

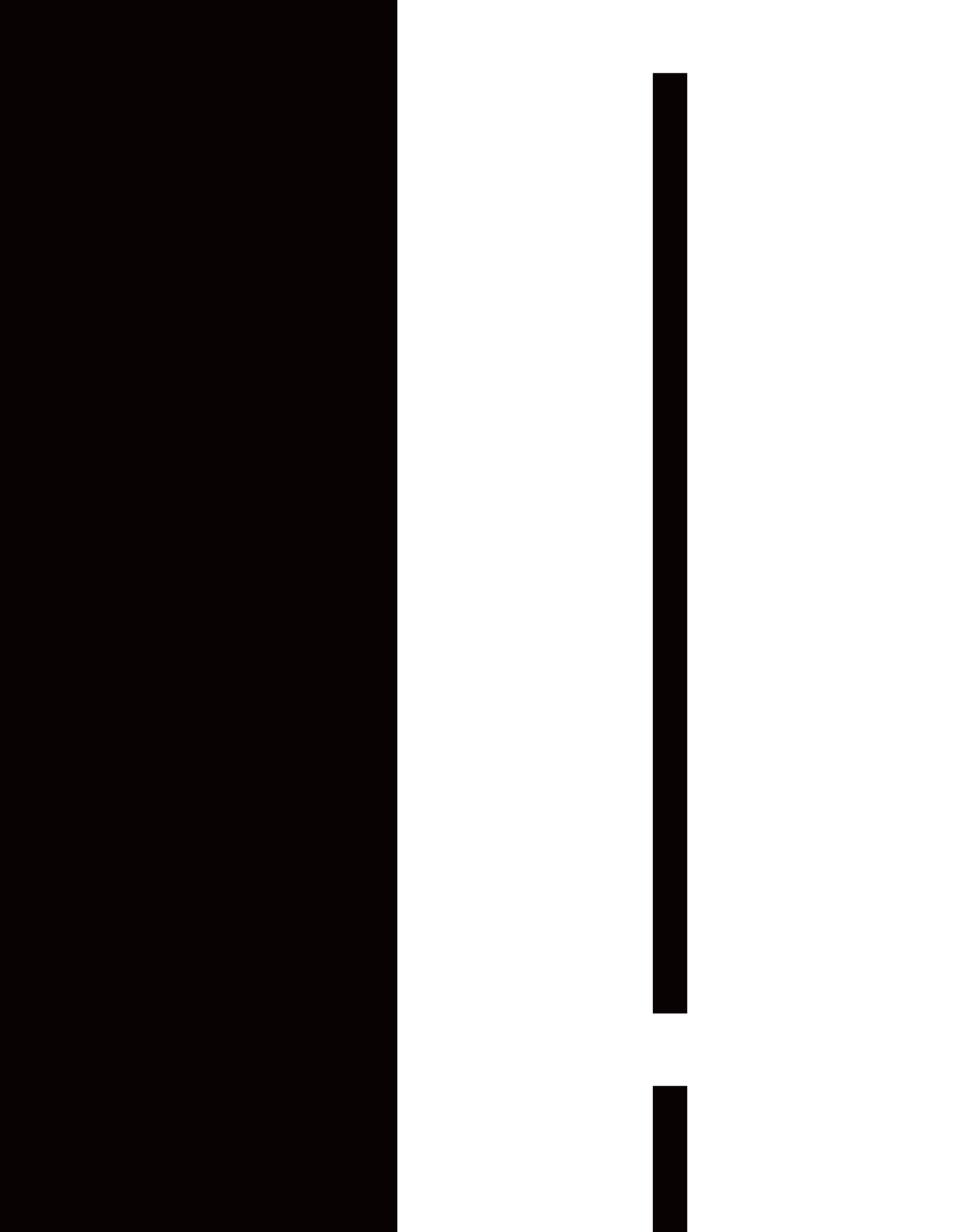


[massa]

anno 8 numero **14** / 4.13

asimmetrie

rivista semestrale dell'Istituto
Nazionale di Fisica Nucleare



asimmetrie

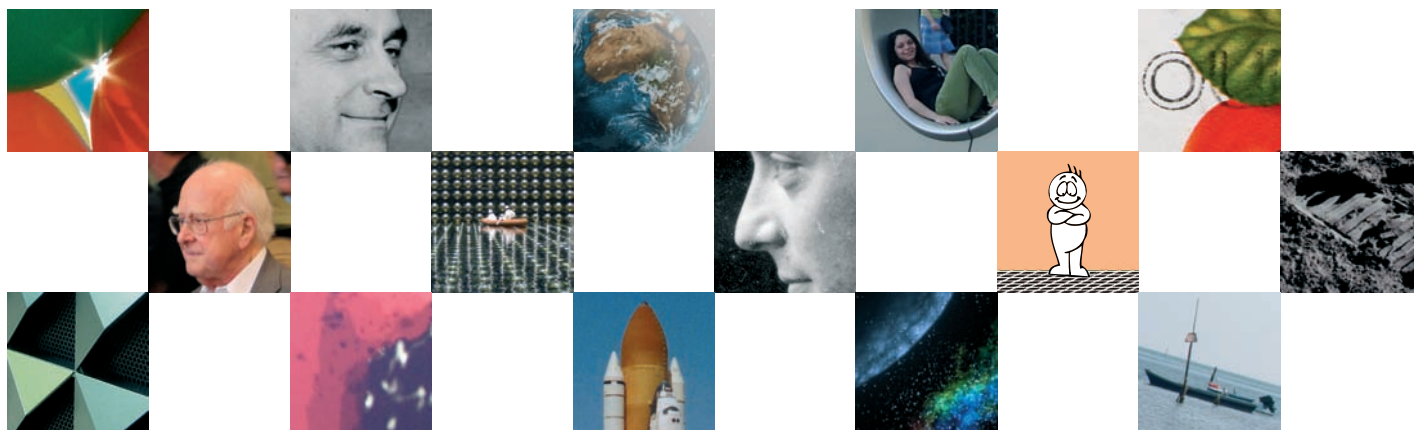
Cari lettori di Asimmetrie,

L'argomento trattato in questo numero è difficile, affascinante, con aspetti sfuggenti. Al liceo, i concetti di massa e peso procurano certamente qualche difficoltà interpretativa. Che cosa misuri una bilancia non è una domanda a risposta unica. Dipende dal tipo di bilancia. La massa corporea è una sottile angoscia della società moderna ed è un bel modo di definire la massa. Ma non importa dove siete, se sulla Terra, su Marte, in orbita intorno a un corpo celeste o immersi nell'acqua: la massa rimane quella, il peso no. Per dimagrire non aiuta fare viaggi interplanetari. Abbiamo imparato da una vasta campagna mediatica che la responsabilità della massa è dovuta al prof. Peter Higgs e all'introduzione del suo mitico bosone. Beh... scoprirete che è vero solo in una minuscola parte. La massa delle cose, di tutte le cose, dipende dall'energia di legame che tiene i quark insieme dentro a un protone. Uhm... la massa che dipende dall'energia? Ma sì: $E=mc^2$! Non è la formula più famosa della fisica forse?

Questo numero, poi, contiene una novità: prende il via, infatti, la rubrica *Illuminazioni*, dedicata a possibili percorsi didattici. La fisica che cerchiamo di raccontare in Asimmetrie è una fisica complicata, quasi impossibile da "sperimentare" nelle scuole. Ma l'esperimento, la misura sono il faro che guida ogni scienza. E allora la sfida, con le nostre *Illuminazioni*, sarà, di volta in volta, proporre un'esercitazione già collaudata o inventarne una nuova o, ancora, offrire guide ragionate all'uso del tanto materiale disponibile, dai libri a internet.

Buona lettura.

Fernando Ferroni
presidente Infn



asimmetrie

Rivista dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare

Semestrale, anno 8,
numero 14 aprile 2013

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

Eleonora Cossi
Vincenzo Napolano
Francesca Scianitti
Antonella Varaschin
Francesca Cuicchio
(infografica)

hanno collaborato

Stefano Borgani, Gianguido Dall'Agata,
Francesco Fidecaro, Francesca Gatti,
Gian Francesco Giudice, Umberto
Guidoni, Vittorio Lubicz, Maria Nicolaci,
Francesco Vissani

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

Istituto Arti Grafiche Mengarelli

stampa

IAG Mengarelli

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 aprile 2013.
Tiratura 15.000 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 14 e tutti i numeri
precedenti della rivista sono disponibili
anche online su www.asimmetrie.it

crediti iconografici

Foto copertina (stock.XCHNG) // foto p. 4
(stock.XCHNG); fig. 1 p. 5 ©Asimmetrie-Infn;
foto a p. 6 ©Borislav Marinic (depositphotos);
foto b p. 7 ©Karin Lizana; fig. c p. 9 ©Asimmetrie-
Infn // fig. p. 10-11 ©Asimmetrie-Infn // fig. a
p. 12 ©Asimmetrie-Infn; foto b p. 13 ©Nasa;
fig. c p. 14 ©Asimmetrie-Infn // foto a p. 15
©Emilio Segre Visual Archives // foto a p. 17
©Cern; foto b p. 18 ©Denis Balibouse, Reuters-
Contrasto // foto a,b pp. 22-23 ©Cern;
fig. 1 p. 24 ©Asimmetrie-Infn // foto a p. 25
©High Energy Accelerator Research Organization
(KEK); fig. b p. 26 ©Asimmetrie-Infn; fig. 1 p.
27 ©Asimmetrie-Infn; fig. 1 p. 30 ©Kamioka
Observatory, ICRR (Institute for Cosmic Ray
Research; figg. b,c pp. 30,31 ©Asimmetrie-
Infn; foto d p. 31 ©Infn // fig. a p. 32
©Asimmetrie-Infn // foto a p. 33 ©Nasa; fig b
p. 34 ©Asimmetrie-Infn // fig. a,b pp. 36,37
©Asimmetrie-Infn // foto a p. 38 ©Hubble; fig. b
p. 39 ©???; fig. 1 p. 40 ©Esa // foto a, b pp.
41-42 ©Nasa // foto a p. 42 ©Infn; fig. b p.
44 ©The KamLAND Collaboration // foto a, b
pp. 44-45 ©embrio.net // p. 47 foto di Marco
Stulle ©Roberto Pastrovicchio; copertine
©Marco Stulle; foto arpa ©Marco Stulle //
fig. p. 48 ©Cern/Asimmetrie-Infn.

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

In sostanza di Vincenzo Barone	4	[as] La pesantezza dei legami. di Giorgio Riccobene	32
[as] Di massa in massa.	10	[as] Masse estreme.	33
In caduta libera di Francesco Fidecaro	12	Nel buio dei buchi neri di Gianguido Dall'Agata	35
[as] radici Le masse nella teoria della relatività (1923). di Enrico Fermi <i>approfondimento di Vincenzo Barone</i>	15	Missing di Stefano Borgani	38
Dr. Boson, I presume? di Eleonora Cossi	17	[as] intersezioni Quando la massa non pesa. di Umberto Guidoni	41
[as] traiettorie Ricerca al buio. di Maria Nicolaci	20	[as] riflessi Messaggeri dal sottosuolo. di Francesca Scianitti	43
Ed è solo l'inizio di Gian Francesco Giudice	22	[as] spazi Il dono della massa. di Francesca Gatti	45
Particelle a colori di Vittorio Lubicz <i>approfondimento di Barbara Sciascia</i>	25	[as] In ricordo di Marco Stulle	47
Con passo leggero di Francesco Vissani	29	[as] illuminazioni Particelle sulla bilancia.	48

In sostanza

Breve biografia della massa

di Vincenzo Barone



Se “pesate” il numero di “Asimmetrie” che avete tra le mani, la bilancia segnerà poco più di 200 grammi. Sgombriamo il campo da un equivoco: mentre nel linguaggio comune le parole “peso” e *massa* si usano come se fossero sinonimi, in realtà si tratta di due grandezze fisiche differenti e solo la seconda è una caratteristica intrinseca degli oggetti (vd. approfondimento). Supponete ora di suddividere la rivista nei suoi elementi più minuti. Succederebbe, allora, una cosa strana: la sua massa si volatilizzerebbe! Ingenuamente potremmo pensare che sommando le masse di tutti i suoi

costituenti elementari si ottengano i 200 grammi misurati dalla bilancia, ma non è così.

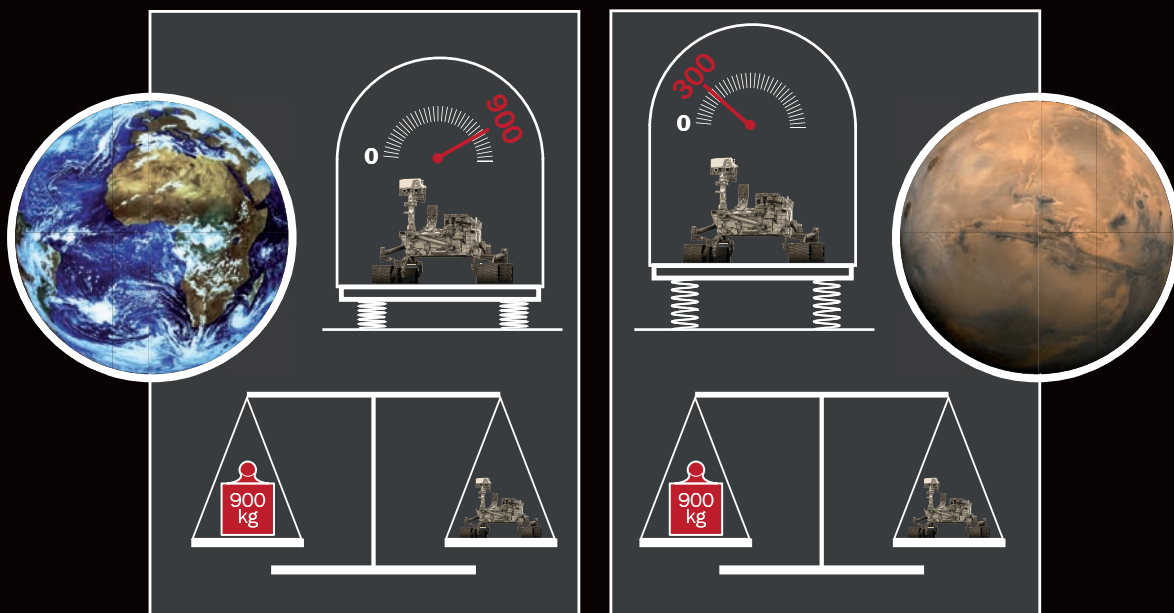
La massa di “Asimmetrie”, così come quella di tutta la materia ordinaria, è concentrata quasi interamente nei nuclei dei suoi atomi, fatti di protoni e neutroni. Questi, a loro volta, sono composti da *quark*, particelle elementari prive di struttura interna, attualmente considerate i costituenti ultimi della materia. Ma se mettessimo assieme le masse di tutti i quark contenuti nella rivista, la bilancia segnerebbe appena qualche grammo. Dov'è il resto della massa?

[as] approfondimento

Più magri su Marte?

1.

La massa e il peso di Curiosity sulla Terra (a sinistra) e su Marte (a destra). Una bilancia a piatti (in basso) confronta la massa di un oggetto con una massa campione: la massa di Curiosity sulla Terra e su Marte è di 900 kg. Una bilancia a molla (in alto) misura il peso di un oggetto e lo converte in massa, tenendo conto dell'attrazione gravitazionale del luogo in cui opera (e per il quale è stata tarata). Su Marte una bilancia di questo tipo, tarata sulla Terra, attribuirebbe a Curiosity la massa erronea di 300 kg (l'attrazione gravitazionale marziana è un terzo di quella terrestre). In realtà, è il peso di Curiosity su Marte a essere diverso.



Il rover Curiosity, che sta esplorando in questi mesi la superficie di Marte, ha una massa di 900 chilogrammi. Nel linguaggio comune diremmo che Curiosity “pesa” 900 chilogrammi. Dal punto di vista della fisica, però, questa espressione è impropria: massa e peso, infatti, sono due grandezze differenti. La massa di un oggetto è una quantità invariante, che non dipende dallo spazio e dal tempo: Curiosity ha la stessa massa sulla Terra e su Marte. Il peso, invece, è la forza di gravità che agisce su un oggetto, e, sebbene sia proporzionale alla massa, a differenza di questa può variare, perché dipende anche dall'attrazione gravitazionale cui è sottoposto l'oggetto. Sulla Terra, per esempio, il peso di un

corpo cambia (sia pure di poco) con l'altitudine: in cima all'Everest l'attrazione gravitazionale esercitata dal nostro pianeta è leggermente più debole che a livello del mare e, di conseguenza, i corpi pesano un po' meno. L'effetto sulla Terra è minimo, ma l'attrazione gravitazionale di Marte è circa un terzo di quella terrestre e quindi il peso di Curiosity su Marte è un terzo del suo peso sulla Terra! Essendo una forza, il peso può essere bilanciato da altre forze. È ciò che succede in una navetta spaziale orbitante, come lo Space Shuttle, dove gli astronauti vivono in “assenza di peso”, perché il loro peso è compensato e annullato dalla forza centrifuga dovuta al moto orbitale della navetta (vd. p. 41).

Fino a pochi decenni fa, non avremmo saputo rispondere (e, a dire il vero, non eravamo neanche consapevoli del problema). All'inizio degli anni settanta fu elaborata una teoria, la *cromodinamica quantistica* (QCD, Quantum ChromoDynamics), che descrive i protoni e i neutroni – i costituenti dei nuclei atomici – come composti da quark che interagiscono fortemente fra loro, scambiandosi delle particelle di massa nulla, chiamate *gluoni*. La QCD propone una risposta sorprendente alla domanda che ci siamo posti: la massa di protoni e neutroni non è dovuta alle masse dei quark, che sono molto piccole, ma all'*energia* dei quark e dei gluoni (vd. p. 25). È il “paradosso della massa senza massa”, come lo chiama Frank Wilczek, uno dei fondatori della QCD.

Ma cosa c'entra la massa con l'energia? Il fatto che la massa di un oggetto composto sia determinata non solo dalle masse, ma anche dalle energie dei suoi costituenti, è una conseguenza della *relatività speciale* di Einstein. Nel caso dei protoni e dei neutroni, poi, questo effetto è particolarmente cospicuo a causa dei fenomeni *quantistici* che caratterizzano le interazioni tra quark e gluoni.

Restano da spiegare le piccole masse dei costituenti indivisibili della materia, i quark e gli elettroni (che orbitano attorno ai nuclei atomici). Qual è l'origine delle masse delle particelle elementari? Oggi sappiamo rispondere anche a questo. Le masse in questione sono generate dall'accoppiamento delle particelle elementari con il *bosone di Higgs*. Si tratta quasi sicuramente della particella che nei mesi passati è stata rivelata dall'acceleratore più grande del mondo, il *Large Hadron Collider* (Lhc), al Cern di Ginevra, e che il 4 luglio scorso ha riempito le prime pagine di tutti i quotidiani.

La massa del mondo che ci circonda è, in definitiva, lo straordinario risultato di sottili effetti relativistici e quantistici. Come si è arrivati a capire tutto ciò?

La storia del concetto moderno di massa comincia con Newton e con i suoi *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica*, in cui vengono enunciate le leggi della dinamica classica. Per Newton, la massa è la costante di proporzionalità tra la forza e l'accelerazione, nella seconda legge della dinamica ($F=ma$). Più precisamente, questa è la *massa inerziale*, la grandezza che quantifica l'inerzia di un corpo, cioè la sua resistenza alle accelerazioni. Nei *Principia* la massa compare anche nell'espressione della forza di gravità, come misura dell'intensità dell'attrazione gravitazionale dei corpi, cioè come *massa gravitazionale*. In linea di principio, la massa inerziale e la massa gravitazionale sono grandezze distinte. Tuttavia, il fatto che i corpi cadano tutti con la stessa accelerazione, come osservò per la prima volta Galileo, indica che massa inerziale e massa gravitazionale sono uguali. Questa uguaglianza, verificata oggi con grandissima precisione (una parte su diecimila miliardi) (vd. p. 12), è, nella fisica classica, un dato di fatto privo di una giustificazione teorica. Una delle motivazioni della *relatività generale* di Einstein, del 1916, fu proprio quella di spiegare l'equivalenza di inerzia e gravitazione (il *principio di equivalenza*), unificando i due concetti. Einstein notò che, poiché le forze apparenti che compaiono nei sistemi di riferimento accelerati sono proporzionali alla massa inerziale e poiché questa è uguale alla massa gravitazionale, un osservatore può sempre eliminare, o simulare, gli effetti della gravità, ponendosi in un sistema di riferimento accelerato: per esempio, in un ascensore in caduta libera un osservatore non avvertirebbe la gravità ma fluttuerebbe come se fosse nello spazio vuoto. Nella relatività generale l'uguaglianza tra massa inerziale e massa

a.
Il concetto moderno di massa in fisica comincia con i *Principia* di Newton.





b.
Nel 2006 la famosa formula di Einstein $E=mc^2$ è diventata una scultura nel cosiddetto *Walk of Ideas* di Berlino, un'esibizione progettata dallo studio Scholz & Friends in occasione dei campionati mondiali di calcio in Germania. La velocità della luce c , come si vede, può fungere da comoda *chaise longue*.

gravitazionale non è più un accidente, ma la conseguenza necessaria di un principio generale, l'equivalenza fisica di tutti i sistemi di riferimento. Lo stesso principio prevede che la gravità si manifesti come una curvatura dello spaziotempo, tanto più accentuata quanto più densa è la materia che la produce. Il Sole, per esempio, incurva solo leggermente il "tappeto elastico" dell'universo (vd. fig. c p. 14), mentre una stella di neutroni – che ha una massa dell'ordine di quella solare, concentrata però in un raggio di pochi chilometri (vd. p. 33), lo incurva molto di più, e un buco nero lo incurva così tanto che niente di ciò che finisce in esso, neanche la luce, può riemergere (vd. p. 35).

