

GUARDARE IL MONDO CON I NEUTRINI: IL SOLE, LA TERRA E L'UNIVERSO

MARCO PALLAVICINI (*)

Nota presentata dal s.c. Gianpaolo Bellini
(Adunanza del 16 dicembre 2021)

SUNTO. – I neutrini sono i componenti elementari conosciuti più sfuggenti e ubiqui dell'Universo. Ipotizzati da Wolfgang Pauli nel 1930 e poi elaborati teoricamente da Enrico Fermi ed Ettore Majorana negli anni successivi, sono stati scoperti sperimentalmente nel 1956 e da allora non hanno mai smesso di sorprenderci con le loro, a volte sconcertanti, proprietà. Ne esistono tre tipi diversi tra loro che possono trasformarsi uno nell'altro, privi di carica elettrica, leggerissimi ma dotati di una piccolissima massa, almeno un milione di volte inferiore a quella dell'elettrone. Pur avendo indicazioni certe sul fatto che una massa la posseggono, ancora oggi non sappiamo quanto pesano. In natura sono copiosamente emessi dal Sole e dalle stelle, dal nucleo delle galassie più attive e dal nostro pianeta sono stati prodotti in tale abbondanza nei primi istanti del Big Bang al punto da permeare di neutrini l'Universo intero. Sono anche prodotti in grande numero dai reattori nucleari e dagli acceleratori di particelle, che ci consentono studi accurati e controllati. I neutrini emessi dalle sorgenti naturali sono messaggeri insostituibili sulle sorgenti stesse e sui meccanismi fisici che li generano. Questa nota riassume le principali tappe della storia dei neutrini, le loro più cospicue proprietà e soprattutto quanto sia stato possibile imparare sulle stelle, sulla Terra e sul Sole grazie a loro. Particolare attenzione sarà data ai recenti risultati ai Laboratori Nazionali del Gran Sasso ottenuti dall'esperimento Borexino che, per mezzo dei neutrini, ha completato per la prima volta nel 2020 lo studio di tutte le reazioni di fusione nucleare che avvengono nel Sole, inclusa quella, minoritaria ma importantissima, catalizzata dalla presenza di Carbonio, Azoto e Ossigeno nel nucleo del Sole.

(*) Dipartimento di Fisica dell'Università degli Studi di Genova e INFN, Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Genova, Italy. E-mail: marco.pallavicini@unige.it

ABSTRACT. – Neutrinos are the most elusive and ubiquitous known building blocks in the Universe. Predicted by Wolfgang Pauli in 1930 and then theoretically elaborated by Enrico Fermi and Ettore Majorana in the following years, they were discovered experimentally in 1956 and since then they have never ceased to surprise us with their, sometimes disconcerting, properties. There are three different types that can transform into each other, devoid of electric charge, very light but with a very small mass, at least a million times lower than that of the electron. Although we know that they have a mass, we still do not know how much they weigh. In nature they are abundantly emitted by the Sun and stars, from the nucleus of the most active galaxies and from our planet they were produced in such abundance in the first moments of the Big Bang to the point of permeating the entire Universe with neutrinos. They are also produced in large numbers by nuclear reactors and particle accelerators, which allow us accurate and controlled studies. The neutrinos emitted by natural sources are unique messengers about the sources themselves and about the physical mechanisms that generate them. This note summarizes the main steps in the history of neutrinos, their most conspicuous properties and above all how much it has been possible to learn about the stars, the Earth, and the Sun thanks to them. Particular attention will be given to the recent results at the Gran Sasso National Laboratories obtained from the Borexino experiment which, by means of neutrinos, completed for the first time in 2020 the study of all nuclear fusion reactions that take place in the Sun, including that, minority but very important, catalyzed by the presence of Carbon, Nitrogen and Oxygen in the Sun's core.

1. INTRODUZIONE: BREVE STORIA DEL NEUTRINO

La fisica dei neutrini affonda le sue radici negli anni a cavallo dei secoli XIX e XX, quando Henry Becquerel nel 1896 scopre la radioattività. I rapidi progressi nel nuovo campo di ricerca, associati soprattutto ai nomi di Maria Skłodowska Curie, del marito Pierre e di Ernest Rutherford, consentono di identificare già nel primo decennio del secolo tre tipi di radiazioni emesse naturalmente da alcuni minerali particolarmente ricchi di Uranio e di Torio. Studi radiochimici pionieristici e quasi eroici per le condizioni materiali e anche sanitarie in cui furono condotti, condussero Maria e Pierre a isolare all'interno di questi minerali alcuni elementi chimici sconosciuti e particolarmente attivi (il Radio, il Polonio sono separati e studiati in quegli anni) e di comprendere che i tre tipi di radiazione (prosaicamente indicati con le lettere greche alfa, beta e gamma e da allora così chiamate ancor oggi) erano composte da oggetti noti: nel caso delle particelle alfa, di nuclei di elio energetici emessi da alcuni elementi pesanti; di elettroni molto energetici nel caso di quelle beta e di radiazioni elettromagnetiche di altissima frequenza (molto al di sopra della luce e anche di quella dei raggi X anch'essi appena scoperti da Röntgen pochi anni prima) per le radiazioni gamma.

