

Giovanni Garberoglio

Neutrini, i messaggeri dalle scale estreme

ABSTRACT: Ever since neutrinos were hypothesized, the study of the somewhat surprising properties of these elementary particles not only vastly improved our knowledge of the subatomic world, but enabled the “observation” of otherwise inaccessible astrophysical phenomena, notably nuclear reactions at the Sun’s core. In this paper, we will present how theoretical and experimental investigations of these elusive particles contributed to extend our knowledge at the most extreme scales that we can access.

KEY WORDS: Neutrino, Subnuclear physics, Astrophysics.

RIASSUNTO: Fin da quando i neutrini sono stati ipotizzati, lo studio delle proprietà per certi versi sorprendenti di queste particelle elementari ha permesso di raffinare la conoscenza del mondo subatomico, oltre che permettere di “osservare” in maniera diretta fenomeni astrofisici altrimenti inaccessibili, come ad esempio le reazioni nucleari all’interno del nucleo del Sole. In questo articolo ripercorriamo brevemente come lo studio teorico e sperimentale di queste elusive particelle abbia contribuito ad estendere la nostra conoscenza alle scale più estreme cui riusciamo ad accedere.

PAROLE CHIAVE: Neutrini, Fisica subnucleare, Astrofisica.

Il 10 Aprile del 2019 l’esperimento KATRIN inizia la sua prima sessione di presa dati. In questo esperimento nuclei di trizio, l’isotopo radioattivo dell’idrogeno, vengono iniettati in una gigantesca camera a vuoto dove, grazie ad un uso sapiente di campi magnetici e rivelatori, l’energia dell’elettrone emesso dal decadimento viene accuratamente misurata. Lo scopo è quello di dedurre, grazie al principio di conservazione dell’energia, la distribuzione delle energie di quello che purtroppo non può essere facilmente misurato: l’ener-



1. Il viaggio del rivelatore KATRIN verso il luogo dell'esperimento.

gia del neutrino emesso nello stesso processo. Dall'analisi della distribuzione delle energie, l'esperimento proverà a dire la sua su una questione irrisolta da ormai 90 anni in fisica delle particelle: qual è la massa del neutrino?

Le difficoltà incontrate nell'affrontare questo interrogativo possono essere apprezzate dando un'occhiata alla camera a vuoto creata apposta per l'esperimento KATRIN. Nella figura 1 vengono mostrate le ultime fasi del trasporto della camera di rivelazione dalla città di Deggendorf, dove è stata costruita e testata, fino al laboratorio di Karlsruhe dove è stata installata e collegata alle sorgenti di trizio. Nonostante Deggendorf e Karlsruhe distino in linea d'aria circa 350 km, le strade che collegano questi paesi non erano adatte al trasporto di questo oggetto, pesante più di 200 tonnellate e delle dimensioni di 10 metri di altezza per 20 di lunghezza. La camera è stata quindi spedita via nave attraverso il Danubio fino alle coste del Mar Nero, dove è stata imbarcata su un cargo che l'ha portata, attraverso il Mediterraneo e l'Atlantico, fino al Mare del Nord per poi risalire il Reno diretta al porto di Leopoldshafen, distante "solo" 7 km da Karlsruhe. La percorrenza di quest'ultimo breve tratto ha richiesto non pochi accorgimenti.

Sebbene KATRIN sia uno dei pochi esperimenti dedicati a misurare con

precisione la massa del neutrino, sono in corso (e sono stati eseguiti negli ultimi anni) parecchi altri esperimenti per misurare con sempre maggiore precisione le varie proprietà di questa interessante, anche se per certi versi ancora misteriosa, particella. Alcuni hanno dimensioni titaniche, come IceCube, che prevede l'utilizzo di un volume di oltre un chilometro cubo di ghiaccio antartico per rivelare neutrini provenienti dallo spazio; altri si estendono per lunghissime distanze come OPERA, dove neutrini prodotti a Ginevra sono stati rivelati nei laboratori del Gran Sasso dopo aver percorso oltre 700 km attraverso la crosta terrestre; infine altri ancora, come l'esperimento di Daya Bay in Cina, usano la potenza di ben sei reattori nucleari.

Queste sono solo alcune delle ingegnose proposte attualmente realizzate o in fase di realizzazione per studiare sempre più in dettaglio questa particella (o meglio, queste particelle) le cui proprietà elusive e per certi versi ancora misteriose hanno accompagnato gran parte dello sviluppo della fisica e dell'astrofisica negli ultimi 50 anni.

