

[next]

anno 11 numero **21** / 11.16

asimmetrie

rivista semestrale dell'Istituto
Nazionale di Fisica Nucleare



asimmetrie

Cari lettori di Asimmetrie,

Siamo sempre in bilico tra la soddisfazione delle scoperte fatte, che dovrebbero ripagare una carriera di duro lavoro, e lo stupore per le domande che questi momenti di gioia ci pongono immediatamente davanti - quasi a ricordarci che il passo che abbiamo fatto e che ci sembra enorme è poca cosa rispetto a quello che ci aspetta e per cui dovremo ricominciare a lottare da domani.

Cosa è il bosone di Higgs, la prima di queste grandi scoperte degli ultimi anni? L'ultima particella della vecchia fisica o la prima della nuova fisica? E sull'altro fronte, le onde predette da Einstein vengono da due coppie di buchi neri che nella loro danza fatale hanno prodotto un segnale che gli incredibili strumenti messi a punto in un ventennio di lavoro sono stati in grado di rivelare ma ... quei buchi neri non erano previsti da nessuna teoria e che addirittura orbitassero uno intorno all'altro era inimmaginabile! Apriamo una finestra e vediamo un mondo nuovo. Che meraviglia questa scienza che ci costringe a ripensare il futuro delle nostre ricerche, che ci offre delle opportunità straordinarie di esplorazione, ma ci ricorda duramente quanto dobbiamo umilmente accettare la nostra ignoranza.

È questo lo spirito di questo numero di Asimmetrie: bisogna sempre andare avanti e vedere cosa c'è "next"! Con l'entusiasmo di percorrere strade sconosciute e la sensazione, in fondo quasi gradevole, di non sapere dove portano. Fino alla prossima stazione, un'altra scoperta e altri percorsi su cui avviarsi. Ricordiamoci e non vergogniamoci di dire che il 95% dell'universo in cui viviamo non sappiamo di cosa sia fatto. Una affascinante sfida per giovani ambiziosi!

Buona lettura.

Fernando Ferroni
presidente Infn



asimmetrie

Rivista dell'Istituto Nazionale
di Fisica Nucleare

Semestrale, anno 11,
numero 21, novembre 2016

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

Davide Patitucci
Francesca Cuicchio
(infografica)

hanno collaborato

Gaia Bruzzo, Giovanni Carugno,
Giulia Catto, Gianluca Cavoto,
Giancarlo Cella, Valeria Ferrari,
Fernando Ferroni, Nicolao Fornengo,
Eligio Lisi, Gianpiero Mangano,
Cristiano Palomba, Giacomo Piaser,
Luca Pozzi, Maurizio Spurio

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 novembre 2016.
Tiratura 16.000 copie.

come abbonarsi

L'abbonamento è gratuito.
Tre modi per abbonarsi:

Compilare l'apposito form sul sito
www.asimmetrie.it

Inviare una mail di richiesta a
comunicazione@presid.infn.it

Contattare la redazione

sito internet

Asimmetrie 21 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 (Sze
Fei Wong) // foto p. 4 © Istockphoto.com
(Fanelie Rosier); foto a p. 5 © Ego/Virgo
Collaboration; foto b p. 6 © Cern; foto c p.
7 © Lnf-Infn; foto d p. 8 © YuraSuvorov-Lngs;
foto e p. 9 © Esa // foto a p. 10 © Ligo;
fig. b, c p. 11 © Asimmetrie-Infn; fig. c p.
12 © Einstein Telescope // foto a p. 13 ©
SXS, the Simulating eXtreme Spacetimes
(SXS) project (<http://www.black-holes.org>);
fig. b p. 14 © Asimmetrie-Infn; foto c p. 15 ©
Kim Fetrow/LIGO Laboratory // foto p. 16 ©
J.D.Bernuzzi // foto a p. 17 © Nasa; fig. b
p. 18 © Ligo/Asimmetrie-Infn; foto c p. 19 ©
Ligo; fig. d p. 20 © Asimmetrie-Infn // foto a p.
21 © Infn; foto b p. 22 © XENON1T Experiment
Collaboration; foto c b. 23 © Km3net // fig.
a p. 24 © ESA and the Planck Collaboration;
fig. b p. 25 © Asimmetrie-Infn; foto c p. 26 ©
Princeton Plasma Physics Laboratory; fig. d p.
27 © Asimmetrie-Infn // foto a p. 28 © Cern;
fig. b p. 29 © Asimmetrie-Infn; foto c p. 30
© Infn // foto a p. 31 © Cern; fig. b p. 32 ©
Asimmetrie-Infn; foto c p. 33 © LNF-INFN // foto
a p. 34 © ErrynNeckelThe Motley Fool; foto b
p. 35 © Lamestlamer/Wikipedia; foto c p. 36 ©
Cern // foto a p. 37 © XENON1T Experiment
Collaboration; foto b p. 38 © Carbosulcis;
fig. c p. 39 © Asimmetrie-Infn // foto a p. 40
© Argonne National Laboratory, Photograph
by Brown Brothers; foto b p. 41 © Massimo
Ferrario; figg. 1, c pp. 42-43 © Asimmetrie-Infn
// foto b p. 45 © Cosimo Filippini // foto a
p. 46 © Giovanni Organtini // foto a p. 47 ©
Aganta Kairos // mofn.org - Laurent Mulot with
the courtesy of Francoise Besson Gallery //
fig. p. 48 © Einstein@home.

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

as

21 / 11.16

[next]

Il seguito della storia di Fernando Ferroni	4	Un vento leggero di Giovanni Carugno	34
14 settembre 2015 di Cristiano Palomba	10	Occhio alle Wimp! di Gianluca Cavoto	37
L'onda perfetta di Valeria Ferrari	13	Elettroni in scia di Massimo Ferrario	40
[as] traiettorie Una passione per la relatività. di Catia Peduto	16	[as] con altri occhi Il Drago dalla testa di fisica. di Luca Pozzi	44
Non solo buchi neri di Giancarlo Cella	17	[as] selfie Un cervello stampato in 3D. di Gaia Bruzzo, Giulia Catto, Giacomo Piaser	46
Tutte le voci dell'universo di Maurizio Spurio	21	[as] spazi Inseguendo i neutrini. di Francesca Scianitti	47
Un secondo dopo di Gianpiero Mangano	24	[as] illuminazioni Scoperte in salotto.	48
Gerarchie nascoste di Eligio Lisi	28		
Lo zoo oscuro di Nicolao Fornengo	31		

Il seguito della storia

Uno sguardo sulle prossime sfide della fisica

di Fernando Ferroni

Un inizio di secolo più felice per la fisica non potevamo proprio chiederlo! In particolare per quella fisica che studia le interazioni fondamentali e cerca di trovare gli elementi unificanti dell'estremamente piccolo, governato dalle leggi della meccanica quantistica, e dell'infinito universo, dove domina la gravità descritta dalla relatività generale. Il 2012 ci ha regalato il bosone di Higgs, osservato nel potentissimo acceleratore Lhc al Cern, e il 2016 le onde gravitazionali, rivelate dagli interferometri Ligo (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory). Entrambe le scoperte sono state il frutto del lavoro di grandi collaborazioni internazionali (Atlas e Cms al Cern, Ligo-Virgo per le onde gravitazionali), nelle quali grande e importante è la presenza italiana attraverso l'Infn e tanti altri giovani ricercatori prestati a prestigiosi istituti di ricerca esteri.

Queste scoperte, che completano da un lato il modello standard delle particelle elementari e dall'altro la relatività generale, sono figlie del duro lavoro che attraversa diverse generazioni di fisici, di un impegno che ha portato a progressi tecnologici straordinari, ma soprattutto di una intelligenza collettiva che ha permesso negli ultimi cinquant'anni di seguire il cammino giusto.

La sete di scoperte, però, non si placa mai, la voglia di conoscere il seguito della storia è un motore potentissimo e, proprio esaminando queste due scoperte fondamentali, ci accorgiamo che esse pongono più domande di quante risposte ci abbiano dato. Il bosone di Higgs giustifica la massa di tutto quello che nell'universo possiamo osservare, dalle galassie lontane alla polvere interstellare, dai pianeti all'essere umano, ma lascia

senza spiegazione l'universo oscuro, quel 95% che non solo non vediamo ma che non abbiamo idea di cosa sia composto, a parte per avergli dato due nomi evocativi (ma nulla di più) come "materia oscura" ed "energia oscura". La prima onda gravitazionale, rivelata il 14 settembre 2015 da straordinari interferometri, capaci di mettere in evidenza un effetto che avvicina la Terra al Sole di una lunghezza pari alla dimensione di un atomo, ci ha lasciato stupefatti. Lo scenario è quello di due buchi neri che spiraleggiano uno intorno all'altro e alla fine si uniscono in un abbraccio fatale che scuote con la sua violenza il tessuto stesso dell'universo. E pochi mesi dopo, il 26 dicembre, ne è arrivata una seconda. Si è aperta così una finestra nuova sulle complesse meraviglie che ancora ci sfuggono e che sono nascoste nell'immensità del cosmo.

a.
Un momento della conferenza stampa dell'annuncio della scoperta delle onde gravitazionali a Virgo (Cascina, vicino Pisa). Da sinistra, Federico Ferrini (direttore del consorzio Ego), Fulvio Ricci (spokesperson della collaborazione Virgo), Albert Lazzarini (Ligo), Catherine-Nary Man (direttrice di Artemis, Cnrs) e Adalberto Giazotto (co-fondatore di Virgo).

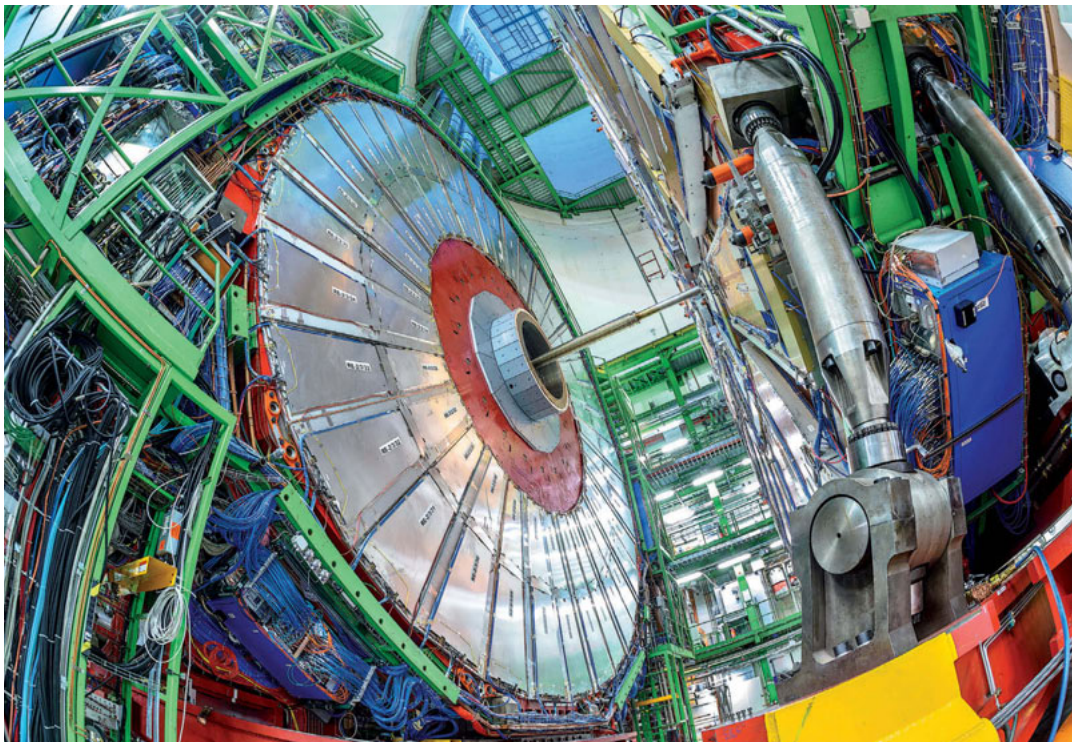


Abbiamo a disposizione strumenti di una perfezione mirabile e vogliamo utilizzarli a lungo e al meglio per ampliare le nostre capacità di scoperta, ma sappiamo già che non saranno sufficienti per darci le complesse risposte alle semplici domande che abbiamo di fronte agli occhi. Il bosone di Higgs dà massa a tutte le particelle con le quali interagisce, ma il valore di ciascuna di queste masse da cosa è determinato? Qual è la natura, che ancora ci sfugge, del super celebrato neutrino? L'universo è tanto meraviglioso da averci offerto persino la possibilità di esistere e di porci la domanda del perché, ma l'antimateria, che all'inizio era uguale in quantità alla materia, come mai è scomparsa? Che cosa è la materia oscura, che probabilmente è responsabile della formazione delle galassie? E l'energia oscura che determinerà l'evoluzione dell'universo, come si è comportata nel passato e come si comporterà nel futuro? Quanti oggetti misteriosi che non abbiamo ancora osservato ci sono nell'universo e cosa sono le sorgenti lontane che producono tutti quei messaggeri (fotoni, neutrini, particelle cariche, onde gravitazionali) che stiamo imparando a osservare attraverso i nostri laboratori in orbita, sugli altipiani, al suolo, sotto terra e persino nelle profondità marine? E infine, la domanda principe: come nasce l'universo

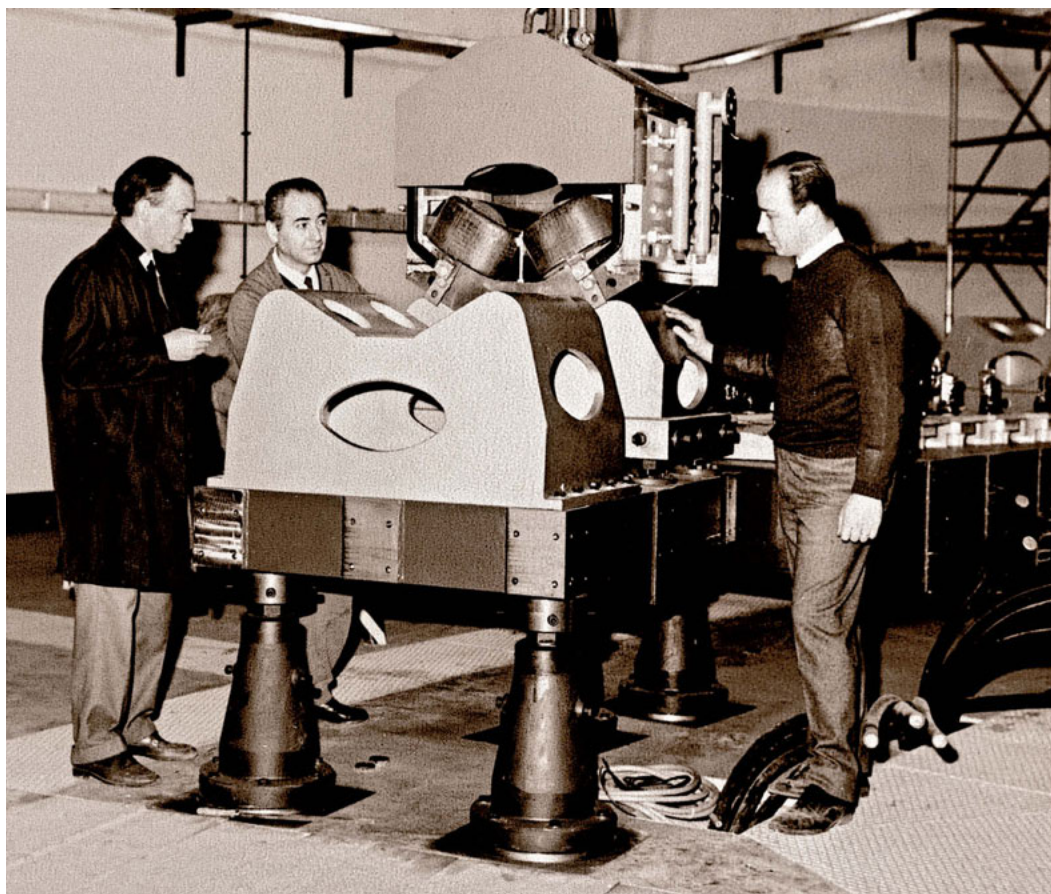
e cosa è l'inflazione, che ha creato le condizioni per rendere l'universo un luogo così bello e ospitale?

Come forse si è capito dal percorso che ci ha portato alle recenti scoperte, solo una visione scientifica di lungo periodo, accompagnata da progressi tecnologici necessari, può aiutarci a tentare di rispondere alle domande che la natura ci pone. Ed è questo il significato di "next": un cammino che dobbiamo iniziare oggi e che, seguendo miglioramenti di cammini già percorsi o intraprendendo strade totalmente nuove, speriamo ci porti al successo.

La grande macchina del Cern, Lhc, è stata un grande investimento finanziario e di risorse umane. Nell'aprile 2015 ha ripreso a funzionare con un'energia maggiore di quella che ha permesso la scoperta del bosone di Higgs. È fondamentale sfruttarla in tutte le sue potenzialità, vedere se ci offre la possibilità di guardare oltre il modello standard (vd. Asimmetrie n. 18, ndr), poi prevedere un suo ulteriore miglioramento da mettere in opera nei primi anni del prossimo decennio e, infine, capire se sia possibile, grazie a magneti superconduttori di nuova generazione, aumentarne ancora l'energia (vd. in Asimmetrie n. 18 p. 19, ndr). È un programma di venti anni di lavoro e ... poi?



b.
L'esperimento Cms del Cern, che insieme all'esperimento Atlas il 4 luglio 2012 ha annunciato la scoperta del bosone di Higgs.



c.
Il fisico austriaco Bruno Touschek (il primo da sinistra), uno dei pionieri delle ricerche sugli acceleratori di particelle, nell'officina "Magnet" dei Laboratori Infn di Frascati alla fine degli anni '50. Touschek propose e poi diresse la costruzione dell'Anello di Accumulazione (Ada), nel quale per la prima volta circolarono insieme, per poi collidere frontalmente, un fascio di elettroni e uno delle loro antiparticelle, i positroni.

Per attaccare la frontiera di energia al di là di quello che si può realizzare in un tunnel di 27 km equipaggiato da magneti con un campo elevatissimo, la via da seguire potrebbe non essere quella di scavare tunnel più lunghi, né quella di cercare di produrre magneti più potenti. Serve un cambio di paradigma, come tra l'altro ci insegna la storia degli acceleratori. Poco prima della sua morte, all'inizio degli anni '50 del secolo scorso, Enrico Fermi provocatoriamente disegnò un acceleratore che per raggiungere delle energie comparabili a quelle di Lhc avrebbe dovuto essere messo in orbita intorno all'equatore terrestre! Ma negli anni '60, poi, Bruno Touschek rivoluzionò il modo di far scontrare le particelle con l'anello di accumulazione Ada, nei Laboratori di Frascati dell'Infn: invece di treno contro muro, treno contro treno! Ada è diventato così il nonno dei moderni acceleratori come Lhc (vd. in *Asimmetrie* n. 6 p. 4, ndr). Oggi è arrivato il tempo di una nuova rivoluzione. L'accelerazione attraverso le onde di scia del plasma può imprimere spinte inimmaginabili

con le tecniche ora impiegate. Si possono far guadagnare miliardi di elettronvolt (GeV) di energia in pochi millimetri, laddove con tecniche convenzionali servono cavità acceleranti di vari km! Lunga è la strada e non è neanche diritta, ma la dobbiamo percorrere se vogliamo gli acceleratori del futuro (vd. p. 40, ndr).

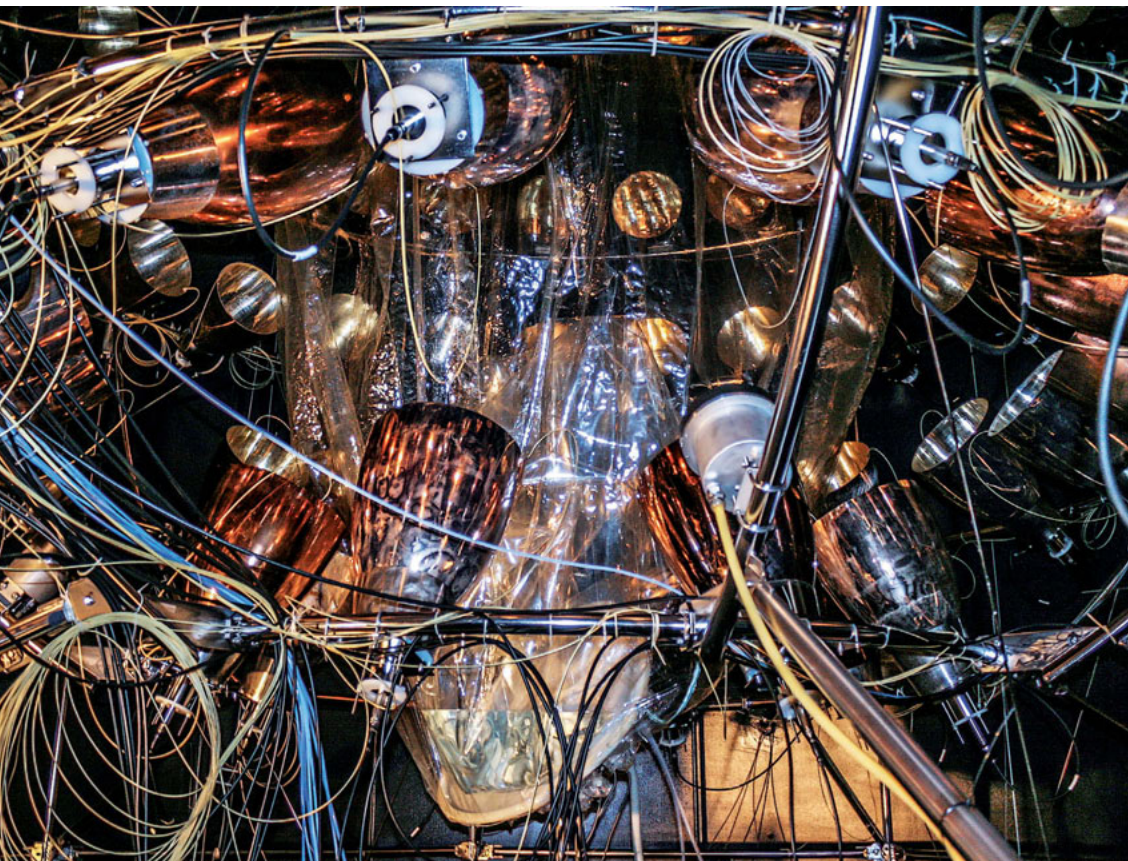
Nel mondo dei neutrini, poi, abbondano le domande che aspettano una risposta. Sappiamo che sono tre e che ciascuno di essi ha una massa minuscola ma non ne conosciamo l'ordinamento. Un gigantesco esperimento, che sfrutterà i neutrini prodotti da un insieme impressionante di reattori nucleari vicino a Hong Kong (di nome Juno, vd. p. 28, ndr), cercherà nei prossimi dieci anni di fare questa misura. Nel contempo, per capire se, come i quark, anche i neutrini violano la simmetria combinata di carica e parità (vd. in *Asimmetrie* n. 16 p. 33, ndr), un gigantesco rivelatore verrà posto nelle profondità di una miniera in South Dakota e illuminato da un fascio proveniente dal Fermilab di Chicago (l'esperimento Dune).

La sfida estrema, però, è quella che cerca di risolvere il dilemma di Dirac-Majorana (vd. in Asimmetrie n. 18 p. 34, ndr). Dietro la sua soluzione si cela la possibile violazione di una quantità invariata nella storia di questa scienza: il cosiddetto “numero leptonico”. Gli esperimenti di punta che cercano di osservare il decadimento doppio beta sono nei Laboratori del Gran Sasso e c'è un'intensa attività di ricerca e sviluppo per capire come aumentarne la sensibilità.