Per la storia delle piccole particelle neutre i decadimenti beta sono il cuore del problema. Misure preliminari di Rutherford e del suo allievo James Chadwick in Inghilterra e misure più sistematiche condotte da Otto Hahn e Lise Meitner a Berlino prima della Grande Guerra evidenziano una stranissima proprietà: gli elettroni non sono emessi sempre con la stessa energia, ma secondo uno spettro energetico molto ampio, che parte da energia quasi nulla fino ad un valore massimo corrispondente a quello in realtà atteso. Per qualche ragione, misteriosa in quel momento, gli elettroni del decadimento beta sembrano violare il principio sacro della conservazione dell'energia, ed addirittura di farlo in modo erratico, quasi casuale. Un fatto inaccettabile per i fisici, a maggior ragione dopo le scoperte di Einstein sull'equivalenza massa-energia dedotta nel contesto della teoria della relatività, e che paradossalmente dal decadimento beta veniva in qualche modo confermata, essendo l'energia massima degli elettroni emessi esattamente uguale a quanto previsto dalla celeberrima equazione di Einstein. Qualcosa mancava nei primi decenni del secolo, ma nessuno aveva idea di cosa.

Il disagio dei fisici si acuisce negli anni '20, con il miglioramento ulteriore delle misure sullo spettro degli elettroni beta e con nuove scoperte. Nel 1927 Ellis e Wooster [1] perfezionano le misure di Chadwick, precisando da natura continua dello spettro degli elettroni e confermando l'apparente violazione della conservazione dell'energia. Lise Meitner, dopo un periodo di scetticismo, conferma le misure di Ellis e Wooster e la questione a fine anni '20 è assodata. Ma il problema si aggrava fino all'estremo quando le prime misure spettroscopiche sullo spin di alcuni nuclei, sviluppate negli anni '20 anche con il contributo importante di Franco Rasetti, dimostrano che in alcuni casi il decadimento beta coinvolge solo nuclei con spin 0. L'emissione di un singolo elettrone in tale condizione è vietata anche dall'altrettanto sacra e intoccabile conservazione del momento angolare, acuendo la crisi sino al culmine. In questo scenario, mentre fisici del calibro di Niels Bohr ancora considerano l'ipotesi di ammettere che nei processi nucleari beta le leggi di conservazione più fondamentali siano violate e altri come Debye si limitano a dire: «*Il decadimento beta? È come con le tasse, meglio non pensarci...*», arriva, sconcertante e liberatoria, una lettera di Wolfgang Pauli ai colleghi riuniti in conferenza a Tübingen nel dicembre 1930, nella quale scusandosi per la sua assenza dovuta al ballo di inizio anno accademico alla sua Università di Zurigo, getta le basi della fisica del neutrino:

*«Cari signori e signore radioattivi,
 Come il latore di queste righe, alla quale vi prego di prestare la massima attenzione, vi dirà meglio, cercherò di spiegarmi in modo più esatto, considerando le statistiche 'false' dei nuclei dell'N-14 e del Li-6, così come lo spettro beta continuo. Ho escogitato un rimedio disperato per salvare il "teorema dello scambio" di statistiche e il teorema dell'energia. Vale a dire c'è la possibilità che possano esistere nei nuclei particelle elettricamente neutre che mi piace chiamare neutroni, le quali hanno uno spin di 1/2 e obbediscono al principio di esclusione e, in più, differiscono dai quanti di luce nel senso che non viaggiano alla velocità della luce: la massa del neutrone deve essere dello stesso ordine di grandezza della massa dell'elettrone e, in ogni caso, non superiore a 0,01 della massa del protone. Lo spettro beta continuo diventerebbe allora comprensibile in base al presupposto che nel decadimento beta un neutrone venga emesso insieme all'elettrone, in modo tale che la somma delle energie del neutrone e dell'elettrone resti costante. [...] Ma non mi sento abbastanza sicuro di pubblicare qualcosa riguardo a questa idea, così per prima mi rivolgo con fiducia a voi, cari radioattivi, con una questione in merito alla situazione concernente la prova sperimentale di un tale neutrone, se abbia qualcosa come circa dieci volte la penetrante capacità di un raggio gamma. Ammetto che il mio rimedio può sembrare di avere una piccola probabilità a priori, perché i neutroni, se esistono, probabilmente sarebbero stati visti molto tempo fa. Tuttavia, solo chi scommette può vincere, e la gravità della situazione dello spettro beta continuo può essere resa in modo chiaro con il detto del mio onorato predecessore in carica, Mr. Debye, [...] "È meglio non pensarci affatto, come le nuove tasse." [...] Così, cari radioattivi, mettetelo alla prova e giudicate.....Con tanti saluti a voi, anche a Mr. Back, il vostro devoto servitore. »*

W. Pauli

La lettera è la prima menzione del neutrino nella storia della fisica, e non sarà mai trasformata in un articolo compiuto. Pauli aveva gettato il sasso ma i tempi non erano maturi per andare oltre. Si limita a discuterla coi colleghi e a presentarla ad alcune conferenze, tra cui quella di Roma del 1931 organizzata da Enrico Fermi e Guglielmo Marconi e poi anche a quella di Solvay del 1932.

A Solvay si discute del neutrone, il componente del nucleo atomico appena scoperto da Chadwick [2], e della radioattività artificiale indotta dalle particelle alfa scoperta da Irene Joliot-Curie, la figlia di Marie, e il marito Frédéric Joliot. Fermi ascolta, discute l'idea di neutrino e di neutrone, e torna a casa con un'idea folgorante. Mettendo insieme queste due particelle appena scoperte o ipotizzate e mettendo a frutto la sua straordinaria conoscenza dell'appena nata Elettrodinamica Quantistica,

la teoria quantistica degli elettroni e della luce, elabora il cuore della moderna teoria delle forze deboli [3], ipotizzando che nel decadimento beta non solo elettroni e neutrini escano insieme come proposto da Pauli, ma che questo avvenga per creazione diretta dal vuoto all'interno del nucleo, esattamente come i fotoni sono creati o assorbiti dagli atomi in elettrodinamica. Fermi inventa la teoria quantistica dei campi, il modello concettuale con cui ancora oggi descriviamo il mondo microscopico degli atomi, dei nuclei atomici e delle particelle elementari.