La scoperta del neutrino

All'inizio degli anni '30 del secolo scorso la Meccanica Quantistica [Garberoglio 16] aveva fatto passi da gigante nella comprensione della struttura elettronica degli atomi e la frontiera della ricerca si era già spostata verso la struttura del nucleo atomico, ed in particolare della radioattività [Garberoglio 18]. Uno dei problemi sul tappeto era scoprire cosa avvenisse durante il cosiddetto decadimento β , in cui elettroni molto energetici venivano espulsi dal nucleo di certi atomi. Dai principi di conservazione dell'energia e della quantità di moto ci si sarebbe dovuti aspettare che ciascun nucleo radioattivo emettesse elettroni con una ben specifica energia, mentre le misure indicavano chiaramente che ciò non avveniva: l'energia degli elettroni emessi durante questo tipo di decadimento aveva una distribuzione continua.

Per spiegare questa osservazione Niels Bohr, sulla scia delle rivoluzioni concettuali alla base della nascita della Meccanica Quantistica, non si faceva problemi a proporre soluzioni drastiche, come ad esempio quella di rivedere la validità del principio di conservazione dell'energia. Ma questo entusiasmo iconoclasta non convinceva Wolfgang Pauli, che, dopo aver ripreso Bohr chiedendogli fino a quando “avesse intenzione di maltrattare la povera legge di conservazione dell'energia”, fece una proposta “disperata” in cui ipotizzava l'esistenza di un'ulteriore particella emessa durante il decadimento β ; le diede il nome di *neutrone* e ne descrisse a grandi linee le proprietà (nessuna carica

elettrica, spin $\frac{1}{2}$ e massa molto minore di quella dell'elettrone), dedotte in modo da rendere ragione delle osservazioni sperimentali.

Qualche anno più tardi, nel 1932, una particella per molti versi simile venne effettivamente scoperta da James Chadwick all'interno dei nuclei atomici, anche se fu subito chiaro che non era quella prevista da Pauli dal momento che la sua massa era di parecchio più grande di quella dell'elettrone (circa 1800 volte, praticamente uguale a quella del protone). Dopo un attimo di confusione venne proposto di mantenere il nome neutrone per la particella pesante (nome con cui la si indica tutt'oggi), mentre Enrico Fermi propose di chiamare la particella di Pauli *neutrino*. Anzi, fu lo stesso Fermi a proporre nel 1934 una teoria in grado di mettere d'accordo neutroni, neutrini e decadimenti β , la quale si rivelò capace di ricomporre in un'unica visione parecchie delle osservazioni allora disponibili su questo processo di decadimento: i neutroni presenti nel nucleo sono instabili e possono trasformarsi in un protone ed un elettrone (rispettando così il principio di conservazione della carica), trasformazione accompagnata dall'emissione di un neutrino (in modo da rispettare il principio di conservazione dell'energia e della quantità di moto).

La "caccia" all'osservazione diretta dei neutrini era quindi ufficialmente aperta. Ma questa si presentò come tutt'altro che un'impresa facile. La teoria di Fermi infatti era molto chiara: la "costante di accoppiamento" dei processi di decadimento β , ovvero la probabilità che avvenga un processo che crei o assorba un neutrino, era ridicolmente piccola. Certo osserviamo un sacco di decadimenti β da qualsiasi campione di materia radioattiva di dimensioni "umane" (grammi), ma solo perché il numero di atomi che possono decadere è *enorme* (dell'ordine del numero di Avogadro, ovvero 6×10^{23} , cioè centinaia di migliaia di miliardi di miliardi). Per osservare un neutrino direttamente è necessario "assorbirlo", invece che crearlo, e questo "assorbimento" deve avvenire in maniera controllata, in modo da essere sicuri che quello che si osserva sia dovuto al processo che si sta cercando invece che ad altri "spuri". Il valore molto basso della "costante di accoppiamento" fa sì che questi processi di assorbimento siano estremamente rari e quindi difficili da osservare.

