

# Asimmetrie

Anno II numero 3 - dicembre 2006

Rivista dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare

## La lunga caccia al neutrino una sfida affascinante

Le interazioni deboli  
L'avventura di Cngs

Nemo. Dagli abissi del mare  
alla scoperta dei misteri dell'Universo

Cento anni  
dalla nascita di Ettore Majorana



# editoriale

di Roberto Petronzio  
presidente Infn



I neutrini sono i protagonisti di questo numero di «Asimmetrie». A settant'anni dall'intuizione di Pauli sulla loro esistenza, studiarli costituisce ancora una frontiera non esplorata della nostra comprensione del mondo delle particelle 'elementari', quelle, cioè, che non sono a loro volta costituite da altri componenti ancora più fondamentali.

L'anno che si conclude vede il completamento di cruciali fasi preparatorie di esperimenti ai laboratori del Gran Sasso (e non solo) che affrontano i problemi tuttora irrisolti relativamente a questa particella. Questi esperimenti utilizzano i neutrini cosmici o quelli generati nell'atmosfera, ma anche quelli 'artificiali' che, creati e lanciati dal laboratorio del Cern di Ginevra, hanno raggiunto i laboratori del Gran Sasso per la prima volta l'agosto scorso.

Il neutrino, cenerentola tra altre particelle elementari, più ricche di interazioni e più massicce, potrebbe aprire uno spiraglio su uno scenario inedito. Quello che si disegnerebbe innalzandoci con le nuove macchine a energie più elevate, simili a quelle che il nostro Universo ha contemplato nei primi istanti della sua vita.



# SOMMARIO



## La lunga caccia al neutrino: una sfida affascinante

di Gianuligi Fogli  
e Eligio Lisi

pagine 4-9

## Le interazioni deboli

di Nicola Cabibbo

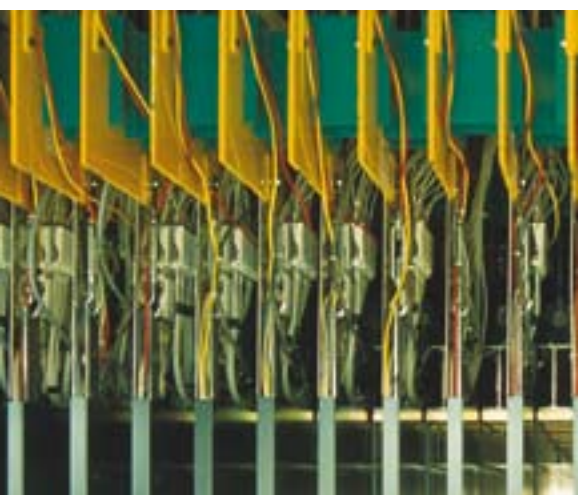
pagine 10-13



La foto

pagine 14-15

Boxerino. L'osservazione dei neutrini al Laboratorio del Gran Sasso



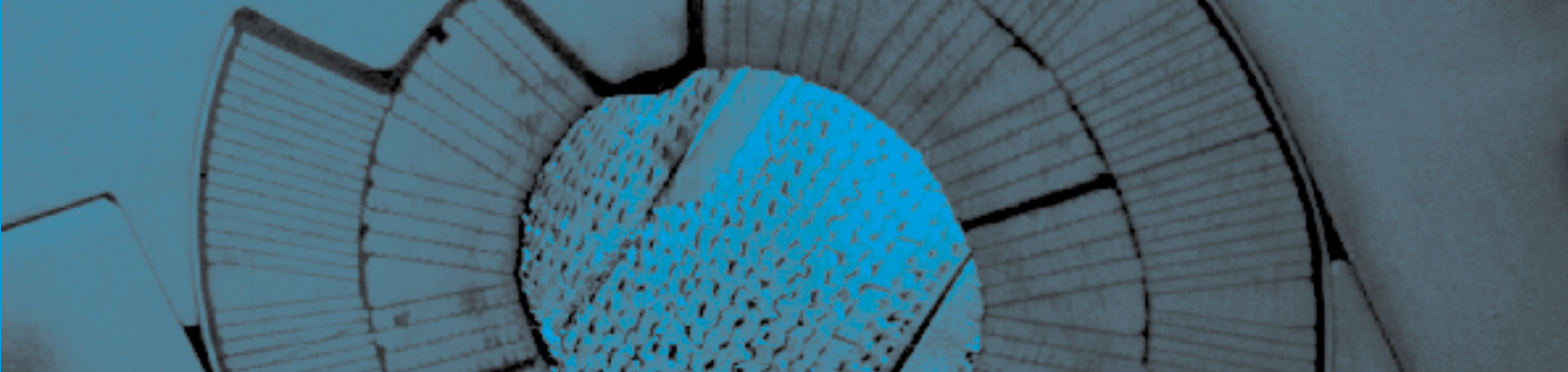
## L'avventura di Cngs.

Come è nato l'esperimento Neutrini  
dal Cern al Gran Sasso

Barbara Gallavotti intervista  
Luciano Maiani

pagine 16-21

In copertina, vista laterale di uno dei due bersagli dell'esperimento Opera: qui verranno rivelati i neutrini provenienti dal Cern di Ginevra



pagine 22-27

## Nemo. Dagli abissi del mare alla scoperta dei misteri dell'Universo

di Emilio Migneco



pagine 28-31

## Cento anni dalla nascita di Ettore Majorana

di Franco Bassani





# La lunga caccia al neutrino: una sfida affascinante

di Gianluigi Fogli  
e Eligio Lisi

**Questa  
è la storia  
di una appassionante  
avventura scientifica,  
nella quale  
si fondono  
vivide intuizioni  
teoriche  
con coraggiose  
e pazienti  
indagini sperimentali**

**U**na storia alla scoperta dei misteriosi meccanismi di un settore della fisica delle particelle elementari davvero sfuggente e affascinante: la fisica dei neutrini.

Qui, dove la natura manifesta a pieno la sua fantasia, l'uomo deve ricorrere a tutte le sue risorse intellettuali e tecnologiche per svelarne i segreti risvolti.

La caccia al neutrino ha una data d'inizio ben precisa. Il 4 dicembre 1930 Wolfgang Pauli, fisico tedesco tra i più noti e geniali della sua epoca, ha un'intuizione che si sarebbe rivelata ben presto decisiva per spiegare la radioattività di tipo beta di alcuni atomi. Le sostanze caratterizzate da radioattività di tipo beta, infatti, decadono emettendo elettroni con energia di volta in volta diversa. Per giustificare l'altrimenti inspiegabile variazione di energia dell'elettrone emesso dal nucleo dell'atomo radioattivo, Pauli ipotizza che in coppia con l'elettrone venga liberata una nuova particella molto leggera e priva di carica, quindi difficilmente rivelabile, alla quale dà il nome di *neutrone*. L'energia liberata nel decadimento si dividerebbe così fra le due particelle in modo casuale, spiegando perché l'elettrone sia emesso ogni volta con un'energia differente. Pauli sceglie un modo assai singolare per rendere nota la sua ipotesi alla comunità scientifica. Il 4 dicembre 1930 scrive una lettera ai colleghi, chiamandoli «Cari Signore e Signori Radioattivi...», e in essa si scusa di non poter partecipare al congresso di fisica a

Tubinga, poiché «... la mia presenza è indispensabile qui per un ballo che avrà luogo nella notte dal 6 al 7 dicembre». Nella lettera, scritta con piacevole autoironia, descrive la sua ipotesi sulla radioattività beta come «... un disperato rimedio per salvare il principio di conservazione dell'energia...», apparso fortemente compromesso dal comportamento anomalo degli elettroni.

Due anni dopo, nel 1932, James Chadwick scopre la particella nucleare che dà luogo alla radioattività beta e la chiama *neutrone*. Sarà Enrico Fermi, l'anno successivo, a ribattezzare *neutrino* la particella ipotizzata da Pauli, formulando per la prima volta una teoria coerente del neutrino e delle altre particelle allora note (elettrone, protone e neutrone). Nasce la Teoria delle Interazioni Deboli, in cui il neutrino gioca un ruolo cruciale (si veda l'articolo *Interazioni Deboli* di Nicola Cabibbo, su questo numero di «Asimmetrie», [n.d.r.]).

Quanto l'intuizione di Pauli precorra i tempi si comprende se si tiene conto che solo nel 1956 Frederick Reines e Clyde L. Cowan riescono a rivelare sperimentalmente l'esistenza del neutrino, grazie a una ricerca condotta sulle particelle prodotte nei reattori nucleari. In realtà, non furono i neutrini i veri protagonisti dell'esperimento di Reines e Cowan, ma gli *antineutrini*, le corrispondenti particelle nel mondo dell'antimateria. In ogni caso, l'osservazione sperimentale degli antineutrini fornisce la prova inconfutabile dell'esistenza del neutrino stesso.

Questo importante risultato sperimentale suggerisce al fisico italiano Bruno Pontecorvo, fra il 1957 e il 1958, l'ipotesi che neutrini e antineutrini possano oscillare, cioè trasformarsi in continuazione gli uni negli altri. L'ipotesi dell'oscillazione dei neutrini, come vedremo, verrà in seguito riproposta sotto un'altra forma.

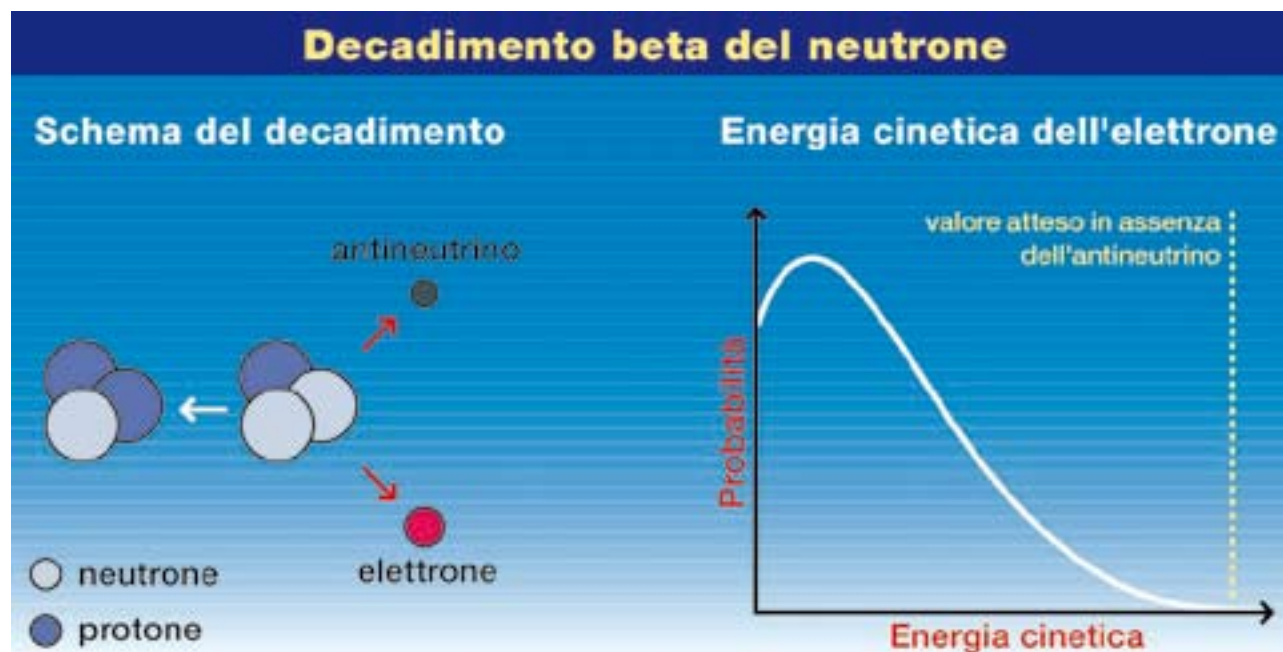
Negli anni successivi è ancora Pontecorvo a intuire che ad accompagnare il *muone* (una particella scoperta nei raggi cosmici, simile all'elettrone, ma instabile e di massa 200 volte maggiore) vi è un nuovo neutrino, detto *muonico*, diverso dal neutrino della radioattività beta (che accompagnando l'elettrone viene detto neutrino *elettronico*). La verifica sperimentale, avvenuta nel 1962, si deve a Jack Steinberger, Leon Lederman e Melvin Schwartz. Tutte queste particelle – i due doppietti formati dall'elettrone più il suo neutrino, elettronico, e dal muone più il suo neutrino, muonico – sono denominate *leptoni*.

La natura, però, ha in serbo un terzo doppietto di leptoni. Nella metà degli anni '70, infatti, Martin Perl e i suoi collaboratori scoprono il leptone *tau*, di massa circa 3500 volte quella dell'elettrone. L'osservazione di questo nuovo leptone suggerisce in modo naturale l'esistenza di un terzo neutrino, il neutrino *tauonico*, che dovrebbe prodursi in coppia

con la particella tau. Sebbene quest'ultimo neutrino sia osservato sperimentalmente solo 25 anni più tardi, esso completa il quadro dei leptoni: elettrone, muone e tau, ciascuno con il suo differente neutrino, elettronico, muonico e tauonico. I tre doppietti identificano così le tre generazioni dei leptoni, in modo simile a quanto avviene per i *quark*, anch'essi distribuiti su tre generazioni, in una simmetria quark-leptoni dalle importanti implicazioni teoriche.

In realtà, la storia è più complessa e richiede di fare un passo indietro. Siamo nel 1968, e dopo diversi anni di preparazione, ad Homestake, una ex-miniera d'oro situata nel Sud Dakota, Raymond Davis jr. e i suoi collaboratori iniziano un esperimento destinato ad aprire interrogativi del tutto nuovi nella fisica del neutrino. Ci si propone per la prima volta di misurare il flusso dei neutrini provenienti dal Sole e di confrontarlo con le attese teoriche. All'epoca, infatti, la conoscenza del Sole e delle reazioni che avvengono al suo interno è già sufficientemente accurata da consentire un significativo confronto con i dati sperimentali. Le reazioni di fusione nucleare all'interno del Sole producono una grande quantità di energia, che arriva a noi prevalentemente sotto forma di fotoni, cioè radiazione elettromagnetica. Secondo i calcoli teorici, però, il 2-3% dell'energia che proviene dal Sole dovrebbe giungere sotto forma di neutrini: è per l'appunto quello che si vuole verificare.

