

# La domanda di Majorana

Francesco Vissani

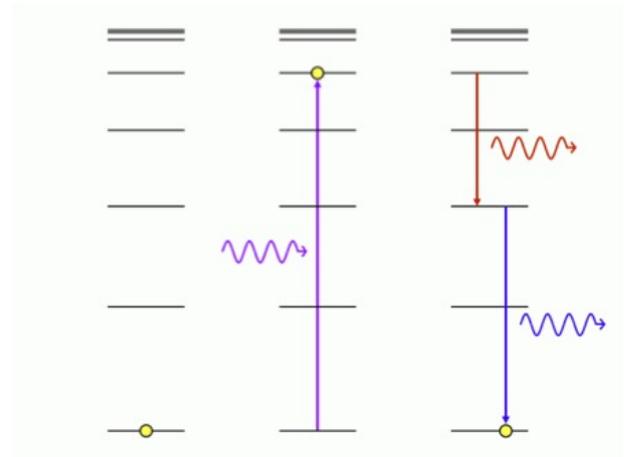
Gran Sasso Science Institute e Laboratori Nazionali del Gran Sasso - INFN, L'Aquila

Lo studio delle particelle elementari è stato una continua fonte di sorprese e questo è particolarmente vero per i neutrini. L'unica prova sperimentale che abbiamo dell'esistenza di nuova fisica, non ancora completamente compresa, è il fatto che essi abbiano massa. Ciononostante, alcune delle più antiche domande su queste particelle restano ancora senza risposta, come quella proposta da Ettore Majorana sulla natura della massa dei neutrini. In questo saggio, ci proponiamo di chiarire il senso di questa domanda. Offriremo un sommario dei risultati parziali ottenuti, illustrando gli sviluppi in corso e discutendo cosa manca per giungere alla risposta.

## Elettroni, positroni, fotoni

Lo studio dell'atomo e dei suoi componenti ha portato alla formulazione della *elettrodinamica quantistica*, una teoria che descrive con impressionante accuratezza le interazioni tra luce e materia, e che si fonda sui principi della relatività e della teoria dei quanti. Vorremmo iniziare questo saggio richiamando alcuni aspetti di questa teoria che erano noti ad Ettore Majorana e che fornirono spunti per le sue ricerche.

Le particelle minime di materia note come elettroni e con carica negativa si legano intorno ai piccoli e pesanti nuclei di carica positiva e spiegano la struttura dell'atomo, i suoi comportamenti e le trasformazioni chimiche. Inoltre, come mo-

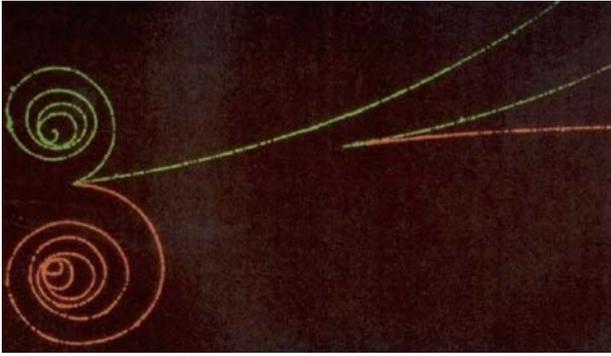


**Figura 1:** Un elettrone atomico assorbe un fotone con energia  $E$  (linea ondulata viola) e va in un livello eccitato. Poi, l'elettrone torna allo stato iniziale emettendo due fotoni con energie  $E_1 + E_2 = E$ . In altre parole, l'energia si conserva ma il numero dei fotoni può variare.

strato da Einstein, anche la luce è composta da particelle elementari dette fotoni.

La prima importante annotazione è che il numero di fotoni *non* è soggetto ad una legge di conservazione. Per esempio, esso può variare in una transizione atomica, come illustrato in Fig. 1.

Per gli elettroni è diverso. Nelle trasformazioni chimiche il loro numero è fissato. Se abbiamo una reazione con energie varie volte più grandi della massa dell'elettrone, come quella mostrata in Fig. 2, l'energia si può convertire in materia. In questo modo si possono produrre nuovi elettroni, ma sempre in associazione con positroni (e cioè antielettroni) che hanno carica opposta. Così, la carica elettrica si conserva, e proprio per questo, il numero *netto* di elettroni non cambia mai.



**Figura 2:** Tracce lasciate in una camera a bolle da elettroni (evidenziati in verde) e positroni (in rosso). La presenza di un campo magnetico permette la misura della carica elettrica. I fotoni che causano le reazioni entrano da sinistra ma non avendo carica elettrica non causano tracce.

Nella elettrodinamica quantistica, la legge di conservazione della carica corrisponde ad un principio di invarianza. Per il lettore interessato ai dettagli, menzioniamo qualche aspetto di questa connessione.

La possibilità che il numero di particelle cambi è descritta introducendo il concetto di campo quantizzato. Nella teoria di Dirac dell'elettrone, ne esiste uno per l'elettrone ed uno per il fotone; essi sono denotati di solito con  $\Psi$  ed  $A_\mu$ .

I due campi differiscono per vari aspetti, inclusi il fatto che il primo è intrinsecamente complesso mentre il secondo è invece reale.<sup>1</sup> Questo significa che  $\Psi$  descrive una transizione in cui un elettrone scompare oppure un antielettrone appare. Invece il campo del fotone è neutro, e non c'è niente che distingua il fotone dall'antifotone: essi sono proprio la stessa particella.

Il principio di invarianza che corrisponde alla carica elettrica afferma che nessuna quantità osservabile varia quando trasformiamo  $\Psi' = e^{i\alpha Q} \Psi$ , dove  $Q = -1$  è la carica elementare dell'elettrone ed  $\alpha$  un parametro reale. Per questo, la teoria non permette che un nuovo elettrone appaia (o scompaia) da solo, ma richiede che esso sia accompagnato da un un positrone. Il numero netto di elettroni è vincolato dal principio di invarianza, che non vincola invece quello di fotoni. Infatti, il campo del fotone non si trasforma affatto, o come direbbe un matematico, si deve

<sup>1</sup>Questo corrisponde a ben noti fatti formali: nella meccanica quantistica la funzione d'onda di Schrödinger è complessa, mentre nella teoria di Maxwell il campo elettrico o quello magnetico sono funzioni reali.

