

Dal profondo del cosmo

I neutrini, i messaggeri più elusivi

di Marco Pallavicini

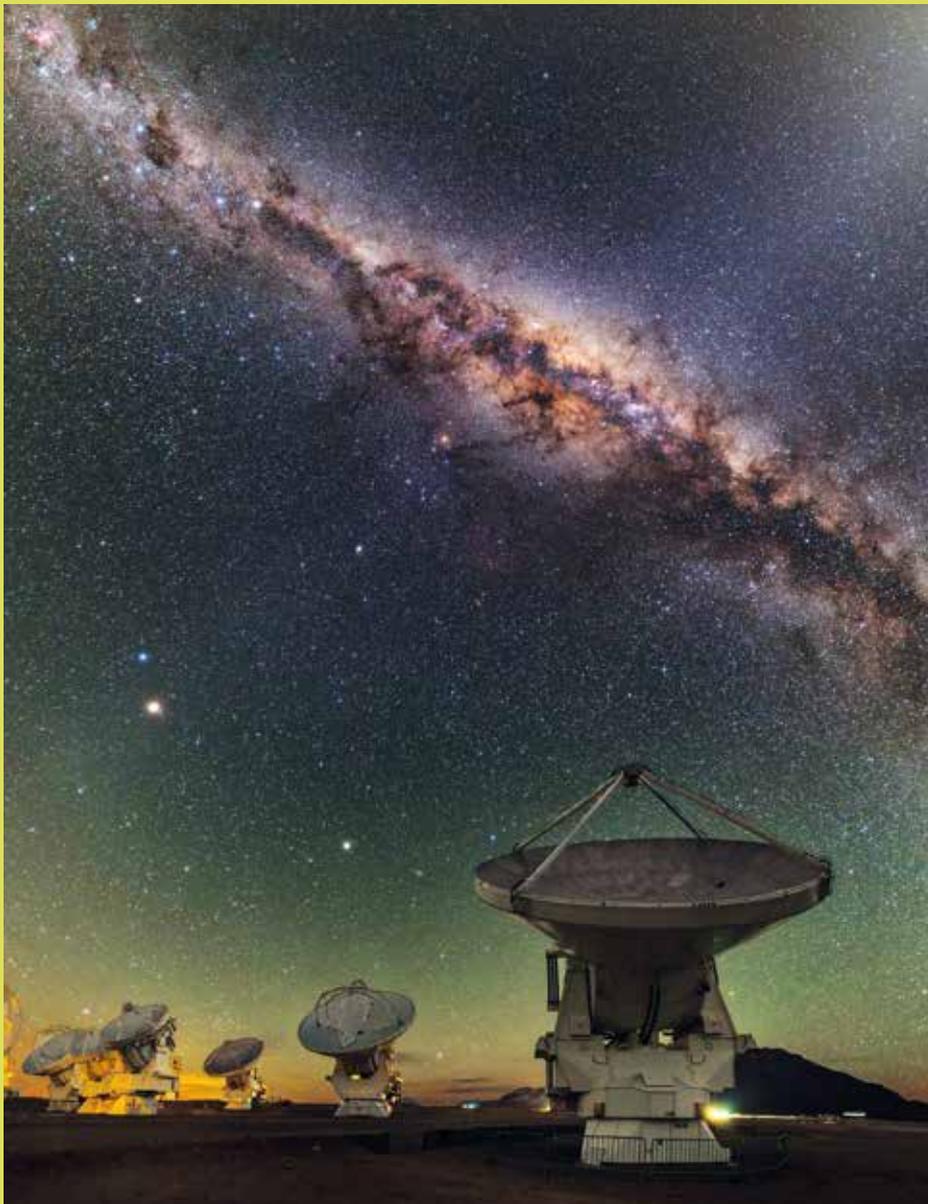
Gli astri che corrono sulla volta celeste hanno affascinato e incuriosito gli uomini di ogni tempo. Il cielo stellato è la più grande delle meraviglie e ancora oggi sa stupirci con la sua ricchezza.

