

Prospettive per nuovi orizzonti nell'astrofisica

Maurizio Spurio

*Dipartimento di Fisica e Astronomia dell'Università di Bologna
INFN - Sezione di Bologna*

L'astrofisica ha avuto sviluppi straordinari negli ultimi 80 anni grazie all'avvento di nuove bande osservative nella radiazione elettromagnetica; dai radiotelescopi e telescopi all'infrarosso sulla superficie della Terra, ai telescopi per raggi ultravioletti, raggi-X e raggi-gamma trasportati fuori dall'atmosfera terrestre da satelliti. Buona parte, se non la totalità, della radiazione rilevata dai tradizionali telescopi ottici e da questi nuovi strumenti viene emessa da processi che coinvolgono elettroni. Tuttavia, l'Universo è elettricamente neutro e altrettanti protoni sono presenti. I protoni, essendo più massivi degli elettroni, emettono meno radiazione elettromagnetica. Sinora, l'astrofisica ha ricevuto poche informazioni sui processi di alta energia che coinvolgono protoni, nuclei e particelle instabili che, come protoni e neutroni, sono composte da quark. Complessivamente, le particelle con struttura a quark sono chiamate adroni. Gli ultimi anni hanno visto la nascita di due nuove tecniche osservative dell'Universo: i telescopi per neutrini e i rivelatori di onde gravitazionali. I neutrini possono essere prodotti solo da processi che coinvolgono adroni. Anche le onde gravitazionali sono emesse da oggetti massivi e

compatti, tra cui le stelle di neutroni. In definitiva, sia i neutrini che le onde gravitazionali trasportano informazioni relative alle regioni dell'Universo dove dominano i processi che coinvolgono adroni. Nei prossimi anni, le nuove generazioni di telescopi di neutrini e onde gravitazionali permetteranno di avere informazioni sulle proprietà degli oggetti astrofisici in cui le interazioni degli adroni lasciano un segnale più visibile di quello degli elettroni, e che sinora non eravamo capaci di osservare. In questo articolo, passo brevemente in rassegna lo stato e le possibili prospettive di questo settore di ricerca.

I due Modelli Standard

Gran parte della nostra conoscenza dell'Universo e della sua storia evolutiva si fonda sull'osservazione della radiazione elettromagnetica, di cui la luce visibile costituisce una piccola porzione. Per un tempo estremamente lungo, l'occhio umano è stato l'unico strumento utilizzato per studiare l'Universo. Dal 1610, con Galileo, è iniziata l'epoca degli strumenti ottici, dal suo piccolo cannocchiale ai giganteschi telescopi odierni. Solo dopo la fine della seconda guerra mondiale, altri strumenti sono stati inventati e utilizzati per estendere la visione fuori dall'intervallo della luce visibile.

La comprensione dei processi che coinvolgono la produzione e propagazione della radiazione elettromagnetica dal punto di vista della fisica classica si è completata attorno al 1860. Nei successivi 60 anni, nuove tecniche osservative portarono a evidenziare i limiti della teoria classica nel descrivere i fenomeni atomici e molecolari prima, e nucleari poi. Nasce così la meccanica quantistica, il primo tassello per la costruzione del quadro di riferimento attuale per la descrizione del microcosmo, che è chiamato **Modello Standard**.

Lo studio sperimentale del macrocosmo, e in particolare della struttura dell'Universo, nasce intorno agli '30 del secolo scorso, con la osservazione della recessione delle galassie fatta da E. Hubble [1]. Ma il vero punto di partenza della cosmologia osservativa è la scoperta della radiazione cosmica di fondo (CMB) avvenuta nel 1964 da parte di A. Penzias e R.W. Wilson. Grazie alla possibilità di studiare questa radiazione fuori dall'atmosfera terrestre per mezzo di satelliti, abbiamo acquistato una visione della storia evolutiva dell'Universo dal Big Bang a oggi che ha superato diverse verifiche sperimentali e ha portato a un Modello Standard del macrocosmo.

Dalle osservazioni, sappiamo che l'Universo è composto da materia, e non da materia e antimateria come invece ci si aspetterebbe dai processi di conversione energia-massa nei laboratori di alta energia in base alla relazione einsteiniana $E=mc^2$. Ad esempio, una particella neutra come il fotone, che se ha sufficiente energia, può generare una coppia particella-antiparticella. Perché il Big Bang in cui inizialmente parte dell'energia si trasforma in massa porti alla formazione di un Universo solo fatto di materia e non materia e antimateria, è uno dei misteri che deve essere ancora risolto dal Modello Standard del microcosmo delle particelle elementari. Un Universomateria è costituito principalmente da atomi di idrogeno con un protone (composto da quark) nel nucleo e un elettrone orbitante. Un Universo-antimateria è costituito principalmente da atomi di anti-idrogeno con un antiprotone (composto da antiquark) nel nucleo e un positrone orbitante.

Dal punto di vista di un fisico sperimentale che si occupa di astrofisica delle particelle (quale io sono) noto una particolarità: il settore dei

Modello Standard delle Particelle Elementari

tre generazioni della materia (fermioni)			mediatori delle forze / interazioni (bosoni)		
	I	II	III		
massa	$=2.2 \text{ MeV}/c^2$	$=1.28 \text{ GeV}/c^2$	$=173.1 \text{ GeV}/c^2$	0	$=124.97 \text{ GeV}/c^2$
carica	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0	0
spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	0	0
	u up	c charm	t top	g gluone	H higgs
	d down	s strange	b bottom	γ fotone	
	e elettrone	μ muone	τ tauone	Z bosone Z	
	ν_e neutrino elettronico	ν_μ neutrino muonico	ν_τ neutrino tauonico	W bosone W	

QUARK (I, II, III)
LEPTONI (e, μ, τ, ν)
BOSONI DI GAUGE (g, γ, Z, W)
BOSONI SCALARI (H)

Figura 1: Tabella riassuntiva del modello standard delle particelle elementari, con i costituenti ultimi della materia, in base alle nostre conoscenze. Per ogni particella è riportata massa, carica e spin. A sinistra, le tre generazioni della materia (o famiglie di particelle) che sentono le interazioni. La prima famiglia (I) contiene l'elettrone e il suo neutrino e i quark u e d di cui sono costituiti protone e neutrone. Le tre famiglie di particelle hanno in corrispondenza tre famiglie di antiparticelle. A destra, le particelle che scambiano le interazioni. Per queste, non sussiste distinzione tra particella e antiparticella.

quark (vedi Figura 1) è molto studiato nel Modello Standard del microcosmo, e molto meglio conosciuto del settore dei leptoni (che contiene l'elettrone). Tra i leptoni, vi sono i neutrini che sono molto difficili da studiare a causa della loro piccola probabilità d'interazione e la necessità quindi di utilizzare rivelatori di dimensioni molto grandi.

