

L'universo poliglotta

Messaggeri dell'infinitamente piccolo e dell'infinitamente grande

di Nicolao Fornengo





a.
La nostra galassia, la Via Lattea
vista dalla Terra.

“E quindi uscimmo a riveder le stelle”, scrive Dante nell’ultimo verso dell’Inferno della Divina Commedia: al termine del lungo e faticoso viaggio, Dante e Virgilio escono e contemplanano il cielo notturno stellato. Questa contemplazione, che nella Divina Commedia assume un significato simbolico, non è diversa dalla meraviglia che proviamo quando, seduti in una sera d’estate su un prato in montagna, alziamo gli occhi verso il cielo e osserviamo la Via Lattea nella sua maestosità. Quello che vediamo è la luce delle stelle che compongono la

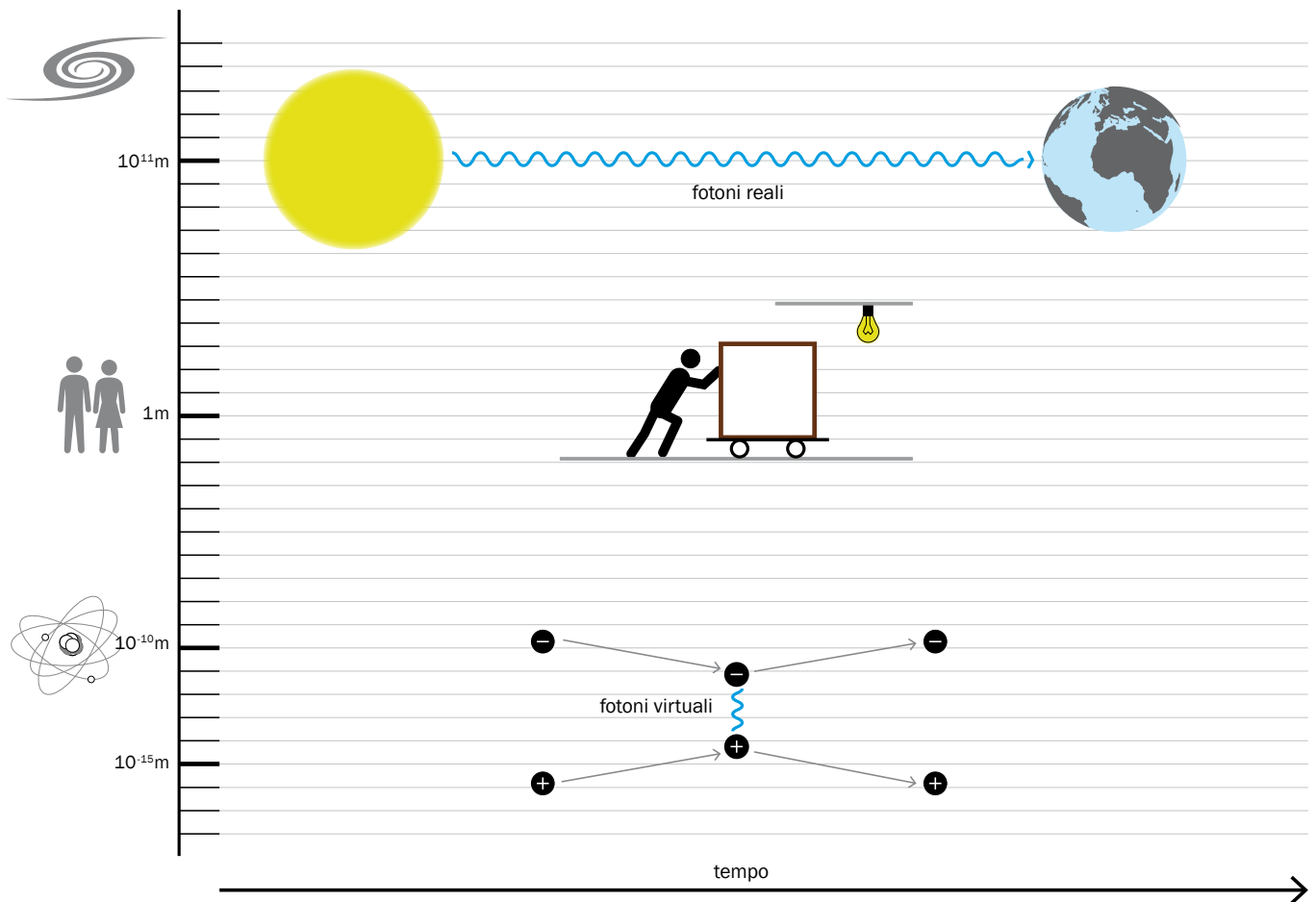
nostra galassia: a una osservazione meno poetica ma più scientifica, quella luce rappresenta un “messaggero”, che ci porta informazione su cosa accadeva tanto tempo fa, da qualche parte nella galassia.

