

[messaggeri]

anno 13 numero **25** / 10.18

asimmetrie

rivista semestrale dell'Istituto
Nazionale di Fisica Nucleare



asimmetrie

Cari lettori di Asimmetrie,

Il concetto di messaggero in questi tempi dove i messaggi corrono sulle fibre ottiche e ci raggiungono continuamente da ogni parte del mondo, spesso con contenuti inutili, fastidiosi o pericolosi, si è un poco perduto.

Affascinanti erano i tempi in cui l'imperatore di Roma, per comunicare un ordine alle sue legioni al Vallo di Adriano, affidava alle Poste Imperiali un messaggio che veniva consegnato forse in una decina di giorni. E che dire di quel figlio di re che, volendo raggiungere i confini del suo regno e mantenere allo stesso tempo un legame con la propria città, inviava dei messaggeri che con le loro progressive difficoltà a ritornare sono una delle più belle metafore dell'universo in espansione?

Certo, il nostro universo si espande sì, e forse in maniera imprevedibilmente accelerata, ma ci manda dei messaggeri continuamente, ciascuno dei quali contiene un minuscolo pezzo di informazione sulla sorgente che ce lo ha inviato.

Forse ci piacerebbe (o anche no!) ricevere dei messaggi chiari da qualche altra civiltà, ma vediamo di accontentarci di quello che c'è! Se un lampo di luce, un gruppo di neutrini, un protone di energia straordinaria che illumina il cielo del Sud sono, ciascuno di essi, un segnale importante, immaginate invece se potessero essere visti da diversi strumenti tutti insieme contemporaneamente. Avremmo una visione della sorgente molto completa e del nostro universo ne sapremmo di più.

Solo da due anni, grazie agli straordinari strumenti che abbiamo potuto costruire, siamo in grado di affrontare questa sfida. La spettacolare coalescenza di due stelle di neutroni, rivelata negli interferometri Ligo e Virgo dalle onde gravitazionali emesse, ha indicato a decine di telescopi a terra e nello spazio di seguire l'evoluzione di questo fenomeno per almeno un anno. Un balzo gigantesco nella conoscenza delle misteriose stelle di neutroni. E da poco è stato osservato un neutrino di altissima energia a IceCube al Polo Sud, che ci ha indicato una sorgente che ha anche emesso un fotone molto energetico rivelato dal telescopio Magic alle Isole Canarie.

È nata l'astronomia multimessaggera. Seguiteci, tante sorprese ci aspettano.

Buona lettura.

Fernando Ferroni

presidente Infn



asimmetrie

Rivista dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare

Semestrale, anno 13,
numero 25, ottobre 2018

direttore responsabile

Fernando Ferroni, *presidente Infn*

direttore comitato scientifico

Egidio Longo

comitato scientifico

Vincenzo Barone
Massimo Pietroni
Giorgio Riccobene
Barbara Sciascia

caporedattore

Catia Peduto

redazione

Francesca Mazzotta
Francesca Cuicchio
(infografiche)

hanno collaborato

Pia Astone, Riccardo Barbieri,
Mariangela Cestelli Guidi, Eleonora Cossi,
Viviana Fafone, Felice Farina,
Nicolao Fornengo, Francesco Guerra,
Ettore Majorana, Vincenzo Napolano,
Marco Pallavicini, Pierluigi Paolucci,
Albino Perego, Claudia Pistone,
Mauro Raggi, Chiara Tornese,
Filippo Vernizzi, Rita Vitale

contatti redazione

Infn Ufficio Comunicazione
piazza dei Caprettari 70
I-00186 Roma
T +39 06 6868162
F +39 06 68307944
comunicazione@presid.infn.it
www.infn.it

impaginazione

Tipolitografia Quatrini

stampa

Tipolitografia Quatrini

su carta di pura cellulosa
ecologica ECF
Fedrigoni Symbol™ Tatami
250 - 135 g/m²

Registrazione del Tribunale di Roma
numero 435/2005 del 8 novembre 2005.
Rivista pubblicata da Infn.

Tutti i diritti sono riservati. Nessuna parte della
rivista può essere riprodotta, rielaborata o
diffusa senza autorizzazione scritta dell'Infn,
proprietario della pubblicazione.

Finita di stampare nel mese di settembre 2018.
Tiratura 19.000 copie.

come abbonarsi

L'abbonamento è gratuito.

Per abbonarsi compilare l'apposito
form sul sito www.asimmetrie.it

In caso di problemi contattare
la redazione all'indirizzo
comunicazione@presid.infn.it

sito internet

**Asimmetrie 25 e tutti i numeri
precedenti della rivista sono
disponibili anche online su
www.asimmetrie.it**

e-magazine

**Asimmetrie è anche disponibile
in versione digitale, ricca di ulteriori
contenuti multimediali, come app
di iOS e Android sull'Apple Store
e nel Google Play Store.**

crediti iconografici

Foto copertina © Istockphoto.com
(BrianAJackson) // foto p. 4 © Istockphoto.com
(FTiare); foto p.5 ©Wikimedia/Man vy; figg.
b, c, d pp. 6,7,8 © Asimmetrie-Infn; foto e p.
9 © NASA/CXC-HST/ASU/J. Hester et al. //
figg. a, b pp. 10,11 © Asimmetrie-Infn; fig. c
p. 12 ©Centre for the Subatomic Structure of
Matter (CSSM) and Department of Physics,
University of Adelaide, 5005 Australia/
DerekLeinweber // foto a p. 13 ©AIP Emilio
Segrè Visual Archives, John Irwin Slide
Collection; foto b p. 14 ©F. Mazzotta/INFN;
foto c p. 15 ©C. Federici-LNF/INFN // foto a p.
16 ©AIP Emilio Segrè Visual Archives, Segrè
Collection; fig. b p. 17 © Asimmetrie-Infn; foto
c p. 18 © Eastern Nazarene College, courtesy
AIP Emilio Segrè Visual Archives; foto d p. 19
©Photograph by Paul Ehrenfest, Jr., courtesy
AIP Emilio Segrè Visual Archives, Weisskopf
Collection // foto a p. 20 © Maurizio Perciballi;
fig. b p. 21 © Asimmetrie-Infn; fig. c p. 22 ©
A5_c©LIGO/Virgo/NASA/Leo Singer (Milky Way
Image Axel Mellinger// foto a p. 23 © ESO;
foto b p. 24 © Martin COBER/LNGS-INFN;
fig. c pp. 25 © Asimmetrie-Infn; fig. d p. 26 ©
IceCube Collaboration // fig. pp. 27, 29, 30 ©
Asimmetrie-Infn // foto a p. 31 © NSF_LIGO_
Sonoma_State_University_A..Simonnet; fig. p.
32 © Asimmetrie-Infn; foto c p. 33 © Caltech/
MIT/LIGO Lab; foto c p. 34 © ESO/N.R. Tanvir,
A.J. Levan and the VIN-ROUGE collaboration //
foto p. 35 © Innoseis // foto a p. 36 © Hulton
Archive; foto b p. 37 © AIP Emilio Segrè Visual
Archives, Segre Collection // foto a p. 38 ©
LNF-INFN; fig. b p. 39 © Asimmetrie-Infn //
foto a, b p. 40, 41 © Cinecittà-Luce // foto a
p. 44 © C.Federici-LNF/INFN ; foto b p. 45 ©G.
Micheletti-INFN; foto c p. 45 © E. Motta-INFN
// foto b p. 47 © TIFPA // foto a p. 48 ©
Maurizio Perciballi.

Ci scusiamo se, per cause del tutto
indipendenti dalla nostra volontà, avessimo
omesso o citato erroneamente alcune fonti.

as

25 / 10.18

[messaggeri]

L'universo poliglotta di Nicolao Fornengo	4	[as] radici Scambi forti. di Francesco Guerra	36
Il potere della mediazione di Riccardo Barbieri	10	[as] intersezioni Luce sulle molecole. di Mariangela Cestelli Guidi	38
Il lato oscuro di Mauro Raggi	13	[as] con altri occhi Conversazioni atomiche. di Felice Farina	40
Quanti di peso di Filippo Vernizzi	16	[as] selfie Nei licei tra arte e scienza. di Claudia Pistone, Chiara Tornese, Rita Vitale	42
Travolti dalle onde di Viviana Fafone	20	[as] spazi Un safari fotografico nei laboratori. di Vincenzo Napolano	44
Dal profondo del cosmo di Marco Pallavicini	23	[as] traiettorie Una vita tra i protoni. di Eleonora Cossi	46
Tutti i colori del cielo di Alessandro De Angelis	27	[as] illuminazioni Interferometro fai da te. di Pia Astone ed Ettore Majorana	48
Con gli occhi puntati di Albino Perego	31		
[as] riflessi Sismometri 2.0. di Francesca Mazzotta	35		

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 contemplan 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

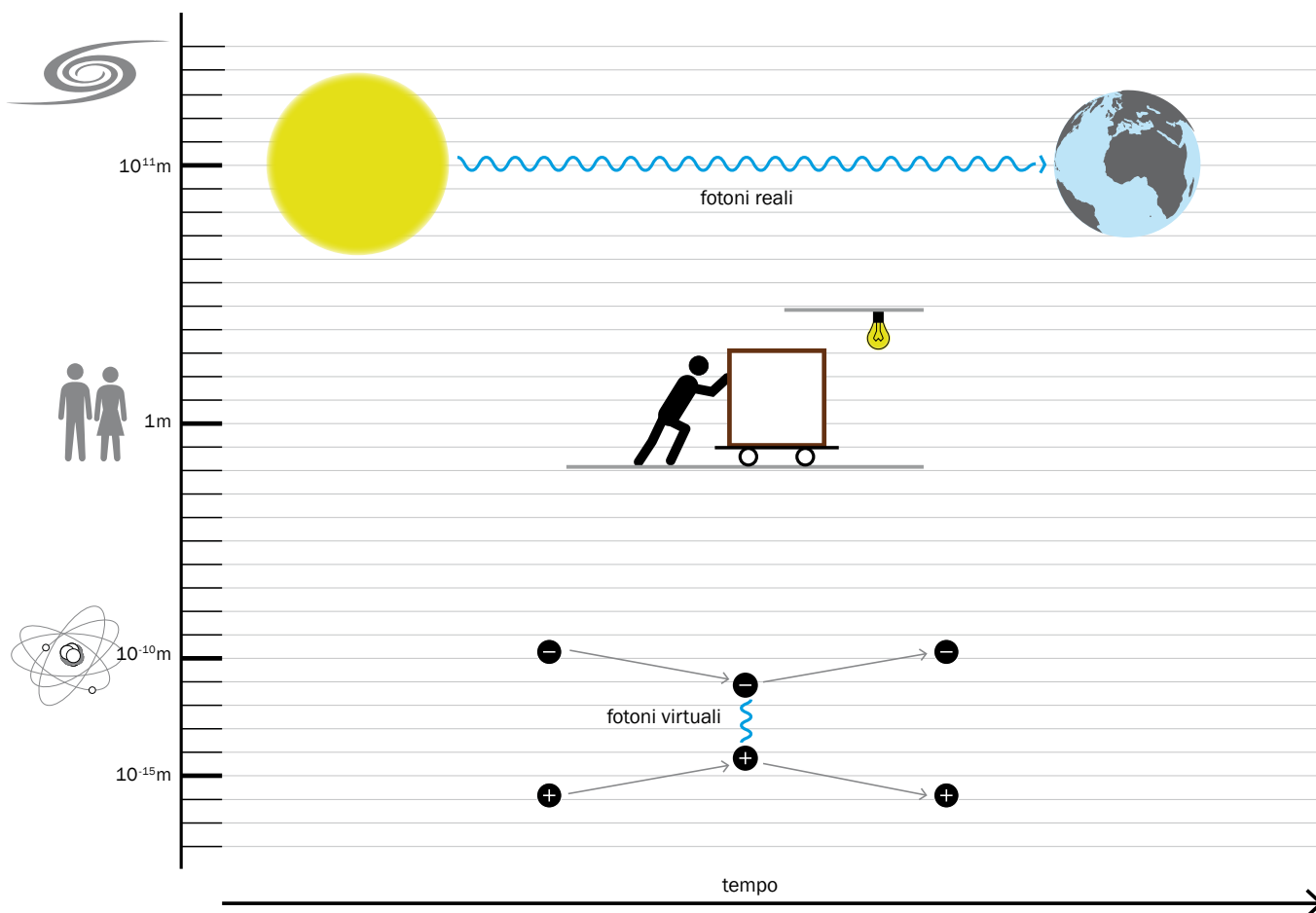
nostra galassia: a una osservazione meno poetica ma più scientifica, quella luce rappresenta un “messaggero”, che ci porta informazione su cosa accadeva tanto tempo fa, da qualche parte nella galassia.

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

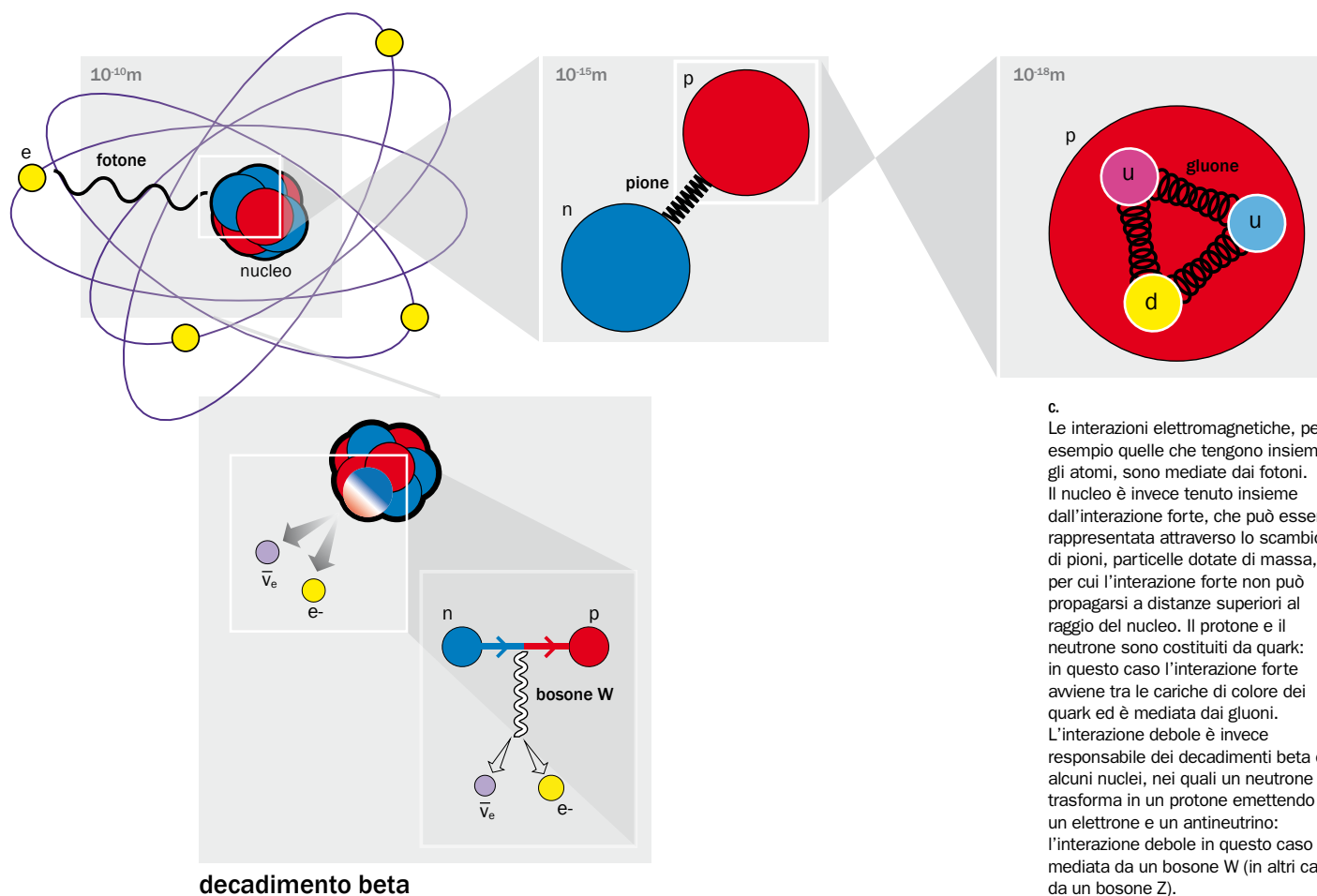
illustri è Richard P. Feynman, di cui proprio quest'anno ricorre il centenario della nascita. La teoria prescrive che due elettroni si scambino non uno, ma un numero arbitrario di fotoni, con sempre minore probabilità quanto più alto è il numero di fotoni scambiati: questo è quello che a livello fondamentale 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.

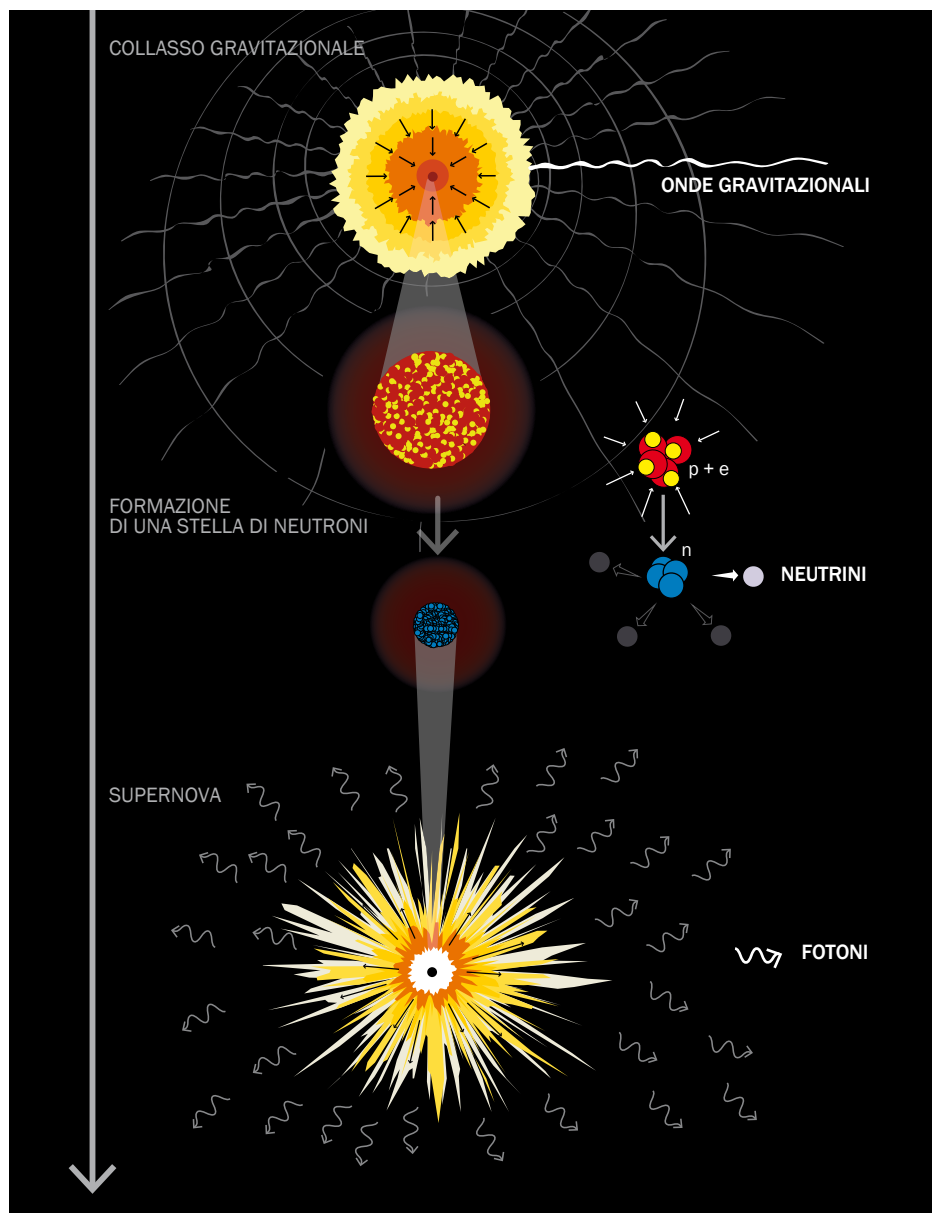
appunto tutte le interazioni note (tranne la gravità, che continua a restare su un altro piano per il momento) in termini analoghi a quello che abbiamo visto per la Qed: le particelle che compongono la struttura fondamentale della materia sono tutte particelle con spin $1/2$ (i campi di materia) mentre 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).