L'esperimento di Davis si basa su un metodo indiretto di rivelazione del neutrino, di tipo radiochimico, proposto da Pontecorvo e messo a punto dal medesimo Davis e da John Bahcall, esperto di fisica del Sole. Attraversando un grande serbatoio contenente un fluido a base di cloro, i neutrini solari interagiscono con gli atomi di cloro, dando luogo alla produzione di argon radioattivo. Il conteggio degli atomi di argon prodotti permette di valutare il numero di neutrini che hanno interagito, e da lì risalire al flusso dei neutrini solari. L'esperimento è di grande difficoltà: solo una piccolissima percentuale di neutrini interagisce e il metodo è in grado di rivelare solo la parte più energetica, non essendo sensibile ai neutrini *pp* (così chiamati perché generati in reazioni di tipo protone-protone), di più bassa energia. Ciononostante, l'esperimento sin dall'inizio rivela un chiaro deficit dei neutrini solari: si trova solo un terzo dei neutrini attesi e questo risultato viene confermato per tutta la durata dell'esperimento, terminato nel 1994. Nasce così il «problema dei neutrini solari», che continuerà a turbare i sonni dei fisici per più di trent'anni e che, come vedremo, solo recentemente ha trovato una soluzione.



NEI NUCLEI DEGLI ELEMENTI CARATTERIZZATI DA RADIOATTIVITÀ BETA, un neutrone del nucleo si trasforma in protone, con emissione di un elettrone e un antineutrino, formando in tal modo un nucleo più leggero. L'energia rilasciata nel decadimento, pari alla differenza di massa fra il nucleo iniziale e quello finale, si trasforma nella massa dell'elettrone e in energia cinetica dei prodotti di decadimento.

Se non ci fosse l'antineutrino, tutta l'energia cinetica si trasferirebbe all'elettrone, essendo trascurabile il rinculo del nucleo per via della sua grande massa. In questo caso, l'energia cinetica dell'elettrone sarebbe ben definita e calcolabile per ogni nucleo radioattivo. La presenza dell'antineutrino, invece, comporta che tale energia si ripartisca tra elettrone e antineutrino, in modo casuale.

L'energia cinetica dell'elettrone può quindi variare in modo continuo secondo la curva di probabilità riportata a destra, e assumere qualsiasi valore fino a un valore limite, rappresentato nella figura dalla linea verticale, corrispondente al caso di assenza dell'antineutrino.

Il deficit dei neutrini solari misurato da Davis e l'esistenza di più neutrini inducono Pontecorvo e Gribov a riproporre, nel 1969, l'ipotesi di oscillazione fatta da Pontecorvo nel 1958. Già nel 1962 Maki, Nagakawa e Sakata avevano proposto la possibilità di transizioni fra i leptoni delle diverse generazioni. Pontecorvo e Gribov suggeriscono pertanto che l'oscillazione avvenga tra i diversi tipi di neutrini, il che è possibile solo se i neutrini hanno massa e, più precisamente, masse diverse per neutrini di tipo diverso. L'ipotesi è di grande impatto nella comunità scientifica, poiché in questi anni l'idea dominante, supportata dall'osservazione sperimentale, è che i neutrini siano particelle prive di massa, come i fotoni.

Per anni l'esperimento di Davis rimane l'unico esperimento che misura il flusso dei neutrini solari. Solo nel 1987 arrivano i primi dati di un nuovo esperimento, Kamiokande. In Giappone, nella miniera di Kamioka, è stato infatti installato un grande rivelatore ad acqua che consente l'osservazione del leptone prodotto dall'interazione del neutrino con l'acqua stessa. L'esperimento è in

grado di rivelare non solo i neutrini solari ma, più in generale, neutrini provenienti da qualsiasi direzione e dovuti all'interazione dei raggi cosmici con l'atmosfera terrestre, cioè i cosiddetti neutrini atmosferici. Kamiokande prosegue con SuperKamiokande, un esperimento basato sulla stessa tecnologia, ma con un serbatoio enormemente più grande.

Kamiokande e SuperKamiokande confermano il risultato di Davis, ma i neutrini solari che essi vedono sono ancora neutrini di energia relativamente alta. Anche in questo caso sfuggono alla rivelazione i neutrini pp. Nel 1999 inizia la presa dati un altro esperimento, Gallex, installato in Italia nel Laboratorio del Gran Sasso dell'Infn e basato ancora sulla rivelazione radiochimica, questa volta usando il gallio. L'esperimento è in grado di 'vedere' anche i neutrini di più bassa energia e quindi verificare sperimentalmente il ciclo fondamentale delle reazioni nucleari nel Sole. Gallex misura tutto lo spettro dei neutrini solari e conferma il deficit dei neutrini solari osservato da Davis. Un risultato di grande importanza.

La comunità scientifica cerca intanto di



**SUPERKAMIOKANDE III È PRONTO!** Nelle precedenti versioni questo gigantesco rivelatore, costruito in Giappone nella miniera Kamioka, ha permesso di rivelare i neutrini provenienti dal Sole e dall'atmosfera consentendo di ottenere, nel 1998, la prima evidenza sperimentale dell'oscillazione dei neutrini atmosferici. Nella versione III, Superkamiokande sarà il rivelatore del progetto T2K (Tokai To Kamioka neutrino oscillation experiment), che prevede di studiare le oscillazioni dei neutrini prodotti artificialmente con un potente acceleratore attualmente in costruzione. Superkamiokande è stato ripristinato nella sua forma originaria nel giugno di quest'anno. Nel novembre 2001, infatti, diverse migliaia degli 11200 rivelatori collocati al suo interno sono implosi con un impressionante effetto domino. Il funzionamento di Superkamiokande si basa su un effetto fisico noto come *effetto Cherenkov*, possibile grazie alle 50000 tonnellate di acqua purissima contenute al suo interno. L'interazione di un neutrino con gli elettroni o i nuclei degli atomi di acqua genera una particella che si muove *nell'acqua* più velocemente di quanto faccia la luce (il valore che non può essere superato, per la teoria della relatività, è la velocità della luce *nel vuoto*). Analogamente al 'bang' provocato nell'aria dagli aerei supersonici, il moto 'superluminale' della particella produce un lampo di luce, chiamato *luce Cherenkov*, il cui studio permette di risalire al tipo di particella prodotta e alla sua direzione di provenienza. In particolare, è possibile distinguere se l'interazione è dovuta a neutrini elettronici o a neutrini muonici. (G. F.)

riprodurre in laboratorio l'effetto di oscillazione che il deficit dei neutrini solari fa intuire. I primi tentativi, gli esperimenti Chorus e Nomad, vengono condotti agli inizi degli anni '90 nel laboratorio del Cern di Ginevra, usando neutrini muonici prodotti artificialmente in un acceleratore. La distanza fra la sorgente del fascio e il rivelatore, cruciale per rivelare l'oscillazione, è però troppo breve (come si comprenderà in seguito) per dare risultati positivi. Un esperimento analogo viene condotto utilizzando neutrini prodotti in un reattore nucleare: si tratta di antineutrini elettronici di energia molto bassa. L'esperimento, denominato

Chooz, dalla località nelle Ardenne ove è situato, dà anch'esso indicazioni negative, così come un successivo esperimento condotto negli Usa, a Palo Verde. Tutti questi esperimenti compiuti con neutrini 'artificiali', cioè neutrini prodotti in laboratorio, sebbene non abbiano permesso di osservare le oscillazioni, sono importanti perché contribuiscono a definirne meglio le caratteristiche. La caccia procede, dunque, e l'habitat della preda si va via via definendo.

Nel frattempo, però, in modo piuttosto inatteso, le oscillazioni vengono effettivamente osservate nei neutrini atmosferici. Come già accennato, Kamiokande e SuperKamiokande



sono in grado di 'vedere' i neutrini atmosferici e la loro direzione di provenienza. In particolare anche i neutrini provenienti dal basso, cioè i neutrini che, prodotti nell'emisfero opposto a quello dove è situato il rivelatore, hanno attraversato la Terra prima di essere rivelati. In particolare, SuperKamiokande misura il rapporto tra le due specie di neutrini e la sua dipendenza dalla direzione di provenienza. I dati mostrano che il rapporto fra neutrini muonici e neutrini elettronici è inferiore del 30% rispetto a quanto atteso: è quella che viene indicata come 'anomalia dei neutrini atmosferici'. Un'analogia sperimentale si svolge in Italia al Gran Sasso con l'esperimento Macro.

Nel 1998, durante la conferenza tenutasi a Takayama, in Giappone, la collaborazione SuperKamiokande, guidata da Masatoshi Koshiba, mostra in modo inconfutabile che l'anomalia dei neutrini atmosferici va interpretata come una scomparsa dei neutrini di tipo muonico, tanto più marcata quanto più lungo è il percorso che i neutrini hanno compiuto attraversando la Terra. L'unica convincente interpretazione è quindi che l'oscillazione dei neutrini muonici avvenga durante il tragitto, su distanze dell'ordine del diametro terrestre. Non solo, ma rimanendo i neutrini elettronici di fatto immutati rispetto all'attesa, l'oscillazione viene interpretata come una transizione dei neutrini muonici in neutrini tauonici, i neutrini della terza generazione. Questo risultato viene confermato anche dall'esperimento Macro.

Va notato che la transizione dei neutrini muonici in neutrini tauonici, osservata da SuperKamiokande, è una convincente interpretazione del deficit dei neutrini muonici; la transizione, però, non può essere rivelata effettivamente. Alla diretta osservazione della transizione, possibile solo grazie all'apparizione del neutrino *tau*, è destinato l'esperimento Opera, allestito ai Laboratori Nazionali del Gran Sasso. Opera inizierà quest'anno la presa dati sul fascio Cngs di neutrini muonici provenienti dal Cern. Di questo importante avvenimento scientifico, inaugurato presso i Laboratori Nazionali del Gran Sasso lo scorso 11 settembre, si parla in questo stesso numero di «Asimmetrie», (si veda l'articolo *L'avventura di Cngs*, Intervista a Luciano Maiani, pp. 16-21 [n.d.r.]).

Con la scoperta dell'oscillazione dei neutrini atmosferici, la caccia al neutrino si intensifica e il cerchio si va ormai chiudendo anche intorno ai neutrini solari. A Sudbury, in Canada, inizia la presa dati Sno (Sudbury Neutrino Observatory), un esperimento di misura diretta dei neutrini solari, più sofisticato dei precedenti. Anziché acqua normale, infatti, Sno utilizza acqua pesante, contenente

deuterio in luogo dell'idrogeno. L'acqua pesante consente di vedere simultaneamente diverse reazioni prodotte dai neutrini solari, il cui confronto dà un'indicazione più chiara di quali neutrini arrivino nel rivelatore.

L'esperimento, combinato con i risultati di SuperKamiokande, già nella sua prima fase consente di concludere che nel rivelatore arrivano dal Sole non soltanto i neutrini elettronici, ma anche altri neutrini non identificabili, che complessivamente annullano il deficit: i neutrini arrivano tutti, ma non tutti sotto forma di neutrini elettronici. Non solo: è anche possibile calcolare il loro flusso e il conteggio risulta in accordo straordinario con quello indicato dal cosiddetto Modello Solare Standard, perfezionato sin dai primi studi sul Sole da John Bahcall e dai suoi collaboratori. Il risultato è una conferma definitiva dell'intuizione di Pontecorvo e, al tempo stesso, del Modello Solare.

Corre l'anno 2002, considerato giustamente 'Annus mirabilis' della fisica del neutrino. L'esperimento Sno introduce sale nel serbatoio di acqua pesante e consente la rivelazione di ogni tipo di interazione indotta dai neutrini provenienti dal Sole. Contemporaneamente arrivano i dati di un nuovo esperimento, KamLand, progettato per rivelare gli effetti di oscillazione dei neutrini emessi dai reattori giapponesi e coreani, su distanze medie dell'ordine di qualche centinaio di chilometri. KamLand adotta la combinazione giusta di energia e di distanza, che permette di rivelare lo stesso effetto di oscillazione che emerge dal complesso degli esperimenti sui neutrini solari, in particolare dai dati di Sno. Lo straordinario accordo fra i dati dei due esperimenti è decisivo: il problema dei neutrini solari, dopo tanti anni di sforzi, è risolto.

Lasciamo calcolare al lettore quanti anni sono passati dalla proposta di Pauli, dalla scoperta del primo neutrino, dall'intuizione di Pontecorvo, dall'esperimento di Davis: una lunga caccia, condotta senza tregua, con molta pazienza. Alcune intuizioni hanno svelato un mondo nuovo. Ognuno degli esperimenti citati ha richiesto innumerevoli accorgimenti di tipo sperimentale e rappresenta un capolavoro di tecnologia e di ingegn timeria.

Ormai sappiamo che i neutrini hanno massa e sappiamo anche che oscillano. Tuttavia, siamo ancora assai lontani dall'aver compreso a fondo il mondo del neutrino. Molti aspetti ci sono tuttora oscuri: non conosciamo le masse assolute, ma solo le differenze di massa, e non sappiamo se i due neutrini più 'vicini' in termini di massa siano più leggeri o più pesanti del terzo. Ma c'è di più: è possibile che al neutrino siano connesse proprietà ancora sconosciute legate all'evoluzione dell'Universo.



**OSCILLAZIONE DEI NEUTRINI  $\nu_\mu$  e  $\nu_\tau$**  (muonico e tauonico), osservati sperimentalmente in associazione, rispettivamente, ai leptoni  $\mu^-$  e  $\tau^-$ .