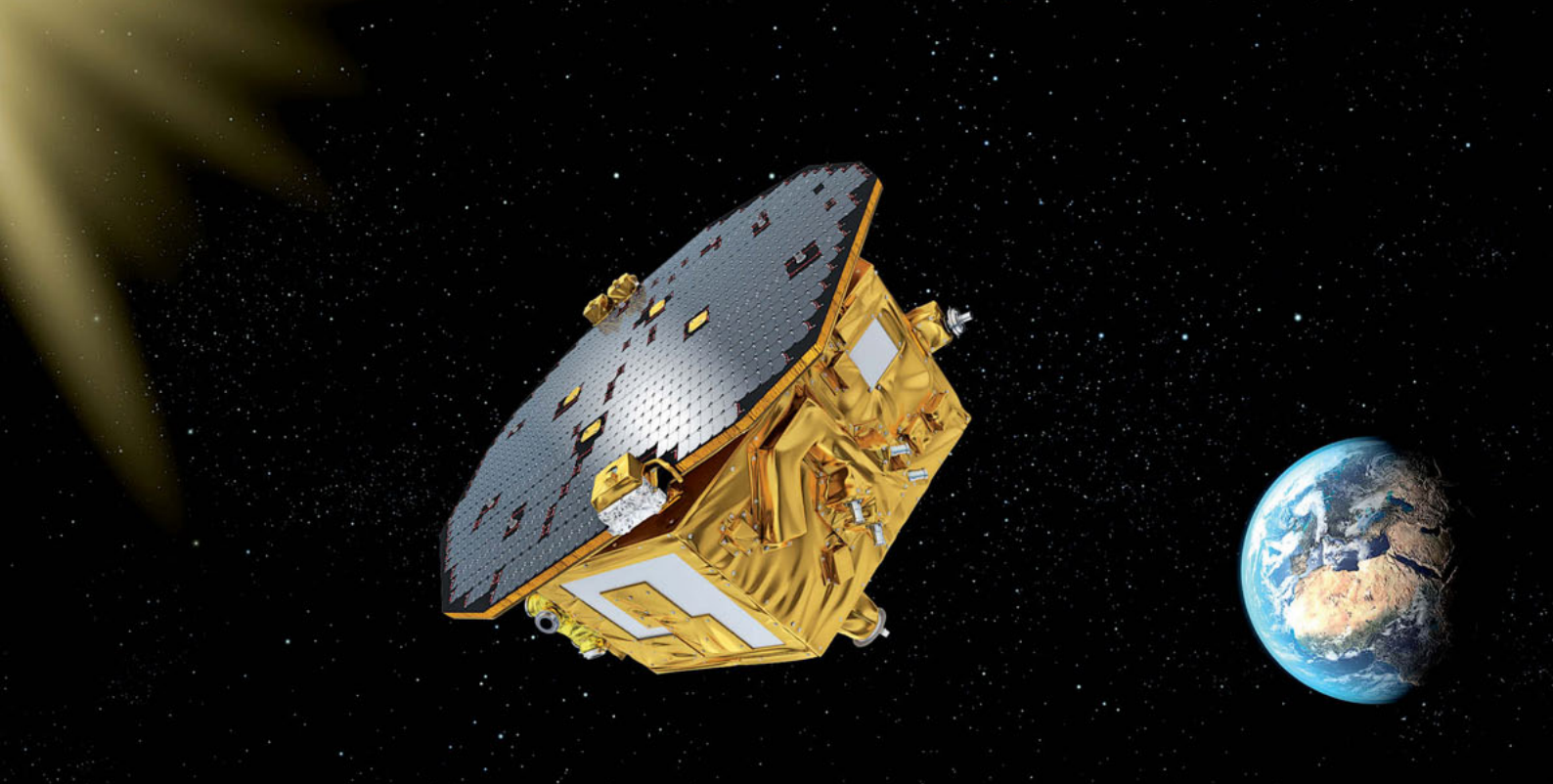
I neutrini sono portatori di un'altra potenziale informazione cruciale per capire l'evoluzione dell'universo. Mentre i fotoni della radiazione cosmica di fondo delle microonde (Cmb) ci danno una foto presa 380.000 anni dopo il Big Bang, i neutrini ci fornirebbero quella presa dopo un secondo (vd. anche p. 24, ndr)! Ma qui siamo veramente nel mondo dei sogni. Dovremmo sviluppare una quantità di tecnologia impressionante per arrivarci. Ma la difficoltà è il motore che ci motiva a superarla.

In un altro campo, la ricerca della materia oscura, le risposte che cerchiamo prevedono un assalto concentrico a qualcosa di molto elusivo. Dal cielo, attraverso i satelliti che, misurando la radiazione cosmica di fondo, ci danno una mappa possibile

della distribuzione di materia oscura che ha influenzato l'evoluzione delle galassie o dai satelliti che cercano gli eventuali prodotti di annichilazione di queste ipotetiche particelle; da Lhc, sperando che la temperatura ivi prodotta, quella che l'universo aveva frazioni di milionesimo di secondo dopo il Big Bang, sia sufficiente a produrre questi oggetti; e, infine, dal silenzio cosmico dei laboratori sotterranei come il Gran Sasso. Se queste particelle sono così restie a interagire con la materia ordinaria, le loro rare manifestazioni richiedono grandissimi rivelatori capaci di separare con assoluta certezza quello che cerchiamo dagli effetti della radioattività naturale. Un grande progetto per equipaggiare un rivelatore di 20 tonnellate (e poi forse di molte di più) è in fase di studio. Si chiama Dark Side e coinvolge processi tecnologici mai affrontati sulla scala richiesta dalla fisica delle alte energie, come l'estrazione di argon da miniere profonde e la distillazione in torri alte come la torre Eiffel a temperature criogeniche in pozzi di miniere nel Sulcis, per eliminare il fatale isotopo argon-39 (vd. p. 37, ndr). Produzione su larga scala di occhi elettronici basati sul silicio in collaborazione pubblico-privato ... materiali ultrapuri e poi vedremo!



d.
Un dettaglio dell'esperimento Dark Side nei Laboratori del Gran Sasso.



e.
Immagine artistica di Lisa
Pathfinder nello spazio.

Ma allo stesso tempo bisogna seguire vie alternative che ci permettano di andare oltre. Per esempio, nel caso venisse identificata una particella di materia oscura, capire la direzione da cui proveniva. Facile a dirsi, ma il cammino sarà lungo e tortuoso. Per fortuna i fisici sono ostinati e molto pazienti. Lo studio dell'inflazione primordiale richiede un insieme di strumenti su palloni sonda (come il Large Scale Polarization Explorer) che orbitino al buio intorno a un polo terrestre, telescopi terrestri (ad esempio il Q&U Bolometric Interferometer for Cosmology) e nel futuro un satellite più potente di Planck. Difatti, i fotoni della radiazione cosmica di fondo delle microonde, quelli che ci danno la foto dell'universo quando aveva 380.000 anni di età, durante l'inflazione hanno subito un processo di polarizzazione di cui conservano la memoria. Proprio studiando questa polarizzazione fossile, un effetto sottilissimo, potremmo capire forse che tipo di inflazione c'è stata. Qui più che "next" per l'Infn si può anche dire "else". Fino a ieri non lo facevamo, ora lo vogliamo fare, perché si tratta di questioni troppo importanti per essere evitate. E anche l'energia oscura è un nuovo campo di interesse dei ricercatori dell'ente.

E per finire, il futuro delle onde gravitazionali. Ora che le abbiamo scoperte, vogliamo vedere tante sorgenti e possibilmente diverse qualitativamente tra loro. Non solo buchi neri! Dovremo pensare a interferometri molto più sensibili a terra, per migliorare la sensibilità nella banda di frequenza dove essi già operano (sopra i 30 hertz), ma anche prevedere lo studio di fenomeni che siano molto più lenti. E per questo dovremo andare nello spazio, con interferometri che sfruttino

satelliti in caduta libera posti a milioni di chilometri di distanza. Lisa Pathfinder, un orgoglio molto italiano, sta aprendo la strada a questo futuro.

E poi ancora, se i neutrini in un esperimento di un qualche futuro ci offriranno la foto dell'universo all'età di un secondo e se potremo rivelare le onde gravitazionali emesse al tempo dell'inflazione, allora sì che penetreremo il mistero dell'inizio e dell'inflazione primordiale.

Insomma, il futuro della ricerca in questo campo è in una combinazione appropriata di "next" ed "else", guidata da una visione di lungo periodo e capace di sviluppare tecnologie adeguate alle necessità degli esperimenti. Poi, se ci fosse un nuovo Einstein che ci aiutasse a capire meglio cosa cercare, i tempi forse si accorcerebbero!

Biografia

Fernando Ferroni è presidente dell'Infn e direttore editoriale di Asimmetrie dal 2011. È professore alla Sapienza Università di Roma. Ha partecipato a molti esperimenti al Cern e allo Slac di Stanford. Attualmente partecipa all'esperimento Cuore dei Laboratori del Gran Sasso per la ricerca del decadimento doppio beta senza neutrini.

Link sul web

<http://www.dunesience.org/>

<https://www.lngs.infn.it/it>

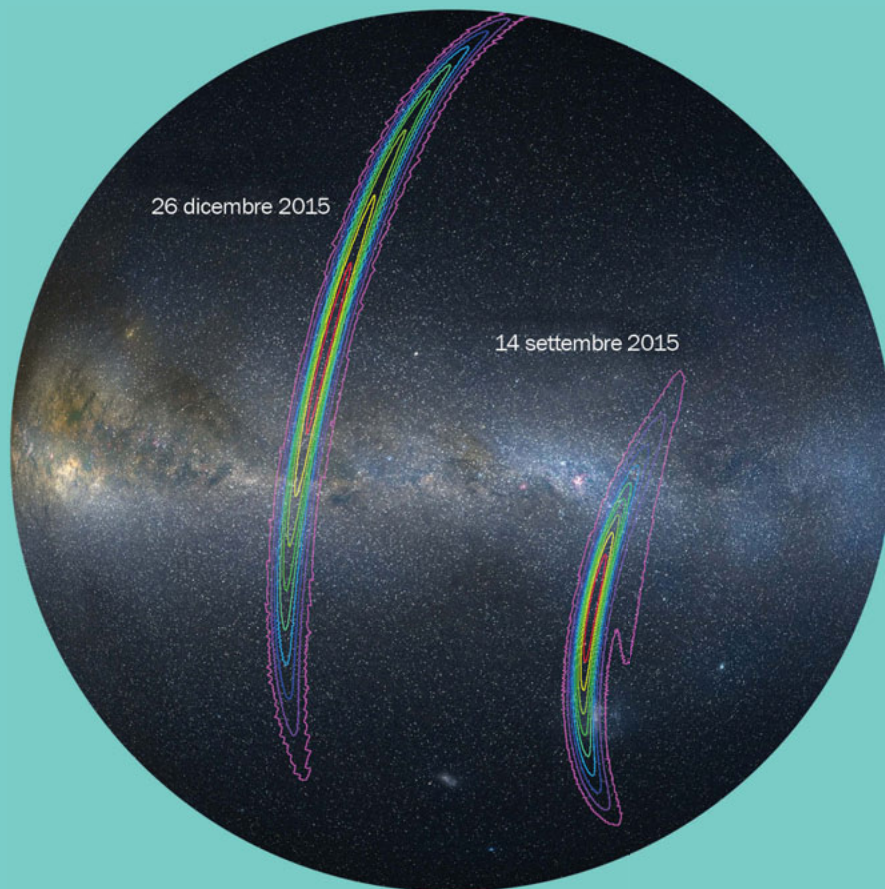
<http://sci.esa.int/lisa-pathfinder/>

14 settembre 2015

La nascita di una nuova astronomia

di Cristiano Palomba

a.
Direzione approssimativa di provenienza delle due onde gravitazionali rivelate, rispettivamente, il 14 settembre 2015 e il 26 dicembre 2015 dalla collaborazione Ligo-Virgo. Le varie linee colorate individuano l'area di provenienza con una probabilità che va dal 90% per la linea viola più esterna al 10% della linea rossa più interna. L'area delimitata dalla linea viola copre una vasta porzione di cielo, di circa 600 gradi quadrati per il primo evento e 850 gradi quadrati per il secondo, a causa del fatto che i segnali sono stati osservati da due soli rivelatori.



Il 14 settembre 2015, alle 9.50 e 45 secondi ora di Greenwich, un'onda gravitazionale generata dalla fusione di due buchi neri di 29 e 36 masse solari ha attraversato i due rivelatori Ligo (a Hanford, nello stato di Washington, e a Livingston, in Louisiana), dopo un viaggio durato oltre un miliardo di anni, depositandovi una minuscola quantità di energia. Tale piccolissimo segnale, denominato GW150914 ("gravitational wave" del 14-09-15), è stato rivelato dagli algoritmi di analisi che operano in tempo quasi-reale, sviluppati dalla collaborazione Ligo-Virgo, ed è stato poi confermato da successive analisi più accurate. L'esistenza delle onde gravitazionali, previste da Einstein esattamente un secolo fa, è stata così dimostrata in modo diretto e con una significatività statistica da non lasciare ombra di dubbio. Fine della storia? Neanche per sogno! In effetti questa prima rivelazione diretta, seguita da una seconda a pochi mesi di distanza, il giorno di Santo Stefano (prodotta in questo caso dalla fusione di due buchi neri di 7 e 14 masse solari), rappresenta un evento epocale per la fisica, soprattutto perché sancisce, dopo quasi mezzo

secolo di incredibili sforzi sperimentali, la nascita di una nuova branca: la cosiddetta "astronomia gravitazionale". Le onde gravitazionali costituiscono un mezzo di osservazione complementare alla radiazione elettromagnetica, che è alla base dell'astronomia tradizionale, ma anche ai neutrini e ai raggi cosmici. L'osservazione dell'universo attraverso le onde gravitazionali permetterà di studiare con un dettaglio senza precedenti fenomeni celesti che coinvolgono oggetti compatti, come stelle di neutroni e buchi neri e in futuro, forse, anche di "osservare" i primissimi istanti di vita dell'universo. Quali saranno allora i prossimi passi sperimentali che permetteranno di consolidare l'avvento dell'astronomia gravitazionale? Un primo aspetto fondamentale è l'espansione della rete di rivelatori. Nella prima metà del 2017 Virgo completerà l'upgrade e "Advanced Virgo" si aggiungerà ai due rivelatori Ligo. Avere una rete di almeno tre rivelatori è un requisito fondamentale per localizzare con ragionevole accuratezza la posizione della sorgente, in particolare nel caso di segnali gravitazionali "transienti", ovvero di breve durata.

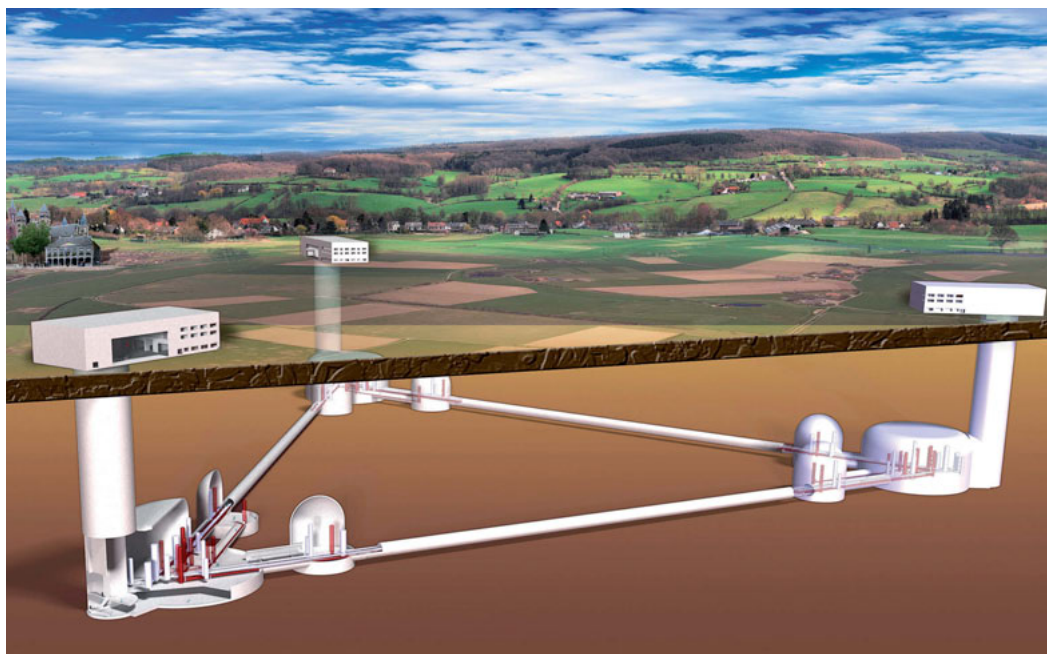
Conoscere la posizione delle sorgenti ne semplifica di molto il *follow-up*, che consiste nel cercare, tramite i telescopi, un'eventuale controparte elettromagnetica, prevista ad esempio nel caso della fusione di due stelle di neutroni o di un'esplosione di supernova (vd. p. 17, ndr). Operare con una rete di rivelatori porta dei benefici anche alla ricerca delle onde gravitazionali "continue" che, al contrario, hanno una durata lunga rispetto ai tipici tempi di osservazione. A questa categoria appartengono, ad esempio, i segnali emessi da stelle di neutroni in rapida rotazione su se stesse, come le pulsar, a causa di una qualche "asperità" sulla superficie. Una rete di rivelatori distribuita geograficamente è poi indispensabile per rivelare il "rumore di fondo" gravitazionale di origine cosmologica o astrofisica, poiché il segnale in un singolo rivelatore non sarebbe distinguibile dal rumore strumentale. In generale, una rete di rivelatori permette

di aumentare la cosiddetta "confidenza" in una rivelazione. Se un segnale, infatti, è osservato in più rivelatori con caratteristiche coerenti (la forma d'onda, l'ampiezza e così via), la probabilità che sia dovuto a una semplice fluttuazione del rumore strumentale si riduce enormemente.

La rete di rivelatori gravitazionali continuerà a espandersi nei prossimi anni. Nel 2018-2019 è prevista l'entrata in funzione dell'interferometro giapponese Kagra, costruito sottoterra, per ridurre l'impatto del rumore sismico, e con specchi raffreddati a 20 Kelvin per ridurre il rumore termico. Intorno al 2022 dovrebbe essere la volta di Indigo, una copia di Ligo, che verrà costruito in India. Il via libera del governo indiano al progetto Indigo è avvenuto il 17 febbraio 2016, sei giorni dopo l'annuncio della rivelazione di GW151014, e dopo un'attesa di oltre due anni. E che non si dica che le onde gravitazionali non hanno effetti pratici!

b.
Mappa con la posizione degli interferometri per rivelare onde gravitazionali già operativi, in costruzione e programmati.





c.
Una possibile rappresentazione artistica dell'interferometro di terza generazione Einstein Telescope. I tre tunnel percorsi dalla luce laser sono nel sottosuolo, per ridurre l'effetto del rumore sismico. Gli specchi sono raffreddati a temperature di pochi Kelvin, per abbattere il rumore termico.

In parallelo, periodi di presa dati si alterneranno a fasi di ulteriori upgrade, in cui nuove soluzioni tecniche verranno implementate per aumentare la sensibilità e la stabilità degli strumenti e, al contempo, nuove procedure di analisi dati verranno sviluppate per estrarre quanta più informazione possibile dai flebili segnali gravitazionali.

All'inizio del prossimo decennio avremo quindi una rete globale di antenne gravitazionali capaci, presumibilmente, di rivelare decine di segnali l'anno e di stimarne i parametri con grande accuratezza. Ma non ci accontentiamo! Per questo in Europa è già in fase di progettazione un rivelatore di terza generazione, l'Einstein Telescope (anche in questo caso con un notevole contributo dell'Infn), che potrebbe entrare in funzione intorno al 2030, con una sensibilità prevista circa dieci volte migliore rispetto a quella dei rivelatori attuali, e che permetterebbe di fare astronomia gravitazionale di precisione e studiare in dettaglio eventuali violazioni della gravità einsteiniana nelle condizioni di un campo gravitazionale "forte", come quello in prossimità di oggetti estremamente densi, come le stelle di neutroni o i buchi neri. Più o meno con lo stesso orizzonte temporale è poi previsto il lancio del rivelatore spaziale eLisa (2032-2034), un ambizioso progetto finanziato dall'Esa (l'agenzia spaziale europea), che mira a portare in orbita attorno alla Terra una costellazione di tre satelliti in configurazione triangolare, con lati lunghi un milione di chilometri (circa tre volte la distanza Terra-Luna), che costituiranno i vertici di due giganteschi interferometri. Questo strumento sarà sensibile in una banda di frequenze, tra circa 1 mHz e 100 mHz (quindi molto più basse di quelle dei rivelatori "terrestri") molto ricca di sorgenti di onde gravitazionali. Lisa Pathfinder, lanciato in orbita a fine 2015 e la cui missione durerà fino alla fine del 2016, è stato già in grado di dimostrare le tecnologie fondamentali che saranno usate in eLisa. Un altro promettente approccio alla

rivelazione delle onde gravitazionali è basato sullo studio delle correlazioni temporali tra i segnali radio emessi dalle pulsar. Questa metodologia, che vede coinvolti radiotelescopi europei, americani e australiani (consorziate nel cosiddetto "International Pulsar Timing Array"), potrebbe nei prossimi anni portare alla rivelazione dei segnali prodotti a frequenze comprese tra il nanohertz e il microhertz nella fusione di buchi neri supermassivi (di molti milioni di masse solari). In conclusione, siamo solo agli albori dell'astronomia gravitazionale, ma i presupposti perché il suo avvento rappresenti una vera e propria rivoluzione nello studio dell'universo ci sono tutti. Nei prossimi anni avremo strumenti sempre più sensibili e metodi di analisi dei dati sempre più raffinati, per "ascoltare" il bisbiglio con cui l'universo ci parla. E quindi, è proprio il caso di dirlo, "orecchie aperte"!

Biografia

Cristiano Palomba è ricercatore dell'Infn di Roma e fa parte della collaborazione Virgo. Si occupa principalmente di analisi dei dati per la ricerca dei segnali gravitazionali emessi da stelle di neutroni.