Nell'altra teoria relativistica, quella speciale del 1905, Einstein aveva rivoluzionato la nozione di massa inerziale. Secondo la relatività speciale, la misura dell'inerzia di un corpo non è la sua massa, bensì la sua energia. Poiché nel limite di basse velocità le predizioni relativistiche si riducono a quelle newtoniane, quando un corpo è fermo la sua energia E (l'inerzia relativistica) deve coincidere con la massa m (l'inerzia newtoniana), salvo un fattore costante che garantisce le corrette dimensioni fisiche delle grandezze: in formula, $E=mc^2$, dove c è la velocità della luce nel vuoto (che, in base alla

teoria della relatività, è una costante fondamentale della natura). La massa, dunque, è una forma di energia, come si verifica in tutti quei processi nucleari e subnucleari – dalle reazioni di fissione e fusione nucleare agli urti negli acceleratori – in cui vi è conversione di massa in energia cinetica o, al contrario, materializzazione di energia cinetica in massa.

La relatività speciale ha altre due conseguenze di rilievo riguardanti la massa. La prima è quella che abbiamo già menzionato: la massa di un sistema composto è la somma delle masse e delle energie dei suoi costituenti. Ciò è esemplificato in modo estremo dalla massa dei protoni e dei neutroni, ma anche la massa dei nuclei è determinata, sia pure in piccola parte (l'1%), dalle energie interne di legame (quanto basta per far sì che la fissione di un grammo di uranio sprigioni decine di migliaia di chilowattora di energia). Il fenomeno caratterizza anche oggetti astrofisici, come le stelle di neutroni, la cui massa è per più del 10% energia di legame (gravitazionale, in questo caso). La seconda conseguenza della relatività speciale è che possono esistere particelle di massa nulla, che si muovono sempre alla velocità della luce: un esempio lampante (è proprio il caso di dirlo) è dato dai *fotoni*, le particelle di luce.

Da chilogrammi a elettronvolt

Le unità di misura della massa che usiamo quotidianamente, i grammi e i chilogrammi, non sono adatte alla fisica nucleare e subnucleare. In questo ambito della fisica, infatti, un grammo è una massa enorme: corrisponde, per avere un'idea, alla massa di un miliardo di miliardi di miliardi (10^{27}) di elettroni. L'unità di misura più usata dai fisici delle particelle si ottiene – secondo la famosa formula $E=mc^2$ – dividendo un'unità di misura dell'energia,

l'elettronvolt (eV), per il quadrato della velocità della luce (c^2): è l'elettronvolt/ c^2 (eV/ c^2), equivalente a poco più di 10^{-36} chilogrammi. I suoi multipli sono il MeV/ c^2 (un milione di eV/ c^2), il GeV/ c^2 (un miliardo di eV/ c^2) e il TeV/ c^2 (mille miliardi di eV/ c^2). Un elettrone, per esempio, ha una massa di circa mezzo MeV/ c^2 , mentre protoni e neutroni hanno una massa di poco inferiore al GeV/ c^2 . Tra le particelle elementari, le più leggere sono i *neutrini*, le cui

masse non sono note ma si stima siano inferiori al decimo di eV/ c^2 , la più pesante è il quark top, la cui massa (174 GeV/ c^2) è pari all'incirca alla massa di dieci molecole di acqua. Un'avvertenza: i fisici di solito omettono il c^2 nelle misure delle masse, che sono quindi espresse semplicemente in eV, MeV, GeV, TeV ecc. (ed è quello che faremo anche in questo numero di Asimmetrie).

La relatività speciale e la meccanica quantistica si combinano nelle teorie delle forze (o *interazioni*) fondamentali della natura. La forza elettromagnetica, la forza debole e la forza forte sono descritte dal cosiddetto *modello standard*, che si fonda su un principio di invarianza che i fisici chiamano *simmetria di gauge* (per approfondire vd. p. 4 in Asimmetrie n. 11, "Simmetrie"). Questa simmetria è preziosa perché determina precisamente la forma delle interazioni: basta imporre questa simmetria e la teoria è fatta (o quasi). La simmetria di gauge dell'elettromagnetismo, per esempio, prescrive il modo in cui le particelle cariche si attraggono o si respingono scambiandosi fotoni.

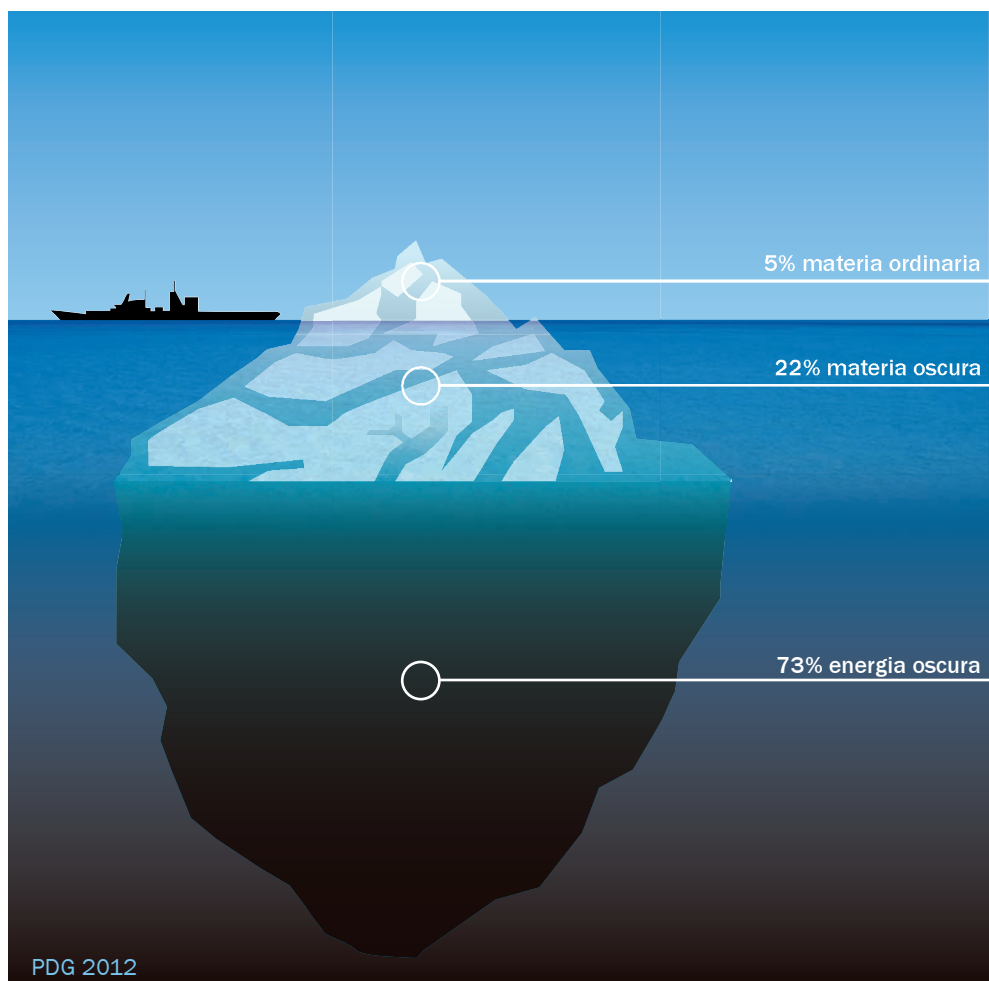
Analogamente, la simmetria di gauge della forza forte prescrive il modo in cui i quark interagiscono scambiandosi gluoni.

C'è però un problema: la simmetria di gauge del modello standard, che distingue tra destra e sinistra, è apparentemente incompatibile con qualunque massa. Essa stabilisce che sia le particelle che mediano la forza debole, i bosoni W e Z, sia le particelle elementari di materia (quark e leptoni) abbiano massa nulla. Un mondo così evanescente è ben lontano dalla realtà.

La soluzione del problema sta in un meccanismo teorico inventato nel 1964 da François Englert e Robert Brout e, indipendentemente, da Peter Higgs. Questo meccanismo prevede l'esistenza di un campo che pervade il vuoto, fornendo massa sia ai

bosoni W e Z sia alle particelle di materia.

Le eccitazioni quantistiche di questo campo rappresentano il cosiddetto bosone di Higgs (vd. p. 22). I fisici si sono dedicati per decenni alla caccia del bosone di Higgs, muovendosi, per così dire, al buio, dal momento che il modello standard non dà alcuna indicazione sulla massa di questa particella. Pochi mesi fa, finalmente, gli esperimenti Atlas e Cms, che lavorano in Lhc a Ginevra, hanno annunciato di aver scoperto una particella, di circa 125 GeV di massa, che sembra avere tutte le caratteristiche dell'agognato bosone. Abbiamo visto in che modo emergono le masse delle particelle che compongono la materia ordinaria: protoni, neutroni ed elettroni. Siamo dunque alla fine della storia della massa? Niente affatto. La massa di cui abbiamo finora rintracciato l'origine – quella visibile – rappresenta solo una piccola frazione (circa il 5%) della massa dell'universo. Varie evidenze osservative dimostrano che c'è una componente notevole di materia che non osserviamo, la *materia oscura* (vd. p. 38). Di essa si sa solo che probabilmente è costituita da particelle pesanti, stabili e debolmente interagenti. Non conosciamo al momento particelle di questo tipo, e molti pensano che "l'ingrediente segreto" della materia oscura possa essere una particella prevista da una nuova simmetria della natura, la *supersimmetria*, su cui Lhc sarà in grado di dire una parola decisiva nei prossimi anni. Ma non è ancora



C.
Paragonando l'universo conosciuto a un iceberg, ecco come apparirebbe suddiviso il suo contenuto di massa-energia: materia ordinaria, composta di elettroni, protoni e neutroni, materia oscura ed energia oscura.

tutto, perché a quanto sappiamo oggi solo un quarto della massa complessiva dell'universo è davvero massa: i restanti tre quarti sono – di nuovo Einstein! – energia. Si tratta della cosiddetta *energia oscura*, che causa l'espansione accelerata dell'universo e la cui natura è per ora del tutto sconosciuta. All'estremo opposto della scala cosmica, anche l'origine delle masse più piccole che conosciamo (quelle dei neutrini) è avvolta nel mistero (vd. p. 29). Per dar conto delle masse dei neutrini, il modello standard deve essere esteso, e questo può essere fatto in molti modi diversi. Lo stesso status dei neutrini è incerto: sono simili alle altre particelle di materia o sono particelle diverse, di un tipo ipotizzato molti anni fa da Ettore Majorana, con una massa peculiare? E ancora, com'è possibile che tra le masse delle particelle elementari più leggere, i neutrini, e la massa

della particella elementare più pesante, il quark top (174 GeV), ci sia un fattore di più di mille miliardi?

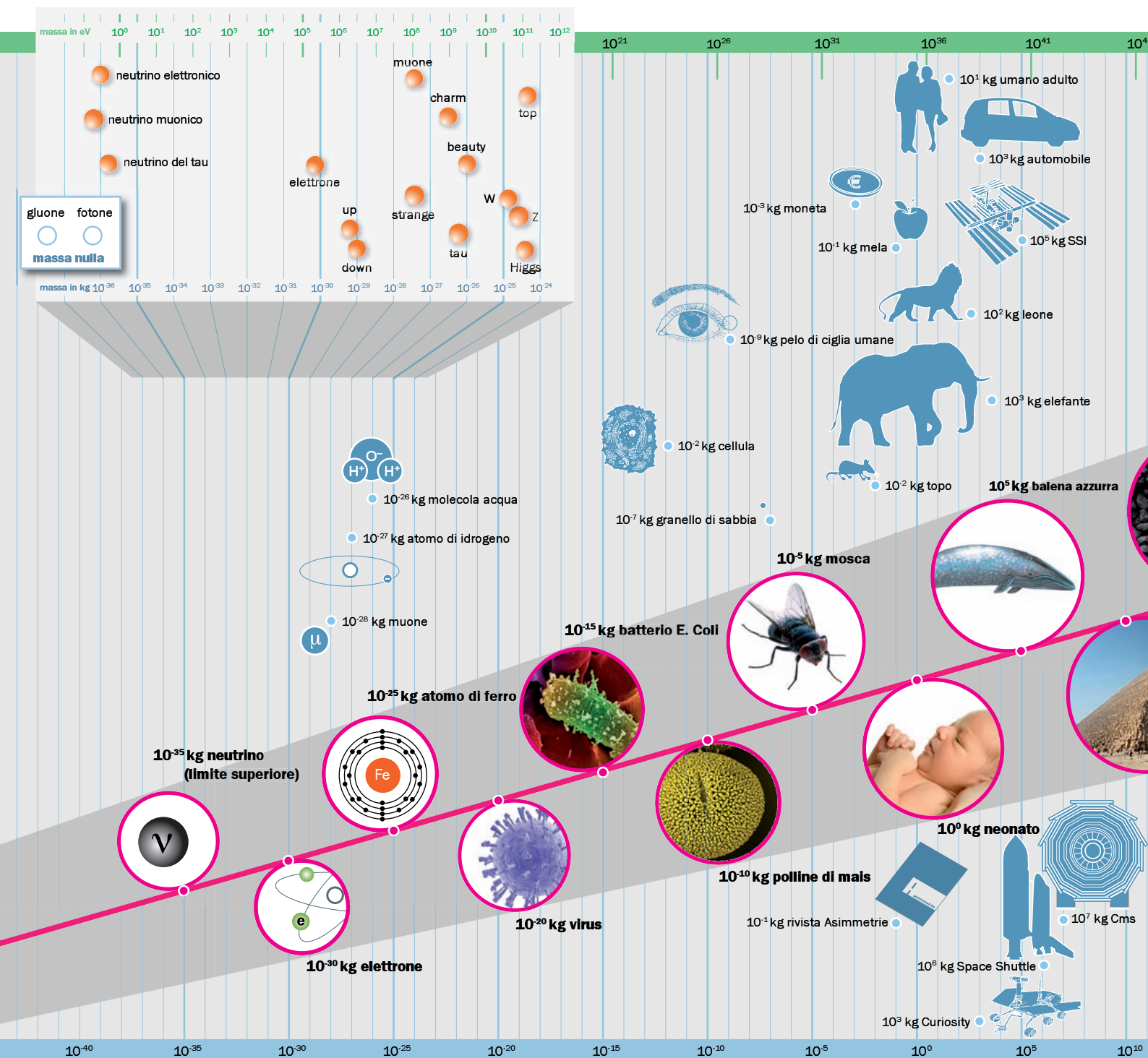
Come si vede, sebbene si sappia già molto sull'origine della massa dell'universo e dei suoi costituenti, le domande senza risposta rimangono tante. Ad alcune di esse risponderemo certamente nell'immediato futuro, altre ci accompagneranno forse per un tempo più lungo.

Biografia

Vincenzo Barone insegna fisica teorica all'Università del Piemonte Orientale. La sua ricerca riguarda la fenomenologia delle particelle elementari e, in particolare, delle interazioni forti. In ambito divulgativo, il suo ultimo lavoro è "L'ordine del mondo", un saggio sulle simmetrie in fisica da Aristotele a Higgs.

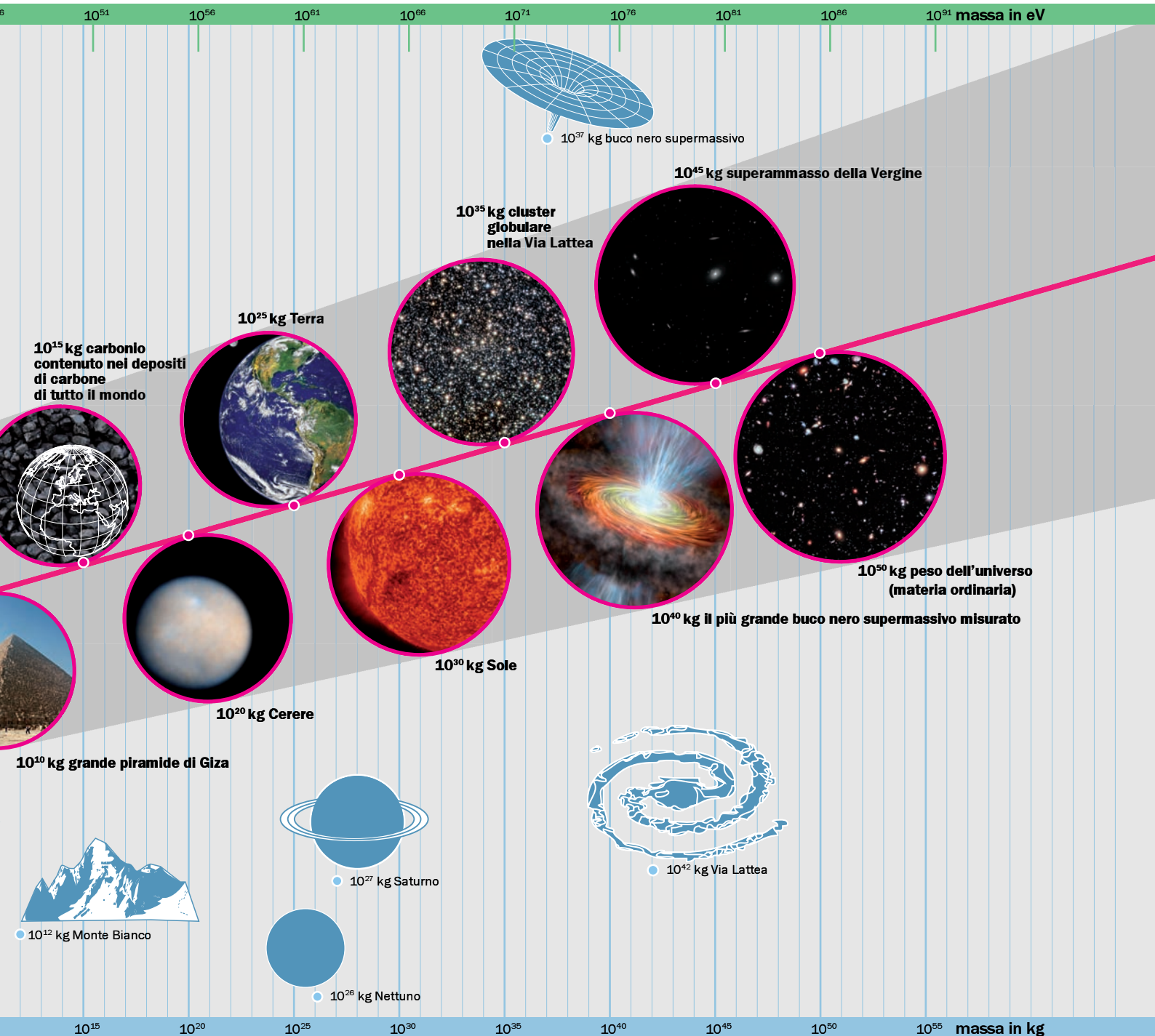
[as]

Di massa in massa.



a.

Dalla massa dei neutrini, le particelle più leggere a noi note, alla massa dell'intero universo conosciuto: 85 ordini di grandezza che includono tutto ciò che conosciamo. Ordinati per valori crescenti di massa, ciascuno degli oggetti sulla banda obliqua è centomila volte più pesante del precedente. In alto a sinistra le particelle fondamentali del modello standard, ordinate per valore crescente di massa. Le particelle che mediano le forze sono il gluone e il fotone (a massa nulla) e i bosoni W e Z. Le particelle costituenti la materia sono i neutrini, con una massa molto piccola (inferiore all'eV); i leptoni (elettrone, muone e tau) e i quark (up, down, strange, charm, beauty e top), con masse che vanno da meno di un MeV a più di 100 GeV. Il quadro si completa con il bosone di Higgs.



