

Sapori di famiglia

La conservazione dei numeri leptonici

di Lorenzo Calibbi



a.
Il sapore, in fisica, è una caratteristica tipica (un "numero quantico") di diversi leptoni e quark, altrimenti indistinguibili in base ad altre proprietà.

Compito della ricerca fondamentale è esplorare mondi ignoti, aprire porte verso una comprensione più profonda della natura. La fisica del muone ci fornisce diverse opportunità in questo senso, alcune delle quali hanno a che fare con il suo "sapore". Nel modello standard, conosciamo tre famiglie di leptoni, ognuna delle quali è costituita da una particella carica (rispettivamente l'elettrone, il muone e il leptone tau) e dal neutrino corrispondente. Analogamente, anche i quark si presentano in tre diverse generazioni o sapori (in inglese *flavours*), come sono stati fantasiosamente battezzati dai fisici. Perché vi siano tre

famiglie e perché le masse di particelle di differenti sapori siano tanto diverse è uno dei misteri che il nostro modello standard delle particelle, nonostante i grandi successi e le accuratissime predizioni di molti fenomeni, non arriva a spiegare. Molti ritengono che questo "mistero del sapore" possa essere spia di una teoria, non ancora formulata, delle particelle e delle loro interazioni, più fondamentale del modello standard. Come nel mondo della fisica classica, così in quello quantistico delle particelle, le leggi di conservazione rivestono grande importanza. Pensiamo ad esempio alla conservazione dell'energia. Vi sono alcune quantità

conservate, dette numeri quantici, che non hanno sempre equivalenti classici, dalle quali i fisici apprendono informazioni preziose per determinare le proprietà fondamentali delle particelle. Una di queste è il cosiddetto "numero leptonico", vale a dire la somma del numero di leptoni (leptoni a carica negativa e neutrini) meno il numero di antileptoni (leptoni a carica positiva e antineutrini) in una data reazione. Finora non sono stati osservati processi (ovvero decadimenti di particelle o collisioni), in cui il numero leptonico iniziale sia diverso da quello finale, come del resto predetto dal modello standard. Ma c'è di più: il modello standard, nella sua formulazione



$$L: 1 = 1 + (-1) + 1$$

$$L_e: 0 = 1 + (-1) + 0$$

$$L_\mu: 1 = 0 + 0 + 1$$



$$L: 1 = 1 + 0$$

$$L_e: 0 \neq 1 + 0$$

$$L_\mu: 1 \neq 0 + 0$$

originaria in cui i neutrini non hanno massa, predice anche che i numeri leptonici associati ad ogni singola famiglia siano conservati, cioè che in una reazione non cambi, ad esempio, il numero di muoni e neutrini muonici meno il numero di antimuoni (muoni positivi) e antineutrini muonici, e lo stesso nel caso degli elettroni e dei tau. Tale predizione non è stata finora contraddetta da quanto osservato nel caso di processi dei leptoni carichi e, anzi, spiega la presenza di un neutrino e di un antineutrino fra le particelle prodotte nel decadimento del muone.

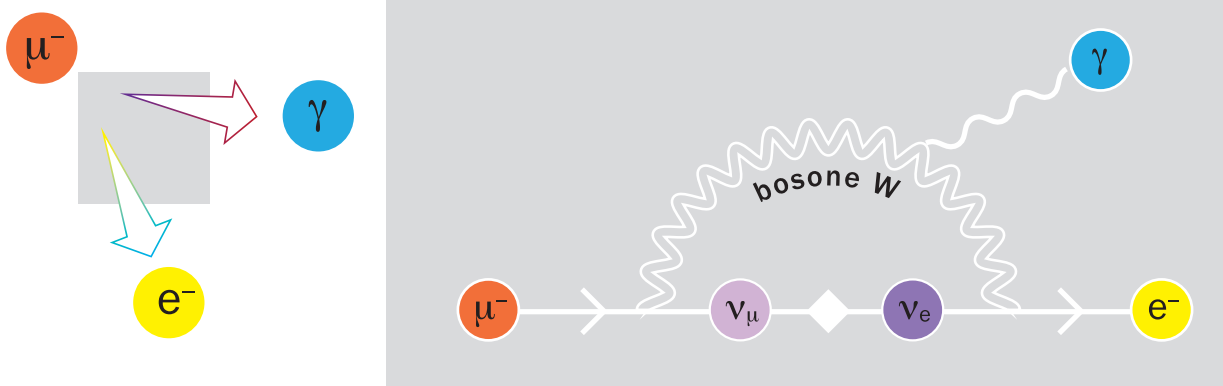
Il muone, infatti, decade con una probabilità prossima al 100% in un elettrone, un neutrino muonico e un antineutrino elettronico. Come mostrato nella fig. b, in questo processo non solo il numero leptonico totale, ma anche i numeri leptonici del muone e dell'elettrone sono singolarmente conservati: il sapore è preservato, nel caso di quello muonico viene semplicemente trasferito dal muone al suo neutrino. Diverso sarebbe il caso di un decadimento del muone in un elettrone e un fotone, un processo che i fisici cercano di osservare da più di settant'anni! Come vediamo sempre in fig. b, in tale decadimento il numero leptonico totale sarebbe conservato, ma non i numeri di famiglia: assisteremmo cioè a una trasformazione di sapore, da muonico a elettronico. Altrettanto accadrebbe nel caso di un muone che decadesse in un elettrone più una coppia elettrone-positrone. A prima vista, può sorprendere

che tali processi con cambiamento di sapore, spesso chiamati processi Lfv (dall'inglese *lepton flavour violation*), non siano stati ancora osservati. In primo luogo perché fenomeni analoghi avvengono piuttosto di frequente nell'ambito dei quark, i cui sapori si mescolano e trasformano. Inoltre, abbiamo da più di quindici anni l'evidenza che i numeri di famiglia leptonici non sono conservati nella propagazione dei neutrini.

