
L'Europa dei neutrini

Francesco Terranova

Dipartimento di Fisica "Giuseppe Occhialini" - Università degli studi di Milano-Bicocca e INFN - Sezione di Milano-Bicocca

La scoperta delle oscillazioni di neutrino ha aperto nuove prospettive per la fisica delle particelle elementari e offre straordinarie opportunità per i centri di ricerca europei. Queste opportunità riguardano tutti i settori della fisica sperimentale del neutrino: la misura delle masse assolute e delle relazioni tra gli autostati di massa, la violazione del numero leptonico, il mixing tra i neutrini e la violazione di CP. Grazie alle oscillazioni, sappiamo a priori quali sono le precisioni richieste agli esperimenti di prossima generazione per raggiungere gli obiettivi che si sono prefissati. Le tecniche sperimentali che si stanno sviluppando sono estremamente diversificate così come le dimensioni e i costi degli esperimenti: da progetti "a misura di università" a grandi collaborazioni internazionali costruite su facilities condivise.

Tutto molto in fretta

La scoperta delle oscillazioni di neutrino [1] ha aperto un programma di ricerca che, nel 1998, sembrava sconfinato. Tutti e tre gli angoli di mixing potevano essere misurati così come le differenze di massa tra i neutrini. L'impresa, tuttavia, sarebbe potuta risultare titanica perchè gli angoli di mixing potevano essere simili a quelli dei quark (piccolissimi) e le differenze di massa al di fuori delle regioni concretamente esplora-

bili dagli esperimenti. Non è stato affatto così. Il più piccolo degli angoli di mixing dei neutrini ($\theta_{13} \simeq 8^\circ$) è circa uguale al più grande degli angoli dei quark (l'angolo di Cabibbo: 13°). In concreto: se trovate il giusto L/E, ovvero il giusto rapporto tra la distanza di propagazione e l'energia del neutrino (si veda il box "La formula di oscillazione nel vuoto" in [1]) le probabilità di oscillazioni diventano enormi ($>10\%$). Il rapporto L/E, d'altronde, non era un parametro ignoto: le oscillazioni erano state osservate per i neutrini prodotti dalle interazioni dei raggi cosmici primari con l'atmosfera (neutrini atmosferici) e per i neutrini prodotti dal sole. Si trattava di realizzare esperimenti con sorgenti artificiali che avessero il valore del rapporto L/E corretto per riprodurre fedelmente le oscillazioni dei neutrini atmosferici e solari. A questo programma sperimentale imponente hanno contribuito molti paesi. Il Giappone ha avuto un ruolo guida ospitando il primo (K2K) e il più preciso (T2K) esperimento capace di osservare le oscillazioni alla scala di energia dei neutrini atmosferici con sorgenti artificiali, così come il primo esperimento che ha osservato le oscillazioni alla scala di energia dei neutrini solari con neutrini prodotti da reattori nucleari (KamLAND). Gli Stati Uniti hanno realizzato l'esperimento più preciso per la misura della differenza di massa responsabile delle oscillazioni alla scala dei neutrini atmosferici (MINOS, solo da poco scalzato da T2K). La Cina e la Corea hanno dimostrato per la prima volta che $\theta_{13} \simeq 8^\circ$ usando neutrini prodotti dai reattori (un risultato confermato in modo spettacolare da T2K con neutrini prodotti da acceleratori di particelle). In Europa è stata osservata per

la prima volta l'oscillazione $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ (OPERA ai Laboratori del Gran Sasso usando un fascio di ν_μ prodotti al CERN e puntanti verso l'Italia). In una serie impressionante di misure di precisione, l'esperimento BOREXINO (Gran Sasso) ha determinato come l'oscillazione dei neutrini solari dipenda dalla densità di materia del sole. In fisica del neutrino si è fatto in 15 anni quello che, nei quark, ha richiesto decenni anche se, ad oggi, le precisioni raggiunte sugli angoli di mixing sono ancora molto lontane dalle precisioni ottenute per i quark [2].