In fisica il concetto di messaggero è molto importante e assume un duplice ruolo. Per la fisica dell’infinitamente piccolo, ovvero la fisica delle particelle, le interazioni fondamentali che ne regolano il comportamento si manifestano attraverso lo scambio di particelle messaggero, i cosiddetti mediatori dell’interazione, che

dipendono dal tipo di forza che stiamo considerando. Per la fisica dell’infinitamente grande, ovvero per l’astrofisica e la cosmologia, i messaggeri cosmici sono quei segnali di varia natura (radiazione elettromagnetica, raggi cosmici, neutrini, onde gravitazionali) che ci portano l’informazione su fenomeni ed eventi che avvengono lontano, spesso molto lontano, da noi: questi messaggeri sono fondamentali per permetterci di investigare il cosmo, dato che non possiamo andare a vedere cosa succede vicino a una supernova, a un buco nero o dentro un’altra galassia.

La descrizione della Natura a livello fondamentale si basa sul concetto di campo quantistico relativistico, che unisce in modo perfetto il concetto di campo con i concetti della meccanica quantistica e della relatività speciale. È un costrutto teorico molto sofisticato che permette di descrivere la struttura della materia in termini di particelle elementari in interazione tra di loro attraverso lo scambio di “messaggeri di interazione”, che sono a loro volta particelle.

Prendiamo ad esempio l’interazione elettromagnetica, responsabile di tutti i fenomeni elettrici e magnetici, come ad esempio la repulsione tra due cariche elettriche di segno uguale (due elettroni) oppure la propagazione della luce.



Classicamente, l'interazione tra cariche è descritta in termini di una forza dovuta alla presenza del campo elettromagnetico, mentre la luce non è altro che il campo elettromagnetico stesso che si propaga sotto forma di onda. Con lo sviluppo della teoria quantistica dei campi, l'interazione elettromagnetica viene descritta in termini di eccitazioni quantistiche di campi relativistici: queste eccitazioni sono le particelle, e la loro mutua interazione si realizza attraverso lo scambio di un messaggero. Tutte le particelle sono descritte da campi relativistici: non solo il fotone, che è il quanto del campo elettromagnetico, ma anche l'elettrone. Abbiamo quindi campi di materia e campi di interazione. I campi di materia o particelle (l'elettrone nel nostro esempio) interagiscono scambiandosi campi di radiazione, la cui eccitazione sotto forma di particella è il fotone: l'interazione è quindi vista come lo scambio di un messaggero, il fotone, tra due elettroni. La teoria completa che descrive l'interazione elettromagnetica si chiama elettrodinamica quantistica (o Qed), e uno dei suoi padri più