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 emissione 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 una 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

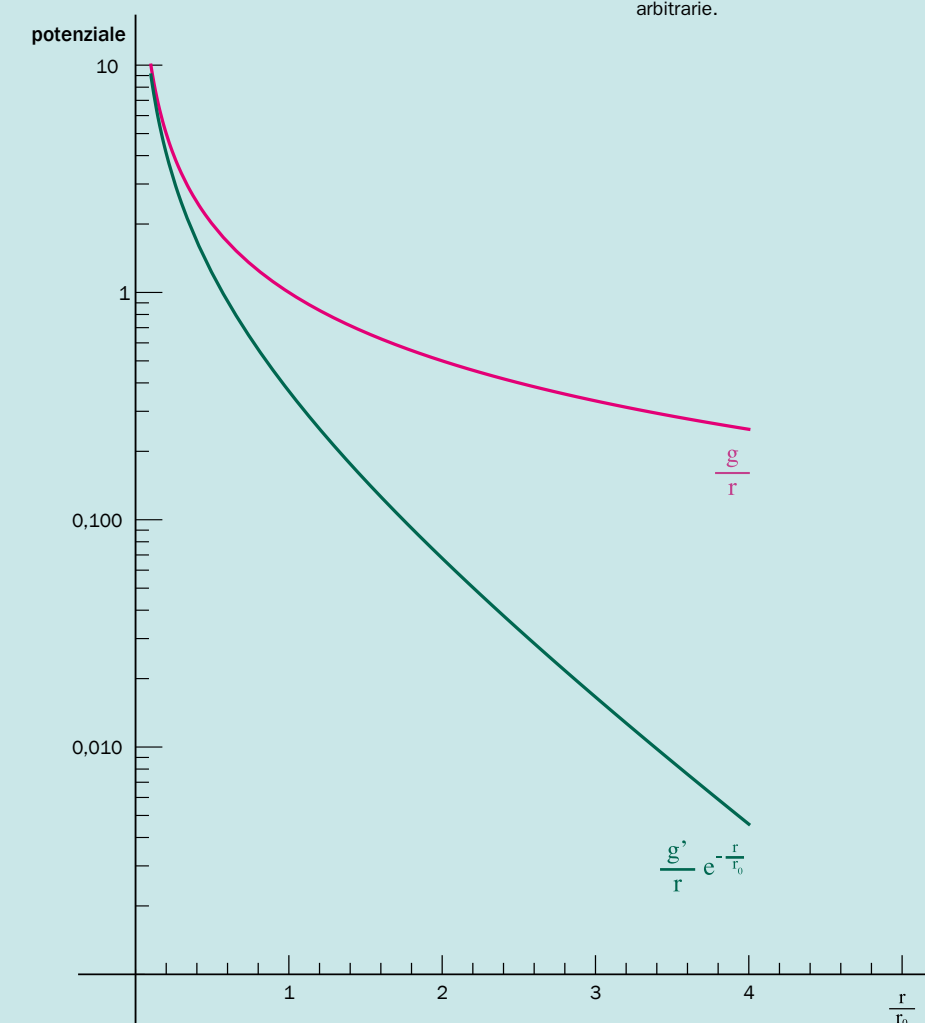
Il potere della mediazione

Le interazioni fondamentali e i loro portatori

di Riccardo Barbieri

Le interazioni gravitazionali sono entrate prepotentemente nella scienza, da quando Newton, nel 1687, formula la sua famosa legge che stabilisce che l'attrazione tra due masse è proporzionale al loro prodotto e inversamente proporzionale al quadrato della loro distanza. Circa un secolo dopo, Coulomb introduce una legge analoga per l'interazione tra due cariche elettriche, di nuovo proporzionale al loro prodotto e inversamente proporzionale al quadrato della loro distanza, che costituisce un primo passo verso l'interpretazione di tutte le interazioni elettromagnetiche. Come mai si deve invece attendere il '900 perché appaiano sulla scena della scienza anche le interazioni deboli e le interazioni forti, o nucleari? La ragione è chiara: il diverso raggio d'azione (o "*range*") delle rispettive forze. Si usa dire che le interazioni gravitazionali ed elettromagnetiche hanno *range* infinito mentre le interazioni nucleari e deboli hanno *range* finito, oltre il quale gli effetti corrispondenti svaniscono rapidamente.

Le caratteristiche delle interazioni elettromagnetiche possono essere descritte mediante un potenziale cosiddetto "coulombiano" inversamente proporzionale alla distanza dalla sorgente (vd. fig. a). Alle interazioni nucleari e deboli si può attribuire un potenziale analogo, corretto però con un termine che decresce esponenzialmente con la distanza e dipende da una lunghezza caratteristica r_0 che determina il *range* dell'interazione (vd. fig. a). Tale potenziale è detto "di Yukawa", dal nome dell'autore che lo introdusse nel contesto delle



interazioni nucleari, il cui *range* è circa cinque ordini di grandezza più piccolo del raggio tipico dell'atomo di idrogeno. A loro volta le interazioni nucleari hanno un *range* circa mille volte più grande di quello delle interazioni deboli. Come

vedremo, il *range* è inversamente proporzionale alla massa della particella che media l'interazione corrispondente. Tralasciando le (debolissime) interazioni gravitazionali, che meritano un discorso a parte e sono comunque irrilevanti

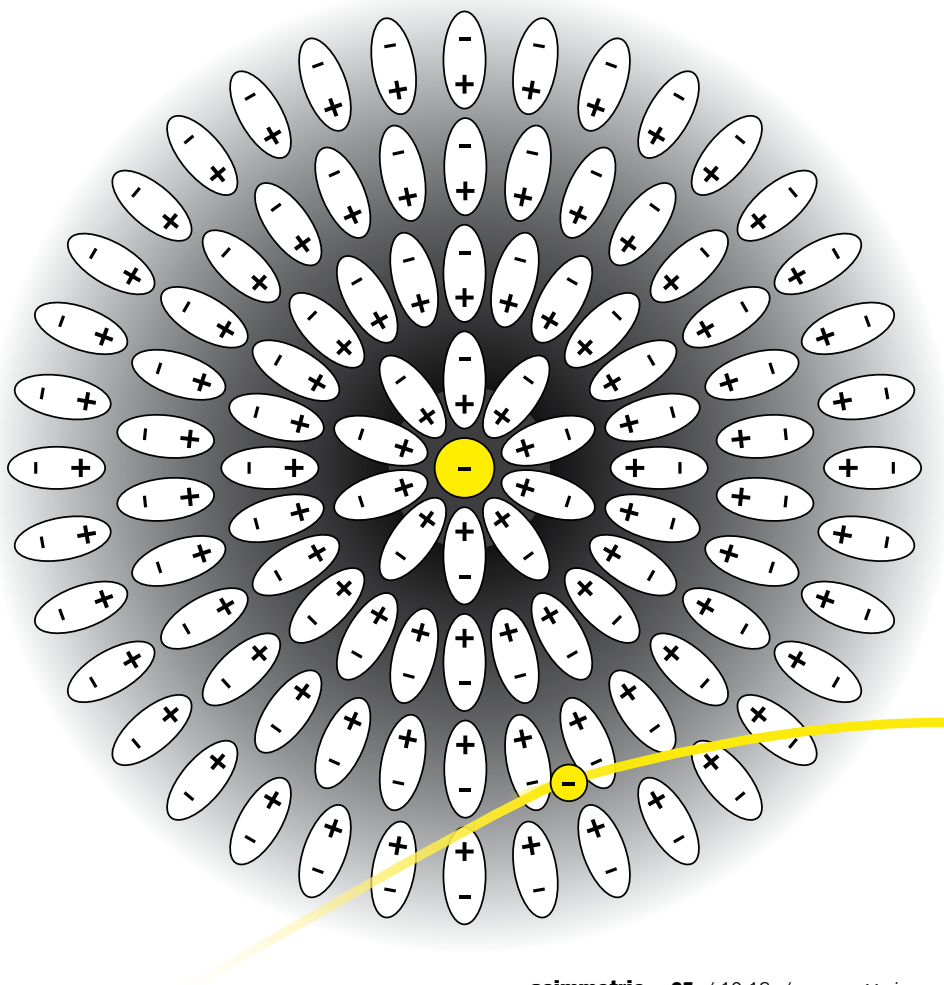
nel mondo delle particelle elementari, questa differenza fra le interazioni elettromagnetiche da una parte e le interazioni nucleari e deboli dall'altra appare in contrasto con la descrizione corrente delle interazioni fra i costituenti della materia contenuta nel modello standard. Nelle equazioni del modello standard (vd. in *Asimmetrie* n. 19 p. 26, ndr), i mediatori delle interazioni forti, elettromagnetiche e deboli, rispettivamente i gluoni, il fotone e i "bosoni intermedi", W e Z, hanno una natura comune. Si tratta in ogni caso di particelle di spin 1, ossia di bosoni, che intervengono per dare alle simmetrie della teoria un carattere locale, cioè indipendente dalla posizione nello spaziotempo. Parliamo in particolare di un apparente contrasto, perché nelle equazioni fondamentali tutti questi bosoni sono egualmente privi di massa, mentre la massa dei mediatori è il fattore chiave nel determinare il *range* delle interazioni. In effetti la differenza sta tutta nella diversa reazione al "vuoto" quantistico dei campi corrispondenti. Va da sé che il vuoto della teoria quantistica dei campi, cioè lo stato di minima energia, è assai diverso dal "vuoto" secondo il senso comune.

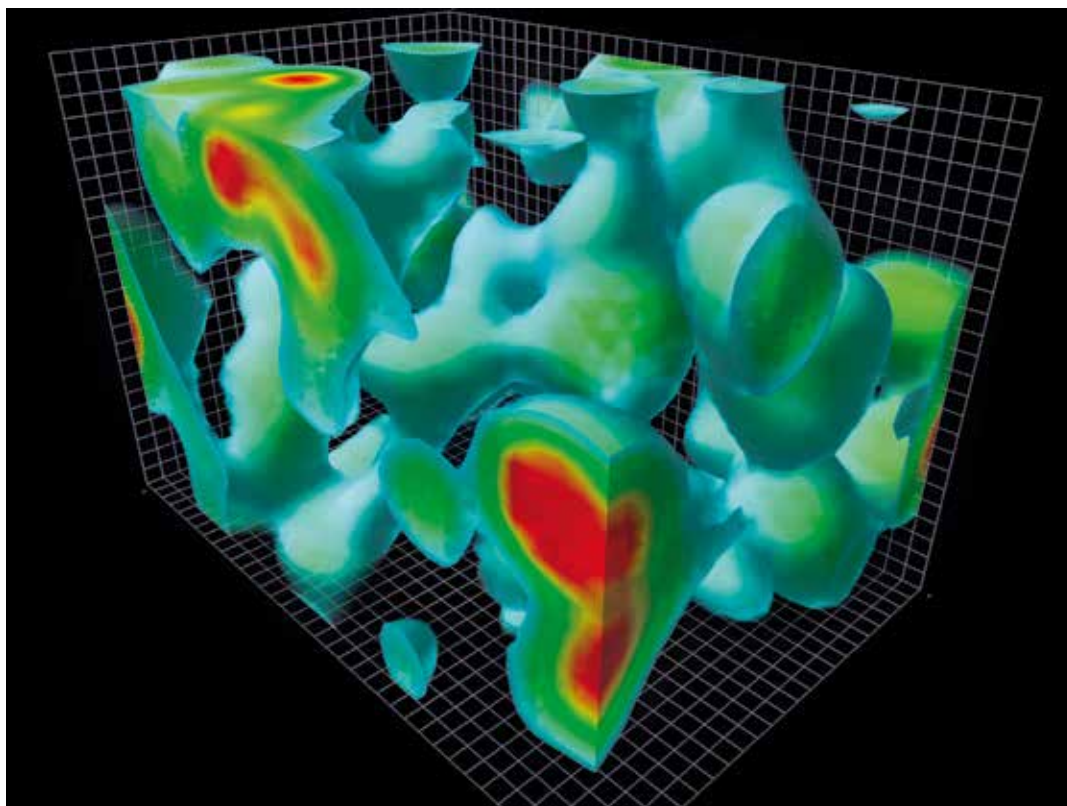
Il vuoto della teoria quantistica dei campi pullula di coppie di particelle "virtuali" prodotte dalle interazioni con il campo stesso: per esempio coppie elettrone-positrone nel caso dell'elettrodinamica quantistica (vd. fig. b) oppure coppie

quark-antiquark o gluone-gluone nel caso della cromodinamica quantistica (vd. fig. c). Si tratta di uno degli effetti più sorprendenti resi possibili dal principio di indeterminazione di Heisenberg.

Il caso del campo elettromagnetico è illustrato nella fig. b: le coppie $+$ - create spontaneamente dal vuoto si orientano in modo tale da "polarizzare" il vuoto stesso, come in un materiale dielettrico, tendendo a schermare la particella carica posta al centro della figura. Come conseguenza, aumentando la distanza, la carica corrispondente è progressivamente diminuita. Il fatto eclatante, scoperto teoricamente nel 1973, è che il vuoto intorno al campo dei quark, portatori di carica "colorata", si comporta in modo opposto: il "colore" dei quark, o degli stessi gluoni, risulta crescere con la distanza r . Con ciò, mentre un elettrone e un positrone, pur attraendosi, possono essere allontanati esercitando una forza di intensità decrescente con la distanza, altrettanto non è possibile per una coppia di quark-antiquark "colorati". Allontanandosi fra loro, l'attrazione reciproca diventa così forte che risulta energeticamente più conveniente strappare dal "vuoto" un'altra coppia quark-antiquark e spezzare la catena del potenziale di attrazione. La scala caratteristica a cui questo fenomeno avviene è detta scala di "confinamento" dentro gli "adroni", tutti di colore complessivo nullo. Ecco perché non si sono mai

b.
L'orientamento delle coppie virtuali che riempiono il vuoto quantistico scherma il campo elettrico generato da una carica elettrica, posta al centro della figura, riducendone l'intensità sperimentata da una carica che passa a una certa distanza dalla prima.





c.
Una rappresentazione del vuoto quantistico delle interazioni forti, prodotta da una simulazione numerica (D. Leinweber) e mostrata da Frank Wilczek nella sua Nobel Lecture del 2004.

osservati quark liberi. O neppure gluoni liberi. Fra gli altri, il protone e il neutrone sono adroni, le cui masse sono dovute alla energia di confinamento e, come tali, inversamente proporzionali alla scala di confinamento. In un nucleo l'interazione fra protoni e neutroni è mediata dallo scambio di altri adroni, il più leggero dei quali, il pione (anche detto "mesone π "), dà luogo all'interazione forte di più lungo *range*. La massa del pione è circa 8 volte più piccola di quella del protone e il *range* del potenziale di Yukawa prodotto dallo scambio del pione è di circa un Fermi, cioè come si è detto, centomila volte più piccolo del raggio tipico di un atomo di idrogeno.

Ci si chiederà: i bosoni W e Z non producono anch'essi coppie virtuali di particelle? Naturalmente sì, ma l'effetto che determina il *range* delle interazioni deboli, pur provenendo anche in questo caso dal vuoto, è di natura diversa e relativamente molto più intensa. Si tratta in questo caso del "campo di Higgs", il cui stato di minima energia permea tutto lo spaziotempo di un condensato di

particelle di Higgs. Come conseguenza tutte le particelle che interagiscono con il campo di Higgs acquistano una massa direttamente proporzionale al rispettivo accoppiamento. Fra tutti i mediatori di cui abbiamo parlato, solo il W e lo Z si accoppiano al campo di Higgs e dunque solo loro ricevono da questo fenomeno una massa, quasi cento volte più grande di quella del protone. Ecco perché le interazioni "deboli" sono tali. Confrontandole con le interazioni elettromagnetiche mediate dal fotone, gli accoppiamenti relativi, indicati con g e g' in fig. a, sono del tutto comparabili. Quello che fa la differenza è la massa del W e dello Z, che interviene nel potenziale di Yukawa corrispondente e

taglia drasticamente le interazioni deboli oltre una scala di circa un millesimo di Fermi. Dunque per la fisica nucleare o, a maggior ragione, per la fisica atomica, gli effetti delle interazioni deboli si possono pensare come interazioni di contatto, cioè a distanza relativa nulla fra le particelle, per esempio fra il protone e l'elettrone nell'atomo di idrogeno. In questo limite le interazioni deboli sono ben approssimate dalla teoria formulata da Fermi già nel 1934. Al contrario è sperimentando a distanze inferiori al *range* delle interazioni deboli, come si fa abitualmente al Large Hadron Collider del Cern, che si constata direttamente l'intensità comparabile delle interazioni deboli ed elettromagnetiche.

Biografia

Riccardo Barbieri è professore emerito di Fisica Teorica alla Scuola Normale Superiore di Pisa. È autore di oltre duecento pubblicazioni nel campo delle particelle elementari ed è stato particolarmente influente nella fisica oltre il modello standard.

DOI: 10.23801/asimmetrie.2018.25.2

Il lato oscuro

Alla ricerca della *dark matter*

di Mauro Raggi

Nonostante la fisica moderna, e in particolare la teoria che ne descrive il comportamento a livello microscopico, il modello standard delle interazioni, sia riuscita a spiegare con sorprendente precisione tutti i risultati sperimentali ottenuti in laboratorio fino ad oggi, la nostra conoscenza dell'universo che ci circonda è in realtà estremamente limitata. Il primo ad accorgersene fu l'astronomo F. Zwicky, che nel 1933, osservando l'ammasso della Chioma di Berenice, notò che le sue velocità di movimento interne non erano compatibili con la massa visibile nell'ammasso. Concluse che doveva esistere una grandissima quantità di massa che non poteva essere vista dal suo telescopio (perché non emetteva radiazione) ma che teneva insieme l'ammasso, che chiamò materia oscura (in inglese, "*dark matter*"). Da allora abbiamo accumulato moltissime osservazioni e prove a supporto dell'esistenza della materia oscura (vd. ad esempio Asimmetrie n. 4, ndr) e ci siamo convinti che essa costituisca circa il 27% del contenuto dell'universo.

Sembra poco, vero? Il problema è che la materia che costituisce tutte le galassie e le stelle che osserviamo costituisce soltanto il 5% dell'universo. E che cos'è tutto il resto? Energia, una quantità enorme di energia, la "*dark energy*", energia oscura, di cui sappiamo ancora meno, che però "serve" alle teorie per spiegare l'evoluzione dell'universo.

Ma non tutti la pensano allo stesso modo e ci sono quelli che non credono all'esistenza della materia oscura. Il fisico M. Milgrom propose negli anni '80 che l'effetto osservato da Zwicky fosse dovuto soltanto al fatto che la teoria della gravitazione di Newton ed Einstein andasse "corretta". Nascevano così le cosiddette "teorie Mond" (Modified Newtonian Dynamics), capaci di spiegare la rotazione delle galassie. Ma proprio quest'anno un'osservazione ha messo in seria crisi le basi di Mond. Un gruppo di astrofisici dell'Università di Yale ha osservato una galassia (la NGC 1052-DF2) che sembrerebbe formata esclusivamente



a.
Fritz Zwicky, astronomo svizzero, propose per primo l'esistenza della materia oscura.

da materia ordinaria. Curiosamente, l'osservazione della possibile assenza di materia oscura in questa galassia è la prova più importante della sua esistenza. Infatti, se l' "effetto materia oscura" fosse dovuto a una modifica della teoria della gravitazione, non sarebbe possibile osservare galassie con una dinamica puramente newtoniana, come sembra essere la NGC 1052-DF2.

Ora ci siamo convinti che esiste: ma allora com'è fatta? Come interagisce? E come possiamo trovarla? A tutte queste domande i fisici hanno cercato una risposta per decenni. Si convinsero subito che non poteva avere interazione elettromagnetica, altrimenti, interagendo con i fotoni, sarebbe stata visibile e non oscura. L'interazione forte era troppo "forte" e le particelle di materia oscura sarebbero state facilmente osservate tramite

i loro urti con la materia ordinaria. Ma certo, i neutrini! No, purtroppo erano troppo leggeri. Ma particelle pesanti con un'interazione molto debole (come quella di Fermi, vd. p. 10, ndr), quelle sì che avrebbero potuto risolvere il problema senza sconvolgere la nostra comprensione del mondo microscopico. Se la nostra galassia è così piena di materia oscura, queste particelle debbono arrivare anche sulla terra, e allora possiamo provare a rivelarle. La caccia alle cosiddette Wimp (*weakly interacting massive particles*) ha coinvolto negli ultimi 30 anni molti laboratori nel mondo, tra i quali i Laboratori Nazionali del Gran Sasso dell'Infn hanno avuto un ruolo di primo piano. Numerosissimi esperimenti hanno dato la caccia a questo sfuggente candidato di materia oscura crescendo in dimensioni e sensibilità, senza fino ad oggi produrre nessuna solida evidenza della sua esistenza e spingendo le Wimp verso sempre più piccoli accoppiamenti con la materia ordinaria. Le Wimp sono anche naturali prodotti di una delle più floride estensioni del modello standard, nota come teoria supersimmetrica (vd. in Asimmetrie n. 18 p. 13, ndr). Tale teoria prevede la possibilità di produrle utilizzando acceleratori, ma la loro alta massa ci costringe a costruirne di altissima energia. Una delle missioni primarie dell'acceleratore Lhc e dei suoi quattro esperimenti è proprio quella di cercare di produrre delle Wimp dalle collisioni dei suoi protoni ad altissima energia.

Purtroppo nella prima fase della sua presa dati, Lhc non ha osservato delle Wimp, ma grandi speranze sono ancora riposte nello studio dei dati che saranno raccolti nei prossimi anni. Il momentaneo insuccesso di questi tentativi ha spinto i ricercatori verso nuove linee di pensiero che superassero il paradigma delle Wimp. Negli ultimi anni un crescente interesse si è addensato attorno alle teorie dette di "settori oscuri" (*dark o secluded sectors*). In questa classe di modelli si ipotizza che la materia oscura sia totalmente disaccoppiata dal modello standard e che esista in un settore nascosto, la cui complessità è ignota e oggetto di speculazioni. Il settore oscuro potrebbe possedere una o più nuove forze, e una o molte nuove particelle, ma nessuna di esse sarebbe capace di interagire con quelle della materia ordinaria. Nella versione più semplice di tali modelli, esisterebbe una sola particella, detta "mediatore" anche in questo caso, capace di interagire sia con le particelle del settore oscuro che con quelle della materia ordinaria tramite un'interazione detta "portale". Le interazioni portale possono essere di diverso tipo: "vettoriale", "scalare", "pseudo-scalare", e da esse derivano diversi mediatori, il "fotone oscuro" (*dark photon*), il "dark Higgs" e l'assione. Il fotone oscuro è divenuto particolarmente popolare a causa della sua particolare affinità con la materia ordinaria. Infatti, possiederebbe un'interazione ("quinta forza" o "forza

b.
L'esperimento Xenon1t nei Laboratori Nazionali del Gran Sasso dell'Infn che è alla ricerca delle Wimp.





c.
I ricercatori dei Laboratori di Frascati
a fianco all'esperimento Padme.

oscura") del tutto simile all'interazione elettromagnetica, soltanto debolmente abbastanza da nascondersi alla nostra vista, cioè a renderlo oscuro, e a differenza del fotone ordinario avrebbe una piccola massa. Il fotone oscuro allora si potrebbe nascondere tra i fotoni ordinari (i fisici lo chiamano il fenomeno di "mixing cinetico") e solo uno sguardo molto attento ne potrebbe scorgere l'esistenza, il che spiegherebbe perché ci è sfuggito fino ad oggi.