Il fenomeno dell'oscillazione si spiega supponendo che i due neutrini non abbiano di per sé massa definita, bensì siano miscele di stati, con massa definita e diversa, che indicheremo ad esempio con  $\nu_1$  e  $\nu_2$ . Questa ipotesi è perfettamente compatibile con la Meccanica Quantistica, la quale ammette l'esistenza di miscele di stati di massa diversa, esistenza confermata sperimentalmente. D'altra parte, neutrini di massa diversa hanno una diversa evoluzione nel tempo. Dopo aver percorso un certo tratto della sua traiettoria, quindi, un neutrino inizialmente di tipo  $\nu_\mu$  non è più un puro stato  $\nu_\mu$ : le componenti  $\nu_1$  e  $\nu_2$  che lo costituivano, infatti, si sono modificate in modo differente e il neutrino iniziale assume una componente via via crescente di  $\nu_\tau$ , cioè comincia a oscillare. Dopo un certo intervallo di tempo o, equivalentemente, dopo aver compiuto un certo percorso, il neutrino  $\nu_\mu$  si converte interamente in  $\nu_\tau$ . Da questo momento l'oscillazione continua con le stesse modalità: diminuisce la componente di  $\nu_\tau$  e il neutrino si trasforma nuovamente in  $\nu_\mu$ . L'oscillazione procede come illustrato in figura, dove la 'tipologia' del neutrino, tecnicamente indicata con il termine sapore, è rappresentata dal colore: marrone per il  $\nu_\mu$  e giallo per il  $\nu_\tau$ . Il periodo di oscillazione, cioè il tempo necessario perché sia compiuta un'oscillazione completa, dipende dalla differenza di massa dei due neutrini  $\nu_1$  e  $\nu_2$  e dall'energia.

Supponiamo ora che il neutrino iniziale  $\nu_\mu$ , dopo aver percorso una parte della sua traiettoria, interagisca con la materia. Nell'interazione il neutrino può rimanere tale (ma in tal caso non possiamo riconoscerlo), oppure può convertirsi nel suo leptone. Perché questo accada, però, il neutrino non può più rimanere una miscela di stati, deve assumere un'identità precisa, o  $\nu_\mu$  o  $\nu_\tau$ . Tuttavia, non possiamo sapere come riapparirà (cioè a quale leptone darà origine): possiamo solo valutare la probabilità che dia luogo a un  $\mu^-$  oppure a un  $\tau^-$  in base alla frazione di  $\nu_\mu$  e  $\nu_\tau$  che in quel momento lo caratterizza. Può quindi accadere che un neutrino inizialmente  $\nu_\mu$  dia luogo ad un leptone  $\tau^-$ , invece che a un  $\mu^-$ . La rivelazione di questa apparizione, mai osservata sperimentalmente, è il principale obiettivo dell'esperimento Opera, attualmente in corso ai Laboratori Nazionali del Gran Sasso. (Si veda *L'avventura di Cngs*, su questo numero di «Asimmetrie», [n.d.r.]). (G. F.)

Potrebbero avere a che fare con la cosiddetta bariogenesi, il processo che, nell'evoluzione dell'Universo, ha fatto prevalere la materia sull'antimateria. E potrebbero avere un ruolo essenziale anche nell'identificazione della materia oscura, materia diversa da quella che conosciamo, di cui è certa l'esistenza ma non la natura, e che sembra costituire la gran parte dell'Universo.

La caccia continua, quindi. E si fa più difficile. Gli esperimenti richiesti per fare luce completa sulle proprietà dei neutrini, già in preparazione, sono almeno 10 volte più complessi di quelli appena terminati. Si apre dun-

que una nuova fase di questa ricerca: la caccia sarà più sistematica e determinata e richiederà armi sperimentali raffinate, ma anche brillanti intuizioni di natura teorica. E ancora tanta pazienza, in attesa che un esperimento minuziosamente e amorevolmente preparato per anni, con il coinvolgimento di centinaia di fisici e tecnologi, ci dia quell'indicazione che viene chiamata 'scoperta'.

Gianluigi Fogli  
fogli@ba.infn.it  
Eligio Lisi  
eligio.lisi@ba.infn.it

# Le interazioni deboli

di Nicola Cabibbo



Nicola Cabibbo

Ogni tipo di interazione ha un ruolo preciso nell'economia dell'Universo, ma le interazioni deboli sono molto diverse dalle altre. Infatti, mentre gli altri tipi di interazioni, cioè le gravitazionali, le elettromagnetiche e le forti, si manifestano soprattutto come forze di attrazione e repulsione tra le particelle, la specialità delle interazioni deboli è quella di trasformare una particella in un'altra.

Nel dicembre del 1933 apparve su *La Ricerca Scientifica*, la rivista del Consiglio Nazionale delle Ricerche, un articolo di Enrico Fermi dal titolo *Tentativo di una teoria dell'emissione dei raggi beta*. Questo articolo segnava la nascita di un nuovo tipo di interazione tra le particelle: l'interazione debole, appunto, che si affiancava a quelle note da tempo, cioè la gravità, l'elettromagnetismo e le interazioni forti (alla base, queste ultime, della stabilità del nucleo atomico).

Nella radioattività beta studiata da Fermi, un neutrone all'interno del nucleo atomico si trasforma in un protone, con l'emissione di una coppia di particelle più leggere, un elettrone e un neutrino (per precisione, un anti-neutrino di tipo elettronico).

A partire dall'intuizione di Fermi, l'importanza delle interazioni deboli è andata continuamente crescendo e il loro ruolo si è rivelato ben più vasto di quanto si potesse inizialmente sospettare. Negli anni Quaranta, con un esperimento che passò alla storia, Marcello Conversi, Ettore Pancini e Oreste Piccioni dimostrarono che la particella *mu*, scoperta

nella radiazione cosmica, era simile all'elettrone, anche se duecento volte più pesante. Il *mu* si disintegra in un elettrone e due neutrini. Sorte analoga tocca a tutte le particelle via via scoperte nel corso dell'ultimo mezzo secolo, le quali in tempi più o meno brevi si trasformano in altre più leggere, sin che, alla fine, restano solamente particelle stabili come elettroni, neutrini, protoni, ma anche neutroni, che non sono stabili come particelle singole, ma assieme ai protoni formano i nuclei atomici. È quindi come se le interazioni deboli fossero lo 'spazzino cosmico' che depura l'Universo da tutte le particelle inutili alla sua attuale struttura, ma che furono prodotte in abbondanza al momento del Big Bang.

D'altra parte, però, se vogliamo dare loro una maggior dignità, potremmo anche vedere le interazioni deboli nel ruolo di 'fuochista' dell'energia solare. Il Sole, infatti, produce la sua energia trasformando nuclei di idrogeno, cioè protoni, in nuclei di elio, che contengono ciascuno due protoni e due neutroni: per questo processo sono essenziali le interazioni deboli, che trasformano due protoni in altrettanti neutroni.

Nel costruire le interazioni deboli a immagine delle interazioni elettromagnetiche, Fermi ebbe una intuizione che si rivelò profetica: nel 1957, infatti, Richard Feynman e Murray Gell-Mann, con la loro teoria V-A, mostrarono che le interazioni deboli sono caratterizzate dalla presenza di cariche e correnti, in piena analogia con le cariche e le correnti elettriche che agiscono nell'elettromagnetismo.

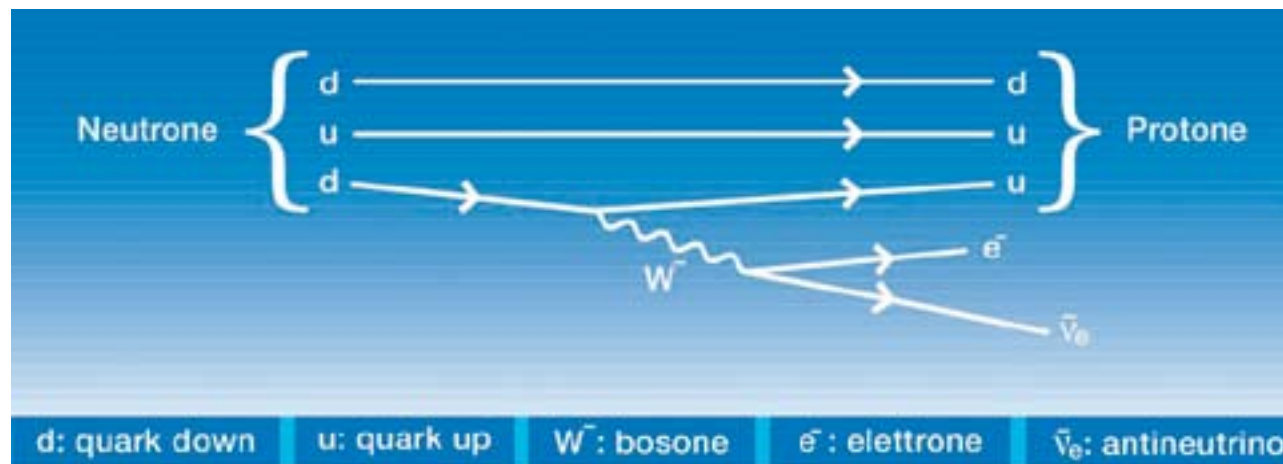
Il quadro si completò negli anni Settanta con la teoria unificata: le interazioni deboli e quelle elettromagnetiche sono in realtà due aspetti di una sola interazione, detta *interazione elettro-debole*. Le interazioni tra cariche e correnti deboli sono mediate da campi detti *W* e *Z*, e la loro 'debolezza' deriva dal fatto che, mentre i quanti del campo elettromagnetico, cioè i fotoni, sono privi di massa, i quanti dei campi *W* e *Z* sono particelle molto pesanti. Attualmente, la ricerca sulle interazioni deboli si concentra su due fenomeni emersi negli anni Sessanta: il mescolamento dei quark, scoperto da Nicola Cabibbo nel 1963, e le cosiddette oscillazioni dei neutrini, che si verificano quando i neutrini, di cui esistono il tipo elettrone, il tipo *mu* e il tipo *tau*, si trasformano, passando da un tipo a un altro. L'oscillazione del neutrino, che fu proposta da Bruno Pontecorvo, è stata recentemente osservata sia nei neutrini prodotti dal Sole che in quelli prodotti nell'atmosfera dalla radiazione cosmica. Questi fenomeni rivelano la stretta parentela che esiste tra i diversi tipi di quark e di neutrini, e rappresentano importanti indizi per i futuri sviluppi della fisica delle particelle elementari. Il mescolamento dei quark è responsabile della asimmetria tra materia e antimateria, ossia della cosiddetta violazione di *CP*, osservata nella disintegrazione dei mesoni *K* e *B*. Una asimmetria tra materia e antimateria è anche attesa nelle oscillazioni di neutrino, e la sua rivelazione rappresenta una delle massime sfide per la ricerca sperimentale dei prossimi decenni (cfr. box *La Simmetria CP* [n.d.r]).

## LA SIMMETRIA CP

**LA SIMMETRIA CP** consiste nel cambiare il segno sia della carica (*C*) che della parità (*P*) di una particella. Se questa simmetria fosse esatta e si trasformasse una particella nella sua rispettiva antiparticella, invertendo la sua carica e guardandola allo specchio, non vi sarebbe alcuna differenza tra di esse, garantendo una esatta simmetria tra materia e antimateria. La violazione di *CP* è essenziale per comprendere la struttura dell'Universo. Gli studi teorici suggeriscono infatti che al momento del Big Bang, assieme alla materia, debba essersi creata una uguale quantità di antimateria, identica alla prima ma con carica opposta. Poiché materia e antimateria, quando entrano in contatto tra di loro, si annichiliscono, se la simmetria tra materia e antimateria fosse una legge valida da sempre e ovunque, l'Universo non sarebbe potuto esistere. Invece, quando al momento del Big Bang, materia e antimateria, quasi immediatamente, cominciarono a scontrarsi, annichilandosi e generando pura energia, esse non si esaurirono completamente: da questo processo, infatti, 'avanzò' misteriosamente un po' di materia, una quantità piccolissima ma sufficiente a costituire le stelle, i pianeti, noi stessi e tutto ciò che si trova nel Cosmo. L'intero Universo, dunque, si deve essere generato per una primordiale asimmetria tra materia e antimateria, a favore della prima. Ma come si produsse questo fenomeno, tecnicamente chiamato violazione della simmetria di *CP*? Questa domanda rappresenta uno dei temi di ricerca più affascinanti nei quali è impegnata la moderna fisica delle alte energie.



# il mescolamento dei quark



Tra questi due fenomeni esiste una stretta analogia, ma per una loro discussione occorre far riferimento al comportamento quantistico delle particelle. Nel mescolamento dei quark, un quark di tipo  $u$  con carica elettrica pari a  $2/3$  (in unità della carica del protone) si può trasformare in uno dei tre quark con carica  $-1/3$ , ma dal punto di vista della meccanica quantistica è come se il quark  $u$  si trasformasse in una particella che è una miscela dei tre quark di carica  $-1/3$ . Lo stesso accade per gli altri due quark di carica  $2/3$ . Il mescolamento dei quark è descritto da un insieme di nove numeri che compongono la cosiddetta matrice  $CKM$ , ormai nota con grande precisione, in ottimo accordo tra teoria ed esperienza. È ancora incompleta, invece, la conoscenza della analoga matrice che definisce le oscillazioni di neutrino (cfr. grafico *Il mescolamento dei quark*, [n.d.r.]).













La ricerca sulle interazioni deboli ha coinvolto alcuni fra i più grandi anelli di collisione al mondo, come il Lep (Large Electron Positron) al Cern di Ginevra, col quale sono state studiate in dettaglio le proprietà dei bosoni  $W$  e  $Z$ . Ma lo studio di queste interazioni continua tuttora a interessare alcuni fra i principali acceleratori di particelle: come Dafne ai Laboratori Nazionali di Frascati, le B-factories di Stanford negli Stati Uniti e Tsukuba in Giappone, ai quali si devono importanti risultati sul mescolamento dei quark.

Ai neutrini, invece, sono dedicati i grandi laboratori sotterranei del Gran Sasso, in Italia, quello di Kamioka in Giappone e quello di Sudbury, in Canada. Ed è proprio ai Laboratori Nazionali del Gran Sasso che lo scorso settembre è stato inaugurato un esperimento, realizzato in collaborazione col Cern, per lo studio dell'oscillazione dei neutrini, il quale prevede che fasci di neutrini giungano dalla Svizzera all'Italia, attraversando 730 chilometri di roccia (cfr. l'articolo, *L'avventura di Cngs*, intervista a Luciano Maiani, pp. 16-21 [n.d.r.]).

In un futuro ormai prossimo, un ruolo di primo piano nella ricerca in fisica delle alte energie sarà svolto da Lhc (Large Hadron Collider) in costruzione al Cern, sul luogo dove una volta sorgeva il Lep: esso sarà il più potente acceleratore di particelle mai costruito e avrà il compito di ricercare il bosone di Higgs, la particella 'mancante', cioè quella la cui individuazione darebbe il tocco finale all'unificazione delle interazioni deboli ed elettromagnetiche, che settant'anni fa fu per Enrico Fermi solo una geniale intuizione.

