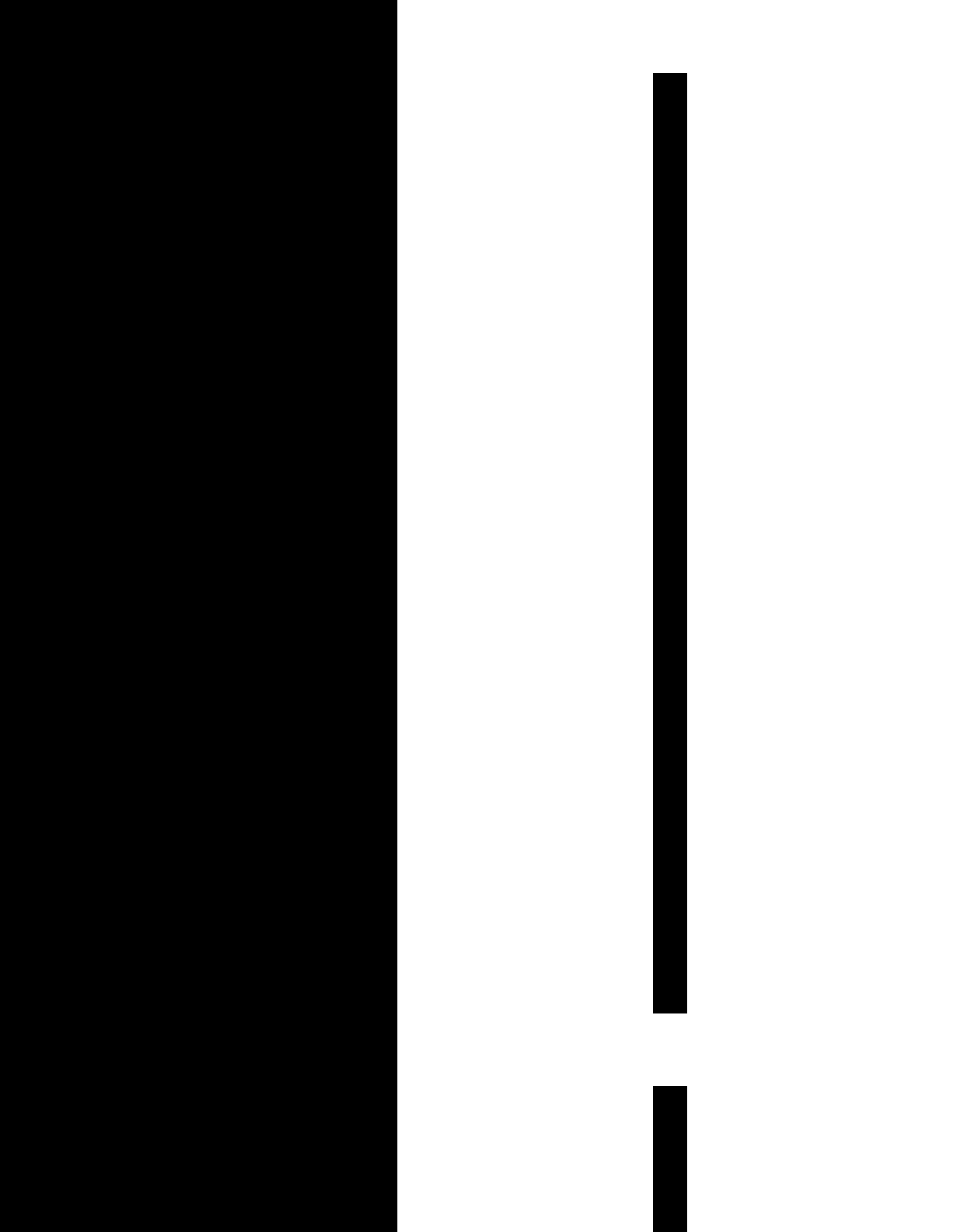


[neutrini]

anno 15 numero **29** / 11.20

asimmetrie

rivista semestrale dell'Istituto
Nazionale di Fisica Nucleare



asimmetrie

Care lettrici e cari lettori,

tutto ebbe inizio nel dicembre del 1930, quando a Tubinga si tenne una conferenza sulla radioattività a cui era stato invitato anche Wolfgang Pauli. Non riuscendo a parteciparvi a causa di un'importante festa da ballo a Zurigo, Pauli inviò ai congressisti una lettera in cui, oltre ovviamente a scusarsi per l'assenza, ipotizzava l'esistenza di una particella elettricamente neutra con massa vicina a quella dell'elettrone, che chiamò "neutrone".

Tre anni dopo, nel 1933, questa piccolissima particella fu ribattezzata "neutrino" da Enrico Fermi, che riteneva più appropriato l'utilizzo del diminutivo italiano. Tuttora questo è il suo nome, in tutto il mondo.

Un avvio un po' insolito per uno dei protagonisti della fisica di oggi. Da allora, tanta strada è stata fatta: abbiamo trovato conferma che il neutrino ha una massa seppur piccolissima, che ha diversi sapori, che si trasforma durante il suo cammino. È, però, una particella molto elusiva, difficile da rivelare, dato che interagisce pochissimo con la materia; per osservarla, abbiamo bisogno di esperimenti giganteschi, in luoghi silenziosissimi, il più possibile liberi da altre particelle provenienti dal cosmo. Ma poiché interagisce poco possiamo utilizzare il neutrino come un messaggero straordinario che ci porta informazioni dall'universo più profondo, dall'interno delle stelle, come il nostro Sole e dagli eventi più catastrofici, come l'esplosione di una stella. Per questi motivi l'Infn, protagonista nello studio dei neutrini, all'inizio degli anni '80 con il grande impegno dell'allora presidente Antonino Zichichi, ha promosso la costruzione dei Laboratori Nazionali del Gran Sasso, oggi i laboratori sotterranei più grandi del mondo, che con i loro esperimenti hanno ampliato le nostre conoscenze sulla fisica del neutrino: da Opera, che ha osservato l'oscillazione

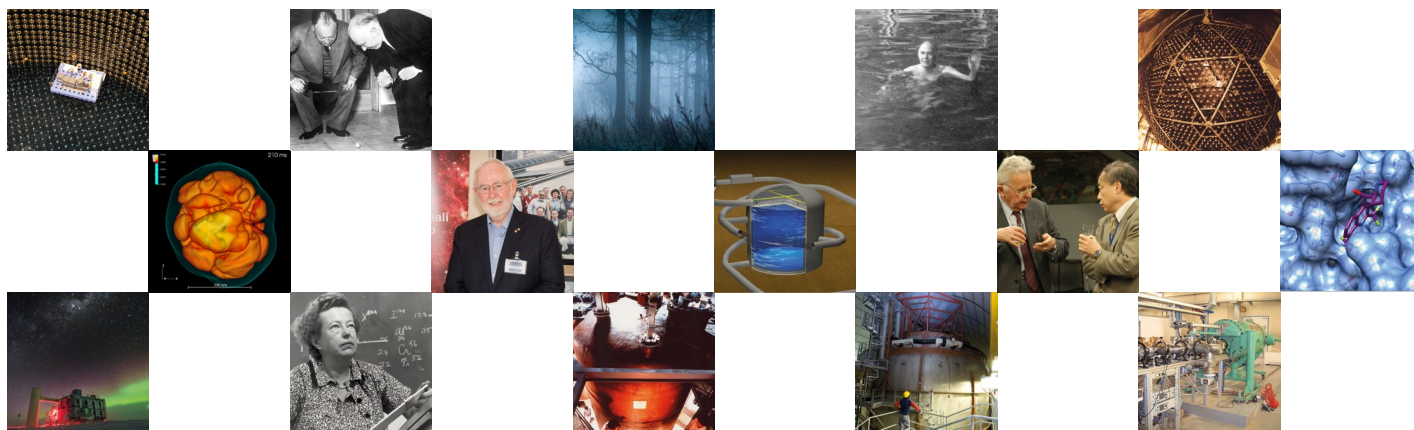
dei neutrini in un fascio artificiale proveniente dal Cern, passando per Lvd, che ricerca i neutrini delle supernovae, da Cuore e Gerda che studiano le proprietà dei neutrini attraverso decadimenti rarissimi, fino a Borexino, che ci ha permesso di rivelare i neutrini che provengono dal Sole e di studiare le reazioni nucleari che avvengono al suo interno.

La strada da fare è però ancora tanta, ci sono molti misteri che rimangono irrisolti e molte domande senza risposta. Per esempio: il neutrino è uguale alla sua antiparticella? Qual è la sua massa? Esiste un quarto tipo di neutrino? Per rispondere a questi interrogativi, tante ricercatrici e ricercatori in tutto il mondo continuano a studiare questa particella e l'Infn partecipa a queste ricerche sia conducendo esperimenti nei propri laboratori, sia lavorando in grandi progetti internazionali, come Km3net nelle profondità del Mediterraneo, DUNE negli Stati Uniti, o JUNO in Cina. Siamo fiduciosi che tra una decina d'anni potremo pubblicare un nuovo numero di Asimmetrie sui neutrini che includerà le risposte a tanti degli interrogativi ancora aperti oggi.

Vorrei concludere queste brevi riflessioni con un pensiero a Nicola Cabibbo, un grande scienziato italiano, che ha dato contributi fondamentali a tanti settori della fisica e che è stato il presidente dell'Infn sotto la cui guida entrarono in funzione i Laboratori Nazionali del Gran Sasso. Quest'anno ricorre il decimo anniversario dalla sua scomparsa. Grazie, Nicola!

Buona lettura,

Antonio Zoccoli
presidente Infn



asimmetrie

Rivista dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare

Semestrale, anno 15,
numero 29, novembre 2020

direttore editoriale

Antonio Zoccoli, *presidente Infn*

direttore responsabile

Catia Peduto

direttore comitato scientifico

Vincenzo Barone

comitato scientifico

Nicolao Fornengo
Giuliana Galati
Sandra Leone
Paolo Pani
Paolo Valente

redazione

Matteo Massicci
Francesca Mazzotta
Antonella Varaschin

Francesca Cuicchio
(infografiche)

hanno collaborato

Valentina Balzarotti, Gianpaolo Bellini,
Paolo Bernardini, Andrea Bersani,
Valter Bonvicini, Maria Gabriella
Catanesi, Carlo Giunti, Paolo Gorla,
Eligio Lisi, Guido Martinelli, Piera
Sapienza, Irene Tamborra, Lucia Votano

contatti redazione

Infn Ufficio Comunicazione
Piazza dei Caprettari 70
I-00186 Roma
T +39 06 6868162
comunicazione@presid.infn.it
www.infn.it

impaginazione

Mengarelli Grafica Multiservices srl

stampa

Mengarelli Grafica Multiservices srl

su carta di pura cellulosa
ecologica ECF
Fedrigoni Symbol™ Tatami
250 - 135 g/m²

Registrazione del Tribunale di Roma
numero 435/2005 del 8 novembre 2005.
Rivista pubblicata da Infn.

Tutti i diritti sono riservati. Nessuna parte
della rivista può essere riprodotta, rielaborata
o diffusa senza autorizzazione scritta dell'Infn,
proprietario della pubblicazione.

Finita di stampare nel mese di novembre 2020.
Tiratura 20.000 copie.

come abbonarsi

L'abbonamento è gratuito.

Per abbonarsi compilare l'apposito
form sul sito www.asimmetrie.it

In caso di problemi contattare
la redazione all'indirizzo
comunicazione@presid.infn.it

sito internet

**Asimmetrie 29 e tutti i numeri
precedenti della rivista sono
disponibili anche online su
www.asimmetrie.it**

e-magazine

**Asimmetrie è anche disponibile
in versione digitale, ricca di ulteriori
contenuti multimediali, come app
di iOS e Android sull'Apple Store
e nel Google Play Store.**

crediti iconografici

Foto di copertina ©Isaac74, iStockphoto//
foto p. 4 ©Mordolff, iStockphoto; fig. a p. 5
©Asimmetrie-Infn; fig. b p. 6 ©Asimmetrie-
Infn; fig. c p. 7 ©Asimmetrie-Infn; foto d
p. 8 ©Courtesy of Brookhaven National
Laboratory // foto a p. 9 ©Niels Bohr Archive,
photograph by Erik Gustafson, courtesy of AIP
Emilio Segrè Visual Archives, Margrethe Bohr
Collection; fig. b p. 10 ©Asimmetrie-Infn; fig.
c p. 11 ©Asimmetrie-Infn // fig. pp. 12,13
©Asimmetrie-Infn // foto a p. 14 ©Sno; foto b
p. 15 ©Per gentile concessione della famiglia
Pontecorvo; fig. c p. 16 ©Collaborazione
Opera; fig. 1 p. 17 ©Asimmetrie-Infn// foto
a p. 18 ©U.S. Department of Energy; fig. b
p. 19 ©Asimmetrie-Infn; foto c p. 20 ©Yura
Suvorov-Lngs-Infn // fig. a p. 21 ©Asimmetrie-
Infn; foto b p. 22 ©Simone Schiavon-Infn;
fig. 1 p. 23 ©Asimmetrie-Infn; fig. c p. 24
©Asimmetrie-Infn // fig. a p. 25 ©Asimmetrie-
Infn; foto b p. 26 ©Martin Cober; fig. c p. 27
©Asimmetrie-Infn // fig. a p. 28 ©Asimmetrie-
Infn; fig. c p. 30 ©Asimmetrie-Infn // fig. a p.
31 ©Asimmetrie-Infn; foto b p. 32 ©Tamborra
et al., The Astrophysical Journal; foto c p. 33
©Daniel Price-University of Exeter, Stephan
Rosswog-University of Bremen // foto a p. 34
©IceCube Collaboration; foto b p. 35 ©Martin
Wolf, IceCube-NSF; foto c p. 36 ©Km3net
// fig. a p. 37 ©Asimmetrie-Infn; foto c p. 39
©The Pauli Letter Collection, CERN // foto a
p. 40 ©Mike Stroud, da Hmdb.org; foto b p.
41 ©Vincenzo Fedecostante // foto a p. 42
©Lnl-Infn; foto b p. 43 ©Lnl-Infn // fig. b p.
45 ©Asimmetrie-Infn // foto a p. 46 ©Sybilla
Biotech // foto p. 48 ©CERN.

Ci scusiamo se, per cause del tutto
indipendenti dalla nostra volontà, avessimo
omesso o citato erroneamente alcune fonti.

as

29 / 11.20 [neutrini]

Fantasmì e camaleonti

di Lucia Votano

4

Tre uomini e un neutrino

di Eligio Lisi

9

[as]

Esperimenti sui neutrini.

12

Trasformisti all'opera

di Giuliana Galati

14

Il fascino dell'assenza

di Paolo Gorla

18

Sotto questo Sole

di Gianpaolo Bellini

21

Gli indifferenti

di Carlo Giunti

25

Apparizioni e sparizioni

di Maria Gabriella Catanesi

28

Esplosioni cosmiche

di Irene Tamborra

31

Neutrini negli abissi

di Piera Sapienza

34

Il neutrino che verrà

di Paolo Bernardini

37

[as] radici

Neutrini a Stoccolma.

di Andrea Bersani

40

[as] selfie

A scuola di fisica moderna.

di Valentina Balzarotti

42

[as] intersezioni

Cabibbo e la fisica del sapore.

di Guido Martinelli

44

[as] riflessi

La sfida Covid-19.

di Valter Bonvicini

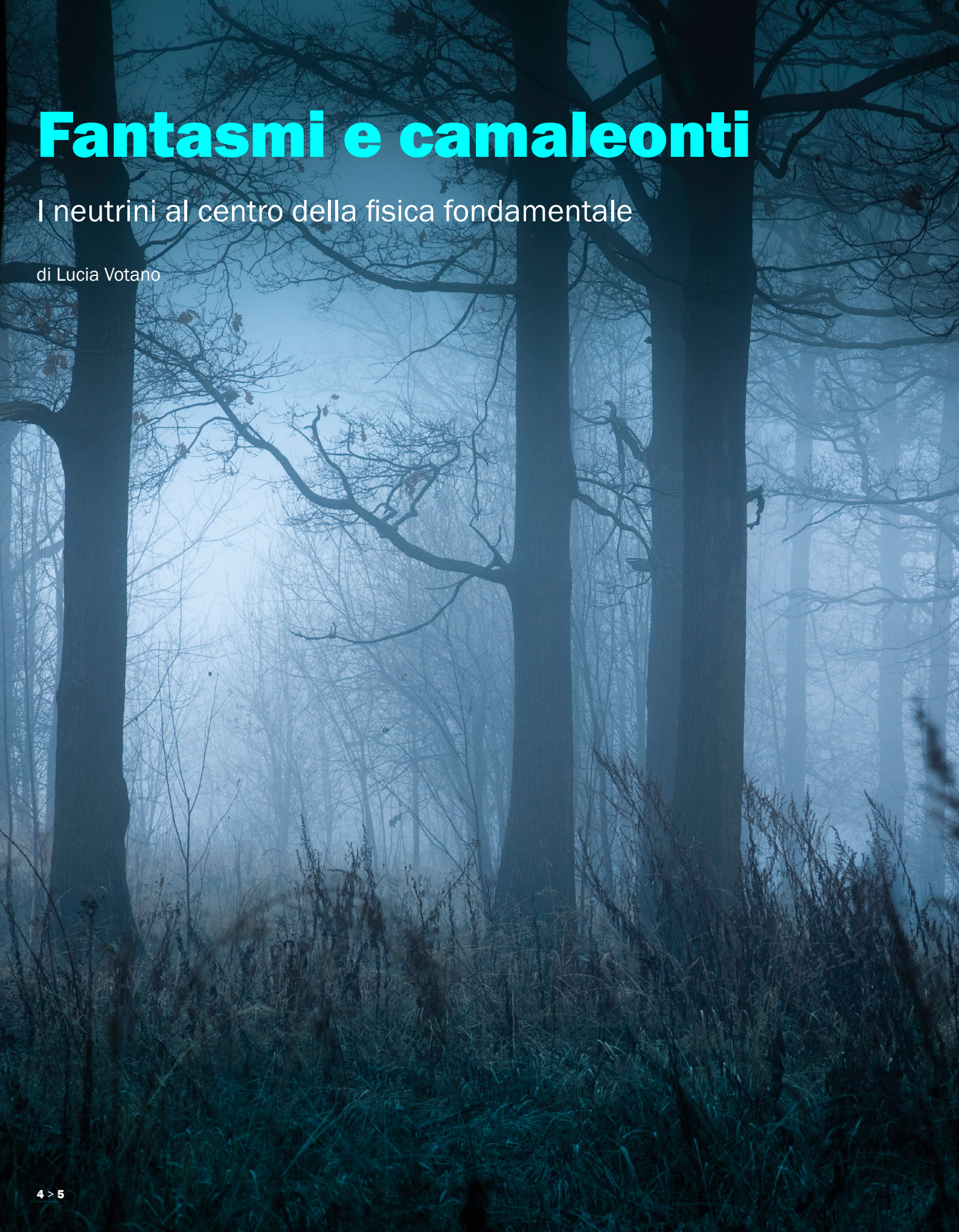
46

[as] illuminazioni

Neutrini fai da te.

di Giuliana Galati

48



Fantasma e camaleonti

I neutrini al centro della fisica fondamentale

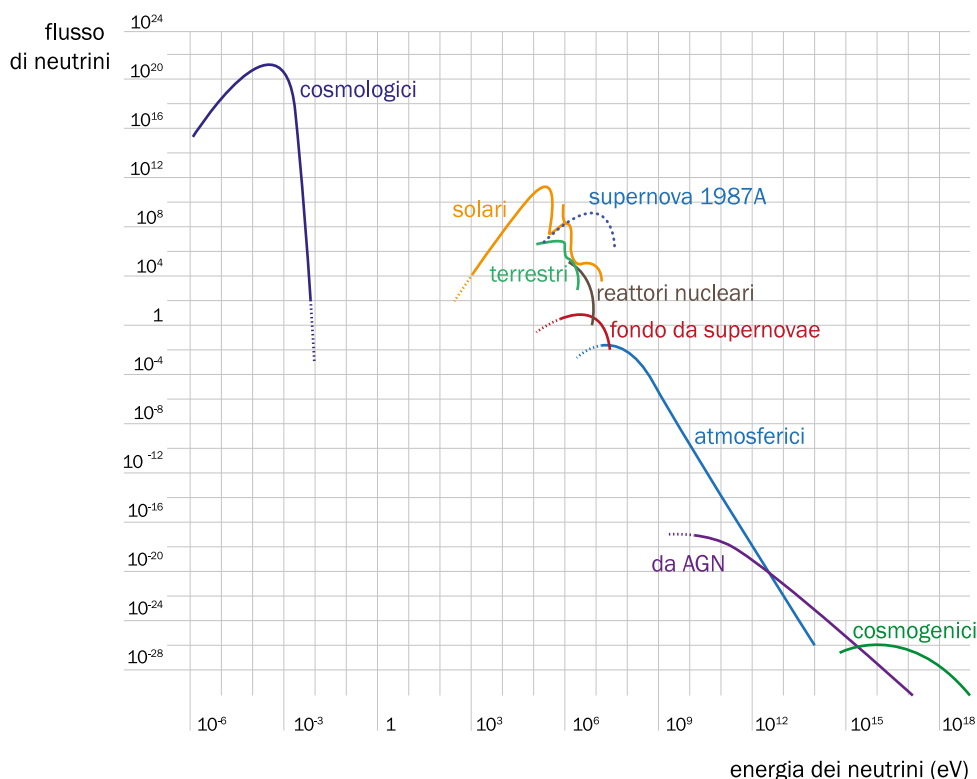
di Lucia Votano

C'è una parola italiana che in tutte le lingue del mondo identifica una particella elementare protagonista di un'avventura scientifica iniziata novant'anni fa, quando Wolfgang Pauli ne ipotizzò l'esistenza nel decadimento beta dei nuclei. Pauli la chiamò "neutrone" (il neutrone vero, costituente dei nuclei, non era ancora stato scoperto), ma Enrico Fermi fece notare che per una particella così leggera era più appropriato usare un tipico diminutivo italiano, e la ribattezzò "neutrino". Era il 1933 e da allora il nome è rimasto quello, per tutti.

Sappiamo oggi che i neutrini rientrano nella categoria dei leptoni (le particelle non soggette alla forza forte) ed esistono in tre diverse specie, o sapori, associate ai tre leptoni carichi (elettrone, muone, tauone): il neutrino elettronico, scoperto nel 1956 (un quarto di secolo dopo la predizione di Pauli), il neutrino muonico, scoperto nel 1962, e il neutrino tauonico, scoperto nel 2000. Sono le particelle di materia più vicine al niente che esistano: privi di carica elettrica, con una massa molto piccola, che ancora non siamo riusciti a misurare, interagiscono pochissimo con la materia e unicamente tramite la forza debole. Arrivano dritti sino a noi dall'universo più remoto, viaggiando quasi alla velocità della luce e recando informazioni sui fenomeni celesti che li hanno generati; per contro, proprio a causa della scarsissima probabilità di interazione, la loro rivelazione richiede giganteschi apparati sperimentali. Eppure, nell'universo visibile, i neutrini sono, assieme ai fotoni, le particelle più numerose. Apparsi liberi ben prima della luce, un secondo dopo il Big Bang, costituiscono oggi, dopo quasi 14 miliardi di anni, un fondo diffuso in tutto l'universo, una specie di gas freddissimo alla temperatura di 1,9 gradi sopra lo zero assoluto. Riuscire a rivelare questi neutrini fossili di bassissima energia (circa 350 per centimetro cubo) ci consentirebbe di

osservare l'universo nei suoi primissimi istanti di formazione. All'altro estremo dello spettro energetico, l'esperimento IceCube, tra i ghiacci del Polo Sud, ha misurato un flusso diffuso di neutrini astrofisici di energia molto elevata, tra le decine di TeV e i PeV (vd. fig. a), di probabile origine extragalattica. Una scoperta strettamente connessa con l'enigma dell'origine e dell'accelerazione dei raggi cosmici di energia estrema (fino a 10^{20} eV), che si ritiene siano generati al di fuori della nostra galassia da eventi cosmici d'inaudita violenza. Tuttavia, solo i raggi gamma (fotoni estremamente energetici) e i neutrini, prodotti secondari delle interazioni dei raggi cosmici in prossimità delle sorgenti, possono aiutarci a identificare cosa li ha generati, perché, essendo neutri, non sono deviati dai campi magnetici cosmici. Per la prima volta nel 2017, c'è stata l'osservazione congiunta di un neutrino di energia di 290 TeV in IceCube e di raggi gamma nei rivelatori Fermi-Lat e MAGIC, provenienti dalla stessa direzione in cui è stato individuato come possibile sorgente un *blazar* già noto, TXS 0506+056: una galassia attiva con un buco nero super massiccio al centro, distante da noi 4,5 miliardi di anni luce. Con l'astronomia neutrinica associata alla rivelazione di fotoni si è aperta una nuova finestra di osservazione dell'universo, che nel futuro il telescopio sottomarino Km3net/Arca potrebbe ampliare nell'emisfero Nord del pianeta (vd. p. 34, ndr). Altre importantissime sorgenti naturali di neutrini sono le reazioni di fusione nucleare che alimentano le stelle, come il nostro Sole (dal quale giungono sulla Terra 60 miliardi di neutrini al secondo per centimetro quadrato). Anche l'ultimo violento sospiro di una stella che si spegne per esaurimento del combustibile, accendendo una supernova, è fatto di neutrini. Geoneutrini sono poi emessi nei decadimenti degli isotopi di uranio, torio e potassio, presenti nel mantello e nella crosta

a.
Il flusso dei neutrini (cioè il numero di neutrini per cm^2 , per secondo e per MeV di energia) provenienti da varie sorgenti. I neutrini più abbondanti e di più bassa energia sono quelli cosmologici, prodotti subito dopo il Big Bang. All'estremo opposto dello spettro, i neutrini di più alta energia sono i neutrini cosmogenici, prodotti dall'interazione dei raggi cosmici con i fotoni della radiazione cosmica di fondo.



terrestre. E persino noi emettiamo neutrini (circa 5000 al secondo) a causa dei decadimenti degli isotopi radioattivi presenti nel nostro corpo.