Ma come ci apparirebbe questo "messaggero oscuro"? Non lo sappiamo per certo, dipende da cosa contiene il settore oscuro. Se, come pensano i fisici ispirati dal modello delle Wimp, fosse la più leggera delle particelle del settore oscuro, allora dovremmo vederlo apparire dai suoi decadimenti in particelle di materia ordinaria, per esempio coppie elettrone-positrone, i cosiddetti decadimenti visibili. Più intrigante è l'opinione secondo cui il settore oscuro contenga numerose nuove particelle tra cui almeno una più leggera del fotone oscuro. In questo scenario il fotone oscuro decadrebbe in materia oscura, rimanendo invisibile, e allora si

che sarebbe una sfida trovarlo! Per non sbagliare i fisici si sono mossi in entrambe le direzioni, preparando esperimenti per stanarlo ovunque si nasconda. Gli americani sono in prima linea in questa ricerca, ma anche l'Italia ha un ruolo importante con partecipazioni agli esperimenti al Jefferson Laboratory (a Hps e Bdx) e con l'impegno in prima linea dei Laboratori Nazionali di Frascati, prima con Kloe, che ha concluso la sua campagna di presa dati a fine aprile, e ora con

Padme, un nuovo esperimento per la ricerca in decadimenti invisibili. Ma potrebbe già essere troppo tardi! In un piccolo laboratorio di fisica nucleare ungherese, infatti, potrebbe essere stato osservato il primo "barlume oscuro". I fisici di Debrecen hanno osservato un'anomala abbondanza di decadimenti in elettrone-positrone nei nuclei di berillio 8, che hanno proprio le caratteristiche necessarie per derivare da un fotone oscuro leggero. Padme e gli altri esperimenti sono già sulle sue tracce.

Biografia

Mauro Raggi è ricercatore presso il dipartimento di Fisica dell'Università Sapienza di Roma e presso la sezione Infn di Roma. Ha lavorato in misure di precisione in esperimenti di fisica dei mesoni K presso il Cern di Ginevra. In questi ultimi anni si è occupato principalmente della ricerca di settori oscuri e in particolare del fotone oscuro. È tra gli ideatori e il portavoce dell'esperimento Padme ai Laboratori Nazionali di Frascati dell'Infn.

Link sul web

https://en.wikipedia.org/wiki/Dark_photon

<http://www.lnf.infn.it/acceleratori/padme/index.html>

<https://www.nature.com/news/has-a-hungarian-physics-lab-found-a-fifth-force-of-nature-1.19957>

DOI: 10.23801/asimmetrie.2018.25.3

Quanti di peso

Ipotesi sui gravitoni

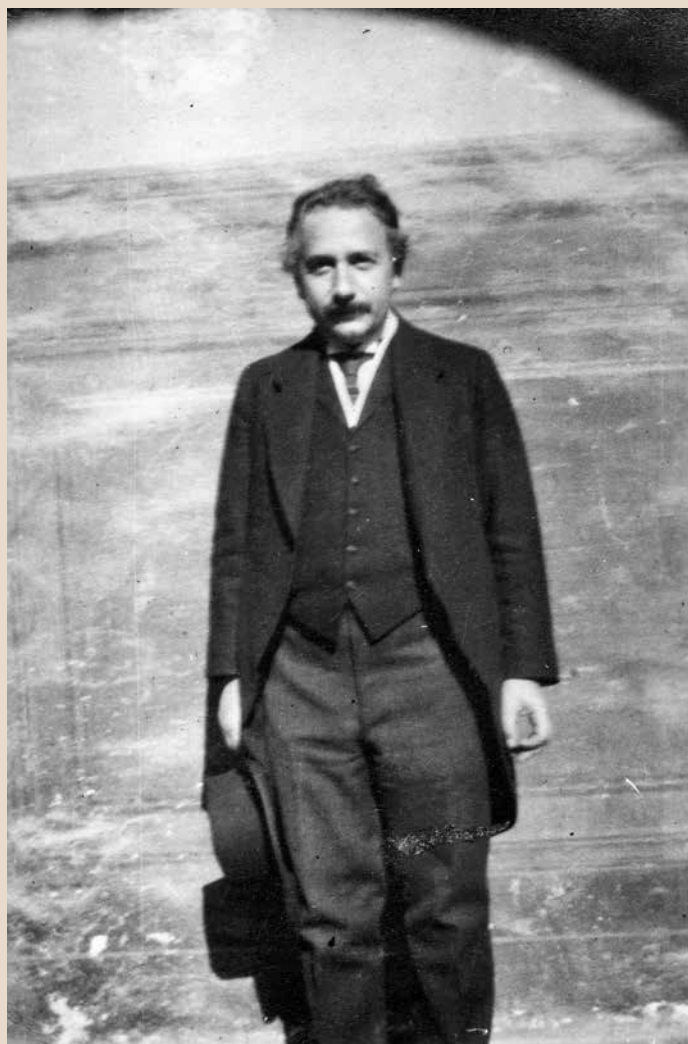
di Filippo Vernizzi

L'apparentemente banale ma profonda constatazione che una persona in caduta libera non sente il proprio peso e che l'effetto dell'attrazione gravitazionale è localmente indistinguibile da un moto accelerato permise al giovane Albert Einstein di formulare, in poco meno di un decennio, una nuova teoria della gravitazione universale: la relatività generale. Einstein la battezzò "l'idea più felice della mia vita".

Qualche anno prima, nel 1905, aveva unificato lo spazio e il tempo per spiegare i fenomeni ad alte energie e con velocità prossime a quelle della luce. Ora lo spaziotempo diventava deformabile dalla presenza di massa o, più in generale, di ogni forma di energia. Nella relatività generale l'interazione gravitazionale non è una forza, come nella gravità di Newton o nell'elettrostatica di Coulomb, ma è curvatura dello spaziotempo. Il salto concettuale rispetto alla visione "classica" è gigantesco. Eppure, dalla sua formulazione fino ai giorni nostri, la relatività generale non ha smesso di ricevere conferme. L'ultima prova della sua elevata affidabilità ce l'hanno data le recenti osservazioni di onde gravitazionali, soluzioni ondulatorie della geometria spaziotemporale che si propagano alla velocità della luce. Le forme delle onde emesse dalla collisione di buchi neri osservati dagli interferometri Ligo e Virgo corrispondono perfettamente alle predizioni di Einstein (vd. in *Asimmetrie* n. 21 p. 10, ndr).

Le onde gravitazionali sono l'analogo gravitazionale delle ben più comuni onde elettromagnetiche, oscillazioni sincronizzate del campo elettrico e magnetico che, nel vuoto, si propagano alla velocità della luce. La luce, quindi, è un'onda, ma secondo la meccanica quantistica è anche composta di quanti, i fotoni. Quando il numero di fotoni per una data frequenza di luce è molto grande, questi si comportano a tutti gli effetti come un'onda classica. Allora viene naturale chiedersi: esiste l'analogo gravitazionale del fotone, il "gravitone"? Un'onda gravitazionale è fatta di gravitoni? È possibile descrivere la relatività generale, così manifestamente geometrica, in termini di particelle?

Per rispondere a queste domande è utile mantenere l'analogia con il fotone. La teoria che descrive l'interazione



a.
Albert Einstein nel 1921, in una foto scattata a Bologna.

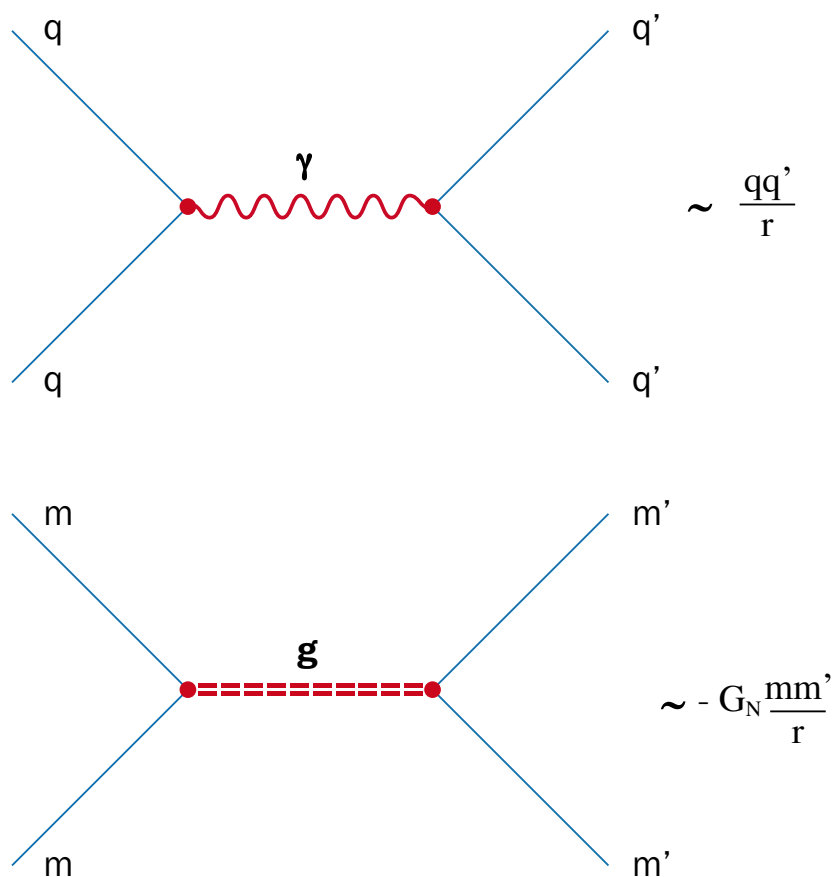
tra luce e materia, che coniuga meccanica quantistica e relatività speciale, si chiama elettrodinamica quantistica o Qed, acronimo inglese per *Quantum Electro-Dynamics*. È stata formalizzata alla fine degli anni '40 da Shin'ichirō Tomonaga, Julian Schwinger e Richard Feynman ed è una delle teorie fisiche meglio verificate sperimentalmente. Nella Qed i fotoni sono eccitazioni quantistiche del campo elettromagnetico. L'interazione tra particelle cariche avviene attraverso lo scambio (emissione e assorbimento) di fotoni virtuali, particelle che non si possono osservare direttamente e la cui esistenza è limitata dal principio di indeterminazione.

Il quadro teorico generale che descrive le interazioni tra tutti i tipi di materia e le forze conosciute, di cui la Qed è un particolare esempio, è la teoria quantistica dei campi. I suoi mattoni fondamentali sono i campi quantistici.

Esistono campi di materia, le cui eccitazioni sono fermioni, cioè particelle con spin semi-intero (come gli elettroni, i neutrini e i quark, tutti di spin 1/2). Esistono poi i cosiddetti campi di *gauge*, con o senza massa, le cui eccitazioni sono bosoni, cioè particelle con spin intero. Il fotone è senza massa perché l'interazione elettromagnetica è a lungo raggio e si propaga alla velocità della luce. Ha spin 1, perché può essere scambiato tra particelle che trasportano una carica e una corrente elettrica. Una descrizione della gravità in questo quadro teorico esiste e, ovviamente, prevede che l'interazione gravitazionale avvenga attraverso lo scambio di gravitoni virtuali. Come il fotone, anche il gravitone per propagarsi su grandi distanze deve avere massa nulla. Tuttavia, il suo spin non può essere 1, come quello del fotone perché questo implicherebbe che l'interazione gravitazionale tra due masse sia

repulsiva, così come lo è quella elettromagnetica tra due particelle di carica uguale. Per avere interazione attrattiva potrebbero andare bene sia spin 0 che spin 2. Ma lo spin 0 non è in grado di descrivere correttamente la deflessione gravitazionale della luce. Rimane quindi lo spin 2 (valori di spin più grandi sono esclusi per altre ragioni) che interagisce con il cosiddetto "tensore di energia-impulso", la sorgente di deformazione dello spaziotempo in relatività generale.

Nelle sue lezioni sulla teoria della gravitazione, Feynman si era chiesto cosa accadrebbe se un ipotetico fisico teorico di Venere, ignaro della relatività generale formulata sulla vicina Terra, ma esperto di teoria quantistica dei campi, si cimentasse a costruire una teoria con il gravitone. Lavorando a bassa energia e imponendo che questa teoria sia fisicamente consistente, il venusiano si accorgerebbe che la forza scambiata è



b.
L'interazione gravitazionale tra due masse m e m' avviene grazie allo scambio di gravitoni (g), così come quella elettromagnetica tra due cariche (q e q') avviene attraverso lo scambio di fotoni (γ). Sia i fotoni che i gravitoni sono particelle di massa nulla, e questo spiega perché entrambi i potenziali (a destra), quello elettrostatico (o di Coulomb) e quello gravitazionale (dove G_N è la costante di Newton), dipendono dall'inverso della distanza. (vd. anche fig. a p. 10, ndr).

universale, riscoprendo l'“idea felice” di Einstein che la massa gravitazionale corrisponde alla massa inerziale. Ne consegue che, diversamente dal fotone che non porta carica elettrica e non contribuisce alla corrente, il gravitone deve interagire anche con se stesso, perché come tutte le particelle porta energia e l'energia gravita. La sua energia gravitazionale cambia la geometria dello spaziotempo, la quale a sua volta cambia l'energia gravitazionale, e così via. Questo processo non-lineare può essere ripetuto all'infinito per piccole perturbazioni, fino a ricostruire la teoria della relatività generale. Tornando alle onde gravitazionali, queste sarebbero dunque composte di gravitoni e, data l'estrema debolezza della gravità, il loro numero deve essere grande, superiore a 10^{12} per centimetro cubo, per renderle osservabili dagli interferometri terrestri. Fintanto che i processi in gioco sono di bassa energia non c'è incompatibilità tra relatività generale e meccanica quantistica. Le incompatibilità emergono quando si cerca di usare la teoria quantistica dei campi per predire processi gravitazionali

a energie sempre più grandi. Vediamo perché questo accade, confrontando nuovamente la formulazione quantistica della gravità con la Qed. Nel caso della Qed, le probabilità dei processi di interazione tra particelle rimangono finite anche ad alte energie (vd. in *Asimmetrie* n. 20 p. 10 e in *Asimmetrie* n. 23 p. 33). Nel caso gravitazionale, invece, queste aumentano con l'energia. Al crescere dell'accuratezza del calcolo, una teoria consistente dovrebbe dare correzioni sempre più piccole. Questo però vale solo per concentrazioni di energia inferiori a un valore chiamato “energia di Planck”. Per valori maggiori, le correzioni diventano invece via via sempre più grandi e le probabilità predette perdono di significato fisico (vd. in *Asimmetrie* n. 20 p. 13, ndr). Tecnicamente, si dice che la gravitazione non è “rinormalizzabile”. Poiché la gravità è molto debole, l'energia di Planck è superiore a quella di qualsiasi processo che conosciamo in natura (più precisamente, equivale a circa 10^{18} volte la massa del protone) e la relatività generale può essere usata con successo. Tuttavia, è da considerare

c.
Richard Feynman, chiamato anche “the great explainer”, in azione. Lo stile di presentazione di Feynman era noto per la sua originalità, entusiasmo e acume.





come una teoria efficace (vd. in *Asimmetrie* n. 18 p. 10, ndr) che richiede un cambiamento radicale di descrizione alla scala di Planck, quale l'emergere di nuovi gradi di libertà. La teoria delle stringhe, in grado di mantenere inferiori a uno le ampiezze di probabilità dei processi gravitazionali a grandi energie, è un suo possibile completamento.

Negli ultimi anni, la stessa teoria dei campi combinata con la necessità di spiegare l'origine dell'espansione accelerata dell'universo ha spinto i fisici teorici ad alterare la relatività generale su scale cosmologiche, dove non è stata ancora del tutto verificata. L'estensione più naturale è quella di ipotizzare che il gravitone abbia una piccola massa che indebolisce l'interazione gravitazionale a grandi distanze. Per essere compatibile con le onde gravitazionali osservate da Ligo e Virgo (vd. p. 31, ndr), questa massa deve essere minuscola: 28 ordini di grandezza inferiore a quella dell'elettrone. Benché apparentemente innocua, questa modifica è in realtà carica di conseguenze e per anni ha reso la vita dei fisici teorici che hanno sviluppato la teoria della gravità massiva difficilissima. La prima proposta del '39 per opera di Markus Fierz e Wolfgang Pauli ha richiesto circa 70 anni per essere messa a punto

coerentemente, preservando le simmetrie dello spaziotempo relativistico. La recente formulazione di Claudia de Rham, Gregory Gabadadze e Andrew Tolley è nota come "gravità massiva invariante di Lorentz". Come la relatività generale, anche la gravità massiva è una teoria efficace, ma la scala di energia a cui perde validità è più bassa di quella di Planck. Il suo valore è ancora dibattuto, ma sembra essere 40 ordini di grandezza inferiore, invalidando la teoria a lunghezze più piccole del raggio terrestre. Se così fosse, ci sarebbe ancora molto lavoro da fare per trovare un completamento ad alta energia di questa teoria in accordo con le osservazioni. Ma questo esempio e molti altri mostrano quanto sia difficile modificare la relatività generale in modo consistente e in accordo con le osservazioni. Insomma, per ora sembra proprio che nessuno abbia avuto un'idea più felice di quella di Einstein.

d.
Da sinistra, Markus Fierz e Wolfgang Pauli durante la Conferenza di Copenhagen al Bohr Institute del 1934. Sulla loro destra, Hans Jensen.

Biografia

Filippo Vernizzi ha conseguito il dottorato all'Università di Ginevra ed è ricercatore all'Istituto di Fisica Teorica del Cea di Saclay, in Francia. Si occupa principalmente di cosmologia.

DOI: 10.23801/asimmetrie.2018.25.4

Travolti dalle onde

I primi passi della rete di rivelatori gravitazionali

di Viviana Fafone

Per secoli la conoscenza dell'universo si è fondata sullo studio della radiazione elettromagnetica emessa dagli oggetti celesti (vd. p. 27, ndr). Grazie alla prima rivelazione diretta delle onde gravitazionali da parte della collaborazione Ligo/Virgo del 14 settembre 2015, oggi si è aperta una nuova finestra osservativa sull'universo, complementare alle osservazioni elettromagnetiche, che si avvale dei messaggi portati da queste minuscole vibrazioni dello spaziotempo.

Mentre gran parte delle onde elettromagnetiche sono prodotte da molecole e atomi eccitati, le onde gravitazionali sono emesse da movimenti collettivi di materia e per questo motivo hanno lunghezze d'onda molto più grandi rispetto alle onde che compongono lo spettro elettromagnetico. Inoltre, mentre la radiazione elettromagnetica può essere facilmente schermata, quella gravitazionale interagisce assai debolmente

con la materia. Se da un lato questa proprietà la rende estremamente difficile da rivelare, dall'altro le consente di viaggiare fino a noi senza essere attenuata apprezzabilmente dalla materia che incontra lungo il suo cammino. Le onde gravitazionali sono dunque portatrici di informazioni inaccessibili alle onde elettromagnetiche.

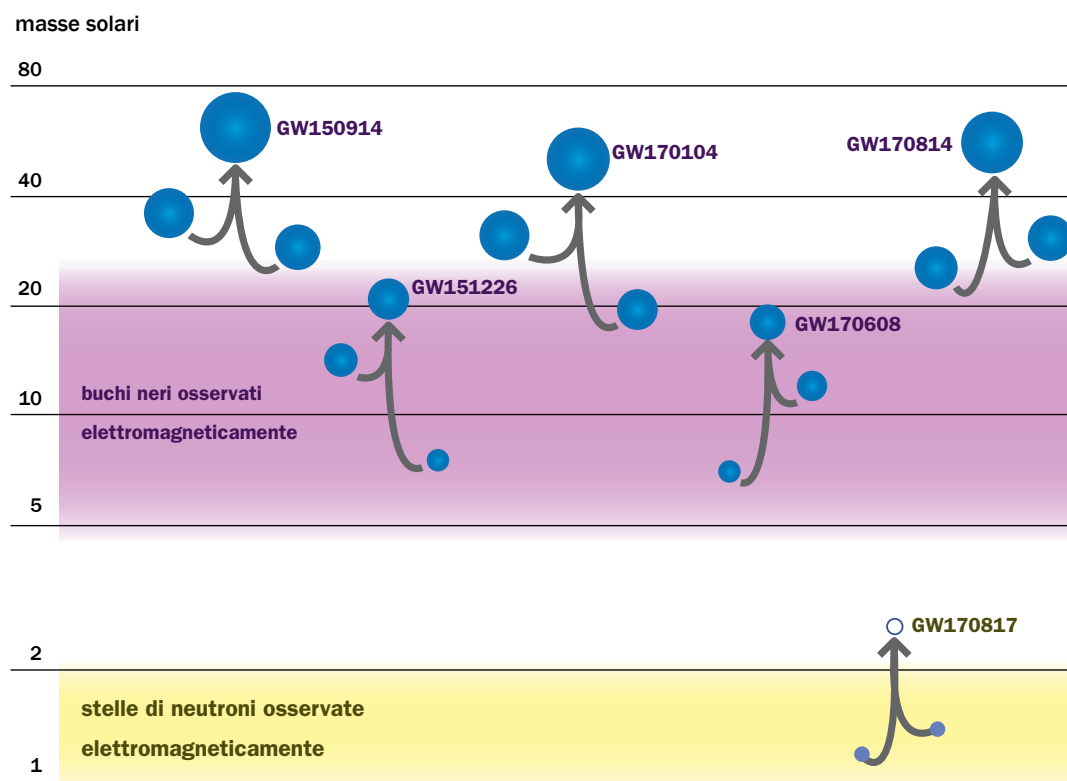
Le prime misure di segnali gravitazionali da parte degli interferometri Ligo e Virgo ci hanno consentito di studiare i buchi neri in sistemi binari. Nell'evoluzione temporale dell'onda gravitazionale da essi emessa è infatti codificata l'informazione sulla natura della sorgente e sui suoi parametri fondamentali, in questo caso la massa e lo spin (vd. in Asimmetrie n. 21 p. 13, ndr).

Dalla prima rivelazione ad oggi sono state osservate sei coalescenze di sistemi binari di buchi neri, di cui cinque confermate con grande significatività statistica (vd. fig. b). Le

a.
L'interferometro Virgo, nei pressi di Cascina (Pisa). La sua entrata in funzione il primo agosto 2017 ha rappresentato una svolta decisiva nelle capacità osservative della rete di rivelatori interferometrici.



b.
Le masse dei sistemi binari rivelati da Ligo e Virgo, confrontate con quelle note tramite osservazioni elettromagnetiche, indicate dalle bande colorate.
Il corpo risultante dalla fusione delle due stelle di neutroni potrebbe essere un'altra stella di neutroni immediatamente collassata in un buco nero.



masse dei buchi neri progenitori arrivano fino a circa 40 volte la massa del Sole, tipicamente più del doppio rispetto a quelle precedentemente note tramite le osservazioni della radiazione X emessa dalla materia orbitante attorno al corpo celeste. I segnali gravitazionali hanno messo quindi in evidenza una nuova famiglia di buchi neri, ponendo nuovi interrogativi sul loro meccanismo di formazione.