## Reazioni tra particelle elementari

In Fig. 2 mostriamo 2 reazioni in cui si forma una coppia elettrone positrone. Nella prima, un elettrone atomico viene urtato, come schematizzato dalla formula

$$\gamma + e^- \rightarrow e^- + e^- + e^+$$

Nella seconda, l'urto coinvolge un fotone del campo del nucleo atomico  $\gamma^*$ :

$$\gamma + \gamma^* \rightarrow e^- + e^+$$

Dal punto di vista della conservazione della carica elettrica, il cui valore elementare è  $-1$ , queste reazioni corrispondono alle identità algebriche  $0 - 1 = -1 - 1 + 1$  e  $0 + 0 = -1 + 1$ , che mostrano come la carica elettrica sia conservata.

trasformare con  $Q = 0$ , proprio perché il campo  $A_\mu$  è reale.

## Altre particelle neutre

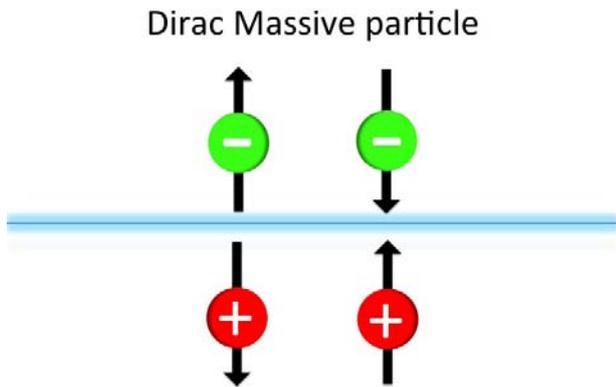
Lo studio del nucleo dell'atomo e delle reazioni di alta energia, permise, fin dall'inizio degli anni '30 del secolo scorso, di scoprire nuove particelle. Tra queste, due di esse risultarono neutre, e cioè senza carica elettrica. La prima è il neutrone, che pesa appena di più del protone e con esso costituisce i nuclei dell'atomo. La seconda è il neutrino, che venne scoperto in modo piuttosto particolare.

In certe trasformazioni nucleari vengono emessi elettroni, detti raggi  $\beta$  secondo la terminologia di Rutherford. Si pensava che fossero descritte da:

$$(A, Z) \xrightarrow{?} (A, Z + 1) + e^-$$

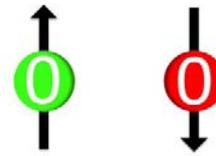
siccome la carica del nucleo deve aumentare di una unità per lasciare la carica elettrica invariata. I fisici si aspettavano che l'energia cinetica  $T$  dell'elettrone emesso fosse semplicemente fissata dalle masse degli atomi iniziali e finali, secondo la legge  $T = (M_{\text{iniziale}} - M_{\text{finale}})c^2$ . Ma sin dagli anni '20 si sapeva che la precedente predizione indica solo il valore massimo di  $T$  che può prendere tutti i valori possibili fino a zero.

Fu Pauli ad ipotizzare che, in questi decadimenti  $\beta$ , fosse emessa anche una particella neutra che porta via l'eccesso di energia. Era proprio



**Figura 3:** Una particella di Dirac ha due stati di spin. Assieme ad essa esiste la sua antiparticella, che per definizione ha carica opposta. Il caso tipico è quello dell'elettrone.

**Majorana Massive Particle**



**Figura 4:** Anche una particella di Majorana ha due stati di spin, ma essa coincide con la propria antiparticella e perciò non ha alcuna carica. In questo, somiglia ad un fotone.

il neutrino, che come supposto da Pauli aveva solo piccolissime interazioni con la materia ordinaria (preciseremo nel seguito il concetto e la distinzione tra neutrini ed antineutrini). Tre anni dopo, grazie a Fermi, le interazioni di queste particelle vennero quantificate e nel 1956 si riuscì ad osservarle in laboratorio.

## La domanda di Majorana

L'esistenza di particelle neutre solleva una domanda sulla loro natura. Possono essere considerate affini al fotone, particella non solo neutra ma addirittura identica alla propria antiparticella, o viceversa, vanno assimilate all'elettrone, di modo che il neutrino e l'antineutrino sono due particelle distinte da qualche ipotetica 'carica'?

Per chiarezza di esposizione, mostriamo in Fig. 3 quali particelle corrispondono ad un campo della teoria di Dirac. Usiamo delle trottole proprio come si fa nei corsi elementari di chimica per raffigurare gli elettroni. Una particella di Majorana è in un certo senso più semplice; essa coincide con la propria antiparticella, come mostrato in Fig. 4. Notiamo che sia nel caso di Dirac che in quello di Majorana, stiamo considerando delle particelle a riposo.

In questo saggio chiameremo *particelle di materia* quelle come l'elettrone, i neutrini, i protoni e i neutroni o i quarks. Esse sono collettivamente chiamate fermioni, essendo soggette alla statistica di Fermi-Dirac, che generalizza il principio di

esclusione a cui obbediscono gli elettroni. Per contrasto, particelle come il fotone, il gluone, le particelle  $W$  e  $Z$  o la particella di Higgs sono soggette alla statistica di Bose-Einstein, e vengono chiamate bosoni.

In termini formali, e considerando la precedente discussione, la domanda di Majorana non è altro che

una ipotesi sulla natura della massa delle particelle neutre di materia.

Si noti che abbiamo dato per scontato che stiamo parlando di particelle dotate di massa, in quanto abbiamo introdotto i concetti di particella di Dirac o di Majorana proprio utilizzando il sistema di riferimento a riposo delle particelle stesse.