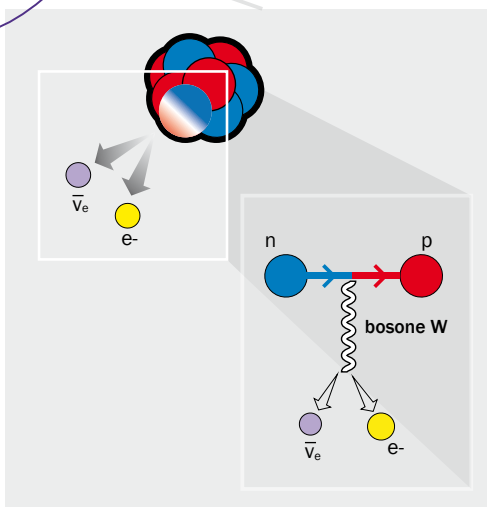
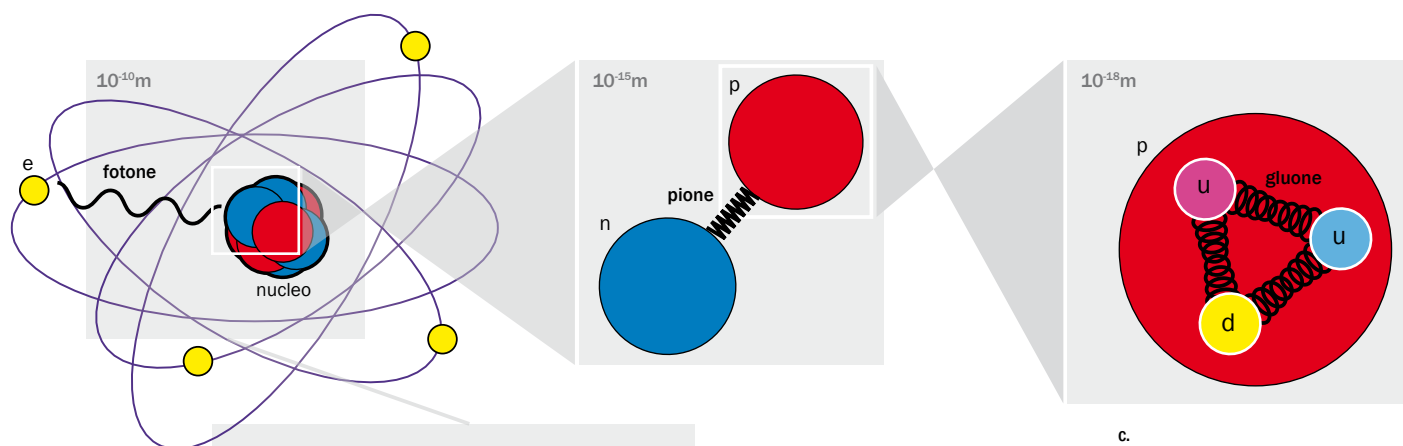
illustri è Richard P. Feynman, di cui proprio quest'anno ricorre il centenario della nascita. La teoria prescrive che due elettroni si scambino non uno, ma un numero arbitrario di fotoni, con sempre minore probabilità quanto più alto è il numero di fotoni scambiati: questo è quello che a livello fondamentale chiamiamo interazione elettromagnetica (vd. in *Asimmetrie* n. 20 p. 10 e in *Asimmetrie* n. 23 p. 34, ndr). Anche il fotone è a sua volta una particella, e può benissimo propagarsi nel vuoto liberamente. C'è tuttavia una differenza cruciale tra un elettrone e un fotone, oltre al fatto che hanno massa diversa e carica elettrica diversa: l'elettrone ha una caratteristica intrinseca chiamata spin (o momento angolare intrinseco) che ha valore $1/2$ (in unità della costante di Planck divisa per 2π), mentre il fotone ha spin 1 (nelle stesse unità). Le idee di Feynman e di molti altri brillanti fisici teorici della sua epoca e di quella successiva hanno portato, tra gli anni '50 e gli anni '70, alla formulazione del modello standard delle interazioni fondamentali che descrive