La teoria di Fermi offre al neutrino un'elegante collocazione teorica, ma pone anche un problema gravissimo. Secondo i calcoli, avviati da Fermi ma poi sviluppati da altri tra cui Peierls e Bethe, i neutrini sono particelle dalle interazioni debolissime e, per la tecnologia degli anni '30, virtualmente impossibili da rivelare. Un problema serio, anche concettuale, che fa scrivere a Pauli nei suoi diari ritrovati anni dopo: *«oggi ho fatto una cosa terribile, ho inventato una particella che non si può rivelare»*¹.

Il problema sarà risolto a cavallo tra gli anni '30 e '40 e poi dalla forte accelerazione degli sviluppi di fisica nucleare associati alla Seconda guerra mondiale e al progetto Manhattan, che dimostreranno l'esistenza di due sorgenti di neutrini, una artificiale e una naturale, sufficientemente intense da poter essere rivelabili: i reattori nucleari e il Sole.

La fisica dei reattori inizia nel 1942, quando Enrico Fermi a Chicago accende la prima pila atomica, un dispositivo capace di produrre energia dalla fissione dell'Uranio. Il processo di fissione produce molti nuclei instabili che spesso decadono per processi beta con una copiosa produzione di neutrini. In media ogni fissione produce una cascata di decadimenti a cui sono associati circa sei neutrini, per cui complessivamente un reattore è una sorgente formidabile, circa 10^{21} neutrini al secondo per ogni GW di potenza termica. Sarà proprio con i reattori, nel 1956, che il neutrino sarà finalmente scoperto sperimentalmente, avviando un campo di ricerca assai vitale ancora oggi.

In parallelo allo sviluppo delle tecnologie nucleari, le conoscenze sul nucleo aprono la via alla comprensione delle stelle. L'invenzione dello spettrometro di massa aveva portato Ashton e i suoi collaboratori

¹ Questa citazione è riportata quasi ovunque. Non ho trovato la fonte originale, ma la riporto ugualmente nel testo perché, se anche risultasse apocrifia, ben rappresenta lo spirito del tempo e anche l'atteggiamento ondivago di Pauli dal 1930 sino alla definitiva scoperta del neutrino avvenuta nel 1956.

a misurare con precisione la massa degli atomi noti, dimostrando che un atomo di elio era significativamente più leggero di quattro atomi di idrogeno. Un fatto apparentemente banale, ma che suggerisce a Ernest Rutherford che la fonte primaria di energia del Sole potesse essere la fusione di idrogeno in elio. Nessuno negli anni '20 può azzardare ipotesi fondate sul meccanismo, ma le cose cambiano negli anni '30, con la scoperta del nucleo, lo sviluppo della meccanica quantistica e l'elaborazione teorica dell'effetto tunnel. È ancora Rutherford a completare il primo esperimento di laboratorio realizzando la fusione di due nuclei di deuterio in uno di elio e con questi ingredienti si capisce come la fusione di idrogeno in elio sia possibile e possa effettivamente fornire abbastanza energia da tenere il Sole acceso per miliardi di anni. Carl Friedrich von Weizsäcker e soprattutto Hans Bethe [4] forniscono i primi elementi, ideando i cicli fondamentali capaci di produrre energia, poi sviluppati in dettaglio nel dopo guerra fino ai lavori definitivi di W. Fowler [5], che estende il modello non solo al Sole ma a tutte le stelle, inclusa la loro evoluzione e la produzione degli elementi più pesanti. Studi che beneficeranno molto dell'enorme sforzo americano e sovietico per la costruzione di bombe a idrogeno.

Questi studi spiegano teoricamente l'origine dell'energia solare ma soprattutto dimostrano che il Sole produce un numero gigantesco di neutrini, sufficienti per poter essere rivelati anche da Terra.

Nel 1956 Frederick Reines e Clyde Cowan [6] scoprono i neutrini emessi da un reattore nucleare, confermandone l'esistenza e soprattutto dimostrando che la loro osservazione sperimentale è possibile. Pochi anni dopo, Lederman, Schwartz e Steinberger [7] completano il quadro, rivelando neutrini prodotti da un acceleratore di particelle e dimostrando al contempo che ne esistono due tipi diversi chiamati neutrino elettronico e neutrino muonico (il terzo, detto neutrino tauonico, arriverà negli anni '90).

A metà anni '60 tutto è pronto per iniziare la caccia al neutrino solare.

2. I NEUTRINI E LA LORO RIVELAZIONE

I neutrini sono fra le più interessanti ed elusive particelle elementari del Modello Standard, la teoria quantistica che descrive la struttura della materia conosciuta e delle forze che la governano. Sappiamo con

ragionevole certezza che sono almeno tre, che hanno una massa molto piccola (almeno un milione di volte inferiore a quella dell'elettrone) e che propagandosi nel vuoto possono, in certe condizioni, trasformarsi da un tipo in un altro per mezzo di un raffinato processo quantistico detto "oscillazione dei neutrini". I neutrini restano però, per moltissimi importanti aspetti, misteriosi.

La ragione principale è che sono difficili da rivelare perché sono le uniche particelle note sensibili alla sola interazione nucleare debole. Tutte le altre particelle (come, per esempio, l'elettrone) sono soggette a forze elettromagnetiche e, nel caso dei quark, anche alle forze nucleari forti.