Majorana avanzò la sua ipotesi in termini molto generali: proprio come ogni numero complesso può essere scritto come parte reale e parte immaginaria, ogni campo di materia può essere decomposto formalmente in due campi di Majorana. (In termini formali, è corretto asserire che il campo di Majorana è reale, proprio come quello del fotone.)

Ma il caso più interessante è quello in cui un solo campo di Majorana descrive completamente una particella. Siccome questo è possibile soltanto per particelle neutre, originariamente si speculò sul neutrone e sul neutrino. Ma come notato da Racah, neutrone e antineutrone hanno momento magnetico uguale ed opposto; questo richiede che siano descritte dalla teoria di Dirac,



**Figura 5:** Quando le energie cinetiche dei leptoni neutri (neutrini o antineutrini che siano) sono molto maggiori delle loro masse, essi sono più facilmente osservabili. In questo regime, gli esperimenti mostrano che gli stati con spin antiparallelo o parallelo alla direzione del moto interagiscono in modo differente e producono rispettivamente leptoni negativi o positivi. Questo permette di definire, in questo regime, cosa sia un neutrino e cosa un antineutrino.

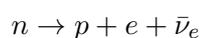
in prima approssimazione almeno <sup>2</sup>. Per questa ragione, la principale particella di materia candidata a soddisfare l'ipotesi di Majorana è proprio l'elusivo neutrino.

## Cosa sappiamo sui neutrini

Dalla scoperta dei neutrini ad oggi, il senso della domanda posta da Majorana è stato sempre più precisato. Per capire come, iniziamo richiamando le principali cose che abbiamo imparato sui neutrini. Discuteremo certe particolarità delle loro interazioni ed i convincenti indizi che queste particelle siano dotate di massa.

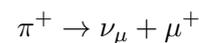
**I tre tipi di neutrini** Siamo certi che esistono tre tipi diversi di neutrini. Ognuno di essi è associato ai rispettivi leptoni carichi  $e, \mu, \tau$  che vengono prodotti nelle interazioni di neutrini o nei decadimenti. Per questo spesso vengono chiamati leptoni neutri e sono denominati  $\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$ .

Consideriamo per esempio il decadimento del neutrone



<sup>2</sup>Non possiamo escludere che neutroni ed antineutroni si mescolino tra di loro in piccola misura. In questo caso gli stati di massa definita sarebbero descritti dalla teoria di Majorana.

o un altro decadimento tipico come quello delle particelle dette pioni con cui si producono fasci di neutrini negli acceleratori,



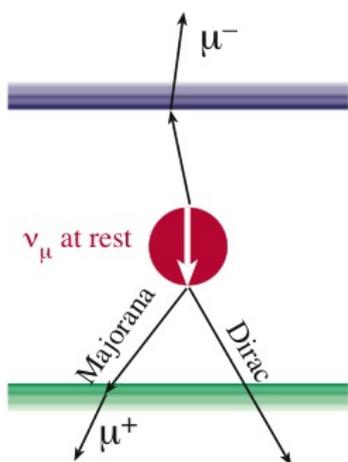
Da quanto ne sappiamo, il primo decadimento dà sempre e solo leptoni neutri  $\nu_e$ , il secondo sempre e solo leptoni neutri  $\nu_\mu$ ; sulla distinzione tra neutrini ed antineutrini, si veda la sezione immediatamente successiva.

**Peculiari interazioni e conseguenze** Passiamo a parlare delle interazioni di neutrino. Una prima proprietà, nota sin dai tempi di Fermi, è che all'aumentare della energia i neutrini interagiscono sempre di più. Questo ha come conseguenza pratica che, più grande è l'energia dei neutrini, più facile è osservarli. Allo stesso tempo, gli effetti più evidenti delle masse dei neutrini sono viepiù trascurabili in questo regime.

Quando le masse dei neutrini sono piccole rispetto alla loro energia cinetica, emerge una seconda e davvero sorprendente proprietà delle interazioni: le particelle con spin parallelo alla direzione del moto interagiscono producendo leptoni carichi positivi, mentre quelle con spin antiparallelo interagiscono producendo leptoni carichi negativi, come mostrato in Fig. 5. Pertanto, nel caso di particelle in moto veloce, è possibile definire i primi come antineutrini ed i secon-

di come neutrini, indipendentemente da quale sia la natura della loro massa. Questo spiega la scelta dei colori usati per denotare gli stati di particella in Fig 4, analoga a quella di Fig. 3.

Questo implica che, nel caso di Dirac, lo stato di neutrino con spin parallelo al suo moto e l'antineutrino con spin antiparallelo al suo moto non producono alcun leptone, nè positivo nè negativo. Si parla in questo caso di stati sterili. Il punto è ulteriormente illustrato per mezzo dell'esperimento concettuale di Fig. 6. Notiamo *en passant* che l'universo stesso funge da sorgente e quindi, a seguito della sua espansione, da rallentatore di neutrini: si sta valutando la possibilità di condurre esperimenti reali seguendo queste idee generali.



**Figura 6:** In una stanza, abbiamo neutrini  $\nu_\mu$  con spin orientati in basso. Accelerandoli verso il soffitto produrranno  $\mu^-$ . Accelerandoli verso il pavimento daranno  $\mu^+$  se sono particelle di Majorana ma se sono di Dirac non interagiranno.

**Cariche leptoniche conservate – o no?** In tutte le reazioni che sono state investigate, usando particelle che si muovono molto velocemente, si è visto che la somma del numero di leptoni carichi e neutri resta sempre la stessa. Si può tenere conto di questo fatto postulando l'esistenza di una carica leptonica conservata. Ma come abbiamo precedentemente osservato, non è possibile dare una definizione di neutrini ed antineutrini che sia valida in tutti i sistemi di riferimento, se le particelle sono di Majorana.

