

Quo vadis neutrino?

Eligio Lisi Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sez. di Bari

Proverò a identificare alcune possibili traiettorie della futura fisica dei neutrini, con un occhio attento soprattutto al lettore non esperto in fisica, ma semplicemente incuriosito da questo campo di ricerca. Per semplicità farò riferimento, oltre ai precedenti articoli di Ithaca sull'argomento, ad alcune voci di Wikipedia (con i loro pregi e difetti).

Lungo la via tracciata da Enrico Fermi

Enrico Fermi ha avuto un impatto così vasto e profondo nella fisica moderna, che al suo nome sono associati decine di fenomeni o quantità fisico-matematiche [1]. In particolare, i costituenti fondamentali della materia (leptoni e quark) sono chiamati fermioni e, fra questi, i neutrini (indicati con il simbolo ν) sono stati battezzati così proprio da Fermi nel 1933, anno in cui egli teorizzò le loro interazioni deboli [2, 3].

Fin da allora, studiare questi particolarissimi fermioni senza carica elettrica (neutri), di massa piccolissima se non nulla (-ini) e sfuggenti nelle loro interazioni (deboli) si è rivelata una sfida affascinante, caratterizzata da straordinarie scoperte che hanno aperto nuove frontiere nella nostra comprensione della natura. Fra queste, la "scoperta delle oscillazioni dei neutrini, che mostrano che i neutrini hanno massa" [4] ha portato Takaaki Kajita e Art McDonald al premio Nobel per la fisica nel 2015, anno in cui un intero numero di Ithaca è stato dedicato ai neutrini [3],[5]-[14]. Successivi articoli in Ithaca hanno ulteriormente approfondito il ruolo dei neutri-

ni in fisica, spaziando dalle basse energie in cosmologia [15] alle altissime energie in astrofisica [16]-[20].

Sfogliando questi articoli si può apprezzare come i neutrini rappresentino una miniera inesauribile di informazioni su fenomeni naturali fondamentali, che spaziano dalla fisica subnucleare all'astrofisica e alla cosmologia, e che tuttora sfuggono in parte alla nostra comprensione. Quali sono i problemi irrisolti? Quali direzioni prenderanno le future ricerche? Quali nuovi orizzonti potranno aprirsi? In breve: "Quo Vadis Neutrino" ?

Oscillazioni di neutrino: come sarà completato il puzzle?

Grazie alla loro leggerezza e alla debolezza delle loro interazioni, i neutrini giungono a noi indisturbati, e quasi alla velocità della luce, da molte possibili sorgenti diverse. Usando sia neutrini di origine naturale (solari, atmosferici) che artificiale (da reattori nucleari e da acceleratori di particelle), sappiamo che i tre tipi di neutrini conosciuti (ν_e, ν_μ, ν_τ) si trasformano l'uno nell'altro nel loro percorso. Questo fenomeno di oscillazione, predetto da Bruno Pontecorvo negli anni '50-'60 del secolo scorso, richiede che ν_e, ν_μ e ν_τ siano sovrapposizioni quantistiche di tre neutrini (ν_1, ν_2 e ν_3) con masse differenti (m_1, m_2, m_3) [5, 6].

Per descrivere precisamente queste sovrapposizioni, c'è bisogno di ben sette nuovi parametri fondamentali. Cinque di essi sono stati misurati sperimentalmente: si tratta di due differenze di

masse al quadrato ($\delta m^2, \Delta m^2$) che determinano le frequenze di oscillazione, e di tre angoli di mescolamento ($\theta_{12}, \theta_{13}, \theta_{23}$), che ne determinano le ampiezze [5].

Mancano ancora due tasselli per completare il puzzle. Il primo è il segno di Δm^2 , che distingue fra un ordinamento delle masse dei neutrini di tipo normale ($+\Delta m^2$, ovvero $m_1 < m_2 < m_3$, come per i quark) oppure inverso ($-\Delta m^2$, ovvero $m_3 < m_1 < m_2$). Il secondo tassello è una possibile fase δ che potrebbe rendere differenti le oscillazioni di neutrini e antineutrini, contribuendo in parte, secondo alcune teorie, alla prevalenza della materia sull'antimateria nel nostro universo primordiale. In generale, le oscillazioni dei neutrini sono intimamente connesse ad alcuni grandi problemi aperti nella fisica teorica, come la peculiare struttura delle masse e dei mescolamenti dei fermioni [7, 13].