I neutrini invece sentono solo le forze deboli e questo complica di molto la faccenda perché la forza debole si chiama così per ottime ragioni: le forze fra i neutrini e la materia ordinaria sono straordinariamente piccole, rendendo la probabilità di collisione fra un neutrino e un elettrone o un nucleo atomico immensamente inferiore a quella, ad esempio, di quella che avrebbe un elettrone o un fotone. Se un elettrone entra in acqua interagisce e viene assorbito dall'acqua entro alcune decine di cm al massimo, a seconda della sua energia. Un neutrino in analoghe condizioni viaggia in media per distanze enormi prima di collidere, fino a un anno luce a energie basse. Come dire, sostanzialmente la materia è trasparente ai neutrini. Il Sole in neutrini brilla anche di notte perché il pianeta Terra è trasparente.

Il lettore può allora giustamente chiedersi come facciamo a studiare una particella così solipsista e poco propensa a interagire col mondo e, ancor più, forse, domandarsi che cosa ci sia di così interessante in loro.

La risposta alla prima domanda sta nella disponibilità di sorgenti di neutrini molto intense. È vero che la probabilità che un neutrino sia catturato da un rivelatore è straordinariamente piccola, ma se il numero di neutrini è abbastanza grande qualcuno ogni tanto finisce nella rete.

Dal Sole, dal cosmo e dal pianeta Terra arrivano naturalmente enormi flussi di neutrini. Per esempio, il Sole ce ne offre 60 miliardi al secondo per cm², un numero gigantesco che ha consentito di realizzare importanti esperimenti. In primo luogo, con tecniche radiochimiche, come quella proposta da Bruno Pontecorvo nel 1946 e poi implementata con straordinaria pazienza e dedizione da Raymond Davis dal 1970 alla fine degli anni '90 [8] o come quella adottata dagli esperimenti Gallex e GNO ai Laboratori Nazionali del Gran Sasso [9] e replicata in Russia dall'esperimento SAGE [10]. Questa prima generazione di

esperimenti ha confermato l'esistenza dei neutrini solari ma anche osservato un flusso nettamente inferiore a quello atteso, costituendo quello che allora fu chiamato il problema dei neutrini solari. Tale problema fu confermato anche da esperimenti realizzati per mezzo di neutrini atmosferici prodotti dall'interazione di raggi cosmici nella stratosfera anche con i neutrini solari dall'esperimento giapponese KamioKANDE e dal suo sviluppo più grande e moderno chiamato Super-KamioKANDE negli anni '90 [11,12]. La soluzione del problema dei neutrini solari e la scoperta delle oscillazioni di neutrino come naturale spiegazione del deficit arrivano a cavallo del millennio, con la scoperta delle oscillazioni da parte di Super-KamioKANDE nel 1998 con i neutrini atmosferici e con i risultati dello Sudbury Neutrino Observatory (SNO) in Canada nel 2001, che ha dimostrato l'esistenza delle oscillazioni nei neutrini dal Sole portando al premio Nobel il canadese Art McDonald [13].

I neutrini sono le particelle di gran lunga più abbondanti dell'Universo: pensiamo che in ogni cm^3 di volume ce ne siano circa 400, una cenere del Big Bang teoricamente prevista e in attesa di conferma sperimentale. A questi aggiungiamo quelli dalle stelle, dalle esplosioni di supernova (che emette in 10 s più neutrini di quelli prodotti in tutta la sua vita di miliardi di anni), quelli provenienti direttamente dal cosmo, - osservati recentemente dalla collaborazione Ice Cube al polo Sud -, quelli prodotti dai raggi cosmici in atmosfera, - che hanno portato il giapponese Takaaki Kajita [12] al Nobel per la scoperta di oscillazioni di neutrino nel 1998 (diverse da quelle di McDonald) -, e poi quelli prodotti dalla Terra, studiati da un rivelatore in Giappone e con maggiore precisione da Borexino.

Studiamo i neutrini perché, seppur strani, leggerissimi e quasi invisibili, sono essenziali per spiegare l'Universo e la nostra stessa esistenza. Hanno influito nei primissimi istanti del Big Bang, nella formazione di strutture (Clusters di Galassie, Galassie, stelle), nel funzionamento delle stelle e nelle esplosioni di supernovae, a cui si deve la formazione di molti degli elementi chimici di cui sono fatte le molecole organiche e gli esseri viventi. Perfino i processi geotermici sono alimentati dalla radioattività nelle profondità del pianeta con abbondante produzione di neutrini. Sono evanescenti, ma noi e il mondo che conosciamo non esiteremmo senza di loro.

Le domande sui neutrini a cui dobbiamo ancora rispondere sono parecchie e non tutte facili, ma provo a riassumerle.

La prima è semplice. Quanto pesano i neutrini e quale fra loro è il più leggero? L'esistenza delle oscillazioni prova che la massa è piccolissima ma non nulla, ma non ci dice quanto. Il valore esatto è importante, non solo per completare le tabelle e aggiungere un numerino mancante, ma perché i neutrini sono davvero tanti e se la loro massa non fosse troppo piccola il loro impatto nell'evoluzione del cosmo potrebbe essere rilevante.

L'esperimento KATRIN [14], in Germania, è oggi il progetto più avanzato per la misura diretta della massa del neutrino, mentre JUNO [15] in Cina proverà nei prossimi anni a stabilire quale fra i neutrini sia il più leggero (senza determinarne la massa).

KATRIN dovrebbe essere sensibile a masse pari a un quinto di milionesimo della massa dell'elettrone. Non è detto che basti, ma mai dire mai, in fisica come nella vita. Se non basterà bisognerà perseverare e introdurre nuove idee, alcune delle quali in sviluppo in laboratori italiani, soprattutto a Milano, a Genova e ai Laboratori del Gran Sasso.

La seconda è più tecnica ma ancora più importante: neutrini e antineutrini sono particelle diverse?