Ci vollero quindi oltre 20 anni per arrivare alla rivelazione diretta di un neutrino, usando il processo "inverso" del decadimento β . Se in quest'ultimo un neutrone decade in un protone, un elettrone ed un neutrino, allora un neutrino che incida su un protone può trasformarlo in un neutrone e in un antielettrone. L'antielettrone così prodotto incontra molto presto gli elettroni presenti nella maniera, annichilandosi e formando due raggi γ di energia fissata, mentre il neutrone può interagire con nuclei di atomi specifici liberando a sua volta raggi γ di particolare energia. I raggi γ , che sono

“comune” radiazione elettromagnetica, possono essere rivelati facilmente; la coincidenza fra l’emissione γ dell’annichilazione e della cattura neutronica è un segnale preciso e diretto della cattura di un neutrino, e quindi può essere usato per rivelarlo. Questo esperimento fu eseguito con successo da Clyde Cowan, Frederick Reines e collaboratori nel 1956, e valse ai primi l’assegnazione del premio Nobel per la fisica nel 1995.

Famiglie di particelle elementari

Nel periodo in cui i neutrini furono rivelati, la fisica delle particelle elementari conobbe una grande espansione, dovuta in particolar modo alla possibilità di effettuare esperimenti precisi accelerando elettroni o protoni ad energie prefissate e facendoli scontrare gli uni con gli altri in maniera controllata. Dai prodotti di queste collisioni venne ben presto fuori una gran quantità di nuove particelle e l’analisi dei risultati di vari esperimenti diede origine a quello che è oggi considerato il *modello standard* delle particelle elementari e delle loro possibili interazioni.

Col procedere della classificazione delle particelle elementari fu ben presto chiara una struttura a tre copie (dette “famiglie”), la cui origine è tutt’ora misteriosa. La prima famiglia è formata dall’elettrone e dal neutrino “originale” (quello dei decadimenti β), oltre che da due quark chiamati up (u) e down (d) i quali sono i mattoni con cui sono formati protoni e neutroni e quindi tutta la materia ordinaria. La seconda famiglia, un pochino più esotica, è formata da una particella chiamata muone, che è sostanzialmente come un elettrone, solo che ha una massa circa 200 volte più grande, da un altro tipo di neutrino (noto come “neutrino muonico”) e da due quark chiamati strange (s) e charm (c) entrambi più pesanti dei quark up e down. Infine una terza famiglia comprende il mesone tau (il “fratello pesante” dell’elettrone e del muone, con una massa pari a quasi 3500 volte quella dell’elettrone), un terzo tipo di neutrino (“neutrino tauonico”) e altri due quark, beauty (b) e top (t) anche loro più pesanti dei corrispondenti quark delle altre famiglie. La scoperta di queste tre famiglie di particelle elementari fu premiata col premio Nobel per la fisica nel 1988.

Nella classificazione di queste famiglie la proprietà più caratteristica che differenzia le varie particelle è la loro massa, che cresce sistematicamente a seconda della famiglia. Per molto tempo però questa osservazione non aveva riscontro nel caso dei neutrini. Tutti i tentativi di misurarne la massa davano risultati compatibili col fatto che i neutrini avessero massa nulla (o comunque minore della risoluzione degli esperimenti messi a punto per misurarla). Questa non è una proprietà del tutto inusuale delle particelle elementari, dal momento che una delle più comuni, i fotoni ovvero i componenti della luce

e della radiazione elettromagnetica, godono della stessa caratteristica, la quale è legata al fatto che la loro velocità di propagazione è la massima possibile (la velocità della luce, appunto).

Neutrini dallo spazio

Nonostante le difficoltà incontrate nel misurare le proprietà dei neutrini, i vari tentativi di rivelare queste particelle in maniera sempre più efficiente hanno contribuito a produrre sorprese inaspettate in vari campi della fisica.

Neutrini dal Sole

Come accennato più sopra, i neutrini hanno una bassissima probabilità di interagire con la materia, talmente bassa per cui un neutrino dovrebbe attraversare *un anno luce* (cioè 9500 miliardi di chilometri) di piombo per avere una buona probabilità di essere assorbito. Dal momento che è impensabile costruire strumenti di misura così grossi, occorre rivolgersi a sorgenti particolarmente intense tali per cui, sebbene la probabilità di interazione sia bassa, l'enorme numero di particelle emesse faccia sì che almeno qualcuna riesca ad essere rivelata. Non ci è voluto quindi molto affinché l'interesse dei fisici si rivolgesse a quella che è in assoluto la sorgente più intensa di neutrini nelle nostre vicinanze: il Sole [Garberoglio 12], che produce un flusso di neutrini pari a 65 miliardi di particelle al secondo per ogni centimetro quadrato di superficie sulla Terra.