b. I messaggeri delle onde elettromagnetiche. Noi riceviamo la luce dal Sole e dalle altre stelle attraverso i fotoni reali, con un ritardo che dipende dalla distanza: nel viaggio dal Sole alla Terra la luce impiega otto minuti e mezzo, nel caso di galassie lontane il viaggio può durare miliardi di anni. L'interazione elettromagnetica tra particelle è mediata da fotoni virtuali, che vengono scambiati, in tempi brevissimi e su piccolissime distanze, tra le particelle cariche in interazione: questi processi sono rilevanti a scala subatomica. Alla scala delle dimensioni umane, i nostri sensi non percepiscono nessuno di questi effetti: la luce di una lampadina impiega qualche nanosecondo per raggiungere i nostri occhi e la trasmissione ci sembra istantanea, mentre il nostro tatto non è in grado di rivelare i fenomeni alla scala atomica, per cui le interazioni con gli oggetti che ci circondano ci appaiono come forze di contatto.

appunto tutte le interazioni note (tranne la gravità, che continua a restare su un altro piano per il momento) in termini analoghi a quello che abbiamo visto per la Qed: le particelle che compongono la struttura fondamentale della materia sono tutte particelle con spin 1/2 (i campi di materia) mentre le interazioni sono mediate da particelle di spin 1 (campi di interazione), che rappresentano i messaggeri dell'interazione. I campi di materia sono quindi dei cosiddetti "fermioni" (particelle con spin semi-intero, nello specifico 1/2), mentre i mediatori di interazione sono dei cosiddetti "bosoni" (particelle con spin intero, in particolare 1). I campi di materia fondamentali sono i sei "leptoni" (elettrone, muone e particella tau, assieme ai loro corrispondenti neutrini) e i sei "quark" (up, down, charm, strange, top, bottom) e le loro antiparticelle. Tutti tranne i neutrini (che non hanno carica elettrica)