Come messaggeri cosmici, i neutrini suscitano oggi molto interesse, ma il mistero principale legato a essi riguarda la natura e i valori delle loro masse. In fisica classica la massa è una quantità fondamentale, una proprietà della materia apparentemente facile da intuire. Al contrario, nella fisica moderna il concetto ha subito uno sconvolgimento totale e oggi la massa ci appare piuttosto come una manifestazione dell'interazione di campi quantistici. A seguito della scoperta del bosone di Higgs nel 2012 sappiamo che le particelle elementari del modello standard acquistano massa nell'interazione con l'omonimo campo, anche se in realtà non sappiamo ancora spiegare le diverse intensità dell'accoppiamento. Per i neutrini va ancora peggio: nella sua forma originaria il modello standard prevedeva che avessero massa nulla come il fotone, ma alla fine del secolo scorso si è scoperto che oscillano, cioè cambiano la loro identità viaggiando nello spazio e nel tempo, trasformandosi ciclicamente da un sapore a un altro, il che è possibile solo se hanno masse non nulle e diverse tra loro. Si tratta di un fenomeno quantistico, teorizzato da Bruno Pontecorvo nel 1957, per cui i tre neutrini di massa definita sono una miscela dei tre neutrini di diverso

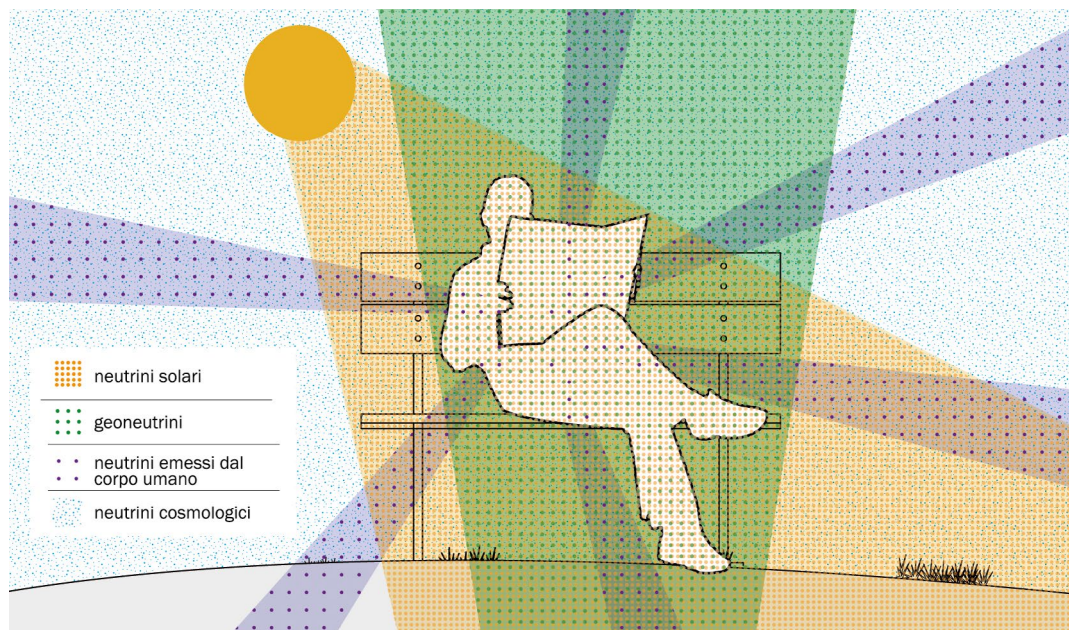
sapore prodotti nelle interazioni deboli. Le frequenze di oscillazione dei neutrini dipendono dalle differenze dei quadrati delle loro masse e non possono quindi aiutarci a determinarne il valore assoluto (vd. fig. c).

La scoperta di questo fenomeno e la misura dei parametri che lo caratterizzano possono essere viste come un grande mosaico il cui disegno ha cominciato a svelarsi solo quando è stato incastrato un numero sufficiente di tessere.

Tutto cominciò negli anni '60 con l'osservazione, da parte di Raymond Davis nell'esperimento Homestake in South Dakota, di un significativo deficit rispetto al flusso atteso dei neutrini elettronici solari di più alta energia.

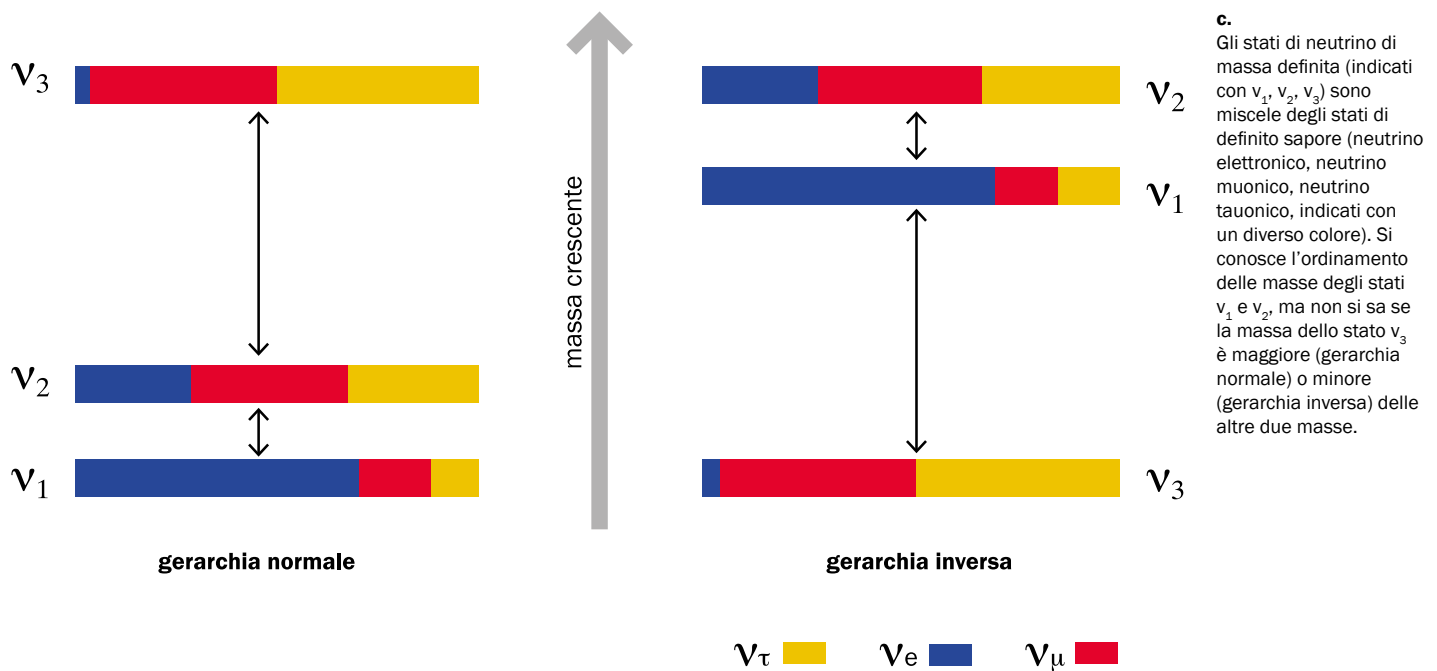
Tessera dopo tessera, misurando con tecniche diverse le varie componenti dello spettro dei neutrini solari, si giunse all'inizio del nuovo millennio, quando l'esperimento Sno in Canada, in grado di rivelare le interazioni dei neutrini di tutti i sapori, fornì la prova conclusiva che il deficit era imputabile alla trasformazione dei neutrini elettronici solari in altri sapori nel viaggio fino alla Terra. Nel frattempo, nel 1998, l'esperimento giapponese Super-Kamiokande aveva fornito una chiara evidenza delle oscillazioni di neutrini muonici, presenti nei raggi cosmici secondari che raggiungono la superficie terrestre, in neutrini tauonici. Per osservare il fenomeno

dell'oscillazione in modo più controllato sono stati prodotti con gli acceleratori di particelle fasci artificiali di neutrini muonici di intensità nota, associati a esperimenti capaci di misurare l'entità della loro parziale scomparsa a distanza di diverse centinaia di chilometri dalla sorgente. Dopo il fascio Numi e l'esperimento Minos negli Stati Uniti, fu realizzato il progetto Cngs: un fascio di neutrini muonici viaggiava dal Cern verso il Gran Sasso, dove c'era l'esperimento Opera che, identificando 10 neutrini tauonici tra i quasi 20.000 eventi da neutrini muonici registrati nell'apparato, ha fornito la prima prova diretta della trasformazione dei neutrini muonici in tauonici (vd. p. 14, ndr). Infine, nell'ultimo decennio, gli esperimenti Daya Bay in Cina, Reno in Corea e, per ultimo, Double Chooz in Francia, misurando a opportuna distanza la scomparsa degli antineutrini elettronici emessi da centrali nucleari, hanno aggiunto ulteriori importanti misure di alcuni dei parametri propri dell'oscillazione di queste particelle. Le masse non nulle dei neutrini sono un chiaro segnale di nuova fisica oltre il modello standard, tuttavia non ne conosciamo ancora il valore e non sappiamo come sono ordinate tra loro; inoltre, non riusciamo a spiegare perché i neutrini siano tanto più leggeri delle altre particelle e rimane incerto il meccanismo che conferisce loro la massa.



b.

Ogni secondo il nostro corpo è attraversato da 500.000 miliardi di neutrini provenienti dal Sole e da 50 miliardi di geoneutrini provenienti dalle profondità della Terra. Noi stessi emettiamo circa 5000 neutrini al secondo a causa dei decadimenti degli isotopi radioattivi presenti nel nostro corpo. Siamo poi immersi in un gas di neutrini prodotti nei primi istanti di vita del cosmo (ce ne sono circa 350 in ogni cm³ dell'universo).



Lo studio dei neutrini elettronici emessi dal Sole e della loro interazione collettiva con gli elettroni nella materia ci ha consentito di conoscere l'ordine di due delle masse ma non si sa ancora se la terza massa sia superiore o inferiore alle altre. Queste due possibilità sono note rispettivamente come gerarchia diretta e inversa (vd. fig. c). Per capire quale sia l'ordine corretto, si possono usare due metodi. Il primo consiste nello sfruttare ancora l'interazione dei neutrini con gli elettroni, che produce esiti diversi nel caso di gerarchia diretta e inversa. Per massimizzare l'effetto si utilizzano come sorgenti i neutrini atmosferici provenienti dalla parte opposta del pianeta rispetto al sito del rivelatore (esperimenti Pingu e Orca) oppure fasci artificiali di neutrini con apparati posti a grande distanza (esperimento Nova e, nel futuro, Hyper-Kamiokande e Dune). La seconda tecnica consiste nel misurare con enorme precisione in un rivelatore di grandi dimensioni, posto ad alcune decine di chilometri dalla sorgente, la scomparsa degli antineutrini elettronici emessi dalle centrali nucleari. Questa è la tecnica dell'esperimento Juno che sarà operativo entro il 2021 nel sud della Cina.

I neutrini potrebbero essere anche la chiave per risolvere il grande enigma dell'asimmetria cosmologica tra materia e antimateria. È ragionevole ritenere che, all'inizio di tutto, l'universo contenesse un ugual numero di particelle e antiparticelle, le quali interagendo avrebbero dovuto progressivamente annichilirsi in pura energia dando luogo a un universo privo di strutture materiali. Come mai allora esistono stelle e galassie fatte di materia e non di antimateria? L'ipotesi più probabile è che, sul finire del periodo di espansione inflazionaria dell'universo, un'impercettibile asimmetria in una delle leggi che governano le particelle elementari abbia determinato il sopravvento dei barioni (protoni, neutroni, ecc.) sugli antibarioni: la cosiddetta bariogenesi. La violazione della simmetria CP (l'invarianza delle leggi fisiche

rispetto all'inversione degli assi spaziali e al cambiamento di carica) è uno degli ingredienti necessari di ogni possibile teoria di bariogenesi, che richiede comunque, alla luce delle osservazioni sperimentali a noi note, un'estensione del modello standard (vd. asimmetrie n. 28 p. 14, ndr).

Uno dei meccanismi di bariogenesi ipotizzato, detto "leptogenesi", potrebbe riuscire a mettere in relazione e spiegare sia la massa dei neutrini sia l'asimmetria materia-antimateria.

Si suppone in questo caso che alle energie altissime dell'universo appena nato potessero essere presenti anche neutrini molto pesanti e non interagenti, detti perciò "sterili", che decadendo in modo asimmetrico in altre particelle avrebbero creato quel piccolissimo eccesso di materia che ha dato origine al nostro universo, mentre tutto il resto si trasformava in bagliori di luce primordiale. La teoria prevede anche che quanto più è grande la massa dei neutrini sterili, tanto più è piccola la massa dei neutrini a noi noti, con un meccanismo ad altalena (seesaw) che riuscirebbe a spiegare l'enorme differenza tra le masse dei neutrini e quelle delle altre particelle elementari (vd. p. 9 e 25, ndr).

La leptogenesi richiede inoltre che i neutrini sterili non siano particelle del tipo di Dirac, ma particelle di Majorana, coincidenti cioè con le proprie antiparticelle. Questa particolare natura potrebbe in linea di principio essere dimostrata cercando di misurare un processo mai osservato finora, il doppio decadimento beta senza neutrini (vd. p. 18, ndr), come cercano di fare ai Laboratori Nazionali del Gran Sasso gli esperimenti Cuore e Gerda, quest'ultimo al momento il più sensibile al mondo. La sola speranza di un risultato positivo in questo campo, stante il livello di sensibilità di tutti gli esperimenti, è però legata all'ipotesi che la gerarchia di massa sia quella inversa.

Altri elementi di prova a favore della teoria della leptogenesi possono essere ottenuti attraverso la misura della violazione della simmetria CP a bassa energia con i neutrini già noti.



Risultati molto incoraggianti sono recentemente arrivati dall'esperimento giapponese T2K che ha trovato che il numero di antineutrini muonici che oscillano in antineutrini elettronici è inferiore rispetto a quello dei neutrini muonici oscillanti in neutrini elettronici (vd. p. 28, ndr). Nel futuro risposte definitive sulla misura della violazione di CP potrebbero arrivare dagli esperimenti Hyper-Kamiokande e DUNE (vd. p. 37, ndr). Guardando alle prospettive future nel panorama mondiale

dello studio dei neutrini, possiamo concludere che ci attendono notevoli progressi sia nella comprensione delle loro caratteristiche sia nel loro impiego come sonde di esplorazione dell'universo. È veramente entusiasmante come il neutrino non cessi mai di sorprenderci: paragonabile a un fantasma per la sua elusività e a un camaleonte per la sua capacità di trasformarsi da un sapore a un altro, è anche l'indiziato principale per la scomparsa dell'antimateria dell'universo.

Biografia

Lucia Votano è dirigente di ricerca emerita dei Laboratori Nazionali di Frascati. Già direttrice dei Laboratori Nazionali del Gran Sasso, si occupa di fisica dei neutrini e partecipa all'esperimento JUNO in costruzione nella Cina meridionale. Ha pubblicato "La via della seta. La fisica da Enrico Fermi alla Cina" con Di Renzo Editore.

d.

Raymond Davis a bagno, nel 1971, nel serbatoio dell'esperimento Homestake, da lui ideato.

Tre uomini e un neutrino

Le teorie di Weyl, Dirac e Majorana

di Eligio Lisi

Pazienza, tanta pazienza! Un decennio per porre le giuste domande. E molti più anni per cominciare a trovare le risposte... Sono questi i tempi ai quali bisogna abituarsi per comprendere la natura nascosta dei neutrini. Ma che cosa s'intende per natura dei neutrini, tanto per cominciare?

Tutte le particelle elementari sono caratterizzate da almeno due quantità: la massa, che può anche essere nulla, e il momento angolare intrinseco o spin, che in appropriate unità di misura può assumere i valori 0, $1/2$, 1, $3/2$, 2, eccetera. Ulteriori quantità sono le cariche (per esempio la carica elettrica), che sono opposte per particelle e antiparticelle. Tutte insieme, queste quantità definiscono la natura di una particella. Per esempio, la particella di luce (il fotone) ha massa nulla,

spin 1 e carica elettrica nulla, ed è identico all'antifotone. Invece l'elettrone ha una massa non nulla, spin $1/2$ e carica elettrica negativa, che lo rende distinguibile dalla sua antiparticella con carica positiva, il positrone.

E il neutrino? Fino dall'ipotesi di Wolfgang Pauli nel 1930 sappiamo che il neutrino deve avere spin $1/2$, massa molto piccola, o nulla, e carica elettrica nulla. Ci basta il fatto che il neutrino abbia carica nulla per poter affermare che è identico all'antineutrino? La risposta è no: ci servono altre informazioni, che, come vedremo, potrebbero portarci verso nuove e affascinanti frontiere della fisica.

Storicamente, le giuste domande e ipotesi sulla natura delle particelle elettricamente neutre, con spin $1/2$ e massa



a.
Wolfgang Pauli (a sinistra)
e Niels Bohr affascinati da
una trottola.

piccolissima o nulla, furono poste nel decennio fra la fine degli anni '20 e '30 del secolo scorso, da tre grandi protagonisti del pensiero scientifico: il matematico Hermann Weyl e i fisici Paul Dirac ed Ettore Majorana. Per capire le loro ipotesi, partiamo da tre dati di fatto della fisica moderna.

Il primo è che una particella priva di massa si muove sempre a velocità pari a quella della luce, mentre se ha massa la sua velocità è sempre inferiore. Il secondo è che una particella di spin $1/2$ si può immaginare come una sorta di minuscola "trottola" che, orientata nella direzione del moto, può girare o in senso destrorso (*right-handed*, R) come un cacciavite, o in senso sinistrorso (*left-handed*, L). Il terzo dato di fatto, veramente sorprendente, è che le interazioni deboli intervengono solo sulla componente L delle particelle di materia con spin $1/2$ (come i neutrini, gli elettroni e i quark) e sulla componente R delle rispettive antiparticelle. La natura non si comporta in modo speculare nel mondo delle particelle elementari, anzi distingue nettamente fra rotazioni verso destra e verso sinistra.

Mettiamo ora insieme questi tre dati di fatto in un esperimento ideale. Consideriamo un neutrino con massa, generato in uno stato di rotazione L. Poiché viaggia a una velocità inferiore a quella della luce, possiamo immaginare di superarlo lungo la sua stessa direzione, vedendolo allontanarsi dietro di noi mentre ruota in senso destrorso. Nel linguaggio del mondo quantistico, possiamo dire che il neutrino, oltre a essere nello stato L, ha una certa probabilità di essere nello stato R. Questa possibilità è preclusa se il neutrino è

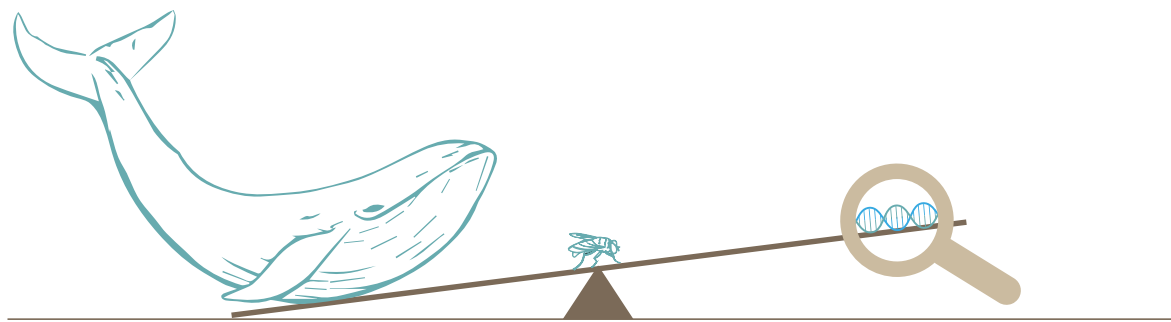
privo di massa: non potremo mai superarlo e lo vedremo sempre e solo come L. Ora abbiamo tutti gli strumenti per distinguere le tre ipotesi di Weyl, Dirac, e Majorana (vd. fig. c).

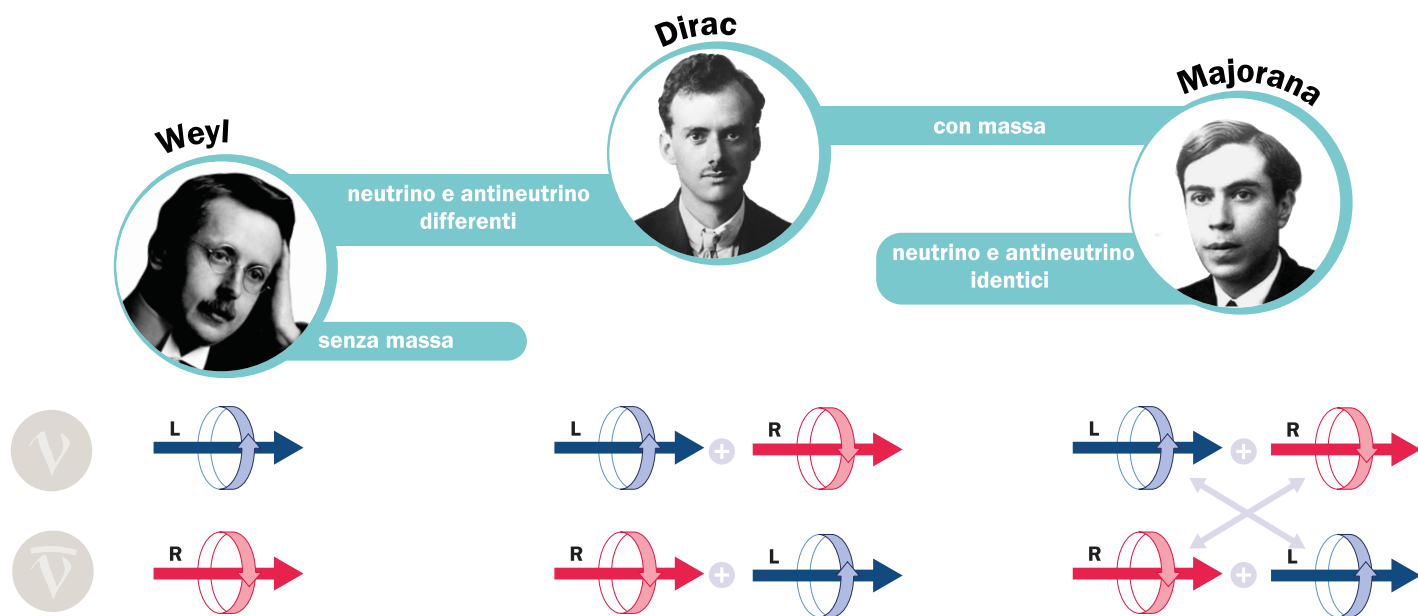
L'ipotesi più semplice è quella di Weyl, che si applica a un neutrino di massa nulla. In questo caso il neutrino è sempre L mentre l'antineutrino è sempre R. Neutrini e antineutrini sono dunque diversi fra loro, e distinti dal senso di rotazione.

Le ipotesi di Dirac e Majorana si applicano invece a neutrini con massa. In questo caso i neutrini e gli antineutrini, come già osservato, si trovano in una sovrapposizione di stati L e R. Nel caso più generale, ipotizzato da Dirac, lo stato L di un neutrino non è identico allo stato L di un antineutrino. Certamente questo è vero per gli stati L di elettrone e positrone, che hanno cariche elettriche opposte e quindi non sono identici. Ma per particelle senza carica come i neutrini, Majorana osservò che si potrebbero identificare, a due a due, gli stati R e L di neutrini e antineutrini: nel qual caso, ogni distinzione fra neutrini (ν) e antineutrini ($\bar{\nu}$) svanirebbe e il neutrino sarebbe identico alla sua antiparticella, come il fotone.

Chi ha ragione fra Weyl, Dirac e Majorana? Al momento non lo sappiamo. Possiamo dire che Weyl potrebbe avere ragione al massimo per il neutrino più leggero, se avesse massa nulla. Nel caso più generale di neutrini con massa, la distinzione fondamentale è fra neutrini del tipo di Dirac o di Majorana. Distinguere questi due casi rappresenta una delle maggiori sfide sperimentali e teoriche dell'attuale fisica delle particelle elementari. Dal punto di vista teorico, particelle di Dirac

b. Rappresentazione delle scale di massa coinvolte nel meccanismo seesaw. I rapporti tra le masse di balenottera, moscerino e Dna (che rappresenta la piccolissima massa dei neutrini) sono approssimativamente gli stessi che intercorrono tra le tre scale di massa del meccanismo.