Questi enormi progressi, più ancora che fornire informazioni specifiche sul fenomeno delle oscillazioni, hanno in realtà cambiato in maniera profonda il modo di progettare esperimenti all'interno della nostra disciplina. Fino a dieci anni fa, le oscillazioni dei neutrini erano un'incognita (oltre che una potenziale opportunità). Oggi, le informazioni raccolte dagli esperimenti di oscillazione sono il fondamento di tutti i progetti futuri per la fisica del neutrino, anche quelli che nulla hanno a che fare con le oscillazioni stesse.

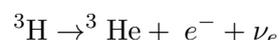
I gruppi europei, da sempre, sono impegnati e hanno dato contributi rilevanti alla fisica del neutrino. Ora, però, che il costo e la complessità degli esperimenti sta crescendo a un livello confrontabile con quello della fisica agli acceleratori di particelle, è tempo di farsi domande di più ampio respiro. Prima di tutto, esiste ancora spazio per esperimenti "nazionali" o una strategia complessiva europea è ormai improcrastinabile? E soprattutto, qual'è il confine tra un'impresa scientifica che ha concrete possibilità di essere realizzata a livello europeo e una che richiede necessariamente uno sforzo globale? La fisica dei grandi acceleratori si pone questi interrogativi da decenni e ha realizzato infrastrutture - prima di tutte il CERN di Ginevra - e organismi decisionali capaci di affrontarli. La fisica del neutrino, invece, è un campo molto più diversificato: esistono ancora esperimenti gestibili in piccoli laboratori o, addirittura, in campus universitari a cui si affiancano facilities con collaborazioni internazionali, costi e complessità che sfidano le grandi imprese del CERN.

Nelle pagine che seguono, cercheremo di dare qualche risposta a questi interrogativi, mettendo un po' da parte le considerazioni strategiche e politiche e facendoci guidare dalla fisica, ovvero

da quello che le oscillazioni di neutrino ci hanno insegnato.

Masse

Prima ancora che i neutrini fossero osservati in modo diretto, si aveva consapevolezza che le loro masse a riposo dovevano essere molto piccole. Non è un caso che - come ha notato D. Montanino in un altro articolo di questo stesso numero di Ithaca - il Modello Standard sia stato originariamente concepito assumendo neutrini completamente privi di massa. Neutrini molto pesanti avrebbero modificato la cinematica dei decadimenti β : per esempio un nucleo di trizio (un isotopo instabile dell'idrogeno costituito da un protone e due neutroni) che decade attraverso il processo



non è in grado di generare elettroni con energia pari a $m_{3\text{H}} - m_{3\text{He}} - m_e$ (m indica la massa a riposo) perché una frazione fissa e irriducibile dell'energia disponibile in questo processo esotermico deve essere "investita" per produrre la massa a riposo del neutrino. Tanto più grande è la massa del neutrino tanto più piccola sarà l'energia massima raggiungibile dall'elettrone. Lo studio dello spettro dell'elettrone è stato perciò il metodo classico per eccellenza per "pesare" i neutrini [3]. Un metodo, che, dopo oltre 70 anni di sforzi, non ha, però, prodotto una misura della massa del neutrino. Le oscillazioni offrono una spiegazione semplice di questo clamoroso fallimento (si veda il box "Le masse assolute dei neutrini") e indicano con chiarezza dove andare a cercare per osservare finalmente il fenomeno.

Visto che i decadimenti beta coinvolgono neutrini elettronici, ciò che determina lo spettro dell'elettrone è soprattutto l'autostato di massa che maggiormente si mescola con il neutrino elettronico. Se esistono autostati pesantissimi i cui angoli di mixing con ν_e sono trascurabili, questi autostati diventano irrilevanti per lo studio dei decadimenti beta. Potremmo però essere fortunati: l'autostato più pesante potrebbe essere quello che maggiormente si mescola con ν_e (in gergo, è la situazione di "gerarchia inversa"). Ancora meglio, i neutrini potrebbero avere masse