Link sul web

<http://www.virgo-gw.eu/>
<https://www.ligo.caltech.edu/>
<http://relativity.livingreviews.org/Articles/lrr-2016-1/>
<http://gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/>
<http://gw-indigo.org/tiki-index.php?page=LIGO-India>
<http://www.et-gw.eu/>
<https://www.elisascience.org/>
<http://www.ipta4gw.org/>

L'onda perfetta

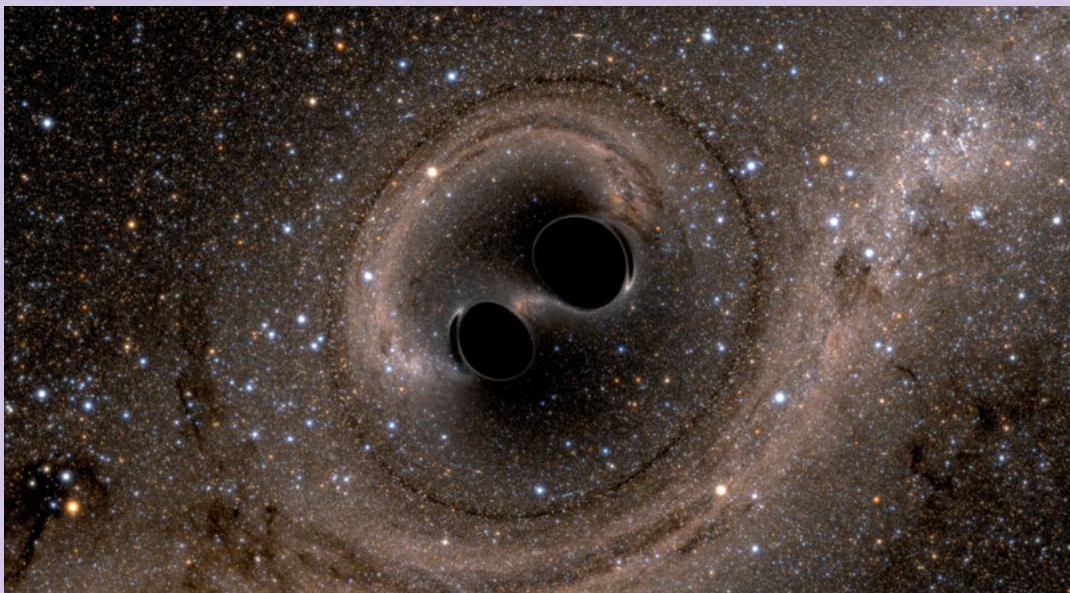
Le equazioni della relatività generale a confronto con i dati sperimentali

di Valeria Ferrari

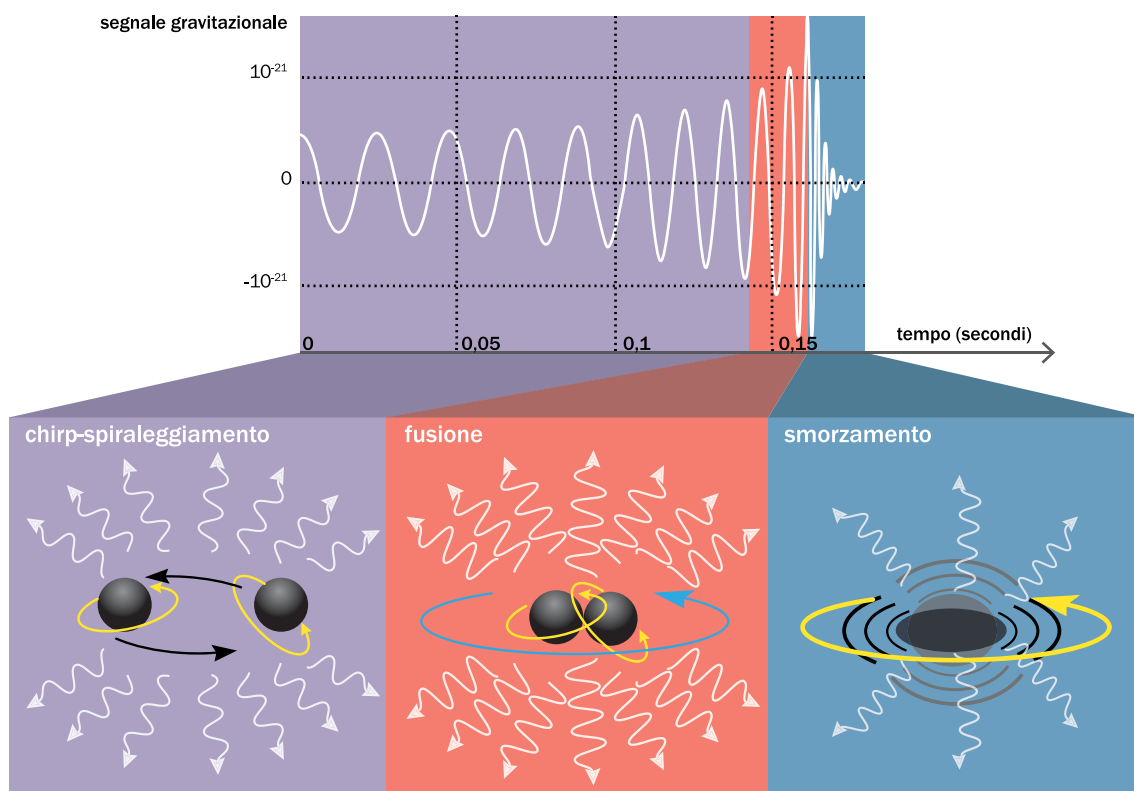
Due buchi neri, con massa pari a 29 e 36 volte la massa del Sole, man mano si sono avvicinati fino a fondersi formando un unico buco nero di 62 masse solari. Questo evento cosmico è avvenuto quasi un miliardo e mezzo di anni fa, quando sulla Terra facevano la comparsa le prime cellule in grado di utilizzare l'ossigeno. L'onda gravitazionale che ha emesso, della durata di circa un quinto di secondo, è il primo segnale gravitazionale rivelato dall'uomo. Per identificare questo evento, captato dalle antenne gravitazionali dell'esperimento americano Ligo nel settembre 2015, è stato necessario confrontare la forma del segnale con dei modelli che sono il risultato di decine di anni di studi teorici e numerici delle equazioni della relatività generale. La storia inizia nel 1963 con un articolo

di Philip C. Peters e John Mathews, pubblicato sulla rivista *Physical Review Letters*, in cui si calcola l'energia gravitazionale emessa da un sistema binario composto da due stelle, che per semplicità si assume siano due masse puntiformi, che si muovono a velocità molto minori di quella della luce. Dato che l'energia totale si conserva, la perdita di energia dovuta alle onde gravitazionali deve essere in qualche modo compensata. Il sistema binario possiede anche un'energia orbitale, che è quella che permette alle due masse di muoversi sull'orbita ellittica o circolare su cui si trovano, quindi l'unico modo per soddisfare la conservazione dell'energia è che l'energia irraggiata in onde venga compensata da una variazione uguale e contraria dell'energia orbitale. Questo implica che le due masse debbono

via via avvicinarsi, in un moto che è progressivamente sempre più veloce. In questa fase di spiraleggiamento, l'onda gravitazionale emessa ha una frequenza che istante per istante è uguale a $2/T$, dove T è il periodo orbitale, cioè il tempo che le masse ci mettono a percorrere l'intera orbita: siccome il raggio dell'orbita diventa progressivamente più piccolo, anche T diminuisce nel tempo e quindi la frequenza dell'onda gravitazionale cresce. Inoltre, siccome le due masse si avvicinano, l'energia emessa per unità di tempo aumenta, e quindi l'ampiezza dell'onda cresce. Si ha dunque un segnale che ha la forma caratteristica di una sinusoide di ampiezza e frequenza crescente nel tempo che, se riprodotta come onda acustica, viene chiamata *chirp* (cinguettio), perché assomiglia al canto di certi uccelli.



a.
Immagine di due buchi neri, mentre si stanno fondendo in unico buco nero. Un evento di questo tipo, avvenuto un miliardo e mezzo di anni fa, ha emesso le onde gravitazionali registrate il 14 settembre 2015 da Ligo.



Nella fig. b è mostrato un esempio di segnale gravitazionale emesso in un processo di “coalescenza” (il processo in cui due corpi si attraggono, spiraleggiando uno verso l’altro, fino a fondersi) di due buchi neri, simile al primo rivelato da Ligo. La parte del segnale emessa durante la fase di spiraleggiamento dei due corpi è visibile nella zona viola. Questa parte del segnale è simile sia che i due corpi siano buchi neri, sia che si tratti di stelle di neutroni. Queste ultime sono estremamente compatte, infatti hanno una massa comparabile con quella del Sole, ma un raggio di 10-15 km (mentre, per avere un confronto, il Sole ha un raggio di 700.000 km). Nel 1975 Russell A. Hulse e Joseph H. Taylor scoprirono un sistema binario, chiamato PSR1913+16, formato da due stelle di neutroni che si muovono su un’orbita ellittica con un periodo orbitale di circa 8 ore e compresero che, misurando con estrema accuratezza e per un tempo sufficientemente lungo il periodo, si sarebbe potuto verificare se esso diminuisce come predetto dalla relatività generale a causa dell’emissione di onde gravitazionali. Questa misura è stata

eseguita monitorando il sistema per decine di anni. Nel 1993 Hulse e Taylor ricevettero il premio Nobel per aver dimostrato grazie a questa osservazione, sebbene solo in maniera indiretta, l’esistenza delle onde gravitazionali.

Ma torniamo al primo segnale rivelato a settembre. Dall’ampiezza della parte di *chirp* del segnale si deduce il valore minimo della massa totale del sistema, che è di circa 70 masse solari. Inoltre, dal valore della frequenza del segnale si risale alla distanza tra i due corpi: all’inizio dell’osservazione si avevano 15 rivoluzioni al secondo, mentre al momento della fusione in un unico buco nero finale le rivoluzioni erano salite a 125 al secondo, le velocità orbitali erano metà della velocità della luce e la distanza tra i due corpi era di circa 350 km. Le stelle di neutroni hanno una massa massima pari a due masse solari, quindi non possono aver prodotto il segnale osservato. Per la teoria di Einstein, due corpi di massa totale maggiore o uguale a 70 masse solari che si trovino a una distanza così ravvicinata non possono che essere due buchi neri.

b.
Le tre fasi del processo di coalescenza tra buchi neri, descritte nel testo, e il corrispondente segnale emesso sotto forma di onda gravitazionale.



Quando i due corpi si avvicinano il campo gravitazionale nelle loro vicinanze diventa estremamente intenso ed entra nel regime detto di campo forte. Per descrivere il segnale emesso in questa fase non si possono più usare le approssimazioni utilizzate per calcolare il segnale di *chirp* (masse puntiformi, velocità piccole rispetto a quelle della luce ecc.) e bisogna integrare le equazioni di Einstein utilizzando computer potenti e veloci. Per ricavare la parte del segnale, visibile in fig. b nella zona rossa e che viene emessa quando i due corpi si fondono e formano un unico oggetto massiccio, ci sono voluti decine di anni di studi teorici e numerici, condotti a partire dagli anni '80 del secolo scorso. Oggi disponiamo di "banche di forme d'onda" sufficientemente accurate da poter essere confrontate con i dati sperimentali e, dal confronto del segnale osservato con queste forme d'onda, si sono potute stimare le masse dei due buchi neri, rispettivamente pari a 29 e 36 masse solari, e la massa del corpo finale, pari a 62 masse solari. Quest'ultima è inferiore alla somma delle masse iniziali, perché una parte della massa è stata trasformata in energia e irraggiata in onde gravitazionali.

Ma la storia non finisce qui, perché il corpo finale continua a oscillare e quindi a emettere onde gravitazionali finché lo spaziotempo non si "acquieta". È questa parte del segnale che ci dà le informazioni più interessanti sulla natura del corpo celeste che si forma alla fine della coalescenza. Infatti la teoria della relatività generale stabilisce che un buco nero oscilla emettendo onde gravitazionali a frequenze ben precise, che dipendono solo dalla sua massa e dal suo momento angolare (che è legato alla velocità di rotazione). Quest'ultimo si deduce dal confronto tra il segnale rivelato e i modelli numerici della parte del segnale emessa quando i due buchi neri si fondono (la zona rossa in fig. b). Avendo misurato la massa del corpo finale e il suo momento angolare, si può calcolare la frequenza del modo principale di oscillazione previsto dalla teoria e confrontarla con la frequenza dell'ultima parte del segnale mostrato in fig. b nella zona blu. I dati e la previsione teorica sono risultati essere in ottimo accordo e, così, è stato possibile stabilire che l'oggetto in questione era un buco nero di 62 masse solari.

Biografia

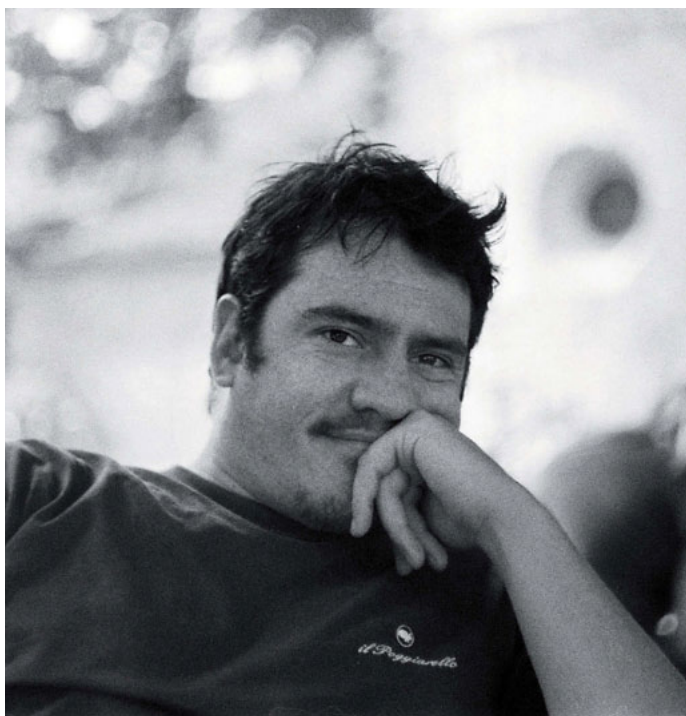
Valeria Ferrari è professore di fisica teorica presso l'Università di Roma Sapienza. Ha coordinato per vent'anni la collaborazione nazionale in ambito Infn Teongrav (TEoria ONde GRAVitazionali), dedicata allo studio di sorgenti di onde gravitazionali. È stata coordinatrice del Virgo-Ego Scientific Forum, che include più di cinquanta gruppi europei che studiano diversi aspetti della fisica delle onde gravitazionali.

c.
Una delle sale di controllo
dell'esperimento Ligo.

[as] traiettorie

Una passione per la relatività.

di Catia Peduto



Sebastiano Bernuzzi, oggi ricercatore all'Università di Parma, studia da anni le equazioni della relatività generale di Einstein. Recentemente ha vinto uno *starting grant* dello European Research Council (Erc) per lo studio e la modellizzazione di onde gravitazionali da sistemi binari di stelle di neutroni, usando metodi analitici e simulazioni in relatività numerica.

[as]: In che consiste il tuo lavoro?

Sebastiano [S]: Studio soluzioni delle equazioni di Einstein che descrivono la dinamica di sistemi binari di oggetti compatti, come buchi neri e stelle di neutroni (vd. p. 13, ndr). In pratica, faccio simulazioni in "relatività numerica", cioè risolvo le equazioni scritte da Einstein un secolo fa, ma usando metodi moderni di fisica computazionale e i più potenti calcolatori che esistono al mondo. Questo tipo di lavoro teorico è essenziale per capire che segnali ci dobbiamo aspettare. I modelli che facciamo del segnale vengono poi usati durante l'analisi dei dati sperimentali per dedurre le proprietà delle sorgenti. È un pezzo della lunga "catena" di competenze che coinvolge fisici sperimentali, teorici e astrofisici e che è necessaria per l'osservazione delle onde gravitazionali.

[as]: Sei sempre stato appassionato di relatività?

[S]: È sicuramente la teoria che più mi ha appassionato fin dall'inizio, sia per i concetti fisici che esprime sia per l'eleganza formale con cui questi concetti sono formulati. I risultati della collaborazione Ligo-Virgo a 100 anni esatti dalla formulazione della teoria sono straordinari. Durante l'annuncio ero emozionatissimo! È chiaro che siamo stati testimoni di

un fatto storico per la fisica. Inoltre, nel mio piccolo, il 2015 è stato un anno fantastico anche per me: dopo tanti anni di duro lavoro ho fatto dei passi avanti significativi con le mie ricerche, sul piano personale sono diventato papà per la seconda volta e per la prima volta in Italia.

[as]: Qual è stata la tua traiettoria lavorativa?

[S]: Dopo la laurea a Parma, durante il dottorato ho passato un po' di tempo a Parigi. Poi ho avuto la fortuna di poter lavorare diversi anni all'Università di Jena, dove c'è uno dei migliori gruppi di relatività numerica. Dopo la Germania ho passato un anno stupendo al Caltech, in California, nel gruppo di astrofisica teorica e relativistica. Lì sei totalmente immerso nella ricerca e per imparare nuove cose basta bussare a una porta o anche solo andare a prendere un caffè. Poi sono rientrato in Italia con il programma "Rita Levi Montalcini", accettando una nuova sfida. Il mio futuro è stato incerto per molto tempo, ma ora, con la riapertura delle abilitazioni scientifiche nazionali, la situazione sembra essersi sbloccata, anche se molti ricercatori rientrati rimangono in uno stato di incertezza.

[as]: Ma quindi sei un "cervello rientrato"!

[S]: Così ci definiscono... un termine terribile. In realtà, io credo che andare a lavorare in un ambiente internazionale sia una tappa necessaria per ogni giovane che vuole fare ricerca. Non importa in che luogo geografico vai, ma le possibilità che l'istituto ti mette a disposizione, i colleghi che trovi, i seminari e i visitatori... Per me "andare" è stata un'esperienza fondamentale, sia professionalmente che culturalmente.

Non solo buchi neri

Le sorgenti di onde gravitazionali

di Giancarlo Cella

Dopo che lo scorso 14 settembre i due rivelatori di Ligo hanno posto fine all'attesa, iniziata 60 anni fa con i tentativi di Joseph Weber (vd. in *Asimmetrie* n. 5 p. 23, ndr), di una prima rivelazione diretta di onde gravitazionali, viene spontaneo chiedersi cosa sarà possibile scoprire ancora e cosa potremo imparare di nuovo.

Si è sempre ritenuto probabile che le onde gravitazionali prodotte da una coalescenza tra due oggetti stellari compatti sarebbero state tra le prime a essere rivelate. La preferenza andava però a "partner" di tipo diverso: due stelle di neutroni oppure una stella di neutroni e un buco nero, e non a due buchi neri. Entrambe le possibilità restano candidati promettenti per future rivelazioni, ciascuna con le proprie peculiarità.

Una regola generale è che la frequenza tipica del segnale immediatamente prima della fusione è tanto più bassa quanto più grandi sono le masse dei due corpi presenti inizialmente. Per due buchi neri, la fusione vera e propria avviene quando la frequenza del segnale è ancora abbastanza bassa da poter essere colta da un interferometro, che offre buone sensibilità da un minimo di qualche decina a un massimo di qualche migliaio di oscillazioni al secondo. Questo significa che la fase di collisione, durante la quale le interazioni gravitazionali sono particolarmente forti, può essere studiata in dettaglio. In queste condizioni, in cui i campi gravitazionali sono intensissimi, fino a ora non era stato possibile verificare le predizioni della relatività generale, se non indirettamente (vd. p. 13, ndr). Buchi neri di massa maggiore di quelli osservati non darebbero un segnale rivelabile, a meno di non trovare il modo di allargare verso le basse frequenze l'attuale finestra di sensibilità.

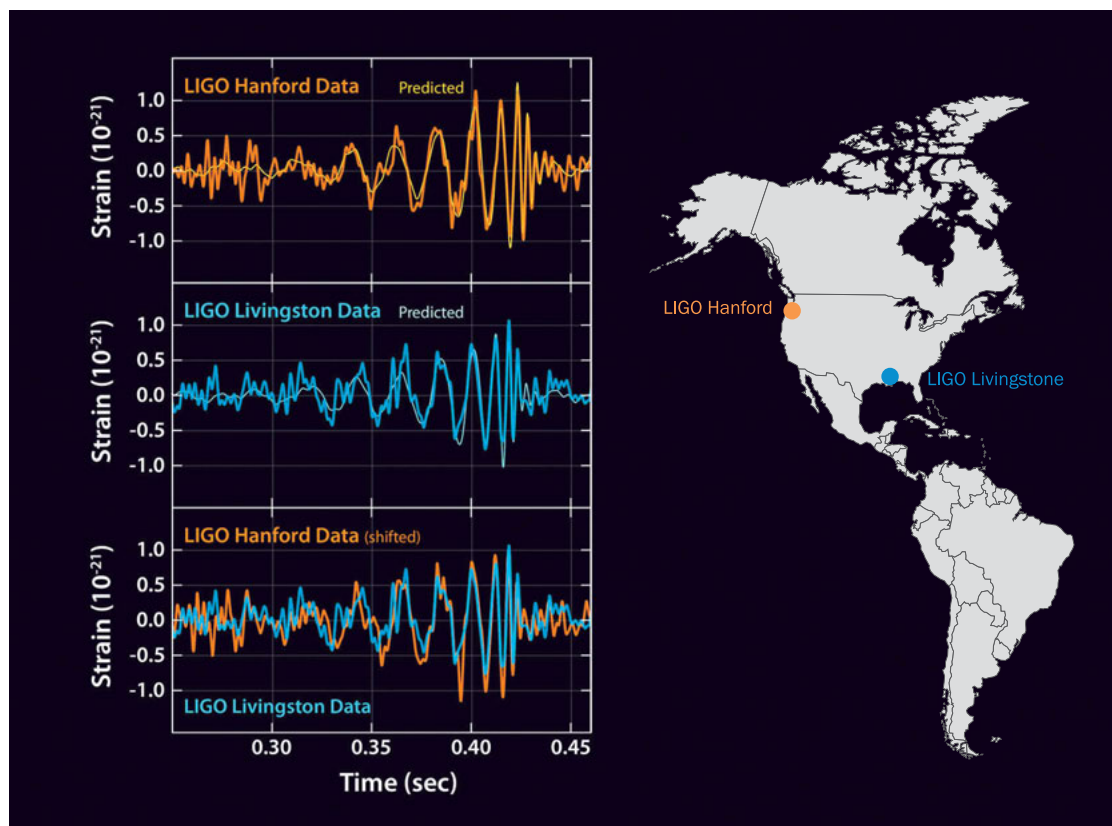
Anche per una coppia costituita da un buco nero e da una stella di neutroni la frequenza del segnale nella fase finale si trova

all'interno della regione di sensibilità degli attuali rivelatori Ligo e Virgo. In prossimità di un buco nero le forze di marea sono talmente intense da distruggere la vicina stella di neutroni. Questo processo potrebbe fornire informazioni importantissime sulle caratteristiche della materia estremamente densa che compone quest'ultima.

Per una coppia di stelle di neutroni valgono considerazioni simili: il segnale in questo caso percorrerebbe in frequenza tutta la banda di sensibilità, rimanendovi per un tempo dell'ordine dei minuti.

a.
Immagine ai raggi X (in giallo) e all'infrarosso (blu e rosso) del gas circostante la pulsar PSR B1509-58, una stella di neutroni rotante che potrebbe emettere onde gravitazionali.





Salvo che nel caso di due buchi neri, per il quale non ci si attende un segnale diverso da quello gravitazionale, alla coalescenza potrebbe essere associata la produzione di un “lampo” di raggi gamma, ossia di fotoni di altissima energia (i cosiddetti “*gamma ray burst*”). Una rivelazione simultanea dimostrerebbe in modo inequivocabile l’associazione tra i due fenomeni. Per questa ragione è importante determinare con la maggior precisione possibile la posizione nello spazio dell’evento di coalescenza: servono almeno tre differenti rivelatori, che permettono la triangolazione della sorgente utilizzando i ritardi dell’arrivo dell’onda. Ad esempio, i segnali rilevati dai due interferometri di Ligo riportati in figura sono stati allineati eliminando il ritardo di 7 millesimi di secondo presente originariamente, cioè il tempo necessario al segnale gravitazionale per percorrere la separazione tra i due rivelatori. Entro quest’anno anche Advanced Virgo comincerà a prendere dati, e questa procedura diverrà possibile. Con tre rivelatori potremo anche studiare dettagliatamente la polarizzazione

dell’onda, caratteristica che può contenere informazioni su eventuali violazioni della relatività generale.

L’energia totale emessa alle varie frequenze in una coalescenza si può calcolare teoricamente in modo molto accurato ed è quindi possibile stimare, per una data sensibilità del rivelatore, fino a quale distanza massima è possibile rivelare una coalescenza. Il numero di eventi rivelabili per unità di tempo è proporzionale al volume esplorabile. Alle sensibilità attuali la distanza massima per una coppia di stelle di neutroni è dell’ordine di 80 megaparsec (260 milioni di anni luce), e potrebbe triplicarsi nel giro di 6-8 anni. In corrispondenza, il numero degli eventi rilevabili per unità di tempo potrebbe crescere di un fattore trenta. Gli eventi del 14 settembre e del 26 dicembre scorsi, dovuti entrambi a due buchi neri, sono avvenuti entrambi a 1,4 miliardi di anni luce da noi. A queste distanze diviene possibile misurare eventuali effetti legati a una velocità delle onde gravitazionali diversa da quella della luce, studiando la “deformazione” del segnale gravitazionale durante la propagazione dalla sorgente fino a noi.

b.

Il segnale dell’onda gravitazionale GW150914 raccolto dai due interferometri di Ligo, quello di Hanford e quello di Livingston (primi due pannelli), e il segnale sovrapposto dopo aver tenuto conto del tempo di ritardo di circa 7 millisecondi dovuto alla distanza tra i due (pannello inferiore).