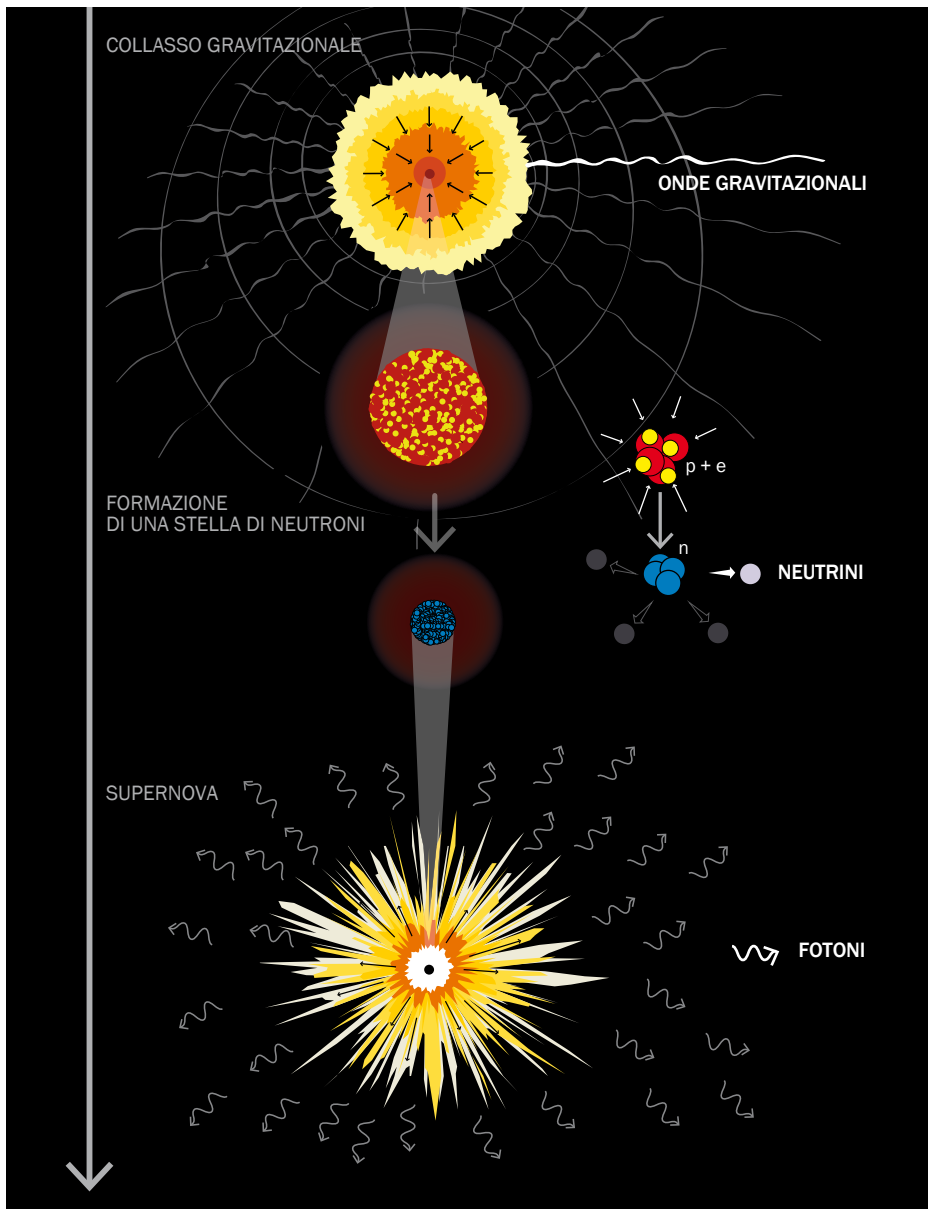
sentono l'interazione elettromagnetica. Tutti sentono l'interazione "debole", quella responsabile di fenomeni come il decadimento radioattivo beta. Solo i quark sentono l'interazione "forte", che è quella responsabile ad esempio del fatto che due quark up e un quark down si legano a formare il protone. Tutti i fenomeni osservati in fisica sono ascrivibili alla presenza di queste sole tre interazioni fondamentali: ognuna di loro deve quindi manifestarsi attraverso lo scambio di messaggeri opportuni. L'interazione elettromagnetica è mediata dallo scambio del fotone. L'interazione debole è mediata da tre particelle: una neutra detta Z e due cariche, chiamate W^+ e W^- . Una differenza fondamentale tra il fotone e questi bosoni è che il fotone ha massa zero, mentre questi hanno una massa decisamente grande (circa 100 volte la massa del protone): il meccanismo attraverso cui essi acquisiscono la loro massa coinvolge il

bosone di Higgs, e il fatto che abbiano massa fa sì che l'interazione mediata da questi messaggeri "deboli" e pesanti avvenga solo su distanze molto piccole. Questo è molto diverso dal caso dell'interazione elettromagnetica, in cui lo scambio di un fotone a massa nulla produce una interazione a lungo raggio. L'interazione forte infine è mediata da otto particelle chiamate "gluoni" (da *glue*, colla in inglese), tutte a massa nulla: i quark si legano fortemente a formare protoni e neutroni (e moltissime altre particelle composite, dette "barioni" e "mesoni") proprio grazie allo scambio di gluoni. Una particolarità dell'interazione forte è che essa non permette ai quark di restare separati: essi devono necessariamente rimanere fortemente legati a formare barioni e mesoni. Anche l'interazione forte quindi si manifesta solo a corto raggio, nonostante i suoi mediatori abbiano massa nulla (vd. p. 10, ndr).



decadimento beta

c. Le interazioni elettromagnetiche, per esempio quelle che tengono insieme gli atomi, sono mediate dai fotoni. Il nucleo è invece tenuto insieme dall'interazione forte, che può essere rappresentata attraverso lo scambio di pioni, particelle dotate di massa, per cui l'interazione forte non può propagarsi a distanze superiori al raggio del nucleo. Il protone e il neutrone sono costituiti da quark: in questo caso l'interazione forte avviene tra le cariche di colore dei quark ed è mediata dai gluoni. L'interazione debole è invece responsabile dei decadimenti beta di alcuni nuclei, nei quali un neutrone si trasforma in un protone emettendo un elettrone e un antineutrino: l'interazione debole in questo caso è mediata da un bosone W (in altri casi da un bosone Z).