Fino a pochi decenni or sono, l'unico - ancorché ricchissimo - messaggero di informazione sugli oggetti celesti è stato il fotone, il "quanto" della luce emessa o riflessa da essi, e proprio

la luce visibile è stata la nostra prima "finestra" di osservazione del cielo, per millenni solo a occhio nudo e poi, dal primo '600, con l'ausilio di telescopi. Oggi abbiamo strumenti capaci di fotografare oggetti distanti più di 10 miliardi di anni luce. Nell'arco del '900, con lo sviluppo delle tecnologie radio, l'avvento dei satelliti e l'uso intelligente dell'atmosfera come "rivelatore naturale", l'osservazione si è estesa a tutto lo spettro elettromagnetico. Le onde radio, la radiazione infrarossa, i raggi X e anche i più energetici raggi gamma, soprattutto se usati insieme in quella che oggi chiamiamo "astronomia multimessaggera", offrono informazioni preziose sulla natura degli oggetti celesti e sui processi fisici che li coinvolgono. I fotoni non possono però dirci tutto, perché sono emessi solo quando la forza elettromagnetica è al lavoro, per esempio nelle transizioni atomiche e molecolari (che di solito producono luce visibile, infrarossa o ultravioletta) oppure in presenza di particelle cariche accelerate che, a seconda dei contesti e delle energie in gioco, producono fotoni di ogni energia, dalle onde radio ai raggi gamma. In natura esistono però altre tre forze fondamentali (la gravità e le due forze nucleari forte e debole), che svolgono un ruolo cruciale in molti processi astrofisici. Le interazioni deboli, in particolare, sono essenziali

a.

I radiotelescopi nel deserto di Atacama in Cile, con lo sfondo della parte centrale della nostra galassia. La rivelazione delle onde radio è uno dei molti preziosissimi "occhi" con cui oggi osserviamo fenomeni non visibili con la luce. Per esempio, la zona oscurata da polvere e gas del centro galattico, chiaramente visibile nell'immagine, può essere studiata molto meglio con onde radio e luce infrarossa che non sono fermate dalla polvere stessa.





b.
Un'immagine dell'esperimento Gallex/Gno ai Laboratori Nazionali del Gran Sasso. Gallex è stato il primo esperimento sensibile alla componente più abbondante dei neutrini solari, quelli emessi dalla fusione di due protoni in un nucleo di deuterio.

per la fusione dell'idrogeno e degli elementi più pesanti nelle varie fasi della vita di una stella e nella formazione di stelle di neutroni durante il collasso esplosivo di una supernova. Svolgono inoltre un ruolo cruciale nel decadimento di particelle elementari in siti di alta energia, per esempio negli "shock" di supernovae esplose in passato o in prossimità di grandi buchi neri in rotazione (vd. in *Asimmetrie* n. 24 p. 16 e 20, ndr). Per comprendere questi fenomeni, oltre ai fotoni dobbiamo usare un altro messaggero capace di discernere i processi deboli da quelli elettromagnetici.