Questa domanda risale agli anni '30, quando una delle più feconde e creative menti italiane, Ettore Majorana, ha proposto una teoria alternativa a quella avanzata pochi anni prima dal fisico teorico inglese Paul Dirac. Le particelle cariche seguono necessariamente la formulazione di Dirac, ma la domanda se il neutrino sia una "particella di Dirac" o una "particella di Majorana" è ancora aperta e attende risposta sperimentale.

Decine di esperimenti nel mondo cercano l'unico processo fisico nucleare noto che discerne i due casi (il cosiddetto "doppio decadimento beta senza neutrini") e l'Italia è in prima fila con due esperimenti di primissimo piano ai Laboratori Nazionali del Gran Sasso (GERDA [16] e CUORE [17]) a cui lavorano molti ricercatori italiani dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare e delle Università.

La domanda non ha valenza solo teorica né tantomeno è questione di bandiera. La rivelazione di questo processo guiderebbe lo sviluppo di nuove teorie oltre al Modello Standard, che sappiamo debbano esistere ma per le quali non sappiamo che direzione prendere.

La terza domanda può apparire sorprendente, ma è davvero un mistero: perché viviamo in un Universo fatto solo di materia? Il Modello Standard prevede che nel Big Bang si sarebbero dovute for-

mare in quasi uguale numero particelle e antiparticelle, ma questo non è accaduto. Ci sono stelle e galassie, non anti-stelle e anti-galassie.

I neutrini potrebbero aiutarci a capire perché, ma per saperlo dobbiamo misurare un parametro della teoria ancora sconosciuto. Sono oggi in atto misure di precisione con fasci di neutrini prodotti con acceleratori di particelle in Giappone e negli Stati Uniti e due nuovi mega-progetti sono stati approvati in entrambi i paesi: il progetto DUNE [18], che studierà neutrini prodotti al Fermilab in Illinois e li rivelerà a 1300 km di distanza in una miniera del South Dakota, e il progetto Hyper-Kamiokande [19], che studierà neutrini prodotti dal laboratorio J-PARK in Giappone e li rivelerà sotto una montagna a circa 230 km di distanza con un gigantesco rivelatore ad acqua. Anche in questo caso l'Italia è in prima fila. La competizione è forte, vinca il migliore.

3. LA RIVELAZIONE DEI NEUTRINI SOLARI E LA NOVITÀ DI BOREXINO

L'esperimento Borexino ai Laboratori Nazionali del Gran Sasso ha completato recentemente lo studio dei neutrini solari, misurando una ad una tutte le componenti note di neutrini emessi sia dalla catena protone-protone [20] [21] (a eccezione dei neutrini emessi dalla fusione di un protone con un nucleo di elio-3 che contribuiscono in modo risibile al flusso e oggi non rivelabile con le tecniche conosciute) e anche quelli del ciclo CNO [22], la fusione dei protoni in elio catalizzata dalla presenza di carbonio e ossigeno nel Sole.

Borexino è stato in funzione dal 2007 al 2021. Il suo rivelatore consiste in una sfera di acciaio racchiusa in una tanica più grande [23]. La tanica è riempita con acqua ultra-pura, la cui funzione è quella di schermare il cuore del rivelatore dalla radiazione proveniente dall'esterno.

La sfera sostiene al suo interno 2212 tubi fotomoltiplicatori (vedi *Fig. 1*), strumenti capaci di rivelare con alta efficienza singoli fotoni provenienti dal centro della sfera. All'interno della sfera due sottilissimi contenitori di nylon trasparente e ultra-puro separano il volume in tre parti, la più centrale delle tre è riempita con un liquido scintillatore che ha caratteristiche tali da emettere un debole segnale luminoso ogni volta che un neutrino o un altro evento di natura radioattiva deposita energia dentro il liquido. Gli altri due volumi sono riempiti anch'essi da

un liquido inattivo che scherma ulteriormente la parte centrale dalla radiazione esterna. Con questa configurazione il rivelatore protegge nel modo più efficace possibile il volume di liquido centrale (circa 300 tonnellate) da ogni forma di radiazione esterna. Il liquido stesso è la sostanza meno radioattiva mai realizzata dall'uomo. Tale risultato è stato frutto di quasi due decenni di ricerche e sviluppo atte a creare le tecnologie necessarie a purificare il liquido quasi 10 miliardi di volte al di sotto di qualunque sostanza reperibile in natura. Per mezzo di questo strumento unico la collaborazione Borexino ha potuto misurare e identificare uno ad uno per la prima volta tutti i neutrini solari. I risultati hanno avuto conseguenze scientifiche rilevanti, tra cui la scoperta sperimentale delle oscillazioni nella materia solare, il cosiddetto effetto MSW [24], ipotizzato dai teorici per spiegare i risultati degli esperimenti precedenti ma mai dimostrato sperimentalmente; la prima osservazione diretta e indipendente di tre su quattro della componenti di neutrini emessi dalla catena protone-protone, ovvero quelli associati al decadimento del berillio-7, del boro-8 e quelli associati alla fusione diretta di due protoni e un elettrone; e infine, la scoperta del ciclo CNO, il ciclo mai osservato prima nel Sole e essenziale per il funzionamento di tutte le stelle, soprattutto per quelle di grande massa.



Fig. 1. L'interno della sfera di Borexino prima del suo riempimento. Si vedono buona parte dei tubi fotomoltiplicatori che rivelano la luce emessa dall'interazione dei neutrini.

La straordinaria purezza di Borexino ha offerto l'opportunità di un'altra misura importante, quella dei neutrini emessi dalla Terra, i cosiddetti geo-neutrini.

