

---

# La frontiera dei neutrini sterili

Paolo Bernardini

Dipartimento di Matematica e Fisica "Ennio De Giorgi" - Università del Salento

---

**L**e oscillazioni di neutrino sono ormai un fenomeno acquisito: oscillano i neutrini *naturali* (prodotti dai raggi cosmici nell'atmosfera oppure dalle reazioni nucleari nel Sole), oscillano anche quelli *artificiali* (da reattori nucleari o da acceleratori di particelle). I parametri caratteristici delle oscillazioni sono oggetto di misure sempre più precise e il puzzle sembra ormai quasi completo. Eppure alcuni tasselli sperimentali non trovano ancora il loro posto. Se queste misure anomale dovessero essere confermate, si aprirebbero scenari entusiasmanti. La nuova fisica, cercata con le grandi macchine acceleratrici, potrebbe invece palesarsi ancora una volta dalle bizzarrie dei neutrini. L'esistenza di neutrini sterili, che interagiscono solo gravitazionalmente, aprirebbe nuovi orizzonti di ricerca, ma per ora è solo un'ipotesi. In questo articolo, cercando di evitare approfondimenti troppo tecnici e senza la pretesa di completezza, verranno presentati sinteticamente i dati sperimentali anomali, l'ipotesi di altri neutrini, oltre a quelli già noti, e lo stato dell'arte nella ricerca dei neutrini sterili.

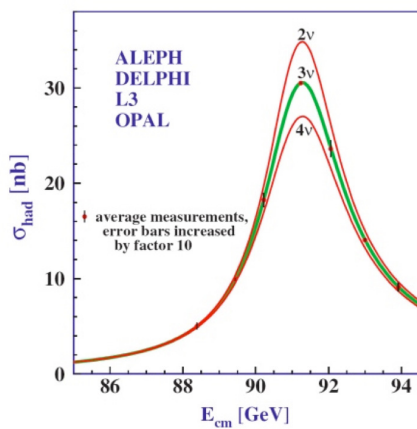
## Introduzione

Da quando nel 1930 Wolfgang Pauli suggerì l'esistenza di una particella neutra e priva di massa per spiegare lo spettro continuo degli elettroni da decadimento beta, i neutrini hanno sempre riservato grandi sorprese per i fisici teorici e sperimentali. La probabilità che essi interagiscano con la materia è estremamente bassa e quindi servono flussi di neutrini molto intensi ed apparati sperimentali molto grandi per rivelarli in numero adeguato. Verso la fine degli anni '90 è stato scoperto che i neutrini oscillano, cioè cambiano sapore durante il loro cammino (si veda l'articolo di D. Montanino in questo numero di *Ithaca*). Ad esempio, l'esperimento Opera al Gran Sasso ha verificato che un neutrino muonico ( $\nu_\mu$ ) con un'energia di 20 GeV ha una certa probabilità di diventare un neutrino tau ( $\nu_\tau$ ), e venire rivelato come tale, dopo aver percorso 730 km. È opportuno sottolineare che i fenomeni oscillatori possono manifestarsi in apparizione, come nell'esempio precedente, oppure in scomparsa, cioè con una riduzione del numero di neutrini che ci si aspetta di osservare.

Attualmente la gran parte dei dati sperimentali è coerente con un modello nel quale i neutrini hanno massa ed assumono tre sapori ( $\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$ ). Questi stati di sapore sono combinazioni (*mixing*) di tre autostati di massa ( $m_1, m_2, m_3$ ). Il modello è caratterizzato dagli angoli di *mixing* ( $\theta_{12}, \theta_{23}, \theta_{13}$ ) e dalle differenze dei quadrati della