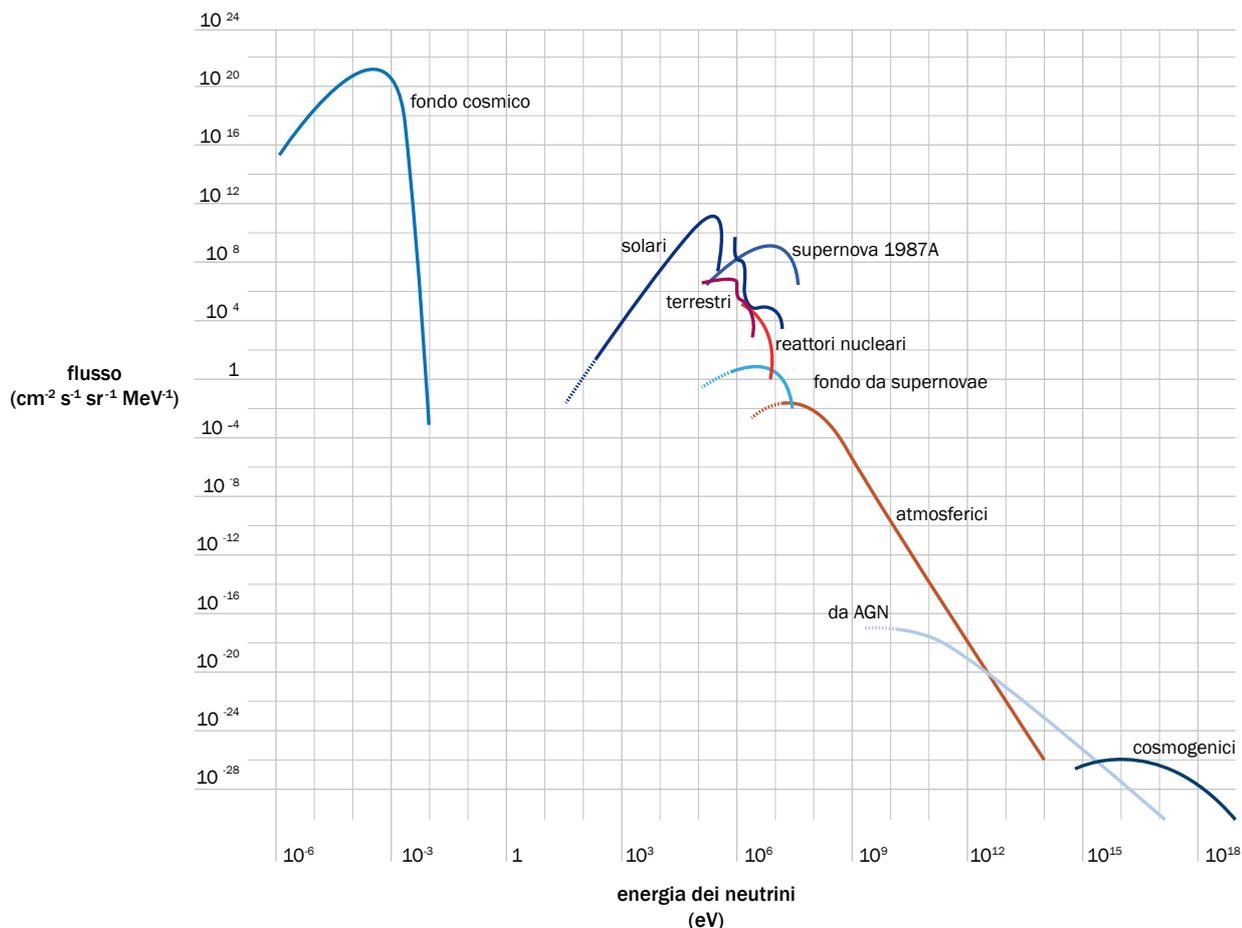
Fortunatamente questo messaggero esiste e ha un nome italiano, il neutrino. Battezzato da Enrico Fermi come "piccola particella neutra", il neutrino è la più elusiva e meno conosciuta delle particelle elementari. È l'unica sensibile alle sole forze deboli e alla gravità (non ha carica elettrica e non ha il colore dei quark per cui non sente le forze nucleari forti) e per questa ragione gode di proprietà uniche. I neutrini sono leggerissimi, hanno interazioni debolissime con la materia e, essendo neutri, non sono deflessi dai campi magnetici galattici e intergalattici. Possono uscire da zone molto dense e nello stesso tempo indicarci con precisione la direzione di provenienza. Inoltre, la presenza di neutrini di alta energia è segno inequivocabile di processi che coinvolgono la produzione di particelle adroniche, per cui la loro rivelazione porta informazioni essenziali e insostituibili sui processi in atto.