Nicola Cabibbo  
nicola.cabibbo@roma1.infn.it

# IL MODELLO STANDARD

	LEPTONI		QUARK		
Tutta la materia ordinaria appartiene a questo gruppo	<b>Neutrino elettronico</b>  Interagisce raramente con il resto della materia. È prodotto in abbondanza nelle reazioni nucleari all'interno del Sole.	<b>Elettrone</b>  È responsabile dell'elettricità e delle reazioni chimiche.	<b>Up</b>  I protoni hanno 2 quark up I neutroni hanno 1 quark up	<b>Down</b>  I protoni hanno 1 quark down I neutroni hanno 2 quark down	prima famiglia
	<b>Neutrino muonico</b> 	<b>Muone</b> 	<b>Charm</b> 	<b>Strange</b> 	seconda famiglia
	<b>Neutrino del Tau</b> 	<b>Tau</b> 	<b>Top</b> 	<b>Bottom</b> 	terza famiglia
<b>ANTIMATERIA</b> Per ogni particella esiste una particella corrispondente, una sorta di immagine negativa					

La teoria che oggi meglio descrive le particelle elementari e le loro interazioni, vale a dire le forze fondamentali che governano l'Universo, si chiama Modello Standard. Secondo questa teoria, la materia è formata da due tipi di particelle elementari: i leptoni e i quark. Esistono sei tipi di leptoni e sei tipi di quark.

Secondo il Modello Standard, le interazioni fra le particelle che costituiscono la materia, come la loro reciproca attrazione o repulsione, sono regolate da quattro forze fondamentali. Queste ultime si manifestano attraverso lo scambio di altre particelle chiamate bosoni mediatori.

Gluoni

## Interazione nucleare forte

L'interazione nucleare forte tiene insieme i quark all'interno di protoni e neutroni, e i protoni e i neutroni stessi all'interno del nucleo. Avviene attraverso lo scambio di bosoni detti gluoni.

Bosoni W, Z<sup>0</sup>

## Interazione debole

L'interazione debole è responsabile di alcuni decadimenti radioattivi ed è coinvolta nei processi di combustione che fanno brillare le stelle, compreso il Sole. Avviene attraverso lo scambio di bosoni detti W e Z<sup>0</sup>.

Fotoni

## Interazione elettromagnetica

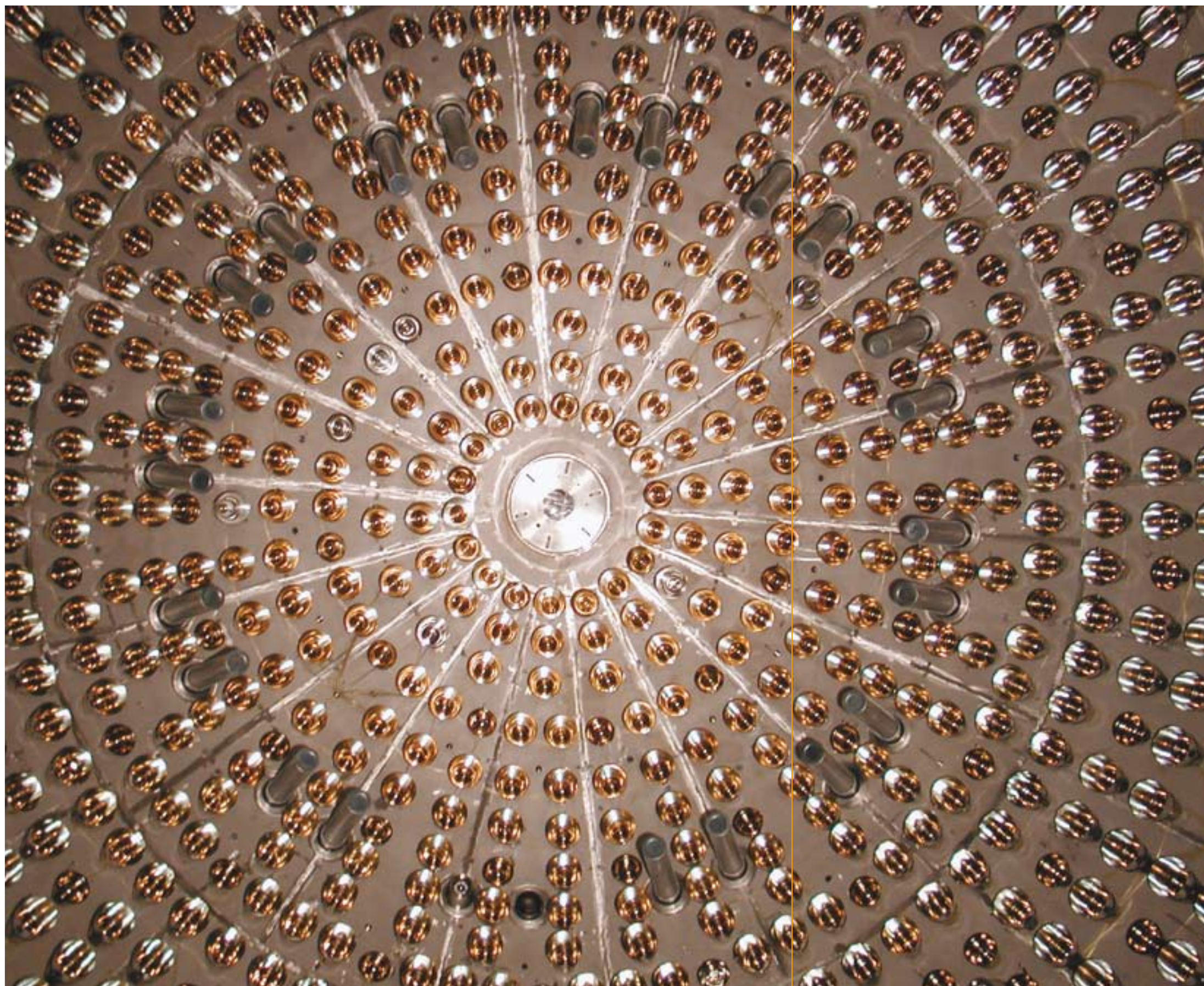
L'interazione elettromagnetica tiene gli elettroni legati al nucleo dell'atomo ed è responsabile dei fenomeni elettrici e magnetici. Avviene attraverso lo scambio di bosoni, detti fotoni.

Gravitoni

## Interazione gravitazionale

L'interazione gravitazionale fa ruotare i pianeti attorno al Sole e ci tiene "legati" a terra. Tutti gli oggetti e le particelle con massa interagiscono attraverso la forza gravitazionale. Si pensa che avvenga attraverso lo scambio di bosoni detti gravitoni, ma questi ultimi non sono ancora stati osservati.





# La foto

**M**isurare i neutrini di bassa energia provenienti dal Sole. È questo l'obiettivo dell'esperimento Borexino, un sofisticato rivelatore installato presso la sala C dei Laboratori Nazionali del Gran Sasso. La 'vita' del Sole dipende dalle potentissime reazioni nucleari che vi hanno continuamente luogo. Queste, oltre a produrre la luce che ci illumina, generano anche un'immensa quantità di neutrini. I fisici studiando queste particelle di origine solare hanno a disposizione un 'fascio' naturale che consente, da un lato, l'indagine astrofisica delle caratteristiche del nucleo del Sole da cui provengono e, dall'altro, l'approfondimento delle loro proprietà intrinseche di particelle elementari. È su questo doppio binario di ricerca dunque che si colloca Borexino. In particolare, Borexino focalizzerà la sua indagine sulla copiosa componente dei neutrini di energia inferiore ad 1 megaelettronvolt, quelli di gran lunga più numerosi ed appena sfiorati dagli studi condotti sino ad ora.

Per centrare il suo ambizioso obiettivo, Borexino si avvale della tecnica di rivelazione a scintillazione: in un sottile pallone di nylon di 8,5 metri di diametro sono contenute 300 tonnellate di una sostanza liquida avente la caratteristica di emettere flebili segnali di luce che indicano l'avvenuta rivelazione di un neutrino. Oltre 2200 'occhi elettronici' costituiti da tubi fotomoltiplicatori sono collocati concentricamente al pallone di nylon su di una sfera di supporto di 13,7 metri di diametro. Il loro compito è quello di registrare i raggi di luce, convertendoli poi in segnali elettrici che vengono memorizzati per la successiva analisi.

Borexino è ormai pronto per iniziare la fase di misura: dopo l'attuale periodo di prova, durante il quale il rivelatore sarà riempito con acqua, si procederà al riempimento finale con il liquido scintillatore. A quel punto Borexino sarà pronto a catturare i primi segnali di neutrini già dalla metà del 2007. Ma l'attività di Borexino non si limiterà solo alla misurazione di neutrini provenienti dal Sole. L'innovativo rivelatore sarà in grado di osservare anche i cosiddetti geoneutrini, ossia i neutrini provenienti dal sottosuolo e prodotti dalla radioattività naturale. Con un unico apparato, quindi, si aprirà non solo una finestra di osservazione sul nucleo del nostro Sole, ma anche sui misteri che si celano nelle profondità del nostro pianeta.

Interno del rivelatore usato per l'esperimento Borexino per l'osservazione dei neutrini presso i Laboratori del Gran Sasso.



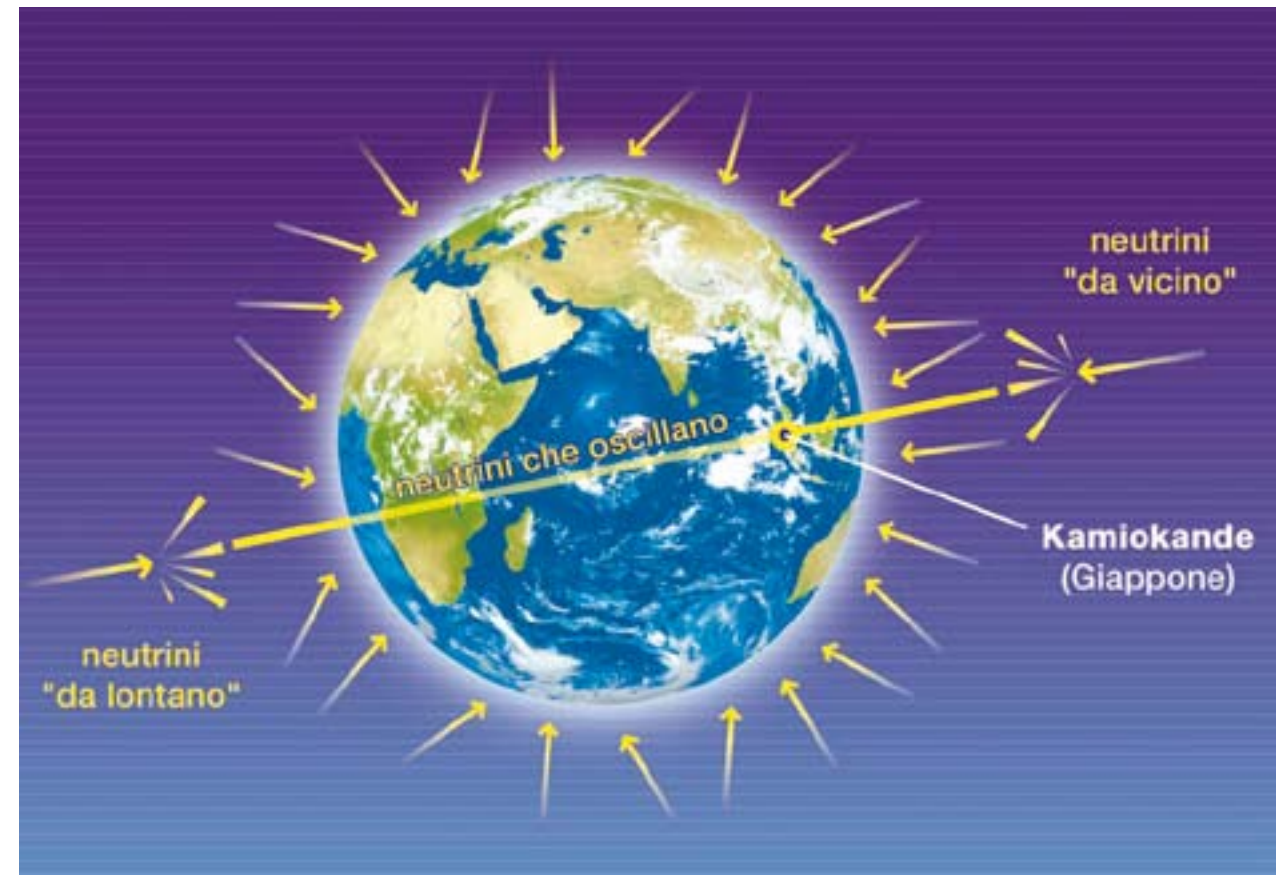
# L'avventura di Cngs.

## Come è nato l'esperimento Neutrini dal Cern al Gran Sasso

Barbara Gallavotti  
intervista

Luciano Maiani

Asimmetrie ripercorre la storia e gli obiettivi di Cngs  
con Luciano Maiani, che in veste di Direttore Generale del Cern  
è stato fra i maggiori promotori dell'esperimento



### *D. Come nasce il progetto Cngs?*

R. La ricerca per svelare i segreti delle particelle elementari coinvolge laboratori in tutto il mondo e non è raro che i risultati di uno di essi vengano poi portati avanti dall'altra parte del pianeta. Ciò è proprio quanto si è verificato con Cngs, che può essere considerato il discendente di un esperimento di nome Kamiokande, condotto in Giappone a partire dagli anni '80. Kamiokande studiava i neutrini prodotti dai raggi cosmici che entrano nell'atmosfera terrestre. I neutrini attraversano la Terra senza apprezzabile attenuazione, quindi Kamiokande poteva confrontare i neutrini che originano "da vicino", cioè quelli che provengono dalla verticale, e quelli "da lontano", i quali provengono dal basso, dopo avere attraversato la Terra. Sorprendentemente, i neutrini di tipo muonico "da lontano" risultarono essere di meno di quanto ci si aspettasse. I neutrini "da lontano" si differenziavano da quelli "da vicino" solo per il fatto di aver percorso più strada, perché oltre ad aver attraversato l'atmosfera erano passati anche attraverso il nostro pianeta (vedi immagine sopra): dunque il fenomeno a cui andavano incontro i neutrini doveva essere legato all'aver coperto un tragitto più o meno lungo. I dati continuarono ad accumularsi fino ad arrivare a un anno cruciale: il 1997, quando divenne

una certezza il verificarsi di una sparizione di neutrini muonici nel caso in cui le particelle percorrano distanze dell'ordine del diametro della Terra. Per i fisici di tutto il mondo era la prima prova sperimentale del fenomeno chiamato dell'oscillazione dei neutrini. La strada per Cngs poteva considerarsi aperta, anche se sarebbe stata ancora molto in salita.