Sebbene ci siano già alcuni indizi a favore dell'ordinamento normale ($+\Delta m^2$) e di una fase δ non nulla, la somma di indizi non costituisce una prova. Per raggiungere prove convincenti sono già in fase di costruzione esperimenti ancora più grandi e sofisticati con neutrini da reattore (JUNO in Cina [21], sensibile a $\pm\Delta m^2$), da acceleratore (DUNE negli Stati Uniti [11, 22] e Hyper-Kamiokande in Giappone [23], sensibili sia a δ che a $\pm\Delta m^2$), e atmosferici (come il rivelatore sottomarino KM3-Net ORCA [12, 24], sensibile a $\pm\Delta m^2$). Si può ragionevolmente prevedere che, nell'arco di uno o due decenni, questi ed altri esperimenti riescano ad identificare gli ultimi due tasselli mancanti nel puzzle, oltre a migliorare le misure di quelli già noti. Avremmo così un quadro sperimentale completo del fenomeno delle oscillazioni, con importanti implicazioni sui modelli teorici interpretativi.

Questo ampio programma di ricerca procede su un tracciato ben definito, ma che potrebbe rivelare delle sorprese. Per esempio, eventuali discordanze fra i risultati di diversi esperimenti di oscillazione potrebbero suggerire l'esistenza di nuove interazioni o tipi di neutrini [13], su cui pure non mancano alcuni (controversi) indizi. In questo caso, ci troveremo di fronte ad un puzzle più grande del previsto, dai bordi indefiniti e con molti altri tasselli sconosciuti. Inoltre, durante la vita pluridecennale degli esperimenti in costruzione, si può sperare nell'imprevedibile

osservazione di un evento astrofisico piuttosto raro nel nostro vicinato galattico ma eccezionalmente interessante, come lo è stato l'esplosione della supernova SN 1987A [9]. L'enorme flusso di neutrini generato da una futura supernova (ne dovrebbero esplodere un paio ogni secolo nella nostra galassia) fornirebbe miniere di preziosissimi dati sperimentali, la cui analisi teorica impegnerebbe generazioni di ricercatori, spero anche la mia! Infine, ci sono altre proprietà sconosciute dei neutrini e delle loro sorgenti, che non sono osservabili tramite le oscillazioni: eccone alcuni esempi rilevanti.

Quanto è neutro il neutrino? L'ipotesi di Majorana

Nel mondo microscopico delle particelle elementari, la carica elettrica (positiva, negativa o nulla) è solo una fra le possibili cariche che distinguono una particella dalla sua antiparticella (con tutte le cariche opposte). Se tutte le cariche del neutrino -non solo quella elettrica- fossero nulle, esso sarebbe indistinguibile dal suo antineutrino, così come la particella di luce, il fotone, è identico all'antifotone. L'ipotesi di identità di neutrini e antineutrini, formulata da Ettore Majorana nel 1937, è tuttora oggetto di ricerche in tutto il mondo [7]. Se fosse provata, avrebbe implicazioni molto profonde, più di quanto Majorana stesso potesse immaginare. In particolare, secondo l'attuale modello standard delle interazioni fondamentali, ogni particella riceve la sua massa tramite una interazione con il bosone di Higgs [25], con la sola eccezione di eventuali neutrini di Majorana, la cui massa richiederebbe inevitabilmente nuova fisica oltre il meccanismo di Higgs. Questa fisica, presumibilmente connessa a scale di energia molto alte, spiegherebbe perché i neutrini sono così leggeri e potrebbe contribuire alla genesi dell'asimmetria materia-antimateria [7, 14].