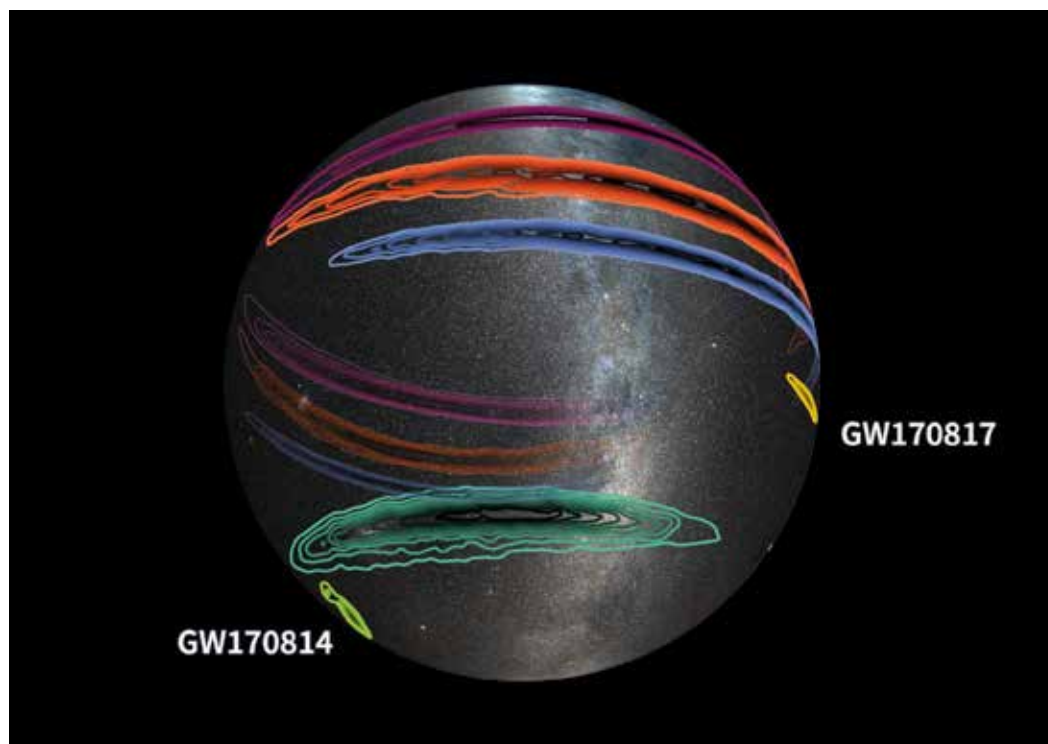
La conoscenza accurata della forma d'onda prodotta da questi sistemi binari li rende dei formidabili laboratori per la verifica della relatività einsteiniana in regime di campo gravitazionale forte e grandi velocità (si pensi, ad esempio, che al momento della collisione i due buchi neri della prima rivelazione si muovevano con una velocità relativa pari a circa metà della velocità della luce). Dalla misura del segnale gravitazionale emesso è anche possibile ricavare la distanza della sorgente dalla Terra: il sistema binario più lontano da noi finora osservato si trovava a quasi tre miliardi di anni luce.

L'entrata in funzione di Virgo, avvenuta il primo agosto 2017, ha rappresentato una svolta decisiva nelle capacità osservative della rete di rivelatori interferometrici. Grazie all'aggiunta di un terzo strumento, è infatti possibile migliorare drasticamente la

capacità di localizzazione nel cielo della sorgente. Ad esempio, nel caso della fusione di due buchi neri registrata il 14 agosto del 2017 dagli interferometri Ligo e Virgo, il sistema binario è stato localizzato entro un'area di circa 60 gradi quadrati, da confrontare con i 1200 individuati dai soli interferometri Ligo (vd. fig. c). Non solo, con tre interferometri è anche possibile fare una stima degli "stati di polarizzazione" dell'onda (cioè delle sue direzioni di oscillazione): la relatività generale ne prevede due, ma altre teorie metriche della gravitazione ne ammettono fino a sei. Si capisce, quindi, come le onde gravitazionali possano essere uno strumento per discriminare tra diverse teorie della gravità.

La capacità di puntamento nel cielo è stata determinante per un altro evento, registrato anch'esso durante l'agosto 2017. Il giorno 17, alle 14:41, Virgo e Ligo hanno osservato per la prima volta la collisione di due stelle di neutroni a 130 milioni di anni luce da noi, e sono riusciti a indentificarne la posizione nel cielo con una precisione di circa 30 gradi quadrati.

Il segnale gravitazionale è stato seguito a breve distanza (circa 1,7 secondi) da un lampo di raggi gamma registrato dai satelliti Fermi e Integral, confermando così l'associazione di questi



c. Incertezza nelle aree di provenienza delle onde gravitazionali rivelate da Ligo e Virgo. Le linee colorate indicano le probabilità associate all'area inclusa (dal 90% per la linea più esterna, al 10% per la linea più interna). Le aree più piccole, indicate dalle sigle, si riferiscono ai due segnali misurati con tutti e tre gli interferometri (i due Ligo e Virgo): GW170814 è il segnale proveniente dal sistema binario di buchi neri, GW170817 quello proveniente dal sistema binario di due stelle di neutroni. I due eventi registrati da Ligo e Virgo mostrano una incertezza oltre 10 volte inferiore rispetto agli eventi registrati dai soli interferometri Ligo.

eventi altamente energetici con la coalescenza di stelle di neutroni (vd. p. 31, ndr).

L'allerta lanciata da Ligo e Virgo è stata raccolta da decine di telescopi che sono stati puntati verso la regione di cielo incriminata, hanno identificato la galassia ospite (NGC 4993) e hanno seguito l'evoluzione dell'emissione elettromagnetica in tutte le bande spettrali per molte settimane. Il sistema binario osservato il 17 agosto è stato il primo che ha prodotto una controparte elettromagnetica, grazie alla presenza di stelle di neutroni, e ha di fatto segnato la nascita dell'astronomia multimessaggera.

Siamo solo all'inizio di una grande avventura. Ligo e Virgo rientreranno in misura nei primi mesi del 2019. Nuovi segnali verranno rivelati, magari provenienti da sorgenti finora non sondate: sistemi binari misti costituiti da buchi neri e stelle di neutroni, singole stelle di neutroni in rapida rotazione, supernovae. Alcuni di questi eventi gravitazionali potranno essere accompagnati non solo dall'emissione di radiazione elettromagnetica, ma anche di neutrini, realizzando così le condizioni per nuove e più ampie osservazioni multimessaggere (vd. p. 23, ndr).

E nel futuro più lontano? Programmi di miglioramento degli attuali interferometri sono già avviati, mentre, in parallelo, la comunità internazionale si sta muovendo verso la terza generazione di interferometri terrestri. In Europa, l'Einstein Telescope potrà portare un miglioramento di sensibilità di circa dieci volte rispetto ai rivelatori attuali, aprendo le porte all'astronomia gravitazionale

di precisione e allo studio dettagliato di possibili violazioni della gravità einsteiniana in condizioni di campo forte. La promessa ultima, insita nella natura elusiva di questa radiazione, sarà l'osservazione del "fondo stocastico" di onde gravitazionali, che ci consentirà di risalire indietro nel tempo, fino ai primissimi istanti dopo il Big Bang.

Biografia

Viviana Fafone è professore di fisica presso l'Università degli Studi di Roma "Tor Vergata". La sua attività di ricerca si rivolge principalmente agli esperimenti per la rivelazione di onde gravitazionali, con interessi anche per la fisica del fondo cosmico di microonde. Ha collaborato agli esperimenti Explorer al Cern e Nautilus presso i Laboratori di Frascati dell'Infn. Dal 2006 partecipa all'esperimento Virgo, di cui è il responsabile nazionale.

Link sul web

<http://public.virgo-gw.eu/language/en/>

<https://www.ligo.caltech.edu/>

<http://www.et-gw.eu/>

<http://www.einstein-online.info/>

DOI: 10.23801/asimmetrie.2018.25.5

Dal profondo del cosmo

I neutrini, i messaggeri più elusivi

di Marco Pallavicini

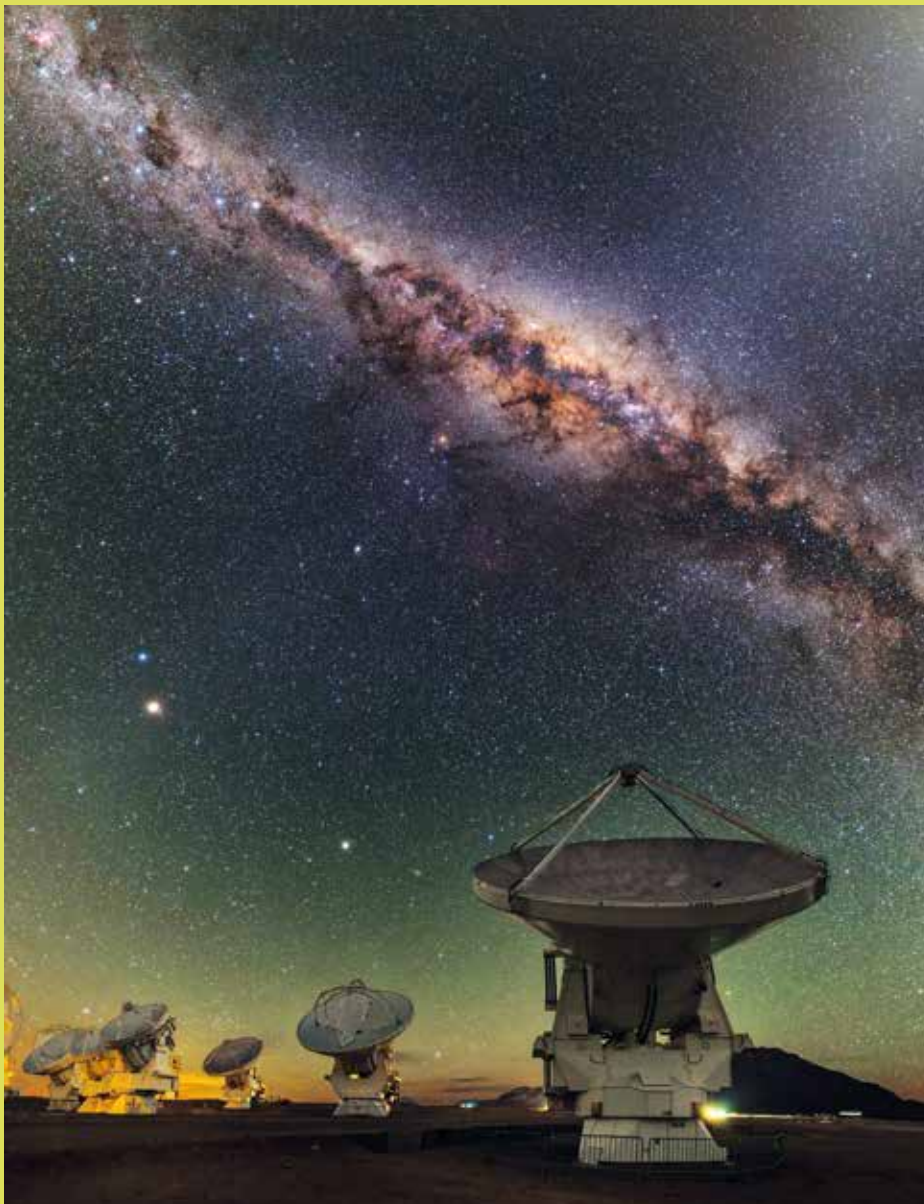
Gli astri che corrono sulla volta celeste hanno affascinato e incuriosito gli uomini di ogni tempo. Il cielo stellato è la più grande delle meraviglie e ancora oggi sa stupirci con la sua ricchezza.

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.

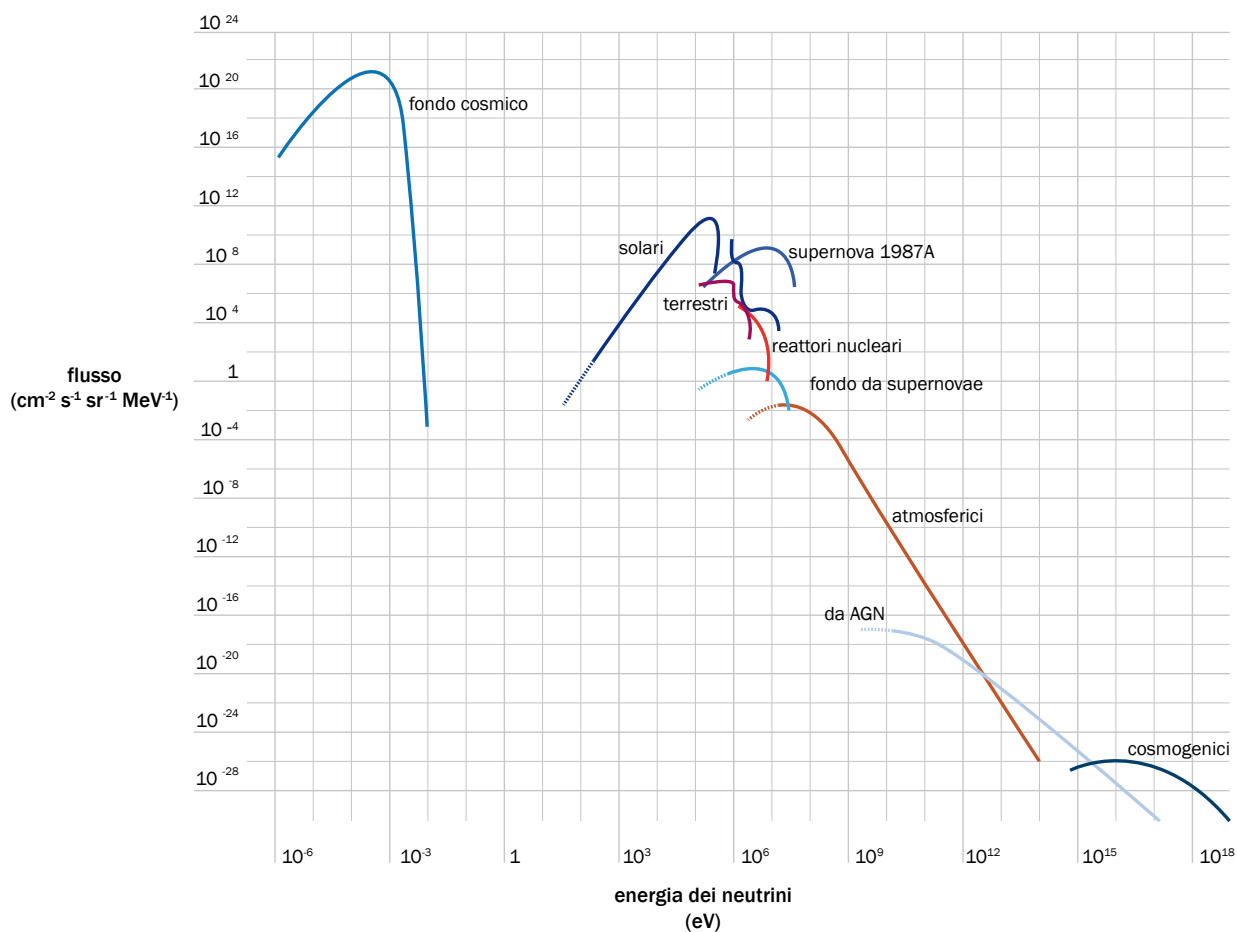
Fortunatamente questo messaggero esiste e ha un nome italiano, il neutrino. Battezzato da Enrico Fermi come "piccola particella neutra", il neutrino è la più elusiva e meno conosciuta delle particelle elementari. È l'unica sensibile alle sole forze deboli e alla gravità (non ha carica elettrica e non 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.





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

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.

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

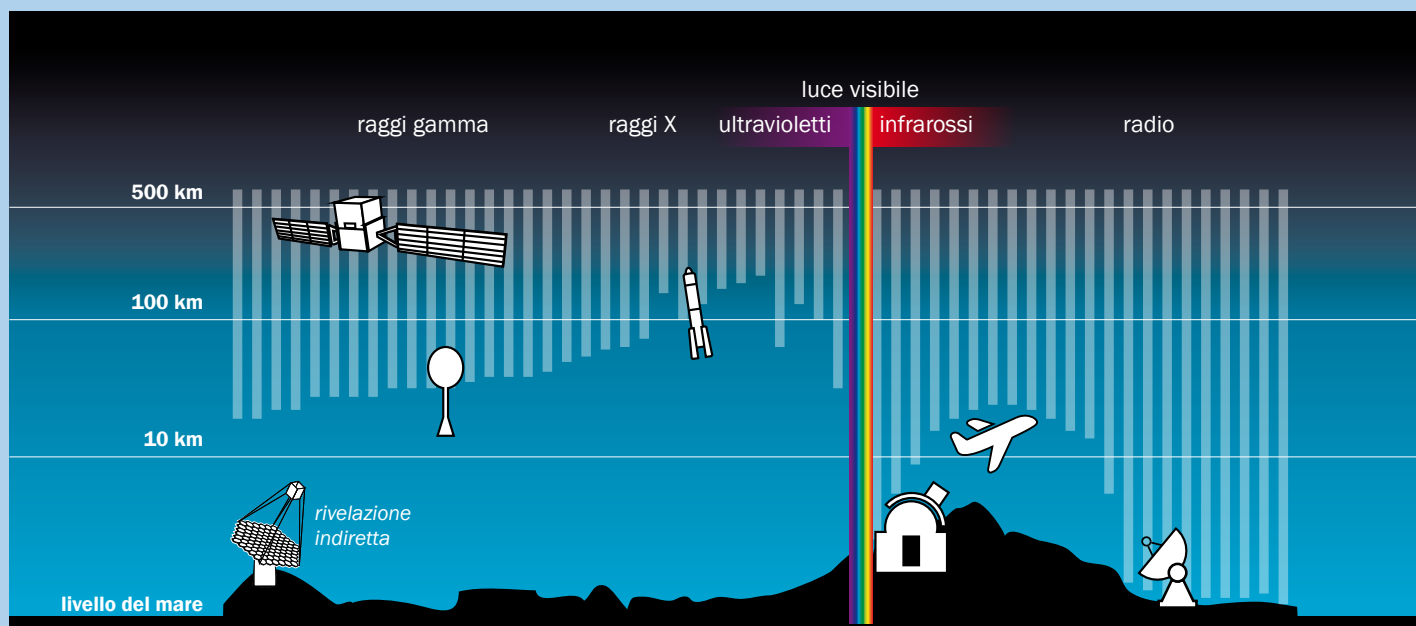
Marco Pallavicini è professore di Fisica delle Interazioni Fondamentali all'Università di Genova e ricercatore Infn. Dal 1990 si occupa di fisica delle particelle, delle astroparticelle e del neutrino. Ha lavorato al Fermilab e a Slac (Usa) dal 1990 al 1998 in esperimenti sulla fisica dei quark pesanti "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

Tutti i colori del cielo

Dai telescopi ottici alle osservazioni multifrequenza

di Alessandro De Angelis



Nel 1610 Galilei dà alle stampe il trattato astronomico *Sidereus Nuncius*, il primo lavoro scientifico pubblicato sulla base di osservazioni al telescopio. Nel libro Galilei commenta e interpreta l'osservazione delle montagne della Luna, di centinaia di stelle mai viste prima e dei satelliti di Giove. Tutte queste osservazioni erano state possibili grazie alla luce emanata dai corpi celesti: per Galilei la luce è il *nuncius* (messaggero) delle stelle. La storia dei messaggeri cosmici comincia quindi dai fotoni, le particelle di luce, e ancor oggi il fotone è il messaggero per eccellenza.