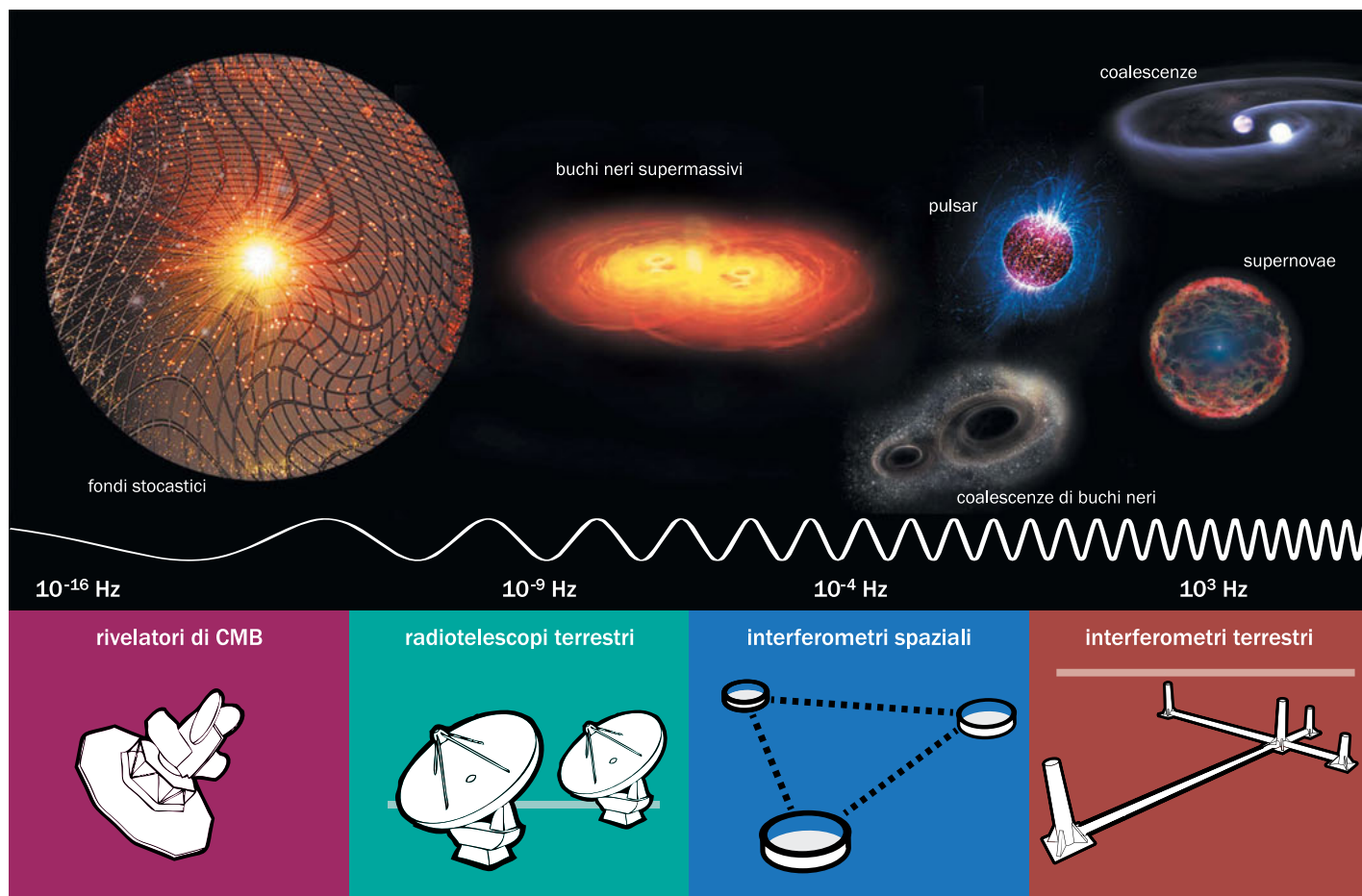
Il catalogo delle possibili sorgenti di onde gravitazionali è però tutt'altro che esaurito dalle coalescenze. Una categoria interessante è quella delle cosiddette "sorgenti continue". Si tratta di stelle di neutroni rotanti, visibili anche come pulsar nel caso emettano onde elettromagnetiche (vd. fig. a, ndr). L'emissione di onde gravitazionali avviene in presenza di una minima deformazione della stella, che può essere presente per varie ragioni ma che è difficile da prevedere quantitativamente con sicurezza. Il segnale emesso ha delle frequenze caratteristiche, tipicamente pari alla frequenza di rotazione e al suo doppio, e ha la proprietà di essere sempre presente. Osservando il sistema per un tempo sufficiente è possibile rivelare ampiezze di emissione anche molto piccole. In alcuni casi la sorgente è nota, e la sua posizione e frequenza conosciute con grande precisione. Vengono però definite delle strategie di ricerca che potrebbero permettere di localizzare anche sorgenti ignote, non visibili in altro modo. Brevi impulsi di radiazione gravitazionale, con durate dell'ordine dei millesimi di secondo, possono essere prodotti durante l'esplosione di una supernova nel caso in cui questa non abbia simmetria sferica. Infine, potenzialmente di grande interesse è la rivelazione di un "fondo stocastico" di onde gravitazionali, ossia onde che non provengono da una posizione precisa, ma sono la sovrapposizione casuale delle emissioni di un numero molto grande di sorgenti. Queste possono essere di natura astrofisica o essere associate a fenomeni accaduti nelle fasi iniziali dell'evoluzione dell'universo. Non esiste in questo caso un

segnale di una forma ben definita: quello che si vede è piuttosto paragonabile a un "rumore", ossia un segnale senza una struttura precisa, distribuito su tutte le frequenze. Per rivelarlo è necessario utilizzare più di un interferometro e verificare la presenza di una correlazione tra i "rumori gravitazionali" misurati da ciascuno. Determinando quanto "rumore gravitazionale" sia presente alle varie frequenze è possibile estrarre informazioni sulla fisica delle interazioni fondamentali (nel caso dei fondi cosmologici) o sulla evoluzione delle popolazioni stellari (nel caso dei fondi astrofisici). Questo permetterà di porre dei vincoli sugli attuali modelli.

La ragione per la quale le onde gravitazionali sono una sorgente insostituibile di informazioni sull'infanzia dell'universo è la stessa che le ha rese sino al settembre scorso così sfuggenti. Esse infatti interagiscono in modo estremamente debole con la materia. Questo implica che l'universo è stato praticamente da sempre "trasparente" al loro passaggio, mentre ha cominciato a esserlo per la radiazione elettromagnetica solo più tardi (380.000 anni circa dopo il Big Bang). Così, mentre con le onde elettromagnetiche possiamo al massimo risalire fino a 380.000 anni dopo il Big Bang, perché prima di allora l'universo era "opaco", con le onde gravitazionali possiamo spingerci a epoche ben precedenti, praticamente fino ai primissimi istanti dopo il Big Bang. Si sa però che la rivelazione di alcuni dei fondi stocastici richiederebbe una sensibilità molto lontana da quelle attualmente raggiungibili, mentre in altri casi le prospettive sono più promettenti.

c.
Vista aerea dell'interferometro
di Ligo a Livingston (Louisiana).





I rivelatori interferometrici terrestri hanno una sensibilità che è limitata a basse frequenze dal rumore dovuto alle vibrazioni sismiche che possono simulare direttamente o indirettamente l'effetto di un'onda gravitazionale. Sarà possibile in futuro abbassare questo limite di un ordine di grandezza, ma sembra arduo riuscire a procedere oltre.

Onde gravitazionali a frequenze più basse possono contenere informazioni sulla coalescenza di due buchi neri "supermassivi" (di milioni o miliardi di masse solari) o della coppia formata da un buco nero supermassivo e da uno più "usuale" e su fondi stocastici di origine cosmologica. Futuri rivelatori spaziali, ad esempio eLisa, potranno esplorare le frequenze tra un decimillesimo e un decimo di hertz. A frequenze ancora più basse già adesso è possibile studiare gli impulsi elettromagnetici prodotti dalle pulsar conosciute: emessi a intervalli estremamente regolari, possono essere ritardati da eventuali onde gravitazionali incontrate lungo il cammino fino a noi. Scendendo ancora, si possono cercare le tracce di onde di frequenza enormemente bassa (meno di un millesimo di miliardesimo di hertz) nella polarizzazione da queste indotta nella radiazione cosmica di fondo. Anche questo tipo di misure sarebbero estremamente importanti per comprendere le primissime fasi dell'evoluzione dell'universo.

d. Diversi sistemi fisici (in alto) possono emettere onde gravitazionali su varie frequenze, per la cui rivelazione sono necessari diversi tipi di strumenti (in basso).

Biografia

Giancarlo Cella è ricercatore della sezione di Pisa dell'Infn. Si è laureato e ha svolto il dottorato su aspetti perturbativi e non perturbativi della Qcd. Da diversi anni si occupa di onde gravitazionali, in particolare di analisi dati, fenomenologia e miglioramento della sensibilità dei rivelatori. Attualmente coordina il gruppo di Pisa dell'esperimento Virgo.

Link sul web

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

<https://www.ligo.caltech.edu/page/learn-more>

<https://www.ligo.caltech.edu/page/educational-resources>

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

Tutte le voci dell'universo

Strategie multimessenger per esplorare il cosmo

di Maurizio Spurio

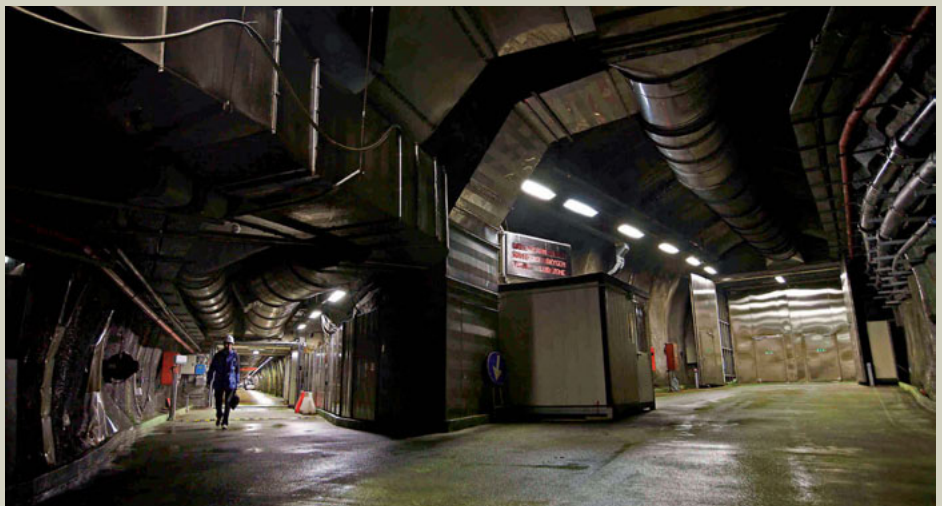
Il '900 ha visto evolversi una sempre più acuta diversificazione tra fisici delle particelle, astrofisici e cosmologi. Questo ha portato alla formazione di comunità scientifiche specializzate, alla nascita di “modelli standard” indipendenti per il microcosmo e il macrocosmo (il modello standard delle particelle e quello cosmologico, vd. in *Asimmetrie* n. 15 p. 4, ndr), basati ciascuno su tecniche sperimentali specifiche. Lo sviluppo di strumenti per la rivelazione della radiazione elettromagnetica è stato alla base delle osservazioni astronomiche, mentre la tecnologia per i rivelatori di particelle, per lungo tempo, è rimasta ancorata ai laboratori di alta energia e agli esperimenti con gli acceleratori. La situazione è iniziata a cambiare negli ultimi decenni, con la nascita di laboratori ed esperimenti sotterranei, con la possibilità di misurare efficacemente sul suolo sciami estesi di particelle, con la capacità di inviare nello spazio rivelatori di particelle leggeri, compatti ed efficienti e, infine, con la straordinaria qualità degli interferometri, finalmente capaci di rivelare le onde gravitazionali. La disponibilità di questi nuovi rivelatori, che permettono l'osservazione dei raggi cosmici carichi (protoni e nuclei) e neutri (raggi gamma, neutrini) e delle onde gravitazionali, unita a quella dei telescopi e rivelatori (ottici, radio, UV, microonde) tradizionalmente usati in astronomia, permetterà di aprire nei prossimi decenni nuovi scenari nella conoscenza del micro e del macrocosmo.

La strada comune, recentemente imboccata dalla comunità dei fisici astroparticellari e degli astronomi, è detta “astronomia *multipessenger*” e consiste nello studio del macrocosmo anche con le tecniche sperimentali del microcosmo. La potenza di questo approccio è quella di poter validare i

modelli astrofisici proposti in modo completo, permettendo di escludere, o riformulare, i modelli che concordano con una parte delle osservazioni ma non con i dati raccolti dagli altri strumenti. Con una similitudine che richiama i nostri cinque sensi, potremmo approssimare l'approccio dell'astronomia tradizionale con l'uso dei soli occhi. I raggi cosmici, i raggi gamma, le onde gravitazionali e i neutrini rappresenterebbero allora gli altri sensi. E come tutti sanno, una buona pizza, ad esempio, non si giudica solo con gli occhi! Storicamente, le prime osservazioni *multipessenger* hanno avuto luogo nei laboratori sotterranei (come i Laboratori Infn del Gran Sasso), nati per ospitare esperimenti per la verifica di teorie oltre il modello standard delle particelle. Questi siti offrono l'ambiente ideale per misurare il flusso di neutrini prodotti dalle reazioni che avvengono per la nucleosintesi nel Sole o durante il collasso gravitazionale di stelle massive. È successo ad esempio

con l'osservazione della supernova SN1987A, identificata il 24 febbraio 1987 ed esplosa a 170 mila anni luce dalla Terra, nella nube di Magellano. I modelli prevedono che le supernovae come la SN1987A rilascino il 99% dell'energia di legame gravitazionale sotto forma di neutrini e questo è stato verificato con la SN1987A. La misura con alta statistica oggi possibile (migliaia o decine di migliaia di interazioni, ad esempio, per una supernova nel centro della nostra galassia) dello spettro energetico e temporale dei neutrini in arrivo permetterebbe finalmente di affinare i modelli e comprendere cosa avviene durante il collasso di una supernova. Senza dimenticare che potremmo avere indicazioni sulle proprietà dei neutrini e sulla loro oscillazione (vd. in *Asimmetrie* n. 14 p. 29, ndr).

a.
L'ingresso dei laboratori
sotterranei del Gran Sasso.





L'universo primordiale offre le più importanti connessioni tra particelle, astrofisica e cosmologia. Il suo studio ha evidenziato gravi inconsistenze tra "modelli standard". Osservazioni astrofisiche e cosmologiche mostrano che la maggior parte (circa il 69%) della densità di energia è sotto l'oscura (in tutti i sensi) forma di energia oscura, il 26% sotto forma di materia oscura e solo il 5% è materia compresa nel modello standard delle particelle. Inoltre, è ignoto il perché questo 5% sia composto quasi esclusivamente di materia (ossia di protoni ed elettroni) e non di materia e antimateria. Le misure che permettono di ricavare i parametri cosmologici sono basate sulla radiazione elettromagnetica. L'osservazione di eventi caratteristici (come, ad esempio, la coalescenza di due stelle di neutroni) tramite onde gravitazionali potrebbe aprire un modo indipendente con cui verificare

nel prossimo futuro l'attuale modello standard cosmologico.

Il problema della comprensione della materia oscura è quello che sta richiedendo (e richiederà) i maggiori sforzi globali in termini di informazioni *multimessenger*. I candidati di materia oscura sinora preferiti dai fisici delle particelle sono le Wimp (*Weakly Interacting Massive Particles*, vd. p. 31, ndr). La ricerca di materia oscura è in programma con acceleratori, con tecniche tradizionali di fisica passiva in laboratori sotterranei, con rivelatori di neutrini e di raggi gamma. Oltre alle Wimp sono in corso ricerche, e si stanno vagliando nuove opportunità sperimentali, per altre ipotetiche particelle quali, ad esempio, gli "assioni" (vd. p. 34, ndr) e i neutrini sterili massivi (vd. in *Asimmetrie* n. 18 p. 34, ndr), che hanno caratteristiche compatibili con le osservazioni astrofisiche.

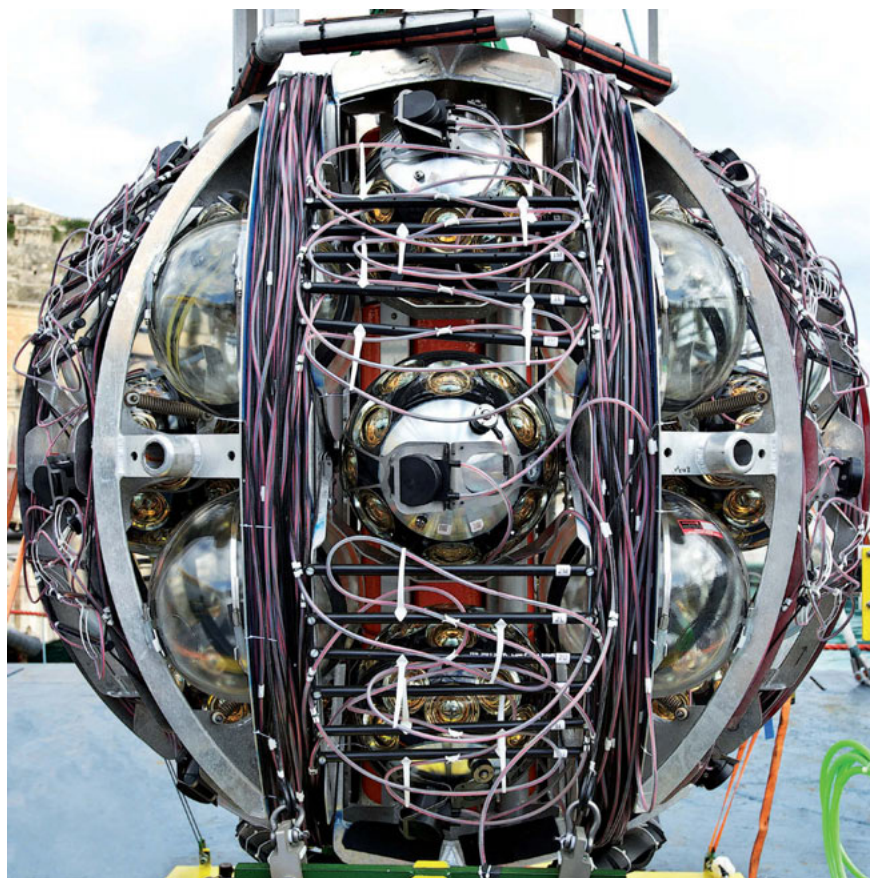
b.
L'esperimento Xenon in fase di costruzione nei Laboratori del Gran Sasso. È uno dei rivelatori in cui i fisici sperano di "vedere" le Wimp, possibili particelle di materia oscura.

Le sorgenti di raggi cosmici carichi sono ancora un capitolo di studio aperto. Oggetti astrofisici accelerano particelle anche oltre a 10^{20} eV, ossia circa 7 ordini di grandezza oltre l'energia di Lhc. Chi siano e dove siano ubicati gli "acceleratori cosmici" oltre il PeV (10^{15} eV) è ancora oscuro e potremmo chiarirlo solo rivelando sonde neutre di alta energia. Per questo scopo, apparati per misurare raggi gamma sono posti su satelliti o distribuiti su grandi aree della superficie terrestre, mentre i neutrini sono studiati tramite enormi telescopi posti in profondità nel Mar Mediterraneo o sotto il ghiaccio dell'Antartide.

L'osservazione simultanea di un evento cosmico con onde gravitazionali, fotoni (i messaggeri della radiazione elettromagnetica) e neutrini (o, per iniziare, con due su tre di queste sonde) sarebbe epocale. Ci si attende che le onde gravitazionali e quelle elettromagnetiche si propaghino alla stessa velocità e che i neutrini dovrebbero leggermente ritardare a causa della loro (piccola) massa. Tali verifiche sperimentali toccano di per sé aspetti fondamentali della fisica. Tacendo il fatto che un'osservazione permetterebbe di determinare limiti e/o valori sulla massa dei oncomitanza di un *gamma ray burst*, una potentissima esplosione cosmica che produce un intenso flusso ("lampi") di raggi gamma di alta energia. In tal caso, ci si aspetta che lo spettro energetico dei neutrini sia strettamente correlato con quello dei raggi gamma e che eventuali distorsioni nello spettro misurato potrebbero indicare segnali di presenza, ad esempio, di neutrini sterili. Lo studio congiunto di particelle neutre e cariche in arrivo da uno stesso oggetto astrofisico potrebbe permettere di stimare il valore dei campi magnetici extragalattici, informazione rilevante per comprendere l'evoluzione delle strutture cosmiche. Se alcuni *gamma ray burst* fossero dovuti alla coalescenza di oggetti di massa nota (per esempio stelle di neutroni, come verificato se si osservassero le corrispondenti

onde gravitazionali), l'osservazione congiunta di fotoni e neutrini provenienti da questi oggetti aprirebbe un nuovo capitolo per lo studio delle interazioni di particelle in arrivo con energie irraggiungibili con tecniche terrestri.

"Next" non potrà che essere il tentativo di unificare i diversi modelli standard. Capire se davvero non conosciamo il 95% dell'universo e, nel caso affermativo, da cosa questo è composto. A tale scopo, le osservazioni *multimessenger* non sono solo un vantaggio, ma una necessità.



c.
Una stringa del rivelatore Km3net-Arca, equipaggiata con 18 moduli ottici. Ogni stringa è alta 700 metri e viene deposta a 3500 m di profondità al largo di Capo Passero (Mar Ionio). Durante la posa la stringa è avvolta nel suo modulo di lancio, una sfera di appena 2 metri di diametro. L'ancora e una boa (non visibile nella foto) permettono di mantenere la stringa in verticale sott'acqua.

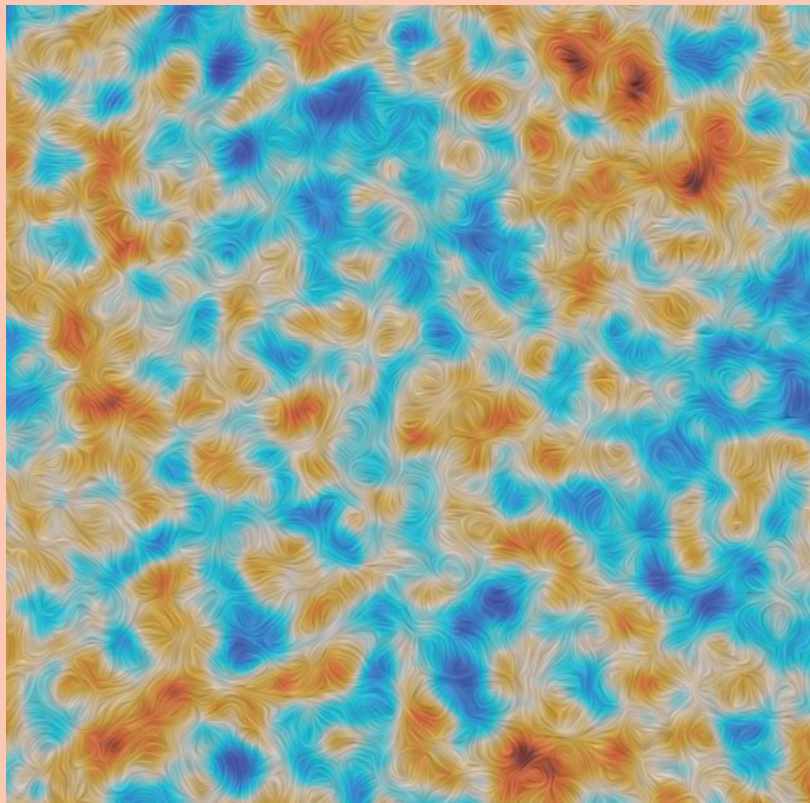
Biografia

Maurizio Spurio è professore all'Università di Bologna. È autore del libro "Particles and Astrophysics: a multi-messenger approach" edito da Springer. Ha svolto ricerche con l'Infn in fisica e astrofisica dei neutrini, prima nell'esperimento Macro al Gran Sasso, ora nel telescopio Antares di cui è vice-coordinatore.

Un secondo dopo

Alla ricerca dei neutrini primordiali

di Gianpiero Mangano



a.
Un dettaglio della radiazione cosmica di fondo dei fotoni, ottenuto grazie al satellite Planck dell'Esa nel 2013.

È ormai familiare a tutti, a differenti livelli di profondità, l'idea fondamentale della teoria del Big Bang "caldo": cioè che l'universo sia in continua espansione, a partire da uno stato iniziale molto denso e caldo (circa 13,8 miliardi di anni fa), in cui era "tutto in un punto" - che è anche il titolo di un celebre racconto di Italo Calvino (da "Le Cosmicomiche"). Ciò che oggi fa parte del nostro modo di pensare quotidiano, ha rappresentato negli anni '20 dello scorso secolo una nuova vera e propria rivoluzione copernicana.

Possiamo osservare l'universo nel corso della sua evoluzione e tracciare gli stadi attraverso i quali è passato, dalla sua infanzia sino ad oggi? La risposta è sì, e questo anche grazie al fatto che la relatività ci insegna che non è possibile trasmettere alcun segnale a una velocità maggiore di quella della luce. Questo significa che, osservando, ad esempio, una galassia a una data distanza da noi, i segnali luminosi che riceviamo ne sono una

fotografia scattata al momento in cui sono partiti, e ci informano sulle sue proprietà a un tempo via via più remoto, man mano che la distanza diventa sempre più grande. Se potessimo osservare sorgenti poste a distanze di 13,8 miliardi di anni luce, avremmo un'immagine dell'universo nel momento della sua nascita! Sfortunatamente, questo è impossibile se si usa la radiazione elettromagnetica (i fotoni) come messaggero, a causa di due ordini di problemi. In primo luogo, stelle e galassie si sono formate solo in tempi relativamente recenti e non erano certamente presenti quando tutto era in un punto. Anche osservando la radiazione cosmica di fondo dei fotoni (più precisamente, di microonde), il Cmb (Cosmic Microwave Background), studiata in grande dettaglio da molti esperimenti, fra i più recenti Wmap e Planck (vd. in Asimmetrie n. 15 p. 33, ndr), ci si può spingere a un'epoca di circa 380.000 anni dopo il Big Bang, noto come il tempo di "ultimo *scattering*" dei fotoni.

In tempi anteriori, la materia era in uno stato noto come “plasma”, elettroni e protoni non erano legati a formare atomi neutri e interagivano mutuamente emettendo e riassorbendo fotoni. In queste condizioni la radiazione elettromagnetica, una volta prodotta, non era libera di viaggiare indisturbata per raggiungere oggi i nostri rivelatori, perché era assorbita e riemessa incessantemente.