L'unico modo realistico per sondare questa affascinante possibilità consiste nel rivelare un peculiare decadimento nucleare (detto "doppio decadimento beta senza emissione di neutrini") che può avvenire e se e solo se i neutrini soddisfanno l'ipotesi di Majorana, e soltanto in particolari isotopi nucleari [7]. Si tratta di un fenomeno ra-

rissimo (ammesso che avvenga in natura), che richiede di monitorare grandi masse di isotopi con sofisticati esperimenti, ben protetti dal rumore dei raggi cosmici in laboratori sotterranei. Queste difficilissime ricerche non hanno ancora dato esito positivo, ma ci sono ottime ragioni per continuare: la scoperta di questo decadimento sarebbe certamente epocale e degna di un premio Nobel.

Recentemente, nella comunità scientifica si è raggiunto un generale consenso sulla necessità di proseguire le ricerche monitorando masse dell'ordine di una tonnellata per almeno un decennio, usando isotopi differenti e tecnologie diversificate. Si raggiungerebbe così una sensibilità alla massa dei neutrini di Majorana fino cento volte superiore a quella attuale. Fra i progetti futuri più accreditati citiamo nEXO (con Xenon), CUPID (con Molibdeno) e LEGEND (con Germanio) [26], con almeno uno degli ultimi due presso i Laboratori Nazionali del Gran Sasso.

Personalmente sono molto ottimista sul potenziale scientifico di questa nuova generazione di esperimenti per la ricerca del doppio decadimento beta, e mi auguro di vedere provata l'ipotesi di Majorana nei prossimi due decenni, magari qui in Italia sotto il Gran Sasso. Ma in questo campo le traiettorie della fisica dei neutrini cominciano ad intersecarsi con aspetti in parte imponderabili, che ci ricordano quanto profondamente umana, e quindi incerta, sia l'avventura scientifica. La produzione, la disponibilità e il commercio di ingenti masse di peculiari isotopi di grande purezza sono nelle mani di un ristretto numero di paesi, in parte collegati, direttamente o indirettamente, all'attuale conflitto fra Russia e Ucraina. C'è da aspettarsi che la Cina intenda giocare un ruolo sempre più importante in questo campo, anche con la costruzione di un nuovo laboratorio sotterraneo. Aspetti geopolitici ed economici potrebbero dunque orientare le grandi collaborazioni internazionali verso direzioni e scelte difficili da prevedere, e non solo nella fisica dei neutrini: si trovano di fronte a situazioni analoghe anche la fisica subnucleare, con il suo prossimo grande collisore di particelle, e l'astrofisica di alta energia, con le sue impegnative missioni satellitari. Fra i molti dubbi ci rimane una sola certezza: tutti i paesi che riusciranno a collaborare in questi ed altri grandi progetti internazionali, potran-

no beneficiare dei valori universali insiti nella ricerca scientifica, superando, almeno in questo campo, (e non è poco!), le divisioni geografiche, politiche ed economiche.

Come sarà determinata la massa assoluta dei neutrini?

Le oscillazioni dei neutrini sono sensibili alle differenze fra le masse dei neutrini $m_{1,2,3}$ ma non ai loro valori assoluti. Enrico Fermi (ancora lui!) osservò che, in linea di principio, la massa assoluta dei neutrini si può determinare misurando con precisione lo spettro di energia dei ben noti decadimenti beta nucleari. Gli esperimenti di questo tipo non hanno ancora trovato un segnale positivo: l'ultimo e il più grande (KATRIN), tuttora in corso in Germania [12, 27], indica che i neutrini hanno masse inferiori a circa un milionesimo di quella dell'elettrone. Prima o poi un segnale dovrà pur emergere, ma non si può escludere che la sua osservazione richieda un futuro esperimento, ancora più sensibile di KATRIN. Le crescenti difficoltà sperimentali non consentono ancora previsioni ben definite ed impongono un approccio a passi successivi, per sondare tecniche differenti e affrontare gli imprevisti che emergono di volta in volta. Possiamo dunque dire che la strada del decadimento beta tracciata da Fermi deve essere percorsa fino in fondo, ma non è ben chiaro come si riuscirà a procedere per arrivare alla meta.