(come elettroni e quark) ricevono massa unicamente dal meccanismo di Higgs nel modello standard. Se i neutrini fossero di Majorana, allora potrebbero essere le uniche particelle di materia la cui massa ha origine a una scala di massa molto più alta di quella del bosone di Higgs, e quindi attualmente inaccessibile in laboratorio. In questo caso si può mostrare come la piccolissima massa dei neutrini sia inversamente proporzionale alla nuova scala di massa (meccanismo seesaw, ad altalena) (vd. fig. b). Inoltre, si ipotizza che, nei primissimi istanti dopo il Big Bang, la fisica dei neutrini di Majorana possa aver originato la netta prevalenza della materia rispetto all'antimateria, che risulterebbe altrimenti inspiegabile nel nostro universo (meccanismo di leptogenesi) (vd. p. 4, ndr). Si tratta di ipotesi teoriche vertiginose, che rendono generalmente molto più appetibile l'ipotesi di Majorana rispetto a quella di Dirac.

Ma la fisica rimane una scienza dove le ipotesi teoriche non possono prescindere dalla conferma sperimentale. Come distinguere dunque sperimentalmente i neutrini di Dirac e di Majorana? Sulla base delle nostre attuali conoscenze, l'unica strada percorribile è quella di cercare tracce di un particolare decadimento nucleare debole, che può aver luogo se e solo se i neutrini sono particelle

di Majorana. Si tratta del cosiddetto doppio decadimento beta senza neutrini. All'interno di un nucleo, due neutroni si trasformano contemporaneamente in protoni, emettendo due elettroni e scambiandosi fra di loro un neutrino. Si può provare che questo scambio ha luogo solo se il neutrino ha massa (e quindi non è di Weyl) ed è identico all'antineutrino (e quindi non è di Dirac).

Nel mondo, svariati esperimenti cercano da anni tracce di questo rarissimo decadimento attraverso sensibilissimi rivelatori sotterranei, fra cui Gerda e Cuore nei Laboratori Nazionali del Gran Sasso (vd. p. 18, ndr). In questo campo, una scoperta sperimentale varrebbe sicuramente un premio Nobel. Non ci resta che aspettare fiduciosi e... avere pazienza, tanta pazienza!

c. Rappresentazione grafica delle ipotesi di Weyl, Dirac e Majorana. La direzione del moto del neutrino e dell'antineutrino è rappresentata dalla freccia, mentre lo spin è rappresentato dalla freccia circolare. I due stati L e R hanno una diversa orientazione relativa di moto e spin.

Biografia

Eligio Lisi è dirigente di ricerca presso la sezione Infn di Bari. Si occupa degli aspetti teorici e fenomenologici della fisica del neutrino e astroparticellare. È responsabile di un network dell'Infn e di un progetto di rilevante interesse nazionale del Ministero dell'Università e della Ricerca. Ha ricevuto il Premio Bruno Pontecorvo 2017.

DOI: 10.23801/asimmetrie.2020.29.2

[as]

Esperimenti sui neutrini.



Chooz, Francia

▣ **Double Chooz**, oscillazione di antineutrini prodotti da reattore nucleare



Toulon, Francia



Portopalo di Capo Passero, Italia



Pylos, Grecia:

► **Km3net**, neutrini astrofisici



Fermilab, Illinois, Stati Uniti:

► **DUNE (near detector)**, oscillazione di neutrini con fascio artificiale

▣ **MINOS**, oscillazione di neutrini con fascio artificiale

■ **NOvA**, oscillazione di neutrini con fascio artificiale

► **SBN** (rivelatori: Icarus, MicroBoone, SBND), oscillazione di neutrini con fascio artificiale, neutrini sterili



Subdury, Canada:

▣ **SNO**, oscillazione di neutrini solari



Miniera Homestake, South Dakota, Stati Uniti:

▣ **Homestake**, neutrini solari



Sanford Lab, South Dakota, Stati Uniti:

► **DUNE (far detector)**, oscillazione di neutrini con fascio artificiale

Legenda

Gli esperimenti riportati sono quelli citati in questo numero di Asimmetrie

▣ presa dati conclusa

■ in presa dati

► in costruzione

Lab. Naz. Gran Sasso, Italia:

- **Borexino**, oscillazione di neutrini solari, geoneutrini
- **CUORE**, decadimento doppio beta senza emissione di neutrini
- **GALLEX**, oscillazione di neutrini solari
- **GERDA**, decadimento doppio beta senza emissione di neutrini
- ▶ **GERDA/LEGEND**, decadimento doppio beta senza emissione di neutrini
- **Icarus**, oscillazione di neutrini con fascio artificiale e neutrini solari
- **MACRO**, oscillazione di neutrini atmosferici
- **OPERA**, oscillazione di neutrini con fascio artificiale

JParc, Tokai, Giappone:

- **T2K**, oscillazione di neutrini con fascio artificiale

Kamioka Observatory, Giappone:

- **T2K**, oscillazione di neutrini con fascio artificiale
- **Kamiokande**, oscillazione di neutrini solari e atmosferici
- **KamLAND**, oscillazione di antineutrini prodotti da reattore nucleare, geoneutrini
- ▶ **Hyper-Kamiokande**, oscillazione di neutrini con fascio artificiale
- **Super-Kamiokande**, oscillazione di neutrini solari e atmosferici

Daya Bay, Cina:

- **Daya Bay**, oscillazione di antineutrini prodotti da reattori nucleari

Kaiping, Cina:

- ▶ **JUNO**, oscillazione di antineutrini prodotti da reattori nucleari

Sud Corea:

- **RENO**, oscillazione di antineutrini prodotti da reattore nucleare

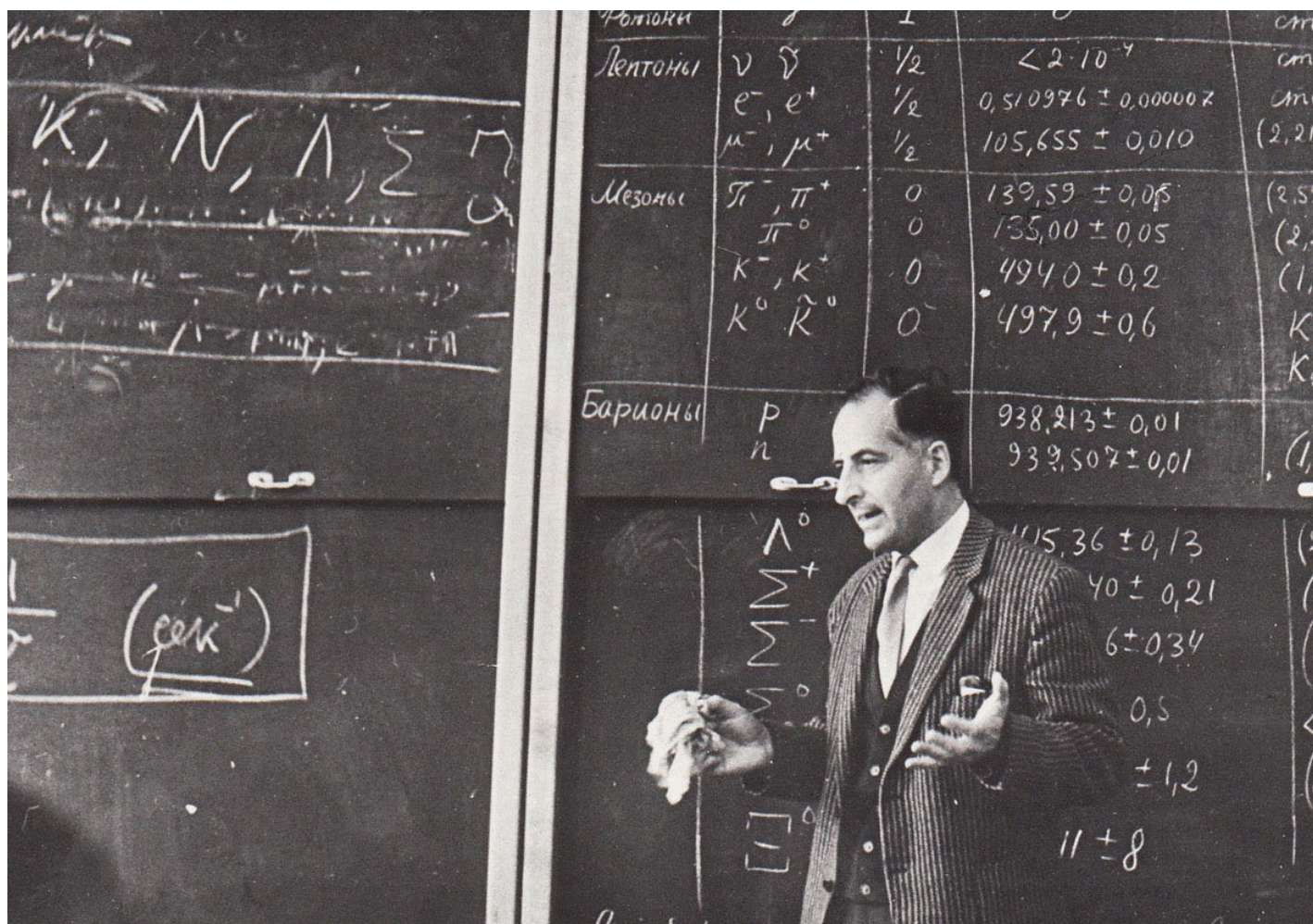
Base Amundsen-Scott, Antartide:

- **IceCube**, neutrini astrofisici
- ▶ **PINGU**, neutrini astrofisici

Questo risultato, confermato anche da altri esperimenti tra cui in particolare Macro ai Laboratori Nazionali del Gran Sasso, è stato successivamente verificato da esperimenti che utilizzavano sorgenti artificiali di neutrini, K2K e Minos.

Per quanto riguarda i neutrini solari, la conferma che la spiegazione delle anomalie fosse dovuta al fenomeno delle oscillazioni

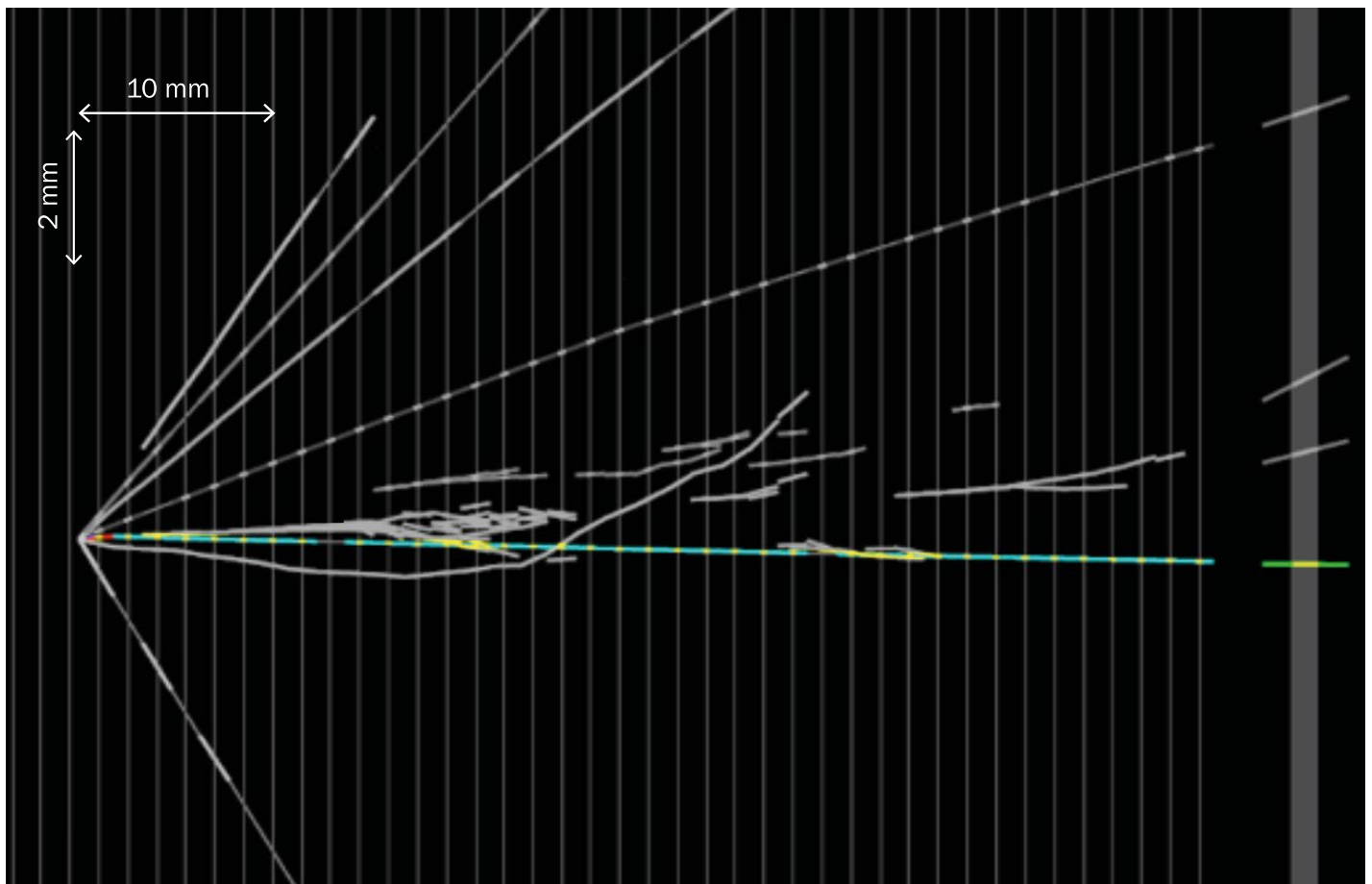
b.
Bruno Pontecorvo all'inizio
degli anni '60.



su tre cambiano il loro sapore in muonico o tauonico durante il tragitto dal centro del Sole al rivelatore, validando così anche il modello teorico del Sole. Finalmente il fenomeno delle oscillazioni di neutrino veniva accettato dalla comunità scientifica. Rimaneva da capire, però, in che cosa si trasformassero i neutrini dopo l'oscillazione. Super-Kamiokande, infatti, aveva dimostrato che i neutrini muonici oscillavano in qualcosa che non era un neutrino elettronico. Si trasformavano quindi in neutrini tauonici, che nessuno degli esperimenti era in grado di rivelare, o in qualche nuova forma di neutrino, come i neutrini sterili (vd. p. 25, ndr). Per rispondere a questo quesito era stato progettato l'esperimento Opera presso i Laboratori Nazionali del Gran Sasso. Questa volta ci si sarebbe basati su un fascio di neutrini artificiale, in modo da conoscerne esattamente la composizione. Il fascio, generato da un acceleratore del Cern di Ginevra, era composto da neutrini muonici e percorreva sottoterra 730 km prima di incontrare sul suo percorso un muro di oltre

1200 tonnellate di piombo. Opera si potrebbe definire la più grande macchina fotografica mai costruita. Per rivelare i prodotti dei neutrini usava, infatti, 9 milioni di speciali lastre fotografiche chiamate "emulsioni nucleari". Quando le particelle cariche (come quelle prodotte dall'interazione di neutrino) attraversano queste lastre, lasciano una flebile traccia dietro di loro, che viene poi amplificata dal processo chimico dello sviluppo, molto simile a quello delle fotografie. Grazie ad appositi microscopi ottici, queste tracce vengono digitalizzate ed è possibile ottenere una ricostruzione tridimensionale di cosa è successo. Questo lungo processo, che dovette immaginare ripetuto per migliaia e migliaia di lastre, consente di ottenere la risoluzione più alta che un rivelatore di particelle possa raggiungere: meno di un millesimo di millimetro. Solo con una precisione così elevata, infatti, si può distinguere la particella tau, o tauone, che viene creata quando a interagire è il neutrino tauonico, quello che gli altri esperimenti non erano in grado di osservare (vd. fig. c). Nell'estate 2015 la

c.
La prima interazione di neutrino tau trovata, nel 2010, dall'esperimento Opera. Il neutrino tau è identificato dalla produzione del leptone tau (rosso), che a sua volta decade in un mesone rho (celeste).



Onda su onda

Che cosa significa oscillazione dei neutrini?

Per capire questo fenomeno bisogna fare un tuffo nella meccanica quantistica, dove ogni particella può essere descritta da una funzione d'onda.

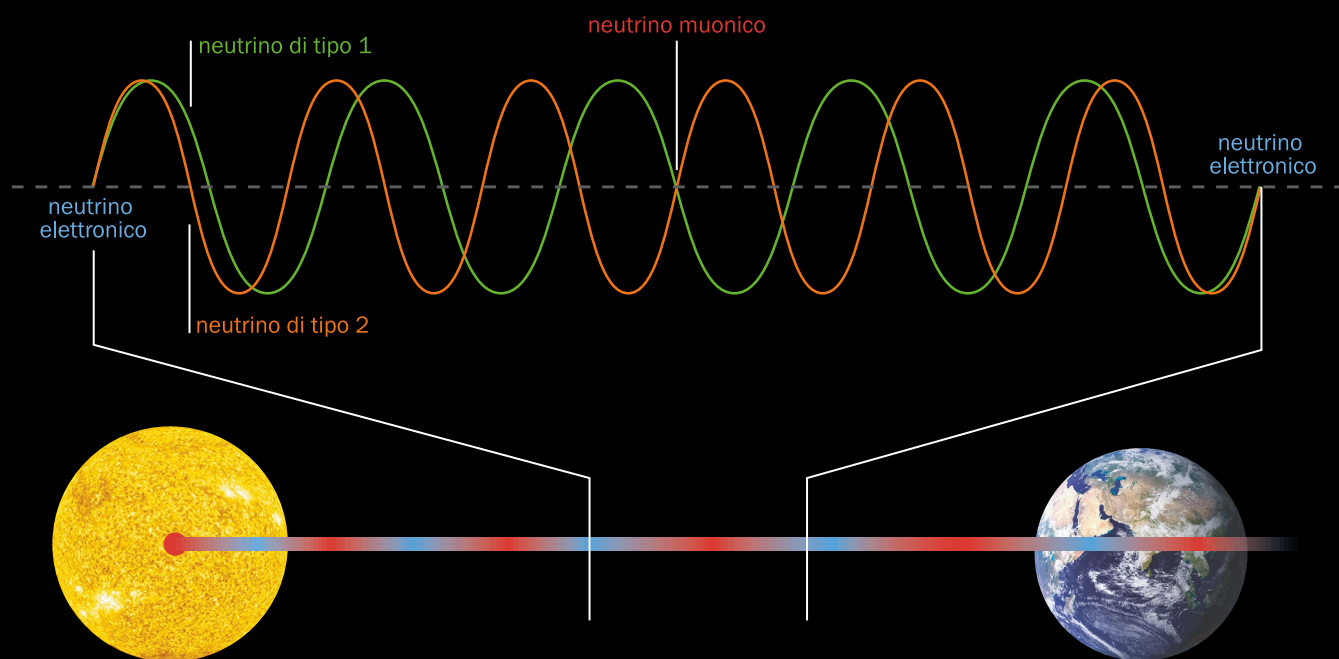
Nel caso dei neutrini, dalla somma di tre funzioni che rappresentano tre onde con frequenze diverse.

Per semplicità, consideriamone solo due: nessuna delle due rappresenta di per sé un sapore di neutrino; questo si determina, invece, dalla loro combinazione. Se, per esempio, le due onde si trovano sovrapposte potremmo avere il neutrino elettronico, mentre se si trovano perfettamente fuori fase quello muonico (vd. fig. 1). Per rappresentare visivamente l'oscillazione possiamo fare ondeggiare due pendoli con lunghezze diverse.

I pendoli oscilleranno in modo differente, in alcuni istanti si troveranno contemporaneamente a una estremità dell'oscillazione e in altri saranno all'estremità opposta. Questi istanti si alterneranno ripetutamente, proprio come accade ai neutrini che cambiano continuamente sapore lungo il loro percorso. [Giuliana Galati]

1.

L'oscillazione dei neutrini solari, dalla loro origine fino alla Terra. Un neutrino elettronico prodotto nel Sole può essere rivelato come neutrino muonico sulla Terra.



collaborazione Opera ha annunciato di aver osservato 5 neutrini tau (diventati poi 10, analizzando ulteriormente i dati, nel 2018), confermando così la trasformazione dei neutrini muonici in neutrini tauonici. Subito dopo questo risultato, Takaaki Kajita e Arthur McDonald, rispettivamente responsabili degli esperimenti Super-Kamiokande e Sno, hanno ricevuto il Premio Nobel per la Fisica 2015 per “la scoperta delle oscillazioni del neutrino, che dimostra che il neutrino ha massa”.

Ma le sfide non sono finite: questo risultato è solo il punto di partenza per nuove ricerche che avranno un grande impatto sulla cosmologia, l'astrofisica e la fisica delle particelle.

Biografia

Giuliana Galati è assegnista di ricerca presso la sezione di Napoli dell'Infn, dove si occupa di ricerca sperimentale nel campo della fisica particellare e astroparticellare. Dal 2012 è autrice e speaker per Scientificast, è componente del comitato scientifico di Asimmetrie ed è tra i divulgatori del programma Superquark+, disponibile su RaiPlay.

DOI: 10.23801/asimmetrie.2020.29.3

Il fascino dell'assenza

Alla ricerca del doppio decadimento beta senza neutrini

di Paolo Gorla

Dopo la pubblicazione del modello di Ettore Majorana per le particelle elementari, alla fine degli anni '30, i fisici cominciarono a chiedersi come si potesse dimostrare che neutrino e antineutrino sono la stessa particella (vd. p. 9, ndr). Fu così che maturò l'interesse per un processo nucleare ancora mai osservato, il doppio decadimento beta senza emissione di neutrini.

Il doppio decadimento beta è un processo nucleare raro noto fin dal 1935, quando fu proposto da Maria Goeppert-Mayer, pioniera dello studio della struttura dei nuclei atomici nonché seconda donna nella storia, dopo Marie Curie, a ricevere il premio Nobel per la fisica nel 1963.

Nel decadimento beta ordinario, la cui trattazione teorica fu sviluppata nel 1934 da Enrico Fermi, un neutrone all'interno di un nucleo si trasforma in un protone, dando origine a una nuova configurazione nucleare. A questo processo si accompagna l'emissione di un elettrone, che garantisce la conservazione della carica, e di un antineutrino.

Goeppert-Mayer calcolò la probabilità che due decadimenti beta avvenissero contemporaneamente all'interno di un nucleo, emettendo due elettroni e due antineutrini. Dai suoi calcoli fu subito chiaro che un processo di questo tipo sarebbe stato molto raro. L'origine del doppio decadimento beta va cercata nel modo in cui si ordinano i protoni e i neutroni all'interno di un nucleo. Ogni protone tende a disporsi in modo ordinato quando è in coppia con un altro protone, orientando il proprio spin in direzione opposta rispetto allo spin dell'altro protone. Quando il numero di protoni è pari si otterrà una configurazione più ordinata di quando è dispari, perché non c'è nessun protone solitario. Lo stesso avviene per i neutroni. Questo schema fa sì che per i nuclei con numero di protoni e di neutroni pari il decadimento beta non avvenga, perché porterebbe a una configurazione più instabile con un neutrone e un protone non accoppiati. È invece possibile un doppio decadimento, ovvero la contemporanea conversione di due neutroni in due protoni, che mantiene la simmetria delle coppie ricomponendo una configurazione di protoni e neutroni stabile.

a.

Maria Goeppert-Mayer, fisica tedesca naturalizzata statunitense insignita del premio Nobel per la fisica nel 1963 per i suoi studi sul nucleo atomico.



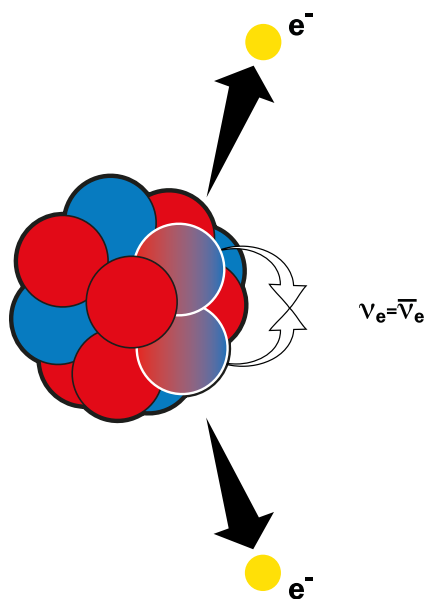
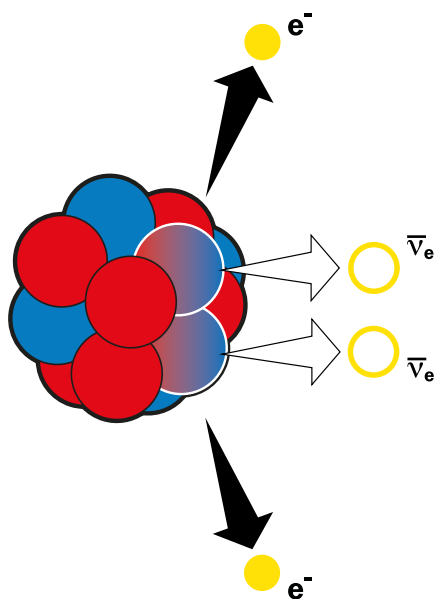
Negli ultimi 80 anni, il doppio decadimento beta è stato osservato in vari nuclei, confermandosi come uno dei processi più rari mai osservati in natura, con vite medie tra i 10^{18} e 10^{20} anni, ovvero fino a 100 miliardi di volte superiori all'età dell'universo. Questo vuol dire che per osservare un solo evento di doppio decadimento beta è necessario osservare almeno un miliardo di miliardi di nuclei atomici in un anno.