L'astrofisica con neutrini è iniziata con la ricerca dei neutrini solari. Negli anni '30-'40 si è dedotto per via teorica che il combustibile delle stelle fosse, almeno nella prima fase di vita, la fusione di quattro protoni in un nucleo di elio. La fisica nucleare ci dice che il processo può avvenire in due modi, uno avviato dalla fusione di due protoni in deuterio e un altro catalizzato da carbonio (C), azoto (N) e ossigeno (O), il "ciclo CNO". Il primo processo, detto catena protone-protone, è dominante in stelle come il Sole o più leggere, mentre si ipotizza che per quelle più pesanti domini il ciclo CNO. Vari esperimenti svolti dagli anni '70 ai primi anni 2000 hanno misurato lo spettro complessivo dei neutrini solari senza distinguere le singole componenti (esperimenti radiochimici come Homestake, Gallex-Gno e Sage) oppure hanno misurato la sola componente più energetica (esperimenti come Kamiokande e Super Kamiokande e l'esperimento Sno). Questa prima fase ha confermato l'esistenza dei neutrini solari (con il premio Nobel a Ray Davis nel 2002) e stabilito l'esistenza delle oscillazioni di neutrino (con il premio Nobel del 2015 ad Arthur McDonald e Takaaki Kajita). Inoltre, nel 1987, Kamiokande in Giappone ha anche potuto misurare per la prima volta il flusso di neutrini prodotti dall'esplosione di una supernova nella Piccola Nube di Magellano, fornendo informazioni uniche sia sulla dinamica dell'esplosione sia sulle proprietà dei neutrini.

È stato però Borexino ai Laboratori Nazionali del Gran Sasso il primo esperimento ad aver misurato fra il 2007 e il 2017 tutti i neutrini prodotti dalla catena pp, confermando con precisione il modello solare standard, il meccanismo di oscillazione nel Sole, e fornendo una prima debole indicazione del contenuto di elementi pesanti nel Sole. Borexino, se possibile, cercherà di identificare anche i neutrini potenzialmente prodotti dal ciclo CNO che, se pur poco importante nel Sole, dovrebbe produrre un piccolo flusso misurabile. Inoltre, insieme all'esperimento Lvd, potrà rivelare il flusso di neutrini di una eventuale supernova galattica, estendendo lo spettro energetico a valori molto più bassi di quelli raggiungibili da Super Kamiokande e fornendo quindi informazioni fondamentali sul meccanismo di esplosione di una stella. La novità più recente è quella dell'astrofisica con neutrini di altissima energia. Molti oggetti astrofisici producono particelle di alta energia e si suppone che alcuni di essi siano responsabili della produzione dei raggi cosmici più energetici oggi studiati

dall'osservatorio Auger in Argentina (vd. in *Asimmetrie* n. 15 p. 11, ndr). Vi sono ancora però molti dubbi sui meccanismi di accelerazione e per ora non sono ancora stati identificati i siti di accelerazione. Questo fatto non è troppo sorprendente, perché i protoni di alta energia che giungono a terra sono deflessi dai campi magnetici galattici e perdono quindi l'informazione della loro origine di provenienza. Auger potrà identificare le sorgenti solo se queste non sono troppo lontane da noi, altrimenti l'effetto dei campi magnetici impedirà qualunque identificazione per mezzo dei protoni. Sappiamo però che, se in un sito sono prodotti protoni di energia molto alta, devono essere necessariamente prodotti pioni carichi quando i protoni collidono con il materiale circostante. I pioni decadono producendo neutrini, per cui rivelando i neutrini si potrebbe identificare la regione di provenienza. La rivelazione di neutrini astrofisici di questo tipo è un'impresa molto complessa, perché i flussi attesi sono molto bassi e sono quindi necessari rivelatori di grandissima massa, di almeno un

c. La distribuzione dei flussi di neutrini attesi sulla Terra in funzione della loro energia con l'indicazione della loro origine. La componente più abbondante è quella del fondo cosmico di bassa energia, teoricamente prevista come residuo del Big Bang, ma non ancora osservata perché le misure a energie così basse sono difficilissime. Le altre componenti sono oggetto di studio e sono state osservate dagli esperimenti attuali. IceCube sembra avere osservato per la prima volta la componente di altissima energia proveniente dagli Agn (nuclei galattici attivi), che sarà studiata anche da Km3net. Alle altissime energie si prevede una componente cosmogenica, con un flusso debolissimo che prevede l'uso di rivelatori capaci di osservare decine di km³ di materia.