grandi ma simili tra loro: visto che le oscillazioni sono sensibili alle differenze dei quadrati delle masse (Δm^2), un valore di Δm^2 piccolo potrebbe nascondere masse grandi (in gergo, “masse degeneri”). Le oscillazioni parlano chiaro: in caso di gerarchia inversa (o, ancor meglio masse degeneri) la massa del neutrino cui è sensibile il decadimento β non può essere inferiore a $\simeq \sqrt{\Delta m_{31}^2} \simeq 5 \times 10^{-2}$ eV. Se siete capaci di costruire un esperimento preciso entro i 50 meV avete solo due possibilità: o vedete l’effetto (e, probabilmente, andate a Stoccolma) o non vedete nulla e dimostrate che la natura ha scelto la “gerarchia normale”, ovvero che l’autostato più pesante è quello che si mescola di meno con il ν_e .

Considerazioni molto simili si applicano alla ricerca del “doppio decadimento beta senza neutrini” ($0\nu\beta\beta$) [4]. Decadimenti di questo tipo (si vedano gli articoli di F. Vissani ed E. Lisi in questo numero di *Ithaca*, in particolare il box “Il doppio decadimento beta” in [5]) non sono permessi nel Modello Standard ma lo sono nella maggior parte delle sue estensioni. Un’evidenza sperimentale del $0\nu\beta\beta$ sarebbe una rivoluzione epocale nella fisica delle particelle elementari: è un fenomeno che contraddice chiaramente il Modello Standard perché viola una delle sue simmetrie (la conservazione del numero leptonic) ma nello stesso tempo, offre una spiegazione semplice della piccolezza delle masse del neutrino rispetto a tutte le altre particelle cariche. I neutrini acquisiscono la status particolare di “particelle di Majorana”: sono cioè gli unici fermioni elementari che coincidono con le loro antiparticelle.

Anche in questo caso le oscillazioni danno informazioni precise: se la gerarchia è inversa e i neutrini sono particelle di Majorana, avrete certezza di osservare l’effetto (e di andare, questa volta senza alcun dubbio, a Stoccolma) se costruite un esperimento con sensibilità migliore di 15 meV. Tuttavia, il rischio di insuccesso è maggiore rispetto ai decadimenti beta: se non osservate nulla non potete inferire che la gerarchia di massa sia normale perché i neutrini potrebbero non essere particelle di Majorana: in questo caso il $0\nu\beta\beta$ non avviene per la conservazione del numero leptonic, indipendentemente dalle masse dei neutrini. Ovviamente, chi lavora in questo settore spera che la fortuna aiuti gli auda-

ci, proprio come è avvenuto negli anni 2000 con le oscillazioni. Staremo a vedere.

L’Europa vanta l’esperimento più preciso al mondo per lo studio del decadimento beta e del suo spettro. Si chiama KATRIN e si trova a Karlsruhe, in Germania. È l’estensione più spettacolare (si veda la Figura 1) degli esperimenti fatti negli anni ’90 e utilizza, concettualmente le stesse tecniche. Malgrado ciò, la precisione che raggiungerà nei prossimi anni (circa 200 meV) si manterrà ancora lontana dai fatidici 50 meV. Ci sarà mai un super-KATRIN capace di raggiungere l’obiettivo dei 50 meV? Vi sono due scuole di pensiero: la prima (la più diffusa) ritiene che le tecniche implementate da KATRIN (spettrometria magnetica combinata a speciali sorgenti di trizio) abbiano raggiunto i loro limiti intrinseci e che serva un’idea nuova. Questa idea potrebbe essere la misura dell’energia complessiva del decadimento beta attraverso tecniche calorimetriche: ovvero attraverso la variazione di temperatura all’interno di materiali diamagnetici. È una tecnica che sfrutta gli enormi progressi fatti negli ultimi 30 anni sui rivelatori termici, rivelatori che oggi sono comunemente impiegati negli esperimenti di cosmologia osservativa. In Europa sono concentrati i principali gruppi che stanno sviluppando questo approccio e, recentemente, due esperimenti europei (ECHO e HOLMES) hanno cominciato a lavorare usando un isotopo molto promettente: l’Olmio-163. L’altra scuola di pensiero, invece, sostiene che ci siano ancora margini di miglioramento per la tecnologia di KATRIN e, recentemente, una collaborazione americana (PTOLEMY) ha intrapreso un programma di ricerca e sviluppo basato su quella tecnica con l’obiettivo ambiziosissimo di misurare i neutrini prodotti dal Big Bang. La fisica del decadimento beta è proprio uno di quei settori in cui vi è ancora molto spazio per esperimenti “da laboratorio universitario” al fine di identificare la tecnologia vincente per arrivare alla soglia dei 50 meV. Tuttavia la realizzazione dell’esperimento vero e proprio avrà sicuramente una complessità tale da richiedere l’aggregazione di queste risorse e la creazione di un unico programma europeo per lo studio di precisione del decadimento beta.