Per illustrare quest'ultimo fenomeno, detto di "oscillazione dei neutrini", dobbiamo aprire una breve parentesi. Secondo la meccanica quantistica uno stato fisico, come per esempio una particella, può essere una sovrapposizione, una "miscela", di stati distinti. Così come il gatto del famoso esperimento concettuale di Schrödinger può trovarsi nell'imbarazzante situazione di sovrapposizione degli stati di vita e di morte (vd. in *Asimmetrie* n. 12 p. 14, ndr), meno drammaticamente un neutrino di un dato sapore è in realtà una miscela di neutrini di masse diverse. Ciò fa sì che vi sia una certa probabilità che neutrini di sapore definito, ad esempio prodotti da decadimenti di muoni, si trasformino, propagandosi, in neutrini di diverso sapore e vengano osservati in processi che coinvolgono elettroni o tau. Le misure effettuate dagli esperimenti che hanno osservato le oscillazioni dei neutrini mostrano inoltre che i tre sapori si mescolano in larga misura, senza che nessuno di essi prevalga, un po' come una torta venuta piuttosto male in cui i sapori dei diversi ingredienti (diciamo

b.

Se ci fosse un solo numero leptonico L, comune a elettroni e muoni, posto convenzionalmente uguale a 1 per le particelle (leptoni negativi e neutrini) e -1 per le antiparticelle (leptoni positivi e antineutrini), questo numero sarebbe conservato nel decadimento a sinistra, che rappresenta il decadimento del muone in elettrone, neutrino e antineutrino, che è quello che si osserva sperimentalmente, ma anche in quello di destra, in elettrone e fotone, che non è mai stato osservato. Se introduciamo invece due numeri leptonici distinti per famiglie o sapori (ovvero L_e per gli elettroni e i loro neutrini e L_μ per i muoni e i loro neutrini), assegnando, per ciascun sapore, di nuovo +1 alle particelle e -1 alle antiparticelle, ma 0 alle particelle o antiparticelle dell'altro sapore, il decadimento di sinistra conserva entrambi questi numeri, mentre in quello di destra né L_e né L_μ sono conservati. Si noti che la somma dei singoli termini di L_e e L_μ fa L.



dolce, aspro e salato) siano tutti egualmente percepibili.

Dunque, il sapore dei neutrini, cioè il numero leptonico di famiglia, è, come dicono i fisici, “violato”, e non di poco. Perché dunque tale processo di violazione non è ancora stato osservato nel caso dei leptoni carichi, in particolare dei muoni? Torniamo all’ipotetico decadimento del muone in elettrone e fotone. Come abbiamo detto, tale processo Lfv è proibito nel modello standard, ma ora sappiamo che i neutrini oscillano cambiando di sapore. È pertanto possibile immaginare il processo rappresentato nella fig. c, in cui, secondo un altro caratteristico fenomeno quantistico, il muone emette per un tempo infinitesimale un neutrino muonico e un bosone W. Se il neutrino oscilla in un neutrino elettronico, e il bosone emette un fotone e poi trasforma il neutrino in elettrone, vediamo realizzato il nostro cambiamento di sapore dei leptoni carichi! Purtroppo però, se calcoliamo la probabilità che questo processo Lfv avvenga, scopriamo che dipende dal rapporto fra le minuscole masse dei neutrini e quella del W elevato alla quarta potenza e che quindi possiamo attenderci un solo decadimento di questo tipo ogni 10^{54} decadimenti ordinari, un numero decisamente troppo piccolo per poter essere mai osservato in un esperimento! Perché allora continuiamo a cercare processi di questo tipo? Proprio perché è dalle cose che riteniamo “impossibili” che abbiamo l’opportunità di imparare di più.

L’osservazione di una violazione del sapore leptonico dei leptoni carichi sarebbe infatti un segnale inequivocabile di nuova fisica al di là del modello standard e forse una porta verso la soluzione del sopra citato mistero del sapore. Inoltre, come abbiamo visto, l’estrema “soppressione” di tali processi Lfv (ovvero il fatto che la probabilità che avvengano è molto molto piccola) è una conseguenza della piccolezza delle masse dei neutrini, non del fatto che i numeri leptonici di famiglia siano quantità conservate, e quindi non è prevista nella maggior parte delle estensioni del modello standard che sono state proposte. Ad esempio, se le particelle che conosciamo avessero un partner supersimmetrico (vd. anche in *Asimmetrie* n. 18 p. 13, ndr), potremmo immaginare di sostituire nel diagramma di fig. c i neutrini e il W con i corrispondenti partner supersimmetrici, il che genererebbe il nostro processo senza la soppressione dovuta alla leggerezza dei neutrini e quindi potenzialmente alla portata degli esperimenti attualmente in costruzione.

c. Diagramma che mostra come sia teoricamente possibile che un muone decada in elettrone e fotone attraverso l’oscillazione (vale a dire il cambiamento di sapore) dei neutrini: il muone si trasforma in un bosone W e un neutrino muonico, entrambi virtuali; il neutrino muonico oscilla in un neutrino elettronico; nel frattempo il bosone emette un fotone ed è riassorbito dal neutrino elettronico, trasformandolo in un elettrone.

Biografia

Lorenzo Calibbi lavora all’Accademia Cinese delle Scienze di Pechino. Dopo il dottorato, conseguito all’Università di Padova, ha fatto ricerca alla Sissa di Trieste, a Monaco di Baviera e a Bruxelles. Si occupa di fisica delle particelle al di là del modello standard.

DOI: 10.23801/asimmetrie.2017.23.2