d.
 Il 22 Settembre 2017, il rivelatore IceCube, al polo sud, ha identificato un neutrino di alta energia proveniente dalla costellazione di Orione. I telescopi gamma, ottici e radio hanno confermato la presenza, in quella stessa direzione, di un potente *blazar* attivo, la TXS 0506+056. È stata così annunciata, nel luglio 2018, la conferma della prima osservazione multimessaggera di una sorgente astrofisica di altissima energia.

miliardo di tonnellate. È evidente che tali masse sono gestibili solo sfruttando bersagli naturali come l'acqua del mare o dei laghi, il ghiaccio dell'Antartide o eventualmente in futuro l'atmosfera. Il progetto IceCube in Antartide ha aperto la strada, fornendo nel 2013 la prima rivelazione convincente di neutrini cosmici di energia fra alcune decine di TeV e alcuni PeV usando come bersaglio la calotta polare equipaggiata con tubi fotomoltiplicatori inseriti nel ghiaccio a 2000 m di profondità (vd. in *Asimmetrie* n. 18 p. 38, ndr). IceCube sta studiando con sempre maggiore precisione questi neutrini. Un recentissimo risultato mostra una correlazione tra la direzione di provenienza dei neutrini e le emissioni gamma di un "*blazar*", una sorgente cosmica altamente energetica e variabile,

formata da un buco nero super massiccio ospitato all'interno di una galassia. Un risultato esaltante che apre la strada all'astronomia con neutrini di alta energia. La prossima generazione di telescopi a neutrini sarà realizzata in siti subacquei, nel lago Baikal e soprattutto nel Mediterraneo, con la realizzazione del progetto Km3net. Si tratta di una collaborazione internazionale con un

forte contributo da Italia, Olanda e Francia, che realizzerà al largo di Capo Passero in Sicilia un rivelatore da almeno 1 km³ d'acqua equipaggiata con tubi fotomoltiplicatori a 3500 metri di profondità per catturare il segnale di questi rari ma preziosissimi neutrini di alta energia.

Il neutrino ha affiancato il fotone come messaggero dal cosmo e, insieme alle ancor più recenti onde gravitazionali, svolgerà un ruolo cruciale per la comprensione dei molti aspetti dell'universo che ancora sfuggono alla nostra comprensione, inclusa, forse, anche la ricerca della materia oscura. In futuro, sarà forse possibile anche rivelare il cosiddetto "fondo cosmico di neutrini", il gas di circa 340 neutrini per cm³ (i neutrini sono la seconda particella più abbondante nell'universo dopo i fotoni che hanno una densità di circa 400 per cm³) che hanno energie inferiori al millesimo di eV, che si suppone teoricamente sia un residuo del Big Bang e che speriamo di poter rivelare per mezzo di tecnologie oggi in studio ai Laboratori del Gran Sasso e in altri laboratori del mondo, ma questa è un'altra storia.

Biografia

Marco Pallavicini è professore di Fisica delle Interazioni Fondamentali all'Università di Genova e ricercatore Infn. Dal 1990 si occupa di fisica delle particelle, delle astroparticelle e del neutrino. Ha lavorato al Fermilab e a Slac (Usa) dal 1990 al 1998 in esperimenti sulla fisica dei quark pesanti "charm" e "beauty". Ai Laboratori del Gran Sasso fa parte dell'esperimento Borexino dal 1998, di cui è portavoce dal 2011, e dell'esperimento Cuore dal 2004.

DOI: 10.23801/asimmetrie.2018.25.6