La situazione per il $0\nu\beta\beta$ è sostanzialmente diversa. Le precisioni raggiunte dagli esperimenti attuali sono già molto buone (nell’ipotesi, ovvia-

Le masse assolute dei neutrini

Le tecniche sperimentali utilizzate per determinare le masse dei neutrini non coinvolgono mai singoli autostati di massa. Nel decadimento beta, la distorsione dello spettro degli elettroni è dovuta alla presenza del ν_e e pertanto coinvolge tutti gli autostati che si mescolano con il neutrino elettronico. La relazione che intercorre tra la "massa efficace del neutrino" (m_β) che determina lo spettro dell'elettrone e le masse dei singoli autostati è la seguente:

$$m_\beta = \cos^2 \theta_{13} \cos^2 \theta_{12} m_1^2 + \cos^2 \theta_{13} \sin^2 \theta_{12} m_2^2 + \sin^2 \theta_{13} m_3^2$$

Un tempo questi angoli erano ignoti ma a partire dal 2012 sono stati tutti ben misurati, così come sono state ben misurate le quantità $m_2^2 - m_1^2$ e $|m_3^2 - m_2^2|$. Questo permette di determinare qual'è il m_β minimo nel caso in cui m_3 ("gerarchia normale") o m_1 ("gerarchia inversa") sia l'autostato più pesante. Abbiamo, in particolare:

$m_\beta > 10$ meV - per gerarchia normale

$m_\beta > 50$ meV - per gerarchia inversa

Considerazioni analoghe valgono per il $0\nu\beta\beta$ per il quale vale $m_{0\nu\beta\beta} < 10$ meV per gerarchia normale e $m_{0\nu\beta\beta} > 15$ meV per gerarchia inversa. In generale, per l'osservazione sperimentale di questi processi, la gerarchia inversa è una condizione estremamente favorevole.



Figura 1: Trasporto dello spettrometro di Katrin verso Karlsruhe.

mente, che i neutrini siano particelle di Majorana) e l'obiettivo dei 15 meV non è irraggiungibile. Molti gruppi sperimentali sono al lavoro per incrementare la quantità di isotopi presenti negli esperimenti, e dunque la probabilità di osservare uno di questi decadimenti rarissimi, e la reiezione del fondo. Analogamente, molti fisici nucleari stanno cercando di ridurre le incertezze teoriche che permettono di determinare la massa dei neutrini una volta nota la vita media del decadimento $0\nu\beta\beta$: questa incertezza è al momento la principale fonte di errori sistematici nello studio