Vi sono due possibilità per studiare l'evoluzione dell'universo in tempi più remoti: usare altre particelle, la cui presenza lasci una traccia, anche se indiretta, su quantità che possiamo osservare direttamente, oppure adoperare il fatto che ogni particella interagisce gravitazionalmente in modo, per così dire, “democratico”, indipendentemente cioè dalla sua particolare natura. L'esempio principe della seconda possibilità è la materia oscura (vd. p. 31, ndr), della cui esistenza abbiamo numerose indicazioni indirette legate al campo gravitazionale che essa produce, senza il quale l'universo ci apparirebbe molto differente

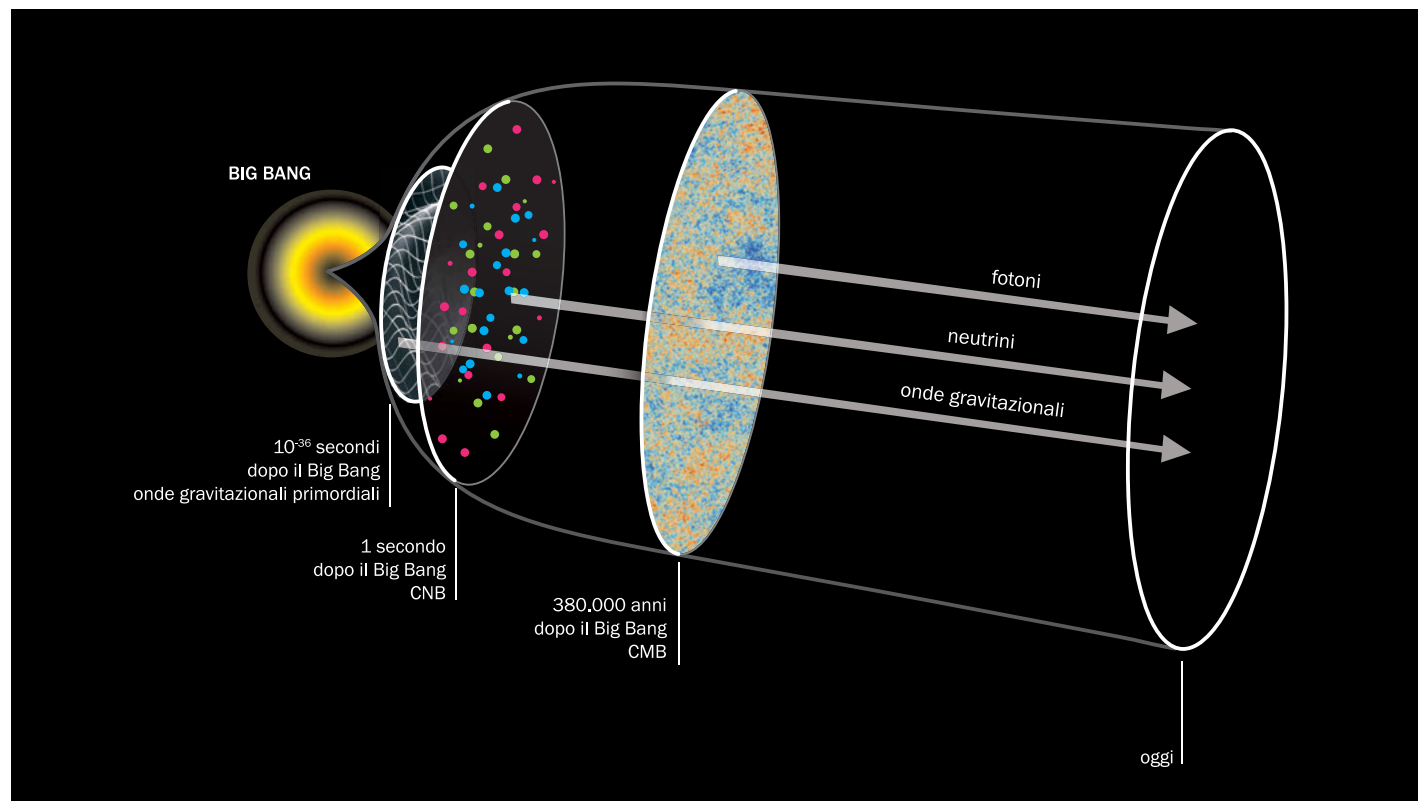
da quello che osserviamo.

L'esempio canonico del primo tipo, che è quello che qui ci interessa, è rappresentato invece dai neutrini. Queste particelle, “inventate” dalla fantasia visionaria di Wolfgang Pauli nel 1930 per “salvare” il principio di conservazione dell'energia nel decadimento beta dei nuclei, non finiscono mai di sorprendere i fisici per le loro straordinarie proprietà. Come i fotoni, anche i neutrini popolano l'universo sin dalle origini. A differenza dei primi, interagiscono con le altre particelle soltanto attraverso le interazioni deboli che, come dice il nome, sono molto più flebili di quelle elettromagnetiche.

Questo fa sì che il loro ultimo *scattering* abbia avuto luogo in tempi molto più remoti, addirittura circa un secondo dopo il Big Bang! In quest'epoca, l'universo era in piena attività e i neutrini erano fra gli attori principali: le loro interazioni con protoni, neutroni ed elettroni sono il primo passo che porta alla formazione dei nuclei leggeri (deuterio ed elio). Misurando oggi le abbondanze di questi elementi, tenendo anche conto

di quanto è stato prodotto in tempi più recenti dalle stelle, abbiamo un modo per studiare com'era fatto l'universo nei primi secondi della sua vita e per capire meglio le proprietà dei neutrini, in modo complementare agli esperimenti di laboratorio: ad esempio, se il numero di specie di neutrini corrisponde a quanto misurato negli acceleratori (cioè tre) o se ve ne siano più di tre. I neutrini, inoltre, sono dotati di energia e come tali producono un loro campo gravitazionale. Questo influenza, secondo la teoria della relatività generale, la velocità di espansione dell'universo, che pertanto possiamo verificare in tempi così remoti!

b.
Tempi di ultimo *scattering* per le onde gravitazionali primordiali (10^{-36} secondi), i neutrini cosmologici (1 secondo) e i fotoni della radiazione di fondo (380.000 anni). Come si vede, i neutrini del Cosmic Neutrino Background (Cnb, vd. p. 26, ndr) forniscono informazioni sullo stato dell'universo nei suoi primi secondi di vita.





Ma forse il ruolo dei neutrini nell'universo potrebbe portarci ancora più lontano. Vi sono, infatti, modelli teorici che prevedono che la ragione del fatto che nell'universo oggi osserviamo soltanto materia e non antimateria sia legata proprio a una proprietà che solo i neutrini possono possedere, ossia di coincidere con le loro antiparticelle, gli antineutrini. In questo caso i neutrini portano il nome di uno dei più brillanti fisici italiani di tutti i tempi e si chiamano "neutrini di Majorana" (vd. in *Asimmetrie* n. 18 p. 34, ndr). Se questi modelli venissero confermati, potremmo avere un'immagine dell'universo all'epoca nella quale è scomparsa l'antimateria, in pratica quando tutto era in un punto!

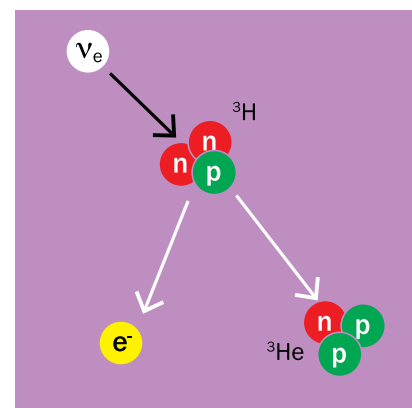
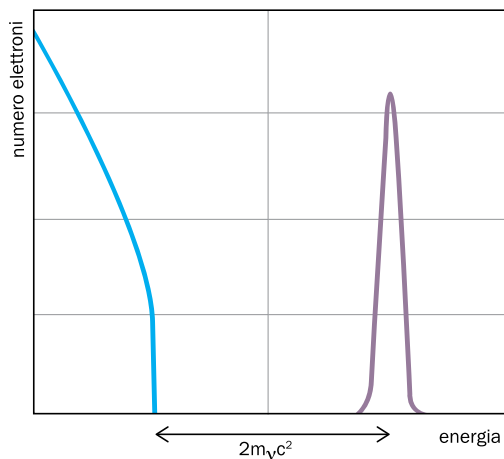
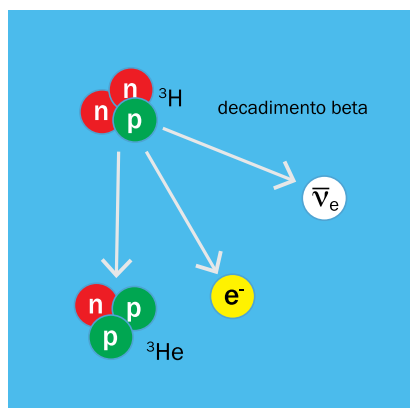
Si è detto che tutte le osservazioni astrofisiche concordano sul fatto che i neutrini sono stati prodotti fin dalle prime fasi di evoluzione dell'universo, così come i fotoni della radiazione cosmica di fondo. Lo deduciamo dalla formazione dei nuclei leggeri e dalle proprietà misurate del Cmb. Tuttavia, abbiamo già osservato che queste informazioni ci danno un'evidenza solo indiretta della loro presenza. Altra

cosa sarebbe poter fare un esperimento di laboratorio qui sulla Terra che li misurasse direttamente. Per i fisici questa rappresenta, in un certo qual modo, la via maestra per poter pervenire a una scoperta.

Quale che sia la posizione, per così dire, filosofica su cosa debba intendersi per scoperta, di una cosa siamo ragionevolmente certi: se i neutrini sono stati fra gli attori nelle fasi antiche del Big Bang, allora oggi siamo circondati da un gran numero di queste particelle, chiamate "neutrini primordiali" o "cosmologici" (per distinguerli da altri neutrini di diversa origine). I neutrini primordiali costituiscono un "fondo" analogo ai fotoni della radiazione cosmica di fondo: il Cosmic Neutrino Background (Cnb). Perché dunque non pensare di catturarli con un qualche telescopio a neutrini? L'idea non è stravagante e vi è un precedente rilevante, la misura del Cmb fatta in maniera inaspettata da Penzias e Wilson nel 1964, i quali, lavorando con un nuovo tipo di antenna per microonde, rivelarono un debole rumore di fondo non attribuibile ad alcuna sorgente astrofisica o a sorgenti terrestri note.

c.

Il prototipo su piccola scala di Ptolemy, installato al Princeton Plasma Physics Laboratory nel febbraio 2013.



d.
L'idea di base dei “telescopi” a trizio è di rivelare indirettamente i neutrini del fondo cosmico facendoli interagire con nuclei di trizio (un isotopo dell'idrogeno). Nel processo di cattura di questi neutrini (a destra) i nuclei di trizio emettono elettroni che hanno un picco di energia (in viola nel grafico) spostato di $2m_\nu c^2$, cioè di due volte l'energia di riposo dei neutrini, rispetto al valore massimo della distribuzione di energia (curva blu nel grafico) degli elettroni emessi nel decadimento beta del trizio (a sinistra).

Se ciò fosse possibile anche per il caso del Cnb, potremmo verificare alcune delle proprietà che, predette teoricamente o misurate indirettamente, riteniamo di conoscere: dovremmo, per esempio, contare all'incirca 340 neutrini e antineutrini del fondo per centimetro cubo (un numero enorme rispetto, ad esempio, ai neutrini che provengono dal Sole!), distribuiti in maniera “democratica” nelle tre specie note, e di velocità molto minore della velocità della luce, per almeno due delle tre specie. Il problema di una misura diretta del Cnb sta nel fatto che a differenza dei fotoni, che interagiscono con la materia (di cui sono fatti gli strumenti di misura) attraverso le interazioni elettromagnetiche, i neutrini interagiscono esclusivamente attraverso le ben più flebili interazioni deboli, il che rende la loro rivelazione estremamente difficile. Da decenni, si propongono metodi e si avanzano idee su come costruire un telescopio per il Cnb. Quasi tutte, purtroppo, sembrano di difficile, se non impossibile, realizzazione in un futuro prossimo, con forse un'unica eccezione: un telescopio a trizio. Sulla base di una vecchia idea di Steven Weinberg, che scrivendo nei primi anni '60 pensava però che l'effetto fosse misurabile per una proprietà dei neutrini legata al celeberrimo “principio di esclusione di Pauli” (vd. in *Asimmetrie* n. 14 p. 33, ndr) e non alla loro massa, l'esperimento Ptolemy al Plasma Physics Laboratory di Princeton si propone di rivelare i neutrini (e gli antineutrini) primordiali osservando la traccia che lasciano quando

interagiscono con nuclei di trizio: catturando un neutrino, un nucleo di trizio emette un elettrone di energia cinetica superiore a quella massima degli elettroni prodotti nel normale decadimento beta del trizio (vd. fig. d). Si stima che un bersaglio di 100 grammi di trizio possa produrre circa 10 eventi all'anno di cattura di neutrini primordiali. La sfida sperimentale è notevole, perché si tratta di costruire un rivelatore con una risoluzione in energia inferiore all'eV, ma un prototipo in scala è già in funzione e capiremo presto se siamo sulla buona strada per osservare i più antichi messaggeri dell'universo.

Biografia

Gianpiero Mangano è un ricercatore dell'Infn della sezione di Napoli. Si occupa di cosmologia, fisica del neutrino e gravità quantistica. È autore di oltre 120 articoli scientifici e di una monografia, “Neutrino Cosmology” pubblicata dalla Cambridge University Press.

Link sul web

http://ithaca.unisalento.it/nr-7_2016/index.html

Gerarchie nascoste

Esperimenti per distinguere le masse dei neutrini

di Eligio Lisi

Siamo nel 1930, a Tubinga, in una fredda giornata di dicembre. Un gruppo di fisici discute animatamente uno dei problemi più misteriosi del momento: in alcuni processi radioattivi sembra che l'energia non sia conservata. Si attende l'arrivo da Zurigo di Wolfgang Pauli, famoso fisico teorico. Ma Pauli rinuncia a partire, prende carta e penna e, fra le righe di una lettera di scuse, lancia un'idea folgorante: la conservazione dell'energia non è violata, purché esista una nuova particella neutra e con una massa leggerissima. Più leggera, secondo i suoi calcoli, di un centesimo della massa del protone. Nasce così la particella che Enrico Fermi chiamerà "neutrino" e la cui esistenza verrà dimostrata in laboratorio dopo oltre vent'anni di ricerche, il 15 giugno 1956, da Clyde L. Cowan e Frederick Reines (vd. in *Asimmetrie* n. 18 p. 34, ndr).

Da allora, misurare l'evanescente massa del neutrino rimane uno dei problemi fondamentali della fisica delle particelle che non è stato ancora completamente risolto. Sappiamo oggi che la sua massa deve essere meno di un milionesimo di quella del protone, ma non ne conosciamo ancora il valore esatto. Sappiamo anche che il neutrino di Pauli e Fermi è

solo il primo di tre varietà differenti chiamate, con un po' di fantasia, "sapori": i neutrini di sapore elettronico, muonico e tauonico. Inoltre, abbiamo capito che i tre neutrini di sapore diverso non hanno una massa ben definita, ma che ciascuno di essi è un "mix" di altri tre neutrini che, al contrario, hanno masse ben definite ma non uno specifico sapore. Una proprietà, questa, difficile da immaginare, ma possibile nel mondo quantistico delle particelle elementari. Il mescolamento quantistico fra neutrini con "masse" e "sapori" diversi conduce a un fenomeno affascinante, previsto da Bruno Pontecorvo nel secolo scorso: il sapore di un neutrino non rimane immutato, ma è soggetto a trasformazioni cicliche. In altre parole, un neutrino elettronico può trasformarsi in muonico o tauonico e viceversa, ripetendo il ciclo di queste cosiddette "oscillazioni" con una frequenza legata alle differenze fra le masse dei neutrini (o meglio, per essere precisi, fra le masse elevate al quadrato). Il Nobel 2015 per la fisica ha premiato proprio la fondamentale scoperta delle oscillazioni di sapore, osservata studiando neutrini che ci arrivano continuamente dall'interno del Sole e dall'impatto dei raggi cosmici con l'atmosfera.



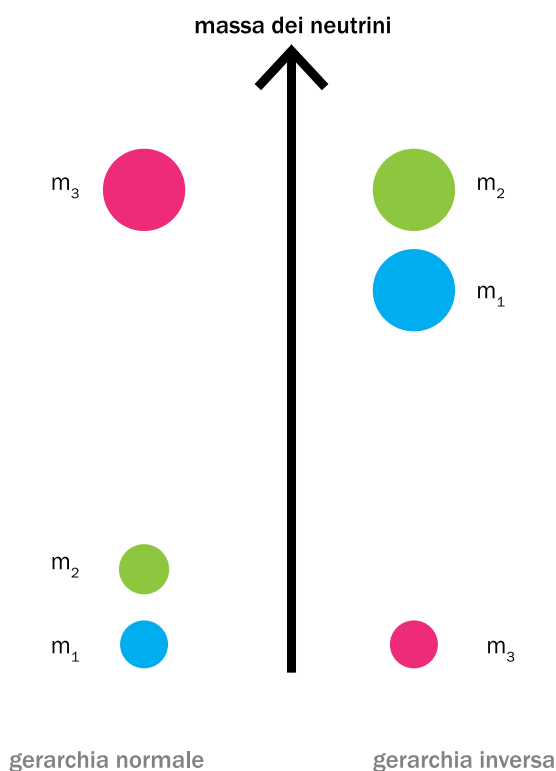
a.
Wolfgang Pauli (a sinistra) con la moglie (a destra) durante un'escursione a Livorno.

Questa scoperta ci ha insegnato, fra l'altro, che i neutrini solari e atmosferici oscillano con due frequenze molto diverse, a cui sono associate due differenze di massa altrettanto diverse. Il problema iniziale di determinare la massa del singolo neutrino di Pauli si è quindi trasformato, nel tempo, nel problema di determinare le masse di tre neutrini, conoscendone due differenze relative. Sembra che l'incognita sia sempre e soltanto una (cioè una massa fra le tre), ma c'è una complicazione. Guardando la fig. b (vd. anche in Asimmetrie n. 14 fig. c p. 31, ndr) capiamo infatti che ci sono due opzioni (dette "gerarchie") per organizzare tre masse dei neutrini, a parità di differenze relative: le due masse con la minore differenza relativa possono essere più leggere (a sinistra) o più pesanti (a destra) della terza massa, associata alla maggiore differenza relativa. La prima gerarchia è detta "normale", perché qualitativamente simile a quella osservata nelle altre particelle di materia come i quark,

mentre la seconda è detta "inversa". Determinare quale gerarchia sia stata scelta dalla natura per i neutrini rappresenta una nuova sfida, all'interno del problema originale di determinarne la massa: una sfida difficile, che però può essere vinta spingendo al limite gli strumenti teorici e sperimentali a nostra disposizione.

I fisici teorici hanno proposto almeno due idee che consentono, in linea di principio, di affrontare il problema della gerarchia. La prima è quella di osservare contemporaneamente le oscillazioni di neutrino prodotte da entrambe le differenze di massa, e non da una sola com'è avvenuto finora. In questo caso, l'interferenza fra le due frequenze fondamentali di oscillazione sarebbe leggermente diversa nelle due gerarchie, e misure di altissima precisione potrebbero rivelare quella giusta. Sperimentalmente, questa idea è realizzabile utilizzando i flussi di neutrini estremamente intensi prodotti dai potenti reattori nucleari per uso civile, e studiando le loro oscillazioni ad

alcune decine di chilometri di distanza, per mezzo di rivelatori di grandi dimensioni ed eccezionali prestazioni. La seconda idea sfrutta il fatto che i neutrini - siano essi elettronici, muonici o tauonici - possono attraversare quasi indisturbati tutta la Terra. I soli neutrini elettronici sono però soggetti a un'interazione aggiuntiva con gli elettroni incontrati durante il loro cammino nella materia terrestre. Gli effetti di questa variazione sulle oscillazioni di neutrino sono leggermente diversi in gerarchia normale e inversa, e queste differenze possono essere evidenziate attraverso misure di oscillazione effettuate a grandi distanze su scala terrestre. Sperimentalmente, si può procedere in due modi: usando fasci di neutrini prodotti in laboratorio attraverso degli acceleratori e rivelandoli dopo un percorso di almeno un migliaio di chilometri, oppure osservando i neutrini atmosferici prodotti dalla parte opposta del globo per mezzo di enormi rivelatori costruiti sotto la superficie terrestre.



b.
Due possibili ordinamenti ("gerarchie") delle masse dei tre neutrini, che lasciano invariate le loro differenze relative: a sinistra la gerarchia "normale" e a destra la gerarchia "inversa". Attualmente non conosciamo quale delle due opzioni sia stata scelta dalla natura. A rigore, va detto che le oscillazioni del sapore dei neutrini determinano le differenze dei quadrati delle masse (non delle masse), ma ciò non cambia il concetto di gerarchia.



Diversi esperimenti basati su queste idee sono già in cantiere in tutto il mondo per investigare non solo la gerarchia di massa ma anche altre proprietà fondamentali e misteriose dei neutrini. In termini sportivi, sta per cominciare una lunga corsa su tre diverse “corsie” di gara, segnate dai neutrini da reattore, da acceleratore e atmosferici - e l'Infn è pronto ai blocchi di partenza! In Cina, l'Infn sta partecipando alla costruzione di un rivelatore di neutrini da reattore che conterrà ventimila tonnellate di scintillatore liquido (Juno), portandovi le competenze acquisite nell'esperimento Borexino con neutrini solari dei Laboratori del Gran Sasso. Negli Stati Uniti, l'Infn sta contribuendo a formare una collaborazione internazionale per un esperimento con neutrini da acceleratore (Dune), basato sulla tecnologia ad argon liquido sviluppata nell'esperimento Icarus, sempre del Gran Sasso. Infine, basandosi sull'esperienza acquisita negli esperimenti sottomarini Nemo e Antares, l'Infn partecipa anche alla costruzione di un grande e denso sistema di rivelatori di neutrini atmosferici nelle acque a 2500 metri di profondità al largo di Tolone (in Francia). Si tratta del

progetto Km3net-Orca, che affiancherà Km3net-Arca, il telescopio di neutrini astrofisici in fase di installazione a 3500 m di profondità al largo di Capo Passero, in Sicilia (vd. p. 21, ndr). Similmente, in Antartide si sta studiando la possibilità di installare un rivelatore di neutrini atmosferici per studiare la gerarchia di massa, complementare al telescopio IceCube. Va anche detto che l'Infn attualmente partecipa a un esperimento con un rivelatore sotterraneo in Giappone (T2k), che potrebbe evolvere in un più grande rivelatore sensibile alla gerarchia di massa tramite i neutrini atmosferici (Hyper-Kamiokande). Appuntamento fra alcuni anni, per parlare dei progressi - e magari anche di qualche risultato preliminare - in una o più di queste affascinanti linee di ricerca in fisica dei neutrini!

c.
Il rivelatore Icarus durante il trasporto dai laboratori del Gran Sasso a quelli del Cern di Ginevra: prima tappa di un lungo viaggio con destinazione Fermilab (nei pressi di Chicago), nell'ambito del progetto sperimentale Dune.

Biografia

Eligio Lisi è ricercatore presso la sezione Infn di Bari. Si occupa principalmente della teoria e dei fenomeni legati alla fisica e all'astrofisica dei neutrini.