Ad esempio, conosciamo molto bene il diverso comportamento nei processi di decadimento che coinvolgono quarks ed antiquarks: in gergo tecnico, si chiama violazione di CP [2]. Dagli anni '60 si sospettava che l'asimmetria osservata nell'Universo tra materia e antimateria potesse essere legata a questa violazione di CP nel settore dei quark. Oggi sappiamo che la violazione che esiste ed è osservata tra quark è troppo piccola per poter spiegare l'asimmetria presente. È quindi possibile, ad esempio, che la scomparsa dell'antimateria nell'Universo sia stata originata

da qualche meccanismo concernente una asimmetria tra il comportamento dei neutrini e degli antineutrini (violazione di CP nel settore leptonic). Comprendere questo aspetto usando i neutrini è uno degli obiettivi dello studio del settore leptonic nei prossimi decenni.

Viceversa, nel Modello Standard del macrocosmo la situazione è completamente rovesciata a favore dei leptoni. Qui, gran parte di quello che sinora è noto scaturisce dai meccanismi d'interazione degli elettroni, ossia i leptoni carichi più leggeri. È infatti la perdita di energia degli elettroni a dare i segnali elettromagnetici studiati dall'astronomia. Viceversa, è quasi nullo il segnale rilevato dagli astronomi, prodotto da protoni, neutroni e nuclei. Scherzando, ai colleghi astronomi del mio Dipartimento spiego che il loro lavoro è giustificato solo dagli elettroni nell'Universo, e le proprietà dell'altra metà del cielo (quella legata ai protoni) è loro totalmente sconosciuta. Nel seguito dell'articolo, cerco di spiegarvi il motivo per cui i prossimi anni saranno centrati anche sull'astronomia prodotta da meccanismi che coinvolgono i protoni.

L'astronomia tradizionale

Elettrone e protone sono le particelle che formano l'atomo d'idrogeno, l'elemento che costituisce il 90% della massa ordinaria dell'Universo. Esse hanno carica elettrica uguale (con segno opposto) ma masse molto differenti: il protone ha massa 1840 volte quella dell'elettrone. Questo provoca una asimmetria nel loro comportamento. Infatti, i meccanismi elettromagnetici di emissione di energia, quelli, per intenderci, che producono la radiazione, dalla frequenza delle onde radio rilevate dai radiotelescopi a quella dei raggi-X rilevati con satelliti, dipendono dall'accelerazione e dalla carica elettrica della particella interessata. Poiché l'accelerazione di una particella, a parità di forza agente e carica elettrica, è inversamente proporzionale alla massa, l'elettrone più leggero perde enormemente più energia dei protoni nelle regioni in cui le particelle stesse vengono accelerate. È questa la ragione del fatto che menzionavo: l'emissione rilevata dal radio fino ai raggi-X osservata con strumenti sulla Terra è principalmente legata ai meccanismi di emissione di radiazione da parte degli elettroni

carichi. Una immagine eloquente di questo fatto è illustrata nella Fig. 2.

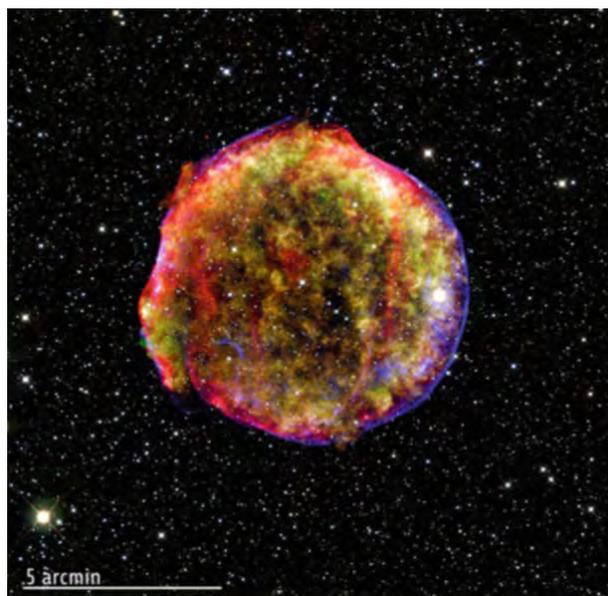


Figura 2: Questa immagine mostra la regione dove avvenne l'esplosione di una stella brillante testimoniata da Tycho Brahe e altri astronomi di quell'epoca (1574). L'immagine combina osservazioni a raggi X e infrarossi ottenute rispettivamente con l'Osservatorio a raggi X Chandra della NASA e il telescopio spaziale Spitzer, e all'Osservatorio di Calar Alto, in Spagna. Tutta l'emissione è dovuta al moto di elettroni nella regione in cui sono presenti intensi campi magnetici. Crediti: Raggi X: NASA/CXC/SAO, Infrarossi: NASA/JPL-Caltech; Ottico: MPIA, Calar Alto. [3]

Ogni volta che è aumentata la sensibilità di un telescopio, o aperta l'osservazione di una nuova finestra osservativa, nuovi orizzonti si sono aperti nelle nostre conoscenze. I primi grandi telescopi ottici degli anni '30 del secolo scorso portarono alla scoperta che l'Universo era composto di tante galassie come la nostra. La radioastronomia sviluppata dagli anni '50 con le tecniche di rivelazione delle onde radio nate durante la seconda guerra mondiale, ha portato alla scoperta delle pulsar (stelle di neutroni), dei quasar e delle galassie con nucleo attivo. Le osservazioni nell'infrarosso hanno offerto la possibilità di studiare come si formano le stelle. Le osservazioni con raggi X, possibili dopo l'avvento dell'era spaziale con la possibilità di trasportare telescopi fuori dall'atmosfera terrestre, hanno portato alla scoperta dei buchi neri di massa stellare. In

tutti questi casi, di nuovo, sappiamo ciò che gli elettroni, accelerati in qualche modo da oggetti astrofisici, ci dicono rilasciando energia.

Sino a poco tempo fa, non eravamo capaci di leggere quello che i protoni (e i nuclei) potevano dirci. Conosciamo sin dal 1912 che un flusso di raggi cosmici (Figura 3), prevalentemente composto da protoni e nuclei, arriva sulla Terra a energie così elevate da non poter essere mai eguagliate da nessun acceleratore terrestre. Come questi raggi cosmici siano originati, e da quali processi astrofisici abbiano origine, è ancora un mistero. Potrebbero essere coinvolti oggetti di classi già note agli astronomi, oppure qualcosa di inaspettato.

Solo negli ultimi anni, con le osservazioni dei neutrini e delle onde gravitazionali stiamo imparando a decifrare quello che le particelle più pesanti (protoni, nuclei) ci dicono della struttura e storia dell'Universo, confermando, ampliando o revisionando quello che ci hanno detto gli elettroni.