dei neutrini di Majorana. La fisica del doppio decadimento beta ha lasciato da decenni i campus universitari perché tutti i moderni esperimenti richiedono laboratori sotterranei molto profondi per la reiezione del fondo dovuto ai raggi cosmici. L'Europa è estremamente ben equipaggiata in questo settore e vanta un laboratorio con sale e infrastrutture enormi (i Laboratori del Gran Sasso) e diversi laboratori più piccoli ma sufficienti a ospitare esperimenti di punta per il doppio beta: i laboratori di Modane in Francia, di Canfranc in Spagna e di Boulby in Inghilterra. Tuttavia a livello mondiale la concorrenza è imponente: già ad oggi i tre più precisi esperimenti di doppio beta europei (GERDA e CUORE - Figura 2 - al Gran Sasso e NEMO-3 a Modane) si confrontano con risultati altrettanto precisi provenienti dagli Stati Uniti (EXO) e dal Giappone (KAMLAND-Zen). Nuovi laboratori e nuovi progetti sono in sviluppo negli Stati Uniti, in Canada, Giappone, Cina, Corea e India. In questo settore, perciò, una strategia Europea è ormai una necessità e la fisica astroparticellare europea si è dotata da tempo di organi di coordinamento internazionali. Ma la buona fisica viene ben prima della buona politica: gli esperimenti che ho citato in precedenza utilizzano tecniche molto diverse tra di loro e, al

momento, non vi è certezza su quale tecnica sia estendibile ai 15 meV. Nei prossimi dieci anni, perciò avremo risultati più precisi che ci permetteranno di fare un'ulteriore selezione tra le tecniche più promettenti; tuttavia non siamo nella condizione di poter considerare conclusa la fase di ricerca e sviluppo e progressi tecnologici sostanziali - soprattutto nella purezza dei materiali e nella reiezione dei fondi - sono una necessità per raggiungere gli obiettivi che le informazioni provenienti dalle oscillazioni ci hanno imposto.



Figura 2: Il criostato di CUORE capace di raffreddare a 10 mK circa 740 kg di rivelatori termici per lo studio dei decadimenti rari del Tellurio.

Gerarchie di massa

Nella fisica delle masse assolute, conoscere l'autostato più pesante e il suo mixing con il ν_e può far la differenza tra un esperimento di "esplorazione" e uno di "scoperta". Esiste un modo per conoscere la gerarchia di massa senza misurare esplicitamente questi autostati? Fortunatamente sì, ancora una volta grazie alle oscillazioni di neutrino. Fin dalla fine degli anni '90 sono state proposte diverse tecniche per ottenere informazioni sulla gerarchia di massa dalle probabilità di oscillazione. Quasi tutte si basano sull'effetto MSW descritto in [1]: le oscillazioni dei neutrini nella materia sono perturbate dalla presenza degli atomi e la probabilità di oscillazione diventa sensibile alla gerarchia di massa, ovvero non solo al valore assoluto dei Δm^2 ma anche al loro segno. Tutti gli esperimenti proposti in Europa, Stati Uniti e India per la misura della gerarchia si basano su questo principio ma nessuno degli esperimenti attualmente in funzione ha una sensibilità sufficiente per osservare una perturbazione così piccola. L'unica eccezione è

l'esperimento americano NOVA che è entrato in funzione in questi mesi ma che potrà osservare l'effetto solo per particolari regioni dello spazio dei parametri e con sensibilità statistica molto ridotta.

La partita per la misura della gerarchia di massa [6] è aperta e, a differenza della misura delle masse assolute, questa osservabile è chiaramente alla portata delle tecnologie attuali. Per quale motivo ne siamo così certi? La possibilità di osservare questo fenomeno è legata alla probabilità di oscillazione $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ alla scala di energia dei neutrini atmosferici (qualche GeV). L'ampiezza di probabilità dipende dall'angolo θ_{13} : se quest'angolo fosse stato piccolo o, addirittura, confrontabile con il corrispondente angolo per i quark, la misura sarebbe diventata difficile come la misura delle masse assolute. Nel 2012, esperimenti in Cina, Corea, Giappone e, più recentemente, l'esperimento francese Double-Chooz hanno dimostrato al di là di ogni ragionevole dubbio che θ_{13} è molto grande (8°). Perfino le più speculative tra le tecniche proposte nel passato hanno perciò la loro chance di effettuare la misura.

