

Lascia e raddoppia

La ricerca del doppio decadimento beta senza neutrini

di Maura Pavan



La miniera è un labirinto buio. Camminiamo in silenzio accompagnati dal chiacchiericcio di minatori e minatrici, indossiamo i loro stessi abiti: stivali di gomma, tuta, elmetto e lampada. In fondo a una lunga galleria, compare una porta bianca incastonata nella roccia. Sembra l'ingresso della tana del Bianconiglio, ma dietro niente mondo fantastico: c'è un esperimento di fisica fondamentale. Siamo nel 1991, a 50 km da Pechino, 521 metri sottoterra. Uno dei tanti laboratori sotterranei utilizzati ieri, oggi o domani per la ricerca del doppio decadimento beta.

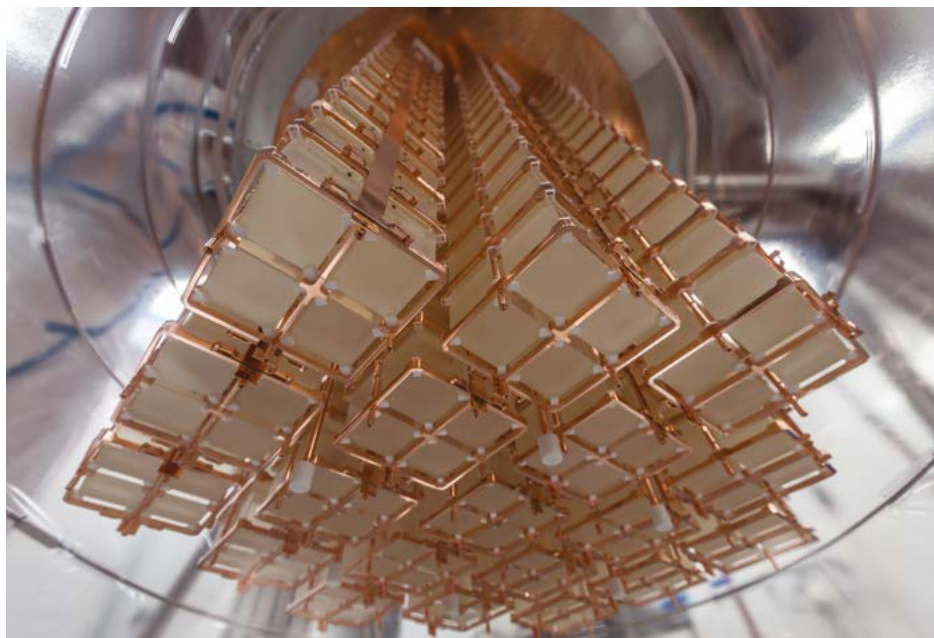
Un elemento chimico è definito dal numero di protoni nel suo nucleo (un protone fa l'idrogeno, due l'elio). Il numero di neutroni, invece, può variare, creando diverse versioni dello stesso elemento chiamate isotopi. Mentre alcuni sono stabili, altri sono instabili e decadono per trovare un equilibrio migliore. Non sappiamo quando un singolo atomo decadrà, ma conosciamo il suo tempo di dimezzamento, ovvero quanto occorre perché metà del campione si trasformi.

Nel decadimento beta, un neutrone del nucleo si trasforma in un protone. L'energia in eccesso crea due nuove particelle: un elettrone (materia) e un antineutrino (antimateria). Questo schema si replica in tutte le trasformazioni in cui l'energia si trasforma in massa: si crea sempre materia associata a una controparte di antimateria. Se questa regola fosse stata rispettata alla perfezione durante il Big Bang, l'energia primordiale avrebbe creato materia e antimateria in parti uguali. Invece la materia ha prevalso, e il nostro universo ne è oggi interamente costituito: è quella che chiamiamo "asimmetria barionica".

La chiave di questo mistero potrebbe nascondersi nel doppio decadimento beta. Nella sua versione "standard" questo processo equivale a due decadimenti beta

a.

Il rivelatore dell'esperimento Majorana all'interno del suo massiccio schermo di rame e piombo. Concluso con successo il suo percorso scientifico alla Sanford Underground Research Facility (SURF), la tecnologia e il prezioso *know-how* sviluppati da questa collaborazione si stanno ora fondendo con l'esperienza dell'esperimento GERDA per la realizzazione di LEGEND, il futuro grande progetto internazionale per la ricerca sul germanio-76.



b.

Vista delle 19 torri di CUORE. All'orizzonte della conclusione della sua presa dati, l'esperimento ha centrato i suoi traguardi di sensibilità, vincendo la scommessa tecnologica di un rivelatore innovativo e posizionandosi ai vertici mondiali nella caccia al doppio decadimento beta. Forte di queste enormi sfide superate, CUORE lascia il passo a CUPID: il nuovo esperimento sfrutterà una versione più avanzata della stessa tecnologia bolometrica, puntando a confermarsi come uno dei progetti più competitivi del futuro.

simultanei. Tuttavia, se il neutrino coincidesse con la propria antiparticella – il cosiddetto “neutrino di Majorana” – diventerebbe possibile un'altra modalità: i due neutrini potrebbero “annullarsi” tra loro all'interno del nucleo, lasciando uscire soltanto i due elettroni e il decadimento si chiamerebbe “doppio decadimento beta senza neutrini”. Un evento simile creerebbe materia senza antimateria, offrendo una spiegazione non solo per l'asimmetria barionica, ma anche per la leggerezza dei neutrini rispetto ai leptoni carichi e ai quark (un altro “sassolino nella scarpa” per i fisici).