Neutrini e Raggi Cosmici

Il neutrino è la particella più elusiva che conosciamo: quando fu ipotizzato da W. Pauli nel 1930, si temeva che non potesse essere mai rivelato. Il motivo è che esso è privo di carica elettrica, e la sua probabilità d'interazione con la materia ordinaria è molto piccola. Oggi sappiamo che neutrini, oltre che dalla radioattività, sono prodotti dai processi di fusione nucleare che mantengono in vita le stelle, dalle esplosioni conseguenti il collasso gravitazionale stellare, dalle interazioni tra particelle cariche accelerate da meccanismi astrofisici. Alcuni dei meccanismi astrofisici connessi con la produzione di neutrini sono anche all'origine dei raggi cosmici (RC).

I RC sono semplicemente particelle cariche (principalmente, protoni e nuclei) estremamente energetiche che permeano la Galassia e, in più piccola parte, l'Universo [5, 6]. La presenza di elettroni nei RC è minimale (vedi Figura 3). Nulla differenza un protone dei RC da un ordinario protone nell'atomo d'idrogeno: solo la sua enorme energia cinetica. Questa energia cinetica deve essere fornita alle particelle da qualche meccanismo di accelerazione di oggetti astrofisici presenti nella nostra Galassia e in galassie

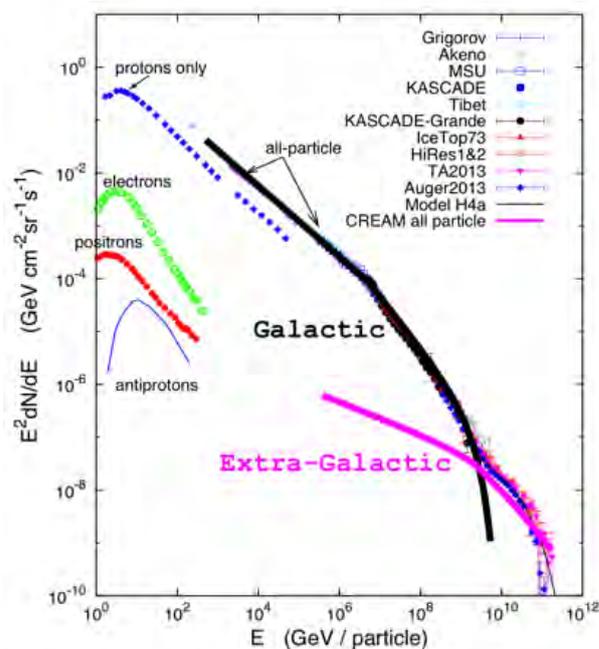


Figura 3: Flusso di raggi cosmici (RC) in arrivo sulla Terra in funzione dell'energia. I RC sono particelle stabili, in prevalenza protoni e nuclei, accelerati da sorgenti galattiche ed extragalattiche. Le due curve (nera e viola) rappresentano i contributi relativi di queste due componenti. La frazione di elettroni nei RC (punti verdi) è minoritaria. Gli elettroni non riescono a sfuggire dalle regioni di accelerazione a causa dei meccanismi di perdita di energia. Nei RC sono presenti anche antiparticelle: positroni (ossia, anti-elettroni punti rossi) e antiprotoni (linea blu). Queste anti-particelle sono prevalentemente prodotte dall'interazione dei RC con il mezzo interstellare. La figura è presa da una compilazione didattica della Collaborazione IceCube utile da consultare [4].

lontane. Schematicamente, basandoci sulle osservazioni, ciascuna galassia produce i suoi RC che rimangono per molto tempo confinati dentro la galassia stessa. Pian piano, buona parte di questi RC esce dalla galassia d'origine (con tempi medi delle decine di milioni di anni) e si propaga nell'Universo. I tempi di permanenza nella galassia di origine dipendono dall'energia: tanto più energetico è un RC, tanto prima fuoriesce. Noi sulla Terra, in un punto periferico della Galassia, osserviamo i RC da oltre 100 anni ma non sappiamo da chi e come vengano prodotti, ovvero quali siano gli straordinari meccanismi di accelerazione coinvolti, figura 4.

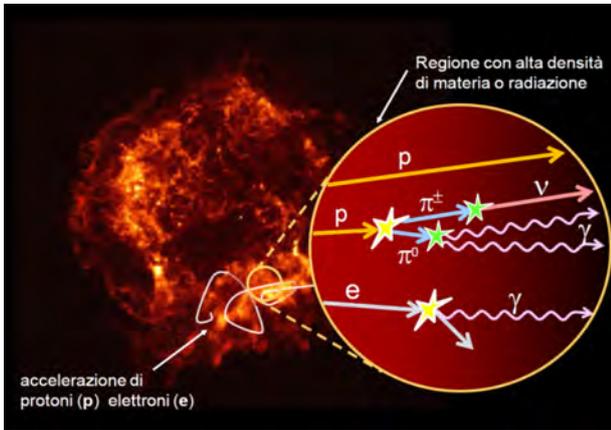


Figura 4: Interconnessione tra raggi cosmici (RC), raggi gamma (γ) e neutrini (ν). Sorgenti astrofisiche possono accelerare RC (protoni, elettroni e nuclei) a enormi energie. Gli elettroni dissipano gran parte della loro energia localmente. Una frazione dei protoni e nuclei diffonde all'esterno della regione di accelerazione, si propaga nello spazio galattico (o intergalattico, se la sorgente è esterna alla Galassia) e può giungere sulla Terra. I RC carichi non viaggiano in linea retta a causa delle deflessioni dovute a campi magnetici. La misura della direzione di arrivo dei RC non permette quindi di determinare la posizione della sorgente. Una frazione di protoni (o nuclei) accelerati può invece interagire con la materia o coi campi elettromagnetici che circondano la sorgente. In questo caso, il decadimento di particelle secondarie neutre (principalmente π^0) produce una coppia di raggi- γ , mentre il decadimento di particelle cariche (principalmente π^+ oppure π^-) produce neutrini. L'interazione di elettroni con la materia o radiazione produce solo raggi- γ . Quindi, la rivelazione di neutrini dalla direzione di una sorgente è un modo univoco per scoprire quali sono le sorgenti acceleratrici di protoni e nuclei.

Il problema è che la Galassia (e anche le regioni di spazio tra le galassie) ospita campi magnetici che deflettono i RC carichi. Quindi, osservare la direzione apparente di provenienza di un protone, elettrone o nucleo non permette di individuare la sorgente che lo ha accelerato, figura 5. Per questo, occorre ricorrere a sonde neutre, che non possono essere deflesse dai campi magnetici. Le uniche particelle prive di carica elettrica provviste dalla natura capaci di percorrere regioni dell'Universo molto estese sono i fotoni e

i neutrini (e come vedremo più avanti, le onde gravitazionali).