### *D. Che cosa è l'oscillazione dei neutrini e perché un esperimento come Cngs può proseguire le indagini del giapponese Kamiokande?*

R. L'oscillazione dei neutrini è un fenomeno di trasformazione di neutrini di un tipo in neutrini di un altro. Secondo le nostre teorie, esistono tre tipi di neutrini: elettronici, muonici e neutrini-tau. Ciascuno di essi, viaggiando nello spazio, può trasformarsi negli altri due tipi (cfr. grafico pagina 9). Quando Kamiokande registrò la strana mancanza di neutrini muonici, immediatamente i fisici pensarono che essi dovevano essersi trasformati in altri tipi di neutrini: secondo i nostri calcoli, soprattutto in neutrini-tau. Mancava però quella che potremmo chiamare la "firma" del neutrino-tau: i leptoni tau, cioè le particelle che vengono prodotte nei rarissimi casi in cui il neutrino-tau interagisce con la materia che attraversa (l'interazione dei neutrini muonici



Dopo decenni  
di caccia  
ai neutrini,  
è sul punto di partire  
l'esperimento concepito  
per essere la chiave di volta  
delle moderne ipotesi  
sulla natura  
e il comportamento  
di queste sfuggenti particelle,  
e non solo.  
Spetterà ai risultati di Cngs  
(Neutrini dal Cern  
al Gran Sasso)  
consolidare, o minare,  
le teorie oggi più accreditate  
per descrivere tutto il mondo  
dell'infinitamente piccolo  
e le forze che agiscono  
fra le particelle elementari





I Laboratori del Gran Sasso.

con la materia genera invece una particella diversa, chiamata muone [n.d.r.]. Il problema è che l'esperimento giapponese non aveva la risoluzione sufficiente per identificare i leptoni tau. Per questa ragione, Kamiokande non permise di osservare realmente l'oscillazione di neutrini muonici in neutrini-tau. Fu chiaro che per risolvere la questione occorreva concepire un nuovo esperimento, grazie al quale fosse possibile realizzare condizioni di partenza controllate, creando un fascio omogeneo di neutrini, ad esempio composto da soli neutrini muonici, e dotato di energia abbastanza alta da permettere l'apparizione della particella tau. Il Cern e i Laboratori del Gran Sasso dell'Infn si presentavano come i luoghi ideali per realizzare uno studio di questo tipo. Al Cern infatti si trova un acceleratore in grado di generare i neutrini con l'energia necessaria, l'acceleratore Sps. I Laboratori del Gran Sasso sono a circa 730 chilometri dall'Sps: una distanza che consente il verificarsi di un numero di oscillazioni abbastanza grande da essere osservabile. Tutti sapevamo inoltre che le sale sperimentali del Gran Sasso erano state costruite, quindici anni prima, con un orientamento verso il Cern. Era stata una decisione estremamente lungimirante, presa pensando all'eventualità che il progredire degli studi sui neutrini rendesse necessario proprio un esperimento come Cngs.

*D. Esistevano altri Laboratori al mondo dove poteva essere condotto un esperimento come Cngs?*

R. In realtà no, non con le stesse caratteristiche. In Giappone mancava l'acceleratore con l'energia adatta. Negli Stati Uniti il Fermilab dispone di un acceleratore che avrebbe consentito di produrre neutrini capaci di creare un tau, ma l'esperimento proposto, di nome Minos, si stava orientando verso neutrini di bassa energia: questi ultimi

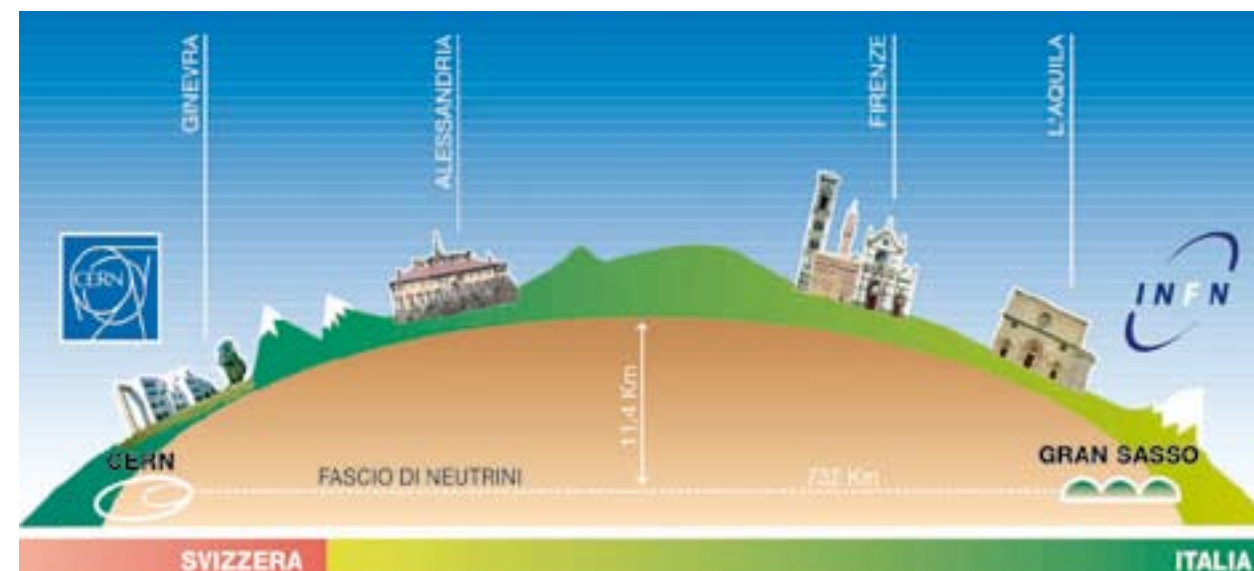
infatti avrebbero permesso di studiare meglio un altro aspetto della questione, cioè la relazione tra energia dei neutrini e probabilità della loro "scomparsa". Europa e Stati Uniti dunque sono partite su due vie che si completeranno a vicenda, dando un quadro preciso della situazione. Occorre dire anche che al Fermilab è attualmente in corso uno studio completamente diverso, nel quale le sfuggenti particelle vengono inviate verso rivelatori posti a breve distanza. L'esperimento, chiamato MiniBoone, ha lo scopo di verificare uno strano risultato ottenuto diversi anni fa presso i laboratori di Los Alamos, sempre negli Stati Uniti, e mai confermato.

*D. Allora, una volta accertato che il Cern e i Laboratori del Gran Sasso erano gli unici ad avere le caratteristiche adatte, la strada verso Cngs era spianata?*

R. Al contrario, molte difficoltà cominciarono proprio allora. Nella fisica delle particelle, come in ogni campo della scienza, le risorse umane e finanziarie sono limitate e c'è stata una accesa discussione sull'opportunità del mettere in cantiere questo esperimento: alcuni avrebbero preferito uno studio sul tipo di MinBoone, tutto concentrato al Cern. Inoltre bisogna considerare che al Cern era già stata decisa la costruzione di Lhc, l'acceleratore di particelle che entrerà in funzione a partire dal 2007 e che con i suoi quattro esperimenti sarà chiamato a gettare luce su alcuni dei più grandi quesiti della fisica moderna. Per qualsiasi progetto, convivere con Lhc è come dormire con un elefante, per riprendere la metafora con la quale l'ex primo ministro del Canada Pierre Trudeau descriveva la situazione politica di un Paese confinante con gli Stati Uniti: anche un semplice sogno agitato del pachiderma



Ginevra, il Cern.



Il fascio di neutrini, prodotti al Cern a circa un centinaio di metri sotto la superficie terrestre, giunge ai laboratori del Gran Sasso dopo aver raggiunto una profondità massima di circa 11,4 km per effetto della curvatura terrestre.

si ripercuote drammaticamente sul suo compagno di letto. E ciò è tanto più evidente se si pensa che Cngs è un progetto tutto sommato piccolo, almeno se confrontato con gli stanziamenti e gli sforzi necessari per realizzare un'installazione come Lhc.

*D. E l'elefante ha avuto sonni tranquilli?*

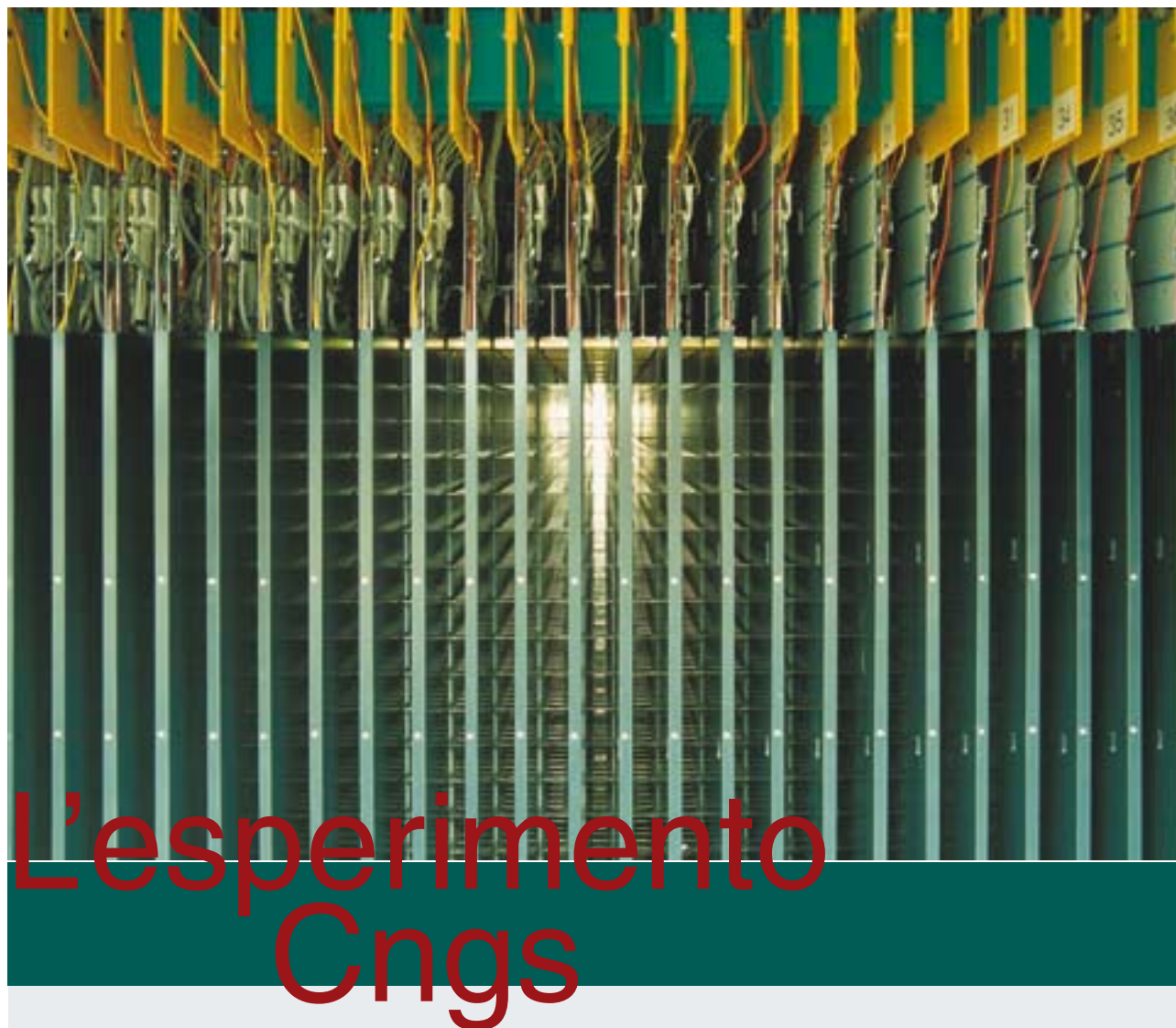
R. Per niente, anzi, è stato molto agitato. Nel 2001 il Cern ha dovuto affrontare una forte crisi finanziaria dovuta alla levitazione dei costi di Lhc, e molti hanno sostenuto che occorresse chiudere i progetti minori, come appunto Cngs. Personalmente, come Direttore Generale del Cern, mi sono opposto decisamente, perché a mio avviso i vantaggi economici che ne avremmo ricavato sarebbero stati irrilevanti, anzi negativi visti gli impegni già presi, e più che controbilanciati dal danno scientifico e di immagine. La situazione comunque era estremamente critica, anche perché ai problemi del Cern si saldarono pressioni, provenienti soprattutto da laboratori esterni i quali insistevano affinché il Cern si dedicasse esclusivamente al nuovo acceleratore: una richiesta motivata in buona parte da ragioni di politica della ricerca ma che ritenevo che avrebbe fatto perdere all'Europa una buona occasione. A mio fianco avevo ovviamente l'Infn, coinvolto direttamente nel progetto. Dalla nostra parte si schierarono anche i giapponesi, fortemente interessati a Cngs e impegnati con l'Università di Nagoya nella costruzione del rivelatore Opera, che ai Laboratori del Gran Sasso capterà i neutrini in arrivo. Alla fine, ce l'abbiamo fatta e il progetto Cngs è ormai partito.



Installazione dei magneti nell'acceleratore Sps.

**Per qualsiasi progetto,  
convivere con Lhc  
è come dormire  
con un elefante:  
anche un semplice sogno  
agitato del pachiderma  
si ripercuote  
drammaticamente  
sul suo compagno di letto**





# L'esperimento Cngs

**FINO AD OGGI ABBIAMO AVUTO DIVERSE PROVE INDIRETTE DELL'OSCILLAZIONE DEI NEUTRINI**, ma Cngs promette di essere il primo a fornire una prova diretta del fenomeno: un po' come se dopo molti indizi sull'esistenza di un crimine trovassimo finalmente il corpo del reato. Cngs consiste essenzialmente in un fascio di neutrini che vengono prodotti al Cern di Ginevra e inviati verso i Laboratori Nazionali del Gran Sasso dell'Infn, dove due esperimenti sono stati concepiti per identificare le sfuggenti particelle in arrivo.