Una delle più speculative è stata proposta da S. Petcov e M. Piai nel 2002 [7] e si basa sull'osservazione dei battimenti nelle probabilità di oscillazione dei neutrini prodotti ai reattori nucleari. I battimenti sono dovuti al fatto che $\Delta m_{31}^2 \neq \Delta m_{32}^2$: dai battimenti è possibile inferire, perciò, la gerarchia di massa. Nel 2002, ricordo di aver letto un po' di fretta quell'articolo: mi bastò notare che la tecnica avrebbe funzionato se θ_{13} fosse stato $> 6^\circ$. A quel tempo si sapeva solo che $\theta_{13} < 9^\circ$ perciò archiviai l'articolo nella lista delle "idee intelligenti che non funzioneranno mai". Su questa idea oggi si basa il più imponente progetto cinese in fisica del neutrino (l'esperimento JUNO), che raccoglie una collaborazione di centinaia di fisici, inclusa un'ampia partecipazione europea. Alla luce del fatto che $\theta_{13} \simeq 8^\circ$, non posso che concordare con quanti sostengono che la natura è stata generosa con i fisici del neutrino.

Sarà possibile misurare in un esperimento europeo la gerarchia di massa, magari facendo concorrenza proprio JUNO? Probabilmente sì: grazie al fatto che $\theta_{13} \sim 8^\circ$, gli effetti di materia e le perturbazioni indotte dalla gerarchia di massa

saranno visibili anche nelle oscillazioni dei neutrini atmosferici. I grandi telescopi di neutrino marini progettati per osservare i neutrini di altissima energia provenienti dal cosmo possono essere riadattati per osservare neutrini a energie del GeV instrumentando con un gran numero di rivelatori piccole porzioni dell’oceano. Questo riadattamento è stato recentemente proposto (per il ghiaccio) dalla Collaborazione Ice-Cube e riproposto (per l’acqua) dalla Collaborazione KM3-Net (si veda l’articolo di V. Flaminio in questo numero di Ithaca). Le osservazioni in acqua verranno effettuate con l’esperimento ORCA (Figura 3), situato nel Mar Mediterraneo, a poca distanza dalle coste francesi, mentre al Polo Sud si acquisiranno dati con l’esperimento PINGU.

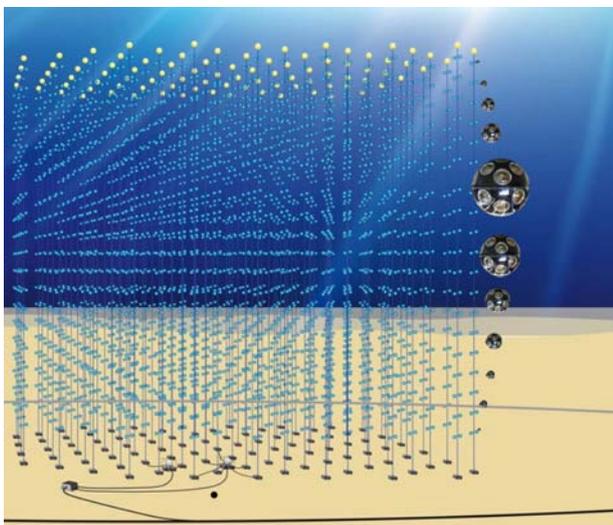


Figura 3: *Disposizione dei fotomoltiplicatori sottomarini per l’osservazione dei neutrini atmosferici in ORCA.*

Il principale vantaggio di questi esperimenti è l’utilizzo di sorgenti di neutrino già presenti nell’ambiente: i neutrini atmosferici per ORCA/PINGU e i neutrini provenienti dai reattori nucleari per JUNO. Questo vantaggio si paga in termini di controllo e conoscenza dello spettro di energia delle sorgenti e determina la principale limitazione alla sensibilità degli esperimenti. Una sorgente completamente controllata, prodotta da acceleratori, all’energia ideale per esaltare gli effetti di materia sarebbe la soluzione ideale. È una soluzione percorribile?