Esperimenti che misurano con precisione raggi gamma sono entrati in funzione nell'ultima decade [7]. Uno dei problemi dell'astronomia con raggi gamma, tuttavia, è il fatto che questi possono essere assorbiti dalla materia che si frappone tra la sorgente e la Terra. I neutrini, invece, risentono molto meno della presenza di materiale assorbente. Tuttavia, il flusso di neutrini di origine cosmica in arrivo su una certa superficie decresce molto al crescere della loro energia: occorrono quindi esperimenti di scala gigantesca per potere rivelare i neutrini di energia estrema [8, 9].

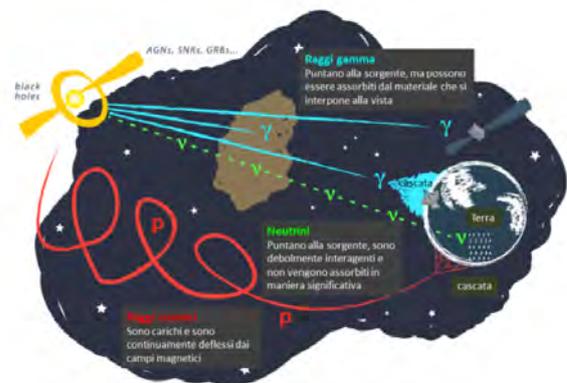


Figura 5: Schema di propagazione dalle possibili sorgenti (nella galassia o extragalattiche) alla Terra di raggi cosmici carichi (principalmente, protoni), raggi gamma e neutrini. Raggi gamma e neutrini sono particelle neutre e si propagano in linea retta, ma hanno caratteristiche di propagazione differenti. Immagine: Juan Antonio Aguilar and Jamie Yang. IceCube/WIPAC (adattata in italiano).

Telescopi per Neutrini

L'idea che portò alla realizzazione di quelli che oggi chiamiamo telescopi di neutrini fu del russo M.A. Markov [10], che all'inizio degli anni '60 propose di disporre un numero molto elevato di rivelatori ottici, chiamati fotomoltiplicatori (PMT), sotto un grande spessore di acqua marina o di un lago, attrezzando un volume dell'ordine di 1 km^3 . L'acqua rappresenta il mezzo (gratuito) in cui i neutrini di altissima energia interagiscono. Le particelle cariche prodotte dall'interazione del neutrino generano luce Cherenkov

nel mezzo attraversato e, poiché, alle lunghezze d'onda interessate, l'acqua è trasparente, la luce può essere raccolta dai PMT. Infine, ponendo la strumentazione in profondità, si ha la schermatura necessaria per ridurre di molti ordini di grandezza la radiazione di luce solare e il flusso di particelle prodotte dall'interazione dei RC in arrivo. Attualmente, i telescopi di neutrini [11] in funzione o in costruzione nel mondo sono IceCube in Antartide (Figura 6: il ghiaccio a grande profondità è trasparente come e più dell'acqua), GVD in un lago della Siberia, e KM3NeT nel mar Mediterraneo. Un predecessore di KM3NeT a scala più piccola (ANTARES) ha terminato di funzionare, dopo molti anni di presa dati, sempre nel Mediterraneo nel 2022 [12]. IceCube è stato completato nel 2010; GVD è in avanzato stato di costruzione; KM3NeT è in costruzione e dovrebbe superare la sensibilità di IceCube nel 2026.

Le proprietà del neutrino (energia, direzione di provenienza, famiglia) possono essere dedotte solo se un neutrino interagisce in prossimità del rivelatore e produce particelle cariche. Queste si muovono nella direzione di provenienza del neutrino e trasportano buona parte della sua energia. Poiché sono particelle cariche, lasciano segnali rivelabili negli apparati sperimentali. Si è sicuri che sono davvero particelle indotte dall'interazione del neutrino quando provengono dal basso e si dirigono verso l'alto. Solo il neutrino, infatti, può attraversare il diametro terrestre senza essere assorbito e, occasionalmente, interagire in prossimità del rivelatore. Oppure, l'interazione è dovuta all'arrivo nel neutrino se non si vede entrare nulla nell'apparato sperimentale, e a un certo punto si osserva la nascita di particelle cariche nella regione interna. Anche in questo caso, solo il neutrino può produrre eventi di questo tipo. L'unico fondo che simuli l'arrivo di un neutrino cosmico è infatti l'arrivo di un neutrino di origine atmosferica. Questi sono neutrini prodotti da RC che arrivano sulla sommità dell'atmosfera e producono neutrini con gli stessi processi mostrati in Fig. 4. Poiché le direzioni dei RC carichi sono modificate in modo casuale dai campi magnetici interstellari, questi neutrini secondari non ci danno informazioni astrofisiche, ma il loro studio è stato fondamentale per la fisica delle particelle.

Tenendo conto del fondo dovuto ai RC secondari (principalmente muoni) che si propagano verso il basso e dei neutrini atmosferici in arrivo da tutte le direzioni, neutrini di origine astrofisica possono essere selezionati in tre modalità:

- Metodo direzionale: evidenziando un eccesso di eventi provenienti da una specifica posizione nel cielo. Questo è possibile usando prevalentemente la direzione ricostruita delle particelle cariche indotte dall'interazione di un neutrino proveniente dal basso e diretto verso l'alto. Per questo tipo di eventi, generalmente la misura dell'energia è imprecisa.
- Metodo energetico: evidenziando un eccesso di eventi di più alta energia rispetto a quanto aspettato nei neutrini atmosferici, prevalentemente usando neutrini che interagendo inducono cascate di particelle secondarie. In questo caso, anche eventi provenienti dall'alto possono essere studiati, se l'interazione avviene entro il rivelatore. In generale, la misura della direzione è però imprecisa.
- Metodo multi-messaggero: selezionando eventi in coincidenza con altri segnali, dovuti a raggi gamma, onde gravitazionali o altro. L'energia o la direzione possono essere imprecise, in base alla topologia dell'evento.

Stato attuale delle osservazioni e prospettive

IceCube ha osservato neutrini di origine astrofisica in tutti e tre i modi sopra citati. A partire dal 2013 ha infatti evidenziato un eccesso di eventi di alta energia dovuti a interazioni di neutrini non spiegabili dai soli neutrini atmosferici (metodo energetico)[13]. Dunque, neutrini di origine cosmica esistono, e il numero in arrivo è numericamente vicino al valore massimo che ci si poteva aspettare. Tuttavia, i neutrini che interagendo producono cascate e che permettono una buona misura dell'energia, non permettono una altrettanto buona determinazione della direzione di provenienza e quindi una determinazione accurata delle possibili sorgenti.