In caduta libera

La sottile uguaglianza tra massa inerziale e gravitazionale

di Francesco Fidecaro

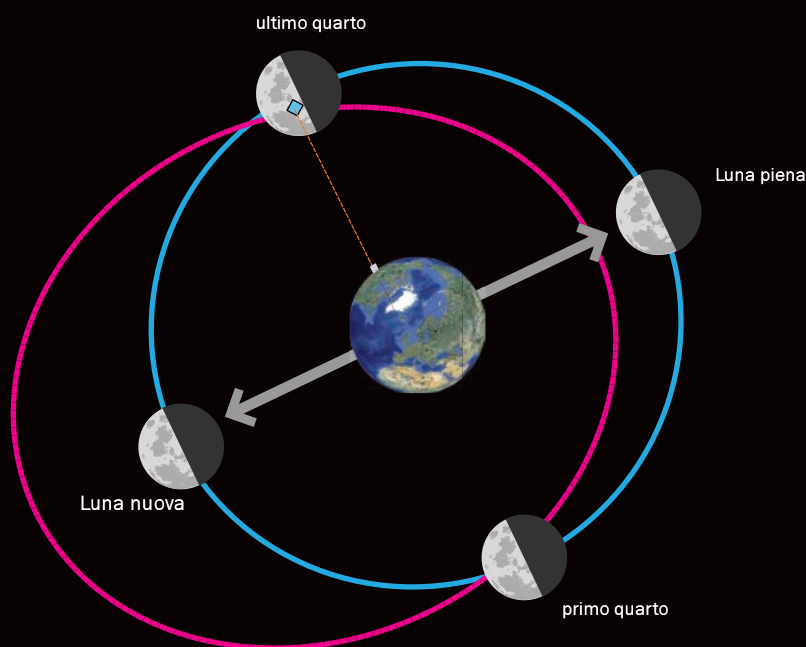
“...cascai in opinione, che se si levasse totalmente la resistenza del mezzo, tutte le materie discenderebbero con eguali velocità”. Questa è la tesi che Salviati espone durante la prima giornata dei *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze* di Galileo Galilei pubblicati nel 1638. Salviati sfrutta con argomentazioni ineccepibili le sue osservazioni del moto dei corpi nelle più svariate circostanze e giunge a descrivere l'esito dell'esperimento che propone. Non risulta che l'esperimento si sia effettivamente svolto, anche se così vuole la leggenda.

Oggi l'osservazione dell'universalità della caduta dei corpi è spiegata usando le leggi della meccanica, pubblicate da Isaac Newton nei suoi *Principia* circa cinquant'anni dopo i *Discorsi*. I *Principia* dicono da una parte che, per ottenere una data accelerazione, la forza da applicare è proporzionale alla massa inerziale; dall'altra che la gravitazione universale, dedotta sempre da Newton dallo studio del moto dei pianeti, si traduce in una forza di gravità proporzionale alla massa gravitazionale. Se varia la massa su cui agisce la forza di gravità, varia nella stessa misura anche la forza esercitata,

a.
L'esperimento più sensibile per verificare l'uguaglianza tra massa inerziale e massa gravitazionale è quello che misura la distanza tra la Terra e la Luna. I due corpi celesti hanno pesi diversi e sono entrambi in caduta libera verso il Sole. Sulla Luna è stato posizionato un riflettore che rimanda indietro un raggio laser proveniente dalla Terra e che permette di misurare la distanza Terra-Luna. Se vi fosse una differenza tra massa inerziale e massa gravitazionale, la distanza reciproca tra i due varierebbe in funzione della fase lunare (linea rosa); non si osserva invece alcuna variazione della distanza al variare della fase lunare (linea blu).



caduta verso il Sole

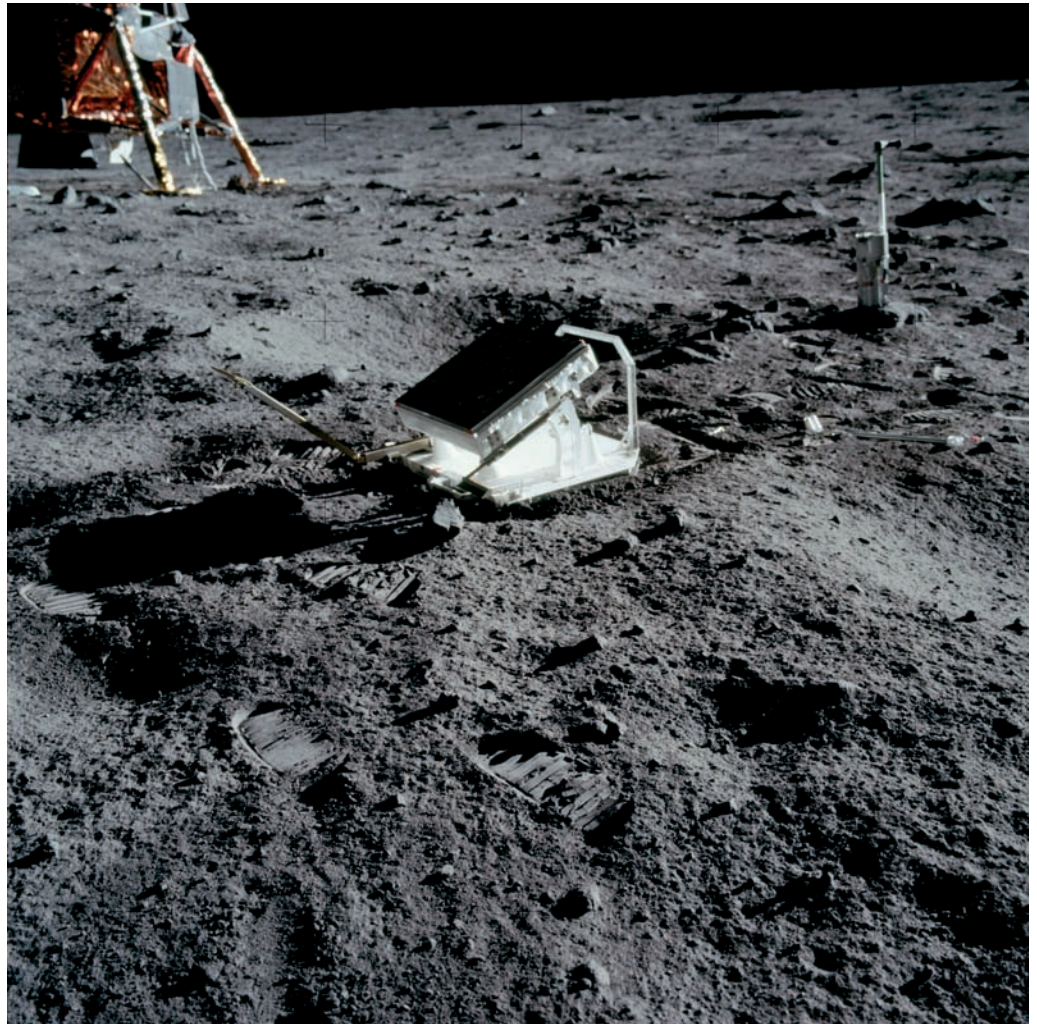


orbita della Luna con accelerazione maggiore rispetto alla Terra

orbita della Luna con stessa accelerazione rispetto alla Terra

b.

Il riflettore installato dagli astronauti della missione *Lunar Laser Ranging* dell'Apollo XI sulla Luna.



ma l'accelerazione di caduta rimane la stessa, se le due masse sono uguali. L'universalità della caduta dei corpi, quindi, implica l'uguaglianza tra massa gravitazionale e massa inerziale: si parla semplicemente di massa.

Quest'uguaglianza (sancita dal principio di equivalenza) colpì Einstein, che immaginò un ascensore in grado di accelerare come se fosse in caduta libera. Se tutti i corpi cadono con la stessa accelerazione, nell'ascensore non si osserva più l'effetto della gravità, che viene cancellata. Benché possa sembrare un esperimento irrealizzabile, è quello che succede in un'astronave nella quale l'assenza di peso non è dovuta alla lontananza dalla Terra, ma proprio al fatto che sia il laboratorio (l'astronave) sia i corpi in esso contenuti sono tutti sottoposti alla stessa accelerazione, ossia tutto è "in caduta libera".

La questione è intrigante e sono stati fatti numerosi esperimenti alla ricerca di una differenza nella caduta dei corpi. Galileo discute di palle di artiglieria, lacrime di piombo, vesciche riempite d'aria. In esperimenti successivi sono state usate masse composte da singoli elementi, come l'oro oppure

l'alluminio, mentre le tecniche diventavano sempre più raffinate. In questo modo si è concluso che massa gravitazionale e massa inerziale risultano uguali con una precisione di una parte su 10^{12} (ovvero che per mille tonnellate la differenza tra le due masse è al più un milligrammo). A oggi l'esperimento più sensibile è quello che misura la distanza tra la Terra e la Luna: entrambe sono in orbita solare, quindi in perenne caduta libera verso il Sole! Una differenza di caduta apparirebbe come una variazione di distanza sincronizzata con le fasi della Luna. L'esperimento *Lunar Laser Ranging* sfrutta tre riflettori lasciati sulla Luna durante le missioni dell'Apollo (XI, XIV e XV) a partire dal 1969. I riflettori rimandano indietro un raggio laser proveniente dalla Terra (vd. fig. a). Misurando il tempo di andata e ritorno si ottiene la distanza percorsa con la precisione del centimetro. La misura continua ancora e a oggi la precisione ottenuta sull'uguaglianza tra massa gravitazionale e massa inerziale è 10 volte migliore di quella degli esperimenti terrestri.

Gli esperimenti ci dicono quindi che massa gravitazionale e inerziale sono uguali. In fisica, un'uguaglianza verificata con altissima precisione suggerisce di cercare un meccanismo che renda "naturale" la similitudine dei moti. Ma che cosa hanno in comune tanti corpi diversi in movimento sotto l'effetto della gravitazione? Anche la forza gravitazionale è diversa per ciascuno di loro, ma lo spazio che li circonda è lo stesso per tutti. Attribuire gli effetti della gravitazione alle proprietà dello spazio (cui occorre aggiungere anche il tempo) e non ai corpi stessi assicurerebbe che la caduta libera sia identica per tutti.

In che modo possiamo attribuire allo spaziotempo proprietà gravitazionali? Esso ha proprietà geometriche che vengono riassunte attraverso la possibilità di conoscere la distanza tra due punti qualsiasi, ovvero conoscere la "metrica". Nello spazio a noi consueto è valida la geometria euclidea, la metrica è espressa dal teorema di Pitagora e si parla di uno spazio "piatto". Nel XIX secolo, Carl Friedrich Gauss, Bernhard Riemann e altri matematici mostrarono che vi possono essere altre geometrie oltre alla euclidea, individuando spazi matematici "curvi". Se lo spaziotempo

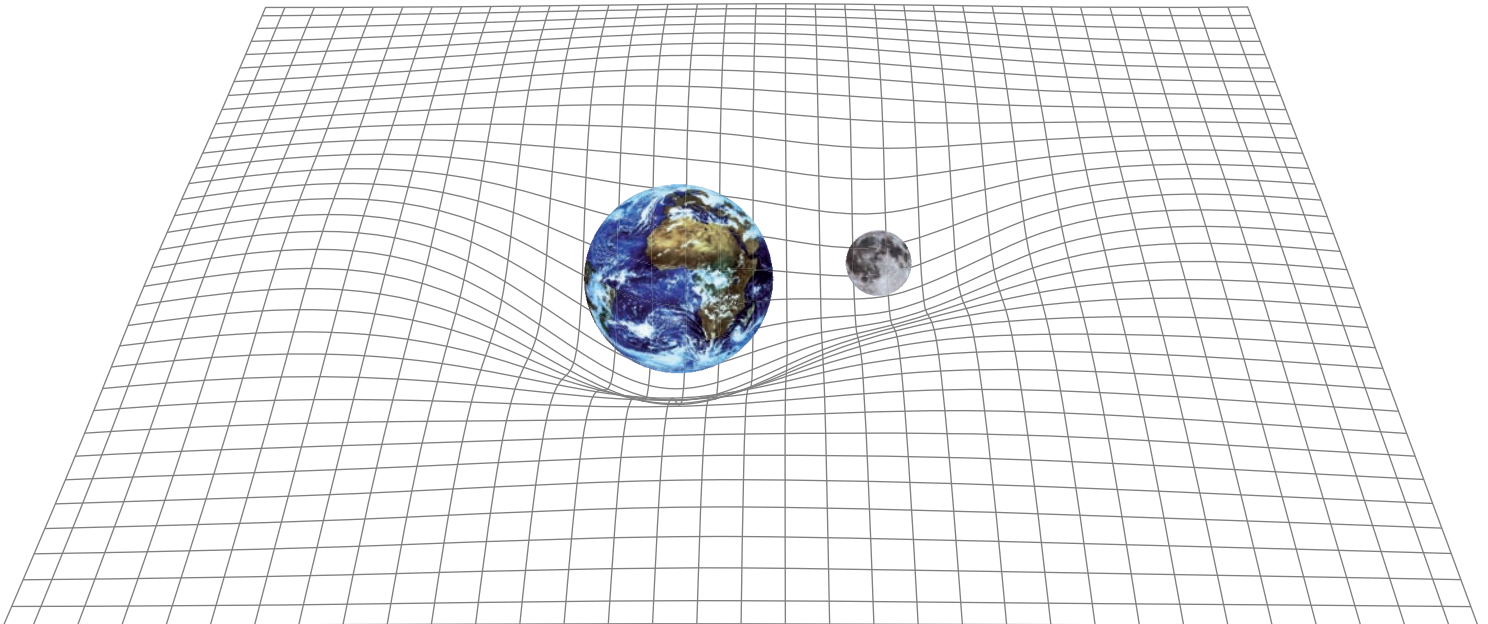
fisico fosse curvo, questa potrebbe essere la caratteristica che determina in uguale modo il moto di qualsiasi corpo in caduta libera.

Questo salto vertiginoso, da spazio piatto a curvo, è stato fatto da Einstein quando ha formulato nel 1916 la teoria generale della relatività, finora la migliore teoria per descrivere i fenomeni gravitazionali. Salviati, Sagredo e Simplicio non potevano immaginare che la "uguale" velocità, ovvero l'uguaglianza tra massa inerziale e gravitazionale, avrebbe portato a una revisione così drastica della concezione dello spazio e del tempo.

Biografia

Francesco Fidecaro insegna fisica generale ed è direttore del Dipartimento di Fisica "Enrico Fermi" dell'Università di Pisa. Allievo della Scuola Normale Superiore, si è laureato nel 1978. Ha partecipato allo sviluppo degli esperimenti Framm-Na1 e Aleph al Cern e all'analisi dei dati raccolti per lo studio dei decadimenti di particelle pesanti per interazione debole. È stato responsabile scientifico della collaborazione Virgo, l'interferometro per la ricerca delle onde gravitazionali.

c.
Rappresentazione bidimensionale dello spaziotempo curvo intorno alla Terra. La Luna risente della curvatura dello spazio prodotta dalla Terra e incurva a sua volta lo spazio circostante.



Le masse nella teoria della relatività (1923).

di Enrico Fermi

[as] approfondimento

L'esordio di un genio



Nel 1922 l'editore Hoepli decise di tradurre uno dei primi manuali di relatività, opera del tedesco August Kopff, aggiungendovi una corposa appendice contenente osservazioni e commenti dei principali scienziati e filosofi italiani. Tra questi scritti, molti dei quali segnati da ostilità e incomprensione nei confronti delle teorie relativistiche, spicca, come notevole eccezione, il breve testo di un ventunenne neolaureato, Enrico Fermi, distintosi negli ambienti universitari pisani per la sua padronanza della nuova fisica, ma ancora pressoché sconosciuto al resto del mondo accademico.

Il contributo di Fermi, che qui pubblichiamo, è pregevole soprattutto per la straordinaria lungimiranza scientifica che lo caratterizza. Mentre l'attenzione dei fisici della vecchia guardia è prevalentemente orientata alle conseguenze ottiche della relatività, Fermi – con quella “prodigiosa capacità di vedere subito l'essenziale in ogni cosa”, di cui parla il suo amico Enrico Persico – riconosce nella relazione tra massa ed energia, espressa dalla formula $E=mc^2$, l'aspetto più importante e fecondo della teoria einsteiniana. Questa relazione, oltre ad aprire prospettive (all'epoca ancora tecnicamente remote) di produzione di ingenti quantità di energia,

Nota bibliografica

Il testo che qui presentiamo fu originariamente pubblicato in A. Kopff, *I fondamenti della relatività einsteiniana*, edizione italiana a cura di R. Contu e T. Bembo, Hoepli, Milano 1923, pp. 342-344, e ristampato poi in E. Fermi, *Note e Memorie*, Accademia Nazionale dei Lincei e University of Chicago Press, vol. I, Roma 1961, pp. 33-34, e, più recentemente, in E. Fermi, *Atomi Nuclei Particelle*, a cura di V. Barone, Bollati Boringhieri, Torino 2009, pp. 3-5.

governa gli scambi energetici che si verificano nelle reazioni nucleari ed è pertanto destinata, secondo il giovane Fermi, a svolgere un ruolo cruciale nella comprensione dei fenomeni e delle strutture fondamentali della materia.

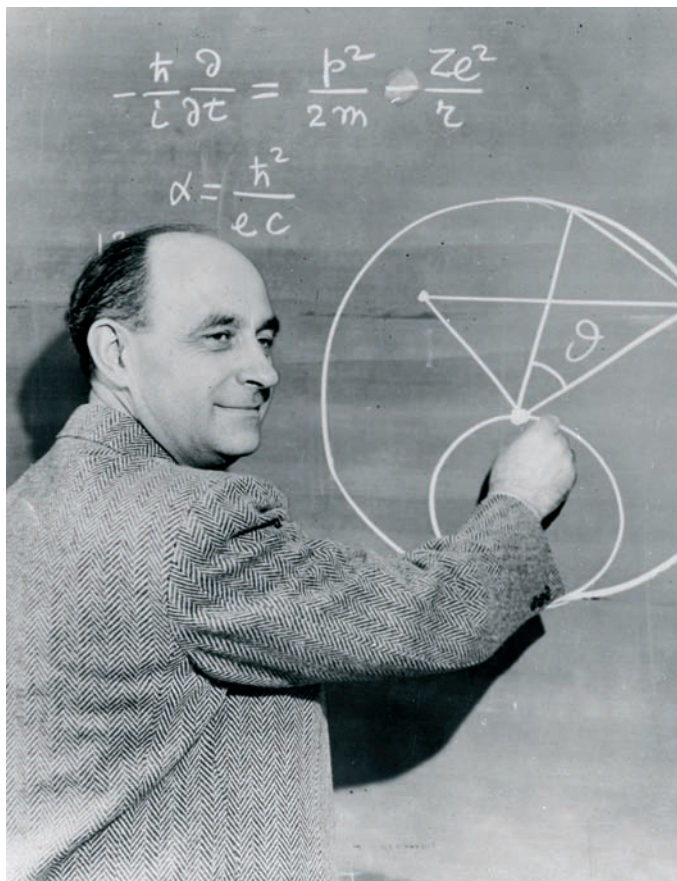
A proposito di queste due paginette, Emilio Segré parla di “premonizione quasi profetica”. Fa una certa impressione, in effetti, pensare che sarà proprio il loro autore a conseguire, vent'anni dopo, i risultati clamorosi che vi vengono prefigurati: sarà lui infatti a liberare l'energia contenuta nella massa dei nuclei, realizzando nel 1942 il primo reattore a fissione nucleare e partecipando poi a Los Alamos al progetto per la realizzazione della prima bomba atomica. [Vincenzo Barone]

1.

Un giovane Enrico Fermi a Pisa (il terzo da sinistra).

La grandiosa importanza concettuale della teoria della relatività, come contributo ad una più profonda comprensione dei rapporti tra spazio e tempo, e le vivaci e spesso appassionate discussioni a cui essa ha in conseguenza dato luogo anche fuori degli ambienti strettamente scientifici, hanno forse un po' distolta l'attenzione da un altro suo risultato che, per esser meno clamoroso e, diciamo pure, meno paradossale, ha tuttavia nella fisica conseguenze non meno degne di nota, e il cui interesse è verosimilmente destinato a crescere nel prossimo svilupparsi della scienza.