Diciamolo più precisamente. Se i leptoni neutrini avessero quel tipo di massa ipotizzato da Dirac (o se non l'avessero proprio) neutrini ed an-

### Ricerche dirette di massa dei neutrini

**VELOCITÀ DEI NEUTRINI:** Dalle osservazioni della supernova 1987A abbiamo desunto che la massa sia inferiore a 5.8 eV.

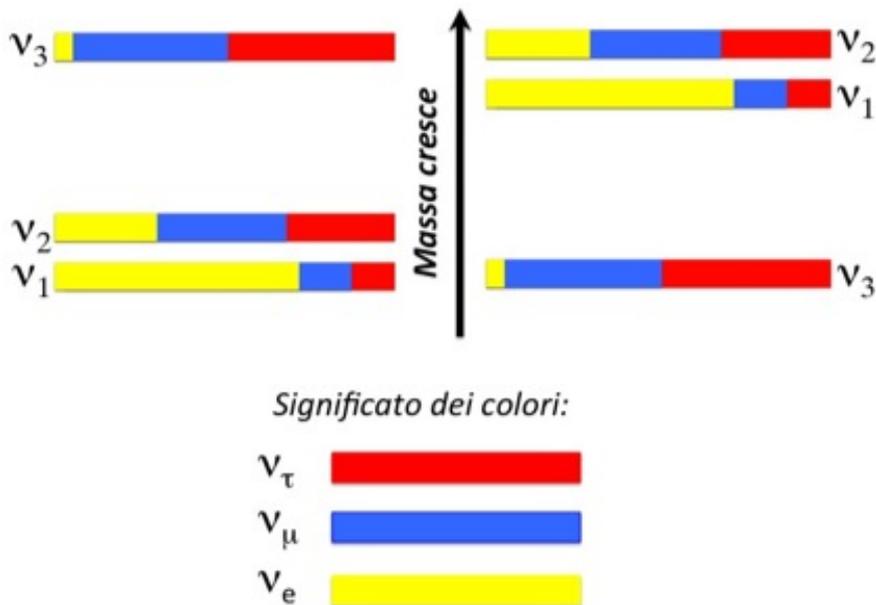
**SPETTRO  $\beta$ :** Si misurano gli elettroni corrispondenti a neutrini con piccola energia cinetica. Mainz e Troitsk hanno ottenuto un limite superiore di 2 eV.

**COSMOLOGIA:** i neutrini sono prodotti nei primi istanti di vita dell'universo, e quando il fondo cosmico di radiazione diventa visibile, la loro temperatura è circa 0.2 eV. I limiti sulle masse sono inferiori a 0.1 eV.

tineutrini sarebbero ben distinti. Se invece essi possedessero il tipo di massa postulato da Majorana, la distinzione non avrebbe validità assoluta e dovrebbero esistere processi in cui la carica leptonica viene violata, come discuteremo meglio dopo. Pertanto, la questione della conservazione (o meno) della carica leptonica merita i più accurati esami sperimentali.

**Evidenze che i neutrini hanno massa** I tentativi più diretti di misurare la massa dei neutrini non sono stati ancora coronati da successo. I metodi noti sono tre e sono illustrati nel riquadro. Solo un quarto metodo, piuttosto indiretto ma estremamente sensibile, ha fornito evidenze convincenti che le masse non siano zero.

Questo metodo sfrutta la natura ondulatoria dei neutrini. Per capire i principi su cui è basato, partiamo dall'analogia tra neutrini e luce. Come è noto, un raggio di luce che si propaga in una data direzione ha due possibili stati di polarizzazione ortogonali alla direzione del moto. Possiamo produrre luce polarizzata in una certa direzione con un filtro detto polarimetro. Ma se poi (con un secondo filtro) cerchiamo di polarizzare ulteriormente la luce nella direzione ortogonale alla prima, non troviamo niente: la luce viene assorbita del tutto. Questo permette di concludere che i due stati di polarizzazione sono tanto diversi quanto un neutrino  $\nu_e$  ed uno  $\nu_\mu$ . D'altro canto, è possibile trasformare uno stato di polarizzazione nell'altro per mezzo di



**Figura 7:** Conosciamo la distribuzione tra i tre stati di massa  $\nu_1, \nu_2, \nu_3$  del neutrino elettronico  $\nu_e$  (in giallo) che è la cosa che ci interessa di più per la discussione. Abbiamo misurato le differenze di masse quadre, ma non la massa del neutrino più leggero: stando solo alle informazioni empiriche, su base speculativa, essa potrebbe essere relativamente grande. Non sappiamo ancora se lo spettro di massa dei neutrini somigli a quello dei fermioni carichi (il caso illustrato in alto a sinistra, detto spettro normale), oppure no (il caso illustrato in alto a destra, detto spettro inverso).

particolari cristalli, che hanno la caratteristica di propagare i due stati di polarizzazione con velocità differenti. A questo punto ci chiediamo, è possibile che qualcosa del genere avvenga per i neutrini?

Consideriamo un neutrino di tipo  $\nu_\mu$  prodotto in un decadimento. Assumiamo che questo neutrino sia uno stato composito (o come si dice in meccanica quantistica, *sovrapposto*) di più neutrini con masse  $m_i$ , con  $i = 1, 2, 3$ . Le loro funzioni d'onda oscillano con frequenze  $f_i$ , proporzionali alle loro energie.<sup>3</sup> Siccome le masse sono diverse, energie e frequenze sono diverse: dunque le funzioni d'onda delle tre componenti non oscillano in fase. Per questo, con lo scorrere del tempo, un neutrino di tipo  $\nu_\mu$  non resta uguale a se stesso, ma acquista una certa probabilità di diventare  $\nu_e$  o  $\nu_\tau$ . Si parla in gergo di *oscillazioni di neutrino* o anche, forse più precisamente, di trasformazioni di neutrino.

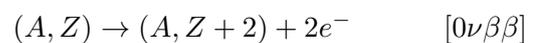
Esperimenti di neutrini dal sole, dalla atmosfera terrestre, da reattori e da fasci artificiali hanno permesso la verifica di queste idee proposte da Pontecorvo. In questo modo abbiamo imparato molto sulle masse dei neutrini: si veda la Fig. 7 per un sommario delle informazioni disponibili.