In quanto neutri, i fotoni non sono deviati dai campi magnetici presenti nell'universo e nella Via Lattea, ed è quindi possibile localizzare le loro sorgenti. In queste sorgenti possono essere all'opera diversi meccanismi che producono fotoni; questi vanno dall'emissione termica a fenomeni di più alta energia, come decadimenti nucleari e interazioni adroniche. I fotoni che costituiscono la luce visibile hanno lunghezze d'onda dell'ordine di qualche decimo di micrometro, ossia energie dell'ordine di

grandezza di un elettronvolt (eV), circa 10^{-19} joule. Sono le tipiche energie che gli elettroni esterni degli atomi liberano quando passano da un livello energetico a un livello di energia più bassa. Fino al 1930 circa, l'universo era stato osservato solo in questa regione di frequenze, perché i nostri telescopi erano sensibili solo alla luce visibile. Le cose cambiano rapidamente negli anni successivi, e grazie a nuovi e ingegnosi strumenti diviene possibile produrre mappe dell'universo in lunghezze d'onda ed energie diverse. La tecnologia sviluppata nel corso della seconda guerra mondiale consente di "vedere" con grandi antenne nuovi fenomeni come quelli caratteristici delle onde radio, trasportate da fotoni di energie milioni o miliardi di volte più piccole di quelle della luce visibile (vd. fig. a). A energie un migliaio di volte più piccole della luce visibile abbiamo le microonde: a queste energie la densità di fotoni nell'universo è massima, circa 400 fotoni per centimetro cubo. Intorno ai fotoni visibili abbiamo la radiazione

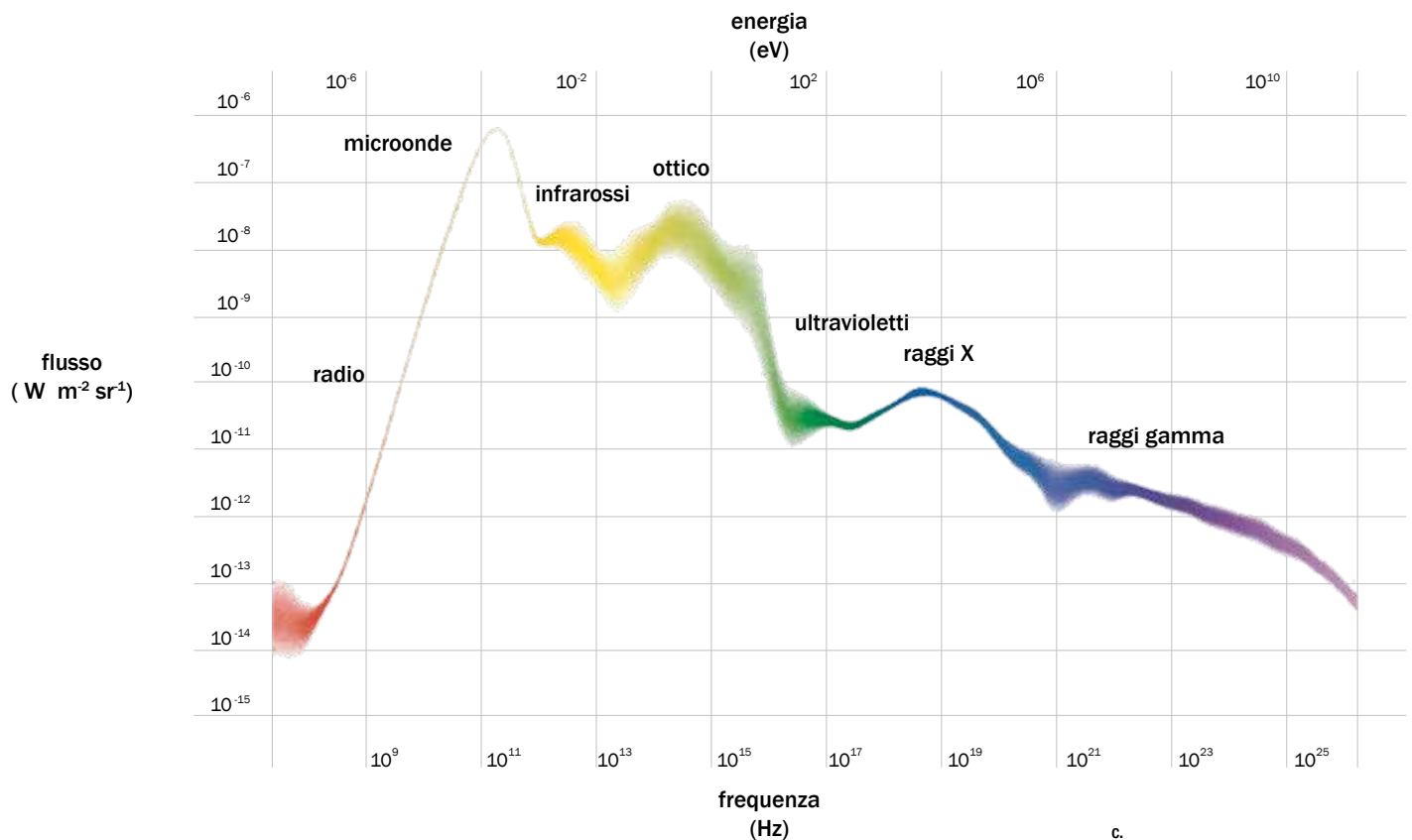
a.
L'assorbimento da parte dell'atmosfera condiziona la scelta degli strumenti da usare per la rivelazione dei fotoni. Mentre le onde radio e la luce visibile provenienti dal cosmo sono ben rivelabili con apparati installati sulla terra, i raggi X e gamma richiedono rivelatori installati su palloni aerostatici o satelliti. I raggi gamma superiori ai 50 GeV possono essere rivelati solo indirettamente osservando da terra la luce Cerenkov generata dagli sciami elettromagnetici.

infrarossa, più debole, e l'ultravioletta, più forte. Aumentando ancora l'energia abbiamo i fotoni (detti anche, per motivi storici, "raggi") X, migliaia di volte più energetici della luce visibile, e i raggi gamma, milioni/miliardi di volte più energetici. L'atmosfera terrestre ci protegge da questi fotoni, che sono nocivi, assorbendoli; di conseguenza l'osservazione è stata possibile solo con l'avvento dell'era spaziale, in particolare grazie al lavoro di Bruno Rossi e Riccardo Giacconi, e alla tecnologia della fisica delle particelle. A energie ancora più alte, l'osservazione da terra diviene di nuovo possibile: i fotoni interagendo con l'atmosfera producono sciami di particelle che sono osservabili da rivelatori posti sulle montagne, come i telescopi Magic (Major Atmospheric Gamma Imaging Cherenkov telescope), installati nelle isole Canarie (vd. fig. b), e Hess (High Energy Stereoscopic System), in Namibia. I fotoni di energie diverse ci portano messaggi diversi e ci raccontano storie diverse, e per capire la struttura di una sorgente conviene esaminarla fotografandone l'emissione a varie lunghezze d'onda. Il relativo peso dei diversi meccanismi all'interno di una data sorgente può venire evidenziato dallo "spettro" delle energie dei fotoni. Parte dei fotoni sono emessi attraverso meccanismi termici: ogni oggetto irradia parte della sua energia in forma di fotoni. Caratteristica delle emissioni termiche per sistemi vicini all'equilibrio è

il cosiddetto "spettro di corpo nero" (vd. in Asimmetrie n. 20 p. 40, ndr): uno spettro a campana, con un massimo a un'energia proporzionale alla temperatura del sistema. Questa è per esempio la distribuzione dei fotoni emessi dalla fotosfera solare, a una temperatura di circa 6000 kelvin: sono i fotoni che illuminano le nostre giornate, e la sensibilità dell'occhio umano si è evoluta ottimizzandosi per questo spettro. Nei fotoni dell'universo (vd. fig. c) vediamo tracce di molti altri sistemi termalizzati o quasi termalizzati: per cominciare, la cosiddetta radiazione cosmica di fondo, che corrisponde al residuo di luce fossile del Big Bang (vd. in Asimmetrie n. 15 p. 33, ndr). Salendo ancora in energia in fig. c osserviamo altri spettri termici: quelli delle stelle, che raccontano la storia dell'evoluzione dell'universo, e a energie ancora più alte gli spettri legati alle regioni di accrescimento dei buchi neri, che corrispondono a temperature fino a milioni di kelvin - qualche kiloelettronvolt, o keV. Oltre queste energie sondiamo meccanismi non termici: i fotoni prodotti sono il risultato di transizioni nucleari e di interazioni di particelle di altissima energia. Ancora più in alto, oltre il centinaio di GeV, sondiamo le sorgenti che accelerano elettroni e protoni alle più grandi energie dell'universo. Queste emissioni, essendo legate a radiazione di particelle accelerate o a collisioni in prossimità di oggetti

b.
A sinistra i due telescopi di Magic, a destra il primo Large Size Telescope di Cta (vd. fig. d a p. 30) in costruzione. Questi telescopi rivelano la luce Cherenkov prodotta dalle particelle cariche, originate dall'interazione di raggi gamma con l'atmosfera. Poiché l'asse dello sciame di particelle e la luce Cherenkov da questo prodotta sono collineari alla direzione del fotone gamma primario, possono identificare con grande accuratezza le sorgenti cosmiche dei fotoni gamma. Sullo sfondo è visibile anche il Gran Telescopio Canarias, in alto il Telescopio Nazionale Galileo.



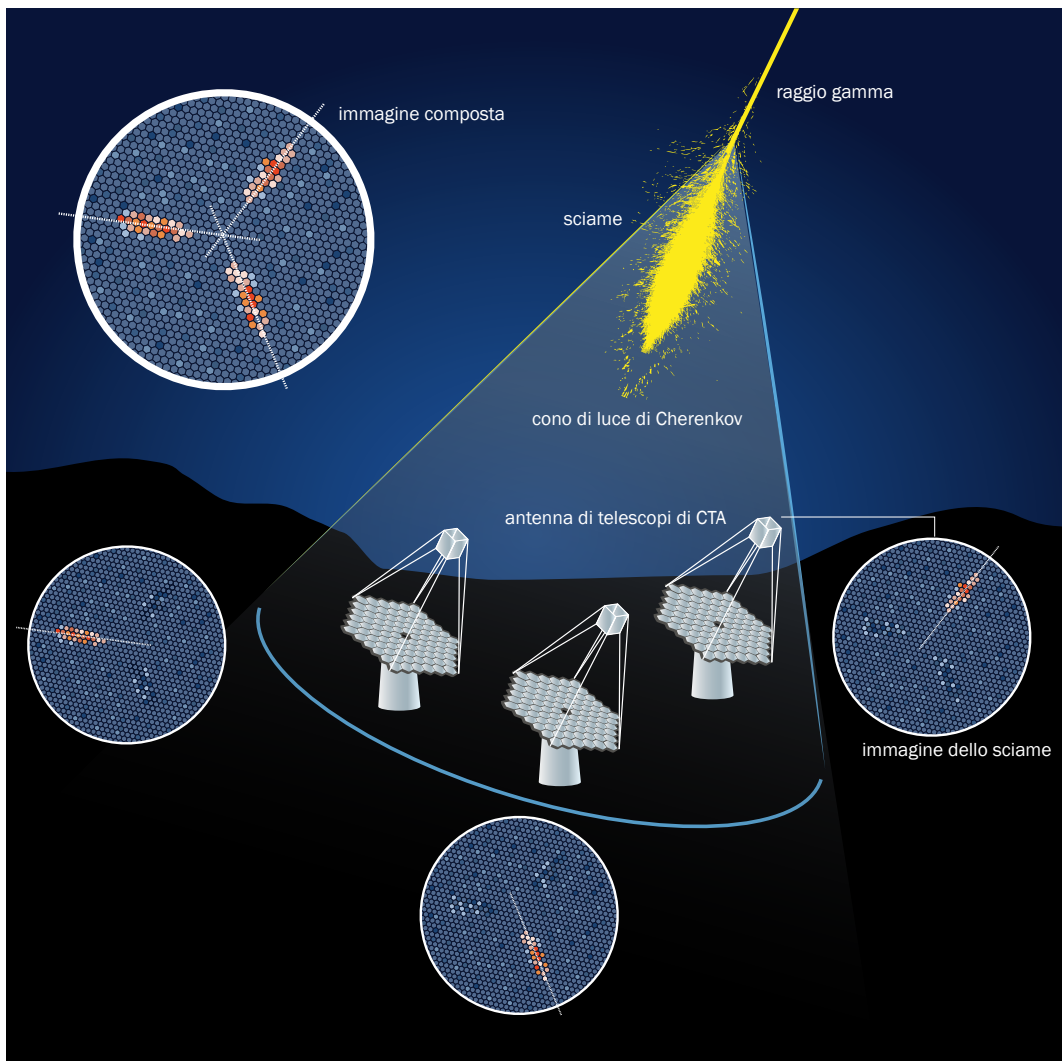


c.
Flusso dei fotoni cosmici, dalle energie delle onde radio fino a 800 GeV. Sono ben visibili i picchi relativi alla radiazione di fondo cosmico nella regione delle microonde e il picco ottico.

compatti, possono essere rapidamente variabili, con scale di tempo che vanno dalle decine di giorni, nel caso dell'accrescimento di buchi neri supermassicci (miliardi di masse solari) nel centro delle galassie, fino ai giorni, ai secondi o anche alla frazione di secondi, nel caso del collasso di oggetti stellari in stelle di neutroni o buchi neri. Nella fase di collasso delle stelle possiamo osservare "lampi" improvvisi di luce e di fotoni gamma in una banda estesa di energia; nella loro breve durata essi possono superare la luminosità totale del resto dell'universo. Sono i cosiddetti "*gamma-ray burst*" che, grazie ai nuovi esperimenti su satellite, oggi osserviamo in media una volta al giorno. L'universo non-termico è un universo violentissimo, e più che d'immagine dell'universo ad alte energie sarebbe appropriato parlare di un film. L'osservazione simultanea dell'universo

con telescopi sensibili a varie lunghezze d'onda è da decenni una delle chiavi di volta dell'astronomia moderna, e nel 2017 siamo stati protagonisti di un salto di qualità: per la prima volta abbiamo osservato in coincidenza l'emissione di fotoni e di onde gravitazionali dal collasso di un sistema binario di stelle di neutroni (vd. p. 31, ndr), e l'emissione di fotoni e di un neutrino da un buco nero supermassiccio in fase di accrescimento (vd. p. 23, ndr). Anche le onde gravitazionali e i neutrini, come i fotoni, "puntano" direttamente alla loro sorgente di produzione: queste due spettacolari osservazioni simultanee hanno aperto il campo dell'astrofisica multimessaggera (vd. in Asimmetrie n. 21 p. 21, ndr), rendendo ancor più stretta l'integrazione tra la fisica delle particelle e l'astrofisica. Molte scoperte degli ultimi anni sono dovute alla rivelazione di fotoni gamma

di alta energia: è questo il settore in cui abbiamo assistito al massimo progresso in astrofisica. In particolare, abbiamo dimostrato che i resti di supernova nella Via Lattea accelerano raggi cosmici fino a qualche migliaio di TeV (vd. in Asimmetrie n. 24 p. 16, ndr), abbiamo fotografato nuovi acceleratori cosmici costituiti da sistemi stellari binari, di cui uno è un oggetto compatto (un buco nero o una stella di neutroni), abbiamo osservato i meccanismi di accrescimento e radiazione di buchi neri supermassicci (con masse anche miliardi di volte superiori a quella del Sole) in altre galassie. Abbiamo visto all'opera lenti gravitazionali costituite da buchi neri di miliardi di masse solari, che fanno sì che lo stesso segnale gamma ci arrivi due volte a intervalli di giorni. Abbiamo spiegato il meccanismo che genera i *gamma-ray burst*, fino a pochi anni fa un puzzle astrofisico, disambiguando i meccanismi di



d. Principio di funzionamento di un'antenna di rivelatori a radiazione Cherenkov atmosferica. L'interazione di un fotone cosmico di alta energia con l'atmosfera genera uno sciame in cui le particelle cariche (prevalentemente elettroni e positroni) più veloci della luce nell'aria generano un lampo di luce che può essere rivelato da grandi telescopi di almeno una decina di metri di diametro. Combinando le immagini di diversi telescopi è possibile ricostruire con accuratezza la direzione e l'energia del fotone.

produzione di quelli “brevi”, di durata inferiore a qualche secondo, che sono prodotti dalla coalescenza di stelle di neutroni, da quelli “lunghi”, dovuti al collasso di supernovae di grande massa. Abbiamo rivelato una galassia che emette simultaneamente neutrini e raggi gamma, scoprendo nel suo centro un acceleratore di decine di PeV (vd. p. 23, ndr).

Nei prossimi anni nuovi satelliti sensibili a fotoni nella regione di energia tra il MeV e il GeV e nuovi strumenti a terra sensibili a fotoni di energie di centinaia di GeV e oltre (come il telescopio Cta, Cherenkov Telescope Array, vd. fig. d, che mira a realizzare un'enorme installazione di telescopi simili a quelli usati da Hess e Magic) apriranno la strada alla comprensione dei meccanismi di produzione delle più alte energie dell'universo e, probabilmente, alla scoperta di nuovi fenomeni fisici, in particolare sinergia con i rivelatori di neutrini e di onde gravitazionali. Grazie a questi nuovi esperimenti il cosmo si arricchirà sempre più di nuovi colori.

Biografia

Alessandro De Angelis dell'Infn di Padova, dopo essere stato negli anni '90 membro dello staff del Cern di Ginevra, dal 2000 si dedica alla fisica astroparticellare. È stato fra i proponenti del telescopio spaziale Fermi della Nasa e in seguito per tre anni responsabile scientifico dei telescopi Magic a La Palma. Attualmente è primo autore della proposta di un nuovo satellite gamma sensibile nella regione del MeV. Insegna fisica astroparticellare a Padova, a Trieste/Udine e a Lisbona.

Link sul web

https://imagine.gsfc.nasa.gov/science/toolbox/gamma_ray_astronomy1.html
<https://www.cta-observatory.org/>

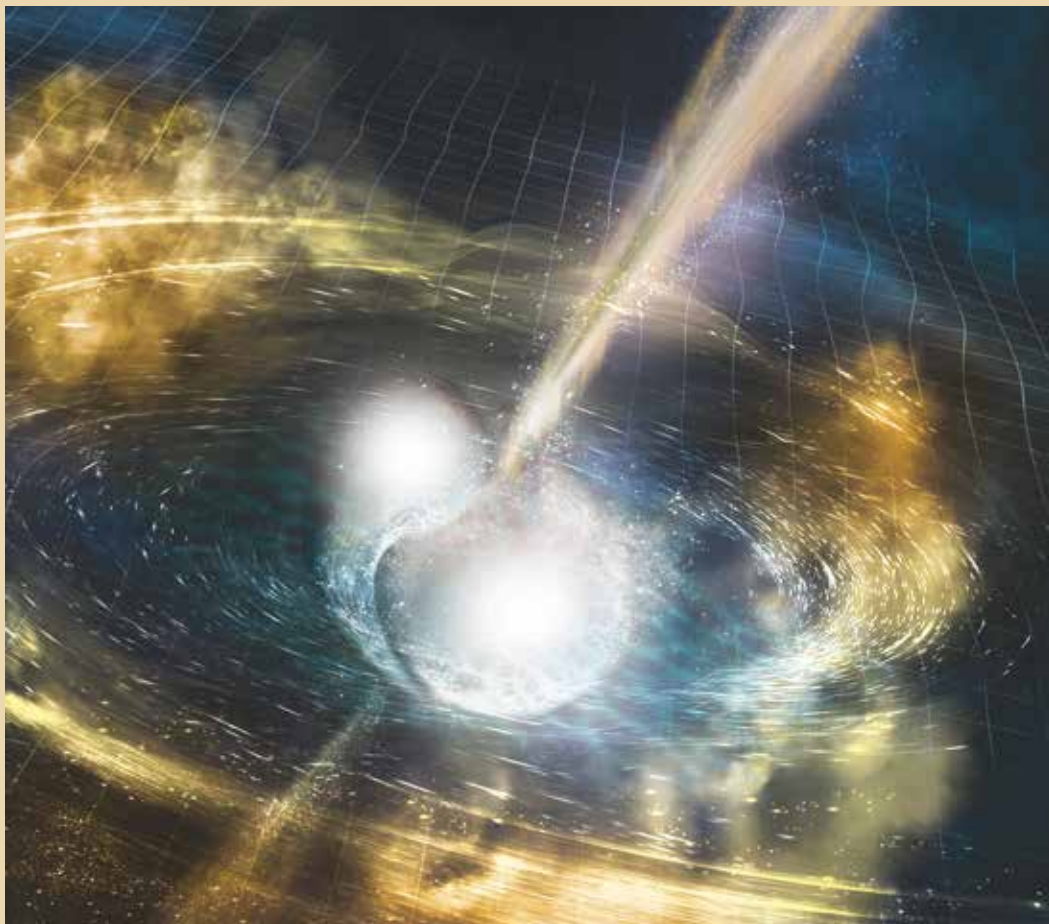
DOI: 10.23801/asimmetrie.2018.25.7

Con gli occhi puntati

L'esordio dell'astronomia multimessaggera

di Albino Perego

a.
Visualizzazione artistica della
fusione di due stelle di neutroni.



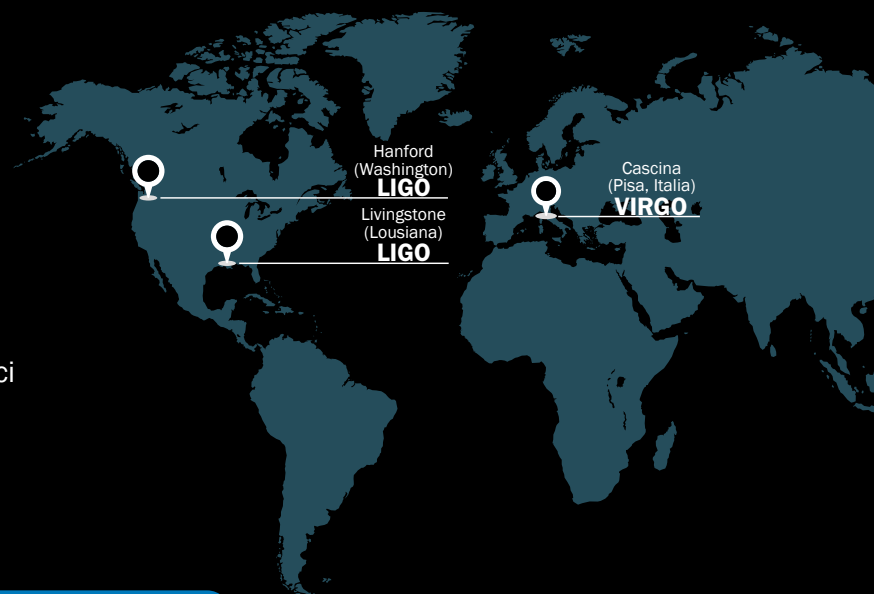
In una notte d'estate del 1609 Galileo Galilei puntò per la prima volta il suo cannocchiale al cielo. Non sappiamo con precisione che cosa vide, ma possiamo immaginarne lo stupore: un nuovo modo di guardare l'universo era nato. 408 anni dopo, il 17 agosto 2017, i due interferometri gemelli dell'esperimento Ligo negli Stati Uniti e quello dell'esperimento Virgo a Cascina (Pisa) rivelavano, per la prima volta, il passaggio di onde gravitazionali prodotte dalla collisione di due stelle di neutroni. Il passaggio dell'onda aveva modificato la lunghezza dei bracci degli interferometri, lunghi qualche chilometro, di una parte su centinaia di miliardi di miliardi, in pratica di una frazione delle dimensioni di un nucleo atomico. Il segnale, denominato GW170817, proveniva da una regione di cielo, grande 140 volte il disco lunare, posta nell'emisfero australe nella costellazione dell'IIdra (vd. fig. c

a p. 22, ndr). Meno di due secondi dopo, i satelliti Integral e Fermi rivelavano un lampo di fotoni gamma della durata di poco più di un secondo (un *gamma-ray burst* corto) proveniente dalla stessa regione di cielo. Undici ore dopo, telescopi dislocati in tutto il mondo e nello spazio cominciarono a osservare il brillare di una nuova sorgente nella galassia NGC 4993. Luce in tutte le bande dello spettro elettromagnetico, dai raggi X fino alle onde radio, passando per l'ultravioletto, il visibile e l'infrarosso, aveva viaggiato per 130 milioni di anni in scia alle onde gravitazionali, fino al nostro pianeta. Lo stupore delle centinaia di fisici e astronomi coinvolti in questa catena di scoperte deve essere stato simile a quello di Galileo quella notte d'estate. L'astronomia multimessaggera era nata e con essa il nostro modo di guardare l'universo si era ancora una volta rinnovato.

GW170817

Coalescenza di un sistema binario di stelle di neutroni

Rivelazione di un'onda gravitazionale da parte di Ligo e Virgo, con associati eventi elettromagnetici rivelati da oltre 70 osservatori



12:41:04 UCT

Il 17 agosto 2017 viene rivelata un'onda gravitazionale dalla coalescenza di un sistema binario di stelle di neutroni avvenuto a 130 mln di anni luce, in un'area di 28 gradi quadrati nel cielo australe.