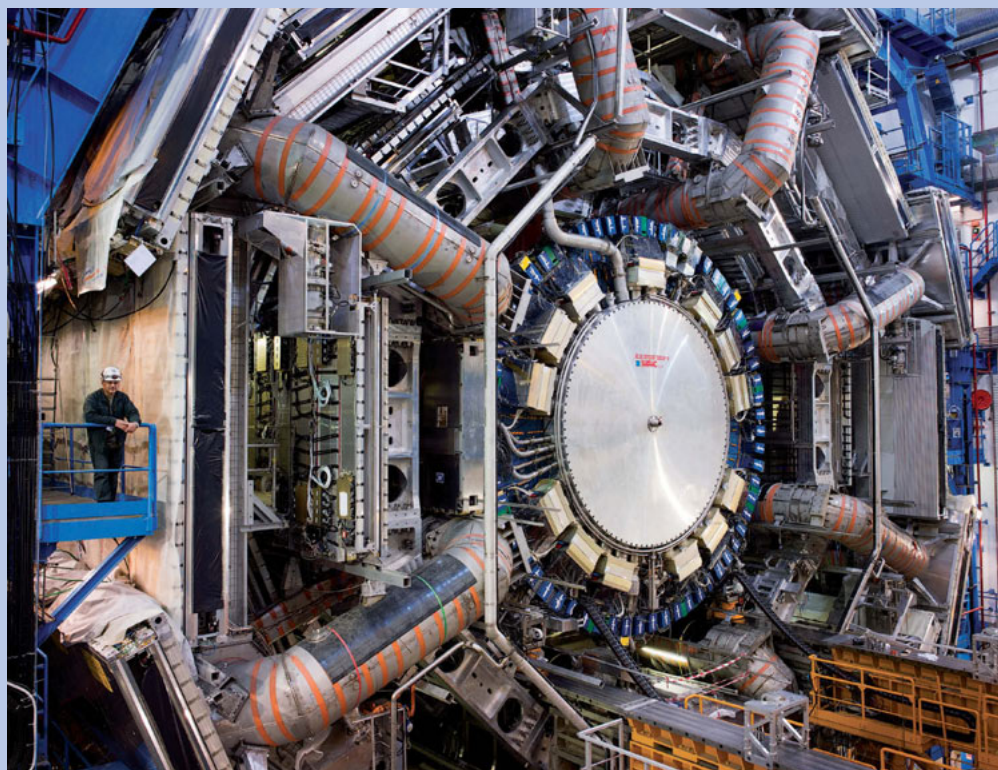
Lo zoo oscuro

Candidati per la massa mancante dell'universo

di Nicolao Fornengo

C'è un enigma che ci accompagna da lungo tempo, e nonostante facciamo di tutto per trovare una soluzione, questa continua a sfuggirci: è il problema della materia oscura. Sappiamo che circa un quarto del contenuto dell'universo è costituito da materia oscura, sappiamo come essa si distribuisce a formare galassie e ammassi di galassie e sappiamo anche che non si tratta di materia ordinaria (quella di cui anche noi siamo fatti): però non ne conosciamo la composizione. È un tema molto affascinante, la cui soluzione potrà condurci a una comprensione più profonda dell'universo.

Il modo considerato più naturale per spiegare la materia oscura consiste nell'ipotizzare la presenza di una nuova particella massiva dotata di interazioni deboli, simili a quelle del neutrino, la Wimp. Particelle con queste caratteristiche venivano prodotte facilmente nel plasma che componeva l'universo primordiale: con il raffreddarsi dell'universo a un certo punto si separano dal plasma e, se stabili, arrivano fino a noi. La richiesta di contribuire oggi a circa un quarto della densità di massa-energia totale dell'universo porta le Wimp ad avere un intervallo di massa compreso tra circa 1 GeV (la massa del protone) e qualche decina di TeV (decine di migliaia di volte la massa del protone). Queste sono proprio le scale di energia che Lhc sta ora esplorando al Cern, e una grande attenzione è infatti rivolta ai risultati che arriveranno da queste ricerche: la scoperta di una nuova particella con le caratteristiche delle Wimp rappresenterebbe uno straordinario successo sia per la fisica delle particelle (con la scoperta di fisica oltre il modello



a.
Il rivelatore Atlas dell'acceleratore Lhc. Assieme a Cms, Atlas misura le particelle prodotte dalla collisione di protoni ad altissima energia dentro Lhc: tra questi prodotti si cercano informazioni sulle particelle responsabili della materia oscura, come ad esempio il neutralino.

standard) sia per la cosmologia, offrendo forse la chiave per comprendere uno dei misteri meglio custoditi dalla natura. Molti modelli di nuova fisica predicono al loro interno particelle che hanno le caratteristiche delle Wimp: un esempio molto studiato è il "neutralino", presente nei modelli supersimmetrici (vd. in Asimmetrie n. 18 p. 13, ndr), ma sono state proposte varie alternative come delle repliche pesanti delle particelle del modello standard, che compaiono nei modelli con dimensioni spaziali aggiuntive (le cosiddette "particelle di Kaluza-Klein") oppure particelle simili al bosone di Higgs, che possono essere presenti se

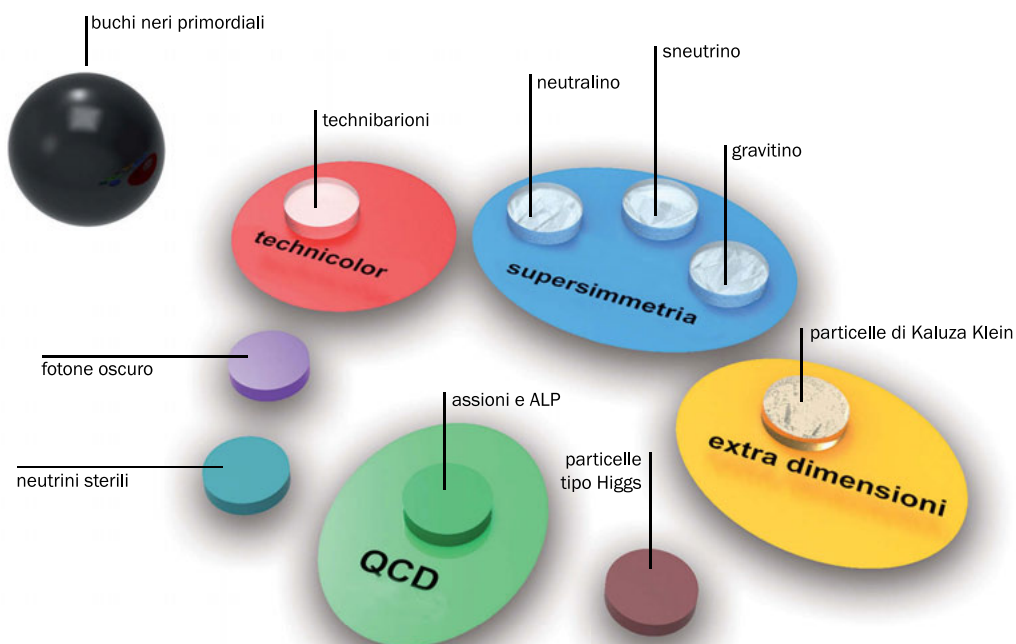
il settore di Higgs del modello standard è più complesso del previsto. Oppure potrebbero esistere delle particelle "specchio" che duplicano quelle del modello standard ma che interagiscono poco con la materia standard (*mirror dark matter*) o, ancora, delle particelle simili al neutrino, ma molto più pesanti, che emergono in estensioni minimali del modello standard (*minimal dark matter* e sue varianti).

Tutte le evidenze osservative sull'esistenza della materia oscura sono di natura gravitazionale e non ci danno alcuna indicazione su quale possa essere la massa di questa nuova particella.

L'unica cosa che ci dicono è che la materia oscura deve interagire molto poco con la materia ordinaria. La teoria della formazione delle strutture cosmologiche (galassie, ammassi di galassie) sembra preferire particelle pesanti, in quanto queste vengono naturalmente rilasciate dall'universo primordiale come particelle "lente" (o "fredde", come si dice in gergo). E la "materia oscura fredda" è proprio quella che sembra essere necessaria per formare la complessità della rete cosmica in cui si trovano le strutture cosmologiche così come le osserviamo. Le Wimp rappresentano il candidato naturale per la materia oscura fredda.

Il comportamento delle particelle nel plasma primordiale può però essere molto più complesso di quanto descritto sopra, e sono possibili alternative molto interessanti. Un caso peculiare è rappresentato dal cosiddetto "assione" (vd. p. 34, ndr) che, sebbene sia molto leggero, in virtù della propria dinamica può agire su scala cosmologica come materia oscura fredda e rappresenta quindi un ottimo candidato. L'assione della teoria originale ha proprietà molto semplici e possiede una forza di interazione con la materia che dipende strettamente dalla sua massa. A seconda del modello, esso può interagire con i fotoni, oppure con gli elettroni o con i quark. L'idea dell'assione può però essere estesa, e ciò conduce alle cosiddette Alp, ovvero *axion-like-particle*: particelle simili all'assione, ma senza un diretto legame massa-interazione. Le Alp sono uno dei candidati di materia oscura più studiati negli ultimi anni, e rappresentano anch'esse una finestra di nuova fisica molto interessante. Una soluzione al problema della materia oscura potrebbe arrivare anche dal settore dei neutrini. Mentre i neutrini del modello standard sono troppo leggeri per poter dare un contributo corretto alla materia oscura, neutrini aggiuntivi

potrebbero avere le giuste proprietà. Non possiamo aggiungere neutrini "normali" (o "attivi") al modello standard, perché le misure di precisione effettuate agli acceleratori ci dicono che questo non è possibile, a meno che il neutrino non sia molto pesante, ma allora ricadrebbe nella categoria delle Wimp, e ricerche dirette di materia oscura nella nostra galassia hanno escluso questa possibilità. Però neutrini "sterili", che praticamente non interagiscono con la materia, potrebbero venir prodotti nel plasma primordiale per effetto dell'oscillazione attivi/sterili, nella giusta abbondanza per spiegare la materia oscura. Si parla di particelle con masse tra l'eV e qualche migliaio di eV. Sempre restando al di fuori del paradigma delle Wimp, ma continuando a salire nella scala di massa, sono state ipotizzate anche particelle pesanti più o meno come le Wimp, ma dotate di interazioni ancora più deboli, così da rendere il meccanismo della loro produzione nell'universo primordiale molto difficile: è il caso delle Fimp (*Feebly Interacting Massive Particle*, ovvero particelle massive che interagiscono flebilmente). Mentre le Wimp vengono prodotte in abbondanza e poi con il raffreddamento dell'universo se ne perde una gran quantità per via della loro annichilazione, di Fimp ne vengono prodotte poche, giusto quanto basta per spiegare la materia oscura presente nell'universo. Anche se possono apparire simili alle Wimp, le loro interazioni estremamente deboli collocano le Fimp in una categoria a parte, specialmente per la possibilità di rivelarle sia agli acceleratori sia in contesto astrofisico. Alternative al paradigma Wimp possono essere ricercate anche nel settore delle interazioni forti, come nelle teorie cosiddette di "technicolor", in cui la materia oscura sarebbe composta da particelle più fondamentali, un po' come il protone è composto da quark. Oppure nel settore della interazione elettromagnetica,



b.
Alcune delle particelle candidate per la materia oscura e le teorie che le prevedono. Una possibilità alternativa è che la massa mancante dell'universo sia costituita da buchi neri primordiali.



in cui la materia oscura pur essendo dotata di carica elettrica interagirebbe poco con i fotoni, perché “costretta” a farlo solo attraverso un “fotone oscuro” (*dark photon*), simile al fotone ma dotato di massa e debolmente interagente con il fotone normale, così da apparire come se avesse una carica elettrica molto piccola (materia oscura “millicarica”): questo la renderebbe di fatto poco “visibile” e quindi oscura. In tutti questi casi è comunque necessario tenere sotto controllo, con opportuni accorgimenti, le interazioni della materia oscura con la materia ordinaria, per evitare che la sua principale caratteristica (quella di essere “oscura”, ovvero debolmente interagente) non venga persa. Numerose altre alternative sono state proposte, ma un’ipotesi forse sorprendente, rafforzata dopo la recente scoperta delle onde gravitazionali, è

che la materia oscura potrebbe essere formata da oggetti inattesi, come i buchi neri primordiali. I buchi neri prodotti nell’universo molto antico e dotati di una massa tra 10 e 100 volte la massa del Sole potrebbero benissimo spiegare l’intero ammontare di materia oscura dell’universo. Ligo e Virgo, quindi, potrebbero forse aver osservato la materia oscura sotto forma di oggetti che erano stati ipotizzati già da Bernard Carr e Stephen Hawking negli anni ’70, ma a cui non si era prestata troppa attenzione.

La soluzione del mistero della materia oscura rimane comunque sfuggente. Abbiamo però a disposizione molte idee e moltissimi strumenti, sia teorici sia sperimentali, che ci fanno prevedere che nei prossimi anni saremo in grado di dare una risposta a uno dei più affascinanti enigmi della scienza moderna.

c. Recentemente l’Infn ha dato luce verde all’esperimento Padme (Positron Annihilation into Dark Matter Experiment), che andrà alla ricerca del fotone oscuro. L’esperimento entrerà in funzione nei Laboratori Nazionali di Frascati (Lnf) dell’Infn (nella foto) in una nuova sala sperimentale della struttura di test dell’acceleratore lineare, la Beam Test Facility (Btf).

Biografia

Nicolao Fornengo è docente di relatività generale e di fisica astroparticellare all’Università di Torino. Si occupa dello studio della materia oscura particellare, di fisica del neutrino e del ruolo della fisica delle particelle in cosmologia.

Un vento leggero

Assioni per spiegare la materia oscura

di Giovanni Carugno



a.

Il detersivo che ha dato nome all'assione.

Tra le tante particelle che sono state ipotizzate per spiegare la composizione della misteriosa materia oscura (vd. p. 31, ndr), una - l'assione - ha la peculiarità di essere stata introdotta fin dagli anni '70 in un contesto del tutto indipendente, per risolvere un problema fondamentale della teoria delle interazioni forti: la possibile violazione della simmetria per inversione temporale (cioè dell'invarianza rispetto al cambiamento di direzione del tempo). All'interno della teoria dei campi che descrive l'interazione forte tra i quark e i gluoni (la cromodinamica quantistica), fa capolino un termine che introduce un'asimmetria tra passato e futuro. Tale termine avrebbe come diretta conseguenza sperimentale la presenza di un "dipolo elettrico" sul neutrone

(ovvero uno squilibrio nella distribuzione spaziale delle cariche elettriche presenti nel neutrone), che non è mai stato osservato. Nei processi governati dalla forza forte, dunque, la natura non manifesta una preferenza nella direzione del tempo e in qualche modo deve essersi protetta dalla comparsa di quel termine asimmetrico. In che modo? La soluzione più "elegante" fu proposta da Roberto Peccei e Helen Quinn nel 1976 e poi sistematizzata all'interno della teoria dei campi da Steven Weinberg e Frank Wilczek. L'idea di base è di introdurre un nuovo campo e una nuova particella, che Wilczek battezzò assione (*axion* in inglese), prendendo spunto dal nome di un detersivo (la nuova particella, per così dire, puliva lo "sporco" delle interazioni forti). Dell'assione si presume

che abbia una massa ben più piccola della massa dell'elettrone, che sia elettricamente neutro, che abbia una vita media superiore all'età dell'universo (13,8 miliardi di anni), che interagisca con la materia ordinaria in maniera molto debole e che non possieda spin. L'assione dovrebbe essere stato prodotto in maniera copiosa nei primi istanti dopo il Big Bang, per poi pervadere l'universo a mo' di un fluido, analogamente a ciò che è accaduto al gas di fotoni primordiali che oggi costituiscono la radiazione cosmica di fondo. Ma, diversamente da questi fotoni, gli assioni hanno una massa e potrebbero quindi dar conto della massa mancante dell'universo, la materia oscura, di cui abbiamo molte evidenze indirette.

La teoria non prevede esattamente la massa dell'assione ma stabilisce che essa sia correlata alla costante di accoppiamento dell'assione con la materia e la radiazione: tanto più la massa dell'assione è piccola, tanto più debole è la sua interazione con la materia e la radiazione (e tanto più risulta difficile la ricerca sperimentale della particella). Attualmente, l'intervallo di massa degli assioni è stato ristretto sperimentalmente tra i microelettronvolt e le decine di millielettronvolt (miliardi di volte inferiore alla massa dell'elettrone). Gli ingredienti che servono per lanciarsi alla ricerca di questa particella sono una sorgente con caratteristiche predicibili e un rivelatore, in cui osservare un segnale attraverso un meccanismo dettato dalla teoria che predice le modalità di interazione dell'assione con la radiazione e la materia. Le sorgenti in uso per la ricerca degli assioni sono di natura cosmologica, stellare e di laboratorio.

Ipotizzando che la materia oscura sia interamente composta da assioni di origine cosmologica, questi dovrebbero formare un fluido di densità dell'ordine delle migliaia di miliardi di particelle per centimetro cubo (per una massa assionica di 10^{-4} eV), rispetto al quale il sistema solare si muoverebbe con una velocità di centinaia di chilometri al secondo. Se potessimo osservare gli assioni, dunque, li vedremmo come una sorta di fiume che ci

viene addosso. Attualmente, due sono gli esperimenti messi in campo per rivelare il "vento di assioni" cosmologici.

Nell'esperimento americano Admx (Axion Dark Matter Experiment) gli assioni, interagendo con un campo magnetico prodotto da magneti superconduttori di intensità superiore a 10 tesla (al limite delle tecnologie attuali), sono convertiti in fotoni all'interno di una cavità elettromagnetica. A causa dell'esiguo numero di fotoni prodotti nella banda di osservazione dettata dalle caratteristiche della cavità a microonde sono necessari amplificatori che operano in regime quantistico, basati su dispositivi superconduttori (cosiddetti Squid) sviluppati dal gruppo di Berkeley appositamente per questo esperimento. Tutto l'apparato, inoltre, deve essere tenuto a temperature di millikelvin per ridurre il rumore termico di fondo.

La sensibilità è massimizzata facendo uso di un sistema risonante in cui la frequenza di risonanza della cavità è calibrata sull'ipotetica massa dell'assione, e viene fatta variare per coprire un intervallo di masse adeguato. Questo approccio, sviluppato nel corso degli ultimi trent'anni, permette di esplorare regimi di masse assioniche corrispondenti a frequenze dei fotoni fino a un gigahertz. Nel prossimo futuro si punta a coprire domini di frequenza/massa più elevate.



b.
L'esperimento Admx nell'Università di Washington.



Un approccio alternativo a quello americano è stato proposto da Riccardo Barbieri, che ha suggerito di studiare l'interazione degli assioni con elettroni polarizzati. Il "vento assionico" è caratterizzato da un campo magnetico efficace di intensità bassissima, dell'ordine di 10^{-22} tesla, oscillante a una frequenza che dipende dalla massa dell'assione. Investendo un rivelatore con elettroni polarizzati, questo "vento" farebbe ruotare gli spin elettronici. L'idea è alla base del progetto Quax (QUaerere AXion), una ricerca volta a studiare la fattibilità di un magnetometro che funzioni a frequenze delle microonde e che sia sensibile a campi magnetici miliardi di miliardi di volte meno intensi del campo magnetico terrestre. Raggiungere una sensibilità per campi a radiofrequenza di 10^{-22} tesla renderebbe l'apparato Quax il magnetometro più sensibile finora realizzato, con possibili applicazioni nei campi della biofisica e della medicina e nel settore della strumentazione avanzata.

Un'altra possibile sorgente di assioni sono le stelle. I fotoni presenti al loro interno, di energia elevata (corrispondente alle frequenze dei raggi X), attraverso l'interazione con il plasma circostante possono produrre copiosamente assioni. Questo processo si traduce in una perdita di energia della stella, e ne influenza la vita media. Studiando l'evoluzione stellare si possono porre limiti molto stringenti sulla massa e sull'accoppiamento dell'assione. È possibile quindi usare il Sole come sorgente di assioni, puntando un rivelatore verso la nostra stella e sfruttando lo stesso principio dell'esperimento americano Admx per convertire gli assioni solari in raggi X. È ciò che fa l'esperimento Cast (Cern Axion Solar Telescope), in fase di presa dati al Cern. Anche esperimenti che cercano candidati diversi di materia oscura possono fornire indicazioni

sull'esistenza dell'assione, dal momento che hanno soglie di rivelazione di energia molto basse, dell'ordine del keV. Gli esperimenti operanti presso il Laboratorio Nazionale del Gran Sasso (Dama, Borexino, Xenon, Cuore) hanno pubblicato dei limiti sulla possibile presenza di assioni provenienti dal Sole. Questa ricerca si può estendere a sorgenti di natura astrofisica, e in questo ambito l'esperimento Fermi ha recentemente fornito un limite superiore per la massa assionica.

Un'ultima possibilità è cercare di generare e rivelare gli assioni direttamente in laboratorio, usando sorgenti laser molto intense, campi magnetici di alta intensità e rivelatori a singolo fotone che presentino un livello di segnali casuali estremamente basso. L'assione viene generato in una regione di spazio e fatto riconvertire in un fotone in una regione adiacente, rivelandone così la presenza. Il capostipite di tale linea di ricerca è stato l'esperimento PVLAS, poi seguito da Alps (Any Light Particle Search), presso i laboratori di DESY ad Amburgo. Un progetto di ricerca e sviluppo è in corso in Italia sotto la sigla Stax per usare sorgenti di alta intensità di microonde e sviluppare un rivelatore in grado di riconoscere un singolo fotone nel dominio delle decine di gigahertz.

Lo sforzo nel perseguire la ricerca dell'assione, oltre a essere dettato da motivazioni di carattere teorico, nell'ambito sia delle interazioni fondamentali sia della cosmologia, offre la possibilità di sviluppare nuovi strumenti e tecnologie che sicuramente avranno ricadute nella diagnostica biomedica e nel campo di nuovi materiali superconduttori, e ci avvicinano al limite del mondo quantistico, dove risiede la nostra visione più avanzata della natura.

Biografia

Giovanni Carugno è ricercatore Infn presso la Sezione di Padova. Insegna presso il Dipartimento di Fisica dell'Università di Padova ed è coordinatore nazionale degli esperimenti Quax e Axioma.

c.

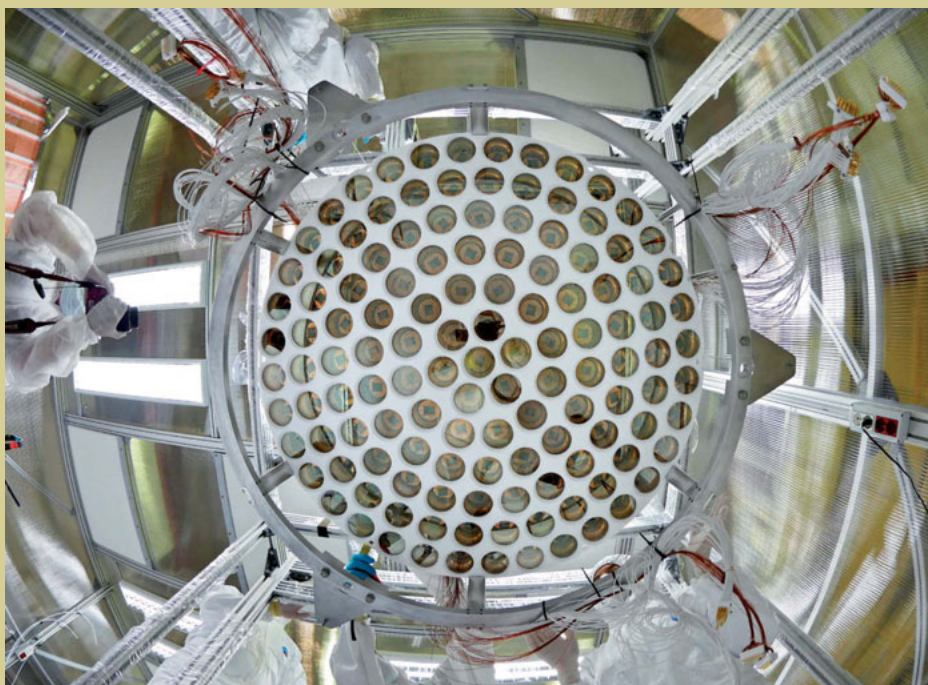
La collaborazione Cast al Cern, davanti all'omonimo esperimento.

Occhio alle Wimp!

I rivelatori del futuro

di Gianluca Cavoto

a.
Fotomoltiplicatori di tipo "standard" sono usati, ad esempio, nell'esperimento Xenon ai Laboratori Nazionali del Gran Sasso.



Per vedere il mondo che ci circonda, noi usiamo i nostri occhi. L'occhio raccoglie la luce, forma un'immagine che viene trasmessa dal nervo ottico al cervello, dove viene elaborata e registrata nella memoria (o dimenticata - se non ci è piaciuta!). Anche nei nostri laboratori abbiamo degli "occhi" per vedere le particelle, sia quelle che produciamo con gli acceleratori (come per esempio in Lhc) sia quelle che provengono dall'universo (ad esempio, attraverso i raggi cosmici). Questi occhi si chiamano "rivelatori di particelle" e nel corso dell'ultimo secolo ne abbiamo inventati e costruiti tanti e di tanti tipi diversi. Con i nostri rivelatori, ad esempio, sappiamo vedere la stessa luce che vede l'occhio umano. La luce è composta da minuscoli quanti di energia, detti fotoni. In un secondo una lampadina a led ne emette dieci miliardi di miliardi. I rivelatori di luce sono così

sensibili da riuscire a vedere persino un solo fotone. L'arrivo del fotone dentro il rivelatore è in grado di produrre una piccola scarica elettrica che tramite un cavo raggiunge un apparato che campiona la forma della scarica ed eventualmente la registra in un calcolatore elettronico. Se ci interessa, la registriamo, se non ci piace la buttiamo. Un tipo di rivelatore per fotoni si chiama "fotomoltiplicatore" ed è un occhio "standard" per vedere particelle "standard", come i fotoni (vd. fig. a). Ma non ci basta. Vogliamo poter vedere tutti i tipi di particelle. E ci servono occhi davvero specializzati per farlo. Per vedere particelle dotate di carica elettrica (i protoni o gli elettroni, ad esempio) abbiamo inventato occhi che sanno vedere piccolissimi rilasci di energia che esse perdono attraversando speciali miscele di gas. Esistono oggi grandi rivelatori che vedono centinaia

di particelle contemporaneamente, in minuscole frazioni di secondo, come ad esempio Atlas o Cms al Cern. Grazie al raffinamento delle tecniche di lettura di questi rilasci di energia, si possono raggiungere precisioni micrometriche. Si possono vedere le traiettorie curve percorse dalle particelle cariche in un campo magnetico e misurarne così la quantità di moto.