Non conosciamo ancora la massa del neutrino più leggero e dobbiamo ancora dirimere una im-

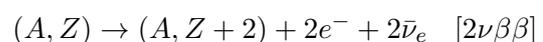
barazzante ambiguità sul tipo di spettro di massa. I due spettri, compatibili con le informazioni sperimentali oggi disponibili, sono detti *normale* e *inverso*. Ma certo, le evidenze che i neutrini abbiano massa rendono urgente capire quale tipo di massa essi abbiano: se quello suggerito da Dirac, o quello suggerito da Majorana.

## Alla ricerca della creazione di elettroni

Da più di 70 anni, gli studiosi delle particelle elementari sono alla ricerca di una ipotetica transizione nucleare, che, se osservata, fornirebbe una risposta alla domanda di Majorana. Si tratta della seguente reazione, nella quale un nucleo atomico si trasforma aumentando la sua carica di due unità ed emettendo due elettroni,



Questa reazione viene detta in gergo *doppio decadimento  $\beta$  senza emissione di neutrini* e indicata per brevità con la sigla  $0\nu\beta\beta$ . Essa può essere messa in contrasto con un'altra reazione, sua analoga,



detta in gergo *doppio decadimento  $\beta$  con emissione di neutrini*, indicata come  $2\nu\beta\beta$ . Mentre la seconda reazione è stata osservata per vari nuclei,

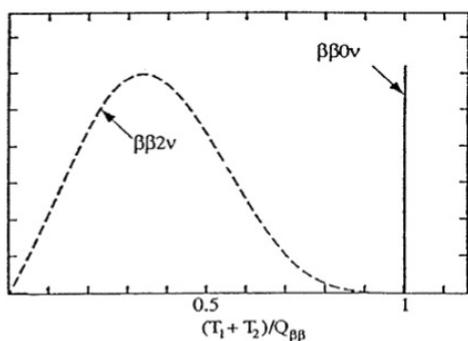
<sup>3</sup>Vale  $E_i = hf_i$ , dove  $h$  è la costante di Planck e dove  $E_i = \sqrt{(pc)^2 + (m_i c^2)^2}$ , secondo Einstein;  $p$  è l'impulso del neutrino e  $c$  la velocità della luce.

## Doppio decadimento $\beta$ senza neutrini = trasformazione nucleare con creazione di elettroni

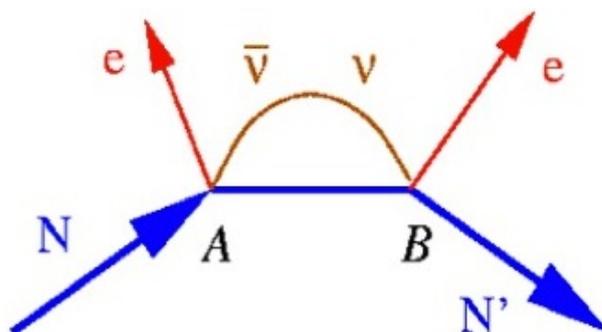
Quando si parla di raggi  $\beta$  per riferirsi all'emissione di elettroni ci si conforma alla terminologia usata da Rutherford ma si paga un pesante prezzo alla chiarezza di esposizione: gli elettroni sono noti a tutti mentre i raggi  $\beta$  fanno parte del gergo specialistico.

Inoltre, parlare di *doppio decadimento  $\beta$  senza neutrini* significa definire un processo per l'assenza di qualcosa, che non aiuta di certo un profano a capire di cosa si sta parlando.

In aggiunta a questo, la denominazione tradizionale tende a nascondere il fatto che non stiamo ragionando di un processo tra i tanti, ma, piuttosto, di uno in cui avviene creazione di elettroni. In altre parole, questo processo nucleare ci offre la possibilità di indagare sperimentalmente l'origine della materia. Non è cosa da poco: a fronte delle numerosissime speculazioni teoriche su di questa tematica, non si dispone ancora di alcuna informazione solida a riguardo.



**Figura 8:** Illustrazione degli spettri energetici attesi nei due tipi di doppio decadimento  $\beta$ . Nell'asse orizzontale viene riportata la somma delle energie cinetiche  $T_i$  degli elettroni, divisa per l'energia massima disponibile nel decadimento,  $Q_{\beta\beta}$ , pari alla differenza tra la massa atomica della specie chimica iniziale e quella finale.



**Figura 9:** Diagramma di Feynman che mostra come la massa di Majorana dia luogo al decadimento doppio  $\beta$  senza emissione di neutrini.

la prima non è stata ancora osservata. La sua caratteristica saliente, utilizzata nella ricerca sperimentale, è che i due elettroni portano via la massima energia disponibile, come mostrato in Fig. 8.

Passiamo adesso a delineare la connessione di questo processo con la domanda di Majorana. Un comodo ausilio per questo scopo è il diagramma di Fig. 9, detto diagramma di Feynman. Esso mostra come la presenza di una massa di Majorana implichi l'esistenza della transizione nucleare  $0\nu\beta\beta$  che stiamo discutendo. Vediamo un po' meglio il suo significato. Le linee blu in Fig. 9 descrivono il nucleo iniziale  $N$  di carica  $Z$  che si trasforma nel nucleo finale  $N'$  di carica  $Z + 2$ , dopo essere diventato, nel tratto compreso tra i vertici  $A$  e  $B$ , un nucleo di carica  $Z + 1$ . In conformità alla teoria di Fermi, nei vertici vengono

emessi elettroni (raggi  $\beta$ ) e leptoni neutri  $\nu_e$ , ma questi ultimi si 'annichilano'. Questo è possibile solo se la massa dei neutrini è del tipo di Majorana, che implica che neutrini ed antineutrini siano lo stesso tipo di particella. In questa situazione il neutrino emesso in  $A$  è riassorbito in  $B$ .