Il risultato a cui accenniamo è la scoperta della relazione che lega la massa di un corpo alla sua energia (è la formula $E=mc^2$, ndr). La massa di un corpo, dice la teoria della relatività, è eguale alla sua energia totale divisa per il quadrato della velocità della luce. Già un esame superficiale ci mostra come, almeno per la fisica quale la si osserva nei laboratori, l'importanza di questa relazione tra massa ed energia è tale da offuscare notevolmente quella delle altre conseguenze, quantitativamente lievissime, ma alle quali la mente si abitua con più sforzo. Valga un esempio: un corpo lungo un metro che si muovesse con la



a.
Enrico Fermi.

velocità, abbastanza rispettabile, di 30 chilometri al minuto secondo (eguale press'a poco alla velocità del moto della Terra attraverso gli spazi) apparirebbe sempre lungo un metro ad un osservatore trascinato dal suo moto, mentre ad un osservatore fermo apparirebbe lungo un metro meno cinque milionesimi di millimetro; come si vede il risultato, per strano e paradossale che possa parere, è tuttavia molto piccolo, ed è da ritenere che i due osservatori non si metteranno a litigare per così poco. La relazione tra massa ed energia invece ci porta senz'altro a delle cifre grandiose. Ad esempio, se si riuscisse a mettere in libertà l'energia contenuta in un grammo di materia, si otterrebbe un'energia maggiore di quella sviluppata in tre anni di lavoro ininterrotto da un motore di mille cavalli (inutili i commenti!). Si dirà con ragione che non appare possibile che, almeno in un prossimo avvenire, si trovi il modo di mettere in libertà queste spaventose quantità di energia, cosa del resto che non si può che augurarsi, perché l'esplosione di una così spaventosa quantità di energia avrebbe come primo effetto di ridurre in pezzi il fisico che avesse la disgrazia di trovar il modo di produrla. Ma se anche una tale esplosione completa della materia non appare per ora possibile, sono però già in corso da qualche anno delle esperienze dirette ad ottenere la trasformazione degli elementi chimici uno nell'altro. Tale trasformazione, che si presenta naturalmente nei corpi radioattivi, è stata recentemente ottenuta anche artificialmente da Rutherford che, bombardando con delle particelle α (corpuscoli lanciati con velocità grandissima dalle sostanze radioattive) degli atomi, è riuscito ad ottenerne la decomposizione. Ora a queste trasformazioni degli elementi uno nell'altro sono legati degli scambi energetici che la relazione tra massa ed energia ci permette di studiare in modo molto chiaro. Ad illustrarli valga ancora un esempio numerico. Si ha ragione di ritenere che il nucleo dell'atomo di elio sia costituito da quattro nuclei dell'atomo di idrogeno (all'epoca si credeva che tutti i nuclei atomici fossero costituiti solo da protoni, cioè "nuclei di idrogeno", e da elettroni; i neutroni, che hanno massa molto simile a quella dei protoni, non erano ancora stati scoperti; un nucleo di elio è in realtà costituito da due protoni e due neutroni, ndr). Ora il peso atomico dell'elio è 4,002 mentre quello dell'idrogeno è 1,0077. La differenza tra il quadruplo della massa dell'idrogeno e la massa dell'elio è dunque dovuta all'energia dei legami che uniscono i quattro nuclei di idrogeno per formare il nucleo dell'elio. Questa differenza è 0,029, corrispondente, secondo la relazione relativistica tra massa ed energia, ad un'energia di circa sei miliardi di calorie per grammo-atomo di elio. Queste cifre ci dimostrano che l'energia dei legami nucleari è qualche milione di volte maggiore di quella dei più energici legami chimici e ci spiegano come contro il problema della trasformazione della materia, il sogno degli alchimisti, si siano per tanti secoli rotti gli sforzi degli ingegni più eletti, e come solo ora, adoperando i mezzi più energici a nostra disposizione, si sia riusciti ad ottenere questa trasformazione; in quantità del resto tanto minime da sfuggire alla più delicata analisi. Bastino questi brevi accenni a dimostrare come la teoria della relatività, oltre a darci una interpretazione chiara delle relazioni tra spazio e tempo, sarà, forse in un prossimo avvenire, destinata ad esser la chiave di volta per la risoluzione del problema della struttura della materia, l'ultimo più arduo problema della fisica.

Dr. Boson, I presume?

Terminata la lunga ricerca dell'Higgs

di Eleonora Cossi

Per oltre trent'anni i ricercatori di tutto il mondo sono stati impegnati in un'impresa difficilissima: scovare il bosone di Higgs. Per questo è stato progettato e costruito il Large Hadron Collider (Lhc), l'acceleratore di particelle più potente e grande del mondo. Al suo interno, posizionati su un anello di 27 km a 100 metri di profondità, giganteschi esperimenti come Atlas e Cms (per approfondire, vd. Asimmetrie n. 8, "Il bosone di Higgs") hanno registrato miliardi di collisioni tra nuvole di protoni, per catturare l'inafferrabile bosone di Higgs. Il 4 luglio di quest'anno, al Cern di Ginevra, Atlas e Cms hanno annunciato di aver individuato, indipendentemente l'uno dall'altro, la ricercatissima particella. Ad ascoltarli, oltre ai ricercatori affollati nella sala del seminario, un'audience globale composta da circa 90 giornalisti inviati al Cern, 150 istituti connessi che trasmettevano l'evento, scienziati di tutto il mondo incollati allo schermo per un totale di circa 500.000 utenti collegati al servizio webcast allestito per l'occasione. Insomma il più importante evento mediatico scientifico degli ultimi anni.

a.
Un momento del seminario del 4 luglio scorso, in cui è stata annunciata la scoperta del bosone di Higgs.





b.
Lo storico abbraccio tra Fabiola Gianotti e Peter Higgs, durante il seminario del 4 luglio scorso, in cui è stata annunciata la scoperta della “dannata” particella.

“La scoperta, tanto attesa per anni, ci è sembrata concretizzarsi per la prima volta alla fine del 2011, quando entrambi gli esperimenti, analizzando i dati raccolti, hanno visto che qualcosa accadeva intorno alla massa di 125 GeV – racconta Guido Tonelli, responsabile emerito dell’esperimento Cms – Per la prima volta Cms e Atlas osservavano segnali coerenti, seppur ancora deboli, che indicavano la possibile presenza della particella che cercavamo dagli anni ‘90. Con la successiva raccolta dati – prosegue Tonelli – dopo solo tre mesi, sono arrivate ulteriori conferme. Il segnale osservato intorno a 125 GeV nei dati del 2011 ricompariva nel 2012 in entrambi gli esperimenti, esattamente nello stesso posto. A questo punto non abbiamo avuto più dubbi e abbiamo annunciato al mondo la scoperta”.

“Nel 1964 Peter Higgs, che allora aveva 35 anni – spiega Fabiola Gianotti, responsabile dell’esperimento Atlas – intuì come si è passati da un universo in cui tutte le particelle sono prive di massa e si muovono alla velocità della luce, all’attivazione di un campo con cui le varie particelle interagiscono in modo differente. Più forte è l’interazione, maggiore è la massa acquisita dalle particelle. Il campo di Higgs è, per così dire, ‘entrato in funzione’ negli istanti iniziali dell’universo, un centesimo di miliardesimo di secondo (10^{-11} s) dopo il Big Bang. Questa intuizione permise di capire perché le particelle elementari hanno massa. Ma è soltanto nel luglio 2012 che abbiamo avuto l’evidenza sperimentale che Higgs avesse ragione” conclude Gianotti, la cui foto dell’abbraccio con Higgs ha fatto il giro del mondo.

Ripercorriamo brevemente gli eventi. Lhc entra in funzione nel settembre del 2008 ma, pochi giorni dopo, si è costretti a spegnere la macchina per un incidente a una connessione fra i magneti superconduttori. Il guasto viene riparato e l’acceleratore riparte nel novembre del 2009. “Una partenza difficile, Tonelli?”. “Sì, inizialmente tutti i piani per la ricerca del bosone di Higgs erano basati sull’ipotesi che l’acceleratore avrebbe prodotto collisioni a 14 TeV di energia e all’intensità di progetto. Così quando Lhc si è guastato ed è risultato chiaro che per i primi due anni avrebbe funzionato a 7 TeV, l’idea prevalente fra molti colleghi era che avremmo dovuto aspettare il 2015 per avere una qualche speranza di scoprire la ‘dannata particella’. Ma tuttavia alcuni di noi, allora, non si sono dati per vinti. Ci siamo messi a cercare nuove soluzioni, i piani per l’analisi dei dati sono stati rivisti e riorganizzati dalle fondamenta, si sono messi al lavoro centinaia di giovani entusiasti di essere chiamati a compiere quella che, a molti, sembrava una missione impossibile: scovare il segnale del bosone di Higgs nelle collisioni a 7 TeV. I dati del 2010 ci dicevano che sia la macchina che i rivelatori stavano lavorando molto bene, le nuove simulazioni ci dicevano che c’erano buone possibilità di scoprire la particella che stavamo ricercando da decenni. A quel punto non ci sono state esitazioni e la presa dati è stata prolungata al 2012. Abbiamo scommesso su Lhc, sui nostri rivelatori e sui nostri fantastici ragazzi. Ora possiamo dire che abbiamo avuto ragione”.

“E adesso che avete trovato l’Higgs che accade?”. “La particella che abbiamo osservato ha caratteristiche molto

simili a quelle del bosone di Higgs. Tuttavia è presto per dire se si tratta proprio della particella prevista da Peter Higgs nel 1964 o di un suo 'cugino'. Occorrono più dati e più lavoro per studiarla in tutti i dettagli e farle un identikit completo", commenta Gianotti. "Questo bosone è una particella che ha un ruolo molto speciale, perché dà la massa a tutte le altre particelle, sia quelle conosciute, sia eventualmente quelle ancora da scoprire. È come aver scoperto un'antenna ultrasensibile il cui studio potrebbe portarci altre sorprese. Il sogno segreto di ciascuno di noi è di riuscire a fare ulteriori passi avanti nella conoscenza, per gettare luce su questioni ancora misteriose come l'origine della materia oscura che tiene insieme le galassie", aggiunge Tonelli. Dietro a questa scoperta c'è un intero mondo, la più grande comunità scientifica mai messa insieme. L'esperimento Cms è una collaborazione

di circa 3300 fisici, tecnici e ingegneri provenienti da 41 paesi, che coinvolge 185 laboratori. Atlas è composto da 3000 fisici provenienti da 38 paesi. Un terzo circa dei membri di entrambe le collaborazioni sono giovani dottorandi e post-doc. Sono numeri impressionanti. "Quando parliamo di Lhc parliamo di *big science*, di progetti che richiedono il contributo tecnologico, economico e intellettuale di tutto il mondo. Non sarebbe possibile fare un esperimento di questo tipo in uno scantinato, come avveniva per i ragazzi di via Panisperna all'inizio del secolo scorso – aggiunge Gianotti. "Una simile impresa scientifica è anche uno strumento di pace, che avvicina e unisce i popoli: in Atlas e Cms lavorano insieme, gomito a gomito, scienziati che provengono da più di 60 paesi del mondo, alcuni dei quali sono in conflitto tra loro. Si tratta di una grande lezione di vita per tutti, in particolare per i nostri giovani".

c.
Il 24 settembre scorso Guido Tonelli riceve dal Presidente della Repubblica Giorgio Napolitano l'onorificenza di Commendatore, assieme ai responsabili degli altri esperimenti del Cern e al Presidente dell'Infn, Fernando Ferroni. Durante la stessa occasione, il Presidente Napolitano ha consegnato a Fabiola Gianotti e a Sergio Bertolucci (direttore della ricerca del Cern) le onorificenze di Grande Ufficiale dell'Ordine al Merito della Repubblica Italiana. Nel marzo 2013 i protagonisti dei successi di Lhc sono stati premiati con il prestigioso *Special Prize for Fundamental Physics*. Tra loro anche Gianotti e Tonelli.



[as] traiettorie

Ricerca al buio.

di Maria Nicolaci

Come sono stati i giorni a ridosso della scoperta del bosone di Higgs? Ce lo raccontano due giovani che lavorano al Cern in due esperimenti in competizione. Manuela Venturi è una dottoranda dell'esperimento Atlas e Francesco Pandolfi un ricercatore post-doc di Cms.

[as] Di che cosa ti occupi in Atlas?

Manuela [M]: Della ricerca del bosone di Higgs, proprio nella regione di massa dove è stato scoperto nel luglio scorso. Ora mi sto concentrando sulle proprietà della nuova particella, fondamentali per capire se si tratta proprio di quella prevista dal modello standard.

[as] Man mano che l'analisi dati confermava la presenza della nuova particella, com'è cambiato il tuo lavoro?

[M]: L'entusiasmo era incredibile! Per settimane abbiamo avuto riunioni sette giorni su sette. Sono state giornate intense e frenetiche. Dovevamo presentare nuovi risultati, prodotti spesso nottetempo. Siamo arrivati a chiederci se non fosse possibile installare delle brandine in ufficio. Ma sapevamo che i dati che stavamo analizzando avrebbero probabilmente fornito una risposta definitiva sull'esistenza o meno del bosone di Higgs. In realtà tutte le analisi erano *blinded*, ovvero non potevamo guardare la regione dove un eventuale segnale si sarebbe manifestato. Quando è stato dato il via libera all'*unblinding*, e per la prima volta abbiamo potuto guardare il picco statistico che confermava l'esistenza del bosone tra i 125 e i 126 GeV, l'emozione è stata indescrivibile, la sala gremitissima e alla fine tutti sono scoppiati in un lungo applauso liberatorio. Ce l'avevamo fatta!

[as] Che clima si respirava negli spazi comuni, a mensa, nei corridoi del Cern?

[M]: L'emozione era palpabile, i volti pallidi per le lunghe ore di lavoro ma gli occhi scintillanti, contenti! Negli spazi comuni si parlava sottovoce per non tradire informazioni riservate, stavamo attenti a non lasciare documenti compromettenti nelle stampanti. Circolavano ovunque voci di ogni genere, quasi tutte, però, si sono rivelate infondate.



[as] Ci racconti un aneddoto?

[M]: Per rendere meno monotone le lunghe riunioni giornaliere, con alcuni amici ci siamo inventati un gioco simile al bingo. Abbiamo raccolto le frasi e le espressioni più tipiche dette dai nostri colleghi e ognuno ne riceveva un certo numero. Vinceva chi per primo le sentiva pronunciare tutte.

[as] Hai raccontato a Francesco cosa stavate scoprendo in Atlas?

[M]: Ovviamente no! Anche se sana e costruttiva, c'era e c'è tuttora molta competizione: labbra cucite con chiunque non fosse di Atlas.

[as] E se fosse stato il tuo ragazzo, glielo avresti detto?

[M]: Sì, penso di sì. Il nostro lavoro è una parte talmente importante della nostra vita, che non si può non condividerla con i propri cari. Però di sicuro l'avrei minacciato di terribili ritorsioni, se non se lo fosse tenuto per sé!



[as] Di che cosa ti occupi in Cms?

Francesco [F]: Di una delle analisi che ha contribuito a questa grande avventura che è stata la caccia del bosone di Higgs, ma analizzavo una regione di massa molto più alta di quella in cui è stato scoperto il bosone. Beh, in un certo senso, non sono stato fortunato, anche se io e i miei colleghi lo sapevamo fin dall'inizio che sarebbe stato difficile trovare l'Higgs in quella regione.

[as] Man mano che l'analisi dati confermava la presenza della nuova particella, com'è cambiato il tuo lavoro?

[F]: Quando ci si rende conto di essere davvero alla frontiera della fisica, di avere gli occhi del mondo puntati addosso, è difficile non emozionarsi. Nei mesi successivi al primo seminario di dicembre 2011 (in cui gli esperimenti hanno mostrato le prime avvisaglie di qualcosa di "interessante") fino alla comunicazione della scoperta, il Cern ha trattenuto il respiro. Si sentiva una sorta di carica accumularsi, un misto di tensione ed emozione: da un lato c'era la possibilità di un'imminente svolta storica; dall'altra una specie di paura e la necessità di fare un meticoloso controllo di tutti i dati.

[as] Che clima si respirava negli spazi comuni, a mensa, nei corridoi del Cern?

[F]: Anche i fisici sono esseri umani! Ci sono amicizie fra partecipanti di esperimenti diversi ed è impossibile evitare lo scambio di alcune informazioni. A volte a mensa mi è capitato di ascoltare per caso la conversazione dei vicini di tavolo. Ricordo che in quei mesi voci di corridoio avevano allarmato noi di Cms: sembrava che Atlas avesse trovato qualcosa di completamente inaspettato e che aveva prestazioni migliori delle nostre. Chissà, forse le voci erano state messe in giro dai nostri capi per farci lavorare di più!

[as] Ci racconti un aneddoto?

[F]: Ho una scommessa in corso. Dopo il seminario del 2011 molti fisici erano ancora scettici. Durante una vacanza in Cambogia, bevendo una birra assieme a un collega sul lungofiume di Phnom Penh, è uscito che avevamo idee molto diverse: per me i dati appena rivelati erano una prova abbastanza convincente della presenza di un bosone di Higgs "standard" (di massa 123-126 GeV). Lui invece era ancora scettico e interpretava quei primi dati piuttosto come l'evidenza di una particella supersimmetrica. Da qui la scommessa: in palio ci sono 500 franchi svizzeri. La scommessa è ancora pendente, perché i risultati finali sono attesi nel 2013, ma per adesso il favorito sono io!

[as] Hai raccontato a Manuela cosa stavate scoprendo in Cms?

[F]: No, assolutamente! Per sei mesi i due esperimenti erano completamente blindati. Intenzionalmente non c'è stata nessuna fuga di notizie che avrebbe potuto influenzare i risultati.

[as] E se fosse stata la tua ragazza, glielo avresti detto?

[F]: È una domanda difficile! Forse, se me lo avesse chiesto, glielo avrei detto. Ovviamente solo dopo aver ottenuto un giuramento convincente di assoluto silenzio. Io, invece, le avrei chiesto esplicitamente di non dirmi niente.

Ed è solo l'inizio

Il bosone di Higgs e oltre

di Gian Francesco Giudice

a.
Peter Higgs durante il seminario al Cern del 4 luglio scorso, in cui è stato dato l'annuncio del bosone che porta il suo nome. Il bosone di Higgs, del tutto insensatamente, è chiamato anche "particella di Dio", per colpa del titolo (*The God particle*) dato dall'editore a un libro del premio Nobel Leon Lederman, nel '95.



Il turbine mediatico che ha accompagnato la scoperta del bosone di Higgs del 4 luglio scorso ha mostrato ai fisici il nuovo volto della comunicazione scientifica nell'epoca del web (guarda caso inventato proprio al Cern). L'informazione, uscita dai laboratori attraverso blog e canali ufficiali, ha raggiunto il pubblico a velocità superluminale. Ma il nome stesso attribuito al bosone di Higgs – “particella di Dio” – dà una misura dei toni sensazionalistici e fuorvianti che ha assunto la comunicazione. Il fenomeno mediatico ha avuto tuttavia il magico effetto di risvegliare nella gente un sincero interesse per la scienza pura e un genuino desiderio di

condividere con gli scienziati l'emozione della scoperta. La parola “bosone” è diventata un termine familiare ed è quasi entrata a far parte della cultura di massa, citata in trasmissioni televisive e nelle gag dei comici più popolari. Dopo l'ebbrezza del successo, all'indomani della scoperta i fisici hanno subito cominciato a riflettere sul nuovo risultato. L'esistenza del bosone di Higgs trova la sua motivazione nelle proprietà di simmetria del modello standard, e in particolare della forza debole – la forza che permette le reazioni termonucleari che alimentano il sole. Questa forza mostra la strana caratteristica di comportarsi in modo

diverso se vista attraverso uno specchio. Più precisamente, essa agisce in modo differente su particelle elementari come i quark, gli elettroni e i neutrini, e le rispettive immagini speculari, in cui gli spin delle particelle ruotano in verso opposto attorno alla direzione del moto. Questa netta separazione tra particelle sinistrorse (cioè tali che la rotazione di spin è in senso orario rispetto alla direzione del moto) e destrorse (spin antiorario) è però incompatibile con la presenza di massa. Infatti, le particelle con massa si muovono sempre a velocità inferiori a quella della luce: quindi se vediamo una particella destrorsa con massa viaggiare in una

data direzione possiamo sempre sorpassarla e vederla così andare nella direzione opposta. Poiché dal nuovo punto di vista la direzione della velocità è invertita mentre quella dello spin è rimasta la stessa, la particella che prima era destrorsa ora ci appare sinistrorsa. In altre parole, per una particella con massa non può esistere una distinzione intrinseca tra le due configurazioni, poiché la proprietà di essere destrorsa o sinistrorsa cambia a seconda del modo in cui osserviamo la particella. Ciò nonostante, la forza debole distingue tra particelle destrorse e sinistrorse. Ecco dunque il problema: le proprietà della forza debole sembrano incompatibili con la massa di alcune particelle elementari.