Fasci di neutrino

Storicamente, le sorgenti artificiali di neutrino prodotti dagli acceleratori sono stati la chiave di volta per ottenere un’evidenza incontrovertibile delle oscillazioni. Nei fasci [8], i neutrini sono prodotti dai decadimenti $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$. I pioni (π^+) vengono, a loro volta, prodotti dalle interazioni di protoni con bersagli di grafite o berillio e sono focalizzati da lenti magnetiche. È possibile perciò produrre fasci di neutrini muonici a qualunque energia compresa tra 0.1 e 100 GeV e puntarli - deflettendo i pioni prima che decadano - in qualunque luogo della terra. Sono il modo ideale per studiare le oscillazioni $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ e $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ con precisioni dell’ordine del 1%. Sono le Ferrari della fisica del neutrino e, come le Ferrari, costano una tombola.

Un fascio di neutrini di energia di 1 GeV puntato verso un rivelatore distante 1000 km, può misurare la gerarchia di massa con una precisione enormemente migliore rispetto a JUNO, ORCA e PINGU ed eliminare qualunque dubbio residuo sugli errori sistematici cui sono affette le sorgenti ambientali. Ma il gioco vale la candela? Costruire un fascio esclusivamente per la gerarchia di massa può essere un azzardo economico perché la gerarchia di massa non è un’osservabile continua: è una variabile binaria (gerarchia normale o inversa). La precisione, perciò serve per eliminare l’incertezza sulle fluttuazioni statistiche e gli errori sistematici ma non svolge il ruolo di misura di precisione. Con un po’ di fortuna, JUNO, ORCA e PINGU potrebbero ottenere un’evidenza statistica a 3-4 sigma e combinando i dati si avrebbe una misura solida della gerarchia. Ovviamente, le cose potrebbero andare storte: dati in conflitto porterebbero a un risultato inconcludente, come è successo di recente con i neutrini sterili [1] (si veda l’articolo di P. Bernardini in questo numero di Ithaca). Ma allora, non conviene aspettare e vedere cosa succede?

In realtà, grazie a quanto sappiamo dalle oscillazioni, i fasci di neutrino hanno oggi un’opportunità che dieci anni fa sarebbe apparsa pura fantascienza. Il fatto che tutti gli angoli di mixing siano grandi permette di osservare un’importante effetto interferenziale tra i tre autostati di massa. Nei quark questo effetto genera la violazione della simmetria di coniugazione di carica

e parità (CP) (si veda il riquadro nell'articolo di D. Montanino) ed è, in parte, responsabile dell'asimmetria materia-antimateria nell'universo. Il mescolamento dei neutrini può dare origine a un effetto analogo e rappresenta un'ulteriore sorgente di violazione di CP nell'universo. Osservarla è, concettualmente semplicissimo: basta osservare una differenza tra la probabilità di oscillazione $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ e quella delle rispettive antiparticelle $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$. Questa differenza dipende da una fase complessa nella matrice di mescolamento [1]: se la fase è massima ($\delta = \pi/2$), la differenza è massima, se la fase è nulla ($\delta = 0$) la simmetria di CP è preservata.

I fasci di neutrini agli acceleratori sono l'unica possibilità realistica di osservare la violazione di CP nel settore dei neutrini. Richiedono intensità circa dieci volte maggiori rispetto ai fasci attuali, rivelatori di 10^5 tonnellate e costi che superano il miliardo di Euro. Non vi è discussione sul fatto che questi progetti hanno lo status di "progetti globali", ovvero le cui possibilità di realizzazione trascendono i singoli continenti e richiedono uno sforzo e un coordinamento a livello mondiale di tutti i fisici delle particelle elementari. Quali possibilità ha l'Europa di ospitare una simile facility? Il nostro continente ha due assi nella manica: il CERN a Ginevra e la European Spallation Source a Lund. Entrambe queste installazioni possono fornire le sorgenti di protoni intensissime necessarie per lo studio della violazione di CP. La prima permette anche lo studio della gerarchia di massa [9], la seconda si limita allo studio della violazione di CP [10]. Entrambe, tuttavia, necessitano della costruzione di un rivelatore con una massa adeguata.

