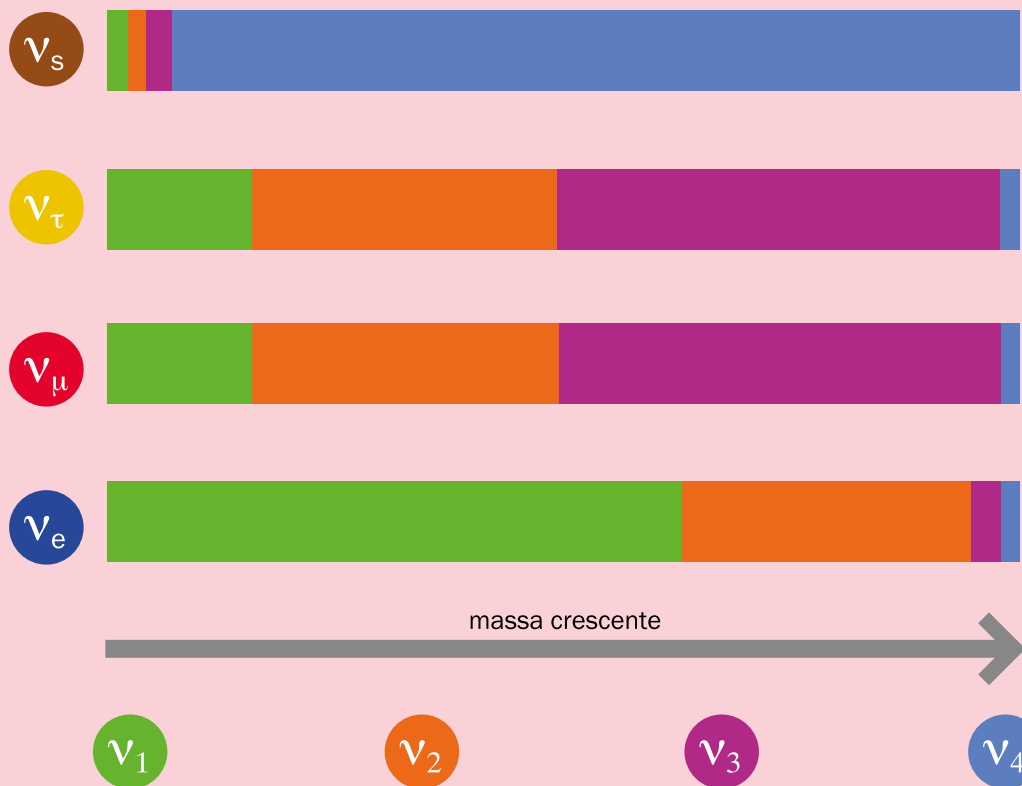


Gli indifferenti

L'ipotesi dei neutrini sterili

di Carlo Giunti



a.
Ciascuno neutrino di definito sapore ($\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau, \nu_s$) è una sovrapposizione quantistica di quattro stati di massa ($\nu_1, \nu_2, \nu_3, \nu_4$) con valori di massa crescente. I tre neutrini attivi (ν_e, ν_μ, ν_τ) devono essere composti da una piccolissima percentuale dello stato di massa più pesante (ν_4), mentre il neutrino sterile (ν_s) è quasi interamente composto da ν_4 .

Quanti neutrini ci sono? Ne conosciamo con certezza tre: il neutrino elettronico, quello muonico e quello tauonico. Questi sono i cosiddetti “neutrini attivi”, che conosciamo perché interagiscono con la materia tramite le interazioni deboli. Sono quasi identici, con la sola differenza che quando interagiscono con la materia producono rispettivamente un elettrone, un muone o un tauone, come indicato dai loro nomi. Questa caratteristica viene chiamata “sapore”. La somiglianza tra i tre neutrini attivi permette le oscillazioni, che sono trasformazioni periodiche del sapore lungo la traiettoria di un neutrino. Sappiamo anche che non possono

esistere più di tre neutrini attivi, perché esperimenti all’acceleratore Lep del Cern hanno dimostrato, negli anni ’90, che i decadimenti del bosone Z^0 , mediatore delle interazioni deboli neutre, producono solo tre neutrini attivi. Quindi, se esistono più di tre neutrini, quelli ipotetici devono essere “sterili”, cioè non interagenti con la materia attraverso le interazioni deboli. La suggestiva terminologia “attivo-sterile” è stata inventata dal fisico italiano Bruno Pontecorvo nel 1967, mentre viveva e lavorava a Dubna, vicino a Mosca, nell’ex Unione Sovietica. In quasi tutti i contesti l’aggettivo sterile ha una connotazione negativa, che