## Il decadimento dello $Z^0$

Il collisore LEP (Large Electron Positron) ha permesso numerose misure di precisione nella fisica delle particelle elementari. È stata misurata anche la larghezza di decadimento del bosone neutro  $Z^0$  (Figura 1) che viene generato e distrutto nelle interazioni deboli di corrente neutra. La larghezza aumenta col numero dei possibili canali di decadimento, cioè delle coppie particella-antiparticella che possono essere generate, a condizione che la massa totale non sia maggiore di quella dello  $Z^0$  (91.2 GeV). I canali direttamente osservabili sono quelli leptone carico - antileptone carico ( $e^-e^+$ ,  $\mu^-\mu^+$ ,  $\tau^-\tau^+$ ) e quelli adronici (quark-antiquark). I canali neutrino-antineutrino non sono direttamente osservabili, ma contribuiscono alla larghezza totale che quindi dipende dal numero di neutrini. I punti sperimentali in Figura 1 sono consistenti con tre sapori dei neutrini ed escludono l'esistenza di altri neutrini che si accoppino con lo  $Z^0$ , a meno di non azzardare l'ipotesi di neutrini con massa superiore alla metà di quella dello  $Z^0$ .



**Figura 1:** Misure a LEP della larghezza di decadimento del bosone  $Z^0$ . I punti sperimentali sono confrontati con differenti modelli che prevedono 2, 3 o 4 famiglie di neutrini. Come si osserva facilmente, i dati sperimentali suggeriscono l'esistenza di sole 3 famiglie neutriniche (curva verde). Si noti che gli errori sperimentali sono stati ingranditi 10 volte per renderli visibili, quindi l'accordo col modello a 3 neutrini è molto forte.

masse ( $\Delta m_{21}^2$  e  $\Delta m_{32}^2$ ). Tutti questi parametri sono stati misurati e la ricerca sulle oscillazioni dei neutrini sembra ormai destinata a misure di sempre maggiore precisione, mentre l'interesse della comunità scientifica si è spostato su altri temi (gerarchia delle masse, violazione di CP, neutrini astrofisici). Eppure, nonostante gli indubbi successi dell'attuale teoria delle oscillazioni a tre sapori, alcuni dati sperimentali suggeriscono che la teoria non sia completa e che si debba ipotizzare l'esistenza di altri neutrini.

Una prima anomalia sperimentale riguarda gli

antineutrini elettronici ( $\bar{\nu}_e$ ) provenienti dai reattori nucleari. Un'accurata rianalisi delle reazioni nucleari che avvengono nei reattori, indica che i flussi misurati risultano inferiori all'attesa. Un deficit simile è stato osservato anche nei flussi dei neutrini provenienti da sorgenti con una radioattività dell'ordine del MegaCurie, usate per la calibrazione degli esperimenti radiochimici progettati per lo studio dei neutrini solari. Infine, due esperimenti americani (LSND e MiniBooNE) hanno individuato degli antineutrini elettronici in un fascio di antineutrini muonici. Questi fenomeni di scomparsa e di apparizione sono stati osservati su corta-base (cioè a piccole distanze in rapporto all'energia dei neutrini come verrà chiarito più avanti.) e non sono assolutamente spiegabili ipotizzando che esistano solo tre tipi di neutrini. D'altro canto, le misure sulla larghezza di decadimento del bosone  $Z^0$  eseguite al collisore LEP (vedere la scheda sull'argomento) pongono limiti stringenti al numero dei neutrini attivi: i neutrini che interagiscono debolmente, accoppiandosi con i bosoni  $W^+$ ,  $W^-$  e  $Z^0$ , e che possono generare i leptoni carichi ( $e$ ,  $\mu$ ,  $\tau$ ) sono solo tre ( $\nu_e$ ,  $\nu_\mu$ ,  $\nu_\tau$ ) [1]. Quindi, queste misure anomale trovano spiegazione solo assumendo l'esistenza di altri neutrini, già ipotizzati da Pontecorvo circa cinquant'anni fa [2]. Essi non potrebbero accoppiarsi con i bosoni mediatori dell'interazione debole, sarebbero privi di una controparte carica e quindi vengono definiti sterili. Dato che i neutrini non interagiscono elettromagneticamente e neanche partecipano all'interazione forte, che interessa principalmente protoni e neutroni, ai

neutrini sterili sarebbero sensibili solo all'interazione gravitazionale, a meno di non introdurre nuove interazioni. Si potrebbero osservare solo grazie al fenomeno dell'oscillazione e quindi sarebbero particelle ancora più elusive dei neutrini attivi. La loro scoperta sarebbe comunque fondamentale per la comprensione dell'universo perché i neutrini hanno un ruolo enorme nella evoluzione cosmica. Per approfondire le tante implicazioni dell'eventuale esistenza dei neutrini sterili, si consiglia la lettura della referenza [3].