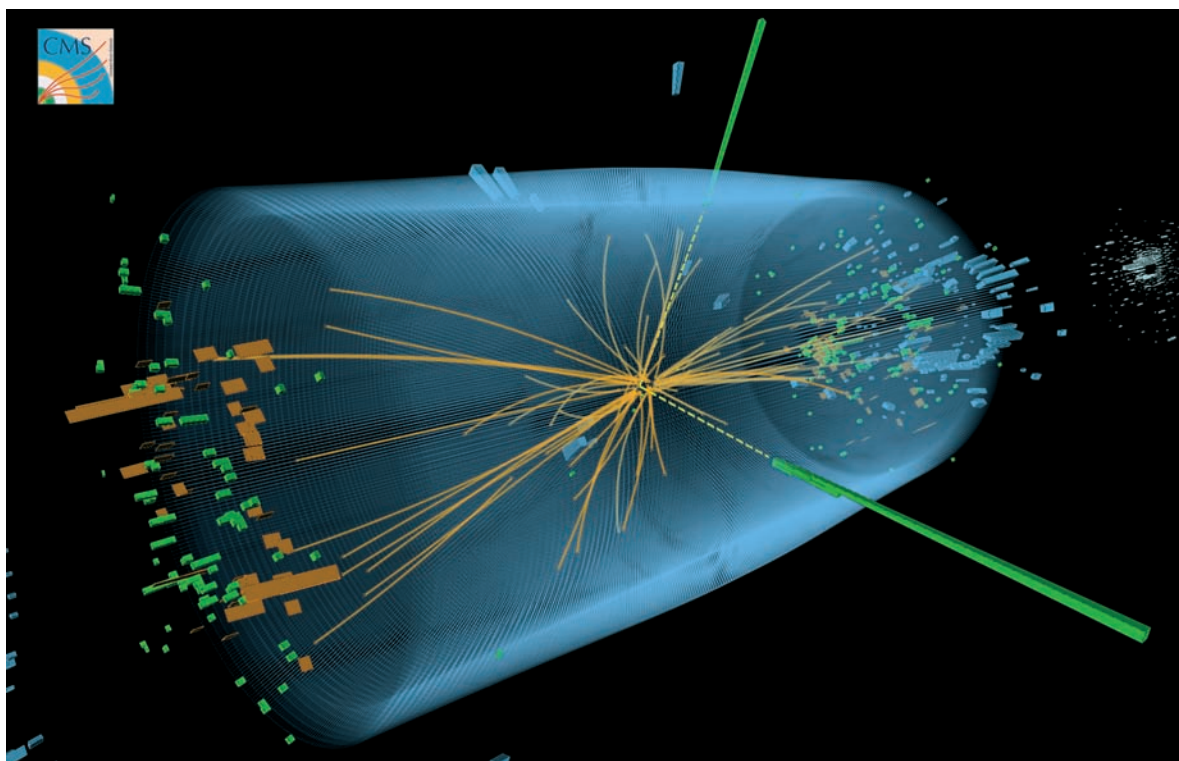
Il ruolo del bosone di Higgs è proprio quello di riconciliare questi due aspetti apparentemente contraddittori, rompendo la separazione tra il mondo destrorso e quello sinistrorso prevista dalla particolare simmetria di gauge. Per realizzare questo compromesso, il campo di Higgs compensa la carenza di simmetria rendendo possibile l'esistenza

di massa anche per le particelle che risentono della forza debole. Questa idea è stata pienamente confermata dalla scoperta del bosone di Higgs. Tuttavia i fisici teorici sono convinti che il bosone di Higgs non possa essere la fine della storia. Nello schema rigoroso ed elegante della teoria delle particelle, il bosone di Higgs è un elemento aggiuntivo necessario, ma precario e insoddisfacente. È un po' come una nota stonata in un concerto altrimenti perfettamente armonioso. Sembra dunque ragionevole pensare che la scoperta della nuova particella sia stata solo una prima manifestazione di un mondo ancora sommerso. Per conoscere cosa si nasconde dietro il bosone di Higgs è necessario misurarne le proprietà con grande precisione. L'intento degli esperimenti è ora capire se le predizioni del modello più semplice di bosone di Higgs sono perfettamente azzeccate o se esistono indicazioni di nuovi fenomeni.

La scoperta del bosone di Higgs ha fornito alcune risposte, ma ha aperto un gran numero di domande. La questione

sul bosone di Higgs che più ha fatto meditare i fisici negli ultimi decenni è il cosiddetto *principio di naturalezza*. In soldoni, questo principio decreta che una teoria fisica valida in un certo intervallo di grandezze non può essere sensibile in modo critico ai dettagli del comportamento della natura a scale molto più piccole. In pratica, questa separazione tra diverse scale di grandezza ci permette di trovare equazioni che descrivono le orbite dei pianeti, anche senza conoscere il moto di ogni singola molecola dentro Giove o Venere, o di formulare una teoria atomica anche senza le equazioni che descrivono la struttura interna dei quark, e così via. Per quanto ne sappiamo, questo principio sembra rispettato nel nostro universo. Se continuasse a valere anche alle distanze ora esplorate da Lhc, il principio di naturalezza avrebbe profonde implicazioni sulla natura del bosone di Higgs.

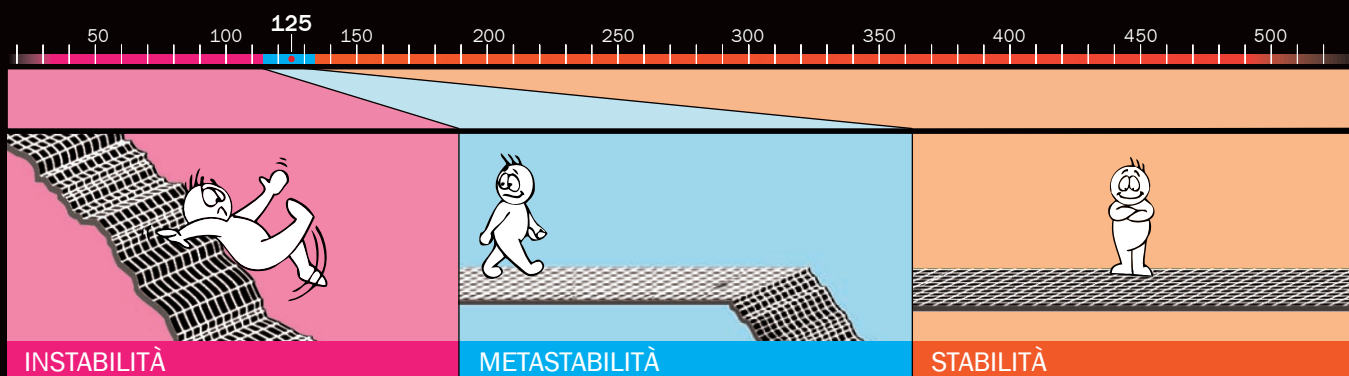
b.
La traccia del decadimento del bosone di Higgs, rivelata dall'esperimento Cms in Lhc.



In bilico

1.

Secondo il modello standard il valore della massa dell'Higgs determina le proprietà di stabilità dell'intero universo. Valori grandi della massa corrispondono a un universo stabile, mentre per valori piccoli l'universo non potrebbe esistere nello stato attuale. Il valore misurato a Lhc, attorno ai 125 GeV, si trova proprio nella stretta zona di confine tra un universo stabile e uno instabile.



I risultati in nostro possesso ci stanno già fornendo dei primi indizi interessanti. I dati sperimentali mostrano che la massa del bosone di Higgs è circa 125 GeV, cioè quanto un intero nucleo di cesio. Recenti calcoli teorici hanno messo in luce una sorprendente coincidenza. Se il modello standard fosse valido anche a distanze ben più piccole di quelle finora esplorate, una massa del bosone di Higgs di circa 125 GeV corrisponderebbe esattamente al minimo valore necessario per evitare che il nostro universo termini la sua esistenza collassando in un enorme grumo massiccio. In altre parole, la massa del bosone di Higgs ha proprio il valore giusto per mantenerci in bilico sull'orlo di un'apocalisse cosmica: viviamo cioè in quello che si chiama un universo *metastabile*.

Secondo alcuni fisici teorici, questa singolare coincidenza potrebbe essere la manifestazione dell'esistenza di una moltitudine di universi paralleli, il cosiddetto

multiverso (contrapposto cioè all'*universo*). Ognuno di questi universi paralleli è caratterizzato da costanti fisiche diverse e dunque alcune proprietà del nostro universo potrebbero essere il risultato di una selezione probabilistica. In altre parole, la massa del bosone di Higgs di 125 GeV ci sembra una strana coincidenza solo perché siamo in grado di osservare un solo universo. Un universo metastabile potrebbe invece essere di gran lunga statisticamente favorito all'interno del multiverso. Oppure, nel multiverso potrebbe essere raro trovare un universo che permette le caratteristiche necessarie alla vita e quindi, per motivi statistici, quelle caratteristiche sono soddisfatte nel nostro universo solo marginalmente. Così si spiegherebbe perché la massa del bosone di Higgs è prossima a quel valore critico oltre al quale il nostro universo è condannato a una catastrofica transizione di fase.

Nel contesto del modello standard, il bosone di Higgs risente di effetti quantistici che lo rendono vulnerabile al comportamento della teoria fino a distanze arbitrariamente piccole. Questa estrema sensibilità contraddice il principio di naturalezza, creando un ostacolo concettuale che si può aggirare solo se il bosone di Higgs è accompagnato da opportuni fenomeni capaci di smorzare gli effetti quantistici. Per questa ragione molti fisici teorici sono convinti che il bosone di Higgs faccia parte di una struttura più complessa, ancora sconosciuta.

Il filo logico suggerito dal principio di naturalezza ha guidato i fisici teorici lungo un affascinante percorso di idee, portandoli a immaginare che il bosone di Higgs sia solo l'araldo di nuove strutture nascoste dello spaziotempo. Nel profondo della materia potrebbero esistere nuove dimensioni spaziali, nuovi tipi di forze o addirittura una nuova concezione di spazio, come previsto dalla *supersimmetria*. Al momento non ci sono prove tangibili dell'esistenza di queste ipotetiche strutture, ma i fisici tengono il fiato sospeso nell'attesa che Lhc potenzi la sua capacità esplorativa, raddoppiando l'energia dei fasci di protoni, in una fase prevista a partire dalla fine del 2014. Non c'è dubbio che la scoperta del bosone di Higgs sia stata una tappa fondamentale nel nostro cammino verso la conoscenza dei principi fisici che governano il nostro universo. Tuttavia, questa scoperta non ha dato tutte le risposte che cercavamo per comprendere il fenomeno della rottura di

simmetria. Il bosone di Higgs fornisce solo una spiegazione rozza e incompleta, che non possiede l'eleganza presente nel resto del modello standard. Tutto sembra far credere che oggi i fisici siano nella stessa situazione dell'archeologo che festeggia il ritrovamento di alcune pietre, non sapendo ancora che sotto c'è un'intera piramide.

Biografia

Gian Francesco Giudice è un fisico teorico delle particelle elementari che opera al Cern di Ginevra dal 1993. Ha lavorato al Fermilab di Chicago e all'Università del Texas nel gruppo del Nobel Steven Weinberg. Ha pubblicato più di un centinaio di articoli scientifici nell'ambito della teoria delle particelle elementari e della cosmologia. Il suo libro divulgativo sulla fisica di Lhc, *Odissea nello zeptospatio*, è stato finalista al Premio Letterario Galileo 2012.

Link sul web

<http://www.infn.it/lhcitalia>

<http://public.web.cern.ch/public/>

<http://giudice.web.cern.ch/giudice/zeptospace/zepto-ita.html>

Particelle a colori

L'energia che dà massa alle cose

di Vittorio Lubicz

Il 2012 sarà ricordato nella storia della fisica come l'anno del bosone di Higgs. Ultimo tassello, finora sfuggito all'osservazione tra le particelle elementari previste dalla teoria, il bosone di Higgs genera un interesse profondo per il ruolo unico che i fisici ritengono sia svolto da questa particella. Infatti, l'interazione di tutti i costituenti elementari, cioè i leptoni e i quark, con il bosone di Higgs, o più precisamente con il campo di forze a esso associato, fornisce a ciascuna particella la propria massa. Le masse dell'elettrone e delle diverse specie di quark sono tutte generate dall'interazione di queste particelle con il campo di Higgs. Si potrebbe dunque pensare che il bosone di Higgs sia il responsabile ultimo della massa di tutta la materia, dagli atomi agli oggetti che da questi sono costituiti, fino a includere la massa di tutti i pianeti e le stelle del nostro universo. Questa conclusione è tuttavia profondamente sbagliata. Nella realtà, solo una piccolissima frazione (appena qualche per cento!) della massa della materia che ci circonda è spiegata dal bosone di Higgs.

Che cosa dunque dà origine alla maggior parte della nostra massa e a quella degli oggetti che ci circondano? È idea radicata del vivere quotidiano che la massa di un sistema sia data dalla somma delle masse di cui è composto. Così siamo portati naturalmente a pensare, in questo caso a ragione, che la massa di una certa quantità di zucchero sia determinata dalla somma delle masse dei singoli granelli. Allo stesso modo, la massa di un qualunque oggetto è determinata dalla somma delle masse degli atomi che lo compongono. Anche gli atomi hanno una loro struttura interna, e



sono composti da un nucleo molto piccolo e da un certo numero di elettroni che gli orbitano attorno. La massa degli elettroni è migliaia di volte più piccola di quella del nucleo e, quindi, quasi tutta la massa dell'atomo è concentrata nella massa del nucleo. Si tratta di una massa molto piccola se rapportata alle masse con le quali abbiamo abitualmente a che fare. Essa, tuttavia, è concentrata in uno spazio così ridotto che la sua densità è enorme: un millimetro cubo di sola materia nucleare (un granello di sabbia) peserebbe circa 200.000 tonnellate, quanto 1000 moderni aerei di linea

a.
Particolare di un supercomputer (Hitachi SR 16000). I moderni supercomputer raggiungono una potenza di calcolo complessiva pari a 2 PFlops (cioè 2 milioni di miliardi di operazioni al secondo) (vd. approfondimento p. 27).

commerciali. Il granello di sabbia naturalmente pesa molto meno, perché è fatto di atomi e non solo di nuclei atomici ed è quindi composto sostanzialmente di spazio vuoto.

Ciascun nucleo è poi costituito da un certo numero di protoni e neutroni e anche in questo caso la massa è data in prevalenza (per oltre il 99%) dalla somma delle masse dei protoni e dei neutroni suoi costituenti. La massa della materia è così principalmente determinata dalla massa dei protoni e neutroni in essa contenuti.

La risposta tuttavia è ancora incompleta, perché sappiamo che anche il protone e il neutrone a loro volta sono composti di qualcosa di più elementare: quark e gluoni. Nel dettaglio, il protone e il neutrone sono composti ciascuno da tre quark costituenti (o *di valenza*), e l'interazione che tiene legati i quark all'interno di protoni e neutroni avviene mediante continui processi quantistici di emissione e assorbimento di gluoni e coppie di quark. Il problema, per il nostro conto della massa, è che i gluoni sono particelle di massa nulla e che le

masse dei quark, *up* e *down*, sono rispettivamente circa 400 e 200 volte più piccole della massa di protoni e neutroni. I fisici sono sempre molto cauti nell'assegnare un valore alla massa dei quark: qui ci riferiamo a pochi MeV per singolo quark.

Per comprendere l'origine della massa di protoni e neutroni si deve ricorrere alla ben nota equazione di Einstein $E=mc^2$ che esprime l'energia di un corpo di massa m quando questo è in quiete (privo dunque di energia cinetica).

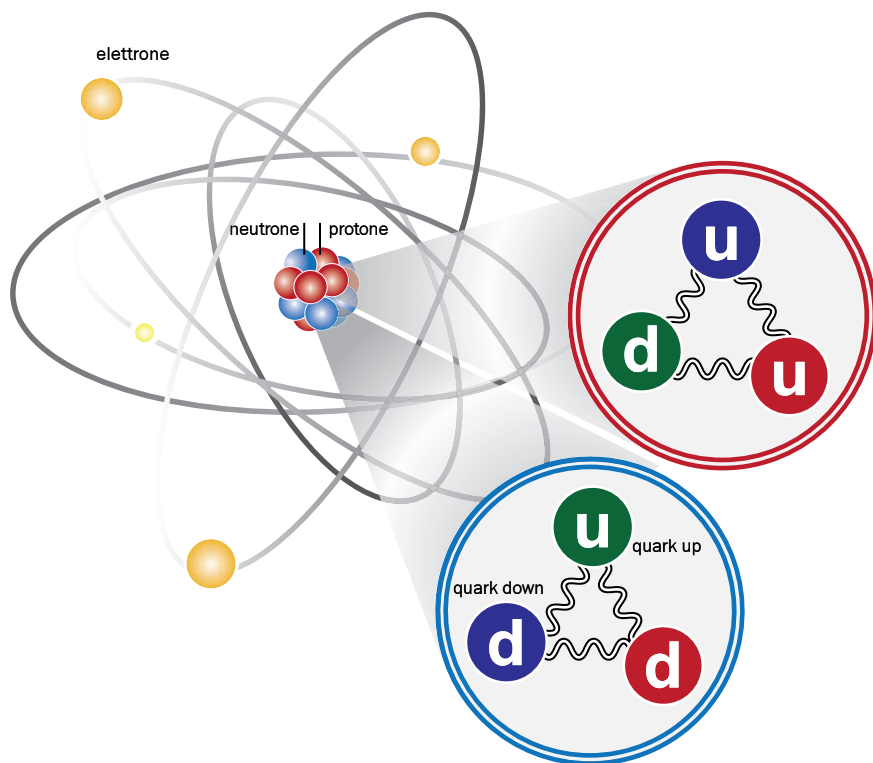
L'equazione di Einstein acquista un significato forse più profondo se riscritta nella forma $m=E/c^2$. Tramite questa equazione la teoria della relatività ci spiega come la massa di un sistema fisico, elementare o composto che sia, altro non è che la sua energia di quiete. La massa è dunque una misura dell'energia del sistema.

Nel caso di un protone o un neutrone in quiete troviamo che la sua massa/energia è originata solo in piccola parte, appena qualche percento, dalla somma delle masse dei quark costituenti. La restante parte è fornita

invece dall'energia della "nuvola" di quark e gluoni: i quark interagiscono tra loro scambiandosi gluoni e questi a loro volta possono generare coppie virtuali quark-antiquark che, dopo un tempo brevissimo si annichilano producendo altri gluoni. L'interno di un *nucleone* (protoni e neutroni) appare dunque come un groviglio dinamico di particelle fortemente interagenti, che compaiono e scompaiono continuamente. L'energia di questa nuvola costituisce la maggior parte della massa di protoni e neutroni e, dunque, la massa di tutta la materia che ci circonda.

Le interazioni tra quark e gluoni della forza forte sono chiamate *interazioni forti* e la teoria che le descrive con grande accuratezza, la cromodinamica quantistica (QCD), descrive il comportamento di quark e gluoni attraverso "eleganti" equazioni.