d.
Un esempio di un possibile evento multimessaggero, rappresentato dall'evoluzione finale di una stella che ha esaurito i suoi processi di combustione: nella prima fase la stella subisce un collasso gravitazionale, emettendo onde gravitazionali; la contrazione del nucleo genera un plasma di protoni ed elettroni, che si possono fondere dando luogo a una stella di neutroni con emissioni di neutrini; le parti più esterne della stella iniziale, costituite da elementi pesanti, "rimbalzano" e possono dar luogo a vari fenomeni, il più noto dei quali è la grande emissione luminosa che viene osservata dalla Terra come la comparsa di una supernova.

tali da richiedere che la sua eccitazione di particella (il gravitone) deve avere spin 2, mentre l'eccitazione di particella del campo elettromagnetico (il fotone) ha spin 1 (vd. p. 16, ndr).

Tutte le particelle di cui abbiamo parlato possono svolgere anche un altro ruolo nella nostra investigazione della Natura: quella di "messaggeri cosmici". Nell'universo avvengono fenomeni di ogni tipo, alcuni dei quali non saremo mai in grado di riprodurre in laboratorio: la possibilità di accedere a questi fenomeni ci può quindi permettere di comprendere il mondo fisico e le sue leggi in modo profondo. L'accesso a questa informazione è possibile proprio grazie ai messaggeri che i fenomeni che avvengono nell'universo ci mandano. Oggi viviamo nel periodo storicamente più eccitante per lo studio dell'universo. Siamo in grado di osservare l'intero spettro possibile di questi messaggeri cosmici, che per poter arrivare fino a noi devono essere particelle stabili: questo avviene solo per i fotoni, i neutrini, gli elettroni e i positroni, i nuclei atomici stabili, e ovviamente le onde gravitazionali.

Le capacità osservative moderne ci permettono di avere accesso all'intero spettro della radiazione elettromagnetica, dalla banda radio, all'emissione infrarossa, visibile, ultravioletta, ai raggi X e infine ai super-energetici raggi gamma. Ognuna di queste frequenze ci racconta una parte, talvolta complementare

In tutto questo si nota l'assenza della forza di gravità. L'interazione gravitazionale è descritta in modo mirabile dalla relatività generale di Einstein, ma ha caratteristiche tali da non essere facilmente posta nel contesto della teoria quantistica dei campi: tanto che, fino ad oggi nessuno ha trovato una soluzione definitiva al problema, anche se ci sono diversi interessanti tentativi. Quello che si può ragionevolmente pensare però è che qualsiasi teoria quantistica della gravità che permetta di descrivere questa interazione come scambio di messaggeri, analogamente alle altre interazioni, ha necessariamente come messaggero una particella,

detta "gravitone", che come il fotone ha massa nulla, ma a differenza del fotone ha spin 2. Pur in assenza di una teoria quantistica della gravità, questo si comprende dal fatto che l'interazione gravitazionale è un'interazione a lungo raggio con un comportamento simile all'interazione elettromagnetica (e quindi entrambe devono avere mediatori a massa nulla) ma anche dal fatto che così come il campo elettromagnetico si propaga nel vuoto nella forma di un'onda che viaggia alla velocità della luce, così fa il campo gravitazionale, con la differenza però che l'onda gravitazionale ha proprietà di momento angolare diverse da quelle del campo elettromagnetico