+2 secondi

Osservazione di un lampo di raggi gamma.

Un lampo gamma (gamma ray burst) è un'intensa emissione di radiazione gamma prodotto immediatamente dopo la coalescenza.

+10 ore e 52 minuti

Una nuova e brillante sorgente di luce visibile viene osservata sempre nell'emisfero australe, in una galassia nota come NGC 4993 nella costellazione dell'Idra.

Il decadimento di materia ricca di neutroni genera un'emissione elettromagnetica di grande luminosità (detta kilonova) producendo metalli pesanti come oro e platino.

+11 ore e 36 minuti

Osservazione di radiazione infrarossa.

+15 ore

Osservazione di intensa radiazione ultravioletta.

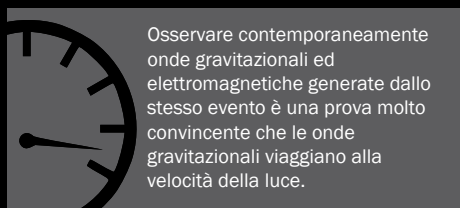
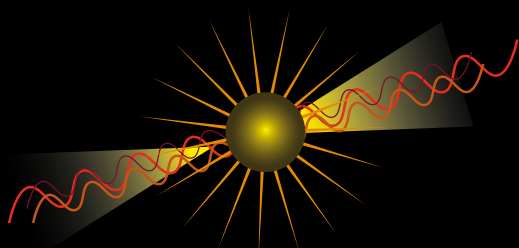
+9 giorni

Osservazione di raggi X.

+16 giorni

Osservazione di onde radio.

Allontanandosi dalla coalescenza, i residui producono un'onda d'urto nel mezzo interstellare, cioè la materia rarefatta tra le stelle. Questo produce emissioni che possono durare per anni.



Osservare contemporaneamente onde gravitazionali ed elettromagnetiche generate dallo stesso evento è una prova molto convincente che le onde gravitazionali viaggiano alla velocità della luce.



La cronaca di quei giorni assomiglia a un avvincente film d'azione. Dopo l'implementazione di importanti migliorie e alcune vicissitudini sperimentali, i primi di agosto 2017 l'interferometro Virgo era stato riaccessato e affiancato ai due interferometri americani. I tre interferometri sarebbero stati finalmente operativi allo stesso tempo, ma solo per alcune settimane. Un intervallo esiguo, ma sufficiente a Virgo per rivelare una coalescenza di buchi neri, prima, e, pochi giorni dopo, la prima coppia di stelle di neutroni.

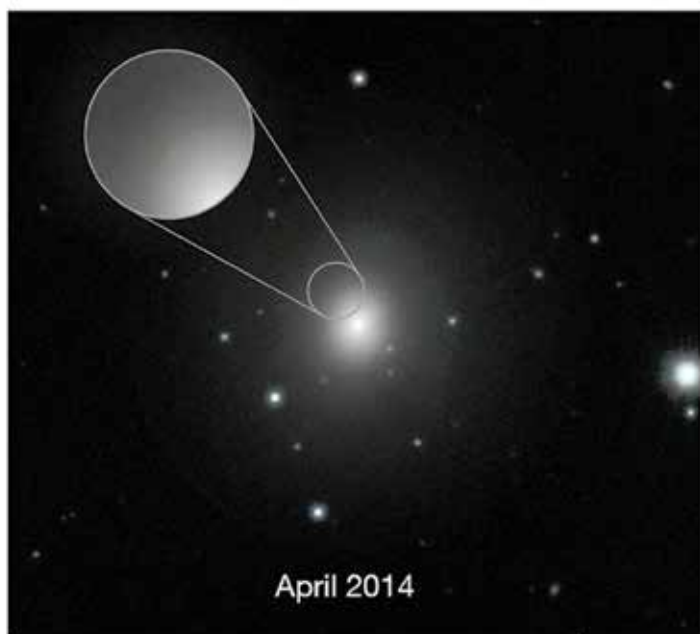
Per quanto l'onda gravitazionale fosse giunta sulla terra prima del lampo gamma, la prima allerta globale dell'evento fu lanciata dal satellite Fermi. Come mai? Il segnale in Virgo (il primo rivelatore a essere stato attraversato dalle onde) fu molto debole: un interferometro assomiglia più a un microfono che a un telescopio e,

nella fattispecie, il segnale era giunto da una delle zone di cielo per le quali il rivelatore ha minore sensibilità. In aggiunta, pochi secondi prima che il segnale gravitazionale raggiungesse il suo picco, il rivelatore Ligo di Livingston registrò un intenso *glitch*, un rumore caratteristico, ma casuale, che rese il rivelatore cieco per alcuni istanti e disattivò l'invio automatico dell'allerta. Tuttavia, una volta ricevuta l'allerta del satellite Fermi, una prima, rapida analisi dei dati raccolti dai tre interferometri rivelò il passaggio dell'onda e cominciò a far luce sulla natura della sorgente. La successiva allerta congiunta dei satelliti gamma e degli interferometri fu quindi diramata a centinaia di astronomi, insieme a una mappa del cielo con la localizzazione della sorgente. A dispetto del debole segnale registrato, la presenza dell'interferometro Virgo è stata fondamentale. Solo così, infatti,

la localizzazione per triangolazione è diventata dieci volte più precisa e i telescopi hanno potuto ispezionare una regione relativamente piccola di cielo alla caccia di emissioni di luce associate alla coalescenza: qualche decina di galassie dalle quali è presto emersa la prima osservazione estesa e dettagliata di una nuova classe di fenomeni astrofisici, le "kilonovae" (anche dette "macronovae"), brillante per più di venti giorni, e la tipica emissione in raggi X e onde radio (chiamata "*afterglow*") che accompagna, a qualche giorno di distanza, l'emissione dei lampi gamma. Al di là del fascino rappresentato dall'osservazione così complessa e variegata di un fenomeno mai visto prima, questo evento ha un immenso valore scientifico, le cui conseguenze sono ancora in gran parte da comprendere. Il segnale gravitazionale ha fornito informazioni preziose non



b.
Vista aerea dell'interferometro Ligo di Livingston, in Louisiana (Stati Uniti).



c.
La galassia NCG nell'aprile 2014 (a sinistra) e nell'agosto 2017, dopo la comparsa della kilonova, evidenziata nello zoom in alto a sinistra.

solo sulle proprietà delle stelle coinvolte nella fusione (per esempio, la loro massa), ma anche su problemi di fisica fondamentale, tra cui il limite superiore della massa del gravitone, la misura dell'accuratezza della teoria della relatività generale e il comportamento della materia nucleare. Secondo i modelli più accreditati, la fusione ha infatti originato una stella troppo massiccia per essere stabile, la quale è collassata in un buco nero entro un secondo. L'osservazione congiunta delle onde gravitazionali e del lampo gamma ha confermato la relazione, congetturata già da qualche tempo, ma mai direttamente provata, tra la collisione di stelle di neutroni e i *gamma-ray burst* corti. Una conferma che stimolerà ulteriormente lo studio di uno dei problemi più affascinanti dell'astrofisica contemporanea, vale a dire come queste emissioni energetiche vengano generate. L'osservazione della kilonova, invece, è una conferma diretta che una piccola parte della materia coinvolta nella collisione (qualche centesimo della massa del Sole) è espulsa e diventa una fucina nucleare, dove gli elementi più pesanti, tra cui l'oro, il piombo e l'uranio, sono prodotti e dispersi nell'universo. Infatti, è proprio il decadimento nucleare degli isotopi radioattivi di questi elementi a fornire energia alla materia riscaldandola e facendola brillare così intensamente. La ricchezza nel segnale di kilonova rivela una variegata produzione di nuclei pesanti, probabilmente influenzata dall'interazione tra la materia espulsa e i neutrini, le elusive particelle elementari così abbondantemente prodotte durante queste collisioni.

GW170817 rappresenta il primo esempio di astronomia multimessaggera guidata dall'emissione di onde gravitazionali e,

primo nel suo genere, un riuscito esperimento di collaborazione internazionale tra gruppi scientifici ed esperimenti tra loro molto eterogenei. Già a partire dall'anno prossimo, la riaccensione degli interferometri, ulteriormente migliorati, promette di rivelare un numero crescente di fusioni di buchi neri e stelle di neutroni, in un volume di universo quattro volte più esteso che in passato. Gli astronomi e i cacciatori di neutrini sono già pronti a raccogliere le allerte e a cercare tra le miriadi di galassie ogni ulteriore segnale proveniente dalla scontro. Le informazioni raccolte in questi laboratori cosmici di fisica fondamentale permetteranno di affrontare alcuni dei quesiti più attuali ed elusivi della fisica contemporanea.

Biografia

Albino Perego è assegnista di ricerca presso la sezione Infn di Milano Bicocca e Parma e membro delle collaborazioni Virgo e Grawita. Ha conseguito il dottorato presso l'Università di Basilea e ha lavorato all'Istituto di Fisica Nucleare Teorica di Darmstadt. Si occupa principalmente di astrofisica multimessaggera e di interazioni deboli in collisioni di stelle di neutroni ed esplosioni di supernovae.

Link sul web

http://public.virgo-gw.eu/gw170817_it/

<https://www.ligo.caltech.edu/page/press-release-gw170817>

<http://www.media.inaf.it/tag/gw-170817/>

DOI: 10.23801/asimmetrie.2018.25.8

Sismometri 2.0.

di Francesca Mazzotta

Il 17 agosto 2017 gli interferometri Ligo e Virgo, osservando per la prima volta onde gravitazionali generate dalla collisione di due stelle di neutroni, hanno rivoluzionato l'osservazione dell'universo, aprendo le porte all'astronomia multimessaggera. Ma anche le tecnologie sviluppate per raggiungere questo importante traguardo sono di per sé rivoluzionarie e possono avere un grande impatto sul mondo dell'industria, come racconta la storia della compagnia olandese Innoseis che, nata come *spin-off* del gruppo di astronomia gravitazionale dell'Istituto Nazionale per la Fisica Subatomica in Olanda (Nikhef), oggi sviluppa sensori sismici ("sismometri") per l'industria. "Mentre lavoravamo alla costruzione dell'interferometro Virgo," racconta Jo van der Brand, attualmente responsabile della collaborazione che gestisce l'interferometro e tra i fondatori di

Innoseis, "abbiamo capito che anche la più piccola quantità di rumore sismico ne avrebbe compromesso l'abilità di effettuare misure accurate, per questo abbiamo iniziato a sviluppare sensori molto sensibili. Per eliminare vibrazioni che potessero interferire con le misurazioni dell'esperimento, abbiamo lavorato sull'elettronica e a sofisticate tecniche di presa dati". Durante questo processo, Jo e il collega Mark Beker hanno però intuito che queste tecnologie avrebbero potuto avere applicazioni al di fuori della ricerca fondamentale e hanno intrapreso un dialogo con il mondo dell'industria, che ha espresso un forte interesse per i sensori. "Abbiamo dunque avviato un percorso parallelo al nostro impegno scientifico e nel 2013 abbiamo fondato Innoseis," continua Jo. "La tecnologia sviluppata per Virgo doveva essere adattata ai bisogni dell'industria:

abbiamo reso i sensori più leggeri e li abbiamo migliorati per facilitarne l'utilizzo. Oggi pesano solo 650 grammi, possono essere installati in poco tempo, non hanno bisogno di cavi, inoltre possono operare autonomamente per più di 50 giorni".

Innoseis ha già venduto migliaia di sensori, che sono installati in tutto il mondo, dall'Artico agli Stati Uniti, dal Sud America al Medio Oriente. Molti tra questi sono stati venduti a compagnie petrolifere, rendendo la ricerca e l'utilizzo di fonti di energia più responsabile ed efficiente.

"Le potenzialità delle tecnologie sviluppate per Virgo sono ancora tante", conclude Jo, "anche le tecniche sviluppate per l'isolamento delle vibrazioni esterne o quelle d'avanguardia nel campo dell'ottica e dell'analisi dati possono rivelarsi utilissime per l'industria".



[as] radici

Scambi forti.

di Francesco Guerra

fisico teorico e storico della fisica

Il 10 dicembre 1949, Hideki Yukawa riceve dal principe ereditario Gustav Adolf di Svezia, nella meravigliosa Sala dei Concerti di Stoccolma, il premio Nobel per la fisica. La motivazione ufficiale recita: “Per la sua predizione dell’esistenza di mesoni sulla base di un lavoro teorico sulle forze nucleari”.

Il lavoro di Yukawa era stato presentato alla fine del 1934, e pubblicato sui Proceedings of the Physico-Mathematical Society of Japan nel 1935. Passeranno circa quindici anni prima di avere la conferma sperimentale dell’effettiva esistenza della nuova particella ipotizzata su basi puramente teoriche.

Conviene ricordare brevemente alcuni antefatti. Nel 1932-1933, Werner Heisenberg ed Ettore Majorana sviluppano una teoria quantistica del nucleo, costituito da protoni e neutroni, in cui intervengono esclusivamente la forza di repulsione coulombiana tra protoni e una forza di scambio attrattiva tra i protoni e i neutroni. Le forze di scambio (forze tra due particelle legate allo scambio di alcune proprietà delle particelle - posizione, spin, carica) erano ben note nell’ambito della fisica atomica e molecolare. Ora esse vengono introdotte anche in fisica nucleare.

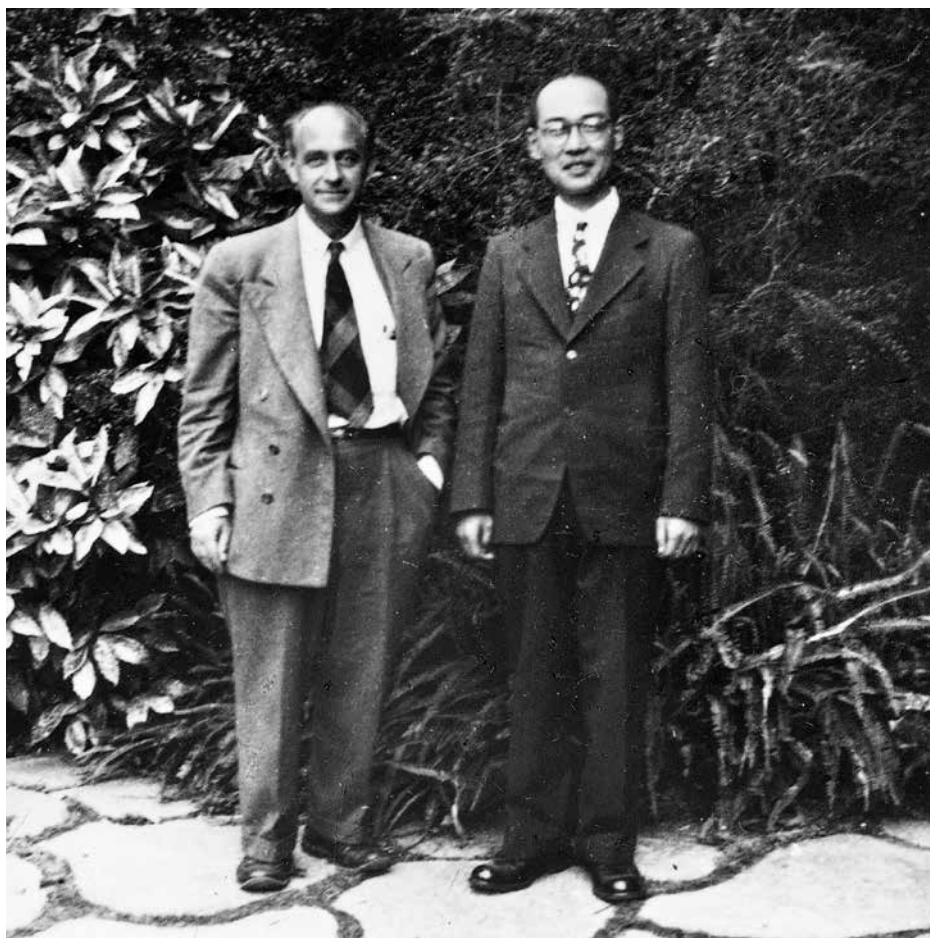
Alla fine del 1933, Enrico Fermi formula la sua celebre teoria del decadimento beta, in cui introduce una nuova interazione fondamentale, detta poi interazione nucleare debole, in un ambito di teoria quantistica dei campi. Questa interazione, la cui intensità è determinata da un parametro, la “costante di Fermi”, permette a un neutrone nel nucleo di trasformarsi in un protone, con la simultanea creazione di un elettrone e un (anti)neutrino. L’elettrone, sfuggito dal nucleo, viene rivelato come raggio beta.

Heisenberg avanza immediatamente una proposta molto ambiziosa, secondo cui la forza di scambio quantistica nucleare sarebbe dovuta allo scambio virtuale di una coppia elettrone-neutrino, che verrebbe emessa nella trasformazione di un neutrone in un protone, e poi immediatamente riassorbita con la trasformazione inversa del protone in neutrone.

a.
Hideki Yukawa riceve il Nobel della fisica dal principe ereditario Gustav Adolf di Svezia nel 1949.



Il tentativo di Heisenberg naturalmente fallisce, perché la sua forza è un effetto del secondo ordine, proporzionale al quadrato della costante di interazione di Fermi, che ha un valore troppo piccolo. Effetti di tale ordine non possono assicurare coesione e stabilità dei nuclei. Però questo tentativo è storicamente importante perché mostra la



b.
Hideki Yukawa con Enrico Fermi,
in una foto scattata a Berkeley
nel 1948.

possibilità di derivare la forza di scambio quantistica nucleare da una teoria di campo opportuna, nel limite di bassa energia.

A questo punto, alla fine del 1934, ci sono tutti gli elementi per poter costruire una teoria soddisfacente delle forze di scambio nucleari. Tocca a Hideki Yukawa, allora giovane professore all'Università Imperiale di Osaka, prendere coraggiosamente l'iniziativa. Il suo punto di partenza è dato da una aggiunta alla teoria di Fermi. Nella trasformazione del neutrone in protone, non solo può essere emessa la coppia elettrone-neutrino, ma anche una ipotetica nuova particella. È lo scambio di questa particella virtuale, in un contesto di teoria dei campi, che produce l'interazione di scambio nucleare.

Le proprietà di questa nuova particella sono facilmente stabilite. Deve avere spin zero, come conseguenza della forma dell'interazione di scambio teorizzata da Majorana. All'inizio

solo due possibili cariche, positiva e negativa, uguali in valore assoluto a quella dell'elettrone, sono ipotizzate. Nel seguito sarà mostrato come sia necessaria anche una componente neutra. La massa, determinata dalla sua connessione con il raggio d'azione noto delle forze nucleari, risulta avere un valore intermedio tra quelle del protone e dell'elettrone, tanto da giustificare la successiva denominazione di "mesone" (ossia particella di massa intermedia). La costante di interazione può essere determinata in modo opportuno, sulla base dei dati fenomenologici, non essendo più legata alla costante di interazione di Fermi. Nella sua *Nobel Lecture*, Yukawa pone anche in rilievo che la forma della forza di scambio di Majorana implica una parità intrinseca pseudo-scalare per la nuova particella (cioè la funzione d'onda della particella deve cambiare segno per inversione delle coordinate spaziali). Complessivamente quindi la teoria di Yukawa si presenta come una

teoria quantistica dei campi che riproduce, a basse energie, le forze di scambio nucleari, introducendo una nuova particella, di cui sarà necessario appurare l'esistenza per via sperimentale.

Segue un lungo periodo di incertezza, in cui la particella di Yukawa pareva potersi identificare con il "mesotrone", una particella, con carica dei due segni, scoperta nei raggi cosmici nel 1936 da Carl D. Anderson e Seth H. Neddermeyer, ed estensivamente studiata negli anni successivi. Però in un famoso esperimento, svolto immediatamente dopo la fine della guerra, Marcello Conversi, Ettore Pancini e Oreste Piccioni dimostrano che il mesotrone interagisce molto debolmente con i nuclei, e quindi non può essere l'intermediario della interazione nucleare forte (vd. anche in *Asimmetrie* n. 23 p. 13, ndr).

Solo nel 1946 César Lattes, Hugh Muirhead, Giuseppe Occhialini e Cecil F. Powell scoprono il vero "Yukone", ora detto "pione", esponendo emulsioni fotografiche all'azione dei raggi cosmici. Ora la strada di Hideki Yukawa verso il Nobel è finalmente aperta: "*Mit dem Genius steht die Natur im ewigen Bunde; was der eine verspricht, leistet die andere gewiss*" ("La natura è costantemente legata al genio; ciò che promette l'uno, di certo lo realizza l'altra", citazione di Friedrich Schiller, poeta tedesco).

[as] intersezioni

Luce sulle molecole.

di Mariangela Cestelli Guidi

ricercatrice Laboratori Nazionali di Frascati



a.
Radiografia a contrasto di fase di una lucertola con luce di sincrotrone di energia pari a 17 keV. Si riesce a vedere ciò di cui la lucertola si è nutrita.

Quando osserviamo un oggetto alla luce del Sole, i nostri occhi rivelano la componente della luce diffusa dalla sua superficie e il colore è determinato da quelle componenti dello spettro solare che non vengono assorbite. La luce quindi, sotto forma di fotoni (il messaggero più antico che conosciamo), porta con sé un'informazione legata al suo passaggio sulla superficie di un materiale. Se guardiamo questo fenomeno su una scala più ampia - la luce visibile, infatti, è solo una piccola parte dello spettro elettromagnetico - ci accorgiamo che la nostra vita quotidiana ci mostra in continuazione esempi in cui la radiazione elettromagnetica, anche e soprattutto quella non visibile, porta con sé informazioni sulle proprietà degli oggetti che attraversa: uno scanner in aeroporto, una radiografia in ospedale o una Tac sono tutte tecnologie

basate sull'assorbimento di energia elettromagnetica da parte di corpi con proprietà diverse. Questo fenomeno è alla base della "spettroscopia", la scienza che studia in che modo lo spettro della radiazione elettromagnetica viene modificato dall'interazione con un materiale (vd. in *Asimmetrie* n. 12 p. 21, ndr). Scegliendo opportunamente la sorgente di radiazione, possiamo studiare le proprietà microscopiche di un qualsiasi materiale attraverso il suo spettro di assorbimento, che può rivelare tutta l'informazione molecolare, elettronica, strutturale o magnetica.