La Terra deve parte del suo equilibrio termico interno alla presenza di elementi radioattivi nelle rocce della crosta. Questo fatto è noto da inizio secolo e numerose campagne geochimiche hanno mappato la composizione chimica della crosta sul pianeta stimando con una certa precisione la quantità degli elementi radioattivi presenti nelle rocce. Poco o nulla si sa però del contenuto di radioattività delle zone più profonde del mantello terrestre e del nucleo. Alcuni vulcani captano magma dagli strati superficiali del mantello, ma non vi sono tecniche note per sapere che cosa vi sia nel mantello centrale e inferiore, e ancor meno ci sono per il nucleo. Solo per mezzo di modelli teorici si possono fare delle stime, ma si tratta di modelli assai incerti. La misura di Borexino, pur non conclusiva, fornisce un'informazione nuova. Il flusso di geo-neutrini osservato mostra con grande livello di confidenza che il contributo della crosta non basta. I dati dicono che anche il mantello produce neutrini, dimostrando che anche lì vi è un contenuto di uranio e di torio superiore alle attese [25].

4. SN1987A

Il 23 febbraio del 1987 alle ore 7.35 dell'ora di Greenwich il rivelatore giapponese KamioKANDE [26], quello americano IMB [27] e quello Sovietico presso il lago di Baksan [28] hanno contestualmente osservato un eccesso di neutrini per un breve periodo di pochi secondi. Quasi contemporaneamente, una Supernovae è apparsa nel cielo australe (vedi *Fig. 2*), localizzata nella piccola nube di Magellano. SN1987A (il nome significa Supernova, avvenuta nel 1987, con la lettera A che significa che è la prima nella nostra galassia) è una delle poche supernovae esplose in prossimità della nostra galassia dell'era moderna e la prima dell'era tecnologica. È anche la prima e per ora unica ad essere osservata non solo per mezzo della luce ma anche attraverso i neutrini.

Le supernovae sono eventi rari. In una galassia come la nostra esplodono alcune stelle a secolo, anche se questo numero è piuttosto incerto. Sta di fatto che SN1987A è davvero un evento storico per la scienza, la nascita dell'astronomia a neutrini.



Fig. 2. Sanduleak-69 202 dopo l'esplosione (a sinistra) e prima. Il confronto delle immagini mostra con chiarezza anche all'occhio non esperto che per alcune settimane una supernova supera in luminosità la galassia che la ospita.

Le supernovae sono eventi di collasso stellare che avvengono quando una stella di grande massa (7-8 volte la massa del Sole) esaurisce il combustibile. Tali stelle nella loro vita attraversano varie crisi, in corrispondenza dell'esaurimento prima dell'idrogeno nel nucleo centrale, poi di quello dell'elio che brucia in carbonio, e poi via via verso nuclei più pesanti fino alla combustione del silicio. La prima fase è lunga, alcuni miliardi di anni, poi le fasi successive accelerano, fino alle ultime che durano alcuni giorni o addirittura ore. La fusione del silicio in ferro è l'ultima delle reazioni nucleari esotermiche, capaci cioè di fornire energia. Poi non vi sono più fonti energetiche possibili e il nucleo inizia a raffreddarsi. In pochi istanti la struttura centrale della stella, straordinariamente densa e soggetta ad un'enorme forza gravitazionale, non ha più abbastanza pressione interna da auto-sostenersi. Il nucleo collassa e se la massa è sufficiente nulla riesce a fermarlo, fino a che la densità e la temperatura sono tali da scindere completamente i nuclei formati e a fondere anche gli elettroni con i protoni. Un fenomeno che avviene in pochi secondi, a temperature immense (miliardi di gradi kelvin) e con un'inimmaginabile produzione di neutrini. In pochi secondi circa 10^{54} neutrini solo emessi dal nucleo, più di quelli che la stella aveva prodotto nei miliardi di anni

precedenti. È un numero così grande che si hanno ormai forti evidenze che i neutrini contribuiscano all'esplosione della supernova, un fatto davvero stupefacente, alla luce delle debolissime interazioni che i neutrini esercitano sulla materia. Ma il nucleo stellare in contrazione è così denso, e i neutrini sono talmente numerosi, che per uscire devono spingere, e questa spinta contribuisce (pare) in modo rilevante all'esplosione della stella.

Abbiamo imparato moltissimo da SN1987A, sia sulle stelle sia sui neutrini. Abbiamo avuto conferma dei meccanismi base di formazione delle stelle di neutroni, osservando un numero di neutrini consistente con qualche predetto dai teorici stellari anni prima (vedi Fig. 3). I neutrini sono arrivati alcune ore prima dei fotoni, per ragioni per nulla legate alla loro velocità ma perché hanno potuto fuoriuscire prima dal denso nucleo stellare in contrazione e poi in esplosione. Ma quattro ore su 100.000 anni sono davvero poche, e questo ha potuto confermare la piccolezza della massa del neutrino.

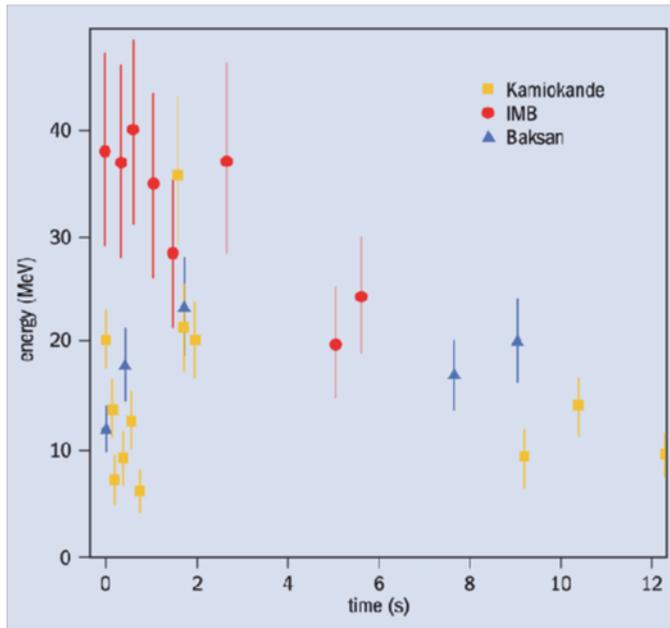


Fig. 3. Il numero di conteggi osservati dagli esperimenti KamioKANDE, IMB e Baksan nel 1987. Una manciata di neutrini emessi quando Homo Sapiens ha iniziato il suo cammino dalle savane africane e che hanno viaggiato per 100.000 anni fino a noi.