Le collaborazioni GERDA e Majorana (rispettivamente ai Laboratori del Gran Sasso e alla Sanford Underground Research Facility - SURF, vd. fig. a), studiando il doppio decadimento beta del germanio-76, hanno provato che mentre il canale standard mostra un tasso di 2 eventi al giorno per kg, il doppio decadimento beta senza neutrini (chiamato anche “canale di Majorana”) non ha prodotto segnali, stabilendo un limite superiore di meno di 3 decadimenti l'anno per 100 kg di isotopo. Conclusioni analoghe sono state raggiunte dagli esperimenti CUORE (al Gran Sasso) e Kamland-ZEN (a Kamioka, in Giappone), studiando il tellurio-130 e lo xenon-136: il decadimento nel canale standard è raro ma osservabile, quello nel canale di Majorana se esiste è ancora al di là della portata di questi esperimenti.

Come si studia questo processo e quali sono gli obiettivi della ricerca? Ci si concentra su isotopi che offrono condizioni ideali: producono elettroni energetici, sono reperibili in grandi quantità e

integrabili in un rivelatore ad alte prestazioni.

La sfida è tutta nell'evitare i falsi positivi indotti dalla radioattività naturale e dai raggi cosmici: gli esperimenti sono sotto chilometri di roccia e utilizzano materiali con contaminazioni radioattive svariati ordini di grandezza inferiori a quelle dei materiali comuni.

Il parametro che misura i progressi di questa ricerca è la “massa di Majorana” del neutrino, una costante universale legata al tempo di dimezzamento da un rapporto di proporzionalità inversa al quadrato. Tale legame varia tra i diversi isotopi, ma è ricavabile con qualche approssimazione dai modelli nucleari. I risultati degli esperimenti GERDA, Majorana, CUORE e Kamland-ZEN corrispondono al limite superiore della massa di Majorana di qualche centinaio di millielettronvolt (meV). La sfida per la prossima generazione di esperimenti è di arrivare a poche decine di meV.

Alcune grandi collaborazioni internazionali sono attualmente in prima linea in questa impresa. In Giappone, a mille metri di profondità, KamLAND-Zen utilizza 800 kg di xenon-136 diluito in un liquido scintillante. L'energia dei due elettroni si converte in “lampi” di luce, rivelati da una schiera di sensori (fotomoltiplicatori). Il tutto è racchiuso all'interno di un enorme pallone di 13 metri di diametro che fa da schermo attivo contro i falsi segnali esterni. L'esperimento vanta oggi una delle sensibilità più alte al mondo e si sta preparando a un ulteriore potenziamento.

In Italia, presso i Laboratori del Gran Sasso, LEGEND raccoglie l'eredità di GERDA e Majorana



C.
Il fisico Ettore Fiorini (1933–2023). A lui si devono le intuizioni rivoluzionarie che hanno tracciato la strada della ricerca sul doppio decadimento beta: l'idea di usare i diodi al germanio negli anni '60 e, successivamente, nel 1984, la proposta di sviluppare i rivelatori termici per studiare isotopi differenti dal germanio-76. Due visioni straordinarie, che oggi trovano il loro coronamento nei grandi esperimenti LEGEND e CUORE/CUPID ai Laboratori del Gran Sasso.

e, utilizzando una tecnica proposta negli anni '60 da Ettore Fiorini, sta completando l'installazione di alcune decine di diodi al germanio per una massa totale di circa 200 kg di germanio-76. In questo caso l'energia dei due elettroni produce nel diodo, in cui avviene il decadimento, un insieme di coppie elettrone-lacuna che danno origine a un impulso elettrico. I diodi sono immersi in un bagno di argon liquido che funge sia da refrigerante che da schermo attivo, grazie alle proprietà di scintillazione dell'argon. Nel frattempo si lavora già a un'infrastruttura futura che arriverà a 1000 kg di germanio-76.

Sempre ai Laboratori del Gran Sasso, si sta concludendo il percorso scientifico di CUORE, segnando il coronamento di una visione durata decenni: quella di Ettore Fiorini, che di questa linea di ricerca non è stato solo l'ideatore, ma il principale artefice e guida. La tecnologia cambia radicalmente e si basa sui rivelatori termici, o "bolometri", capaci di trasformare

l'energia cinetica degli elettroni direttamente in calore. CUORE studia il decadimento del tellurio-130 attraverso 988 cristalli di ossido di tellurio (TeO_2) raffreddati a temperature vicine allo zero assoluto. Terminata con successo questa missione, il testimone passerà a CUPID, che sostituirà i cristalli di ossido di tellurio con cristalli di molibdato di litio (LMO) per studiare il molibdeno-100. Qui si sfrutta la versatilità della tecnica bolometrica, che consente di cambiare isotopo, una strategia che permette di raggiungere sensibilità molto maggiori senza dover costruire un'infrastruttura nuova che contenga un rivelatore più grande.

Infine, si sta già ragionando su un orizzonte temporale ancora più lontano, pensando a sfruttare sinergie con altre attività sperimentali, che usano o useranno rivelatori di grandissime dimensioni, oppure mirando alla realizzazione di più installazioni sperimentali, i cui risultati possano essere combinati per raggiungere sensibilità maggiori.

Biografia

Maura Pavan è professoressa all'Università di Milano-Bicocca e associata alla locale sezione dell'INFN. Dopo gli studi sotto la guida di Ettore Fiorini, svolge da sempre la sua attività di ricerca nel campo della fisica del neutrino, concentrandosi principalmente sullo sviluppo e l'applicazione dei rivelatori termici. Attualmente è *co-spokesperson* della collaborazione CUPID.