Il 22 settembre 2017 (il mese successivo all'osservazione di un altro evento molto importante di cui dirò nel paragrafo successivo), IceCube ha rivelato una traccia indotta da un neutrino di circa 300 TeV, circa 30 volte l'energia che i protoni hanno nell'acceleratore LHC del CERN, generando automaticamente un messaggio di allerta distribuito entro un minuto a tutti gli altri telescopi [14]. L'allerta ha provocato ricerche correlate da parte di molti esperimenti. Il telescopio su satellite Fermi-LAT ha riportato che la direzione del neutrino era coincidente con una sorgente di raggi gamma nota, la galassia con nucleo attivo (AGN) conosciuta come TXS 0506+056. Questo AGN è classificato come blazar dall'inglese *blaze* (vampata): ossia, il getto prodotto del nucleo attivo punta in direzione della Terra. Questo blazar era osservato in uno stato particolarmente attivo al momento dell'arrivo del neutrino. In aggiunta, anche il telescopio per raggi gamma MAGIC (situato a terra, nelle Isole Canarie), ha rivelato fotoni di energie fino a 400 GeV dalla direzione del blazar. Le osservazioni sono state completate anche alle lunghezze d'onda dai raggi X al radio; quelle nell'ottico hanno permesso la determinazione del redshift (ossia, la distanza) della galassia da cui il neutrino è partito. La correlazione del neutrino con l'attività registrata di TXS 0506 + 056 è stata classificata come statisticamente significativa a livello di 3 deviazioni standard. Questo è il primo caso di studio simultaneo di una sorgente di alta energia usando neutrini e sonde elettromagnetiche. Infine, durante il 2022 la collaborazione IceCube, dopo aver selezionato 110 sorgenti di raggi gamma potenzialmente capaci di emettere anche neutrini, ha cercato dalla direzione di ogni sorgente un possibile eccesso di neutrini rispetto al fondo atteso. Tra queste, ha trovato un eccesso di 79 ± 22 neutrini associati alla vicina galassia attiva NGC 1068: l'eccesso ha una significatività statistica di 4.2 deviazioni standard [15]. Esso è interpretato come prova diretta dell'emissione di neutrini aventi energie dell'ordine del TeV da un AGN (active galactic nucleus). Il flusso di neutrini determinato supera il flusso di raggi gamma delle energie del TeV di almeno un ordine di grandezza. Attualmente, almeno altre 4 sorgenti sono molto vicine a evidenziare una significatività statistica di oltre 4 deviazioni standard.



Figura 6: Schema del rivelatore IceCube al Polo Sud. Oltre ad una matrice di rivelatori posti a grande profondità sotto il ghiaccio, sono visibili anche dei rivelatori posti sopra la superficie. Nella foto a destra: in alto uno dei moduli ottici inseriti nel ghiaccio, con un PMT e l'elettronica necessaria per il funzionamento. In basso, uno dei buchi perforati nel ghiaccio con l'inserimento di una delle stringhe. Cortesia della collaborazione IceCube.

Le osservazioni di IceCube hanno prodotto un notevole impatto. Nell'immediato futuro, due nuovi osservatori potranno estendere gli studi di IceCube. Il telescopio GVD costruito nel lago siberiano di Baikal è in stato avanzato di costruzione. Purtroppo, la qualità (trasparenza) delle acque di un lago non è tale da permettere la ricostruzione della direzione con precisione sufficiente per risalire alla posizione delle sorgenti. Questo è invece possibile con il telescopio KM3NeT [16], ancorato alla profondità di circa 3500 m nelle acque del mar Mediterraneo, al largo della Sicilia orientale (figura 7). Il telescopio è attualmente finanziato per un blocco di 115 stringhe, che dovrebbe essere operativo entro il 2027. Oggi (marzo 2023) sono già attive e in presa dati 21 stringhe. Nella configurazione finale di un blocco, KM3NeT ha una sensibilità confrontabile (se non superiore) a quella di IceCube. Un secondo blocco è previsto, ma non ancora finanziato.

Il vantaggio di KM3NeT è quello di essere posizionato in maniera tale da avere il centro della Galassia sotto l'orizzonte. Questo significa che i neutrini eventualmente prodotti da sorgenti Galattiche possono indurre eventi diretti verso l'alto la cui direzione può essere misurata con accuratezza elevata, permettendo la ricerca attraverso

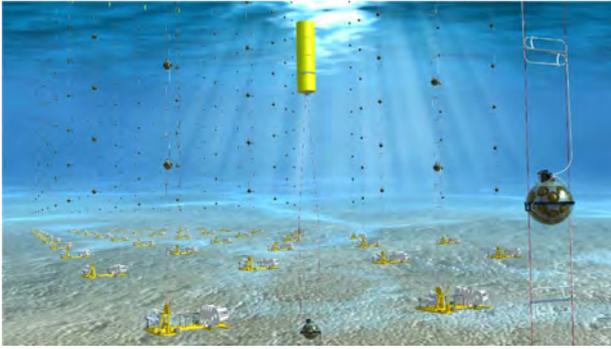


Figura 7: Vista sottomarina di un blocco del telescopio KM3NeT. Un blocco è composto da 115 stringhe. Ciascuna stringa consiste di 18 moduli ottici (la sfera che si vede in primo piano a destra). Ciascuna sfera contiene 31 PMT, i piccoli occhi elettronici che captano la luce. La distanza verticale tra i moduli ottici è di circa 36 m, la distanza orizzontale tra le stringhe di circa 90 m. Appoggiato al fondo marino alla profondità di 3500 m vi è un'ancora per ciascuna stringa. Ogni stringa (700 m di altezza) viene tenuta in tensione da una boa gialla, una delle quali è ben visibile nella parte centrale. (Disegno di Edward Berbee/ Nikhef). Si ricordi che a 3500 m di profondità l'assorbimento della luce solare è praticamente totale. Un telescopio analogo, ma con stringhe e sfere più ravvicinate è in costruzione al largo delle coste di Tolone (Francia) con l'obiettivo di studiare le proprietà fisiche del neutrino. Cortesia della collaborazione KM3NeT.

il metodo direzionale. Attualmente, la nostra Galassia è un deserto per quanto riguarda i neutrini. Ma questo è solo un effetto dovuto al non idoneo posizionamento di IceCube per le sorgenti Galattiche: è come se volesse osservare la stella Polare con un telescopio ottico al polo Sud.

Onde gravitazionali

La teoria della relatività di Einstein ha, sin dalla sua formulazione, affascinato moltissimo l'opinione pubblica per le sue conseguenze sulla percezione dello spazio e del tempo. Per moltissimo tempo una delle predizioni della relatività generale, ossia l'esistenza delle onde gravitazionali (GW), è sembrata una irraggiungibile chimera. Per decenni vi è stato il dubbio teorico che queste onde potessero davvero esistere (lo stesso Einstein era inizialmente dubbioso). Una prima indicazione indiretta dell'esistenza delle

onde gravitazionali si è avuta osservando sistemi astrofisici composti da due stelle di neutroni (il sistema binario scoperto da Hulse e Taylor nel 1973). A partire dagli anni '80, sono nati progetti (negli USA e in Europa) per costruire strumenti con la sensibilità sufficiente a rivelare GW.