Se l'ipotesi di Majorana fosse corretta, anche la strada del doppio decadimento beta consentirebbe di esplorare le masse assolute dei neutrini, sebbene con maggiori incertezze teoriche [7]. In entrambi i casi (decadimento beta o doppio beta) potremmo dover aspettare ben più di un decennio per una osservazione convincente in nuovi esperimenti di laboratorio. In questo lasso di tempo, una misura delle masse dei neutrini potrebbe arrivare da un settore completamente diverso: quello delle indagini cosmologiche sulla distribuzione di fotoni e di materia nell'universo [15].

Sappiamo con certezza che il nostro universo è pervaso da un fondo cosmico di neutrini generati poco dopo il big bang. Poiché ogni massa è una sorgente di gravità, anche i neutrini cosmici

primordiali producono effetti gravitazionali, con un'intensità proporzionale alla somma delle loro masse, $\Sigma = m_1 + m_2 + m_3$. Gli effetti associati a queste piccole masse alterano la distribuzione sia dei fotoni cosmici (radiazione di fondo a microonde) sia della materia osservabile (strutture a grande scala nell'universo) [15]: analizzando queste distribuzioni in grande dettaglio si può dunque determinare Σ . I dati cosmologici pongono già dei limiti sulla massa dei neutrini più stringenti di quelli analoghi di KATRIN, e con esperimenti di prossima generazione potrebbero portare ad un primo segnale positivo per Σ entro un decennio: sarebbe un risultato sensazionale.

Riusciranno i cosmologi a piantare la prima bandiera nel territorio della massa assoluta dei neutrini, precedendo i fisici delle particelle? Forse sì. In questo caso, prevedibilmente si aprirà una approfondita discussione sul modello cosmologico attuale, implicitamente assunto. Non dimentichiamo che questo modello descrive con grande accuratezza la storia dell'universo osservabile, a patto di parametrizzare nel modo più semplice possibile le due maggiori sorgenti attuali di gravità: la materia oscura e l'energia oscura, di cui conosciamo assai poco [28]. Se la descrizione di queste importanti sorgenti oscure dovesse essere più complessa di quanto supposto finora, allora anche la descrizione di una sorgente minore, come il fondo cosmico di neutrini, ne risentirebbe, e dunque la misura cosmologica di Σ andrebbe ridiscussa. La stima cosmologica delle masse dei neutrini sarà dunque legata a doppio filo con gli auspicabili progressi nella comprensione della materia oscura e dell'energia oscura.

Personalmente sarei ben contento di poter vedere entro il prossimo decennio un primo segnale cosmologico positivo per Σ , e di partecipare alla discussione scientifica che ne seguirà. Penso che, a lungo termine, una misura convincente della massa dei neutrini richiederà la convergenza fra le osservazioni cosmologiche ed almeno una misura di laboratorio, tramite decadimento nucleare beta o doppio beta. Viceversa, eventuali discordanze punterebbero verso nuova fisica, con prospettive imprevedibili. Sempre nel lungo termine, un segnale cosmologico della massa dei neutrini darebbe ulteriore impulso a quella che forse rappresenta la sfida più difficile e lun-

ga in fisica del neutrino: la possibile rivelazione diretta del fondo cosmico di neutrini primordiali [7, 29], su cui ritornerò in conclusione.

I neutrini come sonde della materia e messaggeri dell'universo: nuove frontiere?

Quanto più conosciamo le proprietà intrinseche dei neutrini e le loro interazioni con la materia, tanto più possiamo usarli come sonde di sorgenti difficilmente accessibili, dai nuclei alle stelle all'universo primordiale. Gli orizzonti e le sfide aperte in questo campo sono molteplici.

La fisica nucleare di interesse per i neutrini è in fermento. Numerose ricerche teoriche e sperimentali cercano di migliorare gli attuali modelli nucleari al livello di precisione richiesto dalle nuove generazioni di esperimenti di neutrini, siano essi da reattore, da acceleratore, atmosferici, o da decadimenti nucleari, integrando una vasta mole di informazioni differenti [8]. Si tratta di un percorso complesso e faticoso, ma assolutamente necessario. Fra i molti sviluppi promettenti si possono citare, a livello teorico, i progressi computazionali nei modelli nucleari *ab initio* [30], e a livello sperimentale il fiorire di nuove tecniche di rivelazione, fra cui quelle che consentono di studiare la diffusione elastica coerente dei neutrini sui nuclei a bassissime energie [31].

