*solar neutrino puzzle*". Uno dei motivi per proseguire le ricerche in altri laboratori al tempo inesistenti. L'Unione Sovietica colse il punto e iniziò la costruzione del Laboratorio ora noto come Baksan.

Un altro tema che era all'attenzione della fisica era quello del possibile decadimento del protone. Una volta sviluppato il modello standard delle interazioni elettrodeboli (unificazione dell'elettromagnetismo con la forza debole) si cercò di inserire anche le interazioni forti in uno schema plausibile. Questi tentativi iniziati negli anni '60 si basavano sempre su gruppi algebrici che potessero inglobare tutte le interazioni del modello standard.

Una cosa però è certa: che in questi modelli il protone prima o poi decade. Il neutrone decade in circa un quarto d'ora, ma qui il caso è diverso,



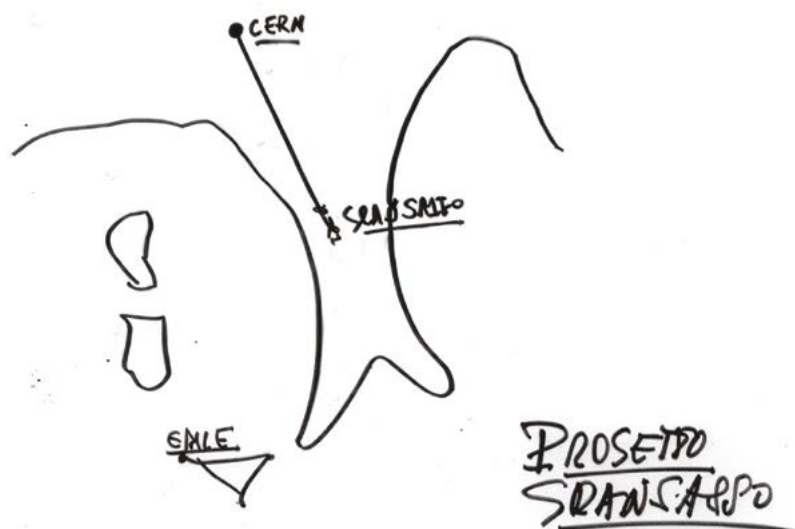
c.

Il rivelatore dell'esperimento NUSEX (NUcleon Stability EXperiment), installato in un'area tecnica del traforo del Monte Bianco, sotto circa 5.000 metri di roccia. Entrato in funzione nel maggio 1982, il rivelatore del peso di 150 tonnellate era progettato per cercare il decadimento del protone e studiare muoni cosmici e neutrini.

perché lì tutto si conserva e l'unica barriera alla velocità di decadimento è la piccola differenza di massa tra protone e neutrone o simili. Il protone non ha un barione più leggero in cui decadere. Per farlo deve violare il numero barionico. E questo è un ostacolo serio. Si pensava a tempi di decadimento nell'ordine di 10^{30} anni. Spaventoso? No, è vero che il tempo di vita dell'universo è "solo" di circa 13,8 miliardi di anni, ma è altrettanto vero che nell'universo osservabile ci sono 10^{80} protoni (la materia visibile) e quindi anche con un tempo di vita così lungo qualche traccia la dovremmo pur trovare. E in Europa negli anni '80 era partita la ricerca di questo decadimento. Il luogo protetto prescelto fu il tunnel del Monte Bianco e l'esperimento dell'INFN NUSEX provò a cercare i prodotti attesi da quel decadimento (vd. fig. c). NUSEX finisce (e per fortuna, perché qualche anno dopo il terribile incidente nel tunnel avrebbe potuto avere conseguenze drammatiche per chi ci lavorava) con un limite nell'ordine di 10^{31} anni. E di nuovo questo è una delle motivazioni per nuovi e più ambiziosi esperimenti.