Le cose si complicano se la quantità di materiale da studiare è molto piccola, come ad esempio una molecola o una cellula umana: per avere un segnale rivelabile è necessario utilizzare una sorgente di radiazione elettromagnetica con una potenza molto elevata oppure

fare in modo che tutta la radiazione sia emessa unicamente in direzione dell'oggetto che vogliamo studiare. Questa proprietà, ossia il flusso per unità di superficie, è detta "brillanza" ed è la stessa per cui possiamo vedere un fascio laser a centinaia di metri di distanza, mentre non è possibile per la luce di una torcia elettrica. Negli anni '60, assieme al crescente sviluppo degli acceleratori di particelle per la fisica delle alte energie, è nato un nuovo tipo di tecnologia che ha consentito di utilizzare la radiazione, detta "radiazione di sincrotrone", prodotta da cariche elettriche accelerate su orbite circolari a velocità prossime a quelle della luce. Questo tipo di radiazione ha proprietà uniche che consentono di studiare le proprietà microscopiche di quantità estremamente piccole di materia. Lo spettro della radiazione

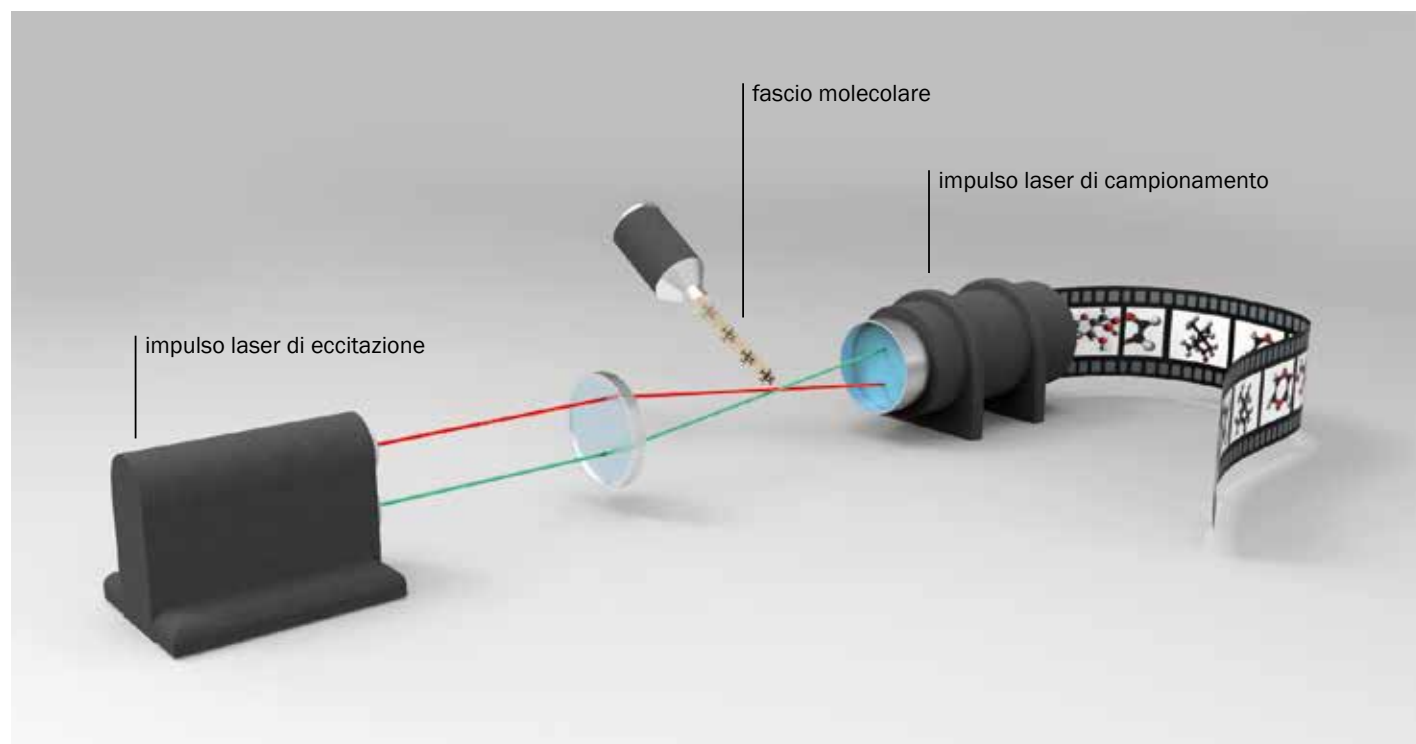
di sincrotrone è uno spettro continuo, esteso dalle microonde fino ai raggi X, e il tipo di applicazioni di carattere scientifico e tecnologico è davvero molto ampio: dallo studio e caratterizzazione di nuovi materiali, allo sviluppo di moderne componenti elettroniche e magnetiche, dalla produzione di energia, agli studi di biologia con il loro impatto in campo medico, dall'analisi non distruttiva di elementi legati all'ambiente naturale, alla conservazione e studio dei beni culturali, a campioni considerati unici come materiali stellari o di interesse paleontologico. Oggi nel mondo esistono più di 30 acceleratori dedicati alla produzione di luce di sincrotrone e centinaia di linee di luce (i canali che raccolgono la radiazione e la trasportano fino alle stazioni sperimentali nei laboratori), ottimizzate per selezionare lunghezze d'onda specifiche e dunque campi di applicazione distinti. Un fascio di luce di sincrotrone rende visibile ciò che è molto difficile vedere con una sorgente di luce convenzionale. Ad esempio, una cellula di un tessuto tumorale può essere riconosciuta in mezzo a milioni di cellule sane grazie agli assorbimenti molecolari presenti nel suo spettro infrarosso, detti "biomarker", legati in modo univoco ad alcune delle caratteristiche del tumore. È inoltre

possibile determinare l'efficacia di un farmaco antitumorale a livello cellulare dal modo in cui questi *biomarker* spettrali vengono modificati dall'azione del farmaco. La sorgente di luce utilizzata per questo tipo di esperimenti deve necessariamente essere collimata per poter misurare segnali deboli, provenienti da una singola cellula, con il minor livello di rumore possibile.

I vantaggi della luce di sincrotrone non si esauriscono a livello atomico e molecolare. Recenti sviluppi nelle tecniche di *imaging* con raggi X a cosiddetto "contrasto di fase" hanno infatti consentito di realizzare immagini di tessuti biologici con una definizione finora mai ottenuta, utilizzando dosi di raggi X estremamente più basse di quelle utilizzate negli ospedali con tubi a raggi X tradizionali, grazie alla brillantezza della sorgente. Per trasferire in ambito diagnostico queste tecniche sviluppate nei sincrotroni molti istituti di ricerca, ma anche industrie, studiano il modo per rendere più compatti i dispositivi per la produzione di radiazione. Altri invece, come il sincrotrone di Trieste, dove l'Infn ha sviluppato una linea dedicata all'*imaging* a contrasto di fase, cercano di portare i pazienti in queste strutture. Le sorgenti di luce di sincrotrone

cosiddette di terza generazione, basate sull'utilizzo di magneti ondulatori o *wiggler*, stanno lentamente facendo spazio ai *free electron laser* (Fel) (vd. in *Asimmetrie* n. 6 p. 38, ndr). Questo tipo di sorgenti ha aperto la strada a esperimenti inaccessibili con sorgenti di luce di sincrotrone di terza generazione, come ad esempio la possibilità di girare il "film" di una reazione fotochimica, interpretandone i dettagli nascosti con l'aiuto di sistemi di calcolo dedicati. I primi passi nei processi fotochimici implicano infatti cambiamenti nella struttura elettronica e geometrica su tempi estremamente brevi misurati in femtosecondi (un milionesimo di miliardesimo di secondo), e solo l'avvento di queste macchine di ultima generazione ha consentito di ricostruire con precisione tutta la sequenza della reazione.

b.
Spettroscopia al femtosecondo di una reazione chimica: una sorgente laser eccita un fascio molecolare utilizzando impulsi della durata di 10^{-15} s (femtosecondi). L'immagine di diffrazione della molecola viene registrata utilizzando un impulso laser della stessa durata, consentendo di catturare gli stati intermedi della molecola durante la reazione.



[as] con altri occhi

Conversazioni atomiche.

di Felice Farina

regista



Sono da sempre ammalato di scienza. Non saprei bene raccontare come sono finito a fare il cineasta, forse perché la scienza mi abita solo per metà e l'altra metà è occupata da un miscuglio di qualcosa che ha a che vedere con l'arte: categoria che in effetti fino ad alcuni secoli fa con la scienza era unita nel tutt'uno di un'infanzia felice. Ma, anche se questa osservazione sembrerebbe precludere a un ennesimo discorso su "arte e scienza", mi hanno sempre destato una certa perplessità i tentativi di innestare visioni estetiche su problemi scientifici, come spesso è accaduto in molti articoli e documentari. Più in generale, ritengo la divulgazione scientifica un complemento importante dell'attività di ricerca, perché è importante che la comunità conosca le domande che vengono poste dalla scienza alla Natura.

Così è nato "Conversazioni Atomiche", un film di 80 minuti sulla fisica in Italia, dove

appunto si conversa, più che teorizzare o difendere assunti. E dove si cerca di seguire un metodo per così dire "galileiano", cioè si osserva e si traggono conclusioni. Ho iniziato a curiosare nel mondo della ricerca, e fin dalle prime conversazioni ho capito che ne valeva la pena, perché tra gli scienziati italiani, appena oltrepassate le deviazioni della cortina mediatica, ho percepito spesso il vibrare sincro di competenza e passione, cosa per me entusiasmante. Ho privilegiato la fisica, perché per essa ho una passione ignorante ma ostinata e devota, maturando l'idea di seguire il lavoro di ricerca così come si svolge giorno per giorno, nei laboratori, nelle *control room* degli acceleratori, nelle aule delle università, raccontare la pazienza, la scala di tempo di un programma di ricerca che può coprire un'intera vita, il confronto incessante con le dimensioni estreme degli anni luce e quelle infinitesime di Planck. E, da sempre

a.
Una scena del documentario "Conversazioni Atomiche". Il regista (a destra) si trova nel Laboratorio del Gran Sasso assieme alla ricercatrice Infn Catalina Curceanu.

legato a un'idea rosselliniana di cinema utile, ho pensato di approfittare di quella competenza e passione per cercare di spiegare almeno a grandi linee, almeno nei concetti, due dei fondamenti della fisica contemporanea, non facili da comprendere intuitivamente, ma che credo oggi debbano essere parte integrante del sapere, non foss'altro perché determinano uno sguardo diverso e assai più profondo sulla Natura: sto parlando della gravità einsteiniana e della meccanica quantistica, le due intuizioni fondanti della fisica il cui disaccordo è tuttora irrisolto e centrale. Un altro dei presupposti che mi sono dato assieme al mio coautore, Nicholas Di Valerio, è stato quello di raccontare con molta esattezza il funzionamento degli apparati di ricerca, spesso presentati come mostruosi *mirabilia* a effetto, con quel tanto di superficialità che sembra sottintendere che - ahimè - l'utente medio più di tanto non può capire. Per questo ho voluto iniziare da un luogo, per me mitico nei racconti che sentivo fare da bambino su quell'"anello" che stava a Frascati, dove ogni giorno dagli anni '60 si fanno scontrare particelle, registrando i dati, e poi studiandoli, con la stessa pazienza con cui Galileo misurava la discesa della palla sul piano inclinato, magia di un sistema osservativo inventato con l'ostinazione di carpire alla natura un suo segreto. Un po' come accadde

a Bruno Touschek, la cui storia mi soffermo a raccontare nell'incursione fatta al sincrotrone, della sua brillante trovata di far collidere elettroni e positroni, un meraviglioso insieme di ragionamento deduttivo e di fantasia trasgressiva sull'uso mai fatto prima di una cosa. Oltre alla curiosità, la visita ai laboratori del Gran Sasso, misteriosa deviazione non accessibile dell'autostrada A24, ha avuto anche una spinta etica, che viene dalla nutrita letteratura *fake* che fantastica di esperimenti che scatenerebbero i terremoti e addirittura l'annichilazione della montagna. Ho trovato invece appassionante raccontare l'idea virtuosa di sfruttare un lavoro pubblico già in corso, che diede luogo a un laboratorio unico al mondo, il primo in grado di filtrare efficacemente i raggi cosmici presenti in natura. Dagli enormi volumi di Xenon1t e di Opera, che abbiamo appena fatto in tempo a filmare durante lo smontaggio, siamo approdati a un piccolo laboratorio densissimo di attrezzatura, dove la passione artigianale e la ricerca avanzata si uniscono in magia: il gruppo di Guglielmo Tino che genera con disinvoltura il condensato di Bose-Einstein, con cui diviene facile giocare con la doppia natura delle particelle, e permettersi quindi di misurare il tempo di caduta di atomi in uno stato quantistico

particolare, contribuendo a indagare sul mistero della gravità. Mi ha colpito come il vecchio adagio del disaccordo tra Einstein e Bohr sia tutt'altro che sorpassato, ma sia anzi pronto a venir fuori in molte occasioni, denotando la sua urgenza, dando la sensazione che fin quando la gravità non si accorderà in qualche modo con la meccanica dei quanti la nostra comprensione della Natura rimarrà come soffocata. La gravità occupa una parte importante del film, come una diva protagonista avvolta nel mistero. È la gravità bene o male a far saltare in aria i conti che hanno portato a ipotizzare la materia oscura. Ed è lei la protagonista del buco nero, nel quale la relatività di Einstein trova il suo limite e le equazioni danno infinito. Determina il nostro modo di stare al mondo più dell'elettromagnetismo, ma è infinitamente meno forte. Per questo forse la visita a Virgo ha avuto un che di sacrale, suggerito dall'idea di un rivelatore lungo chilometri fatto per captare non particelle, non onde radio, o luce, ma qualcosa di più sfuggente, teorizzato da Einstein ma mai visto se non recentemente, troppo debole per le antenne risonanti con cui per decenni è stato inseguito, e che paradossalmente proviene da catastrofi immani, che esprimono l'energia di decine di masse solari annichilate in millisecondi, di cui non giunge qui che una traccia infinitesima.



b.
Un'altra scena del film, in cui il regista e il co-sceneggiatore, Nicholas Di Valerio, ammirano una camera a nebbia costruita dall'amico Cristiano "Capoccia" D'Innocenti, astronomo dilettante.

[as] selfie

Nei licei tra arte e scienza.

di Claudia Pistone, Chiara Tornese, Rita Vitale

studentesse della IV A del Liceo Artistico "Giovanni Caselli" di Napoli

Nell'ultimo anno abbiamo ripercorso più volte, con entusiasmo e con tanta emozione, tutte le tappe, gli ostacoli superati e gli stati d'animo contrastanti che ci hanno accompagnato in questo percorso durato due anni, che ci ha portato fino alla vittoria del primo premio del concorso "Art & Science across Italy". Nel 2016-17 abbiamo partecipato ai primi seminari tenuti presso la nostra scuola da Pierluigi Paolucci, ricercatore dell'Infn-Cern, e dai docenti che ci hanno proposto la partecipazione al progetto come percorso di alternanza scuola lavoro, il prof. Federico Borriello, di fisica e matematica, e la prof.ssa

Adriana Pica, di storia dell'arte. Inizialmente non ci sentivamo particolarmente interessate: gli argomenti ci risultavano ostici e lontani dalle nostre esperienze e conoscenze. Ci affascinavano, però, le immagini, i colori e le forme proiettate sullo schermo. Vedere poi come tali argomenti erano stati tradotti in opere da artisti e altri studenti ha fatto scattare la voglia di misurarci con essi. L'anno scorso, grazie all'intensificarsi delle attività di orientamento e formazione, siamo entrate nel vivo del progetto e abbiamo iniziato ad appassionarci anche alle tematiche scientifiche.

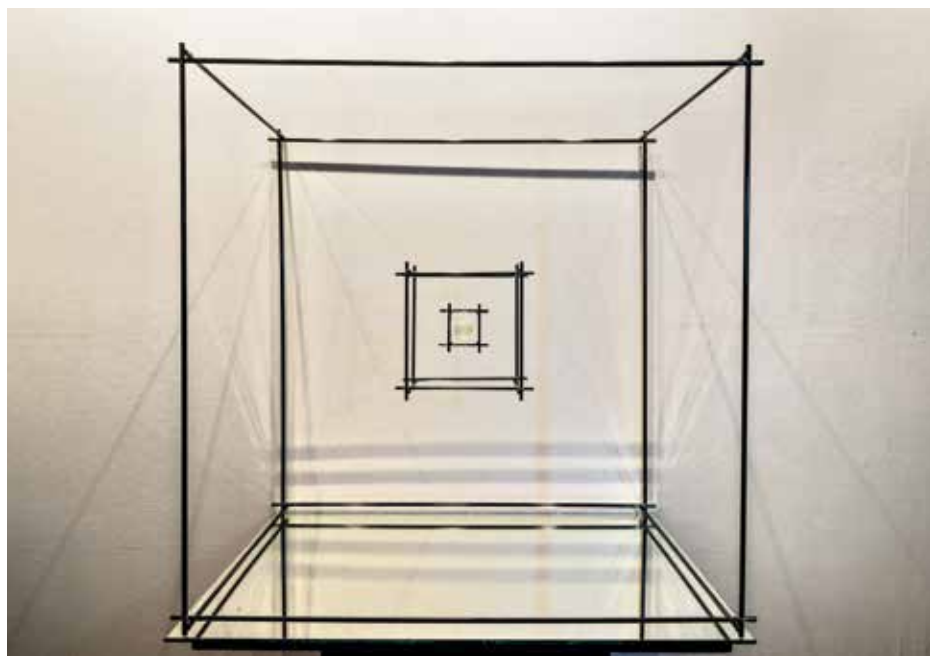
a.
La premiazione di Claudia Pistone, Chiara Tornese, Rita Vitale da parte del presidente Infn Fernando Ferroni durante l'evento "Di Arte e di Scienza" a Napoli, il 6 aprile scorso. Sulla destra il promotore di "Art & Science across Italy", Pierluigi Paolucci, ricercatore dell'Infn e dell'esperimento Cms al Cern.



Alla fine, le idee erano davvero tante e non è stato per nulla semplice far confluire l'immaginazione di ognuna di noi in un progetto condiviso. Per fortuna i temi che ci avevano particolarmente affascinati avevano una matrice comune: la realtà multidimensionale. È nata così l'idea di realizzare un'opera che fosse espressione di due concetti: osservata dall'interno all'esterno, la nascita e l'espansione dell'universo multidimensionale, e osservata dall'esterno all'interno, l'esistenza di una particella elementare imbrigliata in una realtà fisica multidimensionale. Con l'aiuto del prof. Dario Guglielmi, di progettazione, abbiamo dato forma alle nostre idee e, con la collaborazione del prof. Claudio Cipolletti, di discipline plastiche, abbiamo realizzato l'opera in tondini d'acciaio e fili di nylon. L'esperienza ci ha fatto attraversare infiniti stati d'animo ed emozioni, ma l'aspetto che ci piace maggiormente sottolineare è il clima di collaborazione che si è creato tra i gruppi di lavoro. La nostra classe è stata divisa in gruppi, ma non è stato raro vedere i componenti mescolarsi per mettere al

servizio degli altri le proprie capacità. Così, quando ci siamo aggiudicate il primo posto, abbiamo esultato davvero tutti insieme.

b.
L'opera vincitrice della I edizione di "Art & Science Across Italy", realizzata dalle studentesse napoletane e intitolata "Void inside matter" ("Il vuoto nella materia", ndr).



[as] approfondimento

L'iniziativa

"Art & Science across Italy" è un progetto europeo del network Creations (Horizon 2020), organizzato dall'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, dal Cern di Ginevra e dall'esperimento Cms di Lhc. Lo scopo principale è quello di avvicinare tutti gli studenti, indipendentemente dalla loro propensione per le materie scientifiche e dalle loro conoscenze iniziali, al mondo della scienza e della ricerca scientifica, usando l'arte come mezzo di comunicazione universale.

La I edizione, iniziata nell'ottobre 2016 a Milano, ha raggiunto le città di Venezia, Padova, Firenze e Napoli, coinvolgendo 38 licei per un totale di 3050 studenti e più di 100 docenti. La partecipazione degli studenti del terzo e quarto anno dei licei classici, artistici e scientifici, svoltasi anche durante le ore di alternanza scuola lavoro, si suddivide in quattro fasi: un primo momento di formazione con seminari e incontri tra studenti e ricercatori presso le scuole, i laboratori dell'Infn e dell'Università e visite guidate dei musei cittadini di scienza e d'arte; una seconda fase durante la quale gruppi di tre studenti progettano e realizzano una composizione artistica su uno dei temi scientifici affrontati, con il supporto dei ricercatori dell'Infn, dell'Università e dell'Accademia delle Belle Arti; il

momento conclusivo, in cui gli studenti organizzano una vera e propria mostra delle opere risultate più meritevoli nella loro città; una quarta fase in cui alcuni studenti, selezionati da una giuria internazionale, hanno la possibilità di partecipare a un master al Cern.

La I edizione si è conclusa nell'aprile del 2018 a Napoli, con una mostra intitolata "I colori del bosone di Higgs" tenutasi nel museo Archeologico Nazionale di Napoli (Mann), che raccoglieva le migliori opere realizzate dagli studenti di tutta Italia, e con un evento pubblico intitolato "Di Arte e di Scienza", durante il quale sono stati premiati tutti i vincitori e dove sono intervenuti il presidente dell'Infn Fernando Ferroni, il critico d'arte Philippe Daverio, l'attore Edoardo Leo e il giornalista scientifico Marco Cattaneo.