L'eleganza, in questo caso, non è legata all'aspetto esteriore ma al fatto di rispettare un principio di simmetria. Questo concetto, alla base delle moderne teorie dei campi, implica anche che è sufficiente conoscere pochi

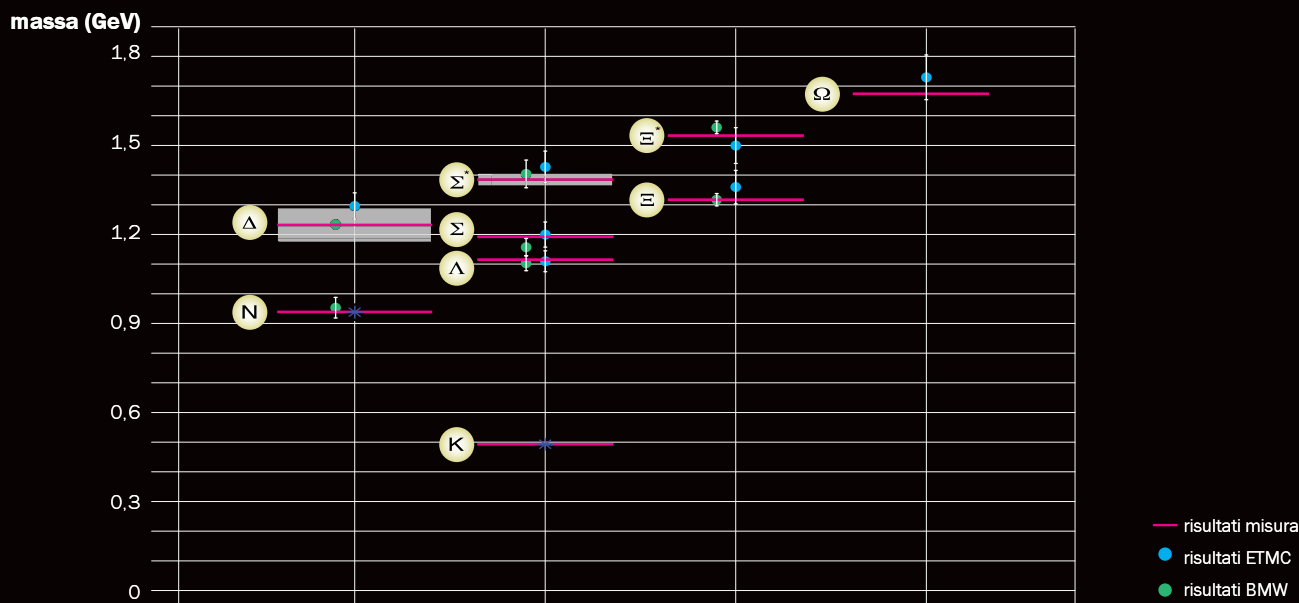


b.
Schema (non in scala) della struttura di un atomo fino ai suoi componenti elementari. Sono visibili gli elettroni intorno al nucleo, i neutroni e i protoni nel nucleo e, infine, i quark e i gluoni che costituiscono protoni e neutroni.

Calcoli massici

1.

Le masse di alcuni adroni, misurate dagli esperimenti (linee rosa) a confronto con quelle calcolate con i supercomputer da due collaborazioni internazionali (punti). In verde i risultati di Bmw (Budapest-Marseille-Wuppertal lattice QCD collaboration) e in blu quelli di Etmc (European Twisted Mass Collaboration).



Il calcolo delle masse dei nucleoni a partire da quella dei quark è stata una delle sfide lanciate dalla QCD fin dalla sua nascita. Il problema principale era l'enorme potenza di calcolo necessaria per considerare l'influenza delle coppie quark-antiquark nello scambio dei gluoni.

Solo da pochi anni, nel 2007, si è raggiunta la potenza di calcolo necessaria per fare un calcolo accurato delle masse.

La figura riproduce i risultati ottenuti per le masse di alcuni *adroni* (particelle soggette alla forza forte). Le masse misurate dagli esperimenti (linee) sono confrontate con quelle calcolate da due collaborazioni internazionali (punti):

verdi per Bmw (Budapest-Marseille-Wuppertal lattice QCD collaboration) e blu per Etmc (European Twisted Mass Collaboration), questi ultimi ottenuti in parte usando i supercalcolatori Ape progettati dall'Infn.

Tra i supercomputer più moderni spicca quello installato nel giugno 2012 presso il Cineca di Bologna per il sistema di calcolo Fermi. Questo sistema è nono nella graduatoria mondiale dei supercomputer (www.top500.org) ed è usato per le simulazioni numeriche di QCD sul reticolo da parte del gruppo teorico della sezione Infn di Roma Tre.

parametri, in questo caso le masse dei quark e un'unica costante di accoppiamento dal cui valore dipende l'intensità dell'interazione forte, per descrivere in modo completo il comportamento di quark e gluoni.

A dispetto però della loro eleganza e semplicità formale la risoluzione delle equazioni della QCD è estremamente complessa. Essa richiede l'impiego di tutta la potenza dei più moderni supercomputer per simulare il comportamento quantistico della nuvola di gluoni e quark, calcolarne l'energia e ottenere da questa il valore della massa di protoni, neutroni e molte altre particelle composte di quark.

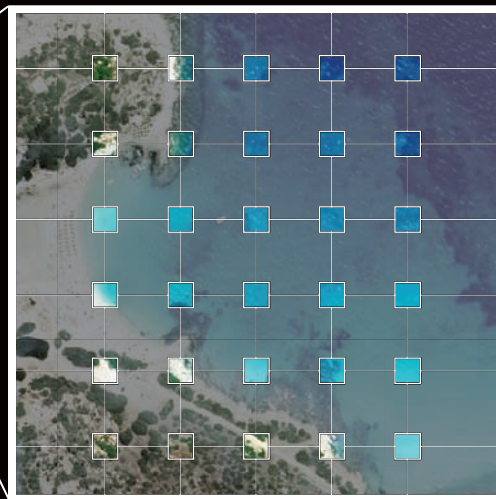
Studiata in questo modo, con l'ausilio di potenti supercomputer, l'elegante teoria delle interazioni forti ha permesso di capire l'origine della massa che costituisce la materia che ci circonda, e di calcolare valori di massa in ottimo accordo con le misure sperimentali (vd. approfondimento). Grande protagonista di quest'anno, il bosone di Higgs, non è certo sminuito nel suo ruolo: esso spiega la massa dei costituenti fondamentali della materia, dei quark, che sono circa l'1% della massa di ciò che ci circonda, mentre i risultati della QCD spiegano come da questo 1% si arrivi a ottenere il restante 99%.

Il mondo in un reticolo



1.

Per risolvere le equazioni della QCD si utilizza un "reticolo". Meridiani e paralleli sono un tipico esempio di reticolo bidimensionale, e se le proprietà della QCD fossero valide anche per la geografia, potremmo ottenere la mappa del mondo intero dallo studio di un solo tratto di costa.



Le equazioni della QCD sono matematicamente eleganti e "semplici". Ma la loro risoluzione lo è molto meno. Non sono equazioni come $y=x^2$, dove per ogni valore di x si può calcolare la y senza difficoltà. Nella QCD non funzionano le tecniche usate per la soluzione di equazioni "difficili" (per i curiosi, in questo caso la QCD è una *teoria non perturbativa*) e "per ogni x " bisogna usare un supercomputer per un bel po' di tempo per sapere "quanto farà y ". In QCD, se la y che vogliamo calcolare è la massa di una particella o la sua probabilità di interazione, la x è in realtà una complicata funzione delle distribuzioni dei quark e dei gluoni all'interno della particella. Anche con i supercomputer, per giungere alle soluzioni, i fisici devono introdurre due espedienti. Nel caso delle interazioni tra le particelle possiamo paragonare il calcolo a una cartina geografica. Il primo espediente è considerare solo alcuni punti dello spaziotempo, un po' come se sulla cartina esistessero solo i punti all'incrocio di meridiani e paralleli. Su questi punti si trovano i quark, mentre i gluoni forniscono i collegamenti tra un incrocio e l'altro. Il secondo: studiare un volume spaziotemporale piccolo, di solito 4 o 5 volte il raggio di un protone. Nell'esempio della cartina geografica, è come voler girare il mondo con una cartina ottenuta studiando solo un tratto di costa sarda, senza curarsi del resto. Mentre nel caso del viaggio avremmo ben poche possibilità di successo, nel caso della QCD alcune proprietà fondamentali (per i curiosi, la *libertà asintotica* e la *località delle interazioni*) permettono di controllare con precisione gli effetti dei due espedienti usati, garantendo la correttezza dei risultati ottenuti. [Barbara Sciascia]

Biografia

Vittorio Lubicz è professore associato di fisica teorica all'Università Roma Tre. Si occupa di fenomenologia delle interazioni delle particelle elementari, in particolare dello studio delle interazioni forti mediante simulazioni numeriche di QCD sul reticolo. È attualmente membro della collaborazione Etmc (European Twisted Mass Collaboration), che comprende fisici provenienti da 16 diverse istituzioni di ricerca in Europa.

Link sul web

<http://www.physics.adelaide.edu.au/theory/staff/leinweber/VisualQCD/Nobel/>

Con passo leggero

Che cosa sappiamo sulla massa dei neutrini?

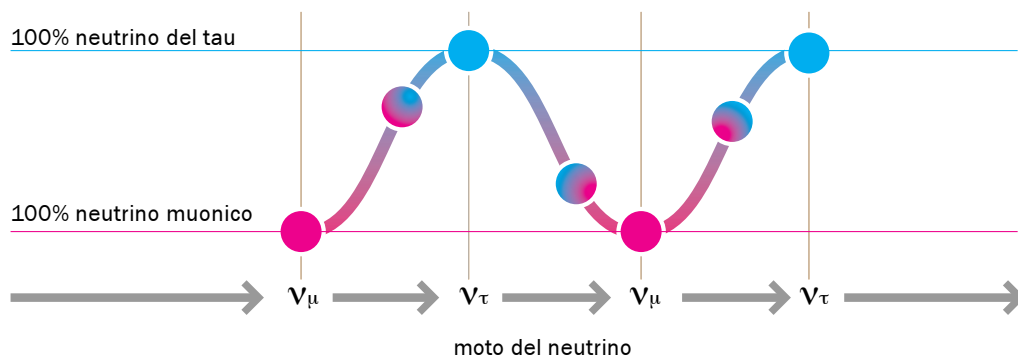
di Francesco Vissani

L'idea che i neutrini potessero avere una massa è nata con i neutrini stessi. Nella famosa lettera del 1930, indirizzata ai "cari signore e signori radioattivi", Wolfgang Pauli sosteneva che queste particelle "differiscono dai quanti di luce, in quanto non viaggiano alla velocità della luce". Seguendo queste idee e grazie alla supernova SN1987A (la prima e unica mai osservata come sorgente di neutrini, mezzo secolo dopo l'affermazione di Pauli), abbiamo imparato che la massa dei neutrini non può superare i 6 eV. Tre anni dopo la lettera di Pauli, Enrico Fermi proponeva di investigare una regione specifica del processo nucleare in cui i neutrini sono emessi: quella in cui l'energia cinetica dei neutrini è piccola e dove, pertanto, gli eventuali effetti dovuti alla loro massa vengono amplificati. Ma anche questo metodo di indagine, nel corso degli anni, non ha dato che dei limiti sulla massa dei neutrini, mostrando che essa deve essere più piccola di 2 eV. I limiti più restrittivi disponibili provengono dalla cosmologia, che vincola la somma della massa dei tre tipi di neutrini conosciuti (chiamati *elettronico*, *muonico* e *del tau*) a essere meno di 0,6 eV. A breve, grazie ai dati della missione spaziale *Planck Surveyor*, dovremmo sapere che cosa succede sotto questo limite (vd. p. 40, ndr). Per adesso, l'unico metodo che ha fornito delle misure anziché dei limiti superiori è quello proposto da Bruno Pontecorvo nel 1957. Questo si basa sulla cosiddetta *oscillazione* dei neutrini, termine che indica la trasformazione dei neutrini da un tipo in un altro (vd. fig. b). La spiegazione di questo fenomeno, offerta dalla meccanica quantistica, è che il neutrino di un dato tipo sia un "mix" di neutrini (1, 2 e 3) di masse diverse (vd. fig. c). Siccome questi neutrini, che si propagano come onde, hanno una diversa velocità, essi acquistano fasi diverse: pertanto, durante la propagazione, la composizione del neutrino si modifica. Dallo studio delle oscillazioni si possono desumere informazioni sulla massa dei



neutrini, dato che le differenze di fase delle onde sono proporzionali alle differenze dei quadrati delle masse. Le differenze misurate sono molto piccole in confronto ai limiti sperimentali di cui abbiamo parlato sopra, che sono intorno all'eV, e addirittura minuscole quando le confrontiamo con la massa delle particelle cariche: basti pensare che la più leggera di esse, l'elettrone, pesa circa mezzo milione di eV.

a.
Il fisico austriaco Wolfgang Pauli, che nel 1930 per primo intuì l'esistenza del neutrino.



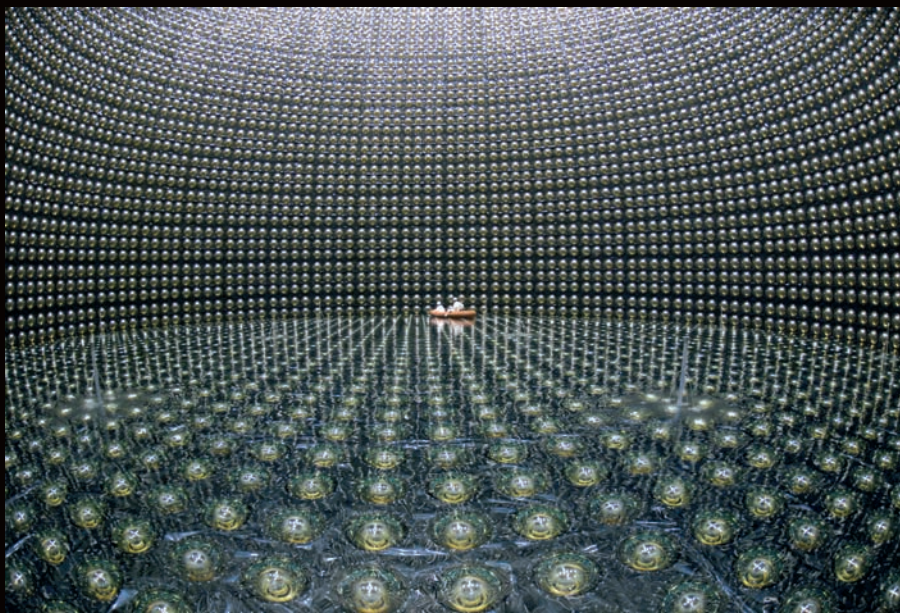
b.
Raffigurazione dell'oscillazione del neutrino, da muonico a del tau.

Nel prossimo futuro, lo studio dell'oscillazione verrà approfondito. Per prima cosa si mirerà a capire qualcosa di più sulla massa dei neutrini noti. Vorremmo sapere se le loro masse sono disposte gerarchicamente, come avviene per le altre particelle elementari (ad esempio, nel caso dei leptoni, il muone è circa 200 volte più pesante dell'elettrone e il tau circa 3500 volte, vd. p. 10), ma al momento non possiamo

escludere che ci sia una coppia di neutrini di massa quasi uguale e un terzo neutrino più leggero. Un secondo problema dibattuto è se il fenomeno dell'oscillazione coinvolga solo i tre neutrini noti o se esistano nuovi tipi di neutrini. Le indicazioni al riguardo sono confuse e la cosmologia pone vincoli stringenti, ma scoprire una nuova particella elementare avrebbe un effetto dirompente sulle ricerche.

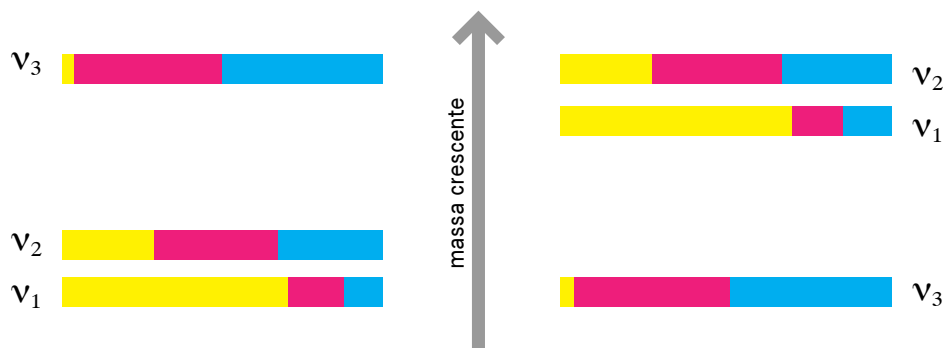
[as] approfondimento

Oscillazioni alla prova



1.
L'osservatorio per neutrini Super-Kamiokande in Giappone contiene 50.000 tonnellate di acqua che vengono osservate da oltre 10 mila fotomoltiplicatori. L'interazione di un neutrino con gli elettroni o i nuclei dell'acqua può produrre una particella carica che, muovendosi nell'acqua a una velocità superiore a quella della luce nell'acqua stessa, produce un lampo di luce. Questo fenomeno, chiamato effetto Cherenkov, viene registrato dai fotomoltiplicatori, portando informazioni sul neutrino che lo ha prodotto.

Avendo a disposizione un fascio di neutrini la cui composizione iniziale sia ben nota, possiamo verificare la presenza di oscillazioni in due modi diversi. Nel primo modo, si osserva una scomparsa di neutrini. Ad esempio, vari esperimenti hanno verificato che i neutrini elettronici provenienti dal Sole erano meno numerosi del previsto, mentre altri esperimenti hanno constatato che lo stesso avveniva ai neutrini muonici prodotti nell'atmosfera terrestre. Tra gli esperimenti da ricordare a questo proposito, che hanno operato dagli anni '70 in poi, ci sono lo statunitense Homestake, Kamiokande e Super-Kamiokande in Giappone, il canadese Sno ma anche Macro, Gallex/Gno e Borexino dei Laboratori Nazionali del Gran Sasso dell'Infn. Nel secondo modo si osserva una comparsa di neutrini di tipo diverso da quello iniziale. L'osservazione di questo fenomeno è l'obiettivo principale dell'esperimento Cngs (Cern Neutrinos to Gran Sasso). Esso coinvolge il Cern di Ginevra, da dove viene inviato un fascio di neutrini muonici, e di nuovo i Laboratori del Gran Sasso, dove si trovano due rivelatori, Opera e Icarus, che registrano l'arrivo dei neutrini e ne identificano il tipo. Il rivelatore Opera ha mostrato la presenza di neutrini di tipo tau, offrendo così un'ulteriore conferma dell'esistenza delle oscillazioni e del fatto che il neutrino abbia una massa. Icarus, invece, ha posto un limite al coinvolgimento di neutrini di tipo elettronico nello stesso fenomeno.

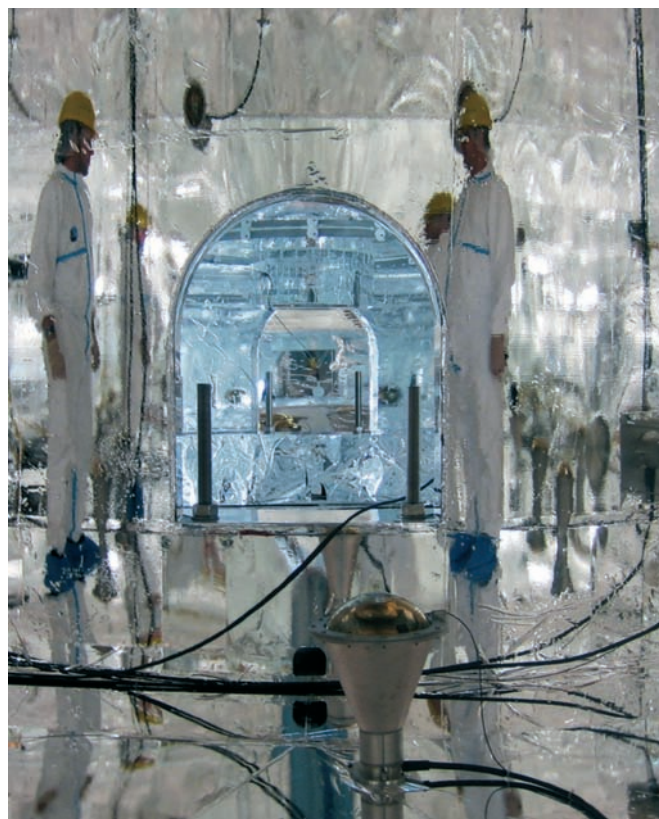


c. Quale è lo spettro di massa dei neutrini? I tre tipi di neutrino conosciuti, noti come neutrino elettronico, muonico e del tau, sono in realtà un "mix" di altrettanti neutrini, con masse ben definite e differenti, chiamati 1, 2 e 3. Gli esperimenti indicano che 2 pesa più di 1, ma non sappiamo ancora se il terzo neutrino sia il più pesante (a sinistra), oppure il più leggero (a destra).

Ora allarghiamo il quadro. La scoperta del bosone di Higgs celebra il trionfo del modello standard delle particelle elementari. Ma questo modello prevede che la massa dei neutrini sia nulla e questo contraddice l'esistenza delle oscillazioni. In altre parole, gli esperimenti hanno già dimostrato che il modello standard non è una descrizione completa del mondo delle particelle elementari. Non è difficile proporre qualche sua estensione che spieghi la massa dei neutrini. È tuttavia difficile farlo in modo convincente e verificabile.