Finalmente, dopo quasi 40 anni di sviluppo di tali rivelatori, il 14 settembre 2015 i due interferometri dell'esperimento LIGO negli USA (situati in due stati diversi, siti distanti circa 3000 km l'uno dall'altro) hanno rivelato contemporaneamente lo stesso segnale di onda gravitazionale. Ma la cosa più stupefacente non è stato tanto l'aver confermato la predizione della relatività di Einstein, ma di aver dimostrato che con le onde gravitazionali si può fare astrofisica. Lo chiarisco prendendo (tradotto in italiano) l'*abstract* dello storico articolo (apparso l'11 Febbraio 2016) sul *Physical Review Letter* che annuncia la scoperta [17]:

“Il 14 settembre 2015 alle 09:50:45 UTC i due rivelatori *Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory* (LIGO) hanno osservato simultaneamente un segnale transitorio dovuto a onde gravitazionali. Il segnale aumenta in frequenza da 35 a 250 Hz con una intensità di picco dell'onda gravitazionale di 1.0×10^{-21} . Questa corrisponde alla forma d'onda prevista dalla relatività generale per lo spiraleggiamento e la fusione di una coppia di buchi neri e lo smorzamento del segnale dovuto alla produzione risultante di un singolo buco nero. Il segnale osservato ha probabilità che sia prodotto casualmente da un evento di fondo inferiore a 1 evento su un intervallo di 203000 anni, equivalente a una significatività statistica maggiore di 5.1 deviazioni standard. La sorgente si trova a una distanza di luminosità corrispondente a un redshift di $z = 0.09^{+0.03}_{-0.04}$. Le masse iniziali dei buchi neri sono $36 \pm 5 M_{\odot}$ e $29 \pm 4 M_{\odot}$ e la massa del buco nero finale è $62 \pm 4 M_{\odot}$, con una quantità di energia pari a $3.0 \pm 0.5 M_{\odot}$ irradiata sotto forma di onde gravitazionali. Tutte le incertezze definiscono intervalli credibili del 90%.

Queste osservazioni dimostrano l'esistenza di sistemi binari di buchi neri di massa stellare. Questo è il primo rilevamento diretto di onde gravitazionali e la prima osservazione di una fusione di buchi neri binari."

Se avete avuto la pazienza di leggere la sintesi dell'articolo, avrete notato che misurando come varia l'intensità del segnale in funzione della frequenza, si ricava:

1. la massa iniziale dei due buchi neri;
2. la distanza di luminosità dei due oggetti, che corrisponde a circa 420 Mpc dalla Terra;
3. la massa del buco nero formato dalla fusione dei due;
4. il fatto che la somma di due masse pari a 36+29 masse solari dia 62 masse solari (e non 65!), perché circa $3 M_{\odot}$ si sono convertite in energia trasportata dall'onda gravitazionale. Oltre, ovviamente al fatto che
5. aver osservato in maniera diretta onde gravitazionali; e
6. che buchi neri possono accrescere fondendosi tra di loro! Prima di allora, nessuno sospettava l'esistenza di buchi neri di massa superiore a 20 masse solari.

La rivelazione ha aperto una pagina totalmente sconosciuta all'astrofisica che ha ripercussioni sul modello di evoluzione dell'Universo, che ora deve spiegare l'esistenza di tanti buchi neri così massicci (Figura 8). Giustamente il comitato Nobel ha immediatamente premiato tre tra i protagonisti di questa storia. L'osservazione di onde gravitazionali ha suscitato una enorme emozione tra gli addetti ai lavori. Io stesso ne sono stato particolarmente eccitato. In un articolo divulgativo che ho scritto per la rivista INFN *Asimmetrie* [18] riportavo:

"L'osservazione simultanea di un evento cosmico con onde gravitazionali, radiazione elettromagnetica e neutrini sarebbe epocale. Ci si aspetta che le onde gravitazionali e quelle elettromagnetiche si propagano alla stessa velocità

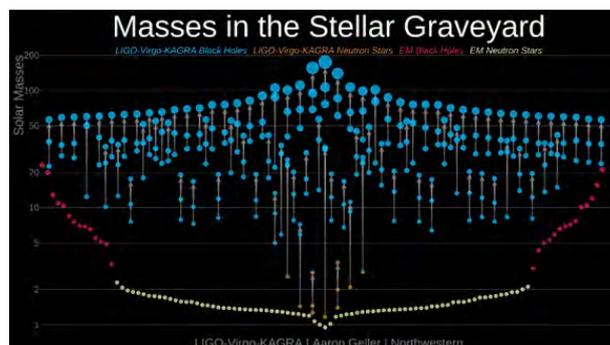


Figura 8: Stato della nostra conoscenza attuale di buchi neri di massa stellare e stelle di neutroni dopo i tre periodi di presa dati dei rivelatori di onde gravitazionali dal 2015 al 2020. Ogni insieme blu contiene tre punti: le masse (in unità di masse solari, scala in ordinata) dei buchi neri prima della fusione, e la massa del buco nero dopo la fusione. Le masse dei buchi neri conosciute prima dell'avvento degli interferometri per onde gravitazionali sono in rosso (a sinistra e destra). L'esistenza di buchi neri di massa > 20 masse solari era inaspettata prima dell'avvento di questi strumenti. I pochi punti in arancio in basso sono invece le coalescenze di stelle di neutroni, e i punti in giallo in basso sono le stelle di neutroni la cui massa era stimata tramite l'osservazione delle onde elettromagnetiche. Crediti: LIGO-Virgo / Aaron Geller / Northwestern University.

e che i neutrini dovrebbero leggermente ritardare a causa della loro (piccola) massa. Tali verifiche sperimentali toccano di per sé aspetti fondamentali dello studio della natura. Una situazione di tale tipo è prevista nel caso di coalescenza di due stelle di neutroni. Grazie all'osservazione dell'onda gravitazionale, è possibile ricavare i valori delle masse degli oggetti in gioco, la loro distanza dalla Terra, le proprietà connesse alla rotazione degli oggetti stessi. Nell'atto della coalescenza, certificato da un lampo di raggi gamma, potrebbe formarsi un buco nero, o un oggetto compatto con proprietà solo teorizzate (uno stato in cui i quark si uniscono non per formare un protone o neutrone, ma una specie di zuppa chiamata plasma di quark e gluoni). Nell'energia trasferita dal sistema ai suoi componenti, si dovrebbe

bero formare gli elementi più pesanti della tavola periodica, incluso l'oro e il platino. Nelle settimane successive la produzione di questi elementi, dovrebbe manifestarsi l'emissione di radiazione elettromagnetica caratteristica dei nuclei appena formati. L'osservazione congiunta di onde gravitazionali, fotoni e neutrini provenienti da questi oggetti aprirebbe un nuovo capitolo per lo studio delle interazioni di particelle in arrivo con energie irraggiungibili con tecniche terrestri. ”