È ormai noto da parecchio tempo che all'origine dell'energia prodotta dal Sole ci sono reazioni di fusione nucleare che avvengono al suo interno. Dal momento che la nostra stella è costituita sostanzialmente da idrogeno ed elio [Garberoglio 18], gran parte delle reazioni nucleari coinvolgono la fusione di 4 nuclei di idrogeno per creare elio, ma questa non è l'unica possibilità. Date le alte temperature, è possibile formare anche nuclei più pesanti, e nel corso degli anni gli astrofisici hanno sviluppato parecchie teorie su quali possano essere i vari tipi di reazione nucleare che avvengono nel centro delle stelle una volta che raggiungano uno stato stazionario, come quello in cui la nostra stella si trova ormai da diversi miliardi di anni.

Sfortunatamente, date le condizioni "estreme" in cui queste reazioni avvengono (si stima che al centro del Sole ci sia una temperatura di decine di milioni di gradi, ed una pressione pari a qualche milione di volte la pressione atmosferica terrestre), una validazione "in laboratorio" di queste teorie risulta particolarmente ostica. Il problema principale non è tanto quello di innescare

reazioni nucleari di fusione, tanto è vero che questo processo fisico è stato ben presto usato per applicazioni militari, ma quello di farle avvenire nelle esatte condizioni presenti all'interno del Sole ed in maniera controllata. Per avere un'idea delle difficoltà incontrate in questo tipo di esperimenti può essere utile ricordare che si stima che reattori basati sulla fusione nucleare per produrre elettricità (che in certe condizioni potrebbero essere una sorgente pulita e rinnovabile di energia a basso costo) non diverranno operativi prima di altri vent'anni... e questa frase è stata ripetuta identica perlomeno negli ultimi trenta!

Date queste premesse, l'unico modo per verificare l'esattezza o meno delle teorie riguardanti l'origine dell'energia delle stelle sembrerebbe quindi quello di andare a misurare direttamente non solo il flusso dei neutrini solari, ma anche la loro distribuzione in energia. In questo caso, la bassissima probabilità di interazione dei neutrini con la materia risulta essere – da un certo punto di vista – una condizione favorevole. Nel loro viaggio dall'interno del Sole (dove vengono prodotti) fino al rivelatore i neutrini non interagiscono praticamente con niente, e possono quindi trasportare informazioni “di prima mano” su quello che avviene al centro della nostra stella. Lo stesso non si può dire dei fotoni (ovvero della luce che vediamo) perché quelli prodotti (come raggi γ) nelle stesse reazioni che producono neutrini, interagiscono molto fortemente con la materia – avendo un'interazione praticamente ogni centimetro – ed emergono dalla superficie del Sole come luce visibile, dopo un “viaggio” che si può stimare essere durato migliaia di anni. In queste condizioni, l'informazione che recano rispetto alla loro origine risulta praticamente nulla, essendo stata per così dire “lavata via” dalle innumerevoli interazioni casuali con la materia stellare.

I primi esperimenti volti a misurare il flusso di neutrini solari furono messi in opera già negli anni '70. Il primo di questi, coordinato da Raymond Davis Jr. e John Bahcall, si è svolto alla profondità di circa 1500 metri nella miniera di Homestake nel South Dakota, usando come mezzo rivelatore una vasca con 380 metri cubi di percloroetilene (un solvente usato nel lavaggio a secco). L'enorme quantità di liquido rivelatore era necessaria per aumentare il più possibile il numero di neutrini rivelati, mentre la disposizione sotterranea era necessaria per diminuire il più possibile l'interazione del cloro con altri tipi di radiazione che avrebbero falsato la misura.

L'idea alla base di questo esperimento era che i neutrini avrebbero interagito con i nuclei di cloro del solvente formando argon, un gas nobile che poteva essere poi estratto in maniera relativamente semplice. La quantità di argon sarebbe stata direttamente proporzionale al flusso (da misurare) dei

neutrini, alla quantità di solvente (noto) e alla probabilità di interazione (sostanzialmente nota e verificata in base alla teoria di Fermi). Per dare un'idea della precisione (e delle difficoltà) di questo esperimento basti pensare che ogni settimana di presa dati portava ad una conta di circa una *decima* di atomi di argon (e quindi di interazioni osservate).