## Le anomalie sperimentali

Prima di passare in rassegna le misure incompatibili con l'attuale teoria delle oscillazioni a tre sapori è opportuno comprendere perché quest'ultima non preveda fenomeni di apparizione o di scomparsa su corta-base. In una rappresentazione semplificata dell'oscillazione, limitata a due sapori e due autostati di massa, la probabilità che un neutrino con sapore iniziale  $\alpha$  venga osservato come neutrino di sapore  $\beta$  risulta

$$P_{\alpha \rightarrow \beta} = \sin^2 2\theta_{ij} \sin^2 (1.27 \Delta m_{ij}^2 L_{\text{km}} / E_{\text{GeV}}), \quad (1)$$

dove gli indici  $i$  e  $j$  indicano gli autostati di massa,  $L_{\text{km}}$  è la distanza in km percorsa dal neutrino,  $E_{\text{GeV}}$  è la sua energia in GeV e il termine  $\Delta m_{ij}^2$  è espresso in  $\text{eV}^2$ . I parametri dell'oscillazione sono stati misurati con crescente precisione negli ultimi anni. I valori più aggiornati per le differenze dei quadrati delle masse risultano [4]

$$\Delta m_{21}^2 = (7.53 \pm 0.18) \times 10^{-5} \text{ eV}^2,$$

$$\Delta m_{32}^2 = (2.44 \pm 0.06) \times 10^{-3} \text{ eV}^2.$$

Utilizzando questi valori per calcolare il secondo fattore dell'espressione (1) e assumendo un esperimento su corta-base, cioè col rapporto  $L_{\text{km}} / E_{\text{GeV}} = L_{\text{m}} / E_{\text{MeV}} \simeq 1$ , si ottiene per  $\Delta m_{21}^2$

$$\begin{aligned} & \sin^2 (1.27 \Delta m_{21}^2 L_{\text{km}} / E_{\text{GeV}}) \\ &= \sin^2 (1.27 \times 7.53 \times 10^{-5}) = 9 \times 10^{-9}, \end{aligned}$$

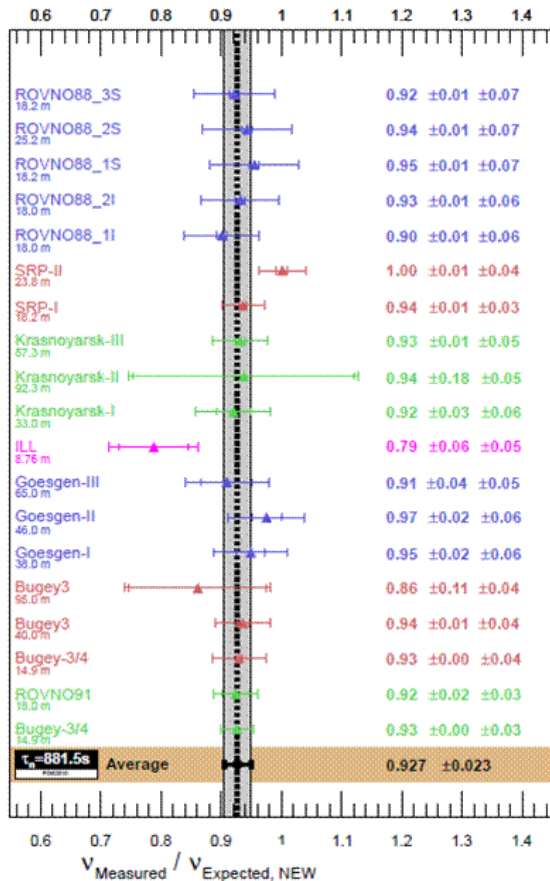
e per  $\Delta m_{32}^2$

$$\begin{aligned} & \sin^2 (1.27 \Delta m_{32}^2 L_{\text{km}} / E_{\text{GeV}}) \\ &= \sin^2 (1.27 \times 2.44 \times 10^{-3}) = 1 \times 10^{-5}. \end{aligned}$$