5. ASTRONOMIA A NEUTRINI

Dopo lo studio dei neutrini solari e l'osservazione di SN1987A un'altra sorgente astrofisica di neutrini è stata oggetto di intense ricerche ed infine di scoperta pochi anni fa.

È noto da più di un secolo che la Terra è continuamente inondata di particelle cariche di alta energia che colpiscono l'atmosfera e generano una pioggia di particelle secondarie collettivamente chiamate raggi cosmici. Le particelle primarie che entrano in atmosfera sono prevalentemente protoni, con una percentuale piccola di nuclei atomici più pesanti e una componente ancora minore di elettroni, positroni e fotoni. L'origine di questi raggi cosmici è ancora oggetto di studi, ma sappiamo che almeno in buona parte provengono dalle Supernovae stesse e, forse in misura molto minore ma estremamente importante alle energie più alte, dai cosiddetti nuclei galattici attivi, il cuore energeticamente attivo di alcune galassie che al loro centro ospitano un buco nero che è ancora in accrescimento e che quindi produce grandi quantità di energia ingoiando materia. Non sappiamo bene se e come i nuclei galattici attivi producano raggi cosmici e non è facile capirlo. Infatti, essendo i protoni e i nuclei particelle cariche, quando arrivano a Terra non indicano la direzione da cui provengono in quanto lungo il viaggio sono stati significativamente deviati dal campo magnetico presente nella nostra galassia e da quello pure presente nel mezzo intergalattico. Non abbiamo quindi modo di identificare le sorgenti da cui provengono osservandoli direttamente.

Per capire quindi l'origine dei raggi cosmici è quindi necessario usare altri mezzi ed in particolare sonde che non siano influenzate dai campi magnetici e che quindi conservino l'informazione della direzione da cui provengono. Ci sono due possibilità, ugualmente feconde e interessanti: i fotoni e i neutrini.

I fotoni non sono oggetto di questa nota, anche se sforzi importantissimi sono in corso in questa direzione. Gli osservatori di fotoni cosmici Hess e MAGIC hanno già dato informazioni preziose sulle molte sorgenti ed è in corso la costruzione del Cherenkov Telescope Array (CTA), un osservatorio astronomico di prossima generazione dislocato su due siti (uno nell'emisfero nord alle isole Canarie e uno nell'emisfero sud in Cile). I fotoni sono interessantissimi, ma possono darci informazioni importanti solo su sorgenti relativamente vicine oppure di enorme intensità; la ragione è che, per strano che sembri, il vuoto cosmico non è completamente trasparente ai fotoni di altissima energia associati ai raggi cosmici. Infatti,

l'intero universo è permeato da fotoni radio originatesi durante il Big Bang e questi fotoni, noti come il fondo cosmico a microonde, rendono opaco l'universo ai fotoni di energia più alta.

Per superare questa difficoltà, illustrata in figura, una via d'uscita è offerta dai neutrini. Tutti i meccanismi di accelerazione di protoni e nuclei devono essere accompagnati dalla produzione di varie particelle e di neutrini. Questi ultimi possono viaggiare l'intero universo senza interazioni, portando informazioni imperturbate anche dai siti più lontani.

Per rivelare neutrini di altissima energia di origine cosmica servono rivelatori di enormi dimensioni, dell'ordine di un chilometro cubo, ed è evidente che nessun apparato artificiale possa avere queste dimensioni. Per questa ragione i fisici si affidano alla natura, utilizzando come rivelatori i tre mezzi trasparenti alla luce disponibili in natura: il ghiaccio, l'acqua e l'aria.

Aria, acqua e ghiaccio hanno in comune la proprietà di essere sostanzialmente trasparenti alla luce Cherenkov emessa da particelle cariche veloci, per cui sono mezzi ideali per essere usati come bersaglio di interazioni di neutrini cosmici che, quando occasionalmente colpiscono un nucleo di ossigeno o di azoto o un protone in questi mezzi emettono particelle veloci che irradiano luce Cherenkov. Se grandi volumi d'acqua o di ghiaccio sono equipaggiati con opportuni rivelatori di luce (per esempio dei tubi fotomoltiplicatori del tipo di quelli usati da Borexino) posso realizzare rivelatori di dimensioni idonee all'osservazione dei neutrini cosmici.