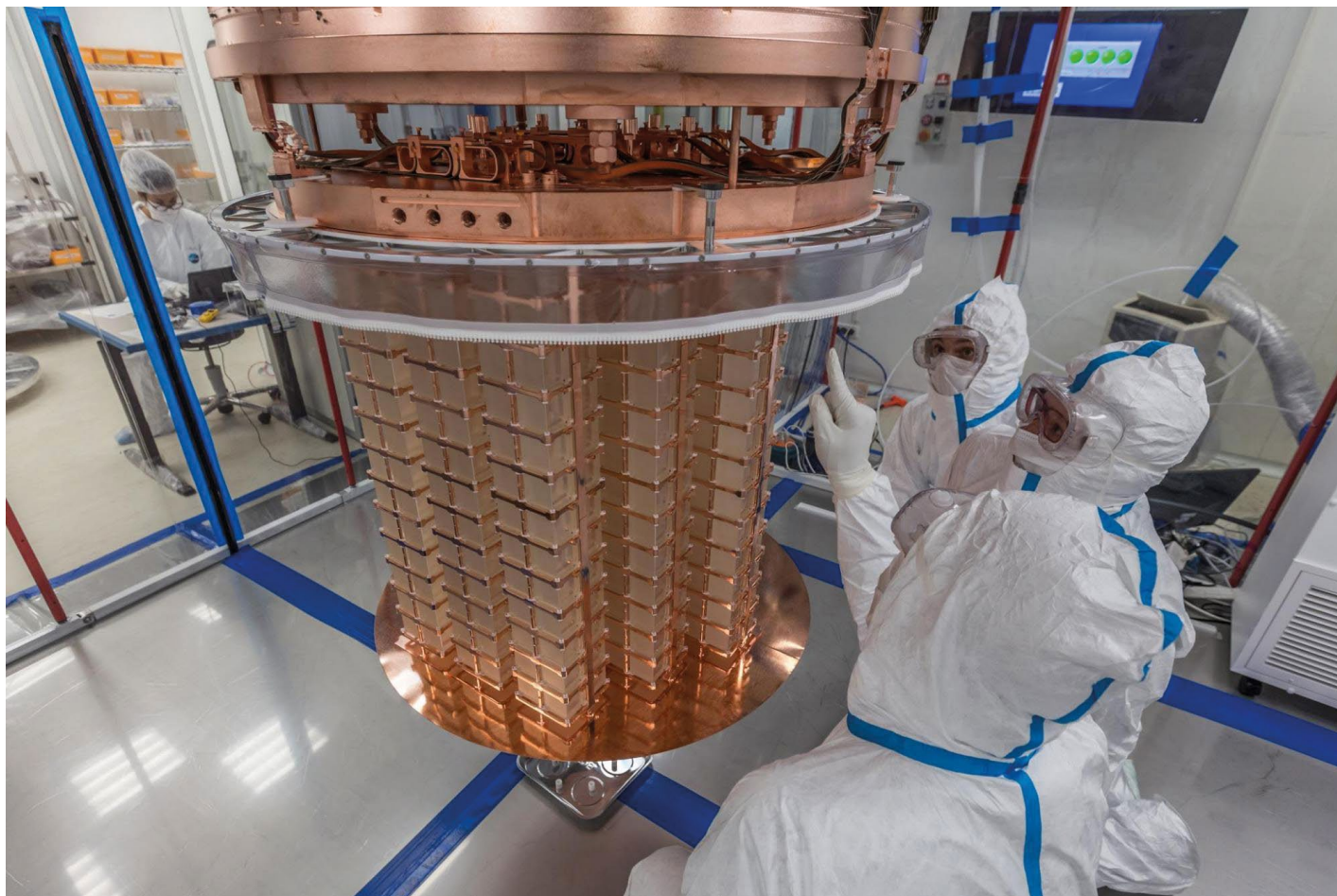
Il vero interesse per i processi di doppio decadimento beta inizia però nel 1939 quando Wendell Furry, partendo dai lavori di Fermi e di Goeppert-Mayer, applica al neutrino il modello proposto due anni prima da Ettore Majorana, in cui non c'è distinzione tra particella e antiparticella, e propone un nuovo processo di decadimento, oggi noto come "doppio decadimento beta senza emissione di neutrini". L'intuizione di Furry è che se il neutrino fosse una particella di Majorana, cioè se il suo comportamento fosse descritto in linguaggio matematico dell'equazione di Majorana e non da quella di Dirac (vd. p. 9, ndr), nel doppio decadimento beta potrebbero non avvenire contemporaneamente due processi separati di conversione di neutrone in protone ma un singolo processo concatenato. Infatti, l'antineutrino emesso da un neutrone

potrebbe essere assorbito come neutrino (visto che non c'è differenza tra le due particelle) da un secondo neutrone. In questo modo, dall'esterno si osserverebbe solo l'emissione di due elettroni, senza alcun antineutrino. L'aspetto fondamentale di questo processo, che è ancora più raro del doppio decadimento beta con due neutrini e quindi ancora più difficile da osservare, sta nel fatto che può avvenire solo se il neutrino è una particella di Majorana. Dunque, se fosse possibile osservare il doppio decadimento beta senza emissione di neutrini sarebbe possibile dare una conferma sperimentale al modello di Majorana per i neutrini.

A partire dagli anni '70 molti fisici si sono dedicati alla ricerca del doppio decadimento beta senza emissione di neutrini. Oggi, più di 80 anni dopo i lavori di Furry e Majorana, due grandi progetti installati presso i Laboratori Nazionali del Gran Sasso si contendono la leadership in questa ricerca: Cuore e Gerda/Legend. Cuore nasce da un'idea di Ettore Fiorini, uno dei pionieri di queste ricerche in Italia, e dalle ricerche del suo gruppo sui rivelatori criogenici, i cosiddetti bolometri (vd. asimmetrie n. 24, p. 35, ndr). Oggi questo esperimento è condotto da una grande collaborazione internazionale, principalmente composta da scienziati italiani

b. Il doppio decadimento beta si verifica nel raro caso in cui due neutroni in un nucleo si trasformano simultaneamente in due protoni, emettendo due elettroni e due antineutrini (sinistra). Nel caso in cui sia valida l'ipotesi di Majorana, e dunque il neutrino coincida con la sua antiparticella, l'antineutrino emesso da uno dei due neutroni può essere riassorbito dall'altro, con l'emissione di soli due positroni (destra).





c.
Tre ricercatori al lavoro sul rivelatore dell'esperimento Cuore, costituito da 988 cristalli cubici ultra-freddi di tellurite organizzati in 19 torri.

e americani, e ha realizzato il primo rivelatore criogenico di quasi una tonnellata per cercare di osservare il doppio decadimento beta nell'isotopo 130 del tellurio.

Gerda, partendo da un'idea sviluppata dallo stesso Fiorini, utilizza rivelatori di germanio per cercare il decadimento nel nucleo dell'isotopo 76 del germanio. Condotto da una

collaborazione di scienziati tedeschi e italiani, Gerda ha appena finito la sua campagna di raccolta dati, senza aver osservato finora il doppio decadimento beta senza neutrini, e sta adesso iniziando la realizzazione di un nuovo progetto ancora più sensibile chiamato Legend, a cui si sono uniti numerosi scienziati americani. I rivelatori di Legend, nella prima fase composti da 200 kg di germanio, sfrutteranno la presenza di una grande tanica riempita di argon liquido. Immersi in questo speciale bagno, saranno protetti dai disturbi provenienti dal mondo esterno.

Siamo all'alba di una nuova generazione di esperimenti che spingeranno al limite la tecnologia per riuscire finalmente a dare una prova sperimentale delle teorie di Majorana. La comunità scientifica attende con impazienza la prima osservazione del doppio decadimento beta senza emissione di neutrini.

Biografia

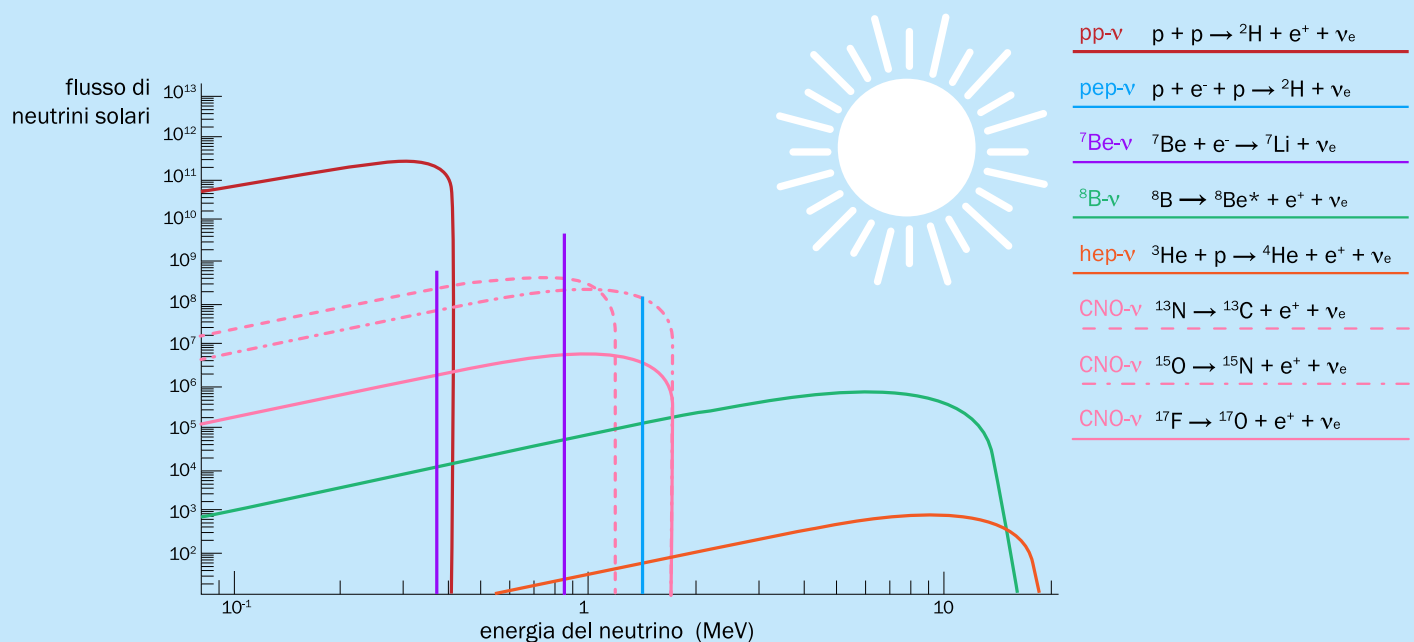
Paolo Gorla è ricercatore presso il Laboratori Nazionali del Gran Sasso dell'Infn. I suoi principali interessi sono lo studio della natura di Majorana del neutrino, attraverso la ricerca del doppio decadimento beta, e la ricerca della materia oscura.

DOI: 10.23801/asimmetrie.2020.29.4

Sotto questo Sole

I neutrini della nostra stella

di Gianpaolo Bellini



Nel fenomeno dell'oscillazione dei neutrini la probabilità che un neutrino passi da un tipo a un altro aumenta con la distanza fra la sorgente e il rivelatore e si riduce con il diminuire dell'energia dei neutrini. I neutrini solari hanno energie molto basse, anche di pochi keV, e, se studiati dalla Terra, percorrono una distanza fra punto di produzione e rivelatore di circa 150 milioni di chilometri: sono quindi lo strumento ideale per studiare il fenomeno dell'oscillazione (vd. p. 14, ndr). Il modello solare standard (*Solar Standard Model*, Ssm), sviluppato in quarant'anni a partire dall'inizio degli anni '60 del secolo scorso da John N. Bahcall insieme ad altri collaboratori, descrive il Sole a partire da quando era una protostella in contrazione e segue la sua evoluzione fino alla fase di equilibrio fra compressione esercitata dalle forze gravitazionali e pressione interna, mantenuta dall'alta temperatura. Il modello

riesce a riprodurre correttamente il raggio e la luminosità del Sole (cioè l'energia irradiata per unità di tempo) e il rapporto fra le abbondanze degli elementi più pesanti dell'idrogeno e l'idrogeno stesso, sulla superficie del Sole. L'energia solare è prodotta da un insieme di reazioni nucleari che avvengono nel nucleo del Sole e sono raggruppate in un ciclo, ipotizzato già negli anni '30 del secolo scorso da George Gamow e Carl Friedrich von Weizsäcker, che viene detto "catena protone-protone" o "pp" e che produce il 99% dell'energia solare. Cinque delle reazioni di questo ciclo emettono neutrini elettronici, con energie comprese tra pochi keV e 16 MeV, dei quali l'Ssm predice i flussi sulla Terra. Poiché i neutrini interagiscono molto debolmente con la materia e quindi le interazioni nel rivelatore sono rare, tutti gli esperimenti sui neutrini solari sono eseguiti in laboratori sotterranei per schermarsi dai raggi cosmici,

a. Le varie componenti del flusso dei neutrini solari (a sinistra) e le reazioni nucleari che le producono (a destra). I flussi di neutrini sono indicati in $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}\text{MeV}^{-1}$, fatta eccezione per le linee verticali (in viola e in celeste), i cui valori sono espressi in $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$.

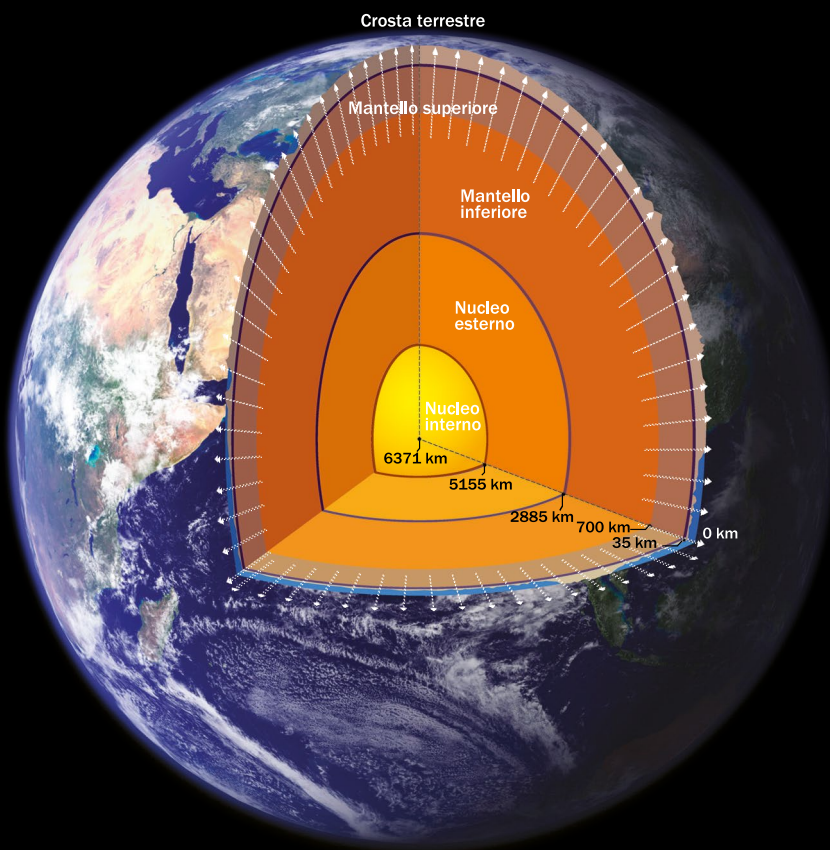


b.
Vista dell'esterno
della grande sfera
dell'esperimento Borexino,
allestito nella sala C dei
Laboratori Nazionali del
Gran Sasso dell'Infn.

che altrimenti maschererebbero i segnali prodotti dai neutrini. I primi due esperimenti sui neutrini solari, Homestake e Gallex, fra gli anni '60 e '90 del secolo scorso, misurarono il flusso dei neutrini solari, ma senza distinguere fra le varie reazioni che li producevano. Essi diedero origine al cosiddetto "problema dei neutrini solari", perché trovarono un netto deficit nel flusso, rispetto alle previsioni dell'Ssm. Le reazioni osservate da questi due esperimenti, per via del metodo di rivelazione utilizzato, potevano essere prodotte solo da neutrini elettronici. La ragione di questo deficit rimase un puzzle irrisolto finché, nella prima decade del secondo millennio, l'esperimento Sno (*Sudbury Neutrino Observatory*), misurò contemporaneamente e in tempo reale (cioè nel momento nel quale le interazioni avvengono) sia le reazioni prodotte solo dai neutrini elettronici sia quelle prodotte dai neutrini di tutti i tre sapori, osservando, in quest'ultimo caso, un flusso uguale a quello previsto dall'Ssm. Il problema quindi era da collegarsi alle oscillazioni dei neutrini elettronici, emessi dal Sole, in neutrini di altro sapore nel tragitto fra l'interno del Sole e la Terra.

Sno misurava solo lo 0,1% di tutto il flusso solare, cioè una coda di alta energia dei neutrini emessi da una reazione della fase finale della catena pp, la reazione del boro 8. Nei primi anni '90 si progettò nei Laboratori Nazionali del Gran Sasso l'esperimento Borexino, capace di misurare separatamente i flussi di neutrini delle varie reazioni nucleari che avvengono nel Sole, coprendo praticamente tutto lo spettro di energia dei neutrini solari. Il problema chiave era l'abbattimento della radioattività naturale, sia dei materiali per la costruzione sia proveniente dalle rocce e dall'ambiente circostante. In cinque anni di ricerca e sviluppo, tra il 1990 e il 1995, si svilupparono metodi innovativi per la riduzione drastica della radioattività, che applicati alla parte attiva dell'apparecchiatura (che rivela le interazioni di neutrini), hanno prodotto una radiopurezza mai raggiunta da nessun altro esperimento, né prima né dopo Borexino: circa 1 grammo di impurezza ogni 10^{19} grammi di sostanza pura. Le radiazioni provenienti dall'ambiente sono schermate da 2400 tonnellate di acqua ultra-pura. La costruzione del rivelatore ha richiesto una decina d'anni, perché niente è standard in Borexino: tutti i materiali sono stati selezionati fra quelli aventi la più bassa radioattività e misurati con rivelatori al germanio di alta sensibilità, i componenti sono stati costruiti o fatti costruire *ad hoc*, l'assemblaggio è avvenuto utilizzando cinque camere pulite, e infine lo stesso rivelatore è stato equipaggiato per essere una camera pulita. La raccolta dei dati delle interazioni di neutrini è iniziata nel 2007 e da allora i successi ottenuti da questo esperimento sono stati molteplici. Si sono misurati i neutrini provenienti da tutte le reazioni nucleari che avvengono nel Sole e che, insieme alle altre della catena pp, producono il 99% di tutta l'energia solare. In questo modo si è dimostrato che il Sole brilla a causa di una reazione esotermica di fusione di quattro nuclei di idrogeno che formano un nucleo di elio, reazione che riassume tutto il ciclo. Da un confronto fra la luminosità dei neutrini e quella dei fotoni, si è constatato che negli ultimi 100.000 e più anni l'energia solare non è cambiata: ciò è stato possibile perché i neutrini impiegano pochi secondi a uscire dal Sole, mentre i fotoni vi impiegano più di 100.000 anni, subendo vari processi di assorbimento e riemissione nella materia solare. La misura delle reazioni della catena pp, da 150 keV fino a 16 MeV, ha permesso anche di osservare

I geoneutrini



1.
Struttura interna della Terra.

L'interno della Terra è composto da vari strati, un po' come una cipolla: la parte più profonda è costituita da un nucleo, con una parte interna solida e una più esterna liquida, seguita da un mantello, anch'esso suddiviso in due parti, e infine una crosta sulla cui parte esterna poggiamo i nostri piedi (vd. fig. 1). La roccia che compone questi strati contiene nuclei instabili come isotopi di potassio, torio e uranio (^{40}K , ^{232}Th e ^{238}U): nel decadimento di questi radionuclidi viene emessa una frazione importante del calore presente nelle profondità della Terra, ma misurare con precisione quanto calore provenga da questi decadimenti nucleari è molto difficile in quanto non si possono fare misure dirette oltre una certa profondità.

Qui è d'aiuto il neutrino: i decadimenti di uranio, torio e potassio producono anche antineutrini, i quali, viaggiando indisturbati fino alla superficie, possono fornire informazioni dirette sui processi che avvengono in profondità. Essendo prodotti nelle viscere della Terra, sono chiamati geoneutrini.

L'idea di usare i geoneutrini per studiare l'interno della Terra risale agli

anni '60 del secolo scorso, ma la possibilità di osservarli ha richiesto lo sviluppo di rivelatori estremamente sensibili e capaci di misurare flussi molto deboli di neutrini dotati di pochi MeV di energia: Kamland in Giappone e soprattutto Borexino ai Laboratori Nazionali del Gran Sasso.

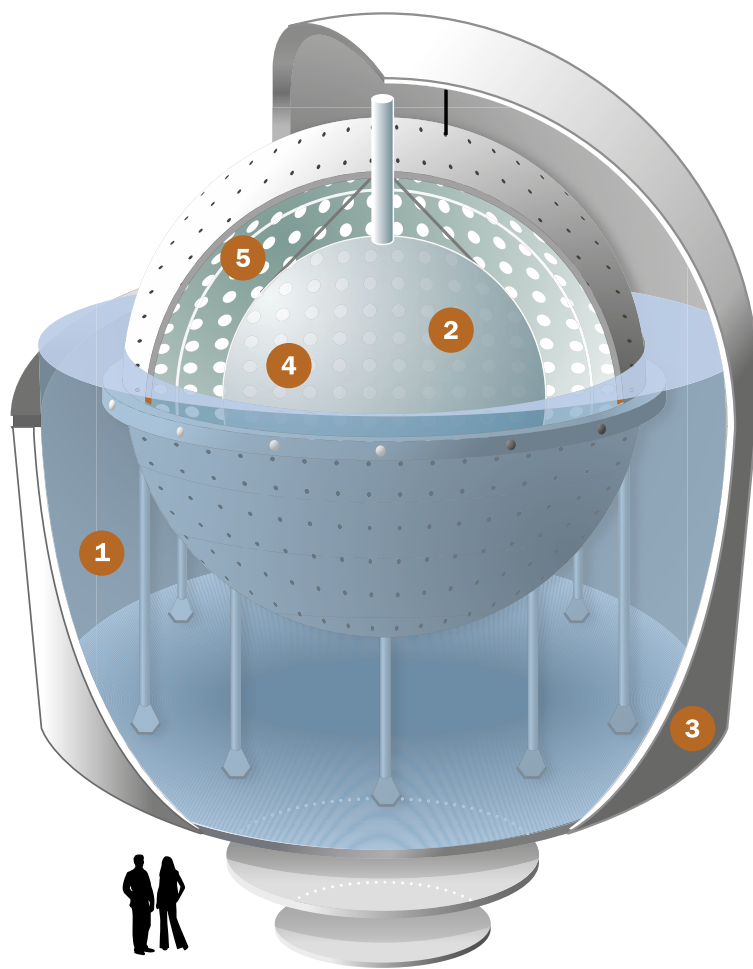
Con una campagna di osservazioni tra il 2007 e il 2019, Borexino ha misurato 53 geoneutrini prodotti dal decadimento di ^{232}Th e ^{238}U presenti nel mantello terrestre: questo ha permesso di determinare per la prima volta e con grande precisione che il calore terrestre è prodotto in larga parte proprio dai decadimenti radioattivi e di quantificare la potenza di questa emissione. Questi risultati, che stabiliscono l'abbondanza di uranio e torio nel mantello terrestre, aprono nuovi scenari nello studio della geochimica terrestre e permettono di comprendere come una parte non trascurabile dell'energia che alimenta vulcani, terremoti e il campo magnetico terrestre sia prodotta dalla radioattività. [Nicolao Fornengo]

l'oscillazione del neutrino elettronico nel vuoto e di misurarne la probabilità di sopravvivenza nell'intero intervallo di energia.

Borexino, insieme a un esperimento giapponese, Kamland, ha anche rivelato i neutrini provenienti dall'interno della Terra, i cosiddetti geoneutrini, confermandone l'esistenza: essi ci forniscono informazioni sulla struttura e sulla composizione chimica dell'interno della Terra.

Ma Borexino non si è fermato qui: è riuscito dopo quattro anni di sforzi a fornire l'evidenza sperimentale del cosiddetto ciclo CNO, che nel Sole è responsabile solo dell'1% dell'energia prodotta, mentre nelle stelle più massicce (con masse superiori a 1,3 masse solari), e quindi nell'universo, è assolutamente dominante. Questo ciclo era ipotizzato dalle teorie astrofisiche, ma non esisteva alcuna prova sperimentale diretta della sua esistenza. La difficoltà della misura risiedeva nella struttura assolutamente priva di elementi distintivi della distribuzione di energia dei neutrini del CNO e nella sua parziale sovrapposizione con lo spettro emesso dal bismuto 210, elemento chimico che permane, seppur in quantità estremamente ridotte, nel rivelatore, anche dopo il raggiungimento dell'estrema radiopurezza. Il completo isolamento termico del rivelatore, che permetteva di tenere sotto controllo i moti convettivi e quindi la diffusione di possibili particolati, nonché lo sforzo di analisi, aiutato dalla buona capacità di misurare l'energia dei neutrini, hanno permesso di conseguire questa importante scoperta.

Borexino, insomma, è stato un esperimento di cruciale importanza, che ci ha permesso da un lato di studiare e approfondire le proprietà fondamentali dei neutrini, dall'altro di comprendere nel modo più profondo e mai raggiunto prima i meccanismi alla base del funzionamento della stella più vicina e più importante per noi, il Sole, e di capire ciò che fa brillare le stelle.