In altre parole, ricordando che il fattore  $\sin^2 2\theta_{ij}$  non può essere maggiore dell'unità, la probabilità di osservare qualche neutrino *oscillato* ( $\nu_\beta$  nell'esempio fatto) è praticamente nulla per un esperimento su corta-base. Ovviamente, di converso, non è neanche pensabile osservare la scomparsa degli originari neutrini- $\alpha$  perché questi hanno una probabilità di circa il 100% di conservare il loro sapore. Conti più accurati, tenendo conto dei tre sapori dei neutrini e dei tre autostati di massa, portano a risultati molto simili. Si può quindi concludere che nessun fenomeno di oscillazione dovrebbe manifestarsi in esperimenti su corta-base.

Viceversa è facile verificare che la probabilità di oscillazione diventerebbe significativa anche per misure su corta-base, ipotizzando un altro valore per la differenza dei quadrati delle masse ( $\Delta m_{\text{sterile}}^2$ ) molto maggiore di  $\Delta m_{21}^2$  e  $\Delta m_{32}^2$ . Le misure che vengono presentate qui di seguito, tutte su corta-base, hanno appunto evidenziato fenomeni oscillatori, suggerendo addirittura  $\Delta m_{\text{sterile}}^2 \gtrsim 1 \text{ eV}^2$ .

**Gli antineutrini dai reattori nucleari** - Il primo neutrino fu osservato da Reines e Cowan negli anni '50, presso il reattore di Savannah River, grazie ad un processo che viene chiamato decadimento beta inverso. L'antineutrino prodotto nel reattore è catturato dal protone che si trasforma in un neutrone emettendo un positrone:  $p + \bar{\nu}_e \rightarrow n + e^+$  Da allora molte altre misure sono state eseguite per monitorare il funzionamento dei reattori nucleari e studiare la fisica del neutrino, tipicamente con rivelatori singoli. La mancanza di un secondo rivelatore più vicino al reattore impedisce di conoscere il flusso di neutrini prima che l'oscillazione si possa manifestare, l'unico confronto possibile è con previsioni teoriche. Nel 2011 è stata pubblicata una nuova stima del flusso di antineutrini, utilizzando i più aggiornati database nucleari e raffinando le tecniche di calcolo [5]. I flussi di antineutrini prodotti da alcuni isotopi dell'uranio ( $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ) e del plutonio ( $^{239}\text{Pu}$ ,

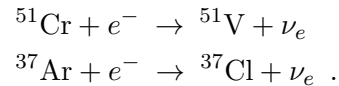


**Figura 2:** Rapporto tra flussi di neutrini da reattore misurati e attesi (19 esperimenti). Si osserva chiaramente un deficit dei neutrini misurati.

$^{241}\text{Pu}$ ) sono stati ricalcolati nell'intervallo 2 – 8 MeV, mediamente con un aumento del 3% rispetto al passato. Questo ha comportato un riesame dei risultati già pubblicati per 19 esperimenti, tutti ad una distanza dal reattore inferiore a 100 m, tenendo conto anche di una nuova stima della vita media del neutrone. In Figura 2 i dati sperimentali sono confrontati con le nuove previsioni. Tenendo conto di tutti i 19 esperimenti il rapporto misura/previsione risulta  $R = 0.927 \pm 0.023$ , con una significatività statistica superiore a  $3 \sigma$ . In altre parole si osserva la scomparsa di oltre il 7% dei neutrini. Questo risultato si può spiegare assumendo l'oscillazione dei neutrini con  $\Delta m^2 \simeq 2.4 \text{ eV}^2$ .

