

Apparizioni e sparizioni

Ricerche con neutrini da acceleratore

di Maria Gabriella Catanesi

Studiare i neutrini e le loro oscillazioni è un'impresa difficile. I neutrini, infatti, interagiscono raramente con la materia e solo attraverso la forza debole. Anche quelli prodotti dalla sorgente naturale per noi più ricca, il Sole, attraversano in gran parte la Terra indisturbati, senza interagire.

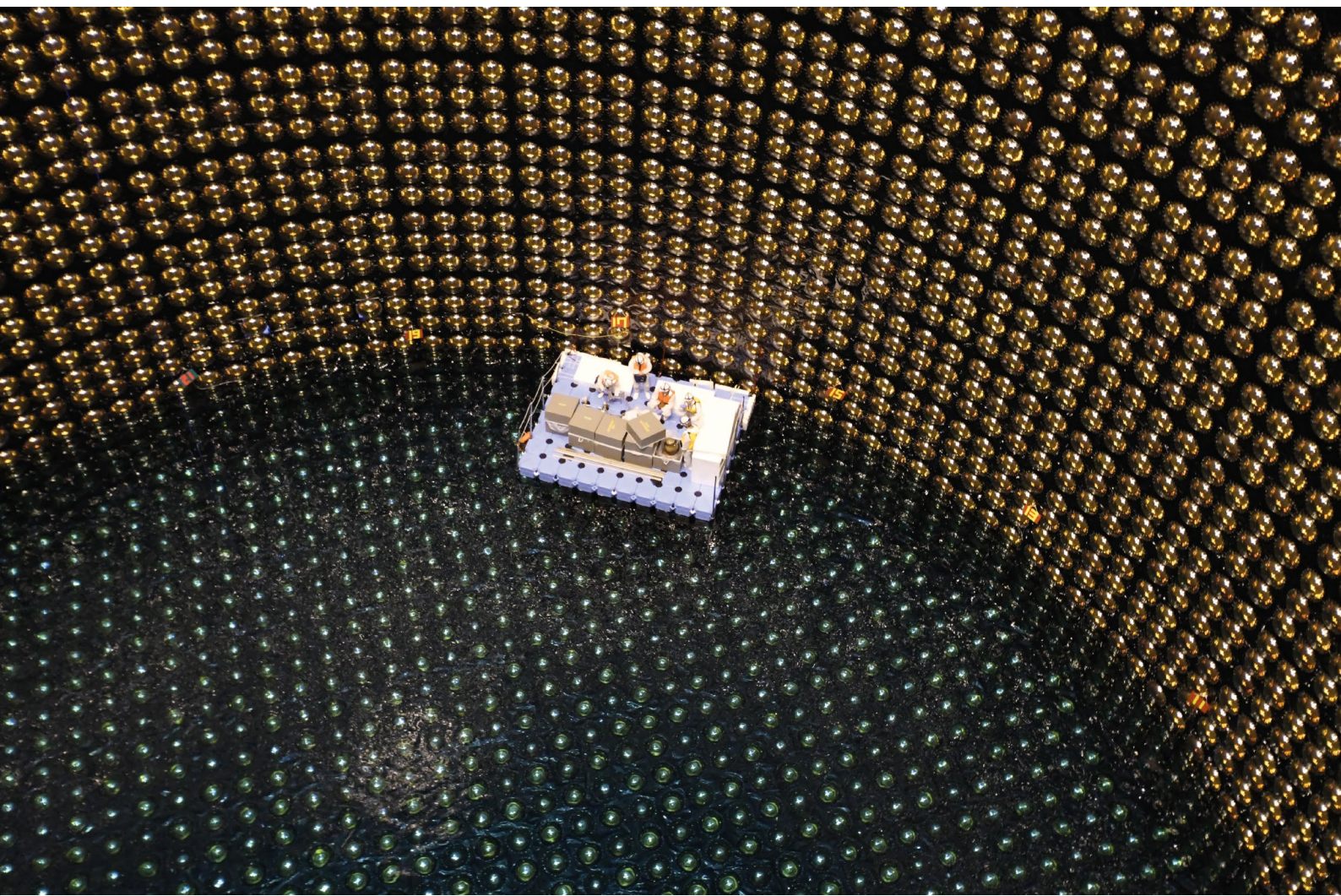
Per questo motivo, al fine di studiare la fisica del neutrino in maniera controllata, sono state realizzate intense sorgenti di neutrini artificiali. I neutrini vengono prodotti grazie alle collisioni di un