Mi sembra incredibile, ma è bastato aspettare meno di un anno per vedere realizzato (quasi) tutto quello che descrivevo. Il 17 agosto 2017, gli interferometri LIGO e Virgo (in Italia) registravano un evento dovuto alla coalescenza di due stelle di neutroni in contemporanea (differenza di tempo di circa 2 secondi) con un lampo di raggi gamma registrato dai satelliti Fermi e Integral [19]. La simultaneità di questi due eventi ha portato circa 80 diversi esperimenti in cielo, terra, mare e ghiaccio a studiarne l'origine (figura 9). Si è così avuto la conferma che gli elementi pesanti (oro e platino) si formano proprio dalla coalescenza di due stelle di neutroni. Questa era una ipotesi astrofisica che necessitava di supporto sperimentale. Inoltre, si è osservato che radiazione elettromagnetica e onde gravitazionali si propagano alla velocità della luce (tenendo conto che la luce impiega poco più di un secondo per uscire dalla zuppa di particelle prodotta dalla coalescenza). L'evento è servito anche per stimare il valore della costante di Hubble, la grandezza che esprime la velocità di espansione dell'Universo e che attualmente è misurata con due tecniche sperimentali diverse che producono due numeri praticamente incompatibili tra loro.

Nella mia lista dei desideri sopra riportata, mancano i neutrini. Non perché non ci fossero, ma perché questi sono emessi in un getto di apertura piuttosto stretto che non intercettava la linea di vista della Terra. L'osservazione di neutrini avrebbe permesso di testare in maniera ancora più accurata i modelli astrofisici, e soprattutto (misurando il ritardo nell'arrivo) di determinare un valore per le loro masse. E, purtroppo, gli interferometri per la rivelazione di onde gravitazionali non avevano ancora la sen-

sibilità sufficiente (ad alte frequenze delle onde gravitazionali) per testare la eventuale presenza della zuppa di quark e gluoni sulla superficie dell'oggetto che si forma nello stato finale, o verificare se si è formato un buco nero o una nuova stella di neutroni.

La ricerca, fortunatamente non si arresta. I rivelatori LIGO negli USA e VIRGO in Italia si sono fermati nel marzo 2020 (forse la data ricorda qualcosa, anche se molti fanno finta che il Covid-19 non ci sia mai stato), e da allora hanno subito un processo di revisione e aggiornamento. A maggio 2023 (tra pochissime settimane) è previsto il loro riavvio, insieme a un nuovo arrivato, l'interferometro KAGRA in Giappone. Il nuovo periodo di presa dati congiunto porterà sicuramente nuove sorprese.

Conclusioni

La presenza di un flusso abbondante di raggi cosmici rappresenta la testimonianza che protoni e nuclei vengono accelerati da processi astrofisici che ancora non conosciamo bene (o, forse, non conosciamo affatto). Neutrini possono essere solo prodotti dall'interazione di adroni (protoni, nuclei). Neutrini diffusi di origine cosmica (ossia, di cui non si conosce con esattezza la direzione di provenienza) sono stati evidenziati con certezza dal telescopio IceCube e confermati con minore significatività statistica dei telescopi nel lago Baikal e da ANTARES nel mar Mediterraneo. Solo una piccola frazione (stimata dell'ordine del 10%) di questi neutrini è originata da sorgenti note, ossia che conosciamo perché emettono onde elettromagnetiche indotte dal moto di elettroni. Ciò significa che le sorgenti di neutrini potrebbero essere oggetti ancora parzialmente sconosciuti o poco studiati, oppure semplicemente che la scarsa precisione angolare del telescopio al polo Sud abbia condizionato le conclusioni. Inoltre, mentre un flusso abbondante di raggi cosmici carichi è prodotto da sorgenti nella nostra Galassia, nessun neutrino di origine galattica è stato sinora individuato in maniera non ambigua. In questo caso, quasi sicuramente il motivo è la posizione non adeguata del telescopio al polo Sud per osservare la regione centrale della Galassia, dove potenzialmente sono posizionate le possibili sorgenti. Il telescopio di neutrini nel

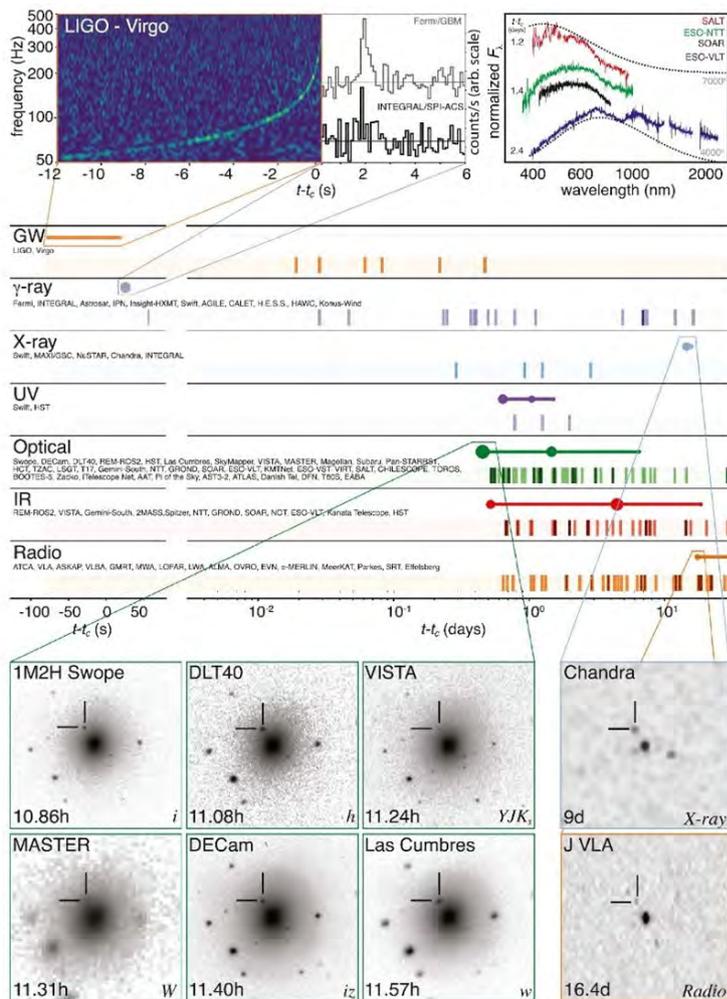


Figura 9: Uno dei simboli dell'astrofisica multi-messaggera [19]: la sequenza temporale della scoperta dell'onda GW170817 e del GRB 170817A. I due segnali sono arrivati in maniera indipendente a un centro di smistamento delle informazioni centralizzato. La caccia alla galassia che ospitava l'evento da parte di telescopi ottici ha avuto successo dopo circa una decina di ore (quando il Sole si è eclissato dalla zona interessata). La galassia coinvolta si trova a circa 40 Mpc dalla Terra. Nei giorni seguenti, la radiazione in arrivo era compatibile con i processi di formazione di elementi rari, come oro e platino (una quantità pari a circa la massa della Terra). Per chi fosse interessato a usare quella miniera, si ricordi che viaggiando alla velocità della luce si impiega 120 milioni di anni per arrivare sul posto. L'articolo in cui compare la figura comprende circa 3500 co-autori di 80 esperimenti diversi.