Qui e là, seguendo una ricerca particolare, ma niente che assomigliasse a un laboratorio che potesse ospitare centinaia di scienziati e tecnici e permettere ricerche a largo spettro, eccoci dunque approdare all'intuizione geniale di Antonino Zichichi (vd. anche p. 34, ndr). Attraversare gli Appennini è stata sempre un'avventura per mancanza di autostrade e ferrovie veloci. Nel momento che si realizza una autostrada che connette Roma con L'Aquila e Pescara e prevede un lungo tunnel sotto il massiccio del Gran Sasso, l'allora Presidente dell'INFN ottiene dal Governo lo scavo di quelli poi conosciuti come Laboratori Nazionali del Gran Sasso (LNGS). Con una intuizione aggiuntiva, che le caverne che ospiteranno gli esperimenti siano orientate in direzione del CERN a Ginevra. E il giorno venne che un fascio di neutrini prodotto al CERN fu inviato verso i laboratori, permettendo l'osservazione diretta della trasformazione dei neutrini muonici in quelli figli del leptone tau. In questi laboratori si ottiene il silenzio cosmico, il flusso di muoni così intenso alla superficie della terra è ridotto in maniera

COMMISSIONE LAVORI PUBBLICI DEL SENATO



d.

Appunti manoscritti dell'intervento di Antonino Zichichi alla Commissione Lavori Pubblici del Senato, convocata nel 1979 per discutere la proposta di realizzazione del Progetto Gran Sasso.

sostanziale, di un fattore un milione, grazie alla presenza di 1400 m di roccia. In un metro quadro, non più 100 al secondo, ma circa 1 ogni qualche ora. Il laboratorio diviene un centro di ricerca con decine di esperimenti condotti da un migliaio di ricercatori, che vi conducono esperimenti, provenienti da tutto il mondo. Ne cito due: BOREXINO, che misura i neutrini solari a iniziare dalle energie più basse, conferma in modo spettacolare l'effetto della materia densa nella parte più interna del Sole sulle loro oscillazioni e dimostra l'esistenza del ciclo CNO (carbonio-azoto-ossigeno), e OPERA, che visualizza le interazioni dei neutrini tau che sono stati prodotti dalla conversione dei neutrini mu lungo il viaggio di 700 km dal CERN fino al Gran Sasso. Bella intuizione quella di Zichichi! Le oscillazioni di neutrino e la scoperta della loro massa avvengono in modo fortunato in un altro esperimento sotterraneo. Sotto la montagna di Ikeno in Giappone, nella miniera di Kamioka, viene realizzato un enorme rivelatore dove 3000 tonnellate di acqua servono per osservare l'eventuale decadimento del protone. A contaminare gli eventuali decadimenti dei protoni ci sono però le interazioni dei neutrini atmosferici ed è proprio studiando questi per capirne l'effetto che si osserva, con sorpresa, la variazione del rapporto tra neutrini muonici ed elettronici in funzione dell'angolo di provenienza. Le oscillazioni quindi, che dipendono proprio dal rapporto L/E (il rapporto tra la distanza dalla creazione all'interazione del neutrino e la sua energia), sono la spiegazione dell'osservazione e poiché solo famiglie di neutrini dotati di massa diversa possono oscillare, ecco anche la scoperta che i neutrini sono massivi. La prossima edizione di questo esperimento (HyperKamiokande) prevederà 260.000 tonnellate di acqua.

La soluzione del "solar neutrino puzzle" risiede proprio nelle oscillazioni che trasformano parte dei neutrini elettronici solari

in uno degli altri tipi e quindi li rendono non rivelabili. In realtà un fondamentale esperimento nel laboratorio sotterraneo canadese (SNOLab) è stato in grado di rivelare attraverso le interazioni di corrente neutra tutti i neutrini indipendentemente dal loro sapore, confermando che il Sole funziona proprio come deve!