Cngs è stato inaugurato ufficialmente l'11 settembre 2006 e si prevede che procederà per circa 5 anni. Durante questo periodo, al Cern verranno prodotti esclusivamente neutrini muonici, ma 2,5 millisecondi dopo, quando il fascio arriverà al Gran Sasso, dopo aver percorso circa 730 chilometri alla velocità della luce, i ricercatori si aspettano di captare con i loro esperimenti un piccolissimo numero di neutrini-tau, anche se quelli che subiscono l'oscillazione saranno molti di più. In particolare, calcoli teorici dicono che, data l'estrema difficoltà di registrare il passaggio dei neutrini, gli strumenti consentiranno di individuare circa 15 tau sui molti miliardi di miliardi di neutrini che arriveranno. In teoria, alcuni neutrini muonici potrebbero trasformarsi in elettronici, invece che in neutrini-tau: Cngs permetterà di osservare anche questo fenomeno o di mettere dei limiti alla probabilità con cui esso può verificarsi.

Al Gran Sasso i neutrini saranno studiati grazie a due esperimenti: Opera e T600. Il primo è un gigantesco rivelatore dal peso di 1700 tonnellate, essenzialmente formato da lastre fotografiche alternate a strati di piombo. I pochissimi neutrini-tau prodotti nell'oscillazione che nel corso della ricerca interagiranno con gli atomi di piombo, produrranno una particella carica. Quest'ultima lascerà una traccia nell'emulsione fotografica e potrà essere così individuata dai ricercatori. L'apparato T600 utilizzerà invece come rivelatore 600 tonnellate di argon liquido e i prodotti dell'interazione fra i suoi atomi e i neutrini verranno registrati da una serie di sensori. È necessario che gli esperimenti si svolgano presso i Laboratori Nazionali del Gran Sasso perché questi ultimi sono localizzati sotto circa 1.400 metri di roccia la quale costituisce un efficientissimo schermo contro la radiazione cosmica, cioè contro la pioggia di particelle cariche che incessantemente colpisce il suolo e che produrrebbe così tanti segnali da coprire il debolissimo effetto delle poche interazioni dei neutrini. (B.G.)

## D. Che risultati si aspetta?

R. Naturalmente mi aspetto che vengano osservati i neutrini tau e che dunque l'oscillazione dei neutrini venga confermata. Se le cose andranno così il nostro quadro di conoscenze sarà finalmente stabilizzato, anche se mancheranno da osservare direttamente altre oscillazioni, come quella dei neutrini muonici in elettronici.

## D. E se al Gran Sasso non ci fosse traccia di tau?

R. Allora le nostre teorie sarebbero tutte da rivedere. La fisica procede formulando teorie generali, le quali però debbono poi essere confrontate in ogni dettaglio con i risultati sperimentali. Se piano piano i tasselli vanno a posto, il quadro complessivo si consolida e anche le conclusioni generali si rafforzano. Ma se qualcosa non si incastra come dovrebbe, allora tutto il sistema è da riesaminare. È successo ad esempio con le equazioni di Newton: nonostante fossero state per

secoli uno strumento perfetto per spiegare i fenomeni allora conosciuti, a un certo punto ci si rese conto che non erano sufficienti per risolvere alcuni interrogativi sulla natura della luce. Per rispondere a questi ultimi è stata necessaria una nuova teoria, formulata da Albert Einstein. Ed è successo anche quando abbiamo scoperto la cosiddetta violazione di CP, cioè un diverso comportamento tra la materia e l'antimateria (quest'ultima è formata da particelle identiche a quelle che compongono la prima tranne che per alcune caratteristiche che risultano opposte. [n.d.r.]). Nessuno avrebbe scommesso sull'esistenza di questo fenomeno, eppure esso si verifica e ciò ha costretto a riesaminare profondamente le conoscenze allora accettate. Se gli esperimenti al Gran Sasso non osservassero i neutrini tau che sono attesi, e se l'esperimento MiniBoone al Fermilab confermasse lo strano risultato di Los Alamos, il quale è incompatibile con l'ipotesi dell'esistenza di soli tre tipi di neutrini, occorrerà riformulare l'intera teoria del neutrino. Così funziona la fisica, e più in generale, la ricerca.



Termine dei lavori di posa del grande tubo a vuoto (lunghezza di 1 km e diametro di 2,5 m), in cui vengono prodotti i neutrini diretti al Gran Sasso.

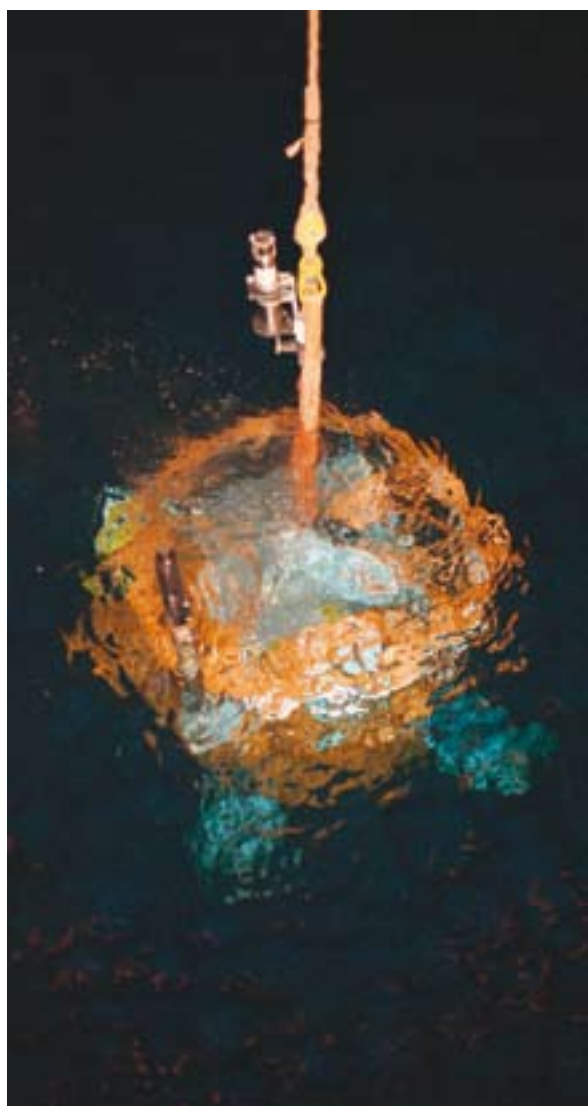
Nella pagina precedente, veduta in 'trasparenza' di uno dei due bersagli dell'esperimento Opera, dove verranno rivelati i neutrini provenienti dal Cern di Ginevra.



# Nemo

Dagli abissi del mare  
alla scoperta dei misteri  
dell'Universo

di Emilio Migneco



Operazioni di posa della junction box dalla nave Teliri.

**S**i chiama Nemo (NEutrino Mediterranean Observatory) ed è un potentissimo telescopio sottomarino progettato per ricercare particolari particelle provenienti dal Cosmo: i neutrini di alta energia. Il dispositivo, che potrebbe essere collocato negli abissi del Mar Mediterraneo, a 3500 metri di profondità e a circa 80 chilometri dalla costa siciliana al largo di Capo Passero, è stato progettato allo scopo di raccogliere preziose informazioni per rispondere ad alcune delle più importanti domande della fisica moderna.

Il progetto, coordinato dai Laboratori Nazionali del Sud, è stato sviluppato all'interno di una vasta collaborazione che coinvolge circa 80 ricercatori italiani di nove sedi dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (Infn). Le attività necessarie per progettare e verificare le tecnologie per la realizzazione del telescopio sono state cofinanziate dall'Infn, dal Miur e dalla Regione Sicilia.

Ma perché studiare i neutrini di alta energia? E perché farlo dal fondo del mare?

La conoscenza dell'Universo che gli scienziati hanno accumulato in secoli di studi si basa essenzialmente su osservazioni per mezzo di onde elettromagnetiche. Negli ultimi decenni i progressi dell'astrofisica, a terra e nello spazio, ci hanno consentito di estendere la capacità osservativa su un intervallo di frequenze che abbraccia molti ordini di grandezza, dalle onde radio, all'infrarosso, al visibile, all'ultravioletto, ai raggi X, fino ai raggi gamma di energia più elevata. L'apertura di una nuova finestra osservativa è stata spesso all'origine della sco-







Torre a bordo della nave Teliri.

perta di fenomeni inattesi, fornendo così immagini del Cosmo del tutto nuove. L'astrofisica delle alte energie, per esempio, con la scoperta dei *Gamma Ray Burst* (lampi di luce che brillano nel cielo per pochi istanti con intensità pari a diversi milioni di Soli), e dei 'nuclei galattici attivi', dai quali vengono emessi intensi getti di particelle di energia ultrarelativistica, ci ha messo di fronte a un Universo sede di fenomeni estremamente violenti, la cui origine non è ancora nota.

Tuttavia la radiazione elettromagnetica di più alta energia è fortemente assorbita dalla radiazione cosmica di fondo e quindi l'osservazione con i raggi gamma di energia elevata resta limitata a un orizzonte di poche decine di milioni di anni luce (da confrontarsi con la dimensione dell'Universo che è di circa 15 miliardi di anni luce). Altre informazioni possono venire dai raggi cosmici. In questo caso si aggiunge un ulteriore ostacolo, rappresentato dall'influenza dei campi magnetici presenti nelle galassie e negli spazi intergalattici, i quali deflettono le particelle cariche impedendoci di ricostruirne la direzione di provenienza.

Una possibilità alternativa per indagare questi fenomeni è quella di utilizzare i neutrini come sonda. Questo richiede la realizzazione di strumenti adeguati in grado di rivelare i neutrini emessi da sorgenti cosmiche e di individuare la loro direzione di provenienza. Questi

strumenti sono i 'telescopi per neutrini', e l'avvio dell'astronomia con neutrini costituirà una delle imprese più rilevanti dei prossimi anni.

La peculiarità dei neutrini sta nella loro probabilità estremamente bassa di interagire con la materia: questa caratteristica consente loro di non essere assorbiti dalla radiazione di fondo e di attraversare imperturbati regioni che sono opache alla radiazione elettromagnetica, come l'interno delle sorgenti astrofisiche. Inoltre, essendo particelle neutre, non subiscono deflessioni causate dai campi magnetici galattici e intergalattici che impedirebbero di risalire alla direzione di provenienza. Il prezzo da pagare per osservare queste particelle così sfuggenti è la necessità di realizzare rivelatori di dimensioni enormi.

Sorgenti astrofisiche di neutrini non sono mai state osservate direttamente, con l'eccezione del Sole e della SuperNova 1987A. I rivelatori che hanno osservato i neutrini provenienti dal Sole hanno masse di diverse migliaia di tonnellate, ma per misurare i deboli flussi di neutrini provenienti da sorgenti astrofisiche remote questi volumi sono assolutamente insufficienti. Stime dei flussi attesi di neutrini di alta energia sono possibili sulla base dei flussi misurati di raggi cosmici e di raggi gamma, nell'ipotesi che il meccanismo alla loro origine sia comune. Queste stime indicano che un telescopio per neutrini di alta energia debba avere un volume di

almeno un chilometro cubo ( $\text{km}^3$ ). Inoltre, per schermarsi dalla pioggia di radiazione cosmica che bersaglia la Terra questi rivelatori devono essere installati in laboratori fortemente schermati. È però evidente che dispositivi di queste dimensioni non possono essere collocati in laboratori sotterranei. Una possibile soluzione è quella di utilizzare grandi volumi di un mezzo naturale, dotandolo di opportuni strumenti. In un mezzo trasparente, come l'acqua delle profondità marine o i ghiacci polari, è possibile rivelare la radiazione luminosa prodotta per effetto Cherenkov dalle particelle secondarie (muoni), che i neutrini generano interagendo con la materia. Inoltre, se poniamo il rivelatore nelle profondità marine (o dei ghiacci polari), la materia sovrastante funge anche da schermo contro il fondo di particelle cosmiche, che in superficie 'accecherebbe' il rivelatore. L'acqua (o il ghiaccio) assolve così a un triplice compito: schermo protettivo dai raggi cosmici, bersaglio per l'interazione di neutrini e mezzo trasparente attraverso il quale si propaga la luce Cherenkov. Questa idea fu proposta da Moisei Aleksandrovich Markov già negli anni '60, ma solo recentemente le tecnologie nel campo della meccanica, dell'elettronica e della trasmissione dati, hanno raggiunto uno sviluppo tale da rendere realizzabile la costruzione di un rivelatore per neutrini da  $1 \text{ km}^3$ .

C'è un altro aspetto molto peculiare che distingue questo telescopio dagli strumenti astronomici più comunemente utilizzati. Per poter essere certi di identificare i neutrini si guarderà il cielo soprattutto 'verso il basso': da quella direzione, infatti, lo spessore della terra impedisce a qualunque altra particella, tranne i neutrini, di arrivare fino al telescopio. Così uno strumento installato nel Mar Mediterraneo permetterà di guardare l'emisfero australe della volta celeste. Per osservare l'intero cielo saranno perciò necessari due telescopi: uno nell'emisfero nord e l'altro nell'emisfero sud. In quest'ultimo una collaborazione a guida statunitense ha già iniziato la realizzazione del rivelatore IceCube, i cui sensori saranno installati a 2000 m di profondità, sotto i ghiacci dell'Antartide.

L'obiettivo di costruire un telescopio per neutrini delle dimensioni di  $1 \text{ km}^3$  a migliaia di metri sotto il livello del mare pone sfide tecnologiche molto impegnative. Notevoli difficoltà derivano dalle condizioni ostili dell'ambiente, dovute alle pressioni elevatissime (a una profondità di 3500 m la pressione è di 3500 tonnellate per metro quadro) e ai problemi di corrosione e infiltrazione dell'acqua. Inoltre, poiché l'apparato dovrà rimanere in funzione per almeno una decina d'anni, con possibilità di intervento e manutenzione limitate, il sistema deve essere molto affidabile.