Numerosi esperimenti hanno contribuito alla ricerca del doppio decadimento  $\beta$  senza neutrini. I progressi maggiori sono stati ottenuti con esperimenti basati su cristalli di germanio (Heidelberg-Moscow, IGEX, GERDA) e sul gas nobile xenon (KamLAND-Zen, EXO-200). Essi hanno mostrato come le vite medie del decadimento eccedano la ragguardevole cifra di  $10^{25}$  anni. Nuovi esperimenti sono prossimi ad entrare in funzione. Due di quelli ospitati dai Laboratori Nazionali del Gran Sasso sembrano molto promettenti: CUORE (Fig. 10) basato su cristalli di ossido di tellurio, e GERDA, basato sul decadimento del nucleo di germanio, che ha già preso dati e sta entrando in una seconda fase operativa.



**Figura 10:** Il criostato dell'esperimento CUORE.

Si sta iniziando a ragionare di una prossima generazione di esperimenti, che utilizzi rivelatori ancora più grandi e sensibili.

Quanto alle predizioni delle vite medie, ci sono due tipi di ostacoli. Per prima cosa, non conosciamo ancora con precisione le masse dei neutrini e quindi non possiamo predire con sicurezza il valore del parametro  $m_{\beta\beta}$ , proporzionale all'ampiezza di decadimento. Inoltre, è vero che la dinamica a livello di neutrini è ben compresa, ma i nuclei atomici sono oggetti complessi, ed una loro descrizione accurata è difficile. Ne discuteremo nella prossima sezione.

## Un contesto in evoluzione

Negli ultimi anni, sono emerse nuove importanti informazioni dalla cosmologia e dalla fisica nucleare teorica che testimoniano la vivacità e la natura multidisciplinare di questo tipo di ricerche. Ne parliamo qui sotto, mettendo in luce le implicazioni sulla interpretazione del doppio decadimento  $\beta$  senza emissione di neutrini.

### Il parametro $m_{\beta\beta}$

La transizione  $0\nu\beta\beta$  avviene se i neutrini hanno massa di Majorana diversa da zero. Quello che conta è la massa del neutrino elettronico  $m_{\beta\beta}$  (o per la precisione, il valore assoluto dell'elemento della matrice di massa dei neutrini elettronici). Il suo valore viene calcolato come somma delle masse dei singoli neutrini  $m_i$ , pesata con la matrice di mescolamento del neutrino elettronico  $U_{ei}$

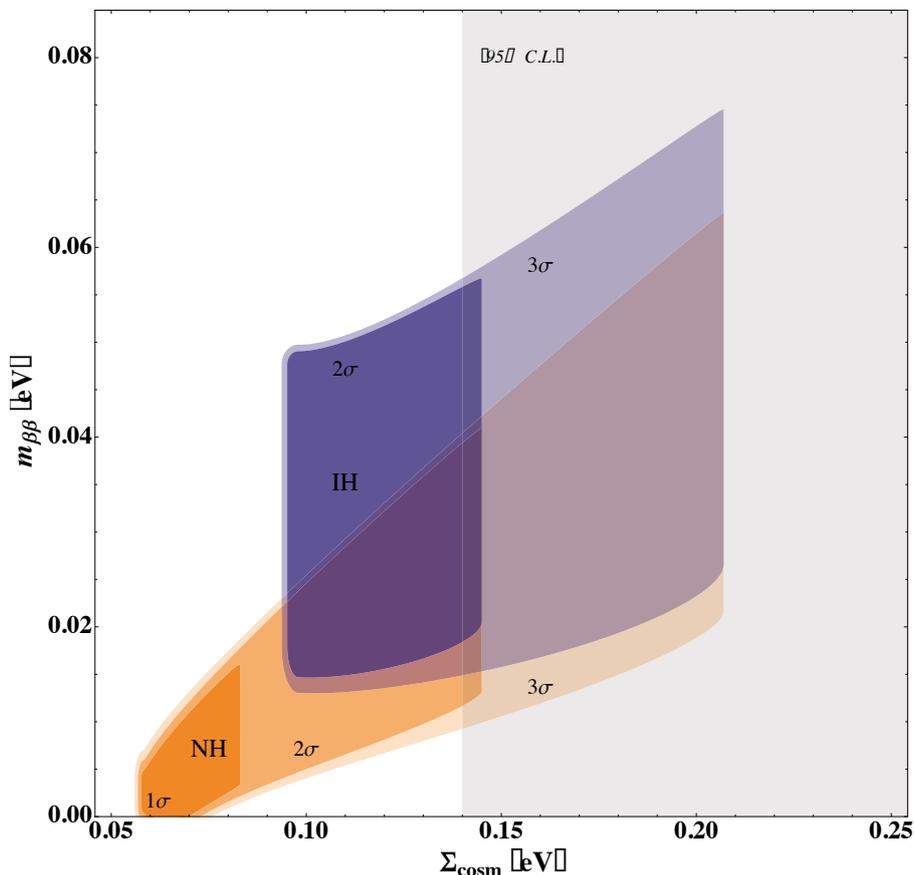
$$m_{\beta\beta} = \left| \sum_{i=1}^3 U_{ei}^2 m_i \right|.$$

La vita media del decadimento  $0\nu\beta\beta$  è inversamente proporzionale ad  $m_{\beta\beta}^2$ .

**Impatto della cosmologia** I neutrini hanno un ruolo importante in astrofisica e cosmologia. Per illustrare questo, ricordiamo che il tasso di espansione dell'universo dipende dal numero di specie di neutrini. Esso ha un impatto sulle abbondanze cosmologiche degli elementi leggeri (che vengono fissate nei primi secondi di vita dell'universo) e anche sulla distribuzione delle perturbazioni di temperatura del fondo di radiazione cosmica (che viene fissata quando l'universo ha varie centinaia di migliaia di anni). Entrambe le osservazioni sono compatibili con l'ipotesi che solo i tre neutrini noti contribuiscano all'espansione dell'universo.

