

Gerarchie nascoste

Esperimenti per distinguere le masse dei neutrini

di Eligio Lisi

Siamo nel 1930, a Tubinga, in una fredda giornata di dicembre. Un gruppo di fisici discute animatamente uno dei problemi più misteriosi del momento: in alcuni processi radioattivi sembra che l'energia non sia conservata. Si attende l'arrivo da Zurigo di Wolfgang Pauli, famoso fisico teorico. Ma Pauli rinuncia a partire, prende carta e penna e, fra le righe di una lettera di scuse, lancia un'idea folgorante: la conservazione dell'energia non è violata, purché esista una nuova particella neutra e con una massa leggerissima. Più leggera, secondo i suoi calcoli, di un centesimo della massa del protone. Nasce così la particella che Enrico Fermi chiamerà "neutrino" e la cui esistenza verrà dimostrata in laboratorio dopo oltre vent'anni di ricerche, il 15 giugno 1956, da Clyde L. Cowan e Frederick Reines (vd. in *Asimmetrie* n. 18 p. 34, ndr).

Da allora, misurare l'evanescente massa del neutrino rimane uno dei problemi fondamentali della fisica delle particelle che non è stato ancora completamente risolto. Sappiamo oggi che la sua massa deve essere meno di un milionesimo di quella del protone, ma non ne conosciamo ancora il valore esatto. Sappiamo anche che il neutrino di Pauli e Fermi è

solo il primo di tre varietà differenti chiamate, con un po' di fantasia, "sapori": i neutrini di sapore elettronico, muonico e tauonico. Inoltre, abbiamo capito che i tre neutrini di sapore diverso non hanno una massa ben definita, ma che ciascuno di essi è un "mix" di altri tre neutrini che, al contrario, hanno masse ben definite ma non uno specifico sapore. Una proprietà, questa, difficile da immaginare, ma possibile nel mondo quantistico delle particelle elementari.

Il mescolamento quantistico fra neutrini con "masse" e "sapori" diversi conduce a un fenomeno affascinante, previsto da Bruno Pontecorvo nel secolo scorso: il sapore di un neutrino non rimane immutato, ma è soggetto a trasformazioni cicliche. In altre parole, un neutrino elettronico può trasformarsi in muonico o tauonico e viceversa, ripetendo il ciclo di queste cosiddette "oscillazioni" con una frequenza legata alle differenze fra le masse dei neutrini (o meglio, per essere precisi, fra le masse elevate al quadrato). Il Nobel 2015 per la fisica ha premiato proprio la fondamentale scoperta delle oscillazioni di sapore, osservata studiando neutrini che ci arrivano continuamente dall'interno del Sole e dall'impatto dei raggi cosmici con l'atmosfera.

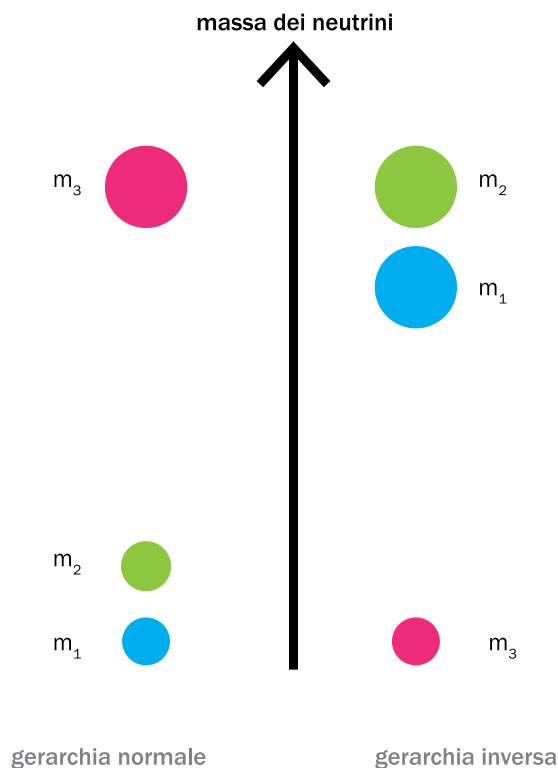


a.
Wolfgang Pauli (a sinistra) con la moglie (a destra) durante un'escursione a Livorno.

Questa scoperta ci ha insegnato, fra l'altro, che i neutrini solari e atmosferici oscillano con due frequenze molto diverse, a cui sono associate due differenze di massa altrettanto diverse. Il problema iniziale di determinare la massa del singolo neutrino di Pauli si è quindi trasformato, nel tempo, nel problema di determinare le masse di tre neutrini, conoscendone due differenze relative. Sembra che l'incognita sia sempre e soltanto una (cioè una massa fra le tre), ma c'è una complicazione. Guardando la fig. b (vd. anche in Asimmetrie n. 14 fig. c p. 31, ndr) capiamo infatti che ci sono due opzioni (dette "gerarchie") per organizzare tre masse dei neutrini, a parità di differenze relative: le due masse con la minore differenza relativa possono essere più leggere (a sinistra) o più pesanti (a destra) della terza massa, associata alla maggiore differenza relativa. La prima gerarchia è detta "normale", perché qualitativamente simile a quella osservata nelle altre particelle di materia come i quark,