Ogni rivelatore - ogni occhio speciale - fonda il suo funzionamento su un particolare tipo di interazione che le particelle hanno con la materia. Il fotomoltiplicatore, per esempio, sfrutta il cosiddetto "effetto fotoelettrico" (vd. in Asimmetrie n. 12 p. 4, ndr) e i rivelatori "a gas", invece, si basano su fenomeni di ionizzazione delle molecole dei gas. Tuttavia questi occhi, per quanto speciali e sofisticati e in continua evoluzione, sono oggi considerati rivelatori standard per particelle standard.

Esistono problemi irrisolti della fisica odierna che con alta probabilità richiedono l'esistenza di particelle non standard. Uno di questi problemi - certamente uno dei più importanti al giorno d'oggi - è lo studio della materia oscura. Della materia oscura sappiamo davvero poco, ma pensiamo che debba riempire la nostra galassia, la via Lattea. Visto che la Terra e il Sole si muovono nella via Lattea saremmo continuamente investiti da un vento di materia oscura. Sotto certe ipotesi, in un volume di un litro ci potrebbero essere circa quaranta particelle di materia oscura del tipo Wimp (vd p. 31, ndr). La materia oscura deve il suo nome proprio al fatto che non emette luce. Questa è una grande sfortuna. Significa che, anche se è presente intorno a noi, in pratica ci attraversa senza "toccarci" davvero. E se interagisce molto poco, non c'è modo di vederla facilmente. Non si possono usare occhi standard. Occorre, perciò, immaginare un modo con cui essa possa rilasciare un segnale in un rivelatore. Ci vogliono occhi nuovi.

Nei nostri laboratori una importante attività di ricerca consiste proprio nel costruire questi occhi non standard, sfruttando effetti mai usati prima oppure nuovi materiali per costruire i bersagli per le particelle Wimp. Un esempio sono i gas nobili liquefatti (come l'argon o lo xenon), che possono essere usati come bersaglio per le Wimp. Tonnellate di argon o xenon liquido contenuti in frigoriferi speciali (detti "criostati") sarebbero in grado di fermare le Wimp. Come in un urto fra palle di biliardo, le Wimp si scontrerebbero con i nuclei del bersaglio. Questi nuclei si metterebbero in moto dopo l'urto, ma sarebbero subito fermati dalle molecole circostanti. Così facendo - grazie a una importante proprietà dei liquidi nobili -

vengono prodotte luce e ionizzazione, visibili con le tecniche standard sopra menzionate.

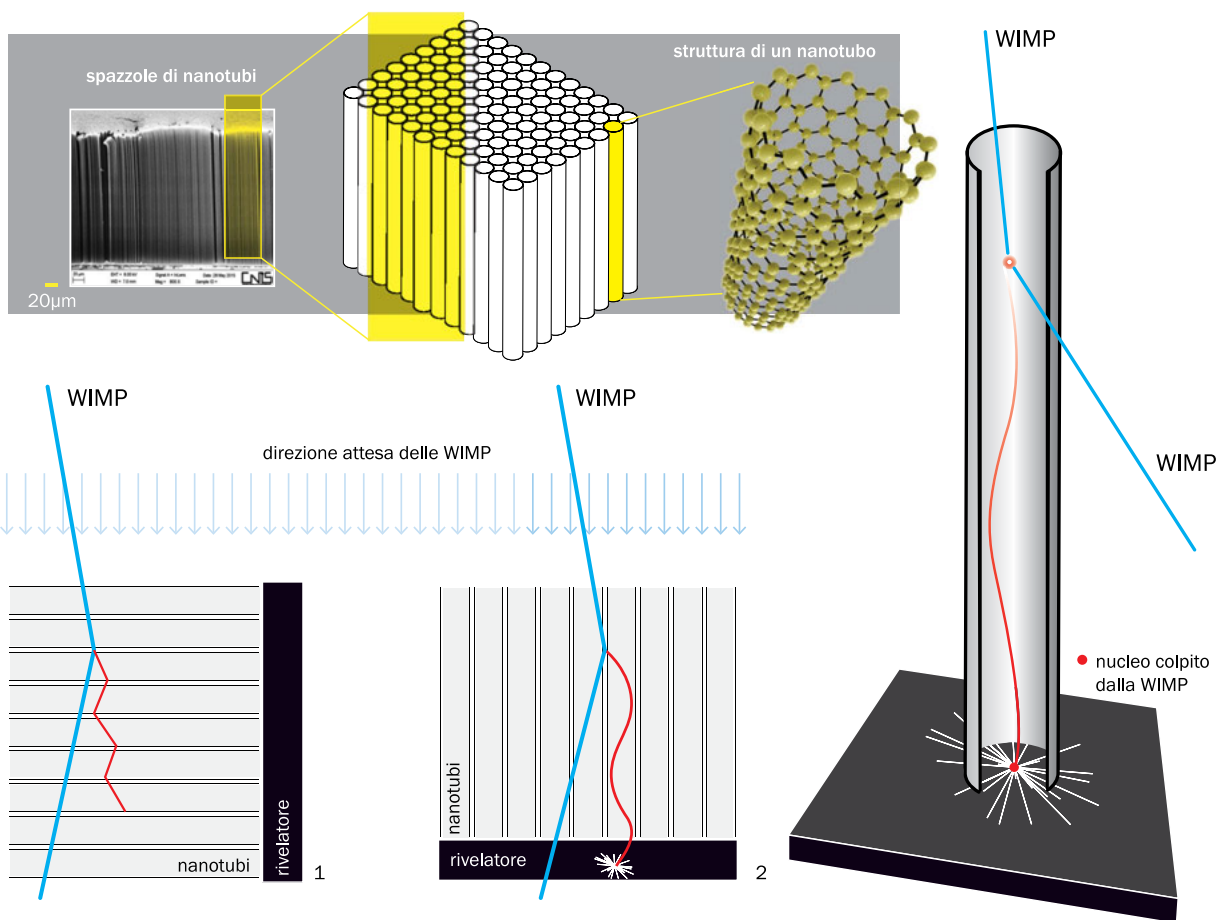
Questo tipo di occhio freddo e pesante è uno dei rivelatori innovativi che si stanno preparando, chiamato Dark Side (vd. fig. d a p. 8, ndr), e che nei prossimi anni sarà usato nei laboratori sotterranei del Gran Sasso dell'Infn per cercare di vedere le Wimp della via Lattea. Un progetto ambizioso, in cui l'Infn è coinvolto e che cerca di accumulare in un criostato almeno 20 tonnellate di argon liquido. Visto che le Wimp sono così sfuggenti, tanti più bersagli si assemblano, tanto più possiamo sperare di vedere l'urto della Wimp. Tuttavia, raccogliere tutte queste tonnellate di argon (in natura presente principalmente come isotopo stabile, l'argon-40) non è cosa facile. Soprattutto perché esiste un isotopo radioattivo, l'argon-39, che produrrebbe un segnale molto simile a quello delle Wimp nel rivelatore Dark Side. L'argon-39 va pertanto eliminato. Per farlo si sta progettando una torre di distillazione alta come la torre Eiffel, che verrà costruita in una miniera dismessa del Sulcis (in Sardegna), dove possiamo purificare tutto l'argon-40 che ci serve (vd. fig. b)!

La fantasia dei ricercatori però è fervida e porta ad azzardare di poter usare persino materiali, le cui proprietà non sono ad oggi perfettamente note. Un esempio sono i nanotubi di carbonio.

Un nanotubo è letteralmente un tubo, la cui superficie è uno strato monoatomico con un diametro di qualche decina di nanometri e alto centinaia di micrometri (vd. in Asimmetrie n. 12 p. 46, ndr). È perciò diecimila volte più sottile di un capello umano e solo duecento volte più grande di un atomo. Oggi si sanno crescere vere e proprie "spazzole" di nanotubi allineati. Queste spazzole allineate e orientate lungo la direzione in cui



b.
Vista dall'alto della miniera di Monte Sinni, nel bacino carbonifero del Sulcis, in Sardegna, dove si sta progettando una torre di distillazione alta come la torre Eiffel che permetterà di separare l'aria nei suoi componenti fondamentali (da cui il nome del progetto, Aria). Uno di questi componenti, l'argon-40, senza le contaminazioni dell'isotopo instabile argon-39, permetterà lo sviluppo dell'esperimento Dark Side nei Laboratori del Gran Sasso.



le Wimp si muovono, potrebbero guidare fuori dalla spazzola i nuclei messi in moto negli urti con le Wimp stesse. Fuori dalla spazzola i nuclei possono essere visti con metodi più tradizionali, come i rivelatori con gas (vd. fig. c). Il grande vantaggio che avrebbe questa “spazzola-bersaglio” è che se allineata lungo una direzione diversa di quella delle Wimp della via Lattea, anziché fare uscire i nuclei, li intrappolerebbe. Questa informazione sarebbe davvero cruciale, ci consentirebbe di capire se le Wimp vengano effettivamente dalla direzione da cui ce le aspettiamo. Nonostante

l’idea sia attraente, non sappiamo se davvero funzionerà. Si fonda, di fatto, su un fenomeno nuovo, mai osservato prima, di interazione fra la materia dei nuclei messi in moto e la materia con la struttura geometrica ordinata dei nanotubi. Stuzzica la nostra fantasia e dimostrare che i nuclei vengono trasmessi dai nanotubi sarebbe interessante di per sé. E potrebbe essere la soluzione per vedere da dove vengono le Wimp. È questo il destino della scienza, esplorare l’ignoto. Ma ci servono occhi nuovi, che dobbiamo ancora inventarci.

c. Schematizzazione dell’utilizzo dei nanotubi per identificare la direzione di provenienza delle Wimp. Nel box grigio a sinistra è visualizzata una foto micrometrica di una spazzola di nanotubi, al centro la rappresentazione schematica dei nanotubi e a destra la struttura atomica di uno di essi. In basso a sinistra, lo schema di una sezione di spazzole di nanotubi:

- 1) Se la Wimp attraversa i nanotubi in direzione ortogonale ad essi e urta un nucleo del materiale che costituisce i nanotubi, questo urterà a sua volta gli altri nuclei dei nanotubi e si fermerà rapidamente.
- 2) Se la Wimp attraversa i nanotubi lungo il loro asse, l’urto con un nucleo indirizzerà quest’ultimo nella direzione del nanotubo. Il campo elettrico degli altri nuclei incanalerà il nucleo sbalzato nella direzione del nanotubo, permettendogli di arrivare al rivelatore.

A destra, illustrazione tridimensionale della canalizzazione del nucleo di un nanotubo colpito dalla Wimp.

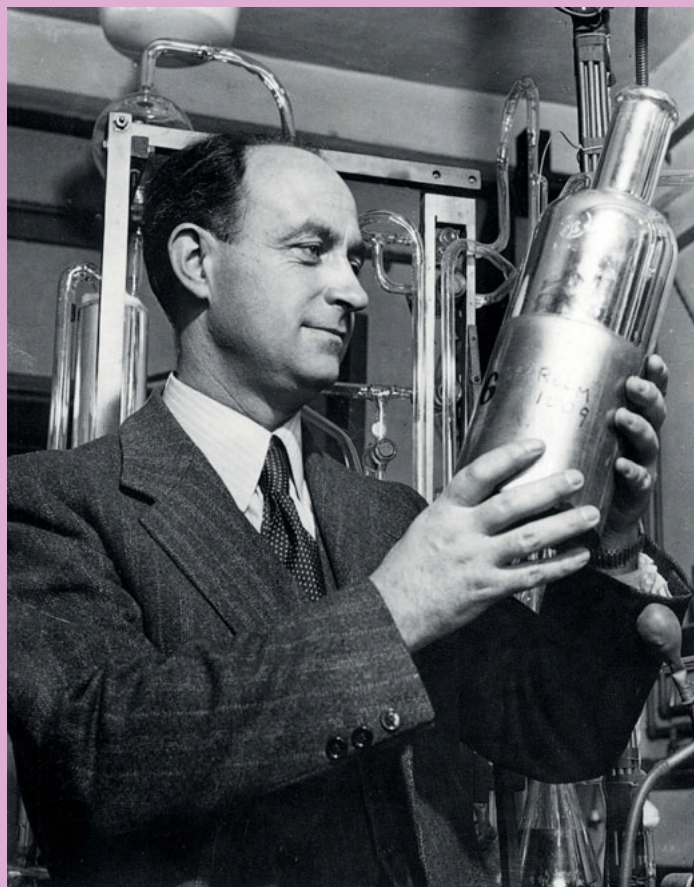
Biografia

Gianluca Cavoto è un ricercatore dell’Infn di Roma. Si occupa di fisica sperimentale delle particelle elementari. Lavora a un progetto di manipolazione di fasci di particelle intrappolate in cristalli piegati, finanziato con un *grant* europeo dello European Research Council (Erc).

Elettroni in scia

Nuove tecniche di accelerazione

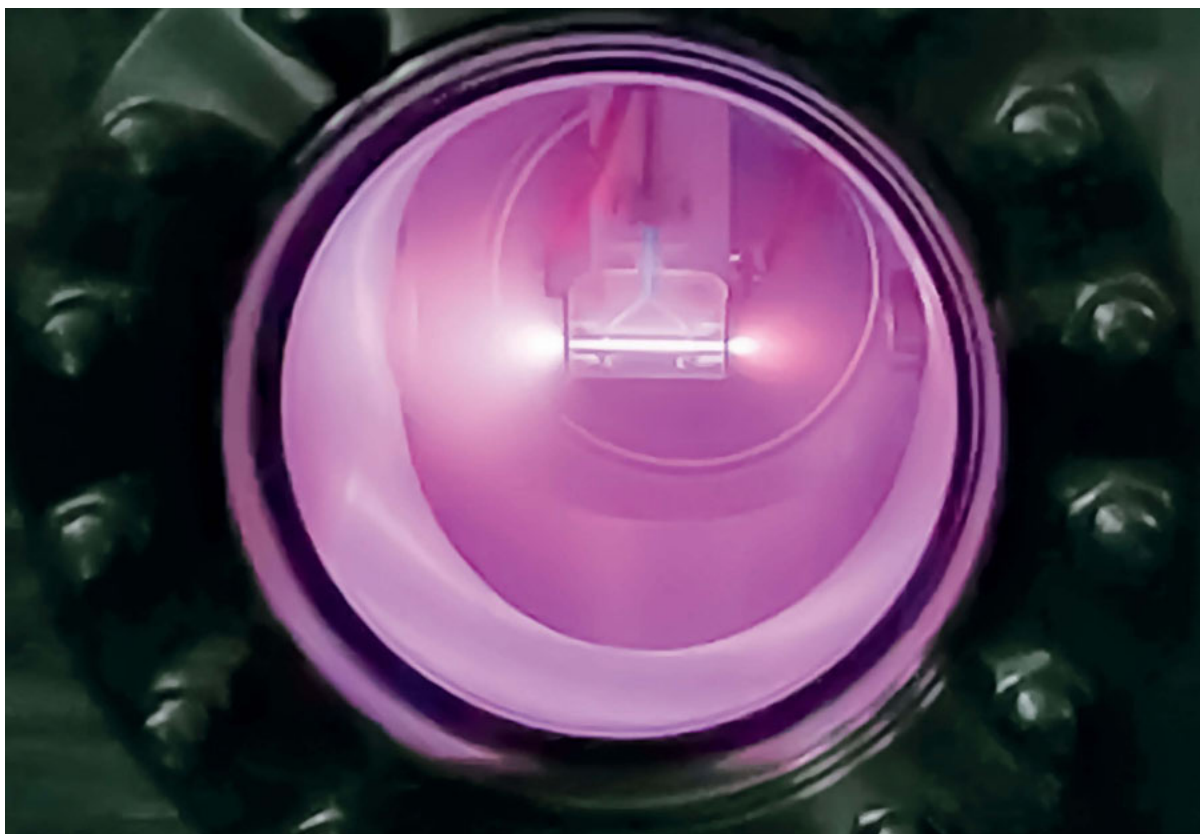
di Massimo Ferrario



a.
Enrico Fermi, in una foto della fine
degli anni '30.

“Cosa possiamo imparare dagli acceleratori di alta energia?”, si chiedeva Enrico Fermi in una delle sue ultime conferenze, nel lontano 1954. Estrapolando la tecnologia sviluppata per il sincrotrone Cosmotron, entrato in funzione nel 1953 a Brookhaven per accelerare protoni che andavano a interagire contro un bersaglio fisso, immaginava l'utilizzo di un anello che potesse circondare l'intero pianeta Terra per raggiungere un'energia nel centro di massa di 3 TeV (vd. in *Asimmetrie* n. 15 p. 9, ndr). Solo otto anni dopo, Ada, il prototipo dell'anello collisore di particelle e antiparticelle proposto da Touschek e costruito a Frascati nel 1961, cambia completamente il paradigma: la collisione di due fasci di uguale energia mette a disposizione nel centro di massa un'energia enormemente superiore a quella che si può ottenere facendo collidere uno solo dei due fasci contro un bersaglio fisso. Questo ha permesso di costruire acceleratori di dimensioni molto ridotte ed è grazie allo sviluppo di questa idea che l'acceleratore Lhc raggiunge oggi 14 TeV nel centro di massa, in un anello di “soli” 27 km.

Una situazione analoga si sta ripresentando ora sotto vari aspetti. Si stima che ci siano oltre trentamila acceleratori di particelle funzionanti nel mondo, da quelli utilizzati per la terapia dei tumori negli ospedali agli acceleratori giganti nei laboratori internazionali di fisica delle particelle utilizzati per indagare i segreti del nostro universo. Gli acceleratori hanno anche trovato una vasta gamma di applicazioni nel campo della scienza dei materiali (ad esempio, nella diffrazione di elettroni per gli studi di cristallografia), ingegneria (studio dei difetti strutturali dei macchinari), architettura (prove di stabilità degli edifici) o per il patrimonio culturale (analisi non invasiva di artefatti). Attualmente, un'ulteriore diffusione degli acceleratori di particelle è fortemente ostacolata dalle loro dimensioni e dal loro costo elevato, difficilmente giustificabile anche per i grandi laboratori di ricerca, per non parlare dei costi di manutenzione e operazione. Se le dimensioni di tali macchine potessero essere ridotte in modo significativo, si conterrebbero al tempo stesso i costi e le difficoltà operative.



Il limite principale da superare risiede proprio nel metodo utilizzato per accelerare le particelle. Quello più diffuso si basa sulle “cavità risonanti a radiofrequenza”, costituite da una struttura metallica all'interno della quale le particelle vengono accelerate da un campo elettrico oscillante a una precisa frequenza di risonanza. Lo stato dell'arte delle cavità permette di raggiungere agevolmente campi acceleranti dell'ordine di 30 milioni di Volt al metro (30 MV/m) in strutture risonanti a 1-3 gigahertz (GHz). A campi più alti però le strutture metalliche che confinano la struttura accelerante tendono rapidamente a danneggiarsi: cominciano a emettere elettroni che producono catastrofiche scariche che ne danneggiano le superfici interne. Una legge empirica (il cosiddetto “limite di Kilpatrick”) indica una possibile soluzione: le superfici interne di una struttura accelerante sopportano campi acceleranti maggiori all'aumentare della frequenza di oscillazione del campo. Attualmente, a

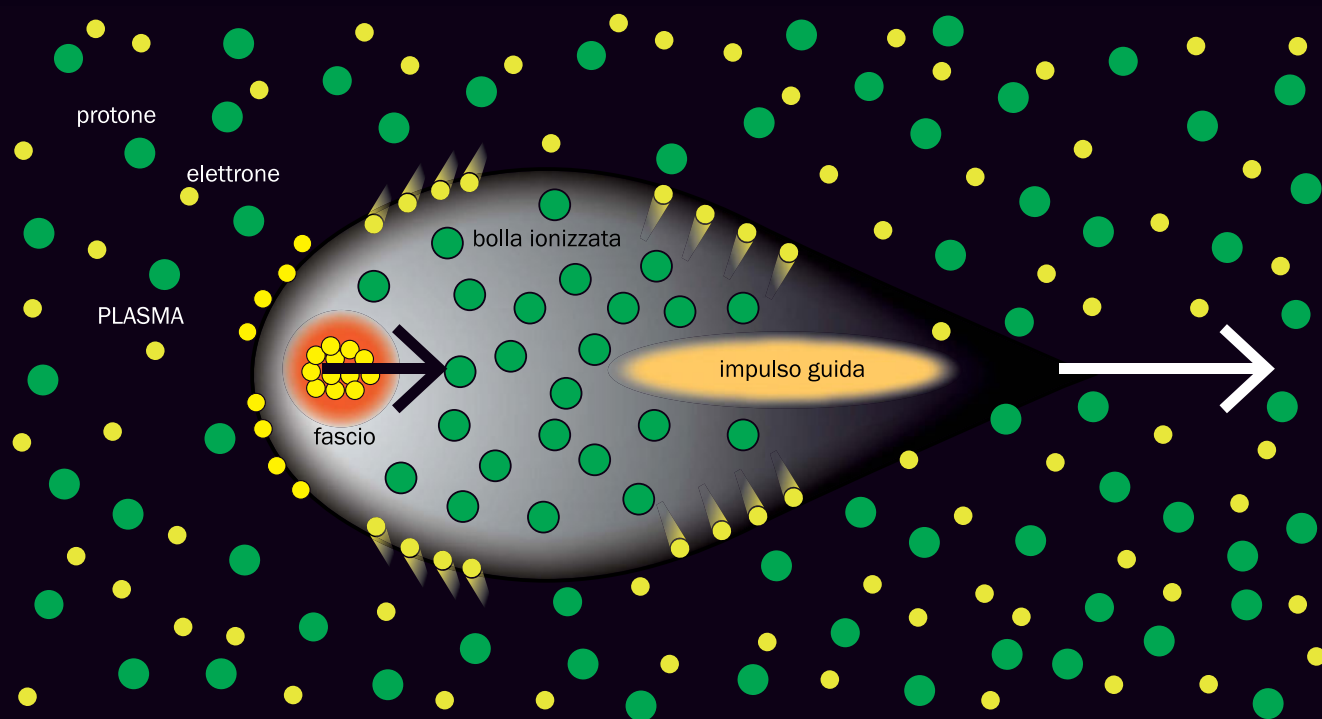
frequenze più alte, intorno ai 12 GHz, si raggiungono campi fino a 100 MV/m. Con strutture a 130 GHz si potrebbe arrivare a 300 MV/m. Ma le dimensioni delle cavità risonanti a radiofrequenza sono confrontabili con la lunghezza d'onda, inversamente proporzionale alla frequenza di risonanza, per cui per aumentare quest'ultima le dimensioni delle strutture acceleranti devono diminuire, ponendo problemi di fabbricazione e di tolleranza meccanica non trascurabili. Per superare questa limitazione un enorme sforzo mondiale è in corso verso lo sviluppo di nuove tecniche di accelerazione “ad alto gradiente”, capaci cioè di sviluppare alti potenziali in spazi molto ridotti, p. es. di 100 MV/cm.

Gli acceleratori “a plasma” per elettroni (e positroni), ad esempio, sostituiscono le pareti metalliche delle strutture a cavità risonanti a radiofrequenza convenzionali con un gas ionizzato. In questo modo, non esiste più una parete metallica soggetta a danneggiamento.

b.
La stessa energia guadagnata in una cavità risonante lunga 3 m potrebbe essere guadagnata in un canale di plasma lungo 3 cm come quello mostrato nella foto.

Piccolo è meglio

1.
Schema di funzionamento di un
acceleratore al plasma.



Il principio di funzionamento di un acceleratore a plasma può essere spiegato abbastanza facilmente (vd. fig. 1). Un impulso guida viene iniettato in un gas ionizzato (il "plasma"). Gli elettroni del plasma vengono allontanati dalla loro posizione di equilibrio e cominciano a oscillare ortogonalmente all'impulso guida, con una frequenza caratteristica detta "frequenza di plasma". Nella scia dell'impulso guida si forma temporaneamente una bolla, occupata quasi esclusivamente dagli ioni di carica positiva che generano elevati campi elettrostatici.