Un contributo importante viene proprio dallo studio sperimentale della massa dei neutrini. È opinione diffusa tra i fisici che i neutrini siano dotati di una massa di origine particolare, detta *di Majorana*. Se così fosse, sarebbe possibile un nuovo tipo di transizione nucleare, in cui un nucleo atomico cambia di due unità la carica elettrica, creando due elettroni e nient'altro (noto come *doppio decadimento beta senza neutrini*), cosa che nel modello standard è impossibile. Dalla misura della probabilità di questa ipotetica transizione, si potrebbe determinare la massa dei neutrini in modo indipendente. L'esperimento Heidelberg-Moscow dei Laboratori del Gran Sasso è l'unico a sostenere di aver osservato questa transizione, anche se la probabilità misurata indica un valore della massa oltre il limite stabilito dalla cosmologia. Le verifiche per adesso effettuate dall'esperimento statunitense Exo e da quello giapponese Kamland-Zen non hanno dato riscontro positivo, ma le prove dirimenti saranno quelle effettuate dagli esperimenti Gerda e Cuore nei Laboratori del Gran Sasso dell'Infn. Nei prossimi mesi, sapremo se bisognerà avviare radicali e stimolanti ripensamenti o se il quadro teorico esistente ne uscirà rafforzato.

Al giorno d'oggi, i teorici si adoperano per costruire estensioni predittive del modello standard, in cui i neutrini abbiano massa; dibattono se quegli stessi modelli siano capaci di spiegare l'asimmetria cosmica tra materia e antimateria (o, per usare termini più evocativi, l'origine della materia); valutano le implicazioni per Lhc. In ogni caso, le masse dei neutrini restano uno dei principali strumenti sperimentali per investigare la fisica oltre il modello standard.



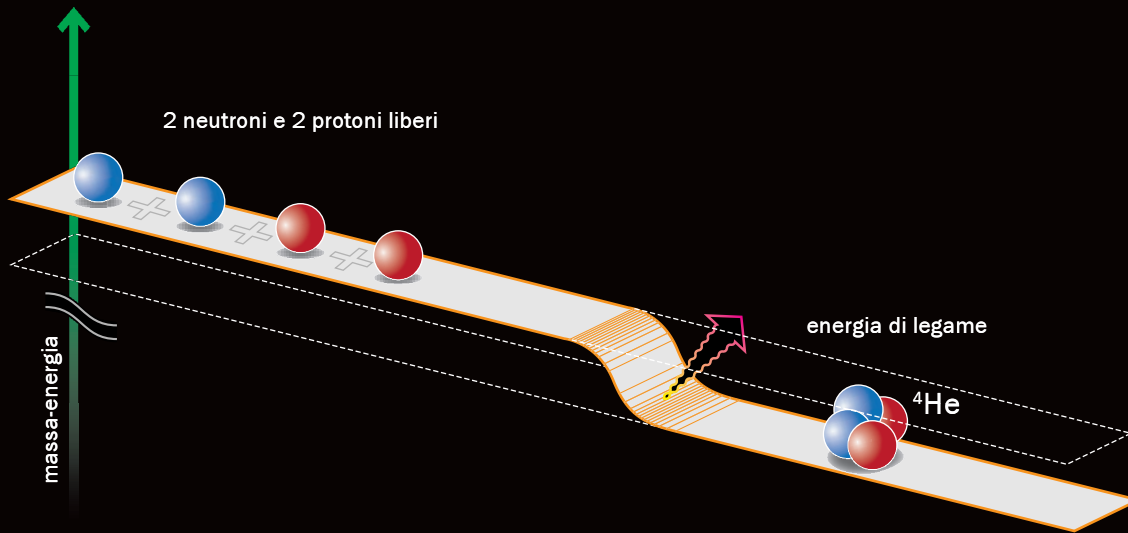
d. Un particolare dell'esperimento Gerda (GERmanium Decay Array), nei Laboratori del Gran Sasso. Gerda è dedicato allo studio del doppio decadimento beta senza emissione di neutrini. Questo decadimento potrebbe avvenire a patto che i neutrini coincidano con gli antineutrini, come suggerito da Ettore Majorana nel 1937: una misura della velocità di decadimento permetterebbe di desumere il valore della massa dei neutrini.

Biografia

Francesco Vissani è interessato allo studio della fisica e della astrofisica dei neutrini. Lavora nel gruppo di fisica teorica dei Laboratori del Gran Sasso.

[as]

La pesantezza dei legami.



a.
La massa di un nucleo (nella figura, il nucleo di elio) è minore della somma delle masse delle particelle che lo compongono, cioè le masse che avrebbero le singole particelle “libere”, perché bisogna anche tenere conto dell'energia di legame. L'energia di legame del nucleo di elio è pari a circa l'1% della sua massa. I nuclei più legati esistenti in natura sono il ${}^{56}\text{Fe}$ e il ${}^{62}\text{Ni}$.

“In una reazione chimica nulla si crea, nulla si distrugge, ma tutto si trasforma”. Così, alla fine del 1700, scriveva l'eclettico scienziato francese Lavoisier, dopo aver misurato la massa totale di ceneri e fumi prodotti da una combustione. Con questa affermazione Lavoisier aveva definito la legge di conservazione della massa di *prodotti e reagenti* di una reazione chimica. Nei secoli successivi, i fisici hanno dimostrato che dietro la sua affermazione c'è però molto di più della conservazione della massa (che oggi sappiamo avere una validità limitata).

La materia che definiamo “ordinaria” è formata da elettroni e dai due quark leggeri, di tipo up e down. Questi due tipi di quark si combinano per formare i protoni e i neutroni. Qual è, allora, la massa dell'atomo più semplice, cioè l'idrogeno, formato da un elettrone e un protone?

Abbiamo visto che il bosone di Higgs dà la massa alle particelle elementari come gli elettroni e i quark, ma il “dono” della massa è ben più complesso.

Se sommiamo la massa dell'elettrone – che vale meno di un millesimo della massa dell'idrogeno – e dei tre quark che costituiscono il protone, otteniamo solo circa un centesimo della massa dell'atomo di idrogeno. La teoria della QCD (vd. p. 25) ci ha infatti dimostrato che la massa del protone è data principalmente dall'energia delle interazioni forti, tra i quark e i gluoni, che lo costituiscono. Così, se alle masse attribuite dal meccanismo di Higgs ai quark e all'elettrone aggiungiamo l'energia della “colla forte” del protone, otteniamo praticamente tutta la massa dell'atomo di idrogeno. Tutta a

meno di qualche milionesimo di frazione: l'energia che lega l'elettrone al protone. Questa è l'energia che si libera nelle combustioni chimiche, e che Lavoisier non poteva misurare con le sue bilance.

Cosa succede, invece, per gli atomi più complessi?

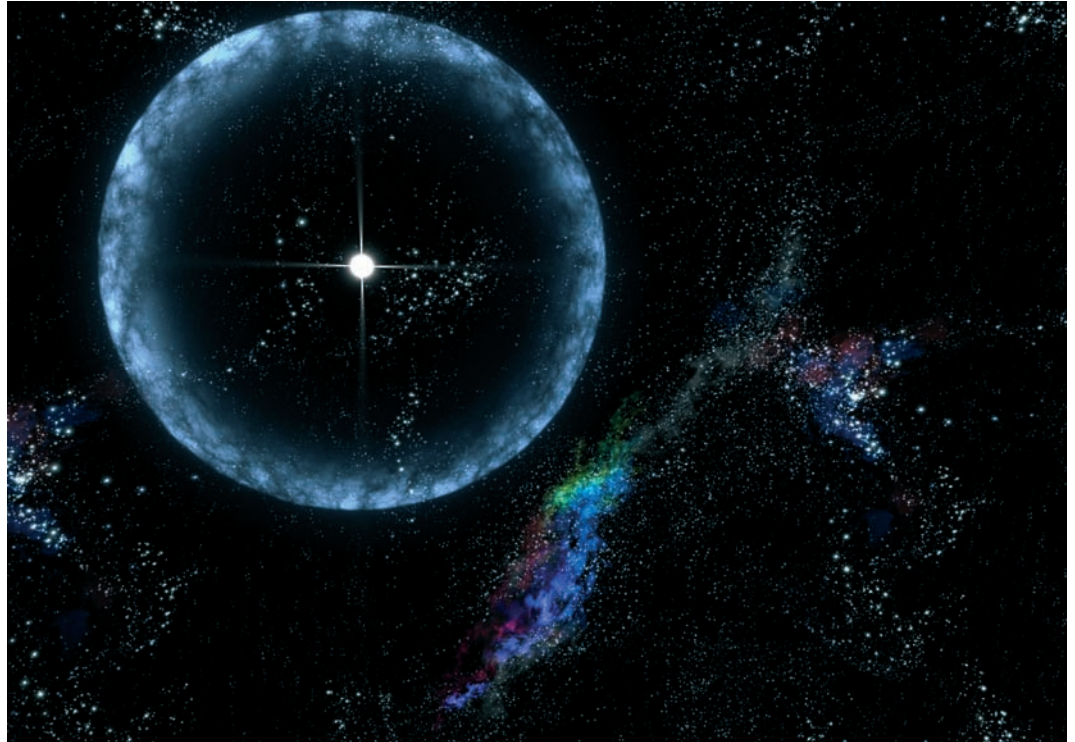
Poiché gli elettroni hanno massa molto piccola, la massa degli atomi è in buona approssimazione quella dei loro nuclei, formati da protoni e neutroni. Ma, ancora una volta, non basta sommare le masse di protoni e neutroni per ottenere la massa totale del nucleo. La massa di un nucleo è infatti più piccola della somma delle masse delle singole particelle non legate: bisogna infatti considerare la cosiddetta *energia di legame nucleare* (vd. fig. a). Nei nuclei atomici agisce infatti una forza prevalentemente attrattiva tra i nucleoni (protoni e neutroni), residuo della interazione forte dei gluoni. Questa forza ha il sopravvento sulla forza di repulsione coulombiana (elettrostatica) tra i protoni – carichi positivamente – creando un sistema legato. L'energia di legame nucleare vale mediamente poco meno dell'1% della massa totale del nucleo, ma questo è un valore comunque enorme ed è l'energia che si libera nelle stelle durante i processi di fusione che, dall'idrogeno, producono nuclei sempre più pesanti, fino al ferro, che è il nucleo più legato.

Se Lavoisier avesse potuto fare una “combustione” nucleare, si sarebbe accorto che la somma delle masse non si conserva: occorre sempre considerare la conservazione massa-energia! [Giorgio Riccobene]

[as]

Masse estreme.

a.
Rappresentazione artistica dell'esplosione di una supernova avvenuta nel dicembre 2004, con successiva formazione di una stella di neutroni, a 50.000 anni luce dalla Terra. Il bagliore emesso dalla stella fu così intenso che oscurò temporaneamente tutti i satelliti a raggi X e illuminò la parte alta dell'atmosfera terrestre.



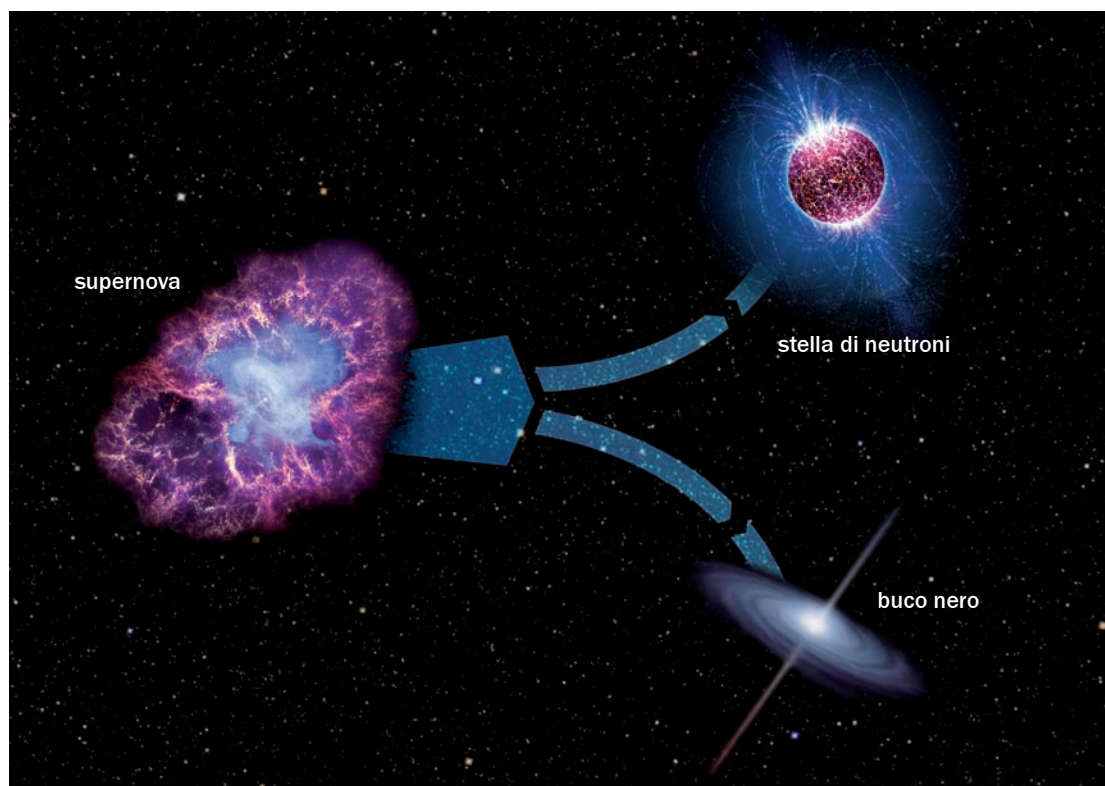
Nell'universo esistono corpi celesti la cui massa si trova in uno stato caratterizzato da densità così elevate da essere considerati dai fisici come dei "laboratori naturali" per lo studio della massa in condizioni estreme. Si tratta delle *stelle di neutroni* e dei *buchi neri*, due tra i possibili stadi finali dell'evoluzione stellare (vd. fig. b).

Quando una stella di grande massa esplode in una supernova, rimane un nocciolo centrale, residuo dell'esplosione, la cui massa ne determina la successiva evoluzione (vd. p. 16 in *Asimmetrie* n. 9, "Nuclei e stelle"). Se la massa del nocciolo residuo è compresa tra circa una volta e mezzo e tre volte quella del Sole, il collasso gravitazionale continua fino al momento in cui gli elettroni e i protoni si saranno trasformati in neutroni e neutrini. Essendo molto penetranti, i neutrini sfuggono dalla stella, diffondendosi nello spazio circostante e lasciando un nocciolo composto in gran parte da neutroni. In queste condizioni, nel nocciolo ha origine una nuova sorgente di pressione, fenomeno noto come *pressione di degenerazione dei neutroni*, che si oppone al collasso gravitazionale e lo arresta.

La degenerazione dei neutroni è un fenomeno quantistico dovuto al *principio di esclusione di Pauli*, secondo il quale due particelle identiche con spin semi-intero (come per esempio

due neutroni, il cui spin vale $\frac{1}{2}$) non possono occupare lo stesso stato quantico. I neutroni della stella si distribuiscono così in differenti "livelli energetici" con energia non nulla. Questo produce una pressione verso l'esterno che equilibra la pressione gravitazionale e crea un oggetto stabile. Nasce così una stella di neutroni, un corpo celeste estremamente compatto, di massa paragonabile a quella del Sole ma con un raggio di appena qualche decina di chilometri e, di conseguenza, con una densità altissima, dell'ordine di 10^{17} chilogrammi al metro cubo, centomila miliardi di volte superiore alla densità solare.

Una stella di neutroni è un sistema legato, la cui massa è inferiore alla somma delle masse dei neutroni che lo compongono a causa dell'energia di legame attrattiva, di natura prevalentemente gravitazionale. Calcoli basati sulla relatività generale e sulle proprietà della materia nucleare, necessari per descrivere gli effetti gravitazionali in condizioni di elevate densità, mostrano che l'energia di legame può arrivare fino al 30% della massa della stella. L'effetto è dunque di gran lunga superiore a quello delle energie di legame dei nuclei (vd. p. 32). Questa enorme quantità di energia è trasportata dai neutrini emessi durante l'esplosione della supernova.



Se il nocciolo residuo ha una massa ancora maggiore, superiore a tre o quattro volte la massa del Sole, il collasso non potrà essere contrastato da alcun fenomeno fisico noto e, al posto di una stella di neutroni, si forma un buco nero.

Che cosa succeda alla materia all'interno del buco nero, e allo stesso spaziotempo in queste condizioni estreme, è uno dei quesiti più attuali della fisica moderna (vd. p. 35). Qui la meccanica quantistica e la forza di gravità, che di solito agiscono in ambiti separati regolando, rispettivamente, il comportamento microscopico e quello macroscopico dei sistemi fisici, entrano in gioco contemporaneamente, sollevando problemi fondamentali, perché non è stata ancora formulata una teoria soddisfacente che unifichi la gravità e la meccanica quantistica. Per ottenere una descrizione completa di questo tipo di oggetti, infatti, bisogna essere in grado di calcolarne la *funzione d'onda quantistica*, l'espressione matematica che descrive completamente lo stato dei sistemi microscopici come atomi o molecole. Solitamente il comportamento quantistico non è rilevante a distanze macroscopiche. Ma nel caso di stelle di neutroni e buchi neri, a causa delle elevatissime densità in gioco, le funzioni d'onda dei singoli componenti microscopici

sono sovrapposte le une alle altre, ed è necessario descrivere il comportamento collettivo di una quantità enorme di oggetti: 10^{57} neutroni nel caso delle stelle di neutroni e ancora di più per i buchi neri, invece del centinaio di neutroni e protoni presenti nei nuclei più pesanti. Ma la vera difficoltà è un'altra: se per gli atomi e le molecole trascurare la forza di gravità è un'ottima approssimazione, questo non è più vero per le stelle di neutroni e i buchi neri, in cui questa forza gioca un ruolo fondamentale. Il calcolo completo della funzione d'onda in presenza della gravitazione è un problema ancora non risolto. Addirittura, nel caso dei buchi neri, i tentativi di risolvere il problema portano a conseguenze paradossali, che sembrano trovare soluzione solo modificando radicalmente la teoria della gravità – la relatività generale di Einstein – o addirittura i principi della meccanica quantistica. Lo studio di questi corpi celesti densissimi, dunque, oltre ad avere interesse astrofisico, può aprire una prospettiva per la conoscenza della fisica fondamentale a scale di energia irraggiungibili dagli acceleratori di particelle. Ecco perché questi oggetti rappresentano dei veri e propri "laboratori" di fisica fondamentale dal valore inestimabile.

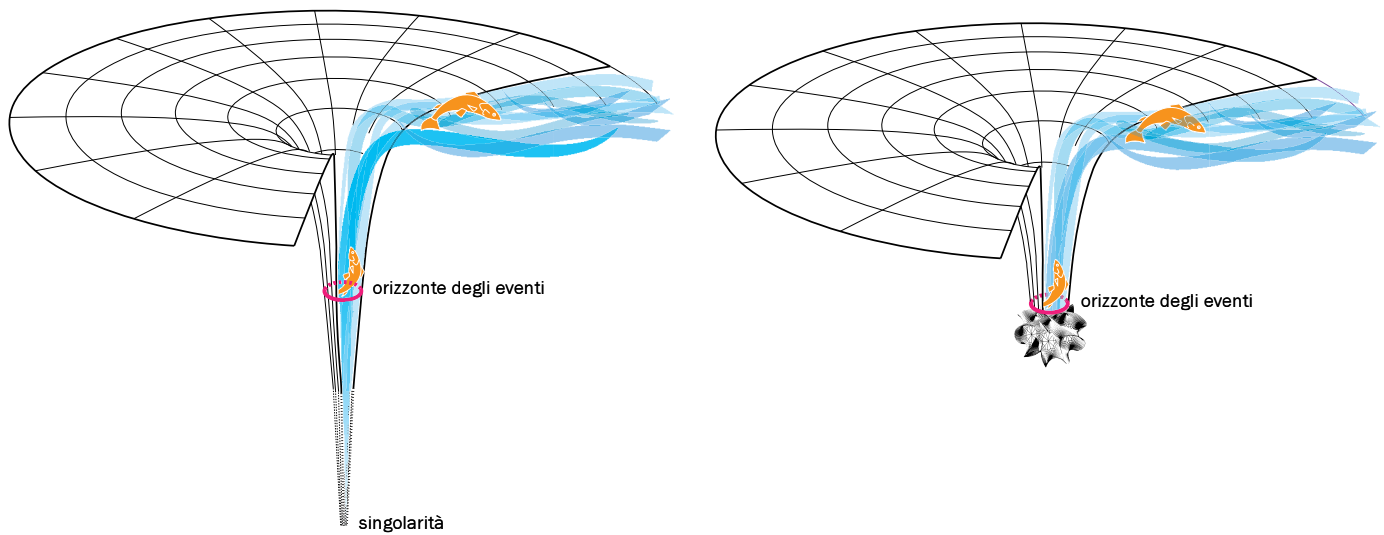
b.
Per effetto del collasso gravitazionale, una stella di grande massa può esplodere in una supernova, il cui residuo è una nebulosa come quella a sinistra nella figura. Se il nocciolo centrale residuo (il pallino bianco appena visibile al centro della nebulosa) ha una massa tra 1,5 e 3 masse solari, la supernova evolve in una stella di neutroni. Se il nocciolo ha una massa maggiore di 3-4 volte la massa del Sole, il collasso continua fino a dare luogo a un buco nero.

