

Tre uomini e un neutrino

Le teorie di Weyl, Dirac e Majorana

di Eligio Lisi

Pazienza, tanta pazienza! Un decennio per porre le giuste domande. E molti più anni per cominciare a trovare le risposte... Sono questi i tempi ai quali bisogna abituarsi per comprendere la natura nascosta dei neutrini. Ma che cosa s'intende per natura dei neutrini, tanto per cominciare?

Tutte le particelle elementari sono caratterizzate da almeno due quantità: la massa, che può anche essere nulla, e il momento angolare intrinseco o spin, che in appropriate unità di misura può assumere i valori 0, $1/2$, 1, $3/2$, 2, eccetera. Ulteriori quantità sono le cariche (per esempio la carica elettrica), che sono opposte per particelle e antiparticelle. Tutte insieme, queste quantità definiscono la natura di una particella. Per esempio, la particella di luce (il fotone) ha massa nulla,

spin 1 e carica elettrica nulla, ed è identico all'antifotone. Invece l'elettrone ha una massa non nulla, spin $1/2$ e carica elettrica negativa, che lo rende distinguibile dalla sua antiparticella con carica positiva, il positrone.

E il neutrino? Fino dall'ipotesi di Wolfgang Pauli nel 1930 sappiamo che il neutrino deve avere spin $1/2$, massa molto piccola, o nulla, e carica elettrica nulla. Ci basta il fatto che il neutrino abbia carica nulla per poter affermare che è identico all'antineutrino? La risposta è no: ci servono altre informazioni, che, come vedremo, potrebbero portarci verso nuove e affascinanti frontiere della fisica.

Storicamente, le giuste domande e ipotesi sulla natura delle particelle elettricamente neutre, con spin $1/2$ e massa



a.
Wolfgang Pauli (a sinistra)
e Niels Bohr affascinati da
una trottola.

piccolissima o nulla, furono poste nel decennio fra la fine degli anni '20 e '30 del secolo scorso, da tre grandi protagonisti del pensiero scientifico: il matematico Hermann Weyl e i fisici Paul Dirac ed Ettore Majorana. Per capire le loro ipotesi, partiamo da tre dati di fatto della fisica moderna.

Il primo è che una particella priva di massa si muove sempre a velocità pari a quella della luce, mentre se ha massa la sua velocità è sempre inferiore. Il secondo è che una particella di spin $1/2$ si può immaginare come una sorta di minuscola "trottola" che, orientata nella direzione del moto, può girare o in senso destrorso (*right-handed*, R) come un cacciavite, o in senso sinistrorso (*left-handed*, L). Il terzo dato di fatto, veramente sorprendente, è che le interazioni deboli intervengono solo sulla componente L delle particelle di materia con spin $1/2$ (come i neutrini, gli elettroni e i quark) e sulla componente R delle rispettive antiparticelle. La natura non si comporta in modo speculare nel mondo delle particelle elementari, anzi distingue nettamente fra rotazioni verso destra e verso sinistra. Mettiamo ora insieme questi tre dati di fatto in un esperimento ideale. Consideriamo un neutrino con massa, generato in uno stato di rotazione L. Poiché viaggia a una velocità inferiore a quella della luce, possiamo immaginare di superarlo lungo la sua stessa direzione, vedendolo allontanarsi dietro di noi mentre ruota in senso destrorso. Nel linguaggio del mondo quantistico, possiamo dire che il neutrino, oltre a essere nello stato L, ha una certa probabilità di essere nello stato R. Questa possibilità è preclusa se il neutrino è