Mediterraneo, che opererà per almeno una decina di anni a partire dal suo completamento nel 2027, contribuirà sicuramente a chiarire molti di questi punti oscuri.

Le onde gravitazionali hanno recentemente aperto una finestra osservativa sull'Universo che sembrava impensabile e che ha potenzialità di miglioramento notevoli. Il nuovo periodo di presa dati di LIGO e VIRGO, con l'aggiunta di KAGRA, dovrebbe continuare per tutto il 2024. Dopo una fase di ulteriore miglioramento tecnico, i tre rivelatori dovrebbero riprendere con un ultimo periodo di acquisizione tra il 2026 e 2029 prima di passare il testimone alla prossima generazione di telescopi. Poiché i protoni possono produrre particelle secondarie neutre come i neutrini e i raggi gamma, e gli oggetti molto massivi produrre onde gravitazionali, lo studio dei fenomeni astrofisici in cui intervengono queste particelle pesanti passa necessariamente per l'astrofisica multimessaggera [20]. Questa metodologia per

lo studio di questi fenomeni straordinariamente affascinanti consiste nello studio del macrocosmo anche con le tecniche sperimentali usate in fisica delle particelle, usando le più moderne tecnologie di comunicazione tra diversi gruppi di ricerca. Sarà la sinergia tra i diversi gruppi di ricercatori ad aprirci nuovi orizzonti nel prossimo decennio su meccanismi ancora poco conosciuti in azione nell'Universo.

Ringraziamenti. L'autore ringrazia sentitamente il prof. Vincenzo Flaminio che mi ha invitato a scrivere il presente documento, e per i commenti alla prima versione. Il prof. Flaminio è stato inoltre un volontario, accuratissimo e utilissimo revisore del libro [20], e non saprò mai ringraziarlo a sufficienza per questo.



- [1] E. Hubble: *A Relation between Distance and Radial Velocity among Extra-Galactic Nebulae*, in Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 15 Issue 3, 15 marzo 1929, pp. 168-173.
- [2] A.D. Sakharov: *Violation of CP invariance, C asymmetry, and baryon asymmetry of the universe*, Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters, 5 (1967) 24.
- [3] Immagine archivio NASA: <http://chandra.harvard.edu/photo/2005/tycho/>
- [4] <https://masterclass.icecube.wisc.edu/en/analyses/cosmic-ray-energy-spectrum>
- [5] I. A. Grenier, J.H. Black, A. W. Strong: *The Nine Lives of Cosmic Rays in Galaxies*, Annu. Rev. Astron. Astrophys., 53 (2015) 199.
- [6] R. Battiston: *High precision cosmic ray physics with AMS-02 on the International Space Station*, La Rivista del Nuovo Cimento, 43 (2020) 319.
- [7] F. M. Rieger, E. de Ona-Wilhelmi, F. A. Aharonian: *TeV Astronomy*, Special issue of "Frontiers of Physics" on "High Energy Astrophysics" (eds. B. Zhang and P. Meszaros). <https://arxiv.org/abs/1302.5603>
- [8] T. K. Gaisser, T. Stanev: *Neutrinos and cosmic rays*, Astroparticle Physics, 39-40 (2012) 120.
- [9] M. Spurio: *Neutrini in profondità: Vita, morte e miracoli dei neutrini rivelati sotto terra, sotto i ghiacci o in fondo al mare*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1609.06710>
- [10] M.A. Markov: *On high energy neutrino physics*. Proc. 1960 Ann. Int. Conf. on High Energy Physics, Rochester 1960.
- [11] T. Chiarusi and M. Spurio: *High-energy astrophysics with neutrino telescopes*, Eur. Phys. J. C, 65 (2010) 649.
- [12] M. Spurio for the ANTARES Collaboration: *Highlights from the ANTARES neutrino telescope*, PoS NOW2022 (2023) 053 <https://pos.sissa.it/421/053>
- [13] IceCube Collaboration: *Observation of High-Energy Astrophysical Neutrinos in Three Years of IceCube Data*, Phys. Rev. Lett., 113 (2014) 101101.
- [14] IceCube Collaboration: *Neutrino emission from the direction of the blazar TXS 0506+056 prior to the IceCube-170922A alert.*, Science, 361 (2018) 147.
- [15] IceCube Collaboration: *Evidence for neutrino emission from the nearby active galaxy NGC 1068*, Science, 378 (2022) 538.
- [16] Km3NeT Collaboration: *Letter of Intent for KM3NeT 2.0.*, Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics, 43 (2016) 084001.
- [17] LIGO Scientific Collaboration, the Virgo Collaboration: *Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger*, Phys. Rev. Lett., 116 (2016) 061102.
- [18] M. Spurio: *Tutte le voci dell'universo*, Asimmetrie, 21 (2016) 21. <https://www.asimmetrie.it/archivio>
- [19] B. P. Abbott et al.: *Multi-messenger Observations of a Binary Neutron Star Merger*, Astrophys. J. Lett., 848 (2017) L12.
- [20] M. Spurio: *Probes of Multimessenger Astrophysics. Charged cosmic rays, neutrinos, γ -rays and gravitational waves.*, Springer, Astronomy and Astrophysics Library, Berlino (2018). <https://doi.org/10.1007/978-3-319-96854-4>



Maurizio Spurio: è professore di fisica Sperimentale a Bologna. L'attività di ricerca verte sulla fisica astroparticellare. Dopo aver partecipato all'esperimento MACRO al Gran Sasso, dal 2001 è coinvolto nelle attività relative ai telescopi per neutrini nel mar Mediterraneo (ANTARES e KM3NeT). Dell'esperimento ANTARES è viceportavoce dal 2014. Ha pubblicato oltre 240 articoli, tra cui articoli di rassegna. È autore di alcuni libri, tra cui "Probes of Multimessenger Astrophysics" (Springer). È stato membro nel Senato Accademico UniBo e si occupa di divulgazione scientifica.