Anche lo studio delle sorgenti di neutrini, specialmente in campo astrofisico, sta conoscendo uno sviluppo straordinario. Rimanendo nel campo delle basse energie, le osservazioni di neutrini solari hanno confermato la nostra comprensione dei meccanismi di fusione nucleare nel nucleo del Sole [32]; le misure dei flussi di geoneutrini sono risultate in accordo con i modelli geochimici dell'interno della Terra [33]; e le osservazioni di neutrini dalla supernova del 1987, pur con una statistica limitata, hanno confermato a grandi linee i modelli di esplosione stellare [9]. In futuro, misure ancora più accurate renderanno i neutrini delle sonde insostituibili di queste sorgenti inaccessibili, ad un livello tale da poter discriminare diverse varianti dei relativi modelli teorici.

All'estremo opposto troviamo i neutrini astrofisici di altissima energia [10], presumibilmente associati ad eventi particolarmente violenti che

hanno luogo nel nostro universo, e che coinvolgono sorgenti ove la materia e lo spazio-tempo raggiungono situazioni estreme. Gli stessi eventi possono produrre, oltre ai neutrini, anche fotoni e onde gravitazionali [34, 35]: abbiamo dunque a disposizione tre possibili messaggeri, carichi di informazioni diverse e preziosissime su fenomeni altrimenti inaccessibili [16]-[19]. La moderna astronomia multi-messaggero di alta energia può già contare sulla osservazione associata di fotoni e neutrini, come pure di fotoni e onde gravitazionali, ed è sulla buona strada per poter osservare, magari con un pizzico di fortuna, la produzione contemporanea dei tre messaggeri [20]: sarebbe un evento eccezionale, a cui spero di poter assistere in futuro! Anche in questo campo, ulteriori ricerche richiederanno non solo telescopi sempre più grandi per la rivelazione separata di ciascuno dei tre messaggeri (neutrini, fotoni e onde gravitazionali), ma anche un crescente coordinamento internazionale con condivisione reciproca dei dati, per consentire la rivelazione sinergica di almeno due messaggeri in uno stesso evento. Sarà un bellissimo esempio di cooperazione mondiale, con importanti implicazioni etiche in aggiunta a quelle scientifiche.

Concludo ritornando ad una sorgente di bassissima energia, e cioè al fondo cosmico di neutrini primordiali [15, 29]. La loro difficilissima osservazione diretta, se sarà mai possibile, congiunta a quella attuale del fondo cosmico di fotoni [15], e a quella futura del previsto fondo primordiale di onde gravitazionali [35], contribuirà a fornire la più profonda sonda multi-messaggero dell'universo primordiale. Realizzare questa impresa potrà richiedere alcune generazioni, come in passato poteva esserlo l'edificazione di una grande cattedrale. Per chi avrà il privilegio di salire sul tetto di questa moderna costruzione scientifica, la visione contemporanea di ben tre lontanissime frontiere del nostro universo sarà di una bellezza da togliere il fiato.

Quo vadis ...

La fisica del neutrino ha un passato ricco di scoperte, e ne ha in serbo molte altre per il futuro. Le prossime sfide richiedono sia di percorrere strade già tracciate verso traguardi ben definiti, sia di esplorare nuovi sentieri verso obietti-

vi appena intravisti, o suggeriti da indizi inattesi. Lungo queste vie, la comunità scientifica vedrà una crescente integrazione fra fisica nucleare, subnucleare, astrofisica e cosmologia, sia teorica che sperimentale. La dimensione delle sfide ancora aperte richiederà, a molti uomini e donne di paesi diversi, di investire le loro energie in una varietà di progetti, collaborazioni e nuove idee. La "piccola particella neutra" di Enrico Fermi continuerà a guidarci, attraversando molte generazioni, verso grandi orizzonti.

Ringraziamenti: Questo lavoro è parzialmente supportato dall'INFN mediante il programma TAsP: "Theoretical Astroparticle Physics", e dal Ministero dell'Università e della Ricerca (MUR) tramite il progetto PRIN 2017W4HA7S "NAT-NET: Neutrino and Astroparticle Theory Network".