1. Rivestimento di 2400 tonnellate di acqua extra pura
2. 300 tonnellate di scintillatore liquido
3. Contenitore di acqua di acciaio inossidabile (diametro 18 m)
4. Rivestimento di nylon dello scintillatore liquido
5. 2200 fotomoltiplicatori (verso l'interno)

Biografia

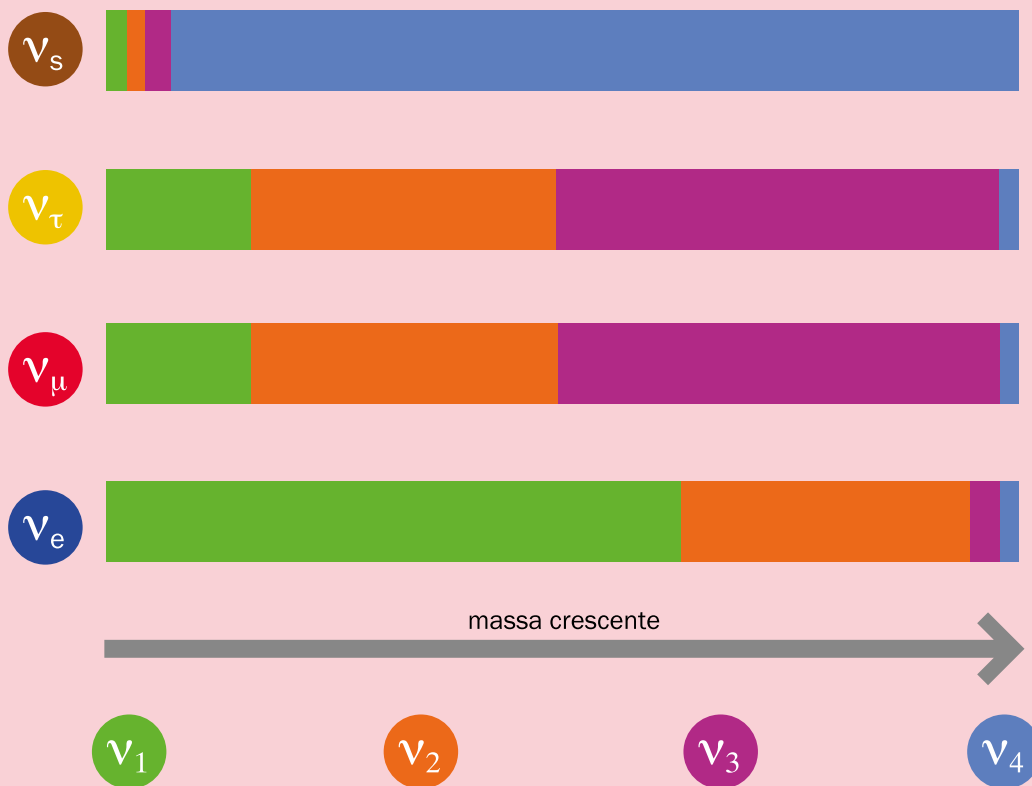
Gianpaolo Bellini è professore emerito all'Università di Milano e scienziato emerito dell'Infn. Fisico delle particelle, ha diretto esperimenti in tutti i maggiori centri di ricerca del mondo. La sua lunga carriera scientifica è stata coronata da prestigiosi premi, tra cui il premio internazionale Bruno Pontecorvo nel 2015 e il premio Enrico Fermi nel 2017.

c. Schema che mostra la struttura e le dimensioni in scala dell'esperimento Borexino.

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 .

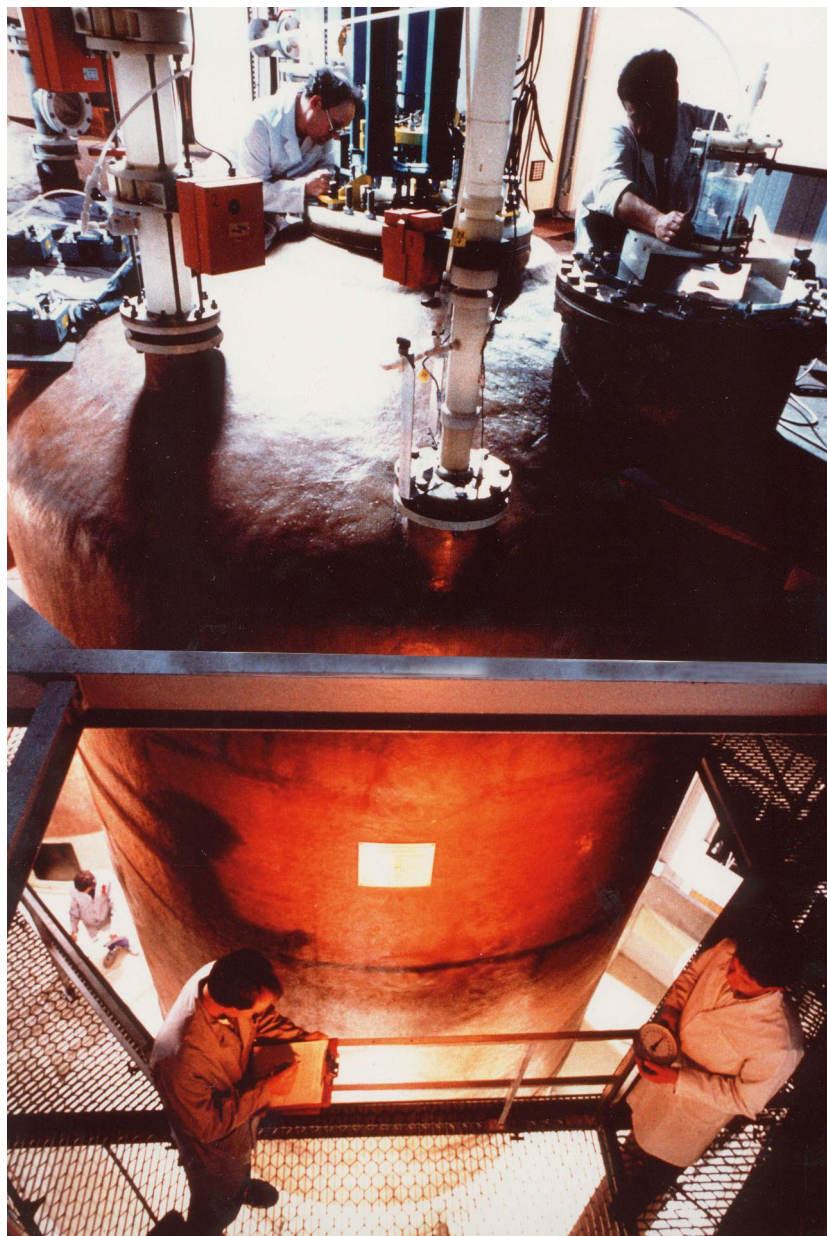
Quanti neutrini ci sono? Ne conosciamo con certezza tre: il neutrino elettronico, quello muonico e quello tauonico. Questi sono i cosiddetti “neutrini attivi”, che conosciamo perché interagiscono con la materia tramite le interazioni deboli. Sono quasi identici, con la sola differenza che quando interagiscono 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

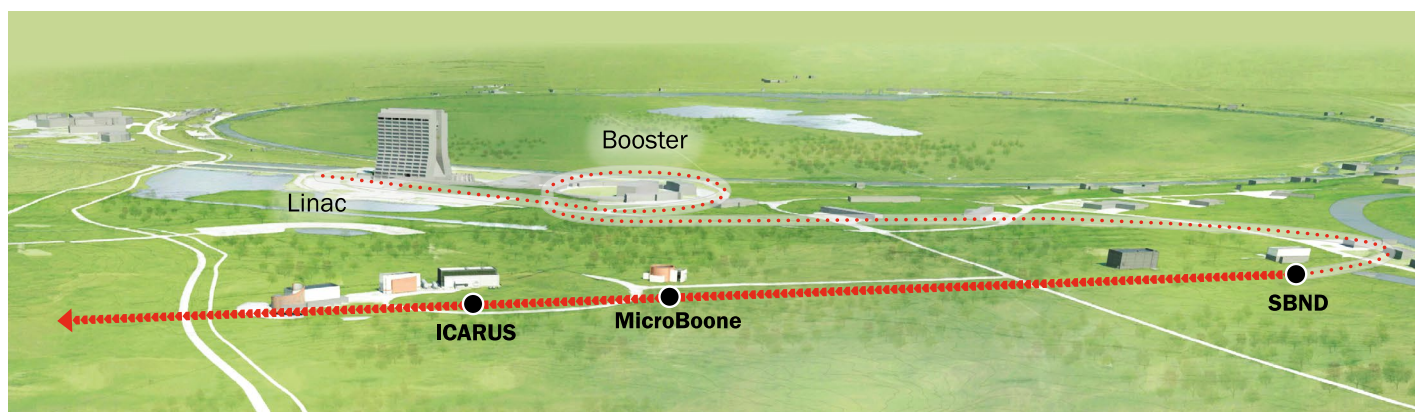
denota l’assenza di vita o l’incapacità alla riproduzione. I neutrini sterili, invece, sono una panacea per la fisica fondamentale contemporanea, che sta cercando di capire quale sia la teoria fondamentale della natura. La teoria attuale più completa è il cosiddetto modello standard, che spiega tre delle 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 rivelarli 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

Apparizioni e sparizioni

Ricerche con neutrini da acceleratore

di Maria Gabriella Catanesi

Studiare i neutrini e le loro oscillazioni è un'impresa difficile. I neutrini, infatti, interagiscono raramente con la materia e solo attraverso la forza debole. Anche quelli prodotti dalla sorgente naturale per noi più ricca, il Sole, attraversano in gran parte la Terra indisturbati, senza interagire.

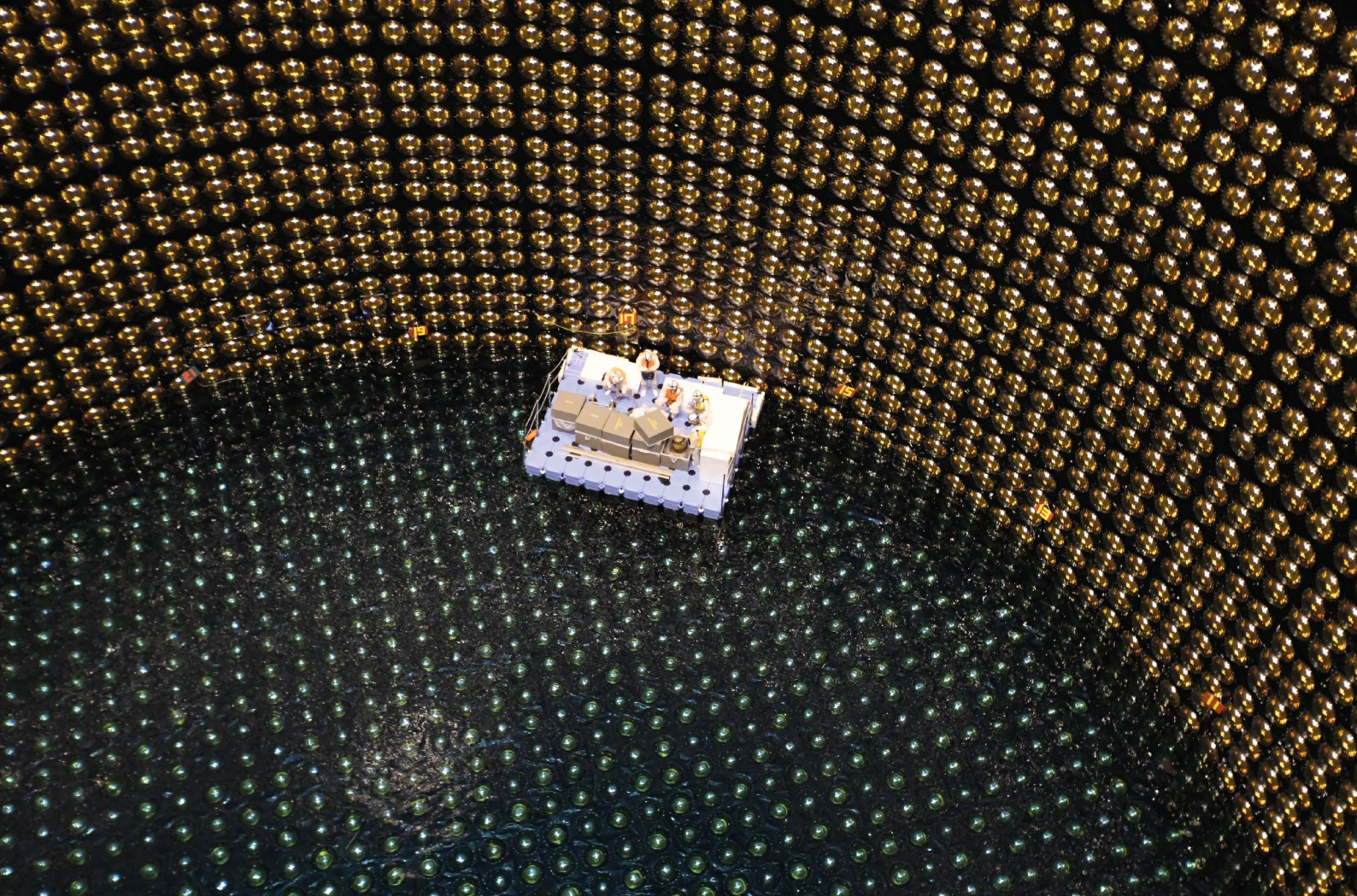
Per questo motivo, al fine di studiare la fisica del neutrino in maniera controllata, sono state realizzate intense sorgenti di neutrini artificiali. I neutrini vengono prodotti grazie alle collisioni di un

tradizionale fascio di protoni, generato da un acceleratore di particelle, su un bersaglio di grafite. Queste collisioni producono pioni che rapidamente decadono in muoni e neutrini muonici. I muoni e i protoni rimanenti sono fermati da un secondo strato di grafite, che invece i neutrini possono attraversare senza problemi. L'energia dei neutrini prodotti è importante, perché è correlata alla distanza alla quale è più probabile che avvenga la loro trasformazione da un sapore all'altro: neutrini di energia

più o meno alta oscillano a distanze più o meno grandi dalla loro sorgente. I neutrini prodotti da un acceleratore di particelle hanno un'energia compresa fra qualche centinaio di MeV e qualche GeV. Di conseguenza, la tipica distanza dalla sorgente a cui occorre posizionare il rivelatore per osservare i fenomeni di oscillazione è di diverse centinaia fino a un migliaio di chilometri. Per questo motivo tali esperimenti vengono chiamati in gergo *"long baseline"*, cioè su grande distanza.

a.
T2K (Tokai to Kamioka) è un esperimento in Giappone che studia i fenomeni legati all'oscillazione dei neutrini.





b.
Super-Kamiokande è un gigantesco rivelatore di neutrini sotterraneo installato a Kamioka in Giappone che, nell'ambito dell'esperimento T2K, rivela i neutrini prodotti nel complesso di acceleratori di Jparc a Tokai.

Un'altra caratteristica importante delle sorgenti artificiali di neutrini da acceleratore è che permettono di generare sia i neutrini che le loro antiparticelle (gli antineutrini): basta selezionare la carica dei pioni prodotti nelle collisioni. Infatti, nel decadimento dei pioni positivi vengono prodotti neutrini, mentre i pioni negativi producono antineutrini. Come vedremo, questo aspetto è estremamente importante perché ci permette di verificare in condizioni controllate le differenze nel comportamento fra materia e antimateria. Produrre neutrini artificiali in grande numero è un processo tecnologicamente complesso ed energeticamente costoso. Non deve meravigliare quindi che solo i grandi laboratori internazionali per la fisica delle particelle siano in grado di farlo: il Cern a Ginevra, il Fermilab negli Usa e Jparc in Giappone. Negli ultimi anni l'esperimento T2K (Tokai to Kamioka) in Giappone è certamente fra quelli che ha prodotto i risultati più interessanti legati ai fenomeni di oscillazione di neutrino. T2K è una grande collaborazione internazionale composta da più di 400 fisici provenienti da tre continenti e da undici diversi

paesi, cui l'Italia partecipa attraverso l'Infn. T2K, che è stato il primo esperimento a osservare nel 2011 la trasformazione di neutrini muonici in neutrini elettronici, utilizza il più intenso fascio di neutrini muonici mai prodotto da un acceleratore, quello del laboratorio Jparc (a Tokai) sulla costa est del Giappone. Il fascio è orientato in modo tale da intercettare le miniere di Kamioka a 295 chilometri di distanza, sul versante ovest del paese, dove è localizzato il rivelatore Super-Kamiokande. Il fascio di Jparc produce neutrini a una energia il cui valore più probabile è 600 MeV, poiché proprio a quest'energia è massima la probabilità che possano oscillare dopo aver viaggiato per 295 chilometri. Il complesso dei rivelatori vicini (ND280) è installato a soli 280 metri dal punto di produzione dei neutrini e permette di misurarli prima che avvengano fenomeni di oscillazione. I neutrini di T2K sono molto più energetici di quelli solari e quindi possiedono una probabilità di interazione con la materia molto più elevata di questi ultimi. In particolare, una piccola frazione interagisce con lo scintillatore o con l'acqua nello ND280

e molte di queste interazioni producono muoni. Il muone è una particella carica e può essere rivelato poiché ionizza il gas contenuto nelle grandi camere a deriva, dette "Tpc". Inoltre, tutti i rivelatori dello ND280 sono immersi in un campo magnetico che permette di discriminare la carica osservando la curvatura (concava o convessa) delle traiettorie. La storia di questo strumento è alquanto peculiare. Progettato alla fine degli anni '70 per lo storico esperimento UA1 al Cern (che valse il premio Nobel a Carlo Rubbia, nel 1984) è rimasto per anni inutilizzato. Seguendo un'idea di alcuni fisici dell'Infn, è stato poi rimesso in funzione, imbarcato su una nave e spedito in Giappone. Qui ha cominciato una nuova vita e rappresenta un esempio di longevità tecnologica e di riciclaggio scientifico ben riuscito. Le misure effettuate da ND280 sono utilizzate per predire il numero dei neutrini muonici che ci aspettiamo di vedere nel rivelatore lontano Super-Kamiokande nel caso non ci siano oscillazioni. La maggior parte dei neutrini muonici attraversa il rivelatore ND280 senza interagire e prosegue il suo viaggio a una velocità di poco inferiore a quella della luce fino a raggiungere il gigantesco rivelatore Super-Kamiokande. Installato a una profondità di 1000 metri, all'interno della miniera di Kamioka, nel Giappone Occidentale, Super-Kamiokande è un enorme cilindro (39 metri di diametro e 42 di altezza) riempito di acqua ultra-pura.

Le interazioni da neutrino muonico e da neutrino elettronico sono viste dal rivelatore come cerchi di luce nell'acqua. L'interazione di un neutrino muonico produce un muone, mentre le interazioni dei neutrini elettronici producono elettroni. I muoni e gli elettroni sono particelle cariche e, a loro volta, interagiscono con gli atomi del liquido scintillante, eccitandoli. Dopo breve tempo, gli atomi ritornano nel loro stato di equilibrio iniziale ed emettono luce. Se la particella che ha attraversato Super-Kamiokande viaggia a una velocità superiore a quella

della luce nell'acqua (che è circa tre quarti di quella nello spazio vuoto) questa luce, chiamata radiazione Cherenkov, è emessa in un cono. Le pareti di Super-Kamiokande sono attrezzate con più di 10.000 sensibilissimi fototubi di grandi dimensioni che sono in grado di rivelare il cerchio formato dai fotoni della radiazione Cherenkov. Super-Kamiokande è in grado di distinguere i muoni (che producono un cerchio ben definito) dagli elettroni (che producono un cerchio più diffuso).

Come abbiamo visto in precedenza, cambiare la carica elettrica dei pioni selezionati ci permette di generare un fascio di antineutrini invece che di neutrini. Ed è esattamente quello che hanno fatto i fisici di T2K per studiare il comportamento delle antiparticelle. In una situazione di simmetria fra materia e antimateria ci si aspetta di osservare nei neutrini e negli antineutrini esattamente gli stessi fenomeni, della stessa entità. La misura sperimentale ha dato però un'indicazione diversa. In particolare, si è osservato che, benché ci siano indicazioni che anche gli antineutrini cambino di sapore (esattamente come i neutrini), lo fanno in quantità inferiore. In altre parole, materia e antimateria non si comportano in modo simmetrico rispetto ai fenomeni di oscillazione: un esempio di violazione della simmetria CP.

Dopo aver analizzato i dati raccolti in nove anni, l'esperimento T2K ha raggiunto un livello di significatività statistica sufficientemente alta da poter fornire un'indicazione abbastanza stringente sull'esistenza della violazione di carica-parità CP in queste particelle fondamentali. Il risultato pubblicato su "Nature" (che gli ha dedicato la copertina) ha avuto un'eco importante nella comunità scientifica e non solo. Ma misurazioni più precise sono certamente necessarie per confermare queste indicazioni che potrebbero spiegare uno dei grandi misteri del nostro universo: il fatto che esso sia composto di materia e non di antimateria.



c.
I neutrini hanno lo spin opposto alla direzione del moto, mentre le loro antiparticelle, gli antineutrini hanno lo spin che punta nella stessa direzione del moto. È stato osservato che gli antineutrini oscillano meno frequentemente dei neutrini, violando così la simmetria CP.

Biografia

Maria Gabriella Catanesi, ricercatrice presso l'Infn, ha conseguito il dottorato di ricerca nel 1986 nell'esperimento Aleph al Cern. Dal 1992 si occupa di fisica dei neutrini, con ruoli di rilievo negli esperimenti Chorus e Harp al Cern. Autrice di oltre 300 pubblicazioni, attualmente è componente del Comitato Esecutivo e responsabile Infn dell'esperimento T2K.

DOI: 10.23801/asimmetrie.2020.29.7

interagiscono così debolmente con le altre particelle che praticamente viaggiano indisturbati e alcuni sono catturati da giganteschi rivelatori sulla Terra.

Le "supernovae di tipo II" sono un esempio di come i neutrini hanno un ruolo fondamentale nel motore di una sorgente astrofisica. Queste supernovae si formano quando muore una stella almeno otto volte più pesante del Sole. Le stelle che diventano supernovae hanno una struttura a cipolla con gli strati più interni fatti di elementi via via più pesanti generati tramite combustione termonucleare. Quando il nucleo della stella inizia a produrre il ferro, la forza rivolta verso l'esterno causata dalla fusione nucleare non bilancia più la forza gravitazionale diretta verso l'interno, e la stella collassa su sé stessa per via della gravità. Al centro della stella si crea un'onda d'urto che viaggia a circa un decimo della velocità della luce, squarciando i vari strati stellari fino a determinarne l'esplosione.

Il 99% dell'energia gravitazionale totale di una supernova di tipo II è emesso sotto forma di neutrini! Essi sono, infatti, prodotti così abbondantemente nel nucleo stellare che possiamo immaginare abbiano un ruolo fondamentale nell'esplosione (si stima che ne vengano emessi 10^{58}). L'onda d'urto appena formatasi perde tutta la sua energia dissociando atomi di ferro, ma successivamente i neutrini forniscono nuova energia all'onda d'urto permettendole di ricominciare a propagarsi e finalmente far sì che la supernova esploda. Senza i neutrini, l'esplosione non sarebbe quindi possibile.

Negli ultimi anni sono state realizzate simulazioni in 3D di una supernova pochi istanti prima dell'esplosione: rappresentano

un'avanguardia computazionale e sono così complesse da impiegare mesi per essere elaborate su supercomputer con più di 15.000 Cpu.

Queste simulazioni permettono di predire il segnale in neutrini di una futura esplosione di supernova. I neutrini rappresentano gli unici messaggeri (insieme alle onde gravitazionali) della fisica in condizioni così estreme.

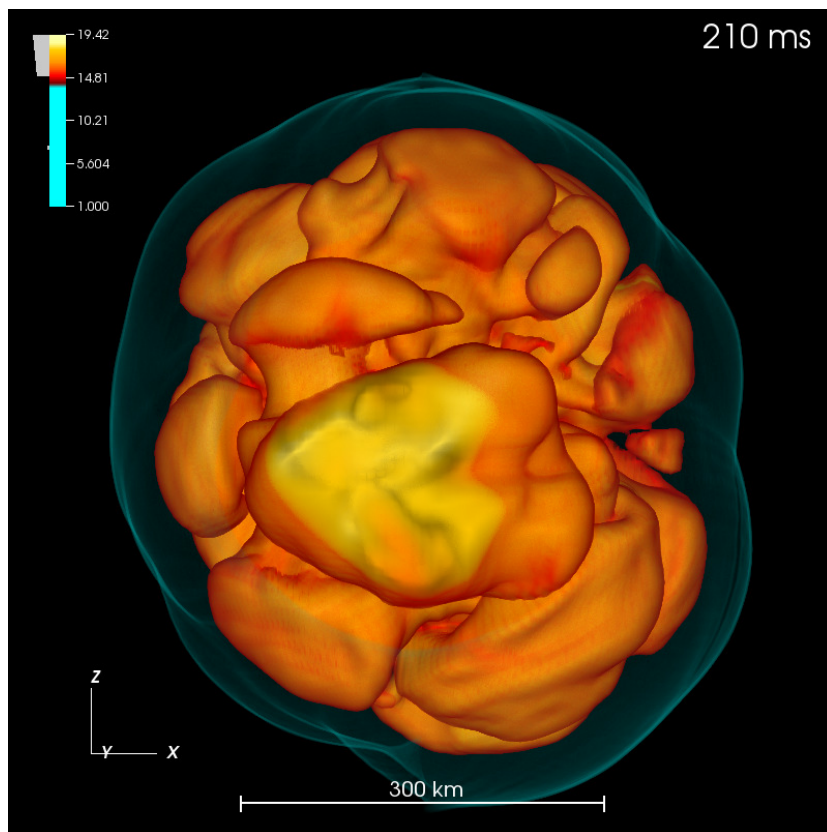
La prima e unica osservazione, nella vicina nube di Magellano (SN 1987A), di neutrini emessi dall'esplosione di una supernova risale al 1987. Purtroppo, non tutti i rivelatori erano attivi, ma la sola manciata di neutrini captati è bastata a convalidare le teorie sul collasso delle stelle massive. Attualmente, però, abbiamo dei rivelatori di neutrini giganteschi, ognuno dei quali potrebbe farci vedere fino a un milione di neutrini dalla prossima esplosione galattica. Esempi di questi rivelatori sono IceCube in Antartide e Super-Kamiokande in Giappone, e una ventina di altri piccoli rivelatori.