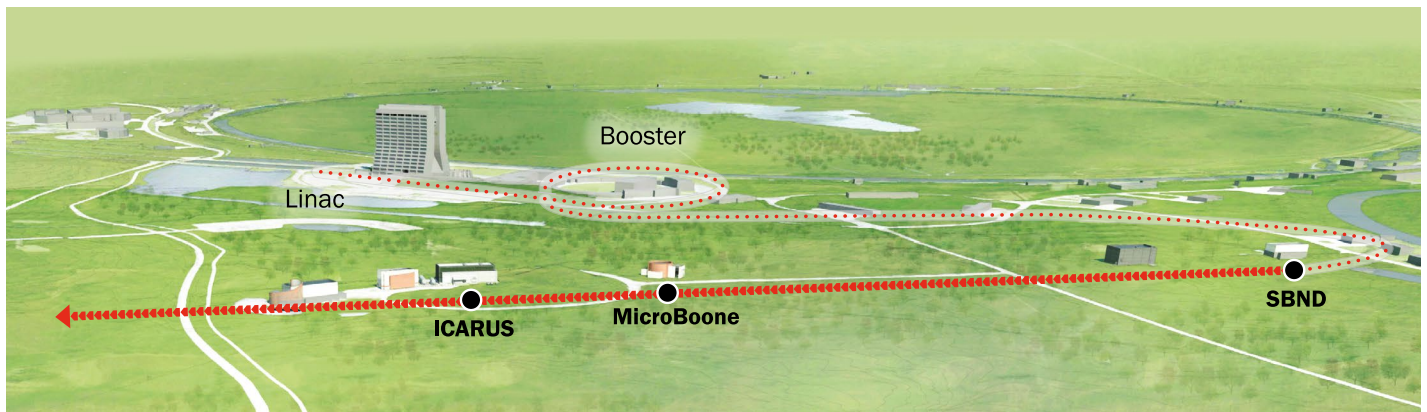
denota l’assenza di vita o l’incapacità alla riproduzione. I neutrini sterili, invece, sono una panacea per la fisica fondamentale contemporanea, che sta cercando di capire quale sia la teoria fondamentale della natura. La teoria attuale più completa è il cosiddetto modello standard, che spiega tre delle quattro forze fondamentali conosciute: la forza forte, che tiene insieme i quark nei nucleoni (protoni e neutroni) e i nucleoni nei nuclei atomici, la forza debole che determina i decadimenti nucleari, e l’elettromagnetismo che lega gli elettroni ai nuclei per formare gli atomi, oltre a generare i fenomeni elettromagnetici macroscopici che tutti

noi sperimentiamo quotidianamente. Resta esclusa solo la quarta forza fondamentale: la gravità, descritta da una teoria non quantistica, la relatività generale di Albert Einstein.

Il modello standard prevede che esistano solamente i tre neutrini attivi, che dovrebbero essere privi di massa, come si credeva fino alla scoperta delle oscillazioni dei neutrini nel 1998. Oggi sappiamo che il modello standard deve essere esteso per spiegare la piccola massa dei neutrini necessaria per le oscillazioni. Parliamo di estensione perché abbiamo buoni motivi per credere che debba esistere una teoria più fondamentale, che include il modello standard e lo generalizza per dar conto di almeno altre due questioni irrisolte: la descrizione unificata quantistica delle quattro forze fondamentali (compresa quindi la gravità) e la probabile esistenza della materia oscura e dell'energia oscura. Come si può estendere il modello standard per spiegare la massa dei neutrini? E come questa estensione è legata alla possibile esistenza di neutrini sterili? Consideriamo innanzitutto il fatto che i tre neutrini attivi corrispondono alle tre generazioni esistenti di leptoni e quark, e sappiamo che non esistono altri quark o leptoni carichi analoghi a quelli conosciuti. Quindi perché si ipotizza che possano esistere degli altri neutrini? Il fatto è che i neutrini sono speciali, perché sono gli unici fermioni fondamentali neutri, cioè senza una carica elettrica. Nelle teorie che estendono il modello standard è prevista l'esistenza di nuovi fermioni che non partecipano alle interazioni debole ed elettromagnetica. Questi fermioni non standard sono neutri come i neutrini e possono accoppiarsi ai tre neutrini attivi tramite la loro massa (se non ci sono altre proprietà che lo impediscono). I fermioni neutri non standard possono avere diversi nomi specifici nelle varie teorie ("neutrini destrorsi", oppure "axini" e "modulini" in teorie supersimmetriche, o "neutrini *mirror*" in teorie che ipotizzano materia speculare), ma in pratica possono essere tutti classificati come neutrini sterili, perché si mescolano ai neutrini attivi tramite la loro massa ma non interagiscono con la materia tramite le interazioni deboli del modello standard. Ciò è meraviglioso, perché significa che i neutrini sterili possono metterci in comunicazione con il mondo della fisica fondamentale al di là del modello standard e ampliare in modo straordinario la nostra conoscenza degli