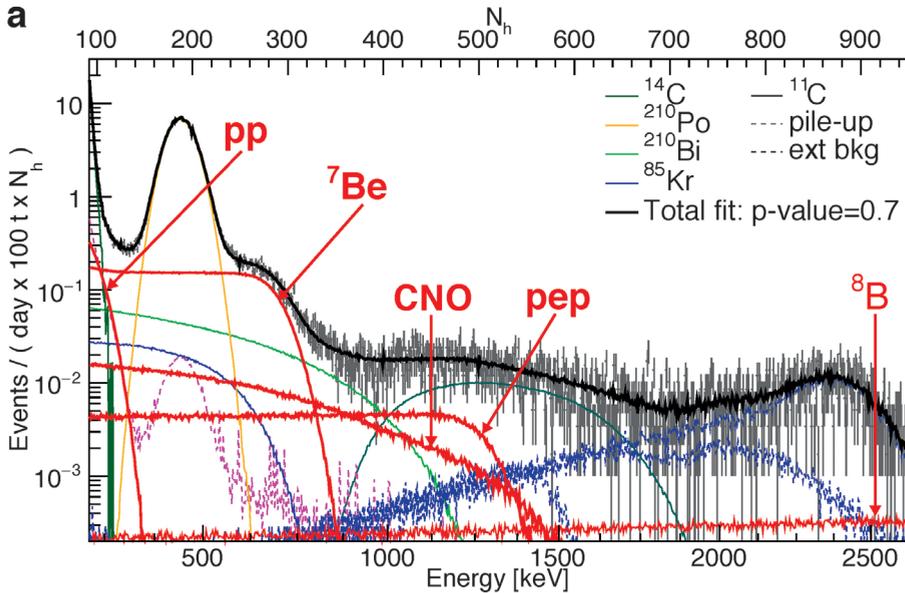
Purtroppo però, il numero di atomi di argon misurati era consistentemente pari a circa *un terzo* di quello che ci si aspettava, una discrepanza decisamente molto alta. Che stava succedendo?

Come sempre nella scienza, di fronte ad un risultato inaspettato (o clamoroso) c'è solo una cosa da fare: ricontrollare. I calcoli teorici, sia della produzione di neutrini dal Sole sia della probabilità di assorbimento da parte del cloro, vennero rapidamente confermati da vari gruppi teorici. Un po' più tempo fu necessario per mettere a punto altri apparati, il più possibile indipendenti da quello originario, per verificare se anche loro ottenessero lo stesso risultato. La misura del flusso di neutrini solari venne ripetuta in vari esperimenti, come il Kamiokande in Giappone (usando acqua come rivelatore), il SAGE in Russia ed il GALLEX in Italia (questi ultimi basati su una reazione nucleare nel germanio). In tutti i casi la discrepanza fu verificata: dal Sole arrivava circa un terzo dei neutrini previsti. Possibile che le teorie riguardo alla fusione dei nuclei leggeri fossero *così* sbagliate?

O forse stava succedendo qualcosa di cui non si era ancora tenuto conto?

Una delle possibilità più interessanti gettate sul piatto dai teorici era quella delle *oscillazioni dei neutrini*. In mancanza di dati certi, il modello standard aveva assegnato ai neutrini una massa nulla e come conseguenza, i neutrini avrebbero dovuto viaggiare alla velocità della luce. Tra le altre cose, questo implica il non poter avere nessun tipo di evoluzione dal momento della loro produzione al momento della loro rivelazione: tanti partono quanti arrivano (dal momento che la distanza fra noi ed il Sole è molto meno di un anno luce – sono solo 8 minuti – ed in mezzo c'è solo del tenuissimo mezzo interstellare, non certo piombo). Oltre a questo, gli esperimenti di Homestake, Kamiokande, SAGE e GALLEX erano per loro natura sensibili *solo* ai cosiddetti neutrini elettronici, gli unici prodotti dalle reazioni nucleari all'interno del Sole.

E se invece i neutrini avessero una massa? In questo caso i neutrini non solo non potrebbero viaggiare alla velocità della luce, ma sarebbe possibile immaginare situazioni in cui avrebbero potuto “oscillare”, trasformandosi gli uni negli altri con un periodo sostanzialmente proporzionale all'inverso delle differenze dei quadrati delle masse in gioco. Se questo fosse vero, allora si dovrebbe osservare, accanto ad un diminuito numero di neutrini elettronici, un flusso non nullo di neutrini di altro tipo (μ o τ) proveniente dal Sole.