Alla II edizione, appena iniziata e che terminerà a maggio 2020, parteciperanno anche le città di Torino, Roma e Potenza/Matera, e coinvolgerà in modo sempre maggiore tante altre discipline scientifiche oltre alla fisica. [Pierluigi Paolucci]

Per informazioni: <https://web.infn.it/artandscience>

[as] spazi

Un safari fotografico nei laboratori.

di Vincenzo Napolano

Fotografare la fisica dietro le quinte. È questa la molla che ha spinto centinaia di fotografi amatoriali e professionisti a partecipare al Global Physics Photowalk. Un concorso fotografico, ideato dal network internazionale per la comunicazione della fisica, Interactions, che permette ai partecipanti di esplorare liberamente, per un giorno, un grande laboratorio di fisica e immortalare, per così dire, il backstage. Dettagli degli strumenti, tagli inediti delle geometrie degli esperimenti, scatti stranianti delle sale degli esperimenti e delle persone, la cui presenza accanto agli apparati tecnologici risulta a volte stridente, altre del tutto quotidiana. Sono questi i contenuti che caratterizzano le foto e che catturano le molte facce del mondo della ricerca, raccontando, in qualche caso con grande forza e immediatezza, la complessità, gli spazi e le forme della tecnologia, ma anche la vita delle persone dentro il laboratorio. Il concorso, che dal 2010 si è svolto all'incirca ogni due anni, prevede due fasi: una selezione nazionale e quindi una internazionale, a cui partecipano per ogni paese le prime tre foto di ogni laboratorio, selezionate nella competizione locale. Laboratori in Cina, Stati Uniti, Canada, Gran Bretagna, Italia, Svizzera, Francia e Australia hanno aderito all'edizione del 2018 e le foto vincitrici del concorso internazionale, valutate da una giuria di esperti, saranno annunciate in autunno. Per la competizione italiana nel 2018 tutti e quattro i Laboratori Nazionali dell'Infn - Frascati, Gran Sasso, Legnaro e Sud - hanno aperto le loro porte ai fotografi e gli scatti sono stati valutati da una giuria mista, costituita da una scienziata, Pia Astone dell'Università La Sapienza, da un giornalista scientifico, Gianluca Dotti, collaboratore di Wired, e da un fotografo, Luca Locatelli, collaboratore del National Geographic Magazine e di molte testate internazionali.

“Fotografare il dietro le quinte della tecnologia e della scienza è una sfida difficile, ma appassionante”, ha commentato Luca Locatelli. “Rappresenta anche un modo di gettare uno sguardo sul futuro, di raccontare quelle comunità e quei luoghi, dove l'umanità sta producendo innovazioni sostenibili e approntando gli strumenti che cambieranno il mondo, così come è già avvenuto nel passato”.

“Per me la fotografia è divenuta un mestiere da poco meno di due anni”, ci racconta invece Gianluca Micheletti, primo classificato nella selezione italiana del Photowalk 2018 (vd. fig. b, ndr).

a.
Un fotografo in giro per i Laboratori di Frascati dell'Infn durante una delle edizioni del Photowalk.

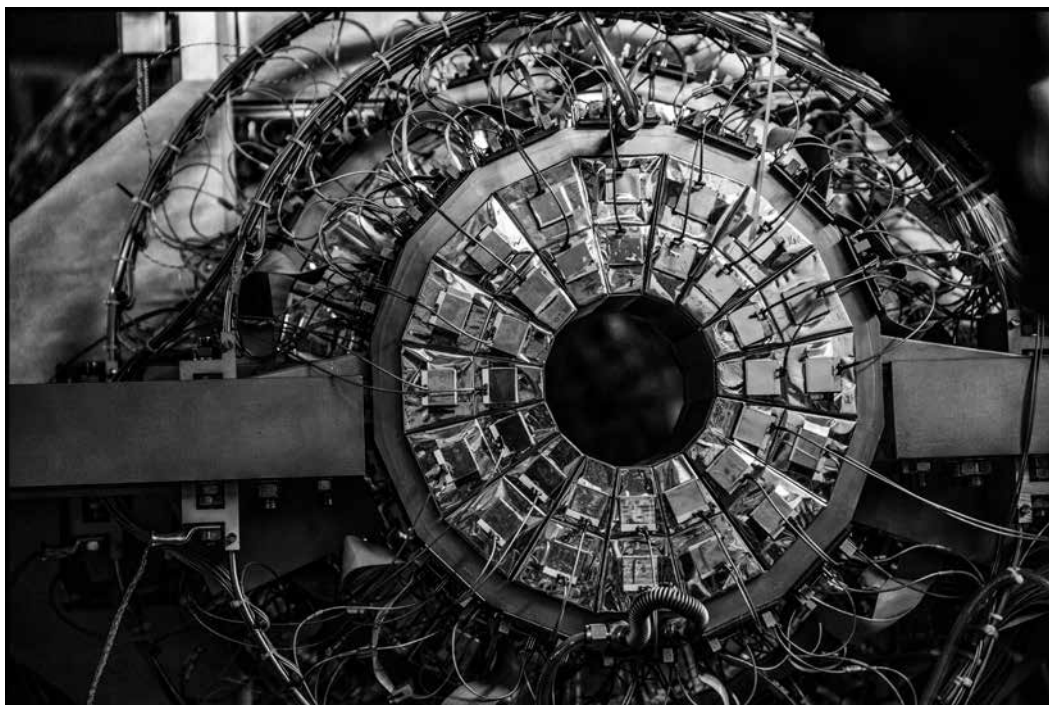


“Avere questo riconoscimento mi rende estremamente felice. Del mondo della scienza mi attrae profondamente la capacità di esplorare l'ignoto e, quindi, la curiosità visionaria di chi la conduce. È questo il *mood* invisibile, che cerco di fissare con i miei scatti”.



b.
Foto di Gianluca Micheletti che si è aggiudicata il primo posto della competizione italiana 2018, scattata ai Laboratori Nazionali del Gran Sasso. Una ricercatrice osserva l'esperimento Xenon1t, per la rivelazione della materia oscura. Il monitor trasmette le immagini del rivelatore interno all'esperimento.

c.
La foto classificatasi come seconda nella competizione italiana 2018, scattata nei Laboratori Nazionali del Sud da Enzo Motta. Un dettaglio del rivelatore Chimera per lo studio dei processi nucleari.



Per informazioni pratiche e iscrizioni alle prossime edizioni:
www.interactions.org/interactions-physics-photowalk

[as] traiettorie

Una vita tra i protoni.

di Eleonora Cossi

Marta Rovituso è una giovane ricercatrice del Trento Institute for Fundamental Physics and Applications (Tifpa), si occupa di protonterapia, radiobiologia e radioprotezione per lo spazio. È arrivata in questa cittadina circondata dalle Dolomiti partendo dalla Sicilia, dove è nata e dove si è laureata a Catania con una tesi svolta ai Laboratori Nazionali del Sud dell'Infn, passando per Darmstadt in Germania, dove ha conseguito il dottorato al prestigioso Gsi Helmholtz Centre for Heavy Ion Research. La sua tesi di dottorato, una ricerca sulla frammentazione nucleare degli ioni di elio in acqua per applicazioni nell'adroterapia, è stata premiata con

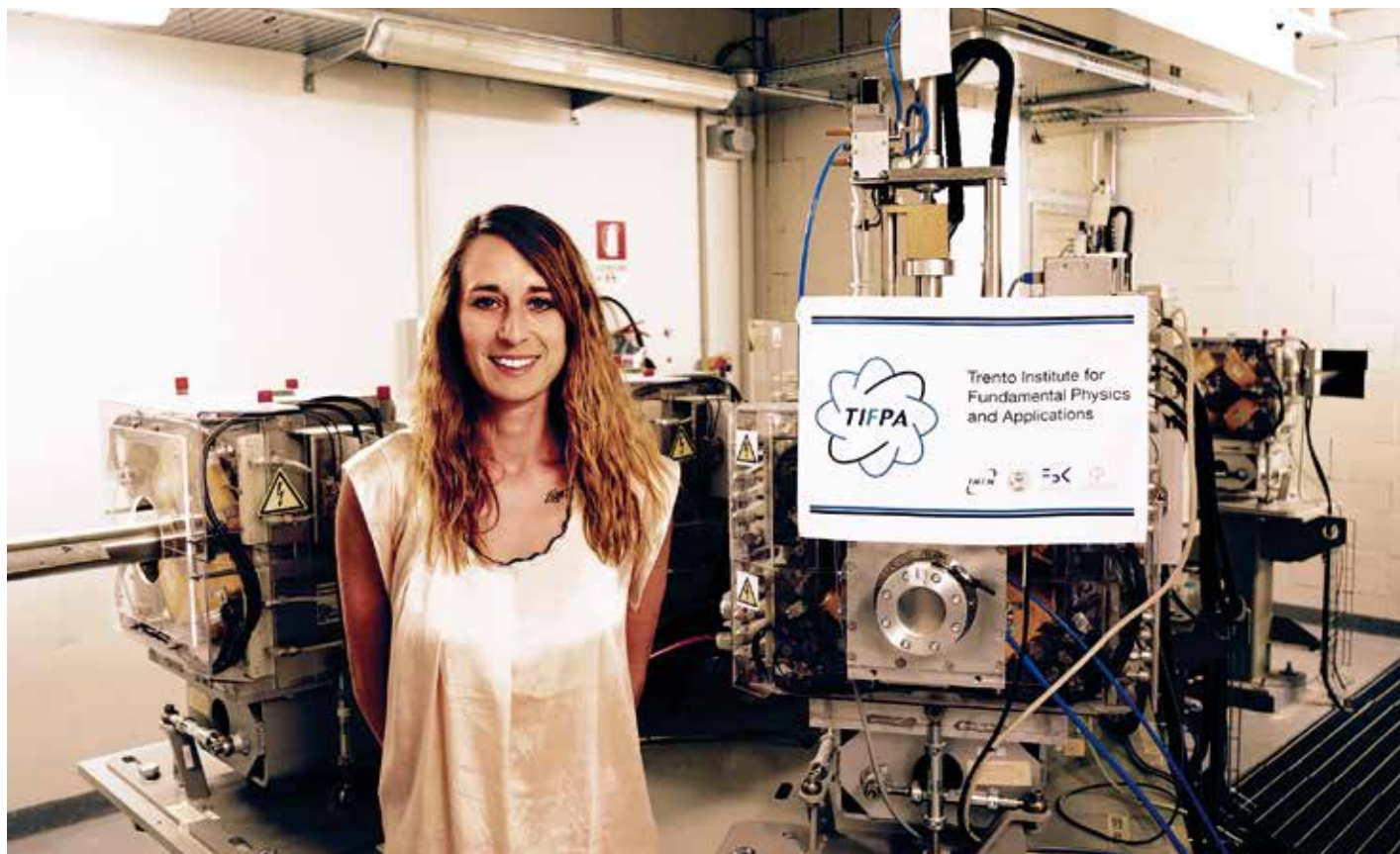
il premio Christoph Schmelzer 2016 e con il premio della Sif intitolato a Ettore Pancini. Lei ha scelto Trento, perché è un posto speciale. Qui infatti, nel 2013, è stato inaugurato il Tifpa, nato dalla sinergia e dalla collaborazione tra realtà di alto profilo già attive sul territorio, quali l'Infn, l'università di Trento, la Fondazione Fbk e l'agenzia per la salute della provincia di Trento, che unendo le forze hanno immaginato e poi concretizzato un centro di ricerca unico in Italia, che porta avanti ricerche di frontiera con un'alta connotazione tecnologica.

“Da sempre il mio motore è stata la passione per la fisica e sentivo il bisogno di lavorare più sulle applicazioni.

Ho presto capito che il mio obiettivo era specializzarmi come fisica nucleare che lavora nel campo delle applicazioni alla medicina in un contesto di ricerca e non di clinica. Così ho studiato per il mio dottorato al Gsi, dove c'era una unità di ricerca specializzata in fisica nucleare sperimentale per applicazioni nucleari”, ci racconta Marta.

[as]: Oggi lavori nella sala sperimentale del centro di protonterapia di Trento. Come si svolge il tuo lavoro?

[Marta]: Lavoro nella divisione di fisica medica e in particolare mi occupo di protonterapia e di radioprotezione nello spazio, svolgendo esperimenti nella





a.
La sala sperimentale gestita dal Tifpa all'interno del centro di protonterapia di Trento.

facility sperimentale seguita dal Tifpa all'interno del centro di protonterapia di Trento. Parte del mio lavoro è occuparmi della sala sperimentale, renderla sempre pronta a diversi tipi di esperimenti sia di radiobiologia che di fisica nucleare e fare da supporto agli utenti esterni che vengono a effettuare le campagne di misura. Il resto del tempo lo dedico a progetti di ricerca del nostro gruppo. Il supporto agli utenti esterni è sia di carattere pratico (disponibilità del fascio di protoni, supporto nella costruzione del *setup* sperimentale), che scientifico quando necessario. I turni di misura si svolgono sempre dopo le 19, una volta finiti i trattamenti dei pazienti. Il fascio di protoni si può utilizzare per diversi scopi: da esperimenti di danneggiamento elettronico a causa della radiazione, a misure di sezioni d'urto di processi nucleari, a misure di radiobiologia dove cellule di vario tipo vengono esposte alla radiazione.

[as]: Quali sono i progetti di ricerca di cui ti occupi?

[M]: Al momento mi occupo di trovare le proprietà del campo di radiazione, dopo che il fascio primario di protoni ha interagito con certi bersagli (*target*). Nell'ambito della protonterapia tale *target* è di solito l'acqua (che emula i tessuti umani), mentre per esperimenti di radioprotezione nello spazio si tratta di materiali di schermatura di vario tipo. I rivelatori che utilizzo per questi esperimenti mi permettono di identificare il tipo di particelle prodotte dalle interazioni nucleari e la loro energia cinetica. Una misura particolarmente interessante per fare caratterizzazioni di tipo fisico con un collegamento diretto alla biologia è la "microdosimetria". Lo strumento che utilizziamo è un rivelatore sferico con una parete in tessuto plastico, al cui interno è presente una miscela specifica di gas, la cui densità riproduce le dimensioni di una cellula di qualche micron. È uno strumento molto potente perché permette di capire

quale sia la dose depositata in volumi della dimensione della cellula e quindi quanto venga danneggiata la cellula. Questo tipo di rivelatore può essere utilizzato anche per caratterizzare materiali schermanti da utilizzare nelle navicelle spaziali per proteggere gli astronauti dalla radiazione cosmica. Nella nostra sala sperimentale possiamo studiare il "potere" attenuante di schermi sia conosciuti che innovativi, caratterizzandone anche il campo di radiazione prodotto.

[as]: Progetti per il futuro?

[M]: Il dottorato è stato una grande motivazione. Poi cresci un po' e le cose cambiano e tu cambi prospettiva. Cerchi un posto per avere un futuro, una casa, e invece la ricerca ti spinge sempre a cambiare. Sono fortunata, perché il gruppo di ricerca in cui lavoro è un po' come una famiglia e la sala sperimentale è un grande stimolo e uno strumento per venire a contatto con diversi gruppi italiani e stranieri che portano avanti diversi progetti. Inoltre l'ambiente in cui si colloca la sala è multidisciplinare, a contatto con fisici medici, ingegneri biomedici e i medici stessi, che ti danno sempre una prospettiva più ampia del lavoro di ricerca che svolgiamo. Mi sta interessando moltissimo lo spazio, studiare gli effetti della radiazione e trovare nuovi materiali per proteggere gli astronauti durante le loro lunghe missioni spaziali, ad esempio per andare su Marte. Lavorare a un progetto che apporti una grande innovazione in questo settore mi stimolerebbe molto, perché la radiazione cosmica rappresenta un serio problema per le missioni spaziali. Mi piacerebbe riuscire a sviluppare un rivelatore che permetta di fare tante misure insieme e dare quante più informazioni possibili in modo semplice, così da poterlo sfruttare sia nell'adroterapia sia nelle applicazioni spaziali, magari portandolo addirittura sulla stazione spaziale internazionale!

Interferometro fai da te.

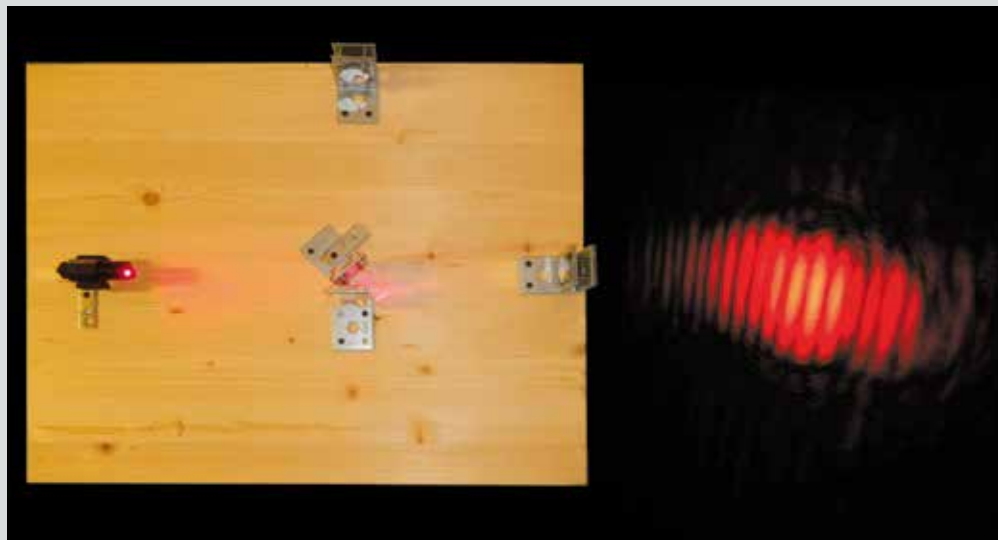
Le recenti osservazioni fatte da Ligo e Virgo hanno segnato l'inizio di una nuova era nella quale l'universo viene osservato anche attraverso le onde gravitazionali. Per rivelare i segnali gravitazionali si può misurare il tempo che la luce impiega ad attraversare lo spazio distorto dal passaggio dell'onda. Lo strumento usato è un interferometro ottico, uno strumento sensibile all'interferenza di due fasci luminosi, ottenuti inviando la luce prodotta da un laser di una determinata lunghezza d'onda su uno specchio separatore semiriflettente. I due fasci viaggiano successivamente lungo due bracci fra loro ortogonali fino a convergere sullo stesso punto di uno schermo, dove può essere osservata la loro interferenza: poiché il cammino dei due fasci luminosi non è mai identico, la fase relativa dei raggi che raggiungono lo schermo non è più la stessa e questo sfasamento produce il fenomeno dell'interferenza (vd. in Asimmetrie n. 12 approfondimento a p. 7, ndr).

In un rivelatore come Virgo, questa differenza di percorso può essere modulata nel tempo dal passaggio di un'onda gravitazionale che deforma lo spazio: osservando l'evoluzione temporale delle frange di interferenza si può ricostruire l'andamento dell'onda gravitazionale.

La differenza di fase che si osserva è proporzionale al prodotto tra la variazione relativa della lunghezza e la lunghezza stessa e inversamente proporzionale alla lunghezza d'onda della luce impiegata. La variazione relativa indotta dall'onda gravitazionale è di 10^{-21} (un millesimo di

un miliardesimo di un miliardesimo!). Per la riuscita della misura è necessario dunque costruire rivelatori con bracci molto lunghi (Virgo ha bracci di tre km) e utilizzare cavità risonanti Fabry-Perot, che permettono di ottenere una lunghezza ottica equivalente a circa 400 volte la lunghezza fisica dei bracci. La necessità di ridurre i rumori (acustico, sismico, termico, quantistico, solo per citarne alcuni) porta all'adozione di un disegno sperimentale estremamente complesso, alla frontiera di tutte le tecnologie impiegate. Tuttavia, con pochi oggetti di facile reperimento, buona volontà e manualità, anche tra i banchi di scuola è possibile costruire un piccolo interferometro per osservare la natura ondulatoria della luce. Il costo per la costruzione dell' "interferometro fai da te", proposto nel testo disponibile online (vd. <https://www.asimmetrie.it/interferometro-fai-da-te>), è di circa 100 euro, ma sarà compensato dalla soddisfazione di provare a curare il delicato allineamento degli specchi e dello schermo fino a ottenere le frange di interferenza, verificando poi che ogni minimo disturbo esterno (come premere leggermente sulla base della struttura o farla vibrare camminandoci intorno o addirittura soffiare su una delle componenti) farà muovere sensibilmente il sistema di frange visibile sullo schermo. Il risultato strabiliante è osservare un oggetto macroscopico apparentemente rigido che subisce deformazioni microscopiche tali da poter essere visualizzate dagli spostamenti delle frange sullo schermo.

[Pia Astone ed Ettore Majorana]



a.
L'interferometro fai da te (a sinistra) e un esempio di interferenza prodotta (a destra). L'interferometro ha bracci di lunghezza fissa, ma la struttura sulla quale si montano gli specchietti consente di muoverli su tre assi, quanto basta per produrre (o distruggere) la figura di interferenza.



Istituto Nazionale di Fisica Nucleare

**I laboratori dell'Istituto Nazionale
di Fisica Nucleare sono aperti alle visite.**

I laboratori organizzano, su richiesta
e previo appuntamento, visite gratuite
per scuole e vasto pubblico.

La visita, della durata di tre ore circa,
prevede un seminario introduttivo
sulle attività dell'Infn e del laboratorio
e una visita alle attività sperimentali.

Per contattare
i laboratori dell'Infn:

Laboratori Nazionali di Frascati (Lnf)

T + 39 06 94032423
/ 2552 / 2643 / 2942
sislnf@lnf.infn.it
www.lnf.infn.it

Laboratori Nazionali del Gran Sasso (Lngs)

T + 39 0862 4371
(chiedere dell'ufficio prenotazione visite)
visits@lngs.infn.it
www.lngs.infn.it

Laboratori Nazionali di Legnaro (Lnl)

T + 39 049 8068342 356
direttore_infn@lnl.infn.it
www.lnl.infn.it

Laboratori Nazionali del Sud (Lns)

T + 39 095 542296
sislns@lns.infn.it
www.lns.infn.it

www.infn.it



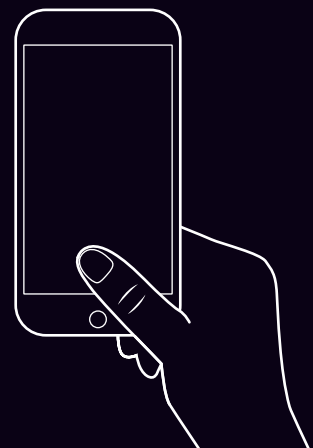
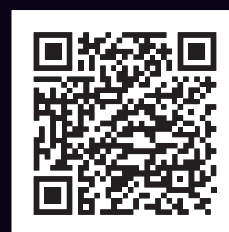
Sul sito **www.asimmetrie.it**
vengono pubblicate periodicamente
notizie di attualità scientifica.

Per **abbonarti gratuitamente** ad Asimmetrie
o per **modificare** il tuo abbonamento vai su:
<http://www.asimmetrie.it/index.php/abbonamento>

Si prega di tenere sempre aggiornato il proprio
indirizzo mail per ricevere le nostre comunicazioni.

Leggi anche le nostre **faq** su:
<http://www.asimmetrie.it/index.php/faq>

Asimmetrie è anche una app,
ricca di contenuti multimediali.





www.infn.it

rivista online
www.asimmetrie.it