b.
L'esperimento Gallex ha misurato il flusso dei neutrini solari nei Laboratori Nazionali del Gran Sasso dell'Infn negli anni '90. Poiché ha osservato un numero di neutrini elettronici inferiore rispetto a quello previsto, è stato ipotizzato che una parte di questi sia sparita perché si è trasformata in neutrini sterili per effetto delle oscillazioni.



aspetti fondamentali della natura. Esistono però quattro problemi che rendono la ricerca dei neutrini sterili un'impresa difficile: non possiamo rivellarli direttamente perché, come abbiamo già visto, non interagiscono con la materia tramite le interazioni del modello standard; non sappiamo quale possa essere la loro massa; non conosciamo l'entità del loro mescolamento con i neutrini attivi, che potrebbe essere proibitivamente piccolo; in ultimo, non sappiamo quanti neutrini sterili possono esistere.

Per quanto riguarda il primo problema, bisogna però chiarire che i neutrini sterili interagiscono tramite la forza di gravità. Quindi è possibile rivelare l'esistenza dei neutrini sterili con metodi gravitazionali, tramite osservazioni astrofisiche di sistemi composti da grandi quantità di neutrini. Il sistema migliore conosciuto è l'universo stesso, che potrebbe contenere una quantità enorme di neutrini sterili prodotti nel Big Bang. La loro presenza modificherebbe l'evoluzione dell'universo in modi diversi a seconda della loro massa. Uno o più neutrini sterili pesanti, cioè con una massa elevata, potrebbero costituire la materia oscura che si sta cercando. Invece, secondo le nostre conoscenze attuali, i neutrini sterili leggeri (con massa piccola non molto diversa da quella dei tre neutrini attivi) non possono costituire la materia oscura, ma la loro presenza potrebbe essere rivelata tramite misure accurate della radiazione cosmica di fondo e della distribuzione di materia nell'universo. Sono proprio i neutrini sterili leggeri a essere attualmente oggetto di un'intensa attività

di ricerca nei laboratori di tutto il mondo, perché alcuni esperimenti potrebbero avere osservato un nuovo fenomeno di oscillazione dei neutrini a distanze più piccole delle oscillazioni permesse, se esistessero solamente i tre neutrini attivi. Un neutrino sterile potrebbe generare queste oscillazioni, mescolandosi ai tre neutrini attivi, a patto però che la sua massa non sia troppo diversa da quelle dei tre neutrini attivi (dell'ordine dell'elettronvolt). In pratica, le oscillazioni dovute ai neutrini sterili hanno anche un altro affascinante aspetto diverso da quello delle normali oscillazioni tra neutrini attivi. Siccome i neutrini sterili non interagiscono, un neutrino attivo che oscilla in un neutrino sterile sparisce. È curioso ricordare che i neutrini attivi sono spesso chiamati "particelle fantasma" perché interagiscono molto debolmente con la materia. Se sparissero del tutto, oscillando in neutrini sterili, il nome sarebbe ancora più appropriato.

c. Sbn, Short Baseline Neutrino Program, è un esperimento in preparazione al Fermilab (Stati Uniti) che utilizzerà i tre rivelatori illustrati nella figura (Sbnd, MicroBoone e Icarus), posti a distanze diverse dalla sorgente di neutrini muonici, per cercare di osservare l'oscillazione dei neutrini muonici in neutrini sterili.

Biografia

Carlo Giunti è ricercatore dell'Infn presso la sezione di Torino. La sua attività di ricerca riguarda principalmente la fisica dei neutrini, sui quali ha scritto il libro specialistico "Fundamentals of Neutrino Physics and Astrophysics" (Oxford University Press, 2007).

DOI: 10.23801/asimmetrie.2020.29.6