## Il principio di rivelazione dei neutrini di alta energia

**I NEUTRINI NON SONO RIVELABILI DIRETTAMENTE**, alcuni di essi però possono interagire con l'acqua delle profondità marine generando delle particelle cariche secondarie chiamate muoni. Queste ultime, grazie alla loro energia sono in grado di attraversare grandi spessori d'acqua, producendo nel loro tragitto una scia luminosa, nota come effetto Cherenkov. Una griglia di alcune migliaia di sensori ottici disposti in un volume di circa  $1 \text{ km}^3$  è in grado di rivelare la debole luce prodotta permettendo di ricostruire la traccia del muone. Poiché quest'ultimo ha una direzione sostanzialmente uguale a quella del neutrino che l'ha prodotto, la sua rivelazione permette di risalire anche alla direzione del neutrino e di conseguenza all'osservazione della sua sorgente.



Modulo ottico, gli 'occhi' dell'apparato, realizzato con fotomoltiplicatori montati all'interno di sfere di vetro in grado di resistere fino a pressioni di oltre 400 atmosfere.



Il telescopio sottomarino sarà costituito da circa 80 strutture meccaniche (*torri*) alte 750 m, cioè più di due volte la torre Eiffel, poste sul fondo del mare a 3500 m di profondità e a circa 150 m l'una dall'altra, in modo da attrezzare un volume d'acqua di 1 km<sup>3</sup>. Le torri saranno equipaggiate con circa 6000 sensori ottici che rappresentano gli 'occhi' dell'apparato: essi consentiranno di rivelare le tracce associate ai neutrini che interagiscono in prossimità del rivelatore.

Sul fondo del mare le strutture sono interconnesse tra loro con un sistema che consente la distribuzione della potenza necessaria per l'alimentazione della strumentazione e la trasmissione dei dati raccolti.

La connessione verso terra sarà realizzata con un singolo cavo elettro-ottico che, grazie all'utilizzo delle più sofisticate tecnologie consentirà la trasmissione a terra dell'imponente flusso di dati raccolto.

Dal 1998 l'Infn ha intrapreso un'attività di ricerca e sviluppo mirata alla realizzazione di un rivelatore da 1 km<sup>3</sup> nel Mar Mediterraneo.

Dopo alcuni anni dedicati alla ricerca del sito sottomarino, che hanno consentito di individuare un'area al largo di Capo Passero con caratteristiche ottimali, e dopo lo sviluppo di uno studio preliminare del rivelatore da 1 km<sup>3</sup>, il progetto Nemo è entrato nella sua prima fase di realizzazione, chiamata Nemo Fase-1. Questa fase prevede l'installazione di un dimostratore tecnologico in un sito di test alla profondità di 2000 m al largo di Catania (cfr. box sotto, [n.d.r.]).



La junction box.

## Il progetto Nemo Fase - 1

**UN PASSO ESSENZIALE** verso la realizzazione del telescopio per neutrini da 1 km<sup>3</sup> è la verifica delle soluzioni tecniche individuate: per far ciò, la collaborazione Nemo sta realizzando un progetto denominato Fase-1. Il progetto è stato messo in opera in un *test site* sottomarino già realizzato dai Laboratori Nazionali del Sud. Il *test site* dispone di un cavo elettro-ottico che dal porto di Catania raggiunge un sito a circa 25 km dalla costa alla profondità di 2000 m. Nell'area del porto, è stato costruito un edificio che ospita le infrastrutture di terra (sistema di alimentazione, sistemi di controllo, acquisizione dati ecc.).

Due sono gli elementi chiave del telescopio per neutrini: la *junction box*, che consente di distribuire le singole linee di alimentazione e di trasmissione dati dal cavo in arrivo da terra su diverse linee, e la struttura meccanica (*torre*), che permette di disporre nelle posizioni volute i sensori ottici e ambientali e i dispositivi di elettronica e trasmissione dati.

Per entrambi questi oggetti sono state progettate delle soluzioni innovative. La *junction box* deve proteggere i componenti al suo interno dall'aggressività dell'ambiente marino e dalla pressione di oltre 200 atmosfere. La torre è un complesso sistema meccanico costituito da una sequenza di tralicci, realizzati in una lega di alluminio marino, connessi tra loro da un sistema di funi di tenuta. Per poterla montare e trasportare questa struttura può essere compattata per essere dispiegata una volta posizionata sul fondo del mare. Qui la torre viene ancorata al fondo da una zavorra in ferro e una volta dispiegata viene mantenuta verticale da una boa posta in cima. Dopo la posa, eseguita tra il 9 e il 18 dicembre scorso, il sistema è stato connesso al cavo elettro-ottico del *test site* utilizzando un robot sottomarino e messo in funzione.

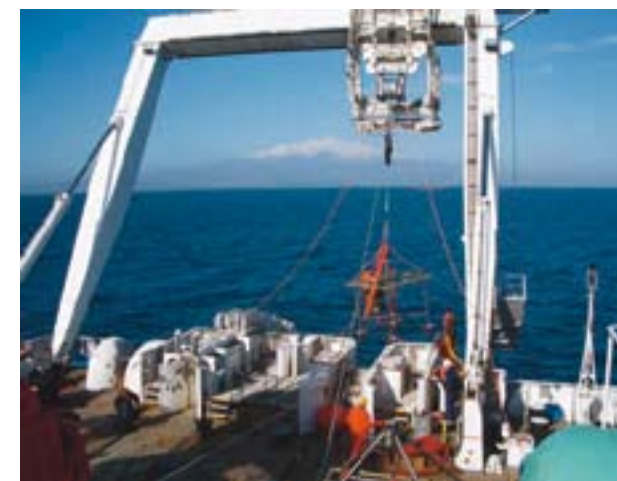
La seconda fase sarà verificare i prototipi e la loro installazione alla profondità operativa del rivelatore (3500 m) nel sito candidato di Capo Passero. Entro il 2007, un cavo elettro-ottico collegherà il *plateau* a 3500 m di profondità con una stazione di terra in via di realizzazione e renderà possibile l'installazione di un primo modulo del rivelatore.

L'interesse per l'ambiente marino a profondità elevate è condiviso da diverse discipline scientifiche che includono l'oceanografia, la geofisica, la sismologia e la biologia (cfr. box in questa pagina, [n.d.r.]). La maggior parte delle ricerche in questi campi sono state effettuate finora utilizzando navi oceanografiche o stazioni sottomarine alimentate da batterie. La possibilità di utilizzare in permanenza infrastrutture sottomarine connesse a terra con cavi elettro-ottici, in grado di trasmettere dati in tempo reale, rappresenta quindi una grande opportunità per lo sviluppo di queste scienze. La collaborazione fra i ricercatori delle varie discipline è stata avviata sin dagli inizi del progetto.

Per l'elevato contenuto di tecnologie di frontiera il lavoro di progettazione e sviluppo del telescopio da 1 km<sup>3</sup> richiede anche una stretta interazione con aziende specializzate nel settore, come quelle che lavorano a grandi profondità marine per l'estrazione del petrolio, o per l'installazione di reti di cavi in fibra ottica per le telecomunicazioni.

La costruzione del telescopio da 1 km<sup>3</sup> non potrà che essere realizzata nel contesto di una grande collaborazione internazionale, che raccolga le esperienze e le conoscenze accumulate negli anni da gruppi di fisici e ingegneri che hanno studiato e realizzato prototipi e dimostratori di piccola e media scala. Oltre a Nemo, altre due collaborazioni sono oggi attive nel Mar Mediterraneo: Antares, a Tolone (Francia), e Nestor, a Pylos (Grecia). Tutte e tre partecipano al progetto *Design Study KM3NeT*, finanziato dalla Comunità Europea. Questo progetto si svilupperà nell'arco dei prossimi tre anni per condurre, a fine 2008, alla definizione di un progetto esecutivo del rivelatore che porti all'avvio della costruzione del telescopio a partire dal 2009.

Emilio Migneco  
migneco@lns.infn.it



## Nemo e le attività interdisciplinari

**OLTRE AL PROGETTO NEMO FASE-1**, il *test site* di Catania ospita anche la stazione sottomarina SN-1 dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (Ingv) e la stazione sperimentale OnDE (Ocean noise Detection Experiment) dell'Infn.

SN-1 è il primo osservatorio abissale in Europa per ricerche geofisiche e ambientali connesso a terra in tempo reale. È stato installato a 25 km al largo di Catania a 2000 m di profondità nel gennaio 2005, e da allora trasmette continuamente dati a terra. I segnali sono inviati al centro operativo sismologico dell'Ingv di Roma, dove è effettuata una localizzazione degli eventi in tempo reale: i dati così ricavati sono poi comunicati alla protezione civile. L'osservatorio SN-1 costituisce il primo nodo di una rete europea per il monitoraggio in mare dell'attività sismica nel Mediterraneo. La stazione di rilevamento acustico OnDE permette di monitorare con continuità e in tempo reale il rumore acustico sottomarino a 2000 m di profondità. La stazione, realizzata dalla collaborazione Nemo, è equipaggiata con quattro idrofoni i cui segnali vengono inviati su fibra ottica al laboratorio di terra 24 ore su 24. L'esperimento è in funzione dalla fine di gennaio del 2005.

La stazione costituisce un primo passo nello sviluppo di nuove tecniche di rivelazione di particelle cosmiche, basata sulla identificazione degli impulsi acustici generati dai neutrini di energia estrema (maggiore di 10<sup>18</sup> eV) che interagiscono nell'acqua di mare. L'esperimento ha anche offerto agli studiosi di bioacustica un'opportunità unica per studiare le emissioni acustiche dei cetacei che vivono, o che transitano, durante le loro migrazioni stagionali, nel golfo di Catania.



Fotografia di Ettore Majorana  
dalla tessera universitaria datata 3 novembre 1923

## Cento anni dalla nascita di Ettore Majorana (1906-1938)

di Franco Bassani

In occasione del centenario della nascita di Ettore Majorana, la Società Italiana di Fisica (Sif) presenta un volume speciale con tutti i suoi lavori nella lingua originale e nella traduzione inglese. Ogni lavoro è commentato da un esperto del settore specifico, e i riferimenti alla sua vita sono tratti da una lunga commemorazione scritta da Edoardo Amaldi, che lo ha conosciuto e gli è stato amico.

La ragione di un tale impegno, non comune, è nella figura umana e scientifica di Ettore Majorana, che è collocato a buon diritto tra i grandi fisici della prima metà del ventesimo secolo. Enrico Fermi aveva di lui un'opinione altissima, tanto che è stata riferita una conversazione privata nella quale lo classificava tra i veri geni della scienza, come Galilei e Newton, quale forse avrebbe potuto essere se si fosse dedicato per lungo tempo alla fisica. La sua attività scientifica si è svolta in un periodo di pochi anni, sostanzialmente dal 1928, quando era ancora studente, al 1933, quando la sua salute fu compromessa. L'ultimo suo lavoro è stato pubblicato nel 1937, ma è stato certamente scritto alcuni anni prima.

Le pubblicazioni a stampa di Ettore Majorana sono le nove citate in ordine cronologico da Edoardo Amaldi nella sua commemorazione, oltre a un lavoro sul ruolo della statistica fisica nelle scienze sociali - trovato tra le sue carte dopo la sua scomparsa e pubblicato postumo da Giovanni Gentile jr. - e un lavoro sul *metodo di Thomas-Fermi*, presentato nel 1928 al congresso nazionale della Sif, quando era ancora studente. Oltre ai lavori a stampa, è disponibile un'estesa

varietà di manoscritti custoditi alla Domus Galileiana di Pisa e oggi oggetto di ricerche da parte di studiosi di storia della fisica.

Nonostante lo scarso numero di pubblicazioni e il breve tempo che Majorana ha dedicato alla fisica, i suoi contributi rivelano una straordinaria capacità di analisi e una totale padronanza dei principi e delle tecniche della relatività e della meccanica quantistica, accoppiati a un vivissimo senso critico. L'importanza dei lavori di Majorana è tale, che l'interesse rivolto a essi dalla comunità scientifica si è mantenuto vivo negli anni e alcuni dei suoi studi sono ancora di grande attualità. A buona ragione, a lui sono stati dedicati il Centro Internazionale di Erice e il Dipartimento di Fisica dell'Università di Napoli.

Ettore Majorana nasce a Catania il 5 agosto 1906 e, ancora bambino, si trasferisce a Roma con la famiglia. Qui segue gli studi liceali e si iscrive alla Facoltà di Ingegneria come il suo amico Emilio Segrè (che ne ha ricordato spesso l'estrema umanità e generosità). Un episodio particolarmente significativo che Segrè raccontava spesso riguarda l'aiuto che Majorana gli diede quando, con grande preoccupazione, attendeva di sostenere l'esame di geometria. Ettore gli suggerì di dire al professor Pittarelli, noto per la sua severità, che aveva trovato una dimostrazione originale dell'esistenza dei cerchi di Villarceau sulla struttura di un solido particolare, il toro, e gli spiegò tale dimostrazione. Poco dopo Segrè sostenne l'esame e, dopo aver invitato il professore a chiedergli la nuova dimostrazione,

questi ne fu tanto impressionato da assegnargli il massimo dei voti.

Come Segrè, anche Majorana si trasferisce a Fisica, in seguito a un incontro con Fermi, promosso da Segrè stesso e da Franco Rasetti. Tale incontro lasciò una profonda impressione in quanti erano presenti. In quell'occasione, Fermi spiegò a Majorana il metodo, che poi venne chiamato di Thomas-Fermi, per il calcolo delle energie degli stati di atomi con più elettroni. Il metodo di Thomas-Fermi consente di eseguire il calcolo delle energie senza che sia necessario conoscere lo stato di ogni singolo elettrone, utilizzando la densità complessiva di elettroni. Majorana non fece commenti, ma ritornò il giorno seguente con le soluzioni dell'equazione risolvente e verificò che coincidessero con quelle ottenute da Fermi. I suoi primi lavori, presentati nel 1928 quando era ancora studente, riguardano un'applicazione del metodo di Thomas-Fermi<sup>1</sup> e un'elaborazione migliorata del metodo stesso<sup>2</sup>.