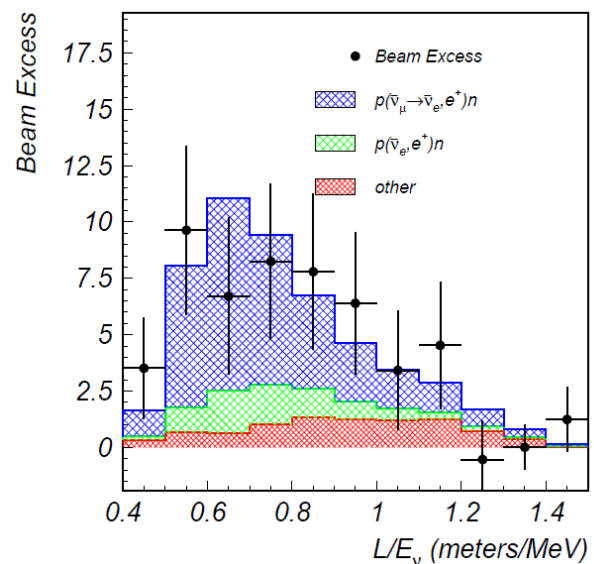
**Le sorgenti di calibrazione** - Gli esperimenti GALLEX e SAGE hanno misurato il flusso di neutrini solari grazie alla trasformazione del gallio in germanio ( $^{71}\text{Ga} + \nu_e \rightarrow ^{71}\text{Ge} + e^-$ ). Questa tecnica di misura è stata calibrata utilizzando sorgenti radioattive di cromo e argon,

particolarmente intense, in grado di emettere neutrini per cattura elettronica:



I neutrini elettronici così prodotti sono stati rivelati con la stessa procedura radiochimica usata per studiare i neutrini solari. Entrambi gli esperimenti hanno conteggiato un numero di eventi inferiore a quanto atteso (scomparsa). Combinando i risultati degli esperimenti GALLEX e SAGE il rapporto tra misura ed aspettazione risulta  $R = 0.86 \pm 0.05$  (significatività statistica  $2.8 \sigma$ ) a cui corrisponde  $\Delta m^2 \geq 0.35 \text{ eV}^2$ . Per un'analisi approfondita sulla cosiddetta anomalia del gallio, si legga la referenza [6].

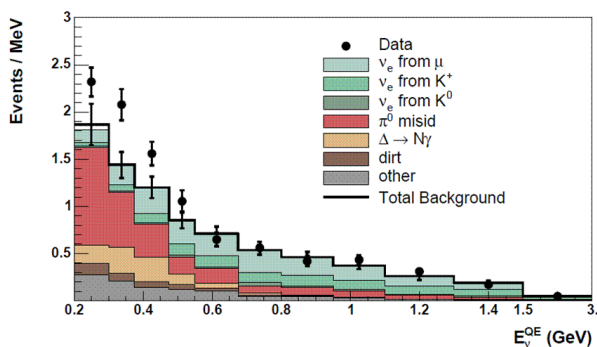
**LSND e MiniBoone** - L'esperimento Liquid Scintillation Neutrino Detector (LSND) a Los Alamos è stato progettato per cercare effetti di oscillazione in un fascio di antineutrini muonici ( $\bar{\nu}_\mu$ ), in particolare per osservare la transizione  $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$ . I neutrini del fascio hanno un'energia compresa tra 20 e 75 MeV, sono generati dal decadimento dei  $\mu^+$  e percorrono una distanza di 30 m prima di raggiungere il rivelatore. Anche in questo caso, come nei



**Figura 3:** LSND - La distribuzione di eventi da  $\bar{\nu}_e$  rispetto al rapporto  $L_m/E_{\text{MeV}}$  [7]. È necessario ipotizzare l'oscillazione (fascia blu) per rendere i dati compatibili con l'attesa.