2. Lo spettro dei neutrini misurato da BOREXINO e il rapporto coi vari processi di fusione all'interno del Sole.

Il flusso totale dovrebbe a questo punto corrispondere a quello originariamente previsto dalla teoria. Il primo esperimento sensibile ai vari tipi di neutrini solari fu fatto nella miniera di Sudbury, in Canada, raccogliendo dati tra il 1999 ed il 2006. Le misure confermarono in maniera indiscutibile il modello delle oscillazioni dei neutrini. Questa scoperta contribuì all'assegnazione del premio Nobel per la fisica a Raymond Davis Jr., dell'originario esperimento Homestake, nel 2002 e al direttore dell'osservatorio di Sudbury, Arthur McDonald, nel 2015.

Oltre a questo risultato, già di per sé eccezionale, lo studio dettagliato della distribuzione in energia del flusso di neutrini ha permesso di confermare in maniera diretta le ipotesi teoriche sui vari tipi di reazione nucleare in atto all'interno del Sole. I primi risultati in questo senso, mostrati in Figura 2, sono stati raccolti ed analizzati dall'esperimento Borexino, frutto di una collaborazione internazionale ed ospitato nei Laboratori Nazionali del Gran Sasso, e pubblicati nel 2018. Come si può immaginare, anche in questo caso le dimensioni in gioco sono ragguardevoli: il rivelatore consiste in 300 tonnellate di liquido scintillatore, e la presa dati ha richiesto anche in questo caso svariati anni di osservazione.

Esperimenti relativi alle oscillazioni dei neutrini sono stati anche eseguiti “in laboratorio”. In questi casi “il laboratorio” può estendersi fino ad occupare una grande parte del globo terrestre, come nel caso del già citato esperimento OPERA. In questo caso al CERN di Ginevra sono stati prodotti dei neutrini elettronici, collimati in modo da dirigersi verso i rivelatori presenti sotto il Gran Sasso, e sensibili sia ai neutrini elettronici che a quelli muonici. Anche questi esperimenti hanno confermato il fenomeno di oscillazione e, unendo i loro dati a quelli presi dai rivelatori di neutrini solari, hanno permesso di dare una stima delle differenze dei quadrati delle masse. Indicando queste ultime con m_i ($i=1,2,3$) i dati più recenti indicano che $\Delta m^2_{21} = 7.5 \times 10^{-5} \text{ eV}^2$ e $|\Delta m^2_{31}| \sim |\Delta m^2_{32}| \sim 2 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$ che significa differenze di massa dell'ordine di centesimi o millesimi di eV. Ovviamente queste osservazioni non sono in grado di dare un'idea della massa *assoluta* del neutrino, se non per il fatto che essa deve essere maggiore della radice quadrata delle differenze di massa quadrata. È possibile quindi stabilire un limite *inferiore* alle masse dei neutrini che vanno da 0.009 a 0.05 eV a seconda del tipo. Per dare un contesto a questi numeri, basti pensare che l'elettrone, che era la particella massiccia più leggera prima della scoperta della massa dei neutrini, ha una massa di 511000 eV, *almeno* 10 milioni di volte tanto.

Neutrini dallo spazio profondo

Parallelamente allo sviluppo dei rivelatori di neutrini specificatamente progettati per misurare il flusso di quelli solari si sono portati avanti progetti per vedere di rivelare neutrini anche da altre sorgenti astrofisiche.

Date le enormi distanze in gioco su scala interstellare (la stella più vicina dista da noi più di 250000 volte la distanza del Sole), è chiaro che in questi casi si puntano ad osservare i fenomeni più cataclismici (e quindi anche più rari). Considerando però il fatto che per via della loro bassissima tendenza ad interagire, i neutrini forniscono informazioni di “prima mano” sui fenomeni che li producono, l'astronomia “neutrinica” desta un grande interesse nella comunità.

Ad oggi si contano due grandi successi in questo campo.

Il primo risale al 1987, quando intorno alle 07:35 UT del 24 Febbraio tre rivelatori di neutrini allora in operazione osservarono contemporaneamente un eccesso significativo di eventi rispetto alla norma: nell'arco di una quindicina di secondi, 12 neutrini furono misurati dall'esperimento Kamiokande II in Giappone, 8 dall'esperimento IMB negli Stati Uniti ed infine altri 5 dall'esperimento Baksan in Russia. Ci vollero circa 3 ore affinché la causa di questa rivelazione si appalesasse nel cielo: una supernova (oggi nota come

SN 1987A) era esplosa nella Grande Nube di Magellano, una galassia nana satellite della nostra Via Lattea, alla distanza di “soli” 168000 anni-luce.