Majorana si laurea nel 1929 con una tesi sulla radioattività nucleare, presentata da Fermi, e in seguito continua a lavorare nel campo della fisica atomica, in linea con gli interessi di ricerca del gruppo. Nel periodo tra il 1929 e il 1932 porta a termine due lavori di analisi spettroscopica, uno sui livelli di energia dell'atomo di elio<sup>4</sup> e un lavoro sul metodo per il calcolo delle energie degli stati degli atomi con più elettroni<sup>6</sup> e, in particolare, degli atomi con due elettroni di valenza. In questo lavoro, Majorana identifica l'origine delle righe di assorbimento e di emissione osservate negli spettri ottici di questi atomi e introduce per la prima volta l'esistenza di stati autoionizzanti, aventi, cioè, energia superiore all'energia necessaria per estrarre un elettrone.

Altri due lavori riguardano una nuova forza di origine quantistica, detta forza di scambio, e i legami che si originano da essa. Tale forza è dovuta alla possibilità che due particelle si scambino fra loro. Il metodo è essenzialmente lo stesso utilizzato nel 1928 dai fisici tedeschi Walter Heitler e Fritz London per la molecola di idrogeno, ma adattato a sistemi più complessi<sup>5</sup>. Majorana calcola la distanza fra due atomi con tre elettroni (ione molecolare di elio,  $\text{He}_2^+$ )<sup>3</sup> e le frequenze di oscillazione degli atomi attorno alla distanza di equilibrio, ottenendo un ottimo accordo con i dati sperimentali. Inoltre, ricava l'energia dello stato fondamentale e dello stato eccitato della molecola, in un così buon accordo con i risultati sperimentali da essere giudicato da lui stesso sorprendente.

L'ultimo lavoro di fisica atomica di Majorana<sup>7</sup> riguarda un problema che gli era stato posto da Segrè, il quale aveva eseguito

«Di lontano appariva  
smilzo, con un'andatura  
timida e quasi incerta;  
da vicino si notavano  
i capelli nerissimi,  
la carnagione scura,  
gli occhi vivacissimi  
e scintillanti: nell'insieme  
l'aspetto di un saraceno»

da un ricordo di Edoardo Amaldi

alcuni esperimenti nel gruppo di Otto Stern ad Amburgo sul comportamento, in presenza di campi magnetici, degli atomi con momento angolare intrinseco (o *spin*, associato alla rotazione dell'atomo attorno al proprio asse), pari a 1/2. Poiché lo spin di un atomo è sempre accompagnato da un momento magnetico, in un campo magnetico costante l'atomo si orienta. Se il campo magnetico varia nel tempo oscillando attorno al valore nullo (cambiando quindi continuamente verso), l'orientazione si può invertire (ribaltamento). La trattazione di tale effetto è limpida ed elegante e conduce alla possibilità di calcolare la probabilità di ribaltamento del momento magnetico intrinseco (*spin flip*). Questo risultato, denominato in seguito *effetto Majorana*, è oggi di grande importanza e ha un ruolo primario nei sistemi che concentrano un grande numero di atomi a bassissime temperature mediante campi magnetici che variano nello spazio (trappole magnetiche). Nel 1995, tali sistemi hanno consentito di ottenere un nuovo stato di condensazione della materia, già previsto da Bose e Einstein nel 1925.

In tutti i lavori di Majorana è notevole lo stretto legame tra teoria ed esperimenti: come per Enrico Fermi, anche per Majorana l'obiettivo principale è sempre la spiegazione completa dei fenomeni che l'esperienza propone.

Dopo il 1931, gli interessi di Majorana si spostano gradualmente su problemi di fisica nucleare, in linea con i nuovi obiettivi del gruppo di Fermi. In questi anni sviluppa una teoria delle forze che legano protoni e neutroni (che lui chiama protoni neutri) nel nucleo. Fermi ne è entusiasta; Majorana, però, non vuole pubblicare il lavoro, ritenendolo incompleto. Per incentivarlo a continuare le sue ricerche, Fermi gli procura una borsa di studio a Lipsia, dove trascorre l'anno 1933 e conosce Werner Heisenberg, al quale lo lega una grande amicizia.





Volume pubblicato dalla Società Italiana di Fisica (Sif) in occasione del centenario della nascita di Ettore Majorana. Il libro ripropone tutti i lavori di Majorana, nella lingua originale e nella traduzione inglese

In quello stesso anno, Heisenberg pubblica la sua teoria delle forze di scambio nei nuclei e apprezza in modo particolare il contributo di Majorana, in quanto migliora la sua definizione delle forze tra protoni e neutroni, assimilandole a quelle già studiate per lo ione molecolare di elio. Heisenberg riesce quindi a convincere Majorana a pubblicare il lavoro, che diviene ben presto un pilastro concettuale della fisica nucleare<sup>9</sup>. La forza tra protoni e neutroni, infatti, ha un ruolo di primaria importanza: impedisce il collasso del nucleo e ne spiega la stabilità in relazione al numero complessivo di protoni e neutroni (genericamente, *nucleoni*). Le forze nucleari di Majorana e Heisenberg, quindi, forniscono la spiegazione più profonda delle cosiddette interazioni forti, responsabili dell'esistenza stessa dei nuclei atomici.

Poco prima di andare a Lipsia, Majorana pubblica una teoria relativistica delle particelle con spin arbitrario<sup>8</sup> (intero o semiintero). Ogni particella esistente è caratterizzata da un valore dello spin (e quindi del momento magnetico a esso associato); gli elettroni, i protoni e i neutroni, ad esempio, hanno spin 1/2, i fotoni di luce, invece, hanno spin 0. Contrariamente alla teoria di Dirac per gli elettroni, la quale ammette l'esistenza dell'elettrone positivo (positrone, o antielettrone),

«Ho un solo desiderio:  
che non vi vestiate di nero.  
Se volete inchinarvi all'uso,  
portate pure,  
ma per non più  
di tre giorni,  
qualche segno di lutto.  
Dopo ricordatemi,  
se potete,  
nei vostri cuori  
e perdonatemi»

Da una lettera di Majorana ai familiari

la meccanica quantistica relativistica generale costruita da Majorana non contiene gli stati di energia negativa. In un secondo tempo la scoperta del positrone e delle altre antiparticelle confermerà l'effettiva esistenza degli stati a energia negativa, che non compaiono nella formulazione di Majorana. La teoria di Majorana, tuttavia, è di fondamentale importanza e anticipa ogni moderna teoria in grado di descrivere compiutamente le varie particelle.

Dopo il ritorno dalla Germania, alla fine del 1933, la salute di Majorana è gravemente compromessa, e i suoi interessi si spostano dalla fisica alla filosofia, la medicina e le scienze sociali.

Alla fine del 1937, Fermi lo convince a partecipare al concorso per una cattedra di fisica teorica. Per l'occasione, Majorana pubblica un nuovo lavoro<sup>10</sup>, probabilmente scritto anni prima, nel quale analizza la *radioattività beta* dovuta al decadimento di particolari nuclei atomici. Il decadimento beta è accompagnato dall'emissione di un elettrone e la contemporanea emissione di un *neutrino*, una particella di massa nulla. La teoria di Majorana prevede, tra l'altro, la possibilità di un *doppio decadimento beta*, nel quale verrebbero emessi due elettroni senza produzione di neutrini, per la cui osservazione sono oggi in corso esperimenti (Cfr. *Cuore*, in controcopertina, [n.d.r.]).

Un ultimo lavoro<sup>11</sup>, pubblicato postumo per l'interessamento dell'amico Giovanni Gentile jr., riguarda la rilevanza delle teorie statistiche della fisica per le scienze sociali, a testimonianza degli interessi di Majorana nell'ultimo periodo della sua vita. Anche le idee di questo lavoro anticipano concezioni oggi di attualità, che usano concetti di fisica per lo studio di problemi economici e dei fenomeni sociali.

Majorana viene nominato professore *per chiara fama* alla fine del 1937 e nel gennaio dell'anno seguente inizia il suo corso di lezioni all'Università di Napoli. Il 26 marzo 1938 è atteso a Napoli, dove dovrebbe arrivare con la nave sulla quale si è imbarcato a Palermo la sera prima. Allo sbarco, però, non si fa trovare e sparisce per sempre. Il mistero sulla sua scomparsa è sempre rimasto vivo, nel dubbio tra il suicidio in mare e il ritiro in convento. Dal giorno della sua sparizione, però, sono state formulate molte altre fantasiose ipotesi.

Ciò che forse è più importante, e che emerge dalle sue lettere e dalle testimonianze di chi lo ha conosciuto, è la nobiltà del suo animo e la sua profonda generosità. L'affetto per i genitori e i parenti e per gli amici è evidente e sincero. Nell'ultima lettera allo zio Quirino Majorana, scritta poco prima della scomparsa, si scusa di non avere potuto fargli visita a Roma e riferisce esplicitamente di essere stato 'alquanto male'. In precedenza, Majorana aveva chiesto allo zio di intervenire per evitare che un banale errore di consegna causasse il licenziamento di un postino siciliano, padre di famiglia. Trovava modo, quindi, di occuparsi dei problemi di altri, nonostante le sue condizioni di salute.

A un secolo dalla sua nascita, Ettore Majorana suscita sentimenti profondi in chi ha studiato la sua opera scientifica e in chi si è avvicinato al suo modo di essere e ne ha

## Lectures consigliate

E. AMALDI, *La vita e l'opera di Ettore Majorana (1906-1938)*, Accademia dei Lincei, Roma, 1966. In traduzione inglese, "Strong and weak interactions, Present Problems", a cura di A. Zichichi (New York, 1966).

E. RECAMI, *Il caso Majorana*, 2ª edizione, Mondadori, Milano 1991.

E. RECAMI, *Ricordo di Ettore Majorana a sessant'anni dalla sua scomparsa: l'opera scientifica edita e inedita*, Quaderni di Storia della Fisica, n. 5, 19-68 (1999), Società Italiana di Fisica, Bologna.

ETTORE MAJORANA, *Lezioni all'Università di Napoli*, Bibliopolis, Napoli, 1987

ETTORE MAJORANA, *Scientific Papers*, Società Italiana di Fisica, Bologna, 2006.

apprezzato la sensibilità e l'umanità. Il dramma finale della sua scomparsa induce a riflettere sul mistero dell'esistenza umana e sulla profondità insondabile dell'anima di un grande uomo.

Franco Bassani  
presidente della Società Italiana di Fisica  
gbassani@sns.it

## Le pubblicazioni di Ettore Majorana

### 1928

[1] *Sullo sdoppiamento dei termini Roentgen ottici a causa dell'elettrone rotante e sulla intensità delle righe di Cesio* (in collaborazione con G. Gentile Jr.), «Rendiconti Accademici Lincei», vol. 8, pp. 229-233.

### 1929

[2] *Ricerca di un'espressione generale delle correzioni di Rydberg valevole per atomi neutri o ionizzati positivamente* «Nuovo Cimento», vol. 6, pp. 14-16 (comunicazione presentata al congresso Sif di Roma del 1928).

### 1931

[3] *Sulla formazione dello ione molecolare di elio*, «Nuovo Cimento», vol. 8, pp. 22-28.

[4] *I presunti termini anomali dell'elio*, «Nuovo Cimento», vol. 8, pp. 78-83

[5] *Reazione pseudopolare fra atomi di idrogeno*, «Rendiconti Accademici Lincei», vol. 13, pp. 58-61.

[6] *Teoria dei tripletto P' incompleti*, «Nuovo Cimento», vol. 8, pp. 107-113.

### 1932

[7] *Atomi orientati in campo magnetico variabile*, «Nuovo Cimento», vol. 9, pp. 43-50.

[8] *Teoria relativistica di particelle con momento intrinseco arbitrario*, «Nuovo Cimento», vol. 9, pp. 335-344.

### 1933

[9] *Über die Kertheorie*, «Zeitschrift für Physik», vol. 82, pp. 137-145.

*Sulla teoria dei nuclei*, «La Ricerca Scientifica», vol. 4 (1), pp. 559-563.

### 1937

[10] *Teoria simmetrica dell'elettrone e del positrone*, «Nuovo Cimento», vol. 14, pp. 171-184.

### 1942

[11] *Il valore delle leggi statistiche nella fisica e nelle scienze sociali*, «Scientia», vol. 36, pp. 57-66 (pubblicazione postuma, a cura di G. Gentile Jr.).





Asimmetrie  
Rivista dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare  
anno II numero 3 - dicembre 2006

Direttore responsabile  
Roberto Petronzio, presidente Infn

Comitato Scientifico  
Angelo Scribano (presidente), Roberta Antolini,  
Roberto Battiston, Ugo Braico,  
Giorgio Chiarelli, Gianni Fiorentini,  
Silvia Giromini, Giuseppe Pappalardo, Andrea Vacchi

Redazione  
Cecilia Migali  
Catia Peduto  
Francesca Scianitti  
Antonella Varaschin

Hanno collaborato a questo numero:  
Nicola Cabibbo, Franco Bassani, Gianluigi Fogli,  
Barbara Gallavotti, Eligio Lisi, Emilio Migneco

Progetto grafico e impaginazione  
D.D.D. Srl.

Stampa  
Arti grafiche, Pomezia, per D.D.D. Srl  
su carta riciclata priva di cloro

Registrazione del Tribunale di Roma n. 435/2005  
dell'8 novembre 2005  
Rivista trimestrale, pubblicata da Nuova Argos  
© testi, Infn Roma

ISSN 1827-1383

Crediti iconografici  
Copertina: Opera ©Infn; controcopertina: Cuore  
©Infn; pp. 4-9: Superkamiokande ©Kamioka  
Observatory, ICRR, University of Tokyo;  
Decadimento beta del neutrone ©Internosei;  
Oscillazione di neutrini ©Internosei / pp. 10-13:  
Cabibbo ©Infn; Diagramma di Feynman - Modello  
Standard ©Internosei / pp. 14-15: Boxerino ©Infn/  
pp. 16-21: Malani ©Cern; Diagramma Kamiokande  
© Internosei; Gran Sasso ©Infn; Cern ©Cern;  
Diagramma fascio di neutrini ©Internosei;  
Opera ©Infn; installazione magneti Sps ©Cern;  
tubo ©Cern / pp. 22-27: Junction box - torre  
a bordo della nave deliri ©Ivan Perrone;  
altre immagini ©Infn / pp. 28-31: Majorana ©Sif;  
Copertina "Ettore Majorana Scientific Papers" ©Sif.

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

## Per contattarci:

Infn - Presidenza  
00186 Roma - Piazza dei Caprettari, 70  
[www.infn.it](http://www.infn.it)  
[comunicazione@presid.infn.it](mailto:comunicazione@presid.infn.it)