tradizionale fascio di protoni, generato da un acceleratore di particelle, su un bersaglio di grafite. Queste collisioni producono pioni che rapidamente decadono in muoni e neutrini muonici. I muoni e i protoni rimanenti sono fermati da un secondo strato di grafite, che invece i neutrini possono attraversare senza problemi. L'energia dei neutrini prodotti è importante, perché è correlata alla distanza alla quale è più probabile che avvenga la loro trasformazione da un sapore all'altro: neutrini di energia

più o meno alta oscillano a distanze più o meno grandi dalla loro sorgente. I neutrini prodotti da un acceleratore di particelle hanno un'energia compresa fra qualche centinaio di MeV e qualche GeV. Di conseguenza, la tipica distanza dalla sorgente a cui occorre posizionare il rivelatore per osservare i fenomeni di oscillazione è di diverse centinaia fino a un migliaio di chilometri. Per questo motivo tali esperimenti vengono chiamati in gergo *"long baseline"*, cioè su grande distanza.

a.
T2K (Tokai to Kamioka) è un esperimento in Giappone che studia i fenomeni legati all'oscillazione dei neutrini.





b.
Super-Kamiokande è un gigantesco rivelatore di neutrini sotterraneo installato a Kamioka in Giappone che, nell'ambito dell'esperimento T2K, rivela i neutrini prodotti nel complesso di acceleratori di Jparc a Tokai.

Un'altra caratteristica importante delle sorgenti artificiali di neutrini da acceleratore è che permettono di generare sia i neutrini che le loro antiparticelle (gli antineutrini): basta selezionare la carica dei pioni prodotti nelle collisioni. Infatti, nel decadimento dei pioni positivi vengono prodotti neutrini, mentre i pioni negativi producono antineutrini. Come vedremo, questo aspetto è estremamente importante perché ci permette di verificare in condizioni controllate le differenze nel comportamento fra materia e antimateria. Produrre neutrini artificiali in grande numero è un processo tecnologicamente complesso ed energeticamente costoso. Non deve meravigliare quindi che solo i grandi laboratori internazionali per la fisica delle particelle siano in grado di farlo: il Cern a Ginevra, il Fermilab negli Usa e Jparc in Giappone. Negli ultimi anni l'esperimento T2K (Tokai to Kamioka) in Giappone è certamente fra quelli che ha prodotto i risultati più interessanti legati ai fenomeni di oscillazione di neutrino. T2K è una grande collaborazione internazionale composta da più di 400 fisici provenienti da tre continenti e da undici diversi

paesi, cui l'Italia partecipa attraverso l'Infn. T2K, che è stato il primo esperimento a osservare nel 2011 la trasformazione di neutrini muonici in neutrini elettronici, utilizza il più intenso fascio di neutrini muonici mai prodotto da un acceleratore, quello del laboratorio Jparc (a Tokai) sulla costa est del Giappone. Il fascio è orientato in modo tale da intercettare le miniere di Kamioka a 295 chilometri di distanza, sul versante ovest del paese, dove è localizzato il rivelatore Super-Kamiokande. Il fascio di Jparc produce neutrini a una energia il cui valore più probabile è 600 MeV, poiché proprio a quest'energia è massima la probabilità che possano oscillare dopo aver viaggiato per 295 chilometri. Il complesso dei rivelatori vicini (ND280) è installato a soli 280 metri dal punto di produzione dei neutrini e permette di misurarli prima che avvengano fenomeni di oscillazione. I neutrini di T2K sono molto più energetici di quelli solari e quindi possiedono una probabilità di interazione con la materia molto più elevata di questi ultimi. In particolare, una piccola frazione interagisce con lo scintillatore o con l'acqua nello ND280