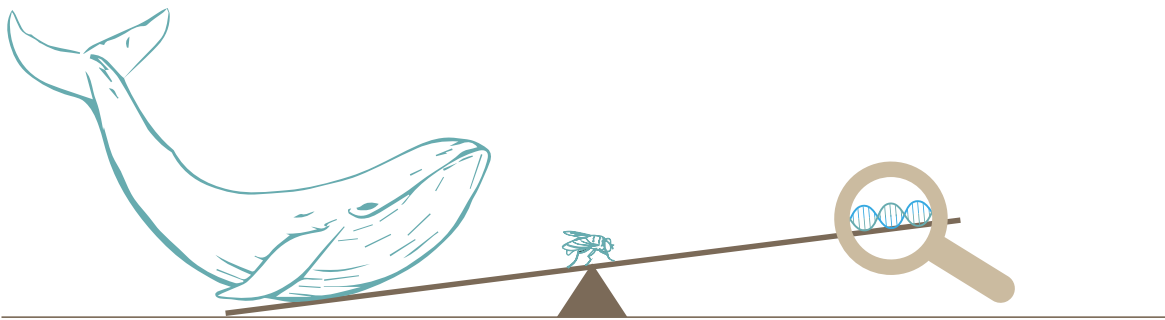
privo di massa: non potremo mai superarlo e lo vedremo sempre e solo come L. Ora abbiamo tutti gli strumenti per distinguere le tre ipotesi di Weyl, Dirac, e Majorana (vd. fig. c).

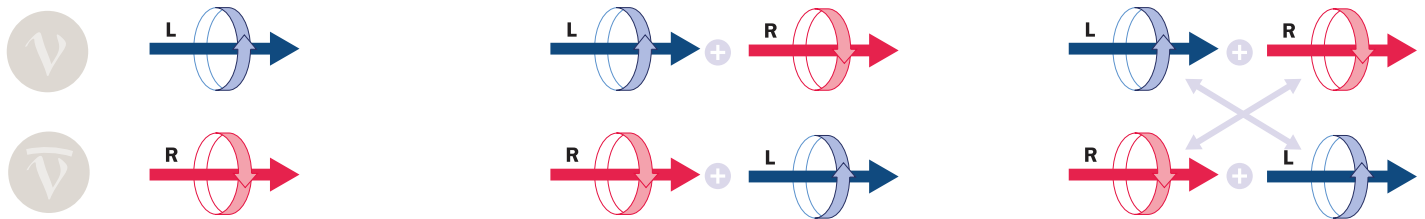
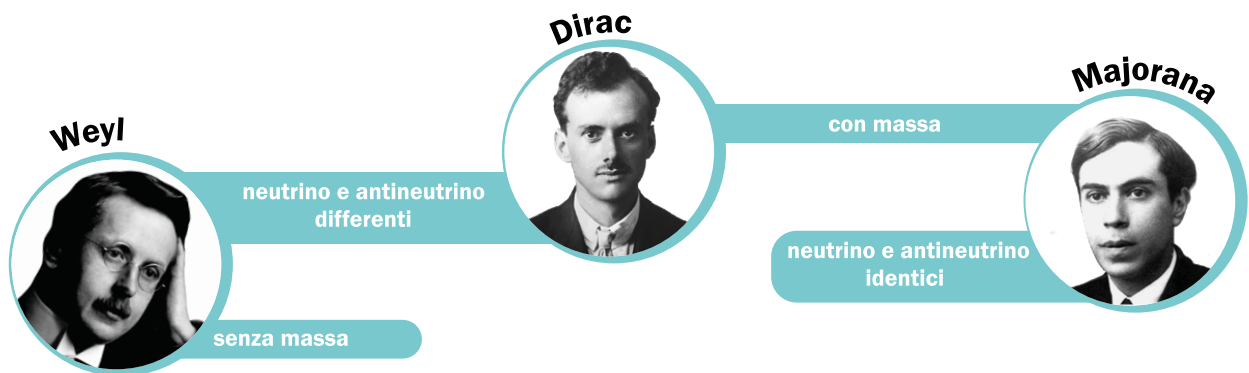
L'ipotesi più semplice è quella di Weyl, che si applica a un neutrino di massa nulla. In questo caso il neutrino è sempre L mentre l'antineutrino è sempre R. Neutrini e antineutrini sono dunque diversi fra loro, e distinti dal senso di rotazione.

Le ipotesi di Dirac e Majorana si applicano invece a neutrini con massa. In questo caso i neutrini e gli antineutrini, come già osservato, si trovano in una sovrapposizione di stati L e R. Nel caso più generale, ipotizzato da Dirac, lo stato L di un neutrino non è identico allo stato L di un antineutrino. Certamente questo è vero per gli stati L di elettrone e positrone, che hanno cariche elettriche opposte e quindi non sono identici. Ma per particelle senza carica come i neutrini, Majorana osservò che si potrebbero identificare, a due a due, gli stati R e L di neutrini e antineutrini: nel qual caso, ogni distinzione fra neutrini (ν) e antineutrini ($\bar{\nu}$) svanirebbe e il neutrino sarebbe identico alla sua antiparticella, come il fotone.