mentre la seconda è detta "inversa". Determinare quale gerarchia sia stata scelta dalla natura per i neutrini rappresenta una nuova sfida, all'interno del problema originale di determinarne la massa: una sfida difficile, che però può essere vinta spingendo al limite gli strumenti teorici e sperimentali a nostra disposizione. I fisici teorici hanno proposto almeno due idee che consentono, in linea di principio, di affrontare il problema della gerarchia. La prima è quella di osservare contemporaneamente le oscillazioni di neutrino prodotte da entrambe le differenze di massa, e non da una sola com'è avvenuto finora. In questo caso, l'interferenza fra le due frequenze fondamentali di oscillazione sarebbe leggermente diversa nelle due gerarchie, e misure di altissima precisione potrebbero rivelare quella giusta. Sperimentalmente, questa idea è realizzabile utilizzando i flussi di neutrini estremamente intensi prodotti dai potenti reattori nucleari per uso civile, e studiando le loro oscillazioni ad

alcune decine di chilometri di distanza, per mezzo di rivelatori di grandi dimensioni ed eccezionali prestazioni. La seconda idea sfrutta il fatto che i neutrini - siano essi elettronici, muonici o tauonici - possono attraversare quasi indisturbati tutta la Terra. I soli neutrini elettronici sono però soggetti a un'interazione aggiuntiva con gli elettroni incontrati durante il loro cammino nella materia terrestre. Gli effetti di questa variazione sulle oscillazioni di neutrino sono leggermente diversi in gerarchia normale e inversa, e queste differenze possono essere evidenziate attraverso misure di oscillazione effettuate a grandi distanze su scala terrestre. Sperimentalmente, si può procedere in due modi: usando fasci di neutrini prodotti in laboratorio attraverso degli acceleratori e rivelandoli dopo un percorso di almeno un migliaio di chilometri, oppure osservando i neutrini atmosferici prodotti dalla parte opposta del globo per mezzo di enormi rivelatori costruiti sotto la superficie terrestre.



b.
 Due possibili ordinamenti ("gerarchie") delle masse dei tre neutrini, che lasciano invariate le loro differenze relative: a sinistra la gerarchia "normale" e a destra la gerarchia "inversa". Attualmente non conosciamo quale delle due opzioni sia stata scelta dalla natura. A rigore, va detto che le oscillazioni del sapore dei neutrini determinano le differenze dei quadrati delle masse (non delle masse), ma ciò non cambia il concetto di gerarchia.



Diversi esperimenti basati su queste idee sono già in cantiere in tutto il mondo per investigare non solo la gerarchia di massa ma anche altre proprietà fondamentali e misteriose dei neutrini. In termini sportivi, sta per cominciare una lunga corsa su tre diverse "corsie" di gara, segnate dai neutrini da reattore, da acceleratore e atmosferici - e l'Infn è pronto ai blocchi di partenza! In Cina, l'Infn sta partecipando alla costruzione di un rivelatore di neutrini da reattore che conterrà ventimila tonnellate di scintillatore liquido (Juno), portandovi le competenze acquisite nell'esperimento Borexino con neutrini solari dei Laboratori del Gran Sasso. Negli Stati Uniti, l'Infn sta contribuendo a formare una collaborazione internazionale per un esperimento con neutrini da acceleratore (Dune), basato sulla tecnologia ad argon liquido sviluppata nell'esperimento Icarus, sempre del Gran Sasso. Infine, basandosi sull'esperienza acquisita negli esperimenti sottomarini Nemo e Antares, l'Infn partecipa anche alla costruzione di un grande e denso sistema di rivelatori di neutrini atmosferici nelle acque a 2500 metri di profondità al largo di Tolone (in Francia). Si tratta del

progetto Km3net-Orca, che affiancherà Km3net-Arca, il telescopio di neutrini astrofisici in fase di installazione a 3500 m di profondità al largo di Capo Passero, in Sicilia (vd. p. 21, ndr). Similmente, in Antartide si sta studiando la possibilità di installare un rivelatore di neutrini atmosferici per studiare la gerarchia di massa, complementare al telescopio IceCube. Va anche detto che l'Infn attualmente partecipa a un esperimento con un rivelatore sotterraneo in Giappone (T2k), che potrebbe evolvere in un più grande rivelatore sensibile alla gerarchia di massa tramite i neutrini atmosferici (Hyper-Kamiokande). Appuntamento fra alcuni anni, per parlare dei progressi - e magari anche di qualche risultato preliminare - in una o più di queste affascinanti linee di ricerca in fisica dei neutrini!

c. Il rivelatore Icarus durante il trasporto dai laboratori del Gran Sasso a quelli del Cern di Ginevra: prima tappa di un lungo viaggio con destinazione Fermilab (nei pressi di Chicago), nell'ambito del progetto sperimentale Dune.

Biografia

Eligio Lisi è ricercatore presso la sezione Infn di Bari. Si occupa principalmente della teoria e dei fenomeni legati alla fisica e all'astrofisica dei neutrini.