- [1] https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_things_named_after_Enrico_Fermi
- [2] https://it.wikipedia.org/wiki/Interazione_di_Fermi
- [3] G. Co': *Neutrini ed interazione debole*, Ithaca, VI (2015) 7.
- [4] <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2015/summary/>
- [5] D. Montanino: *Le oscillazioni di neutrino*, Ithaca, VI (2015) 19.
- [6] F. Ronga: *Breve storia della ricerca delle oscillazioni nei neutrini solari ed atmosferici*, Ithaca, VI (2015) 37.
- [7] F. Vissani: *La domanda di Majorana*, Ithaca, VI (2015) 47.
- [8] M. B. Barbaro, O. Benhar, C. Giusti: *Interazione dei neutrini con la materia*, Ithaca, VI (2015) 59.
- [9] A. Mirizzi: *Neutrini e Supernovae*, Ithaca, VI (2015) 69.
- [10] V. Flaminio: *I neutrini in astrofisica*, Ithaca, VI (2015) 75.
- [11] C. Mariani: *Esperimenti di neutrini negli USA*, Ithaca, VI (2015) 97.
- [12] F. Terranova: *L'Europa dei neutrini*, Ithaca, VI (2015) 101.
- [13] P. Bernardini: *La frontiera dei neutrino sterili*, Ithaca, VI (2015) 109.
- [14] E. Lisi: *Neutrini: messaggeri di nuova fisica*, Ithaca, VI (2015) 117.

- [15] G. Mangano: *Neutrini e Cosmologia*, Ithaca, VII (2016) 147.
- [16] P. Lipari: *I Raggi Cosmici e l'universo delle alte energie*, Ithaca, XIX (2022) 5.
- [17] A. De Angelis: *Raggi cosmici ieri, oggi, domani*, Ithaca, XIX (2022) 35.
- [18] C. Distefano, F. Vissani: *L'importanza dei neutrini cosmici di altissima energia*, Ithaca, XIX (2022) 103.
- [19] A. Castellina: *Astroparticelle di altissima energia*, Ithaca, XIX (2022) 115.
- [20] M. Spurio: *Prospettive per nuovi orizzonti nell'astrofisica*, Ithaca, XIX (2023) 79.
- [21] https://en.wikipedia.org/wiki/Jiangmen_Underground_Neutrino_Observatory
- [22] https://en.wikipedia.org/wiki/Deep_Underground_Neutrino_Experiment
- [23] <https://en.wikipedia.org/wiki/Hyper-Kamiokande>
- [24] <https://en.wikipedia.org/wiki/KM3NeT>
- [25] P. Ciafaloni: *Il bosone di Higgs*, Ithaca, I (2013) 7.
- [26] https://en.wikipedia.org/wiki/Neutrinoless_double_beta_decay
- [27] <https://en.wikipedia.org/wiki/KATRIN>
- [28] M. Gasperini: *Teoria Gravitazionale e Applicazioni Cosmologiche: Sviluppi Futuri*, Ithaca, XXI (2023) 47.
- [29] https://en.wikipedia.org/wiki/Cosmic_neutrino_background
- [30] A. Bracco: *Struttura e reazioni nucleari e l'origine degli elementi*, Ithaca, XXI (2023) 19.
- [31] <https://en.wikipedia.org/wiki/CONUS-Experiment>
- [32] https://en.wikipedia.org/wiki/Solar_neutrino
- [33] <https://en.wikipedia.org/wiki/Geoneutrino>
- [34] P. Leaci: *Ascoltando l'Universo di onde gravitazionali*, Ithaca, VII (2016) 167.
- [35] https://en.wikipedia.org/wiki/Gravitational_wave



Eligio Lisi: è Dirigente di Ricerca presso la Sezione di Bari dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN). Le sue ricerche hanno riguardato aspetti teorici e fenomenologici delle interazioni elettrodeboli, con particolare attenzione alla fisica dei neutrini ed astro-particellare. Nel 2018 ha ricevuto, assieme a Gianluigi Fogli, il Premio Internazionale "Bruno Pontecorvo" per la fisica delle particelle elementari.