La progressione temporale di questi neutrini, che si presentarono in chiari fiotti, oltre che il periodo intercorso tra la loro emissione e la manifestazione visibile dell’esplosione contribuirono a confermare alcune previsioni teoriche relative ai processi di formazione di questo tipo di supernove. Gli effetti dell’esplosione sono stati seguiti nel corso degli anni, e l’osservazione dei residui di SN 1987A è ancora in corso. Si possono trovare in rete [Wikipedia 1987A] interessanti filmati che mostrano l’evoluzione temporale dello strato esterno della supernova, scagliato nello spazio dall’esplosione del suo nucleo.

La seconda interessante osservazione astrofisica in cui la rivelazione di neutrini ha avuto un ruolo interessante, riguarda teorie sull’origine dei raggi cosmici. Queste sono particelle cariche provenienti da fuori del sistema solare che impattano regolarmente sulla Terra, nella misura di circa uno per centimetro quadrato di superficie ogni secondo. Nel 2018 le osservazioni dell’esperimento IceCube hanno permesso di scoprire una sorgente particolarmente intensa di queste particelle, la blazar TXS 0506+056.

Ma andiamo con ordine: IceCube è un osservatorio di neutrini posto esattamente al Polo Sud, che ha iniziato le sue operazioni nel 2010. Come ormai sarà chiaro ai miei 24 lettori, per rivelare i neutrini serve tenere sotto controllo grandi quantità di materia ed IceCube affronta questo problema in maniera drastica: attraverso opportune perforazioni che arrivano ad oltre 1400 metri, migliaia di sensori sono stati inseriti in un blocco di ghiaccio antartico delle dimensioni di un chilometro cubo. Il fatto di utilizzare ghiaccio, unito alle caratteristiche dei rivelatori usati, fa sì che IceCube sia particolarmente sensibile ai neutrini più energetici. Nel 2017, IceCube rivelò un neutrino particolarmente energetico, circa 290 TeV, riuscendo a stabilirne la direzione di provenienza con una precisione sufficiente a determinarne la corrispondenza con quella di un flusso di raggi γ molto energetici, provenienti appunto dall’oggetto spaziale denominato TXS 0506+056, un nucleo galattico attivo, e legando così per la prima volta la presenza di neutrini cosmici ad una specifica sorgente.

È opportuno anche notare che l’energia di questo neutrino supera di parecchie volte l’energia con cui vengono fatte scontrare le particelle nel più potente acceleratore attualmente disponibile, il Large Hadron Collider (LHC) del CERN di Ginevra, il quale è capace di far collidere protoni ed antiprotoni con un’energia di “soli” 13 TeV. C’è quindi la segreta speranza che l’astronomia neutrinica riesca a dare qualche informazione sulla fisica delle particelle a queste energie “estreme”, per ora assai al di là della portata di qualsiasi acceleratore

terrestre. Notiamo, infine, come 290 TeV non sia poi l'energia più alta misurata da IceCube, che ha osservato eventi generati da neutrini di energia intorno ai 10 PeV, ovvero circa 1000 volte maggiore di quella disponibile al CERN.

Neutrini e cosmologia

Oltre a portarci messaggi importanti da eventi astrofisici lontani nello spazio, la presenza dei neutrini ha un effetto significativo – e misurabile – anche sull'evoluzione dell'Universo. Si ritiene che una gran quantità di neutrini sia stata prodotta durante i primi minuti di vita dell'Universo, come sottoprodotto dei processi che hanno determinato la composizione della “miscela primordiale” ($\frac{3}{4}$ di idrogeno e $\frac{1}{4}$ di elio) [Garberoglio 18]. A seguito della nucleosintesi i neutrini così prodotti – data la loro scarsa propensione all'interazione – si sono disaccoppiati dalle successive evoluzioni cosmologiche e si ritiene che oggi siano distribuiti uniformemente nel cosmo con una temperatura media $T = 1.9\text{K}$ ed una densità di circa 300 milioni di neutrini per metro cubo. Questo fa di loro il secondo tipo di particelle più comune nell'Universo (superati solo dai fotoni, con una densità media di 1 miliardo di particelle per metro cubo). Per confronto, si pensi che la densità della materia “normale” è stimata essere circa mezzo protone per metro cubo.

Anche se nello stato attuale dell'Universo i neutrini non hanno una grande importanza nel determinarne l'evoluzione, la loro presenza era progressivamente più marcata quanto più l'Universo era giovane, e questo ha lasciato tracce osservabili persino oggi. Lo studio della cosmologia è ora ad un livello così avanzato, grazie specialmente ai risultati del satellite Planck [Wikipedia Planck], che le osservazioni astronomiche riescono non solo a stabilire il numero di famiglie di particelle presenti nell'Universo, ma anche a fornire alcuni vincoli sui possibili valori della massa dei neutrini.