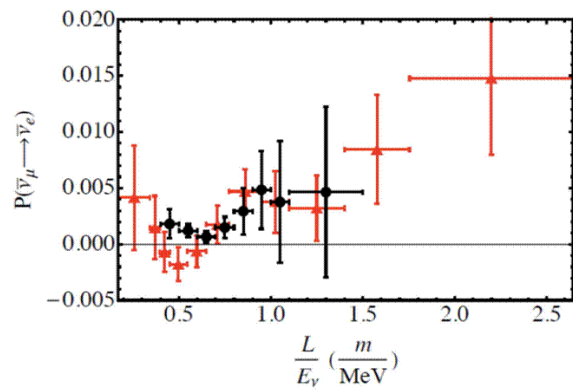


precedenti, si tratta di un esperimento su cortabase, dato che il rapporto  $L_m/E_{\text{MeV}}$  è dell'ordine dell'unità. Il segnale di oscillazione (apparizione di antineutrini elettronici) è rivelato, come per gli antineutrini da reattore, attraverso la reazione di cattura  $p + \bar{\nu}_e \rightarrow n + e^+$ . Essa è caratterizzata da una doppia segnatura: il segnale del positrone seguito da un fotone gamma di 2.2 MeV dovuto alla cattura del neutrone. La Figura 3 ben sintetizza il risultato della misura di LSND: i dati sperimentali (punti neri) non sono compatibili con il fondo atteso (banda rossa e banda verde). Solo introducendo un altro segnale (banda blu) da neutrini *oscillati* si ottiene una distribuzione compatibile con la misura [7]. Il valore di  $\Delta m^2$  si colloca nell'intervallo 0.2 – 2.0 eV<sup>2</sup>. Un altro esperimento, denominato KARMEN ha eseguito misure simili, senza trovare segnali di oscillazione, ma senza neanche poter completamente escludere il risultato di LSND.



**Figura 4:** MiniBooNE - La distribuzione in energia degli eventi da  $\nu_e$ . I punti neri rappresentano la misura, mentre le bande colorate rappresentano i diversi fondi [8]. I neutrini osservati sono più numerosi di quanto previsto alle basse energie.

L'esperimento MiniBooNE a Fermilab è stato progettato essenzialmente per verificare la misura di LSND ed ha operato sia con un fascio di neutrini muonici che con un fascio di antineutrini muonici. I neutrini elettronici generati dall'oscillazione ( $\nu_e$ ) sono stati rivelati cercando interazioni con i nuclei di carbonio ( $\nu_e + C \rightarrow e^- + X$ ). I risultati della misura [8] sono riportati in Figura 4 dove si vede un eccesso di eventi a basse energie. Questo risultato non è compatibile con quello di LSND, a meno di non introdurre modelli di oscillazione più complessi e la violazione di CP,



**Figura 5:** La probabilità di oscillazione  $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$  misurata da LSND (punti neri) e da MiniBooNE (punti rossi) in funzione del rapporto  $L_m/E_{\text{MeV}}$  [9]. I risultati dei due esperimenti sono compatibili entro le barre d'errore.

cioè una asimmetria tra neutrini e antineutrini. Le misure sono state ripetute con il fascio di antineutrini, questa volta con risultati [9] compatibili con quelli di LSND (vedere Figura 5).

**Possibile spiegazione** - I singoli risultati anomali non sono di per sé particolarmente significativi, si passa dal risultato di LSND a  $3.8 \sigma$  a quello delle sorgenti al MegaCurie ( $2.8 \sigma$ ). Ma combinati tra loro assumono maggiore significatività e rafforzano l'ipotesi del neutrino sterile. Quindi i valori di  $\Delta m^2$  suggeriti dalle misure possono essere interpretati come  $\Delta m^2_{\text{sterile}}$ , cioè come la differenza tra il quadrato della massa del  $\nu$  sterile e il quadrato della massa di un neutrino attivo. L'eventuale scoperta dei neutrini sterili aprirebbe la strada a nuova fisica. Si potrebbero ipotizzare interazioni non-standard, oltre alle quattro già note (elettromagnetica, debole, forte e gravitazionale), e i modelli cosmologici dovrebbero tener conto di queste nuove particelle massive. La possibilità forse più affascinante è che la materia oscura sia proprio costituita dai neutrini sterili. In effetti già i neutrini attivi ( $\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$ ) potrebbero essere i candidati naturali per la materia oscura, ma essi risultano troppo leggeri e non permettono di spiegare le strutture osservate su larga scala. I neutrini sterili, così scarsamente interagenti con la materia ordinaria, dotati di una massa maggiore, sembrano anch'essi buoni candidati. Questa ipotesi dei neutrini sterili come materia oscura viene rafforzata da alcuni studi teorici che ipotizzano l'esistenza di diversi neu-

trini sterili, addirittura con masse dell'ordine del keV.

È comunque opportuno ricordare che altre misure non hanno trovato evidenza di oscillazioni anomale, ma senza arrivare ad escluderle completamente. È stato già citato l'esperimento KARMEN, va anche ricordato che il satellite PLANCK, dedicato alla misura della radiazione cosmica di fondo, ha posto vincoli severi [10], anche se non definitivi, all'esistenza dei neutrini sterili, che se esistessero dovrebbero contribuire alla radiazione presente nell'universo, riscaldandosi nella sequenza di oscillazione e collisione.