Chi ha ragione fra Weyl, Dirac e Majorana? Al momento non lo sappiamo. Possiamo dire che Weyl potrebbe avere ragione al massimo per il neutrino più leggero, se avesse massa nulla. Nel caso più generale di neutrini con massa, la distinzione fondamentale è fra neutrini del tipo di Dirac o di Majorana. Distinguere questi due casi rappresenta una delle maggiori sfide sperimentali e teoriche dell'attuale fisica delle particelle elementari. Dal punto di vista teorico, particelle di Dirac

b. Rappresentazione delle scale di massa coinvolte nel meccanismo seesaw. I rapporti tra le masse di balenottera, moscerino e Dna (che rappresenta la piccolissima massa dei neutrini) sono approssimativamente gli stessi che intercorrono tra le tre scale di massa del meccanismo.





(come elettroni e quark) ricevono massa unicamente dal meccanismo di Higgs nel modello standard. Se i neutrini fossero di Majorana, allora potrebbero essere le uniche particelle di materia la cui massa ha origine a una scala di massa molto più alta di quella del bosone di Higgs, e quindi attualmente inaccessibile in laboratorio. In questo caso si può mostrare come la piccolissima massa dei neutrini sia inversamente proporzionale alla nuova scala di massa (meccanismo seesaw, ad altalena) (vd. fig. b). Inoltre, si ipotizza che, nei primissimi istanti dopo il Big Bang, la fisica dei neutrini di Majorana possa aver originato la netta prevalenza della materia rispetto all'antimateria, che risulterebbe altrimenti inspiegabile nel nostro universo (meccanismo di leptogenesi) (vd. p. 4, ndr). Si tratta di ipotesi teoriche vertiginose, che rendono generalmente molto più appetibile l'ipotesi di Majorana rispetto a quella di Dirac. Ma la fisica rimane una scienza dove le ipotesi teoriche non possono prescindere dalla conferma sperimentale. Come distinguere dunque sperimentalmente i neutrini di Dirac e di Majorana? Sulla base delle nostre attuali conoscenze, l'unica strada percorribile è quella di cercare tracce di un particolare decadimento nucleare debole, che può aver luogo se e solo se i neutrini sono particelle

di Majorana. Si tratta del cosiddetto doppio decadimento beta senza neutrini. All'interno di un nucleo, due neutroni si trasformano contemporaneamente in protoni, emettendo due elettroni e scambiandosi fra di loro un neutrino. Si può provare che questo scambio ha luogo solo se il neutrino ha massa (e quindi non è di Weyl) ed è identico all'antineutrino (e quindi non è di Dirac). Nel mondo, svariati esperimenti cercano da anni tracce di questo rarissimo decadimento attraverso sensibilissimi rivelatori sotterranei, fra cui Gerda e Cuore nei Laboratori Nazionali del Gran Sasso (vd. p. 18, ndr). In questo campo, una scoperta sperimentale varrebbe sicuramente un premio Nobel. Non ci resta che aspettare fiduciosi e... avere pazienza, tanta pazienza!

c. Rappresentazione grafica delle ipotesi di Weyl, Dirac e Majorana. La direzione del moto del neutrino e dell'antineutrino è rappresentata dalla freccia, mentre lo spin è rappresentato dalla freccia circolare. I due stati L e R hanno una diversa orientazione relativa di moto e spin.

Biografia

Eligio Lisi è dirigente di ricerca presso la sezione Infn di Bari. Si occupa degli aspetti teorici e fenomenologici della fisica del neutrino e astroparticellare. È responsabile di un network dell'Infn e di un progetto di rilevante interesse nazionale del Ministero dell'Università e della Ricerca. Ha ricevuto il Premio Bruno Pontecorvo 2017.

DOI: 10.23801/asimmetrie.2020.29.2