Ancora più importante per quanto segue è il ruolo cosmologico delle masse dei neutrini. Per gli effetti che consideriamo, tutto quello che conta è l'accoppiamento alla gravità, che non distingue neutrini di Dirac o di Majorana. Ci sembra corretto ricordare che nei decenni scorsi, la cosmologia ha in varie occasioni suggerito che le masse dei neutrini fossero diverse da zero, ma nel tempo, queste indicazioni si sono indebolite. I risultati del 2015 convergono nell'indicare invece uno stringente limite superiore sulle masse dei neutrini. Assumendo che i neutrini siano di Majorana, concludiamo che c'è un importante limite sulla massa  $m_{\beta\beta}$  che regola l'ampiezza del decadimento doppio  $\beta$  senza neutrini. Esso è illustrato e discusso in Fig. 11.

Per il seguito della discussione, terremo presente tanto il limite superiore su  $m_{\beta\beta}$  indicato



**Figura 11:** Per interpretare correttamente l'assunzione che la transizione nota come doppio  $\beta$  senza neutrini avvenga a causa delle masse di Majorana dei tre neutrini noti bisogna tenere conto di tutte le informazioni sperimentali sulle masse dei neutrini.

In particolare, l'interpretazione di recenti osservazioni cosmologiche conduce ad un limite superiore sulla somma delle masse dei neutrini  $\Sigma_{\text{cosm}} = m_1 + m_2 + m_3$ , che a sua volta implica un limite sulla combinazione di massa dei neutrini,  $m_{\beta\beta}$ , che regola il tasso di doppio decadimento  $\beta$  senza neutrini.

Mostriamo qui a fianco le regioni permesse per  $m_{\beta\beta}$ , a vari livelli di confidenza, nelle ipotesi che lo spettro di massa dei neutrini sia quello normale (arancione) oppure quello inverso (blu).

dalla figura, quanto il valore piuttosto specifico

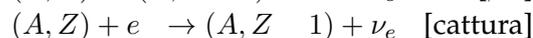
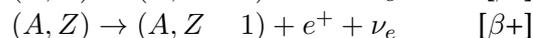
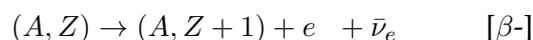
$$m_{\beta\beta} = 8 \text{ meV}$$

compatibile con le indicazioni correnti e possibile per uno spettro di massa dei neutrini normale: si veda la Fig. 11.

**Incertezze dalla fisica del nucleo** Con questa precisione si può prevedere la vita media del processo  $0\nu\beta\beta$ ? Dieci anni fa, la gran parte dei fisici avrebbe risposto pressapoco come segue: siccome le varie e numerose previsioni teoriche differiscono di un fattore di due o tre, sarebbe incauto assumere che si possa fare molto di meglio. L'opinione generale iniziò a mutare quando il gruppo di Faessler e collaboratori produsse calcoli che esibivano un errore formale del 10-20%, ed i suoi calcoli risultarono in ragionevole accordo con altri calcoli, indipendenti e condotti con metodi completamente diversi, svolti dal gruppo di Iachello e collaboratori.

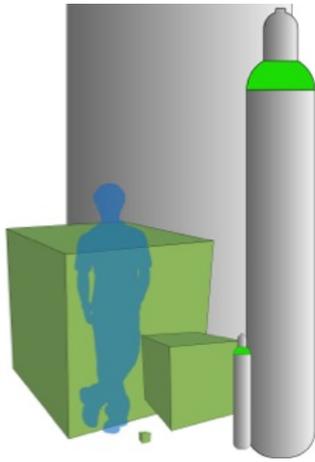
Ma la cautela è d'obbligo. Consideriamo infatti processi simili, come il decadimento  $\beta$  singolo

o la cattura di un elettrone dell'atomo,



o anche il  $2\nu\beta\beta$ . Si trova che l'accordo tra previsioni e misure è entro un fattore intorno a 2-3. L'impulso dei neutrini in questi processi è di vari ordini di grandezza più piccolo dell'impulso dei neutrini coinvolti nel  $0\nu\beta\beta$ , poiché in quest'ultimo processo, i neutrini sono confinati all'interno del raggio nucleare, e devono soddisfare la relazione di indeterminazione di Heisenberg. Ma questo non implica che le previsioni che riguardano il  $0\nu\beta\beta$  siano molto più affidabili delle altre.

Diversi autori hanno avanzato una interessante congettura, che forse potrebbe aiutare a chiarire la situazione. Nel decadimento  $\beta$ , anche i nucleoni hanno interazioni caratteristiche che corrispondono a quelle già discusse per i neutrini. I nucleoni sono soggetti ad intensi accoppiamenti con le correnti di spin, che non hanno analogo nelle interazioni elettromagnetiche. Le relative costanti di accoppiamento, dette accop-

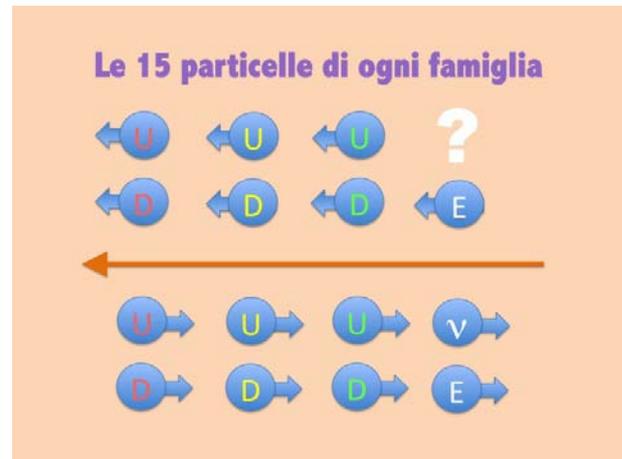


**Figura 12:** Masse richieste per dar luogo ad un singolo evento di segnale dal doppio  $\beta$  senza neutrini in 5 anni di osservazione. I cubi sono di germanio, le bombole di gas contengono xenon: la più grande è fuori scala. Nei tre casi, si assume che la vita media vera coincida con il presente limite sperimentale, o che le vite medie vere corrispondano a  $m_{\beta\beta} = 8$  meV con e senza modifiche dell'accoppiamento assiale nel mezzo nucleare.

piamenti assiali, sono misurate e ben note nel caso di nucleoni liberi, ma sembra ragionevole congetturare che gli accoppiamenti dei nucleoni nel mezzo nucleare possano essere diversi da quelli liberi.