## La ricerca del neutrino sterile

Come si è visto il panorama sperimentale non è di facile interpretazione e può essere chiarito solo da esperimenti con un'alta sensibilità, che non lascino spazio a dubbi. Molti esperimenti sono stati progettati, con lo scopo di indagare le tre anomalie. Per quanto riguarda il flusso di neutrini dai reattori, si conta di utilizzare al meglio apparati già esistenti, dedicati al monitoraggio delle centrali nucleari, oppure di mettere in opera nuovi apparati di misura. Progetti in questo senso sono stati avviati in Belgio, Francia, Russia, Corea e Cina. Due esperimenti (CeLand e SOX) intendono invece indagare sui neutrini da sorgenti ad altissima attività; per fare ciò utilizzeranno sorgenti di cesio ( $^{144}\text{Ce}$ ) e cromo ( $^{51}\text{Cr}$ ) in prossimità o all'interno dei rivelatori KamLand in Giappone e Borexino al Gran Sasso.

Indagare sull'anomalia di LSND e MiniBooNE richiede un fascio di neutrini e rivelatori adeguati. Una possibilità era rappresentata dall'uso combinato di una *Time Projection Chamber* (TPC), capace di "fotografare" gli eventi da neutrino elettronico in un fascio di neutrini muonici, e di uno spettrometro, in grado di misurare la carica e il flusso dei muoni [11, 12]. Il progetto prevedeva la realizzazione di due coppie di rivelatori, a distanze diverse, che permettessero di osservare l'oscillazione in funzione del cammino percorso dai neutrini. Purtroppo questo progetto, in gran parte italiano, ha subito una battuta d'arresto perché il management del CERN ha rinunciato, almeno per ora, a realizzare un fascio di neutrini. A Ginevra comunque è in fase di rea-

lizzazione una *Neutrino Platform*, cioè un'area sperimentale dove sviluppare e collaudare rivelatori destinati a ricerche sui neutrini negli Stati Uniti e in Asia.

Attualmente solo gli Stati Uniti hanno avviato un programma di ricerca del neutrino sterile su fascio. Questo in fondo non meraviglia, dato che sia LSND che MiniBooNE sono esperimenti americani. A Fermilab, dove è in funzione il *Booster Neutrino Beam*, si lavora per eseguire misure con la tecnica delle TPC ad argon liquido. Sono previsti tre rivelatori (LAR1-ND, MicroBooNE e Icarus) a diverse distanze (circa 100, 470 e 600 m) dal tunnel di produzione dei neutrini. MicroBooNE era stato progettato essenzialmente per indagare le misure anomale di MiniBooNE, eventualmente completato da LAR1-ND, come rivelatore vicino (*Near Detector*) per monitorare le caratteristiche del fascio prima che le oscillazioni si manifestino. Successivamente la collaborazione Icarus, diretta dal premio Nobel Carlo Rubbia, ha proposto di utilizzare il rivelatore da 600 tonnellate, già operativo nei laboratori del Gran Sasso, per completare il setup sperimentale con un rivelatore lontano (*Far Detector*) che possa osservare al meglio l'eventuale apparizione di  $\nu_e$ . Le tre collaborazioni lavorano in stretto coordinamento con la prospettiva di avviare la presa dati combinata nella primavera 2018.

Un'altra collaborazione (NESSiE), in maggioranza italiana, di cui fa parte anche l'autore di questo articolo, ha proposto di riutilizzare gli spettrometri dell'esperimento OPERA, già in funzione al Gran Sasso, per misurare l'eventuale scomparsa dei  $\nu_\mu$ , ulteriore inevitabile segnatura del fenomeno oscillatorio [13]. Il Program Advisory Committee (PAC) di Fermilab ha giudicato scientificamente fondata la proposta, ma non compatibile con le disponibilità finanziarie e gli impegni già assunti a Fermilab.