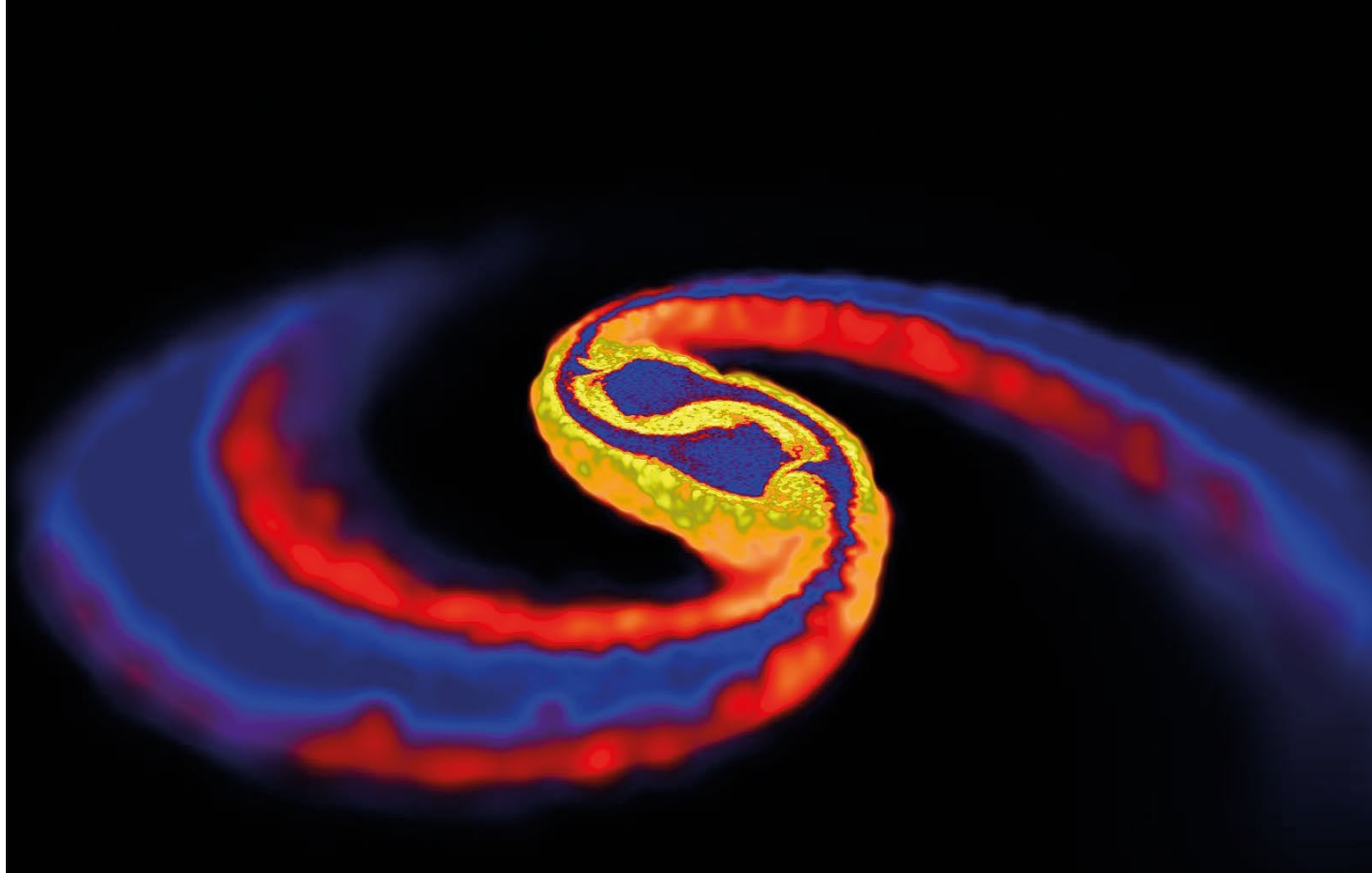
Gli scienziati possono utilizzare i neutrini per localizzare le supernovae nel cosmo; soprattutto quelle con un segnale di luce molto debole o assente. Il destino di una supernova dopo l'esplosione è, con la stessa probabilità, collassare in una stella di neutroni o in un buco nero senza emissione di alcuna radiazione. I neutrini, quindi, possono offrirci informazioni preziose sulla fisica della sorgente appena prima che il buco nero si formi.

Se due stelle di neutroni o una stella di neutroni e un buco nero sono abbastanza vicini da formare un sistema binario, i due corpi celesti iniziano a orbitare l'uno intorno all'altro fondendosi.

Questo evento astrofisico, denominato "kilonova", è stato

b. Simulazione del fenomeno di esplosione di una supernova. Le bolle corrispondono alla materia della supernova in rapida espansione, scaldata dal passaggio di un enorme numero di neutrini.





c.
Simulazione della fusione
di stelle di neutroni.

considerato per molto tempo una delle possibili sedi di formazione degli elementi più pesanti del ferro, come oro e platino. Nel 2017, per la prima volta sono state rivelate onde gravitazionali emesse dalla fusione di stelle di neutroni insieme alla radiazione prodotta, in particolare quella emessa dal decadimento radioattivo degli elementi pesanti. Questa osservazione ha fornito una chiara evidenza che almeno una parte degli elementi più pesanti del ferro è creata durante la fusione di stelle di neutroni. La fusione di due stelle di neutroni produce tanti neutrini proprio come l'esplosione di una supernova. La formazione di elementi pesanti in questo processo è fortemente influenzata dalla frazione di neutrini e antineutrini presenti. Quest'ultima può essere modificata dalle oscillazioni di sapore dei neutrini, con conseguente impatto sulla quantità di elementi pesanti prodotti, e quindi sulla lunghezza d'onda della radiazione elettromagnetica

emessa dalla kilonova. Sappiamo ancora molto poco della fisica di questi affascinanti eventi astrofisici, ma negli ultimi anni c'è stata un'intensa attività teorica volta a fornire un quadro più chiaro sul ruolo dei neutrini nella fusione di stelle di neutroni.

Oltre a essere un cacciatore di supernovae, nel 2013, l'esperimento IceCube in Antartide ha osservato due neutrini con l'energia più alta mai misurata, Bert ed Ernie. Pian piano sempre più neutrini di questa energia sono stati rivelati e oggi gli scienziati hanno qualche centinaio di eventi da poter studiare. Sebbene sia chiaro che questi neutrini abbiano origine astrofisica, le loro sorgenti non sono note al momento. Sappiamo però che i neutrini osservati provengono da tutte le direzioni nel cielo e questo suggerisce che siano emessi da sorgenti extragalattiche.

Di recente, alcuni dei neutrini osservati da IceCube sono stati osservati in correlazione temporale con i fotoni a diverse lunghezze d'onda emessi dal *blazar* TXS 0506+056 (un nucleo galattico attivo con il getto che punta verso di noi). Sebbene, al momento, non si riescano ancora a spiegare in modo coerente tutti i dati raccolti in neutrini e radiazione elettromagnetica, se questa osservazione fosse confermata si tratterebbe della prima correlazione diretta tra neutrini di altissima energia e la loro sorgente. Solo di recente abbiamo iniziato a guardare all'universo tramite questi potenti messaggeri invisibili: una nuova finestra che ci riserverà sorprese affascinanti.

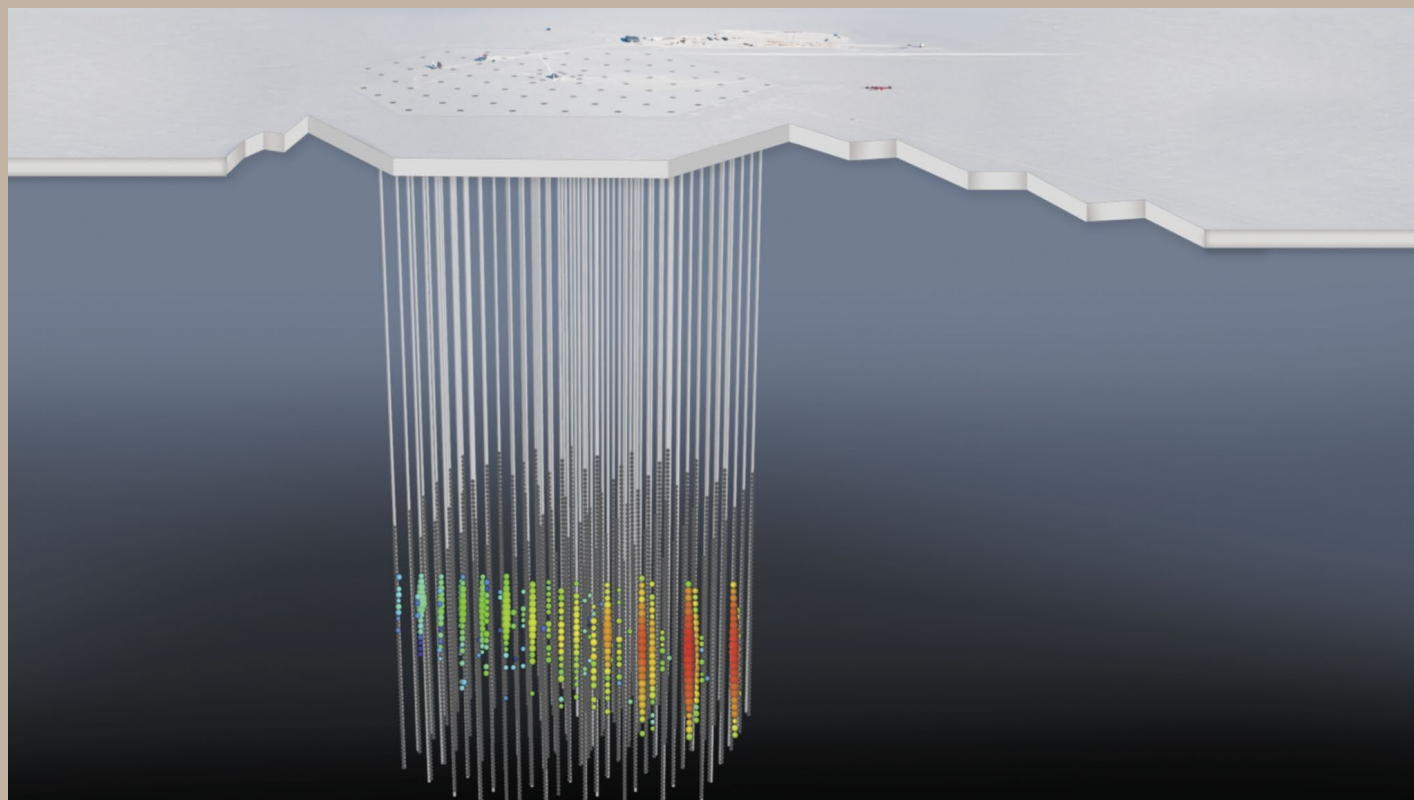
Biografia

Irene Tamborra è professore del Niels Bohr Institute a Copenaghen dove dirige il gruppo di ricerca AstroNu. Studia modelli per la fisica del neutrino e multimessaggera nelle sorgenti astrofisiche e nell'universo primordiale. Ha conseguito il dottorato di ricerca a Bari e svolto attività di ricerca presso il Max Planck Institut di Monaco e l'Università di Amsterdam.

Neutrini negli abissi

Telescopi di ghiaccio e di acqua

di Piera Sapienza



Il 22 settembre 2017 IceCube, che nel 2013 aveva annunciato la scoperta dei neutrini cosmici, rivela un neutrino muonico di altissima energia (circa 290 TeV), catalogato come “evento IC170922”, e manda un’allerta con la direzione dell’evento a tutti i telescopi del globo. I telescopi Magic osservano raggi gamma di alta energia dal *blazar* TX506+056 in prossimità dell’evento. Seguono osservazioni correlate in altre lunghezze d’onda, nell’ambito radio, ottico e dei raggi X. L’evento IC170922, considerato il primo dell’astronomia con neutrini di alta energia, ha messo alla prova i diversi modelli teorici che descrivono i nuclei galattici attivi, cioè galassie con un buco nero

centrale attivo e getti ultrarelativistici che accelerano particelle ad altissima energia, tra cui i *blazar*, il cui getto è orientato verso di noi. La comprensione dell’universo estremo, sede di eventi cataclismatici, è una delle frontiere della scienza attuale. L’universo è però sostanzialmente opaco a fotoni di alta energia e le particelle cariche, emesse da acceleratori cosmici, non consentono di fare osservazioni astronomiche poiché sono deviate dai campi magnetici galattici ed extragalattici, che incontrano nel loro cammino verso di noi. I neutrini invece, essendo privi di carica, stabili e debolmente interagenti, possono attraversare pressoché indisturbati tutto

a. Un’immagine dei segnali di luce Cherenkov rivelati dai fotomoltiplicatori dell’esperimento IceCube (sotto i ghiacci del Polo Sud), che indicano il passaggio di un muone prodotto dall’interazione del neutrino di alta energia dell’evento IC170922 con il ghiaccio. I colori si riferiscono a tempi diversi di rivelazione della luce e ci dicono che il muone si muoveva da destra verso sinistra.

b.

Il laboratorio di IceCube, presso la stazione Amundsen-Scott South Pole, nell'Antartico.

l'universo ed emergere dal cuore dei più potenti acceleratori cosmici trasportando informazioni sui meccanismi della loro produzione. L'astronomia alle altissime energie è quindi accessibile solo ai neutrini, particelle affascinanti ed elusive. Talmente elusive che l'esperimento IceCube, con un volume di rivelazione di un chilometro cubo, cattura appena una decina di neutrini cosmici l'anno.

La necessità di rivelatori di volumi di circa un chilometro cubo scaturisce da stime di flusso che sono state confermate dalle osservazioni. L'idea di utilizzare grandi volumi di mezzi naturali, come l'acqua marina o i ghiacci polari a grandi profondità, per rivelare i neutrini di alta energia è stata proposta negli anni '60. Il neutrino, interagendo con l'acqua o il ghiaccio, produce un muone (o un altro leptone carico a seconda del sapore del neutrino) che si propaga a velocità maggiore della velocità della luce nel mezzo, generando un cono di luce direzionale per effetto Cherenkov. La luce Cherenkov viene rivelata da una matrice tridimensionale di sensori ottici (fotomoltiplicatori) che consentono di misurare l'energia del neutrino e di risalire alla sua direzione di provenienza e quindi di individuarne la

sorgente. Il ghiaccio o l'acqua hanno una triplice funzione: fungono da bersaglio per l'interazione del neutrino, da radiatore Cherenkov e da schermo per i muoni atmosferici che provengono dall'alto e costituiscono la principale sorgente di rumore di fondo. Un paio di migliaia di metri di ghiaccio o acqua sovrastante il rivelatore riducono il flusso di muoni atmosferici di circa un milione di volte, facendo in modo che il rivelatore non ne sia accecato. I segnali di neutrini sono tuttavia talmente rari che nei telescopi si selezionano solo eventi di neutrini che provengono dall'emisfero opposto, utilizzando tutta la Terra, che può essere attraversata solo dai neutrini, come filtro. La rivelazione di segnali dall'emisfero opposto è necessaria per la identificazione dei neutrini muonici, che sono il canale privilegiato per l'astronomia. Per l'osservazione completa del cielo di neutrini sono necessari quindi due rivelatori di dimensione del chilometro cubo installati in emisferi opposti, in modo da assicurare una copertura totale. La realizzazione di telescopi per neutrini ad alta energia in ambienti estremamente ostili, come le profondità dei ghiacci polari o gli abissi marini, implica sfide tecnologiche considerevoli,





c.
Un modulo di rivelazione dell'esperimento Km3net/Arca, in costruzione al largo di Capo Passero, in Sicilia, a 3500 metri di profondità.

a causa delle pressioni elevatissime e di problemi di corrosione e accessibilità. La progettazione di questi apparati sperimentali ha richiesto molti anni di ricerca e sviluppo e la costruzione e validazione di prototipi *in situ*.

I rivelatori, che una volta installati devono essere operativi per tempi dell'ordine di 20 anni, non sono accessibili per riparazioni e manutenzioni, e pertanto è necessaria una elevatissima affidabilità, confrontabile con quella degli esperimenti spaziali. IceCube, operativo dal 2008 nella configurazione completa, è costituito da 86 colonne da 60 fotomoltiplicatori ognuna (per un totale di 5.160) e un volume di rivelazione di un chilometro cubo e, a oggi, è l'unico rivelatore al mondo ad aver rivelato neutrini cosmici. Antares, installato a 2500 metri di profondità al largo di Tolone e operativo dal 2008, è un telescopio dimostratore da 0,01 chilometri cubi costituito da circa 900 fotomoltiplicatori. Malgrado le piccole dimensioni è attualmente il presidio operativo nell'emisfero Nord per l'astronomia multimessaggera. L'astronomia con neutrini di alta energia muove i suoi primi passi e già suscita grandi aspettative nella comunità astrofisica. Nonostante l'eccezionale osservazione dell'evento IC170922,

l'origine dei neutrini cosmici è in larga misura ancora sconosciuta, in quanto le informazioni disponibili sono contrastanti. In particolare, esistono vincoli osservativi che indicano che l'emissione da *blazar* spiegherebbe solo una piccola frazione del flusso di neutrini cosmici osservato da IceCube.

La ricerca di sorgenti di neutrini e dell'origine dei raggi cosmici continua a essere fondamentale per la comprensione dell'universo di alta energia. Di estrema importanza è anche il monitoraggio su tutto il cielo di fenomeni transitori e in particolare di onde gravitazionali. È quindi sempre più evidente quanto sia importante disporre di un altro telescopio da un chilometro cubo nel Mar Mediterraneo con potenzialità simili o superiori a quelle di IceCube. L'astronomia con neutrini ha infatti bisogno di rivelare più neutrini e

con maggiore precisione, e di allargare il campo di vista a tutto il cielo. Il telescopio Km3net/Arca, in fase di costruzione a 3500 metri di profondità, a 80 km al largo di Capo Passero, in Sicilia, avrà un volume dell'ordine del chilometro cubo, una sensibilità che eccederà quella di IceCube e vedrà l'87% del cielo, compreso il piano galattico e il centro galattico, solo marginalmente osservabili da IceCube. La grande lunghezza di diffusione della luce Cherenkov in acqua di mare rispetto al ghiaccio consentirà di ottenere un miglioramento della risoluzione angolare di un ordine di grandezza, spianando la strada all'identificazione delle sorgenti dei neutrini di altissima energia. Con Km3net, l'attuale IceCube e la sua versione futura possiamo appena immaginare quali progressi scientifici deriveranno dall'astronomia dei neutrini di altissima energia.

Biografia

Piera Sapienza è dirigente di ricerca ai Laboratori Nazionali del Sud dell'Infn. Ha lavorato in esperimenti di fisica nucleare in Francia, Germania e Italia. Dai primi anni 2000 lavora sulla fisica dei neutrini. È stata rappresentante Lns nei consigli internazionali di Km3net e Antares ed è responsabile dell'integrazione delle stringhe di Km3net ai Lns.

DOI: 10.23801/asimmetrie.2020.29.9

Il neutrino che verrà

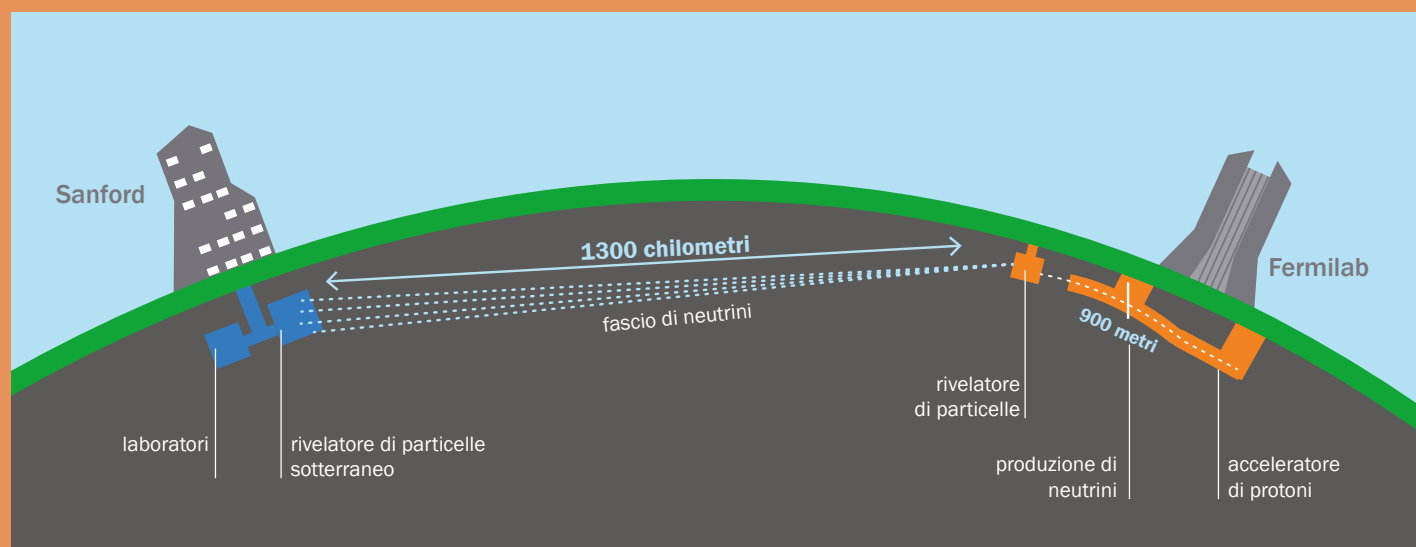
Gli esperimenti futuri

di Paolo Bernardini

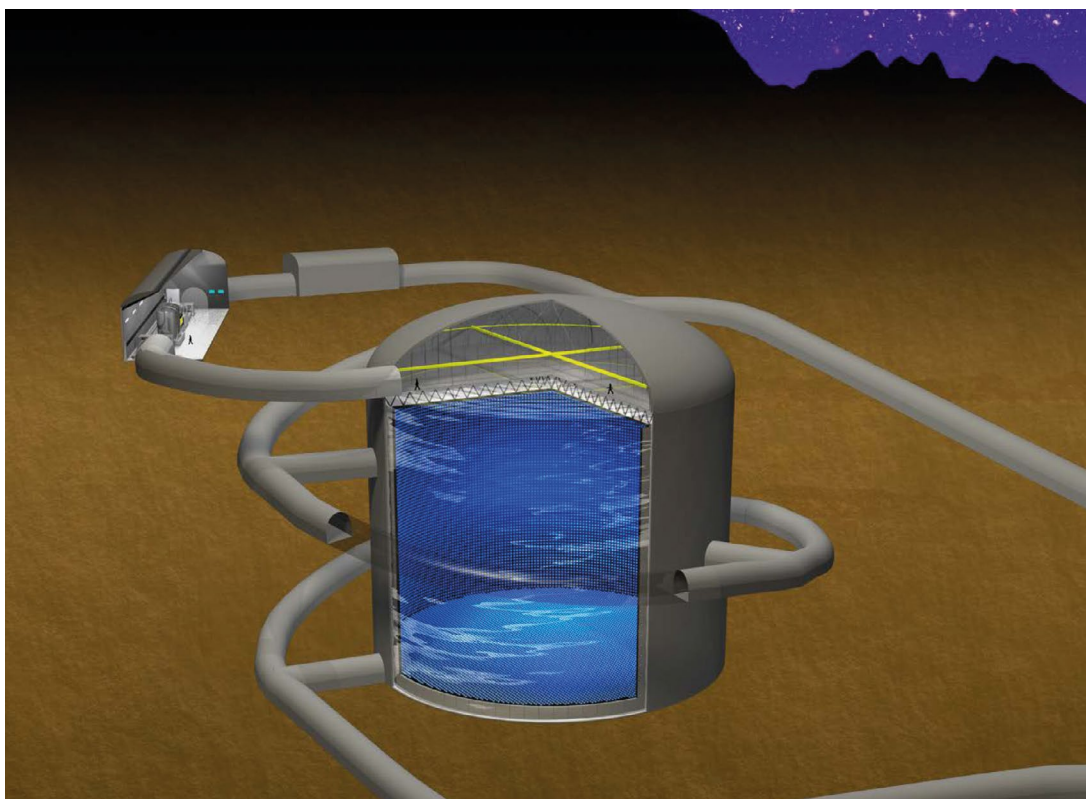
In questi anni il panorama della fisica del neutrino si è arricchito di così tanti nuovi dettagli, grazie ai molti recenti risultati, da far credere che gli esperimenti attualmente in corso possano presto completare le conoscenze sul neutrino, esaurendo questo filone di ricerca. In realtà non è così. Migliaia di ricercatori in tutto il mondo, tra i quali molti italiani, continuano a progettare e realizzare nuovi esperimenti, sempre più complessi e tecnologicamente avanzati. A spingerli non è solo un interesse specifico sui neutrini, ma anche la convinzione che queste particelle misteriose possano ancora riservare entusiasmanti sorprese, di valenza più generale. Misure di precisione dell'oscillazione dei neutrini, un fenomeno ormai ben noto, potrebbero evidenziare delle anomalie e aprire la strada a nuova fisica. I neutrini potrebbero addirittura fornirci la chiave per comprendere perché la materia domini l'universo e l'antimateria sia destinata a sopravvivere solo pochi istanti. Per descrivere i tanti progetti sperimentali relativi ai neutrini sarebbe necessario un intero volume.