Sebbene i primi tentativi per misurare i neutrini cosmici siano stati realizzati da esperimenti pionieristici in mare, il primo esperimento di successo è in corso nei ghiacci del polo sud e si chiama Ice Cube. In prossimità della base scientifica internazionale presente al polo è stato realizzato un magnifico rivelatore immergendo nel ghiaccio un grande numero di tubi fotomoltiplicatori, su distanze di molte centinaia di metri. Ice Cube ha potuto con certezza rivelare alcuni neutrini cosmici, avviando l'astronomia con i neutrini di alta energia. I ricercatori sperano di poter aggiungere al ghiaccio di Ice Cube la rivelazione in acqua in aria. Per quello che riguarda l'acqua l'Italia è in prima fila con il progetto Km³Net, che si propone di realizzare un rivelatore di un chilometro cubo nelle profondità marine al largo di Capo Passero in Sicilia. Alcuni rivelatori sono oggi già in mare perfettamente funzionanti e nel giro di alcuni anni ne saranno installate altri 130, portando Km³Net ad essere uno strumento competitivo con Ice Cube.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Ellis, C. D.; Wooster, W. A. (1927). “*The Continuous Spectrum of β -Rays*”. *Nature*. 119 (2998): 563–564.
- [2] Chadwick (1932), “The existence of a neutron”, Proc. R. Soc. London 136.
- [3] Fermi, E. (1933). “*Tentativo di una teoria dell'emissione dei raggi beta*”. *La Ricerca Scientifica*, anno IV, vol. II, N. 12.
- [4] Bethe, A. H. (1967) “*Energy production in stars*”, Nobel Lecture; Bethe, H. A. & Critchfield, C. L. (1938) “The formation of deuterons by proton combination”, *Phys. Rev.* 54, 248 (1938); Bethe, H. (1939) “*Energy production in stars*”, *Phys. Rev.* 55, 434 (1939).
- [5] Fowler A. W, (1983) “*Experimental and Theoretical Astrophysics: the quest for the origin of elements*”, Nobel Lecture.
- [6] Reines F. (1983), “*The neutrino: from Poltergeist to particle*”, Nobel Lecture.
- [7] Lederman L. (1988), “*Observations in particle physics from two neutrinos to the standard model*”, Nobel Lecture; Schwartz M (1988), “*The first high energy neutrino experiment*”, Nobel Lecture; Steinberger J. (1988), “*Experiments with high energy neutrino beams*”, Nobel Lecture.
- [8] Davis, R. Jr. (2002) “*A half-century of solar neutrinos*”, Nobel Lecture.
- [9] Anselmann, P. et al. (1992), “Solar neutrinos observed by GALLEX at Gran Sasso”, *Phys. Lett. B* 285, 376 (1992).
- [10] Abdurashitov, J. et al. (1994), “*Results from SAGE (the Russian-American gallium solar neutrino experiment)*”, *Phys. Lett. B* 328, 234 (1994).
- [11] Koshiba M. (2002), “*Birth of Neutrino Astrophysics*”, Nobel Lecture.
- [12] Kajita, T. (2015), “*Discovery of atmospheric neutrino oscillations*”, Nobel Lecture.
- [13] McDonald, A. (2015), “*The Sudbury Neutrino Observatory: Observation of Flavor Change for Solar Neutrinos*”, Nobel Lecture.
- [14] Aker M. et al. (2019), “Improved Upper Limit on the Neutrino Mass from a Direct Kinematic Method by KATRIN”, *Phys. Rev. Lett.* 123 (2019).
- [15] Fengpeng A. et al. (2016), “*Neutrino physics with JUNO*”, *J. Phys. G* 43 (2016) 3, 030401.
- [16] Agostini M. et al. (2020), “*Final Results of GERDA on the Search for Neutrinoless Double- Decay*”, *Phys. Rev. Lett.* 125 (2020) 25.
- [17] Adams D.Q. et al. (2020), “*Improved Limit on Neutrinoless Double-Beta Decay in ^{130}Te with CUORE*”, *Phys. Rev. Lett.* 124 (2020) 12, 122501.
- [18] Abi B. et al. (2020), “*Long-baseline neutrino oscillation physics potential of the DUNE experiment*”, *Eur.Phys.J.C* 80 (2020) 10, 978.
- [19] Bian J. et al. (2022), “*Hyper-Kamiokande Experiment: A Snowmass White Paper*”, Snowmass 2022 Contribution.
- [20] Agostini M. (2014), “*Neutrinos from the primary proton–proton fusion process in the Sun*”, *Nature N.* 512, 383.
- [21] Agostini M. (2018), “*Comprehensive measurement of pp-chain solar neutrinos*”, *Nature Vol.* 562, 505.
- [22] Agostini M. (2020), “*Experimental evidence of neutrinos produced in the CNO fusion cycle in the Sun*”, *Nature Vol.* 587, 577.

- [23] *Alimonti G.* (2009), “*The Borexino detector at the Laboratori Nazionali del Gran Sasso*”, *Nucl. Instr. & Meth.*, A600 (2009) 568.
- [24] *Wolfenstein, L.* (1978), “*Neutrino oscillations in matter*”, *Phys. Rev. D* 17, 2369 (1978); *Mikheyev, S. & Smirnov, A.* (1985), “*Resonant amplification of neutrino oscillations in matter and spectroscopy of solar neutrinos*”, *Sov. J. Nucl. Phys.* 42, 913 (1985).
- [25] *Agostini M. et al.* (2020), “*Comprehensive geoneutrino analysis with Borexino*”, *Phys. Rev. D* 101 (2020) 1, 012009.
- [26] *Hirata K. et al.* (1987), “*Observation of a Neutrino Burst from the Supernova SN 1987a*”, *Phys. Rev. Lett.* 58 (1987) 1490.
- [27] *Bionta R.M. et al* (1987) “*Observation of a Neutrino Burst in Coincidence with Supernova SN 1987a in the Large Magellanic Cloud*”, *Phys. Rev. Lett.* 58 (1987) 1494.
- [28] *Alekseev E.N. et al.* (1987), “*Detection of the Neutrino Signal From {SN1987A} in the {LMC} Using the Inr Baksan Underground Scintillation Telescope*”, *Phys. Lett. B* 205 (1988) 209-214.