## Conclusioni

Il modello con tre neutrini massivi è in grado di spiegare la gran parte dei fenomeni oscillatori osservati. Solo poche misure, peraltro controverse, sembrano indicare che non tutto è stato compreso. Un principio di cautela suggerirebbe di non investire nella ricerca dei neutrini sterili, ma è difficile spegnere gli

entusiasmi scatenati dalla possibilità di scoprire qualcosa di completamente nuovo. La scoperta del neutrino sterile rappresenterebbe una svolta epocale nella comprensione dell'universo e quindi il gioco sembra proprio valere la candela. Nei prossimi anni sapremo se i neutrini hanno ancora altre sorprese in serbo per noi.



- [1] ALEPH, DELPHI, L3, OPAL AND SLD COLLABORATION: "Precision electroweak measurements on the Z resonance", *Physics Report* **427** (2006) 257.
- [2] B. PONTECORVO: "Neutrino experiments and the question of leptonic-charge conservation", *Sov. Phys. JETP* **26** (1968) 984.
- [3] K.N. Abazajiana et al. "Light Sterile Neutrinos: A White Paper", arXiv:1204.5379v1.
- [4] K.A OLIVE ET AL. (PARTICLE DATA GROUP): "The Review of Particle Physics", *Chin. Phys. C* **38** (2014) 090001.
- [5] TH. A. MUELLER ET AL.: "Improved predictions of reactor antineutrino spectra", *Phys. Rev. C* **83** (2011) 054615.
- [6] C. GIUNTI, M. LAVADE: "Statistical significance of the gallium anomaly", *Phys. Rev. C* **83** (2011) 065504.
- [7] A. AGUILAR ET AL. (LSND COLLABORATION): "Evidence for neutrino oscillations from the observation of  $\bar{\nu}_e$  appearance in a  $\bar{\nu}_\mu$  beam", *Phys. Rev. D* **64** (2001) 112007.
- [8] A. A. AGUILAR-AREVALO ET AL. (MINIBOONE COLLABORATION): "Unexplained Excess of Electronlike Events from a 1-GeV Neutrino Beam", *Phys. Rev. Lett.* **102** (2009) 101802.
- [9] A.A. AGUILAR-AREVALO ET AL. (MINIBOONE COLLABORATION): "Event Excess in the MiniBooNE Search for  $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$  Oscillations", *Phys. Rev. Lett.* **105** (2010) 181801.

- [10] A. MIRIZZI ET AL: "The strongest bounds on active-sterile neutrino mixing after Planck data", *Phys. Lett. B* **726** (2013) 8 .
- [11] P. Bernardini et al. (NESSiE Collaboration) "Prospect for Charge Current Neutrino Interactions Measurements at the CERN-PS", arXiv:1111.2242.
- [12] M. Antonello et al. (ICARUS Collaboration), M. Benetoni (NESSiE Collaboration) "Search for anomalies from neutrino and anti-neutrino oscillations at  $\Delta m^2 \sim 1 \text{ eV}^2$  with muon spectrometers and large LAr-TPC imaging detectors", arXiv:1203.3432.
- [13] A. Anokhina et al. (NESSiE Collaboration) "Prospects for the measurement of muon-neutrino disappearance at the FNAL-Booster", arXiv:1404.2521. A. Anokhina et al. (NESSiE Collaboration) "Search for sterile neutrinos in the  $\nu_\mu$  disappearance mode at FNAL", sottomesso per la pubblicazione a *Phys. Review D*



**Paolo Bernardini:** È professore associato di Fisica Nucleare e Subnucleare presso l'Università del Salento. Nei primi anni della sua carriera, all'Università di Urbino, si è interessato di storia della fisica e di elettronica quantistica. Trasferitosi a Lecce nel 1988, si è dedicato alla fisica astroparticellare, nell'ambito delle attività dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare. Ha collaborato all'esperimento MACRO presso i laboratori sotterranei del Gran Sasso, contribuendo alle analisi sui neutrini atmosferici che portarono alla scoperta del fenomeno delle oscillazioni. Successivamente si è dedicato all'esperimento ARGO-YBJ presso l'osservatorio di alta quota di YangBaJing in Tibet. Dal 2000 è uno degli organizzatori del Neutrino Oscillation Workshop (NOW).