Qui ci si limiterà alle più importanti misure nell'ambito di tre tra i principali progetti futuri. Un esperimento che si prevede prenderà dati già alla fine del 2022, denominato Juno, è in costruzione in Cina a circa 53 chilometri da due impianti nucleari. Nota la potenza dei reattori, è possibile stimare il flusso di antineutrini elettronici emessi dai frammenti instabili della fissione nucleare. Juno sarà costituito da una gigantesca sfera, di 40 metri di diametro, riempita con 20 mila tonnellate di scintillatore liquido, in grado di rivelare gli antineutrini con una statistica mai ottenuta in passato. È previsto che l'oscillazione provochi una notevole riduzione del flusso degli antineutrini generati dai reattori e che a questa riduzione si sovrapponga un'ulteriore variazione, dipendente dalla gerarchia di massa e rivelabile grazie all'ottima risoluzione in energia dell'esperimento. In queste condizioni, Juno può risolvere alcune discrepanze tra misure precedenti e determinare la gerarchia delle masse associate ai neutrini. La gerarchia di massa è oggetto di indagine

a. L'esperimento DUNE studia l'oscillazione dei neutrini muonici a grandi distanze. I neutrini, prodotti al Fermilab dall'interazione di un fascio di protoni con un bersaglio, sono osservati inizialmente in un rivelatore posto nello stesso laboratorio e, successivamente, da un rivelatore sotterraneo a 1300 chilometri di distanza a Sanford.



b.
Hyper-Kamiokande,
il grande rivelatore di
neutrini in costruzione a
Kamioka (Giappone), sarà
dieci volte più grande del
suo predecessore Super-
Kamiokande.



anche da parte di due altri importanti progetti: DUNE, negli Stati Uniti, e Hyper-Kamiokande (Hyperk), in Giappone. Essi intendono sfruttare l'oscillazione dei neutrini muonici in neutrini elettronici non solo per studiare le masse dei neutrini, ma anche per misurare un parametro associato alla violazione della simmetria CP. I neutrini si prestano perfettamente a tale misura perché gli antineutrini non sono solo le antiparticelle dei neutrini, ma anche le loro immagini speculari. Infatti, i neutrini sono sinistrorsi (hanno impulso e spin antiparalleli), mentre gli antineutrini sono destrorsi (hanno impulso e spin paralleli). In conclusione, gli antineutrini sono il risultato dell'operazione CP sui neutrini.

DUNE e Hyperk hanno in programma di verificare se l'oscillazione dei neutrini abbia caratteristiche differenti rispetto a quella degli antineutrini. Entrambi gli esperimenti utilizzano un fascio di neutrini muonici, un rivelatore vicino per monitorare il fascio prima che l'oscillazione si manifesti e un gigantesco rivelatore remoto, per misurare l'effetto dell'oscillazione. I neutrini

muonici vengono prodotti a partire da un fascio di protoni estratti da un acceleratore. Questi incidono sul bersaglio, tipicamente un pezzo di grafite, generando un gran numero di pioni carichi che si propagano all'interno di un tunnel sotterraneo. Un opportuno sistema di magneti permette di focalizzare i pioni di carica positiva o viceversa quelli di carica negativa. Essendo particelle instabili, i pioni decadono in volo generando muoni e neutrini muonici. La fine del tunnel arresta i muoni e i pioni residui, mentre i neutrini proseguono il loro cammino nel sottosuolo verso i rivelatori. Se le polarità dei magneti sono adattate per collimare pioni positivi e disperdere pioni negativi, il fascio inizialmente sarà costituito da neutrini muonici. Se viceversa vengono collimati pioni negativi, il fascio sarà costituito da antineutrini muonici. In entrambi i casi l'oscillazione fa sì che nei rivelatori lontani arrivino anche neutrini o antineutrini elettronici, inizialmente assenti. Sebbene gli obiettivi di DUNE e Hyperk siano molto simili, in realtà i due esperimenti sono alternativi e complementari. Non solo per le

c.
Il 4 dicembre 1930
Wolfgang Pauli scrive
una lettera ai fisici che
partecipano a un congresso
a Tubinga in cui ipotizza
l'esistenza del neutrino.

tecniche adottate, ma anche per le diverse strategie di misura. Infatti, le ricerche sulla violazione di CP devono tener conto del cosiddetto "effetto materia", cioè del fatto che gli elettroni della materia ordinaria agiscono in maniera opposta sull'oscillazione dei neutrini e degli antineutrini elettronici e quindi la violazione di CP non può essere indagata se le misure non vengono "ripulite" da questo effetto.

La scelta operata dalla collaborazione Hyperk è quella di utilizzare un fascio in una banda di energia molto stretta e di posizionare il gigantesco rivelatore sotterraneo (258 mila tonnellate di acqua purissima) a "solo" 300 chilometri dall'acceleratore di Jparc, in modo da rendere trascurabile l'effetto materia. Viceversa, i ricercatori di Dune hanno optato per un fascio con uno spettro energetico molto più ampio e un rivelatore, composto da quattro moduli per un totale di 52 mila tonnellate di argon liquido, posto a una distanza di circa 1300 km dall'acceleratore che sarà in funzione al Fermilab. In questo caso l'effetto materia non sarà assolutamente trascurabile, ma sarà possibile distinguere tra effetto materia e un'eventuale violazione di CP osservando il profilo dei picchi di oscillazione a diverse energie.

È noto da tempo che c'è violazione di CP nel settore dei quark, ma tale violazione è così esigua da non riuscire a spiegare lo sbilanciamento tra materia e antimateria che osserviamo nell'universo. Tale sbilanciamento potrebbe essere spiegato se Dune e Hyperk scoprissero che la violazione di CP si manifesta anche nel settore dei leptoni, in particolare nell'oscillazione dei neutrini.

Nel 1930 Wolfgang Pauli preferì rimanere a Zurigo perché invitato a una serata danzante, piuttosto che partecipare a un congresso a Tubinga. Inviò ai congressisti solo una irrituale lettera in cui ipotizzava l'esistenza del neutrino. Son trascorsi 90 anni da allora e forse oggi Pauli rinunciarebbe al ballo pur di sapere quali progressi scientifici e quali progetti futuri hanno avuto e ancora hanno come fondamento la sua "disperata" ipotesi.

original - Photocopy of PLC 0393
Abschrift/15.12.96 PW

Offener Brief an die Gruppe der Radioaktiven bei der
Gauvereins-Tagung zu Tübingen.

Abschrift

Physikalisches Institut
der Eidg. Technischen Hochschule
Zürich

Zürich, 4. Des. 1930
Gloriastrasse

Liebe Radioaktive Damen und Herren,

Wie der Ueberbringer dieser Zeilen, den ich huldvollst
anmehren bitte, Ihnen des näheren auseinanderzusetzen wird, bin ich
angesichts der "falschen" Statistik der N - und $Li-6$ Kerne, sowie
des kontinuierlichen beta-Spektrums auf einen verweifelten Ausweg
verfallen um den "Wechselgats" (1) der Statistik und den Energiesatz
zu retten. Nämlich die Möglichkeit, es könnten elektrisch neutrale
Teilchen, die ich Neutronen nennen will, in den Kernen existieren,
welche den Spin $1/2$ haben und das Ausschliessungsprinzip befolgen und
sich von Lichtquanten ausserdem noch dadurch unterscheiden, dass sie
nicht mit Lichtgeschwindigkeit laufen. Die Masse der Neutronen
müsste von derselben Grosseordnung wie die Elektronenmasse sein und
jedemfalls nicht grösser als $0,01$ Protonenmasse. Das kontinuierliche
beta-Spektrum wäre dann verständlich unter der Annahme, dass beim
beta-Zerfall mit dem Elektron jeweils noch ein Neutron emittiert
wird, derart, dass die Summe der Energien von Neutron und Elektron
konstant ist.

Man handelt es sich weiter darum, welche Kräfte auf die
Neutronen wirken. Das wahrscheinlichste Modell für das Neutron scheint
mir aus wellenmechanischen Gründen (näheres weiss der Ueberbringer
dieser Zeilen) dieses zu sein, dass das ruhende Neutron ein
magnetischer Dipol von einem gewissen Moment μ ist. Die Experimente
verlängen wohl, dass die ionisierende Wirkung eines solchen Neutrons
nicht grösser sein kann, als die eines gamma-Strahls und darf dann
wohl nicht grösser sein als $e \cdot (10^{-13} \text{ cm})$.

Ich traue mich vorläufig aber nicht, etwas über diese Ideen
zu publizieren und wende mich erst vertrauensvoll an Euch, liebe
Radioaktive, mit der Frage, wie es um den experimentellen Nachweis
eines solchen Neutrons stünde, wenn dieses ein ebensolches oder etwa
10mal grösseres Durchdringungsvermögen besitzen würde, wie ein
gamma-Strahl.

Ich gebe zu, dass mein Ausweg vielleicht von vornherein
wenig wahrscheinlich erscheinen wird, weil man die Neutronen, wenn
sie existieren, wohl schon längst gesehen hätte. Aber nur wer wagt,
gemäss und der Ernst der Situation beim kontinuierlichen beta-Spektrum
wird durch einen Ausdruck meines verehrten Vorgängers im Amt,
Herrn Debye, beleuchtet, der mir kürzlich in Brüssel gesagt hat:
"O, daran soll man am besten gar nicht denken, sowie an die neuen
Steuern." Darum soll man jeden Weg zur Rettung ernstlich diskutieren.
Also, liebe Radioaktive, prüfet, und richtet. Leider kann ich nicht
persönlich in Tübingen erscheinen, da ich infolge eines in der Nacht
vom 6. zum 7. Des. in Zürich stattfindenden Balles hier unabhämlich
bin. Mit vielen Grüssen an Euch, sowie an Herrn Back, Euer
untertänigster Diener

ges. W. Pauli

Biografia

Paolo Bernardini è docente presso l'Università del Salento. Si interessa di raggi cosmici e fisica del neutrino. Ha partecipato agli esperimenti Macro al Gran Sasso e Argo-Yb in Tibet. Attualmente è impegnato negli esperimenti Dampé su satellite e Dune negli Stati Uniti.

DOI: 10.23801/asimmetrie.2020.29.10

Neutrini a Stoccolma.

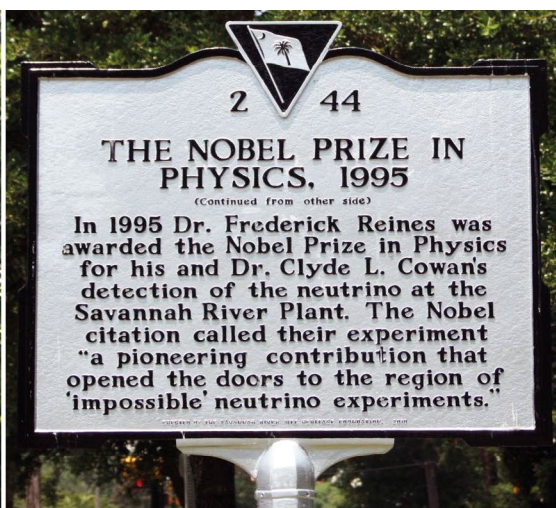
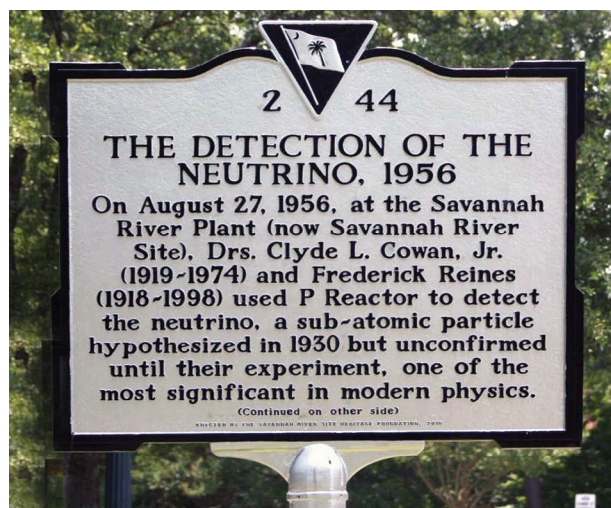
di Andrea Bersani

tecnologo Infn

La storia del neutrino è stata caratterizzata, fin dal 1930, quando è stato ipotizzato per la prima volta, da un'evoluzione molto lenta. Si è dovuto aspettare un quarto di secolo, fino al 1956, perché ci fosse la prima osservazione diretta, e altri decenni sono passati prima che uno scienziato fosse insignito del premio Nobel per i suoi studi su questa particella. Wolfgang Pauli, che per primo ne ipotizzò l'esistenza, aveva già ricevuto il prestigioso riconoscimento nel 1945, per il principio di esclusione della meccanica quantistica, e sarebbe morto nel 1958, quando la scoperta di Frederick

Reines e Clyde Cowan di due anni prima era ancora troppo poco consolidata perché il comitato potesse prendere in considerazione un secondo premio. Dei due scopritori solo Reines ricevette il Nobel, nel 1995, insieme a Martin Lewis Perl, "per i contributi pionieristici alla fisica del leptone": Reines per la scoperta del neutrino e Perl per la scoperta del leptone Tau. Cowan era morto da oltre vent'anni e non poté vedere riconosciuto il proprio merito. Reines, a dire il vero, non era stato il primo a volare a Stoccolma grazie al neutrino: già nel 1988 Leon Lederman, Melvin

Schwartz e Jack Steinberger avevano ricevuto il Nobel per aver osservato per la prima volta, nel 1962, il neutrino muonico. Curiosamente, la scoperta del secondo tipo di neutrini è stata premiata prima della scoperta del primo neutrino in assoluto. Ma la motivazione del comitato Nobel aveva un significato più profondo: si premiava il fatto di aver dimostrato, verificando che neutrino elettronico e neutrino muonico sono diversi, l'esistenza di famiglie di leptoni, in analogia a quanto visto per i quark (all'elettrone corrisponde il neutrino elettronico, al muone il neutrino muonico).



a. Targa commemorativa dell'esperimento di Reines e Cowan presso il reattore nucleare di Savannah River nel 1956 e del premio Nobel per la fisica assegnato a Reines nel 1995.



In comune, i casi del 1995 e del 1988 hanno la lunghissima attesa tra la scoperta e l'assegnazione del premio: guardando indietro possiamo pensare che alla base di questo "ritardo" ci potesse essere stata una qualche forma di resistenza della comunità scientifica verso una particella di cui, in effetti, fino agli anni '80 del ventesimo secolo non si sapeva quasi nulla.

Il primo Nobel assegnato in questo settore nel nostro secolo è del 2002, quando il premio fu conferito a Masatoshi Koshihara e Raymond Davis. Quest'ultimo ha legato il suo nome al primo esperimento sui neutrini solari, a Homestake: lo scopo era di confermare che il Sole funzionasse attraverso processi di fusione nucleare, emettendo neutrini, e il risultato fu la scoperta di un deficit di conteggi, che aprì la strada alle teorie di oscillazione e alla costruzione di molti altri rivelatori per neutrini solari. Tra questi, Kamiokande e Super-Kamiokande, di cui Koshihara fu l'ideatore, furono tra i più importanti: il premio fu loro riconosciuto per aver inaugurato l'astrofisica del neutrino. Anche Kamiokande nasceva, in realtà, per cercare qualcos'altro, il decadimento del protone: questo

non è mai stato osservato, ma i neutrini sì, e con un'efficienza notevolissima. L'esperimento di Davis era iniziato nel 1970, ma aveva preso dati fino al 1994, mentre Kamiokande era stato impostato all'inizio degli anni '80 e prende dati tutt'ora: il riconoscimento dell'importanza di queste scoperte è stato molto veloce, rispetto al secolo precedente. L'ultimo Nobel assegnato al settore dei neutrini risale al 2015, quando ricevettero il premio Takaaki Kajita e Arthur McDonald, per aver osservato l'oscillazione dei neutrini e aver così dimostrato che hanno massa non nulla. Kajita aveva lavorato come Koshihara su Super-Kamiokande, mentre McDonald era il responsabile del fratello ad acqua pesante del rivelatore giapponese, il Sudbury Neutrino Observatory, in Canada.

Nonostante duri ormai da novant'anni, la storia del neutrino è ancora lontana dall'essere conclusa: è più che probabile che fra alcuni anni questo articolo dovrà essere più lungo e includere nuovi nomi, grazie allo sforzo senza precedenti per la realizzazione di nuovi esperimenti a cui stiamo assistendo in questi anni.

b.
Il premio Nobel Arthur McDonald in visita ai Laboratori Nazionali del Gran Sasso dell'Infn.

[as] selfie

A scuola di fisica moderna.

di Valentina Balzarotti

docente del Liceo Scientifico "Paolo Borsellino e Giovanni Falcone" di Zagarolo

a.

Foto di gruppo dei partecipanti al Pid nel febbraio 2020 presso i Laboratori Nazionali di Legnaro.



All'inizio del mese di giugno 2019, ancora alle prese con gli adempimenti finali dell'anno scolastico che si stava concludendo, ho iniziato a progettare le attività per il laboratorio di fisica dell'anno successivo. La mia ricerca sul web è partita dalle pagine dell'Infn, serbatoio inesauribile di iniziative e progetti per i ragazzi, e non solo per loro! Infatti (quando si dice serendipità) mi sono imbattuta nel bando appena pubblicato dei Pid, Programma Infn per Docenti.

A dir la verità avevo già sentito parlare di questi corsi intensivi di formazione e aggiornamento della durata di una settimana da colleghi che avevano partecipato alle precedenti edizioni ma, con un po' di sana invidia per chi aveva fatto questa esperienza, mi ero subito autocensurata pensando che non avrei ottenuto il permesso dalla dirigente scolastica, visto il numero elevato di corsi a cui partecipo ogni anno. Questa volta però la descrizione dell'iniziativa mi ha coinvolto a tal punto che ho deciso di tentare la selezione: ho compilato la domanda online e, quasi come ulteriore incoraggiamento, ho scoperto che l'iniziativa era curata da Silvia Miozzi, una ricercatrice dell'Infn che diverse volte in

passato ha proposto attività poi risultate memorabili.

Con il beneplacito della dirigente scolastica ho quindi potuto seguire il corso, iniziato il 10 febbraio e conclusosi il 14 febbraio 2020, mentre ci arrivavano dalla Cina notizie sull'emergenza Covid-19 ed eravamo ancora inconsapevoli dell'imminente pandemia.

Il Pid è un corso residenziale della durata di cinque giornate e viene svolto in uno dei laboratori nazionali dell'Infn.

Personalmente ho chiesto di poter partecipare al Pid presso i Laboratori Nazionali di Legnaro, vicino Padova, perché i campi di indagine di questi laboratori sono quelli più vicini alla mia formazione di base in biofisica: sei acceleratori che applicano tecniche di fisica nucleare alla conservazione dei beni culturali, all'ambiente, allo studio dei materiali, alla radiobiologia. Il Pid ha coinvolto circa trenta docenti provenienti da tutta Italia, che sono stati suddivisi in quattro gruppi di lavoro per facilitare il movimento e le interazioni all'interno dei laboratori: le attività infatti sono state proposte sia nella forma di lezioni frontali che con la modalità di laboratori guidati da tecnici e ricercatori di Legnaro.

Gli argomenti del Pid hanno spaziato dalla teoria sugli acceleratori (con riferimenti e aneddoti storici) alla radiobiologia e ai radiofarmaci, alla fisica dei beni culturali, mentre in laboratorio sono state realizzate misure di vita media con sorgenti di fotoni e rivelatori di bromuro di lantanio e misure di radioattività ambientale. Abbiamo inoltre utilizzato la tecnica di fisica nucleare Rutherford Back Scattering (Rbs) per lo studio dei materiali con l'acceleratore CN e fatto misure di elementi in traccia in un lapislazzulo con la tecnica micro Pixe con l'acceleratore AN2000.

Questo corso è stato una continua sorpresa anche sul piano dell'organizzazione e dell'accoglienza, a partire dall'ospitalità alberghiera che ci è stata fornita in uno degli alberghi più belli di Padova, a fianco della Basilica di Sant'Antonio: gli organizzatori (Giorgio Chiarelli, Silvia Miozzi, Andrea

Gozzelino e Luisa Pegoraro) ci hanno guidati in ogni azione della giornata, compresa la visita al Palazzo del Bò offerta dall'Infn.

Molto gratificante si è poi rivelato il piano delle relazioni sociali, all'insegna di una cordiale condivisione professionale e personale.

Ricordo con nostalgia le tavolate serali nei ristoranti di Padova, momenti conviviali durante i quali abbiamo parlato di cucina regionale, vini, libri e ci siamo confrontati sulle nostre esperienze con gli studenti.

L'insegnamento delle discipline scientifiche nelle scuole superiori richiede studio costante, aggiornamento, passione e innovazione: esperienze come il Pid favoriscono e sostengono i docenti che vogliono fare seriamente questo lavoro, facilitando anche il confronto tra colleghi di materie differenti e di diversa provenienza.

b.
L'acceleratore AN2000
dei Laboratori Nazionali
di Legnaro.

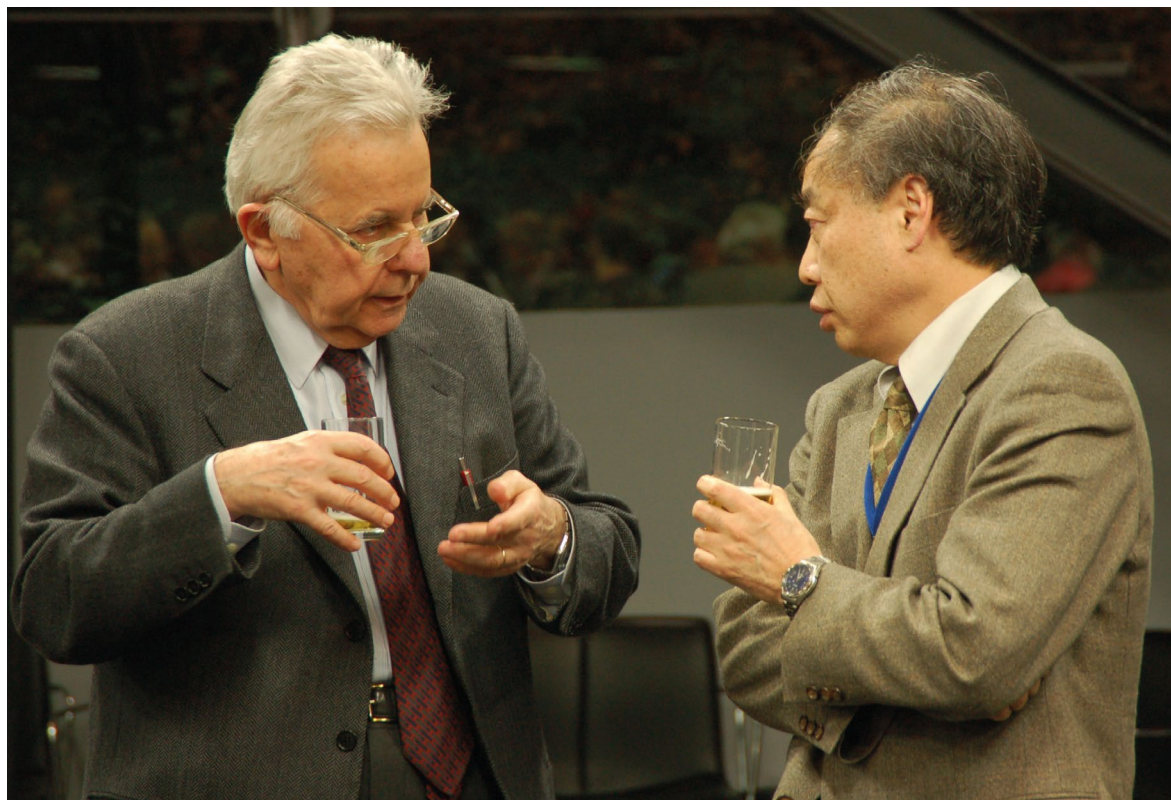


[as] intersezioni

Cabibbo e la fisica del sapore.

di Guido Martinelli

professore ordinario presso Sapienza Università di Roma

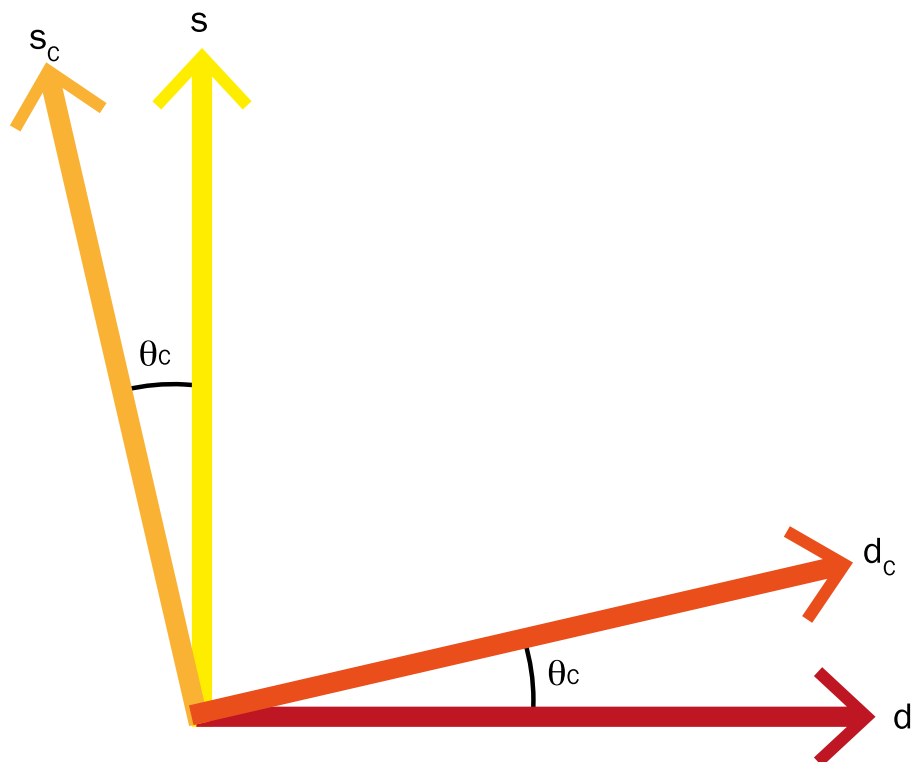


a.
Nicola Cabibbo con
Makoto Kobayashi
nel 2008.