Sviluppando questa congettura, e postulando che gli accoppiamenti assiali nel nucleo siano modificati, si può recuperare un accordo molto migliore tra predizioni sui processi di decadimenti  $\beta$  con emissione di neutrini e misure. Modificando il valore degli accoppiamenti assiali si trova che le predizioni per  $0\nu\beta\beta$  cambiano: si trova che il tasso di reazione atteso diminuisce fino a 5 o 6 volte.

Se ci proponiamo di osservare un singolo evento di segnale in un certo tempo di presa dati e se ipotizziamo ottimisticamente che non ci siano eventi spuri (rivelatore ideale), la correttezza della congettura implica la necessità di aumentare dello stesso fattore la massa del rivelatore. Nella Fig. 12, si visualizza quale massa servirebbe per vedere un singolo evento di  $0\nu\beta\beta$  in varie ipotesi. In particolare, illustriamo nella stessa figura quali sarebbero le implicazioni della congettura sopra descritta, assumendo che valga  $m_{\beta\beta} = 8$  meV.



**Figura 13:** Le particelle del modello standard di una singola famiglia (non mostriamo le altre due, nè le antiparticelle per non appesantire la figura). Nella parte superiore, le particelle con spin parallelo all'impulso; nella parte inferiore, quelle con spin antiparallelo all'impulso. I tre tipi di quarks vengono distinti dal numero quantico di "colore". Il punto di domanda sottolinea l'assenza di un neutrino con spin parallelo all'impulso.

## Oltre la fisica nota

Le evidenze che i neutrini abbiano massa mostrano che il modello teorico di riferimento che conosciamo, detto modello standard, è incompleto e va modificato. Ci sono varie opzioni plausibili, e, in queste ultime pagine, ne discutiamo brevemente una che suggerisce che i neutrini abbiano massa di Majorana.

Come è noto, ci sono 2 tipi di particelle di materia: i quark, sensibili alle interazioni forti, ed i leptoni (carichi e neutri), che invece non lo sono. Tutte queste particelle, tranne forse i leptoni neutri, hanno natura di Dirac. Quindi la direzione del loro spin può avere componenti parallele o antiparallele alla direzione del moto. Nel modello standard si postula che i neutrini abbiano solo uno di questi stati. L'altro, se anche fosse presente, non interagisce con la materia come mostrato in Fig. 13.

Ma è lecito pensare che anche l'altro tipo di leptoni neutri esista e che prenda parte a nuove interazioni, corrispondenti a scale di massa più grandi. Difatti, la struttura del modello standard ispira l'idea che proprio questi nuovi neutrini abbiano grandi masse del tipo di Majorana. In questo modo, spieghiamo la ragione per cui non li osserviamo e ne derivano due conseguenze

molto interessanti. Per prima cosa, ne segue che i neutrini noti hanno una piccola massa di Majorana. Inoltre, in questi modelli diventa possibile spiegare l'origine della materia nei primi istanti dell'universo. Non discuteremo oltre questi importanti argomenti che sono oggetto di intensi dibattiti teorici e che ci si augura di riuscire a verificare con adeguati esperimenti nel futuro, sperabilmente dopo la misura della vita media della transizione  $0\nu\beta\beta$ .

## Sommario e discussione

Anche se i neutrini sono piuttosto lontani dalla nostra esperienza quotidiana, a causa delle loro debolissime interazioni, essi hanno avuto un ruolo centralissimo nel disegnare il modello di riferimento delle particelle elementari. Da quando ci siamo resi conto che possiedono masse piccole ma non nulle, sono diventati ancora più importanti e ci costringono a capire come modificare le nostre idee correnti sul modello standard.

Affrontare la domanda di Majorana sulla natura delle masse dei neutrini è diventato più urgente che mai. L'ipotesi di Majorana sulle masse è compatibile con tutte le informazioni disponibili e si armonizza bene con le idee teoriche correnti. Il modo più ragionevole per verificarla è la ricerca della transizione nota come doppio  $\beta$  senza neutrini.

Un risultato positivo avrebbe un enorme importanza: questo processo implica la creazione di elettroni, e cioè di materia ordinaria. Purtroppo per adesso non abbiamo avuto ancora riscontri dagli esperimenti. Quanto alla teoria, abbiamo discusso le ragioni per cui non siamo in grado di predire in modo affidabile il segnale atteso nè di escludere che esso sia molto difficile da verificare.

In questa situazione, ci sembra che il meglio che si possa fare sia semplicemente di continuare a chiarirci le idee e soprattutto di non desistere dagli sforzi sperimentali.

---

**Francesco Vissani:** Ricercatore dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN) presso i Laboratori Nazionali del Gran Sasso (LNGS), coordinatore del programma di PhD in fisica astro-particellare presso il Gran Sasso Science Institute (GSSI) di L'Aquila, si occupa principalmente di fisica e astrofisica dei neutrini dal punto di vista teorico.

È molto interessato alla didattica e comunicazione della fisica a tutti i livelli ed è sempre contento di discutere di fisica con le persone interessate.

Ha avuto piacere di lavorare sugli argomenti di questa nota con due giovani colleghi sperimentali, Simone Marcocci e Stefano Dell'Oro (quest'ultimo in tenuta da lavoro, in Fig. 10) e con il noto teorico Alessandro Strumia, con cui ha anche scritto un lungo lavoro di rassegna proprio sui neutrini. I risultati di questi studi sono descritti in vari articoli, che il lettore interessato può reperire dal database pubblico inSPIRE,

<http://inspirehep.net/?ln=en>

I diagrammi più belli sopra inclusi sono frutto di questi lavori in collaborazione.