I neutrini grazie alla loro proprietà di interagire assai poco hanno un'altra possibile funzione. Una volta prodotti in qualche assai poco compreso, ma certamente affascinante, meccanismo da qualche acceleratore cosmico, viaggiano poi in linea retta e se rivelati ci possono indicare la sorgente. Sono rari ed estremamente energetici. Per poterli osservare non bastano le decine di migliaia di tonnellate che possiamo mettere nelle caverne dei laboratori sotterranei.

Ed ecco quindi l'idea di utilizzare il ghiaccio del Polo Sud o l'acqua del Mar Mediterraneo, calando in profondità (sempre i cosmici bisogna schermare!) dei rivelatori di luce che sfruttano l'effetto Cherenkov e sono in grado di vedere enormi volumi. Recentemente nelle acque prossime alla Sicilia l'esperimento KM3Net è riuscito a osservare il neutrino più energetico mai visto (vd. p. 18, ndr). Qualcosa come 200 milioni di GeV (per confronto, LHC ha una energia di 7000 GeV per fascio).

Alcune altre considerazioni.

I laboratori sotterranei sono anche uno dei terreni dove viene ricercata la materia oscura. Costituiscono un vertice del triangolo che pensiamo ci permetterà di trovarla e capirla. La materia oscura si spera di crearla in LHC o nei suoi successori al CERN (High Luminosity-LHC, abbreviato HI-Lumi LHC o HL-LHC, e il Future Circular Collider, FCC, vd. p. 15, ndr) oppure di osservare la sua annichilazione dai satelliti nello spazio o la sua interazione negli esperimenti sotterranei.

In HI-Lumi LHC, prima, e poi con FCC, a più di 100 m sottoterra al confine franco-svizzero, si studieranno con grande



e.
Vista dall'alto dell'interferometro Virgo, a Cascina (Pisa). La collaborazione Virgo ha contribuito alla scoperta delle onde gravitazionali, annunciata nel 2016 insieme alla collaborazione LIGO.

precisione le proprietà del bosone di Higgs e i fenomeni del modello standard. Si cercherà anche di scoprire la cosiddetta “nuova fisica” attraverso l’identificazione di nuove particelle elementari o piccole discrepanze con il modello. Il motivo per cui questi moderni e potenti acceleratori di particelle, come i loro predecessori, devono essere posti sottoterra questa volta è logistico. Acceleratori lunghi decine di chilometri non sono compatibili con la antropizzazione dei nostri territori (strade, ferrovie, villaggi, agricoltura). Andare sottoterra ci risolve un problema e fornisce anche una protezione da qualsiasi possibile incidente.

Anche le onde gravitazionali fin qui studiate a LIGO e Virgo andranno nelle profondità della terra (vd. p. 12, ndr). Qui le due ragioni (scientifica e logistica) si combinano. Sono macchine lunghe almeno 10 km

e bisogna ridurre il rumore antropico e le vibrazioni sismiche a bassa frequenza. La nuova generazione di interferometri (l’Einstein Telescope – ET) verrà quindi realizzata in tunnel sotterranei e la Sardegna nella miniera di Sos Enattos ha buone probabilità di essere scelta come sito.

La combinazione delle misure dei neutrini cosmici misurati nelle profondità del mare, delle onde gravitazionali rivelate dall’Einstein Telescope e dei *gamma ray burst* osservati dai satelliti e provenienti dalla coalescenza di stelle di neutroni sarà un pilastro dell’astronomia multimessaggera del futuro.

Insomma, per osservare meglio il cielo e indagare i misteri dell’infinitamente piccolo, bisogna andare sottoterra!

Biografia

Fernando Ferroni è professore emerito del Gran Sasso Science Institute. È stato presidente dell’Infn dal 2011 al 2018. Ha partecipato a molti esperimenti al Cern e allo Slac di Stanford. Attualmente è co-direttore della Einstein Telescope Organisation e partecipa all’esperimento Cuore dei Laboratori del Gran Sasso per la ricerca del decadimento doppio beta senza neutrini.