Dieci anni fa, nell'agosto del 2010, scompariva Nicola Cabibbo, un grande protagonista della scienza del '900, il cui nome ricorre in tutti i manuali di fisica delle particelle. Cabibbo può essere considerato a buon diritto il "padre" della fisica del sapore, cioè di quel settore della fisica subnucleare che studia la dinamica dei diversi tipi (chiamati "sapori", in inglese *flavour*) di quark e leptoni. Per illustrare gli straordinari contributi di Nicola Cabibbo, bisogna fare un passo indietro. Uno dei processi fisici più importanti è il decadimento beta del

neutrone, in cui un neutrone si trasforma in un protone emettendo un elettrone e un antineutrino elettronico. Fu lo studio di questo decadimento, negli anni '30 del secolo scorso, che condusse Wolfgang Pauli a ipotizzare l'esistenza dei neutrini e Enrico Fermi a elaborare la prima teoria dell'interazione debole, responsabile del processo. Fermi mostrò che il decadimento beta può essere descritto in termini di una costante di accoppiamento (la "costante di Fermi"), che svolge lo stesso ruolo, nelle interazioni deboli, della carica elettrica, e permette di calcolare la

probabilità con cui la reazione avviene. Un fatto interessante, sperimentalmente accertato fin dagli anni '40 e '50, è che anche il muone subisce un decadimento beta, analogo a quello del neutrone, trasformandosi in un elettrone, un neutrino muonico e un antineutrino elettronico, con una costante di Fermi che è identica (o quasi) a quella del decadimento del neutrone. Nel 1958 Richard Feynman e Murray Gell-Mann interpretarono questo fatto postulando l'universalità dell'interazione debole, simile all'universalità dell'interazione



b.
Gli stati di quark che intervengono nelle interazioni deboli non sono i sapori puri down (d) e strange (s), ma due loro miscele (che possiamo chiamare d_c e s_c). Se rappresentiamo il down e lo strange con due frecce perpendicolari (rossa e gialla), gli stati d_c e s_c (che si accoppiano rispettivamente al quark up e al quark charm) sono rappresentati da due frecce ruotate di un angolo θ_c , il cosiddetto angolo di Cabibbo.

elettromagnetica, con un intrigante suggerimento di un'origine comune delle due interazioni. Questa affascinante idea era tuttavia messa in crisi dall'osservazione sperimentale che le costanti di Fermi di altri decadimenti beta, quelli delle particelle dotate di stranezza, come la lambda, risultavano largamente inferiori alla costante di Fermi del neutrone. Fu Cabibbo a risolvere il problema e a conciliare i decadimenti delle particelle strane con l'universalità dell'interazione debole, aprendo la strada alla unificazione delle interazioni elettrodeboli nell'ambito di quello che sarebbe poi stato denominato modello standard. In termini del modello a quark (inizialmente limitato ai soli quark up, down, strange), la teoria di Cabibbo prevedeva che l'interazione debole accoppiasse il quark up a una combinazione dei quark down e strange parametrizzata da un numero, noto come angolo di Cabibbo. Il concetto di mescolamento dei quark così introdotto fu poi esteso da Sheldon Glashow, John Iliopoulos e Luciano Maiani (GIM) alla teoria a quattro quark, in cui il charm, non ancora scoperto all'epoca in cui le teorie di Cabibbo e GIM furono formulate, si accoppia a un'altra combinazione down-strange, perpendicolare per così dire alla combinazione di Cabibbo. L'universalità delle interazioni della teoria di Cabibbo e l'introduzione del quark charm hanno permesso di estendere a tutte le particelle la teoria elettrodebole unificata, proposta pochi anni prima da Steven Weinberg e da Abdus Salam, evitando

le inconsistenze che avevano afflitto lo schema a tre quark fino ad allora. Per includere la violazione della simmetria CP, scoperta sperimentalmente nel 1964 ed essenziale alla spiegazione dell'asimmetria tra materia-antimateria del nostro universo, Makoto Kobayashi e Toshihide Maskawa estesero ulteriormente la teoria a uno schema a sei quark, dove il mescolamento di Cabibbo è descritto da una matrice (cioè da una tabella di parametri), universalmente nota come matrice CKM (Cabibbo-Kobayashi-Maskawa).

Anche nel settore dei leptoni i sapori si combinano e si mescolano. L'oscillazione dei neutrini, infatti, consiste in un mescolamento tra neutrini di sapore diverso, che dimostra come essi possiedano una massa. Il fenomeno, che costituisce un'estensione ai leptoni del meccanismo di Cabibbo, fu proposto indipendentemente negli anni '60 da Bruno Pontecorvo e da Ziro Maki, Masami Nakagawa e Shoichi Sakata. Cabibbo fu anche tra i primi a notare come fosse possibile una misura della violazione della simmetria di CP e della simmetria per inversione temporale attraverso misure delle oscillazioni di neutrino, un argomento oggi di grande attualità.

La fisica del sapore, iniziata dal pionieristico lavoro di Nicola Cabibbo, costituisce uno dei capitoli più vivaci ed eccitanti della fisica delle particelle, denso di sviluppi futuri, che perpetueranno il ricordo di questo grande fisico italiano.

[as] riflessi

La sfida Covid-19.

di Valter Bonvicini

presidente della Commissione Scientifica Nazionale 5 dell'Infn

Di fronte all'emergenza sanitaria globale legata alla pandemia da Sars-Cov-2, anche settori scientifici, che non includono le scienze della vita nella loro missione primaria, hanno saputo mobilitare le proprie risorse, mettendo a disposizione capacità, conoscenze e tecnologie, e facendosi promotori di iniziative di ricerca a supporto del contrasto alla pandemia. Da questo punto di vista, la risposta dell'Infn è stata estremamente significativa per varietà, quantità e qualità delle iniziative che le ricercatrici e i ricercatori dell'ente hanno saputo proporre e attuare.

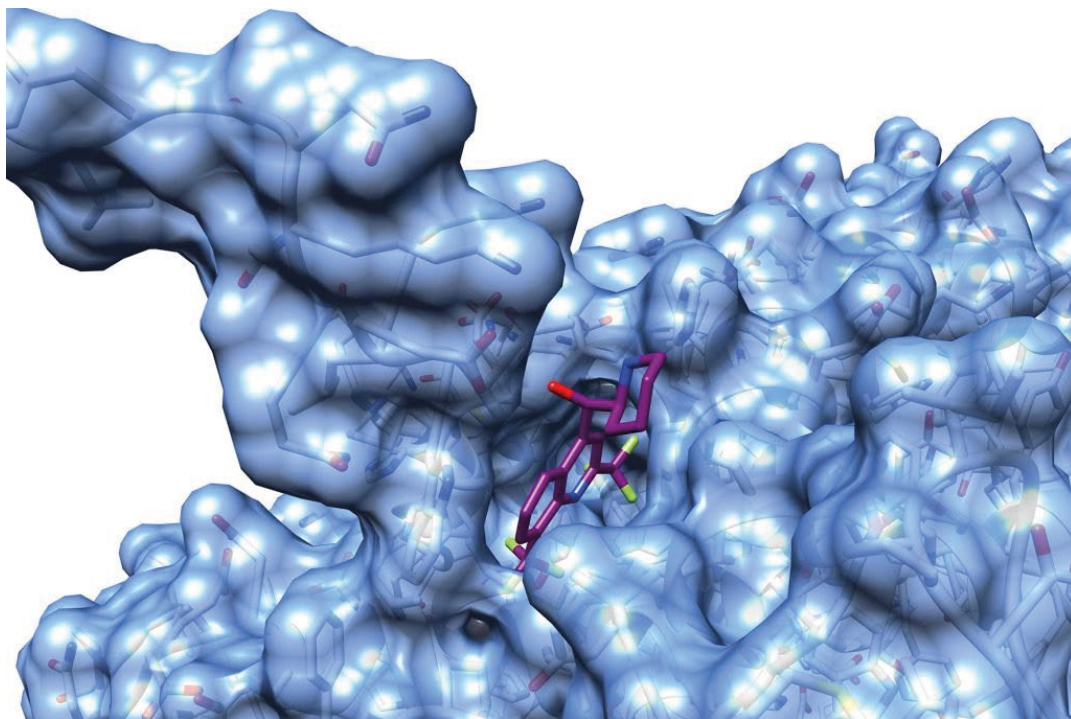
Alcuni dei progetti nati a supporto della lotta alla pandemia devono molto alle infrastrutture avanzate dell'Infn e alla grande esperienza nel calcolo, nella simulazione e nell'analisi dati, acquisita lavorando a esperimenti di fisica fondamentale, come quelli agli acceleratori di particelle o negli esperimenti di fisica astroparticellare.

Un esempio è offerto dal progetto dell'azienda Sibylla Biotech,

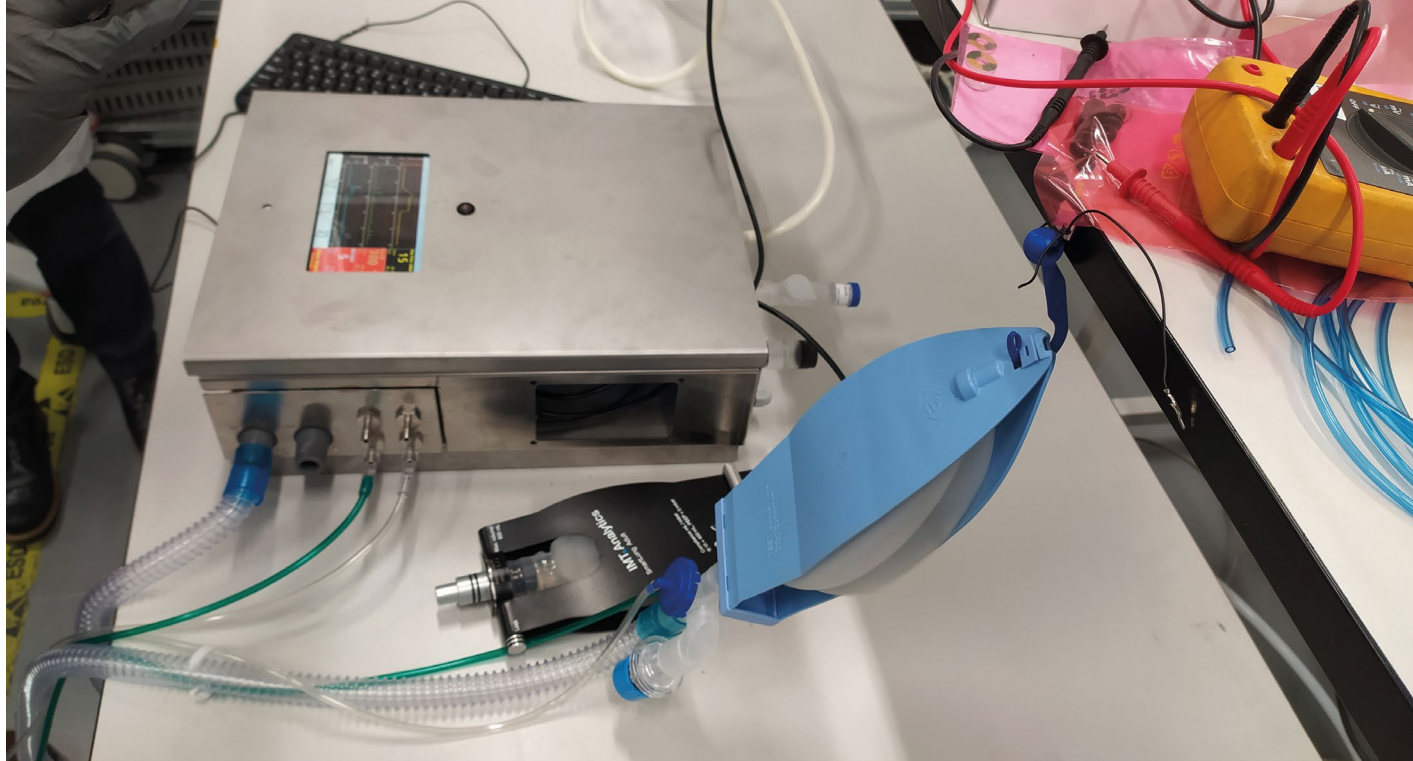
spin-off dell'Infn, sulla simulazione del ripiegamento proteico per identificare molecole che possano interferire con il processo di replicazione del virus Sars-Cov-2, e rallentare così la sua diffusione nel corpo umano. L'Infn ha fornito, attraverso il suo Centro Nazionale di Calcolo Cnaf, un'importante quota delle proprie risorse di calcolo, dislocata in otto *data centre* e pari a circa trentamila unità, per condurre queste simulazioni, i cui risultati sono ora a disposizione per gli studi farmacologici.

Un secondo progetto a cui l'Infn contribuisce con le sue risorse di calcolo è Exscalate4Cov che prevede, invece, la simulazione e la progettazione *in silico* di inibitori del Sars-Cov-2, individuandoli tra i farmaci già testati e altre molecole.

Le competenze dei ricercatori dell'istituto nel campo dell'analisi dati hanno portato, inoltre, allo sviluppo di Covidstat Infn, un sito realizzato dal gruppo di lavoro costituito per mettere a disposizione dell'unità di crisi Covid-19 interna all'ente un'analisi



a. Simulazione computazionale realizzata da Sibylla Biotech che illustra l'interazione tra una molecola della famiglia dell'idrossiclorochina e la proteina Ace2, un recettore del Sars-Cov-2.



statistica dei dati forniti quotidianamente dalla Protezione Civile sulla diffusione della pandemia in Italia. Il sito propone un'analisi strettamente statistica dei dati e mette a disposizione un quadro aggiornato della situazione, con tabelle sinottiche e mappe navigabili interattivamente. Analogamente, alcuni ricercatori dell'Infn effettuano analisi dei dati sulla diffusione del Covid-19 sul territorio nazionale e in altri paesi, utilizzando modelli statistici ed epidemiologici, al fine di studiare e prevedere l'andamento della pandemia. Tra le infrastrutture di calcolo messe a disposizione dall'Infn per le ricerche sul Covid-19, c'è anche la piattaforma aperta Cloud Infn. Altri progetti prevedono, invece, lo sviluppo di modelli per la diagnosi, la prognosi e la terapia. Un'ulteriore tipologia di contributi nasce dalle grandi competenze tecnologiche presenti nell'Infn e sfrutta le infrastrutture presenti nell'istituto. Per esempio, Anti-Covid-Lab è un laboratorio per la verifica delle qualità funzionali di tessuti destinati alla realizzazione di mascherine e altri Dpi (Dispositivi di Protezione Individuale), realizzato a Catania, in collaborazione tra i Laboratori Nazionali del Sud dell'Infn e l'Università di Catania. L'Infn è anche protagonista del progetto Mvm (Milano Ventilatore Meccanico), al quale partecipano oltre 150 ricercatori provenienti da Italia, Canada, Stati Uniti e vari paesi europei, che ha portato alla progettazione, allo sviluppo e, infine, alla costruzione di un innovativo ventilatore, sicuro, efficiente e di facile impiego, utilizzando componenti disponibili sul mercato. Il progetto Mvm ha ottenuto la certificazione di emergenza dalla Fda (Food and Drug Administration), l'ente

certificatore statunitense) e potrà quindi entrare nelle dotazioni degli ospedali dei Paesi che riconoscono la certificazione americana. Un altro progetto si propone invece di realizzare un sistema innovativo, basato su una sorgente radiogena, da utilizzare per la sterilizzazione di superfici. Altre importanti iniziative riguardano, invece, i settori della radiomica e della fisica ambientale, nei quali diversi gruppi che si occupano di fisica medica e interdisciplinare all'interno dell'Infn hanno grande esperienza. Per quanto riguarda la radiomica, il progetto Aim (*Artificial Intelligence in Medicine*) propone, grazie alla raccolta di immagini da tomografia computerizzata polmonare e dati clinici, lo sviluppo di modelli predittivi basati su *machine learning* e *deep learning* per il supporto alla diagnosi o alla previsione di prognosi per i soggetti affetti da Covid-19 (vd. asimmetrie n. 28 p. 18, ndr). In ambito ambientale, sono attivi più progetti che mirano alla caratterizzazione di batteri e virus presenti in atmosfera e allo studio delle possibili relazioni tra concentrazione di inquinanti atmosferici, parametri meteorologici e la componente biologica dell'aerosol atmosferico. Lo sviluppo da parte dell'Infn di tutte queste iniziative e molte altre evidenzia alcuni aspetti importanti: il ruolo e il grande impatto della ricerca di base, con la sua capacità di reazione, di conoscenza e di innovazione tecnologica, il valore delle applicazioni interdisciplinari, che l'Infn per precisa scelta strategica sostiene e valorizza, e l'importanza strategica per un paese di investire nel settore della ricerca.

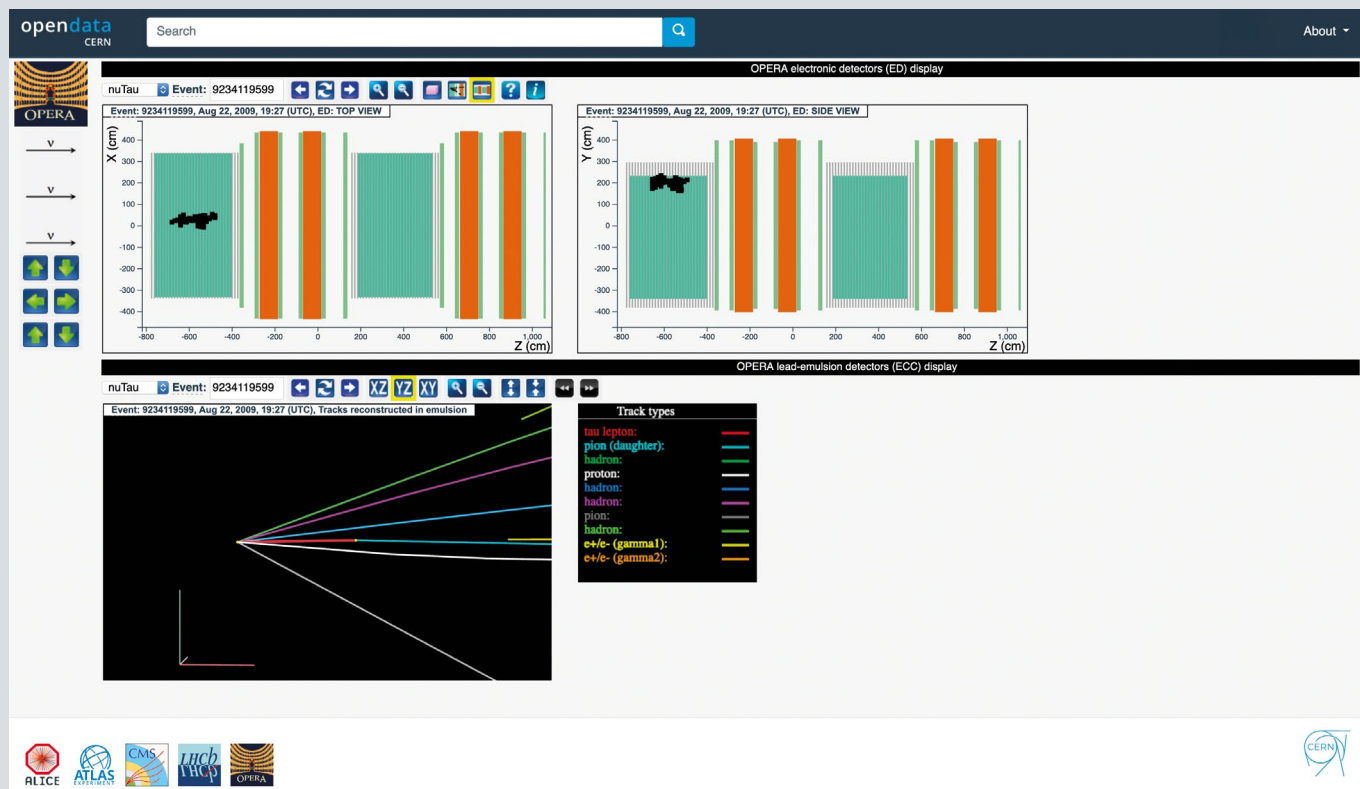
b.
Il Milano Ventilatore
Meccanico, Mvm.

[as] illuminazioni

Neutrini fai da te.

Come sono fatti i neutrini? Che cosa vedono davvero gli scienziati che li cercano e come li distinguono uno dall'altro? Se volete osservare anche voi dei neutrini, potete andare su <http://opendata.cern.ch/>, un portale del Cern dove alcuni esperimenti, tra cui Opera, pubblicano una parte dei loro dati affinché chiunque possa scaricarli e utilizzarli a scopo didattico o di ricerca. Tra i campioni di dati attualmente pubblicati troverete un ampio numero di interazioni di neutrini elettronici e di neutrini muonici, oltre alle dieci interazioni di neutrino tau derivanti dall'oscillazione di neutrini muonici. A ogni neutrino è associata una descrizione della sua tipologia di interazione e una spiegazione sulle informazioni che si troveranno scaricando i dati, che vengono forniti in diversi file di testo. Tramite un link si possono anche visualizzare le tracce nel display dell'intero apparato, dove

sono visibili i segnali dei rivelatori elettronici, che permettono di determinare dove ha interagito il neutrino. È possibile osservare, inoltre, il display della regione dove è avvenuta l'interazione, visualizzando l'interno del mattoncino, costituito da piombo e speciali lastre fotografiche. Non è possibile vedere direttamente i neutrini perché, essendo privi di carica elettrica, non lasciano alcuna traccia. Per distinguerli si guardano le particelle da essi create: il tau nel caso dei neutrini tauonici, che produce una o più particelle dopo aver percorso al massimo un paio di millimetri, o il muone nel caso dei neutrini muonici, in grado invece di attraversare decine di metri di piombo, o infine l'elettrone nel caso dei neutrini elettronici, che crea una "cascata" di particelle. [Giuliana Galati]





Istituto Nazionale di Fisica Nucleare

I laboratori dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare sono temporaneamente chiusi alle visite per l'emergenza sanitaria Covid-19.

Per contattare
i laboratori dell'Infn:

Laboratori Nazionali di Frascati (Lnf)

T + 39 06 94032423
/ 2552 / 2643 / 2942
comedu@lnf.infn.it
www.lnf.infn.it

Laboratori Nazionali del Gran Sasso (Lngs)

T + 39 0862 4371
(chiedere dell'ufficio prenotazione visite)
visits@lngs.infn.it
www.lngs.infn.it

Laboratori Nazionali di Legnaro (Lnl)

T + 39 049 8068342 356
stage@lnl.infn.it
www.lnl.infn.it

Laboratori Nazionali del Sud (Lns)

T + 39 095 542296
visiteguidate@lists.lns.infn.it
www.lns.infn.it

www.infn.it



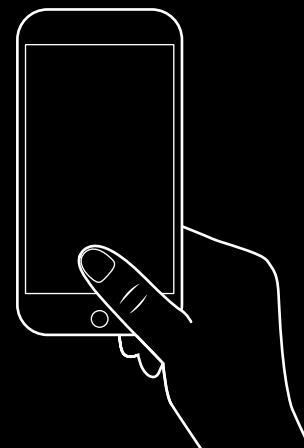
Sul sito **www.asimmetrie.it**
vengono pubblicate periodicamente
notizie di attualità scientifica.

Per **abbonarti gratuitamente** ad Asimmetrie
o per **modificare** il tuo abbonamento vai su:
<http://www.asimmetrie.it/index.php/abbonamento>

Si prega di tenere sempre aggiornato il proprio
indirizzo mail per ricevere le nostre comunicazioni.

Leggi anche le nostre **faq** su:
<http://www.asimmetrie.it/index.php/faq>

Asimmetrie è anche una app,
ricca di nuovi contenuti multimediali.





www.infn.it

rivista online
www.asimmetrie.it