Un fascio di elettroni iniettato nella scia dell'impulso guida è soggetto a campi acceleranti di decine di GV/m. L'impulso guida può essere un fascio laser ultra-corto (della durata di circa 30 femtosecondi, ossia 30×10^{-15} s) e ad alta potenza (dell'ordine di 100 terawatt) oppure un fascio di particelle ad alta carica (dell'ordine del nanocoulomb, corrispondente a circa 5×10^9 elettroni). Nel primo caso si parla di *laser wake field acceleration* (Lwfa), nel secondo di *particle wake field acceleration* (Pwfa).

Dalla prima formulazione dell'idea di un acceleratore a plasma, proposta da Toshiaki Tajima e John M. Dawson nel 1979, molta strada è stata fatta. Campi acceleranti fino a 200 GV/m sono stati raggiunti sperimentalmente (in particolare anche nei Laboratori di Frascati nell'esperimento Sparc_Lab) e utilizzati per accelerare elettroni e positroni in varie configurazioni. I risultati più importanti negli ultimi anni sono stati ottenuti a Berkeley, con la tecnica del Lwfa (vd. approfondimento) utilizzando un laser da 300 TW per accelerare elettroni fino a 4,2 GeV in soli 9 cm di plasma. Nel laboratorio Slac (a Stanford, in California), invece, utilizzando la tecnica del Pwfa (vd. approfondimento), è stato utilizzato un

fascio di 3×10^9 elettroni di 40 GeV per eccitare il plasma, dimostrando la possibilità di accelerare sia elettroni che positroni. Gli elettroni hanno guadagnato 1,6 GeV in una colonna di plasma di circa un metro di lunghezza e i positroni hanno superato i 3 GeV. In particolare, per raggiungere energie confrontabili con quelle in uso oggi, p.es. i 13 TeV di Lhc, sarebbe necessario accodare una serie di stadi acceleranti al plasma. Ma la distribuzione angolare ed energetica delle particelle all'uscita di ciascuno stadio, ad esempio, non è - allo stato dell'arte - compatibile con quella richiesta in ingresso dello stadio successivo. Al fine di dimostrare la possibilità di utilizzare i fasci di elettroni

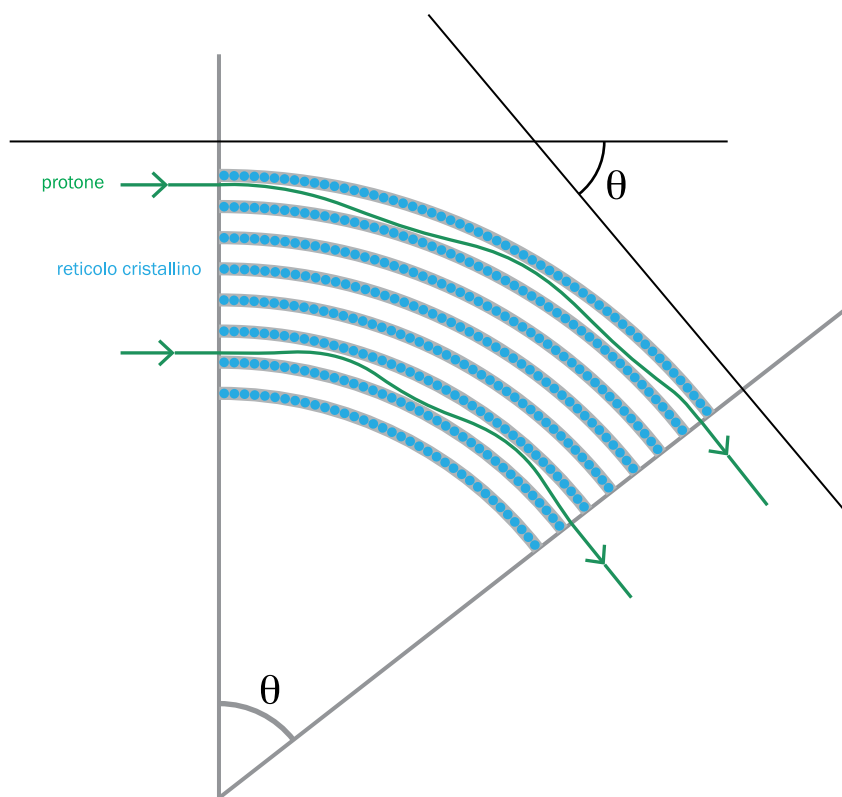
accelerati con le nuove tecniche a plasma è stato recentemente lanciato un progetto europeo denominato Eupraxia, con la partecipazione di 16 istituti, tra cui anche l'Infn con il gruppo Sparc_Lab di Frascati. L'obiettivo della collaborazione Eupraxia è di progettare una sorgente di luce di sincrotrone di nuova generazione basata sul *free electron laser* (vd. in Asimmetrie n. 6 p. 40) e pilotata da un acceleratore a plasma di alta qualità. Tale sorgente dovrebbe poter operare negli anni 2020 per fornire fasci di raggi X a esperimenti pilota. La capacità di produrre fasci di alta qualità e affidabilità renderebbe questa tecnologia appetibile anche per progettare macchine per la fisica delle alte energie.

Ma l'accelerazione ad alto gradiente non è l'unico aspetto oggetto di indagine. Un acceleratore super compatto deve poter contare anche su sistemi di focalizzazione e deflessione del fascio efficienti e di dimensioni contenute. Notevoli risultati sono stati raggiunti con le "lenti a plasma". Con questa tecnica si sfruttano gli alti campi trasversi presenti nella bolla di plasma, per focalizzare i fasci a dimensioni anche sub-micrometriche in pochi centimetri di plasma. Una possibilità non trascurabile anche per ridurre le dimensioni (dalla scala dei chilometri a quella dei metri) del sistema di focalizzazione finale di un acceleratore lineare. Sperimentalmente sono già state verificate le proprietà del plasma di focalizzare il fascio fino a dimensioni trasverse di una decina di micron. Per quanto riguarda la deflessione trasversa dei fasci, un importante risultato è stato raggiunto recentemente al Cern dalla collaborazione internazionale Ua9, alla quale partecipa anche l'Infn con la tecnica del *crystal channelling*. Quando una particella carica incide sulla superficie di un cristallo nella direzione del reticolo cristallino, viene deflessa dagli alti campi elettrostatici presenti nel cristallo. Piegando il cristallo in modo opportuno il fascio di particelle può essere "canalizzato" in modo controllato. Una tecnica utile sia per estrarre i fasci di particelle circolanti in un anello, sia per ripulire ("collimare") il fascio da aloni destinati a perdersi nella camera da vuoto. Con questa tecnica, usando cristalli piegati di silicio lunghi circa 2 mm, in Lhc sono stati collimati fasci di protoni da 6,5 TeV.

Come ci insegna la storia è difficile prevedere i tempi di realizzazione di una macchina costruita con nuove tecniche di accelerazione

senza incorrere in errore. Tuttavia è evidente un crescente sforzo internazionale di ricerca e sviluppo di nuove componenti che potrebbero rivoluzionare il mondo degli acceleratori. I casi discussi sono solo un piccolo ma rilevante esempio. Non ci resta che aspettare, come auspicava Fermi, "un colpo di fortuna, un balzo teorico oppure, più probabilmente, una combinazione tra duro lavoro, ingegno e un pizzico di buona fortuna".

c. Schema di funzionamento del *crystal channelling*. I nuclei del reticolo cristallino carichi positivamente generano alti campi elettrostatici che impediscono al protone entrante di avvicinarsi al reticolo, canalizzandolo in una direzione diversa da quella di ingresso. L'angolo di deflessione θ è stato ampliato a scopo illustrativo.



Biografia

Massimo Ferrario è ricercatore nei Laboratori Nazionali di Frascati (Lnf). Negli ultimi anni si è occupato principalmente di fisica dei fasci di alta brillantezza, laser ad elettroni liberi e di nuove tecniche di accelerazione. Attualmente è responsabile dell'esperimento Sparc_Lab presso i Lnf ed è responsabile nazionale del progetto Europeo Eupraxia.

Link sul web

http://www.lnf.infn.it/acceleratori/sparc_lab/

<http://www.eupraxia-project.eu/>

<http://bella.lbl.gov/>

https://portal.slac.stanford.edu/sites/ard_public/facet/Pages/default.aspx

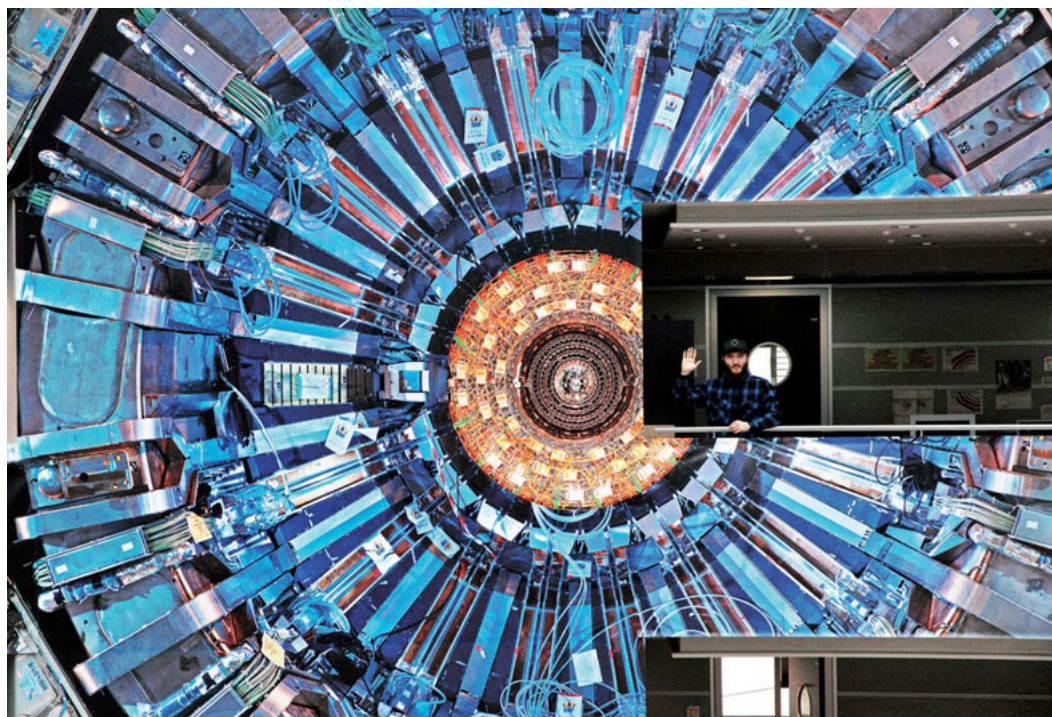
<http://w3.lnf.infn.it/alta-velocita/>

[as] con altri occhi

Il Drago dalla testa di fisica.

di Luca Pozzi

artista visivo



a.
Luca Pozzi in visita al Cern
nel *building 40* (marzo 2016),
l'edificio che ospita i ricercatori
dell'esperimento Cms, raffigurato
sui muri.

“La realtà non è come ci appare”, non è solo il titolo di uno dei libri più avvincenti di divulgazione scientifica che mi sia capitato di leggere, è anche un’affermazione precisa e chiara di ciò che spinge l’uomo oltre i propri confini immaginativi e le proprie pertinenze disciplinari. Rivela una consapevolezza orientata al dubbio e all’adattamento, piuttosto che alla rigidità e all’autocelebrazione. Che si tratti di fisica, musica, arte, biologia, letteratura o capoeira, non fa alcuna differenza. Il segreto è immaginare nuovi incastri, sondarli e sperimentarli con il più congeniale “linguaggio” a propria disposizione, oppure reinventandolo. Io lo visualizzo come una specie di Drago dalla testa di fisica delle particelle, con gli artigli di cera traslucida alla Medardo Rosso, la coda spazialista, il cuore di gravità quantistica, gli occhi di cosmologia multimessaggera e le ali multicolori degli angeli della Madonna del Parto di Piero della Francesca. Per questo fatico a definirmi un artista visivo, la mia ricerca non è solo mia e la “grammatica” che uso non

esisterà per sempre così come la conosco oggi. La realtà non si ferma alle mie convinzioni e alle nostre convenzioni, non è composta solo di ciò che posso esperire ma da molto di più. Intuire cosa sia questo valore aggiunto è ciò che mi ha spinto ad approfondire e diversificare il mio linguaggio, a connettere le visioni di persone straordinarie e campi di ricerca diversi. Ho frequentato il gruppo della gravità quantistica a *loop* (vd. in *Asimmetrie* n. 17 p. 9, ndr) per accettare l’idea, grazie a Carlo Rovelli, Abhay Ashtekar, Laurent Freidel, Daniele Oriti e molti altri, che persino lo spaziotempo possa avere una natura emergente e non esista a priori. Ho coinvolto Tiziano Camporesi, Silvia Maselli e Michael Hoch dell’esperimento Cms del Cern di Ginevra nel mio ultimo progetto al Museo Ettore Fico di Torino, per celebrare, in un museo d’arte contemporanea, la scoperta del bosone di Higgs. Visitare l’esperimento Virgo nell’anno della scoperta delle onde gravitazionali è stato come vedere Cezanne al lavoro nel suo studio di Aix-en-Provence nel 1877.

b.
La mostra "Detectors" di Luca Pozzi nella Galleria Federico Luger di Milano nel 2015.



Le camere pulite di Pisa, dove vengono creati i componenti più sofisticati di esperimenti come il telescopio Fermi, mi sono apparsi invece come un miracolo di rigore tecnologico, di virtuosismo manifatturiero e maestria giapponese Zen. L'arte non rappresenta la scienza, la scienza non ispira l'arte, la ricerca è semplicemente iperconnessa e il successo di una disciplina è il successo di tutti. Per me le proposte di Maxwell sull'elettromagnetismo e la serie delle cattedrali di Rouen di Monet sono un tutt'uno, così come il principio di indeterminazione di Heisenberg e Jackson Pollock, l'esperimento della doppia fenditura (vd. in *Asimmetrie* n.

12 p. 7, ndr) e Francis Bacon. Ricordo la risposta di Paul Dirac alla domanda su come facesse a scoprire nuove leggi della natura: "Giocando con le equazioni, diversi modi di scrivere la stessa equazione possono suggerire cose molto diverse tra loro sebbene logicamente equivalenti". In altre parole, combattendo il dogma con la creatività, la forma che emerge dal processo di trasformazione della grammatica può modificare profondamente la nostra coscienza. "La realtà non è come ci appare", gli "oggetti" non esistono. Se un bicchiere di vetro cade su un blocco di marmo, produrrà delle schegge di vetro ma se due particelle si scontrano alle alte

energie produrranno particelle del tutto nuove. Gli "oggetti" ci appaiono in un dato modo semplicemente perché diamo un nome a un insieme di condizioni che li rendono possibili, ma è una questione di gradi di libertà. Così come due protoni che si scontrano a 13 TeV possono produrre un bosone di Higgs che velocemente decade in quattro muoni, così due intuizioni possono produrre un'opera d'arte che subito decade in un sorprendente trattato di filosofia. Non sono schegge di vetro, sono nuova "materia" che sopravvive per un dato tempo in un dato luogo, sono *habitat* che influenzano la forma al fine di preservare l'informazione.

[as] selfie

Un cervello stampato in 3D.

di Gaia Bruzzo, Giulia Catto, Giacomo Piaser

Lo scorso 6 febbraio noi della 5ª liceo scientifico dell'istituto Brandolini Rota di Oderzo, ci siamo recati al Cnao (Centro Nazionale di Adroterapia Oncologica) di Pavia per eseguire l'esperimento progettato per la competizione *Beamline for Schools* (vd. in *Asimmetrie* n. 18 p. 33, ndr). L'iniziativa ci è stata proposta dall'Infn, che ha reso possibile la realizzazione concreta della nostra idea, in collaborazione con il prof. Giovanni Organtini della Sapienza Università di Roma. L'esperienza consisteva nell'esporre a un fascio di ioni carbonio un modello tridimensionale di cranio e cervello, realizzato grazie a una stampante 3D, per simulare un trattamento adroterapico. La stampante è stata costruita da Indrit, un nostro compagno di classe che ha il pallino del "fai da te" e che per questo funge anche da "tecnico" a scuola, per la quale aggiusta tutti gli strumenti che hanno bisogno di qualche intervento di manutenzione. Il passaggio delle suddette particelle è stato registrato da apposite pellicole "radiocromiche", speciali lastre fotografiche che hanno la

proprietà di annerire nei punti attraversati dalle particelle, posizionate in precedenza tra le "fette" in cui era stato suddiviso l'encefalo.

Si è voluto evidenziare la presenza del picco di Bragg, ovvero il punto di massima intensità di azione degli ioni, in relazione alla profondità e alle caratteristiche dei tessuti attraversati. L'adroterapia sfrutta questa peculiarità per sconfiggere alcune masse tumorali localizzate in luoghi altrimenti difficili da raggiungere attraverso altre tecniche radioterapeutiche (vd. anche in *Asimmetrie* n. 9 p. 32, ndr).

È sicuramente stata un'occasione irripetibile e unica nel suo genere, che ci ha affascinato e ispirato. Ci sentiamo grati nei confronti di coloro che l'hanno resa possibile. Grazie all'aiuto delle professoressa Katia Vittor e Catia Parolin abbiamo avuto l'opportunità di approfondire il nostro bagaglio culturale, confrontandoci con brillanti esperti del settore che ci hanno accompagnati nel nostro piccolo viaggio all'interno del mondo della fisica medica.



a.
I ragazzi della 5° a.s. 2015-16 dell'Istituto Brandolini Rota di Oderzo con il modello di cranio da loro ideato per effettuare l'esperimento.

[as] spazi

Inseguendo i neutrini.

di Francesca Scianitti



a.
Celebrazione del passaggio
della "particella fantasma"
con inaugurazione della targa
commemorativa di *Aganta Kairos*
in Madagascar nel 2012.

Aganta Kairos nasce dall'incontro casuale tra un artista plastico, Laurent Mulot, e uno scienziato, Thierry Stolarczyk, astrofisico del Cea (Commissariat à l'Energie Atomique et aux Energies Alternatives), che all'osservatorio Antares studia neutrini cosmici. L'intreccio dei linguaggi e delle curiosità di questi due diversi esploratori della conoscenza dà origine a un'opera d'arte visiva, scultorea, ma anche esposizione diffusa e insieme di "atti" artistici, che celebrano e testimoniano il passaggio dei neutrini attraverso il pianeta. È fonte d'ispirazione per l'artista il fatto che queste particelle generate da sorgenti cosmiche, chiamate anche "particelle fantasma" perché prive di carica e dotate di una massa piccolissima, attraversino luoghi, oggetti, persone sulla superficie terrestre, per proseguire indisturbate la loro corsa dalla parte opposta del

globo. Così, l'opera *Aganta Kairos* si inserisce nell'opera più complessa *Middle of Nowhere* (nel mezzo del nulla, vd. <http://mofn.org>), che integra le creazioni successive del lungo cammino dell'artista alla ricerca dell'invisibile, ed è costituita da installazioni di dimensioni variabili, composte da fotografie, video, sculture, suoni e ambienti *in situ*. Anche il titolo dell'opera, *Aganta Kairos*, trae ispirazione dall'elusività dei neutrini e dalla precarietà della loro rivelazione: "Kairos", figura mitologica greca, personaggio alato, è il messaggero delle opportunità che passano senza mai ritornare. "Aganta", invece, significa "prendere" nel linguaggio provenzale di La Seyne-sur-Mer. Ed ecco come nel dialogo tra lo scienziato, Stolarczyk, e l'artista, Mulot, nasce l'opera. Situato a 2500 metri di profondità al largo di Tolone, Antares rivela ogni giorno una mezza dozzina di muoni, particelle cariche che indicano il passaggio

dei neutrini. Sulla base dei dati raccolti da Antares nell'arco di cinque anni, Mulot e Stolarczyk scelgono quattro punti di probabile entrata dei neutrini, quattro zone che permettono di collegare quattro regioni oceaniche - indiana, artica, pacifica e antartica - al luogo abitato più vicino al telescopio Antares, l'Isola di Porquerolles (nel Mediterraneo, ovvero nella regione oceanica atlantica), che grazie ai neutrini diviene ideale punto d'incontro di popolazioni e tribù agli antipodi del pianeta. L'atto artistico è segnato dall'inaugurazione delle targhe commemorative, alla presenza degli abitanti del luogo, testimoni del passaggio della particella. Ma *Aganta Kairos* non si esaurisce con la celebrazione del "passaggio": in ogni punto scelto sono stati raccolti alcuni litri d'acqua, gli elementi fondanti della scultura a contagocce intitolata "Le cinque regioni oceaniche", traccia e punto di raccolta dell'itinerario dell'opera.

[as] illuminazioni

Scoperte in salotto.

Immaginate 100.000 computer sparsi sul pianeta, ognuno impegnato ad analizzare i dati relativi a un piccolissimo spicchio di cosmo e che partecipino a un'impresa scientifica straordinaria, i cui risultati sono attesi da migliaia di scienziati, come la ricerca delle onde gravitazionali. E immaginate infine che uno di questi computer sia nel vostro salotto.

È proprio così che funziona Einstein@home, un progetto lanciato nel 2005 al Max Planck Institute di Hannover, per cui migliaia di volontari in tutto il mondo mettono a disposizione il proprio computer, nelle ore in cui non lo utilizzano, per analizzare i dati registrati dall'interferometro Ligo negli Stati Uniti. Paola Leaci, oggi ricercatrice della Sapienza, Università di Roma, ha partecipato al progetto fino al 2014.

"In effetti - ci spiega - non c'è un singolo centro di calcolo, tra quelli che analizzano i dati degli interferometri gravitazionali, che abbia risorse di calcolo equivalenti a quella di questa grande rete di calcolatori distribuita sulla Terra". Se si pensa che il progetto è attivo da una decina di anni, il numero di volontari coinvolti - 100.000 persone, di cui 70.000 statunitensi e 30.000 nel resto del mondo, ma per lo più europei - è effettivamente molto alto. Dopo la prima rivelazione di un'onda gravitazionale, annunciata a febbraio 2016 dalla collaborazione Ligo-Virgo, molti nuovi volontari si sono aggregati al progetto, forse con la segreta speranza che a identificare la prossima onda fosse proprio il computer di casa loro. "I due segnali rivelati sinora da

Ligo - continua la ricercatrice - sono stati prodotti dalla fusione di due buchi neri di grande massa. Dunque sono brevi (della durata di pochi millisecondi) e più intensi rispetto a quelli che cerchiamo con Einstein@home. Infatti, le sorgenti che ci si aspetta di rivelare con tale progetto sono pulsar, ovvero particolari stelle di neutroni rotanti, isolate o in sistemi di stelle binarie, che emettono segnali deboli e continui (vd. p. 17, ndr)".

L'analisi dei dati in questo caso richiede di discriminare il rumore di fondo con ancora maggiore attenzione e algoritmi robusti e differenti, quindi ingenti risorse di calcolo. Il contributo di privati cittadini alla causa della scienza diviene allora decisivo, come in altri progetti di questo tipo, chiamati appunto di *citizen science*. Nel caso di una ricerca così di frontiera gli scienziati però si sono preoccupati di proteggere le informazioni trasmesse ai computer privati, in modo che nessuno possa manometterli o impadronirsi di un'eventuale scoperta. "Gli stessi dati - conclude Leaci - vengono analizzati da computer diversi, in modo da confrontarne i risultati. Questi inoltre sono prodotti in una forma criptata e decifrabile solo dagli scienziati del progetto". Se nel vostro computer dovesse prodursi un risultato significativo però sareste ringraziati nella relativa pubblicazione scientifica e invitati a una cerimonia di ringraziamento nel centro di Hannover. È un po' come vincere una lotteria, il cui premio è la soddisfazione di aver contribuito, e concretamente, a far avanzare la scienza. [Vincenzo Napolano]



Per aderire a Einstein@home: <https://einstein.phys.uwm.edu/>

**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



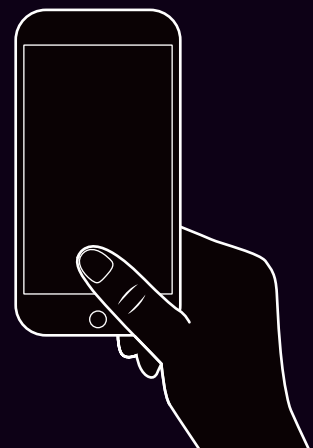
Sul sito **www.asimmetrie.it**
vengono pubblicate periodicamente
notizie di attualità scientifica.

Per **abbonarti gratuitamente** ad Asimmetrie 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