e molte di queste interazioni producono muoni. Il muone è una particella carica e può essere rivelato poiché ionizza il gas contenuto nelle grandi camere a deriva, dette "Tpc". Inoltre, tutti i rivelatori dello ND280 sono immersi in un campo magnetico che permette di discriminare la carica osservando la curvatura (concava o convessa) delle traiettorie. La storia di questo strumento è alquanto peculiare. Progettato alla fine degli anni '70 per lo storico esperimento UA1 al Cern (che valse il premio Nobel a Carlo Rubbia, nel 1984) è rimasto per anni inutilizzato. Seguendo un'idea di alcuni fisici dell'Infn, è stato poi rimesso in funzione, imbarcato su una nave e spedito in Giappone. Qui ha cominciato una nuova vita e rappresenta un esempio di longevità tecnologica e di riciclaggio scientifico ben riuscito. Le misure effettuate da ND280 sono utilizzate per predire il numero dei neutrini muonici che ci aspettiamo di vedere nel rivelatore lontano Super-Kamiokande nel caso non ci siano oscillazioni. La maggior parte dei neutrini muonici attraversa il rivelatore ND280 senza interagire e prosegue il suo viaggio a una velocità di poco inferiore a quella della luce fino a raggiungere il gigantesco rivelatore Super-Kamiokande. Installato a una profondità di 1000 metri, all'interno della miniera di Kamioka, nel Giappone Occidentale, Super-Kamiokande è un enorme cilindro (39 metri di diametro e 42 di altezza) riempito di acqua ultra-pura. Le interazioni da neutrino muonico e da neutrino elettronico sono viste dal rivelatore come cerchi di luce nell'acqua. L'interazione di un neutrino muonico produce un muone, mentre le interazioni dei neutrini elettronici producono elettroni. I muoni e gli elettroni sono particelle cariche e, a loro volta, interagiscono con gli atomi del liquido scintillante, eccitandoli. Dopo breve tempo, gli atomi ritornano nel loro stato di equilibrio iniziale ed emettono luce. Se la particella che ha attraversato Super-Kamiokande viaggia a una velocità superiore a quella

della luce nell'acqua (che è circa tre quarti di quella nello spazio vuoto) questa luce, chiamata radiazione Cherenkov, è emessa in un cono. Le pareti di Super-Kamiokande sono attrezzate con più di 10.000 sensibilissimi fototubi di grandi dimensioni che sono in grado di rivelare il cerchio formato dai fotoni della radiazione Cherenkov. Super-Kamiokande è in grado di distinguere i muoni (che producono un cerchio ben definito) dagli elettroni (che producono un cerchio più diffuso).

Come abbiamo visto in precedenza, cambiare la carica elettrica dei pioni selezionati ci permette di generare un fascio di antineutrini invece che di neutrini. Ed è esattamente quello che hanno fatto i fisici di T2K per studiare il comportamento delle antiparticelle. In una situazione di simmetria fra materia e antimateria ci si aspetta di osservare nei neutrini e negli antineutrini esattamente gli stessi fenomeni, della stessa entità. La misura sperimentale ha dato però un'indicazione diversa. In particolare, si è osservato che, benché ci siano indicazioni che anche gli antineutrini cambino di sapore (esattamente come i neutrini), lo fanno in quantità inferiore. In altre parole, materia e antimateria non si comportano in modo simmetrico rispetto ai fenomeni di oscillazione: un esempio di violazione della simmetria CP.

Dopo aver analizzato i dati raccolti in nove anni, l'esperimento T2K ha raggiunto un livello di significatività statistica sufficientemente alta da poter fornire un'indicazione abbastanza stringente sull'esistenza della violazione di carica-parità CP in queste particelle fondamentali. Il risultato pubblicato su "Nature" (che gli ha dedicato la copertina) ha avuto un'eco importante nella comunità scientifica e non solo. Ma misurazioni più precise sono certamente necessarie per confermare queste indicazioni che potrebbero spiegare uno dei grandi misteri del nostro universo: il fatto che esso sia composto di materia e non di antimateria.



c.
I neutrini hanno lo spin opposto alla direzione del moto, mentre le loro antiparticelle, gli antineutrini hanno lo spin che punta nella stessa direzione del moto. È stato osservato che gli antineutrini oscillano meno frequentemente dei neutrini, violando così la simmetria CP.

Biografia

Maria Gabriella Catanesi, ricercatrice presso l'Infn, ha conseguito il dottorato di ricerca nel 1986 nell'esperimento Aleph al Cern. Dal 1992 si occupa di fisica dei neutrini, con ruoli di rilievo negli esperimenti Chorus e Harp al Cern. Autrice di oltre 300 pubblicazioni, attualmente è componente del Comitato Esecutivo e responsabile Infn dell'esperimento T2K.

DOI: 10.23801/asimmetrie.2020.29.7