talvolta correlata alle altre, della storia del nostro universo e ci permette di indagare a fondo il funzionamento suo e di tutti quei misteriosi sistemi che lo compongono. Solo per fare qualche esempio: dalla radiazione cosmica di fondo a microonde impariamo come era l'universo all'inizio della sua vita e come si è evoluto successivamente; con le onde radio possiamo studiare le parti più interne delle galassie fino al loro nucleo oppure le pulsar, che sono stelle di neutroni in rapida rotazione; con la radiazione infrarossa possiamo sapere dove si trovano le polveri nelle galassie; con la luce visibile e ultravioletta studiamo le stelle; con i raggi X possiamo stabilire quali atomi sono presenti nelle galassie, oppure la presenza di gas caldo; con i raggi gamma studiamo i fenomeni più estremi che avvengono nell'universo. Tutto questo costituisce quello che viene chiamata "astrofisica multifrequenza" (vd. p. 27, ndr).

Possiamo però fare di più: possiamo guardare il cielo anche attraverso i neutrini (vd. p. 23, ndr), che vengono prodotti ad esempio all'interno delle stelle nello stesso processo di reazione termonucleare che le fa brillare, oppure che vengono prodotti in grande quantità nelle esplosioni di supernova, o ancora che vengono emessi da nuclei galattici attivi al centro delle galassie (vd. in *Asimmetrie* n. 18 p. 38, ndr). Ma le esplosioni di supernova e i nuclei galattici attivi emettono anche nuclei atomici oppure elettroni e positroni, che vanno a formare quella componente di radiazione cosmica elettricamente carica (i raggi cosmici) che è una ulteriore finestra aperta sull'universo. Dallo studio multifrequenza possiamo estenderci quindi allo studio "multimessaggero". Questi messaggeri ci raccontano non una, ma molte storie: sta a noi ascoltarli tutti e capire i messaggi che ci portano. Anche la materia oscura è tra le storie che questi messaggeri ci possono raccontare: lo studio multimessaggero dei segnali particellari di materia oscura rappresenta infatti una delle grandi sfide contemporanee (vd. p. 13, ndr).

Da un paio d'anni a questa parte abbiamo un ulteriore messaggero a disposizione: le onde gravitazionali. L'universo visto attraverso le onde gravitazionali ci permette di osservare fenomeni che altrimenti non saremmo in grado di vedere direttamente, come la fusione di due buchi neri. Ma ci permette anche di aggiungere una informazione cruciale allo studio e alla comprensione di fenomeni che, per loro natura, ci inviano tutti i tipi di segnale ma che possiamo comprendere a fondo solo



combinando con cura e attenzione tutti i tasselli a nostra disposizione (vd. p. 20, ndr). L'osservazione della fusione di due stelle di neutroni nell'intero spettro multimessaggero, onde gravitazionali comprese, che si è realizzata l'anno scorso combinando tutti i canali osservativi a disposizione, rappresenta il coronamento mirabile di una lunghissima strada che con coraggio e visione fisici e astrofisici hanno intrapreso e che ci ha portati allo sviluppo di tecniche capaci di ascoltare il sussurro dell'universo in ogni sua sfumatura (vd. p. 31, ndr). E allo stesso tempo, rappresenta l'inizio di una nuova era nello studio dell'universo che ci porterà sicuramente ancora molte emozionanti sorprese.

e. Immagine combinata nello spettro ottico e dei raggi X della Nebulosa del Granchio. I raggi X rivelano la presenza di una giovane pulsar, la PSR B0531+21.

Biografia

Nicolao Fornengo è professore di fisica teorica all'Università di Torino. Ha svolto ricerche presso la John Hopkins University (Usa), l'Università di Valencia (Spagna), il Laph di Annecy (Francia). Si occupa di materia oscura, sia nell'ambito della fisica delle particelle che della ricerca di segnali astrofisici. Si occupa inoltre di fisica del neutrino, incluse le sue implicazioni astrofisiche e cosmologiche e più in generale della connessione tra la fisica delle particelle e la cosmologia.

DOI: 10.23801/asimmetrie.2018.25.1