Nel primo caso, le teorie più accreditate ed esplicative che possediamo sull'evoluzione del cosmo dopo il Big Bang, permettono di concludere che il numero di famiglie di particelle elementari deve essere circa 3, in perfetto accordo con le misure terrestri basate sullo studio delle particelle elementari visibili negli acceleratori.

Ma non è tutto. Le osservazioni attuali sulla distribuzione di massa dell'Universo sono in accordo con le teorie cosmologiche solo a patto di assumere che i neutrini abbiano una massa. Le analisi non sono per niente facili, ma in ogni caso viene fornito un limite *superiore* alla somma delle tre possibili masse del neutrino. I dati attualmente ritenuti più attendibili (ovvero, facendo le analisi in maniera più conservativa possibile) indicano che la somma delle masse dei neutrini deve essere inferiore a circa 0.6 eV.

Concludendo (per ora)

Dopo circa un mese di presa dati, gli scienziati della collaborazione KATRIN hanno rilasciato i risultati preliminari: la massa del neutrino coinvolto nel decadimento β del trizio è al più 1.1 eV. Questo esito, seppur parziale, rappresenta un netto miglioramento rispetto alle precedenti stime di laboratorio, che avevano permesso di stabilire un limite superiore della massa del neutrino a 2 eV.

Gli scienziati coinvolti prevedono di proseguire l'esperimento per almeno altri 5 o 6 anni, eseguendo 3 campagne di presa dati di circa 2 mesi l'una all'anno, procedura che permetterà di raffinare via via la precisione della misura. Alla fine di questa fase si prevede di riuscire a stabilire con una precisione sufficiente la massa del neutrino, qualora questa sia maggiore di 0.2 eV, il limite indicato dalle osservazioni astrofisiche sotto l'ipotesi che le tre masse siano uguali.

Nella migliore tradizione della scienza, secondo cui ogni risultato acquista validità solo quanto più viene confermato in maniera indipendentemente, ci sono altri progetti in fase avanzata di realizzazione che si propongono di eseguire la stessa misura. Tra i più promettenti merita di essere menzionato il Project8, una collaborazione a guida statunitense, che utilizzerà anch'esso il decadimento di atomi di trizio.

Attualmente la fisica dei neutrini, ed in particolare la loro massa e la loro oscillazione, può venir inclusa nel *modello standard* delle particelle elementari, a patto di "massaggiarlo" un po' per far posto a queste proprietà, cosa che fa alzare più di un sopracciglio a quei fisici teorici più sensibili a considerazioni di simmetria, bellezza e "naturalzza" (ma perché mai questi neutrini hanno una massa che è *dieci milioni* di volte più piccola dell'elettrone?). Non è da escludere che uno studio più approfondito delle proprietà di queste elusive particelle porti in futuro ad ampliare o modificare il modello standard (e a numerosi altri viaggi a Stoccolma).

Bibliografia

- [Garberoglio 12] Giovanni Garberoglio. *Zio, ma quanto è grande il Sole?* Atti Acc. Rov. Agiati, a. 262, 2012.
- [Garberoglio 16] Giovanni Garberoglio. *La "realtà" secondo la Meccanica Quantistica: dalla funzione d'onda all'entanglement.* Atti Acc. Rov. Agiati, a. 266, 2016.
- [Garberoglio 18] Giovanni Garberoglio. *Da dove viene la materia? Gli atomi e la storia dell'Universo.* Atti Acc. Rov. Agiati, a. 268, 2018.
- [Jayawardhana 14] Ray Jayawardhana. *Cacciatori di neutrini. La storia della particella che aiuterà a svelare i segreti dell'Universo.* Codice Edizioni, 2014.

[Wikipedia 1987A] Wikipedia. *SN 1987A*. https://en.wikipedia.org/wiki/SN_1987A

[Wikipedia Planck] Wikipedia. *Planck (spacecraft)*. [https://en.wikipedia.org/wiki/Planck_\(spacecraft\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Planck_(spacecraft))

Credits

Figura 1. KATRIN collaboration media gallery. <https://www.katrin.kit.edu/70.php>

Figura 2. The Borexino collaboration. https://bxopen.lngs.infn.it/pp-chain_neutrinos/