Fuori dall'Europa, gli Stati Uniti propongono un progetto simile a quello basato sul CERN: i protoni vengono prodotti e accelerati al laboratorio Fermilab (Illinois) e i neutrini sono puntati verso l'esperimento DUNE (South Dakota), a circa 1300 km di distanza. In questo momento, il progetto americano è l'unico che può vantare un finanziamento sostanziale (circa il 75% del costo) da parte del governo ospitante. Il Giappone propone di utilizzare il laboratorio JPARC, nel Sendai, per inviare neutrini verso un nuovo rivelatore (HyperKamiokande) posto a 230 km di distanza. La proposta giapponese non è al momento finanziata, non ha sensibilità alla ge-

rarchia di massa ma ha la migliore sensibilità alla violazione di CP.

Potremmo disquisire a lungo sui pro e contro delle diverse proposte. Temo però che a questo punto le considerazioni di fisica dovranno essere necessariamente integrate da considerazioni di natura strategica e di opportunità economica: un compito a cui rinuncio volentieri.

Conclusioni

Da 15 anni la fisica del neutrino corre a ritmi serrati. La chiave di questa accelerazione è stata la scoperta delle oscillazioni di neutrino: un fenomeno che ha riplasmato dalle fondamenta la nostra disciplina e ha permesso di identificare precisamente gli obiettivi e le sfide per gli esperimenti di prossima generazione. La fisica del neutrino, oggi, lascia spazio a molte tipologie di progetti: esperimenti "a misura di università" e grandi progetti internazionali costruiti su facilities condivise. L'Europa, d'altronde, possiede molte infrastrutture ideali per la fisica del neutrino: laboratori sotterranei, grandi acceleratori e centri di ricerca focalizzati sullo sviluppo di nuove tecnologie, e ha le potenzialità per giocare un ruolo determinante anche nel prossimo decennio. La frase che ho sentito più spesso pronunciare nelle rassegne del mio settore è stata: "siamo stati davvero fortunati" o, ancora, "la Natura è stata generosa con i fisici del neutrino". Tutto questo è vero - e spero di essere riuscito a spiegarne il senso nelle pagine che precedono - ma non deve spingere a sottovalutare l'inventiva e la determinazione con cui abbiamo perseguito i nostri programmi sperimentali. La Natura non sempre è generosa ma, spesso, la fortuna aiuta gli audaci.



- [1] D. Montanino, "Le oscillazioni di Neutrino", *Ithaca*, questo numero.
- [2] K.A. OLIVE ET AL. (PARTICLE DATA GROUP): "Review of Particle Physics", *Chin. Phys. C* **38** (2014) 090001.
- [3] G. DREXLIN ET AL.: "Current Direct Neutrino Mass Experiments", *Advances in High Energy Physics* **2013** (2013) 293986.
- [4] A. GIULIANI AND A. POVES: "Neutrinoless Double-Beta Decay", *Advances in High Energy Physics* **2012** (2012) 857016.

- [5] E. Lisi, "Neutrini: messaggeri di nuova fisica", *Ithaca*, questo numero.
- [6] R.B. Patterson, "Prospects for Measurement of the Neutrino Mass Hierarchy", arXiv:1506.07917 [hep-ex].
- [7] S.T. PETCOV AND M. PLAT: "The LMA MSW Solution of the Solar Neutrino Problem, Inverted Neutrino Mass Hierarchy and Reactor Neutrino Experiments", *Phys. Lett. B* **533** (2002) 94.
- [8] S. KOPP: "Accelerator-based neutrino beams", *Phys. Rep.* **439** (2007) 101.
- [9] A. RUBBIA: "LAGUNA-LBNO: Design of an underground neutrino observatory coupled to long baseline neutrino beams from CERN", *J.Phys.Conf.Ser.* **408** (2013) 012006.
- [10] M. DRACOS: "The ESS Based Neutrino Super Beam for CP Violation Discovery", *Phys. Procedia* **61** (2015) 459.

+
+ +

Francesco Terranova: È professore associato di Fisica Sperimentale presso l'Università di Milano Bicocca. Da 15 anni lavora nella fisica del neutrino, occupandosi sia di esperimenti di oscillazione con sorgenti artificiali sia di decadimenti doppio-beta.