Nel buio dei buchi neri

Dove la gravità incontra la meccanica quantistica

di Gianguido Dall'Agata





I buchi neri sono tra gli oggetti più affascinanti ed estremi dell'universo, capaci di divorare e distruggere intere stelle. La forza di gravità dovuta alla loro massa enormemente concentrata fa sì che per un qualsiasi oggetto che si muova verso di essi esista un punto di non-ritorno: una superficie immaginaria chiamata *orizzonte degli eventi*, superata la quale nulla può più tornare indietro, nemmeno la luce (vd. fig. a).

Da questo deriva il loro nome e per questo motivo, non potendoli osservare direttamente, ci siamo convinti della loro esistenza solo osservando gli effetti della loro presenza nello spazio circostante. Una convinzione oggi tanto radicata da far ritenere che al centro di ogni galassia si trovi un buco nero.

I buchi neri però non sono solo affascinanti oggetti astrofisici. Fin dalla loro scoperta sono stati un laboratorio teorico eccezionale per la comprensione della forza di gravità e, allo stesso tempo, una vera e propria sfida alle idee su cui si fonda la descrizione delle leggi fondamentali della fisica.

Uno dei principi cardine della teoria che è alla base della fisica moderna, la meccanica quantistica, è l'assunzione che un qualunque sistema in evoluzione conservi l'informazione contenuta in esso, che siano cioè conservati all'interno del sistema tutti i dati necessari a identificare il suo stato iniziale (si dice in questo caso che l'evoluzione del sistema è *unitaria*). Nel processo di creazione di un buco nero tutta l'informazione contenuta nella materia che collassa viene confinata al suo interno. In altri termini, visto dall'esterno, un

buco nero formato ad esempio a partire da oggetti macroscopici, come una o più stelle, è indistinguibile da uno che è stato "assemblato" mettendo insieme oggetti più piccoli, come palle da biliardo o singoli atomi. In questi casi, cioè, l'informazione su quali tra questi differenti "stati iniziali" abbia dato origine al buco nero è nascosta all'osservatore che si trova fuori dall'orizzonte degli eventi. Questo non sarebbe un problema, se si usa la teoria classica di Einstein per descrivere il buco nero: esso vive in eterno e si può immaginare che questa informazione sia preservata, ma non più accessibile a chi guarda dall'esterno. La situazione cambia nel momento in cui si considerano gli effetti quantistici. Come mostrato da Stephen Hawking, infatti, ogni buco nero *evapora*, ossia emette radiazione termica in modo continuo, in corrispondenza dell'orizzonte degli eventi. Dato che questo tipo di radiazione è estremamente "povera" di informazione, essendo caratterizzata da un solo parametro (la temperatura), la massa/energia che fuoriesce dal buco nero attraverso questo processo non trasporta alcuna informazione sullo stato iniziale. Poiché l'esito finale del processo di evaporazione è la scomparsa del buco nero, con lui scompare anche tutta l'informazione, in palese contraddizione con i fondamenti della meccanica quantistica. Nel cercare una soluzione a questo problema sono nate molte nuove idee affascinanti, ci sono stati anche forti scontri tra gli scienziati e si sa di una famosa scommessa tra Hawking, convinto che i buchi neri violassero

a.

Per capire cosa succede alla materia nelle vicinanze di un buco nero possiamo ricorrere a una semplice analogia: pensiamo al corso di un fiume, vicino a una grande cascata. Un pesce potrà risalire il fiume controcorrente e tornare verso acque più tranquille soltanto fino al momento in cui la velocità dell'acqua che si avvicina alle rapide diventa uguale a quella del pesce. A quel punto, per quanto si sforzi, il pesce sarà trascinato nella cascata senza accorgersene (nel buco nero avrebbe oltrepassato l'orizzonte degli eventi). A sinistra è raffigurato un buco nero classico, nel cui centro la densità tende all'infinito. Ciò è rappresentato dalla punta (la cosiddetta *singolarità*). A destra la raffigurazione di un buco nero secondo la teoria delle stringhe.

l'unitarietà, e Preskill, sostenitore della superiorità dei principi della meccanica quantistica.

Una possibile soluzione a queste contraddizioni è offerta dalla teoria candidata a fornire una corretta descrizione della gravità quantistica: la *teoria delle stringhe*. In base ad essa, i quanti fondamentali non sono particelle elementari puntiformi, ma oggetti estesi noti come *stringhe*.

Per la teoria delle stringhe, un buco nero è un oggetto molto diverso da quello che conosciamo dalla teoria classica di Einstein: l'interno è completamente alterato e la sua nuova struttura, più complessa ma più regolare (vd. fig. a), permette all'informazione di sfuggire all'esterno, se pure dopo tempi estremamente lunghi, risolvendo la contraddizione tra l'evaporazione e la conservazione di informazione.

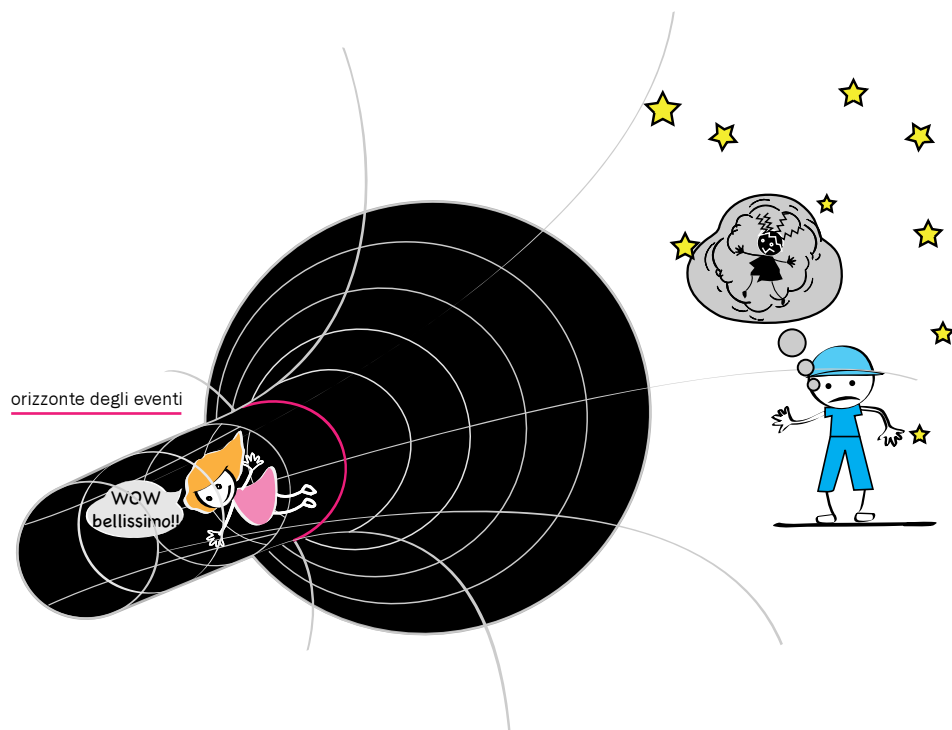
In particolare, lo studio dei buchi neri all'interno della teoria delle stringhe ha portato all'affermazione di un principio, chiamato *principio olografico*, secondo il quale la gravità sarebbe la manifestazione di una teoria quantistica che vive in uno spazio con un numero minore di dimensioni, proprio come succede in un ologramma, dove un'immagine apparentemente tridimensionale è realizzata tramite una struttura bidimensionale. Se il principio olografico è corretto, essendo le teorie quantistiche unitarie – esse conservano cioè

l'informazione – qualunque processo fisico, inclusa la formazione e l'evaporazione dei buchi neri, deve essere unitario. Proprio a seguito dell'affermarsi di queste idee Hawking ha finalmente ammesso la propria sconfitta nella scommessa con Preskill.

Questo però non significa saper tutto su questi oggetti affascinanti, anzi, il loro studio è una continua fonte di sorprese, di importanti lezioni e di accesi dibattiti.

Ancora oggi si discute sulla vera natura delle modifiche della loro struttura interna necessarie per risolvere il paradosso dell'informazione.

Infatti, un ipotetico osservatore che cada in un buco nero non si accorge del momento in cui ha passato l'orizzonte degli eventi e rimane intrappolato al suo interno (vd. fig. b). D'altra parte, le modifiche introdotte per spiegare come l'informazione viene rimessa dal buco nero sembrano implicare l'esistenza di un muro di materia e radiazione che si accumula all'orizzonte e che, data l'elevatissima temperatura che ne consegue, non può essere compatibile con la sopravvivenza dell'avventato visitatore. Dunque chi cade nel buco nero sa di sopravvivere, mentre chi lo osserva da fuori ne constata senza ombra di dubbio la fine. Un altro paradosso la cui soluzione ci farà capire meglio questi affascinanti oggetti e la vera natura della forza di gravità.



b.

La presenza della radiazione di Hawking crea situazioni paradossali. Chi cade in un buco nero non si accorge del momento in cui ha passato l'orizzonte degli eventi e rimane intrappolato al suo interno. Chi osserva da lontano, invece, vede un muro di radiazione termica, conseguente all'evaporazione che si accumula all'orizzonte e che, data l'elevatissima temperatura che ne consegue, non può essere compatibile con la sopravvivenza. Ecco il paradosso: chi cade nel buco nero sa di sopravvivere, mentre chi lo osserva da fuori ne constata senza ombra di dubbio la fine.

Biografia

Gianguido Dall'Agata è professore di fisica teorica presso l'Università di Padova. Ha lavorato all'Università von Humboldt di Berlino, al Cern e all'École Normale Supérieure di Parigi. Per le sue ricerche sulle teorie di supergravità e di superstringa ha vinto il premio Sigrav nel 2008.

Missing

Sulle tracce della massa mancante dell'universo

di Stefano Borgani

La cosmologia moderna ha visto negli ultimi 15 anni un avanzamento senza precedenti che ha permesso di determinare con grande precisione la storia dell'espansione cosmica e di risalire alla struttura dell'universo fino a 380.000 anni dopo il Big Bang.

Oggi sappiamo di conoscere solo una piccola parte di ciò che costituisce l'universo: solo il 5% è infatti formato da materia "ordinaria", quella di cui siamo fatti noi e gli atomi che ci compongono. Tutto il resto è oscuro, per essere più precisi circa il 22% è costituito da una forma sconosciuta di materia chiamata *materia oscura* e il restante 73% da un qualcosa di ancora più strano, chiamato *energia oscura*.



a.

Immagine di una galassia distante circa 15 miliardi di anni luce ripresa dall'Hubble Space Telescope: a causa dell'ammasso di galassie distante oltre 6 miliardi di anni luce (visibile al centro della foto), la luce proveniente dalla galassia distante viene deviata per effetto lente gravitazionale e la galassia appare come la serie di archi azzurri intorno all'ammasso centrale.

La storia della materia oscura cominciò negli anni '30 quando l'astronomo svizzero Fritz Zwicky osservò che le galassie nell'ammasso della Chioma di Berenice si muovono troppo velocemente per poter essere tenute insieme soltanto dalla reciproca attrazione gravitazionale. Per misurare la velocità delle galassie rispetto alla velocità media dell'ammasso si usa lo spostamento relativo della luce delle galassie, analogo all'effetto Doppler per il suono.

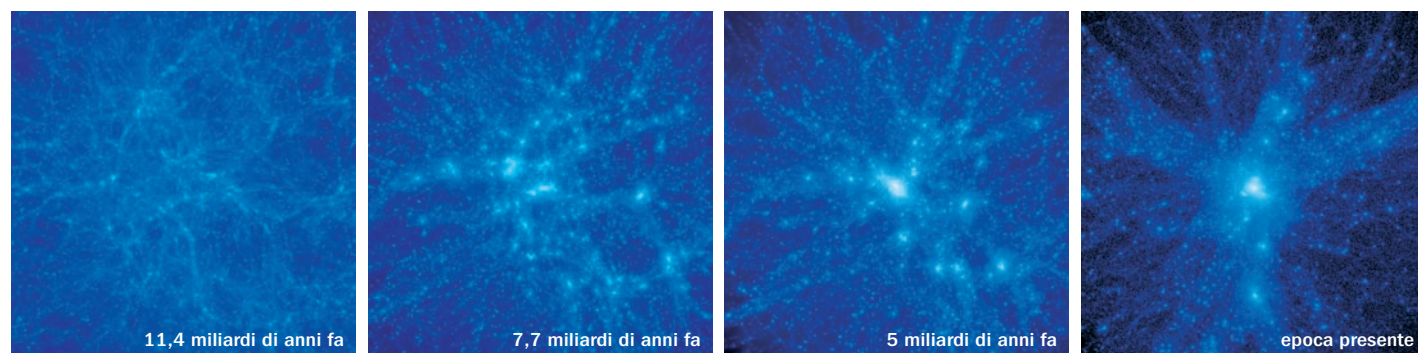
Basandosi su questa osservazione, Zwicky ipotizzò che una massa non visibile, appunto oscura, fosse presente tra e intorno alle galassie, impedendo loro di scappare via.

Successive e più raffinate osservazioni hanno confermato che gli ammassi di galassie e le singole galassie possiedono una quantità notevole di materia oscura che domina su quella visibile e che determina la loro dinamica interna. Nella fig. a si vede un'immagine ripresa dallo Hubble Space Telescope che mostra un notevole addensamento di galassie e la presenza di una elevata quantità di materia oscura testimoniata dagli effetti di lente gravitazionale che distorcono in archi le galassie (per approfondire, vd. Asimmetrie n. 4, "La materia oscura").

Le nostre attuali conoscenze non ci permettono di stabilire cosa sia la materia oscura e di rispondere a questa domanda, ma sappiamo cosa non può essere: non può essere costituita dalla stessa materia alla base di tutto ciò che vediamo nella realtà quotidiana e che è formata da particelle chiamate *barioni*, costituite a loro volta da tre quark. Questa materia, detta *barionica*, emette, assorbe o diffonde radiazione elettromagnetica, al contrario della materia oscura. A questa conclusione sconcertante si è giunti studiando due epoche distinte della storia cosmica dell'universo. Studiando la formazione dei nuclei degli elementi più semplici (idrogeno, deuterio, elio e tracce di litio), avvenuta pochi minuti dopo il Big Bang, si è capito che i barioni non possono contribuire per più di 1/6 alla massa che misuriamo nelle strutture cosmiche.

Altre importanti informazioni sono arrivate dallo studio della radiazione cosmica di fondo, emessa quando l'universo aveva circa 380.000 anni. Questa radiazione arriva a noi sotto forma di microonde e ci fornisce un'immagine di come era l'universo allora, quando gli atomi di idrogeno si sono ricombinati. Oggi sappiamo che le minuscole disomogeneità presenti nella radiazione cosmica di microonde, di appena circa una parte su centomila, sono i semi da cui si sono formate le galassie. Sono state osservate galassie già mezzo miliardo di anni dopo il Big Bang, ma in un universo costituito di sola materia barionica le disomogeneità misurate non sarebbero state sufficienti a formarle così presto.

L'esistenza di galassie formatesi già nel lontano passato indica che la materia oscura è non solo non barionica, ma anche fredda. La "temperatura" della materia è una misura della velocità con cui si muovono le particelle elementari che la costituiscono; in analogia con quanto previsto dalla teoria cinetica dei gas, cioè che in un gas freddo le molecole si muovono in media più lentamente di quelle di un gas a temperatura più alta, dire che la materia oscura è "fredda" significa che le sue particelle si muovono molto lentamente, rispetto a quelle della materia oscura "calda". La temperatura della materia oscura ha ripercussioni cruciali sul modo in cui le galassie e le altre strutture cosmiche si formano. Particelle di alta velocità, tipiche della materia oscura calda quali i neutrini, tenderebbero a sfuggire alla reciproca attrazione gravitazionale, ritardando la formazione delle galassie. Viceversa, in un universo dominato da materia oscura fredda, le strutture di piccola massa, le *protogalassie*, si formerebbero per prime, mentre oggetti via via più massicci (grandi galassie ellittiche, ammassi di galassie) si formerebbero successivamente per fusione degli oggetti più piccoli. Questa formazione "gerarchica" delle strutture cosmiche è illustrata nella fig. b, che mostra una simulazione al computer dell'evoluzione della



b. Formazione di un ammasso di galassie predetta da una simulazione numerica eseguita al computer: i quattro pannelli mostrano le fluttuazioni della densità di materia oscura fredda 11,4, 7,7, 5 miliardi di anni fa e all'epoca presente. La regione mostrata ha una dimensione di circa 70 milioni di anni luce.

Occhi puntati sull'universo oscuro



1.
Rappresentazione artistica
del satellite Planck.

Per cercare di cogliere l'essenza della materia oscura, gli scienziati ne cercano tracce con ogni mezzo. Planck (1) è un satellite progettato per guardare "all'alba del tempo" e misura con alta precisione i dettagli della radiazione di fondo cosmico di microonde. Allo stesso tempo, sono in corso osservazioni da terra da parte del progetto Boss (2) che ci permetteranno di capire come dalle minuscole increspature della radiazione di fondo cosmico di microonde si sia formata la struttura dell'universo odierno, con zone piene di galassie e altre incredibilmente vuote.

In futuro, dalla terra l'Extremely Large Telescope Europeo (3) rivoluzionerà la nostra comprensione su come le galassie si siano formate a partire dalle piccole onde nel mare di materia oscura, aumentando la nostra comprensione sull'origine dell'universo e i suoi costituenti fondamentali. Dallo spazio il Webb Space Telescope (4) e Euclid (5) osserveranno le galassie dell'universo primordiale, studiando la storia dell'espansione dell'universo e l'evoluzione delle strutture cosmiche.

Link sul web

- 1: www.esa.int/SPECIALS/Planck/index.html
- 2: www.sdss3.org/surveys/boos.php
- 3: www.eso.org/public/teles-instr/e-elt.html
- 4: www.jwst.nasa.gov
- 5: www.euclid-ec.org

densità di materia oscura fredda che porta alla formazione di un ammasso di galassie. Determinare quanto fredda sia la materia oscura è uno degli argomenti di ricerca di punta nella cosmologia osservativa degli ultimi anni. Se da un lato le osservazioni delle strutture cosmiche indicano un universo dominato da una materia oscura e sconosciuta, rimane la domanda su quali siano le particelle elementari che la costituiscono. Presumibilmente le risposte arriveranno soltanto dagli esperimenti che si conducono nei laboratori terrestri. Tuttavia i telescopi e i satelliti che continuano a scrutare l'universo definiranno con sempre maggior precisione il "lato oscuro" dell'universo, cioè il suo contenuto in materia ed energia oscure.

Biografia

Stefano Borgani è direttore dell'Osservatorio Astronomico di Trieste dell'Istituto Nazionale di Astrofisica (Inaf) e professore presso l'Università degli studi di Trieste. Svolge ricerche in ambito cosmologico e in quello della fisica astroparticellare. È coinvolto in progetti di simulazioni numeriche per la formazione di strutture cosmiche, nonché nella missione Euclid dell'Agenzia Spaziale Europea (Esa).

[as] intersezioni

Quando la massa non pesa.

di Umberto Guidoni

astronauta (missione Sts-75, 1996, e missione Sts-100, 2001)

Passano poco più di otto minuti dall'accensione dei motori dello Space Shuttle al momento in cui essi tacciono definitivamente. Un volo breve, durante il quale si lascia alle spalle la Terra e si raggiunge l'orbita. Al principio, lo Shuttle si innalza lentamente, fatica a sollevare il suo peso di oltre duemila tonnellate. Gradualmente accelera fino a diventare supersonico – una, due, ...25 volte. L'accelerazione si stabilizza attorno a tre volte l'accelerazione di gravità sulla Terra e rimane costante negli ultimi minuti: una sensazione di pesantezza, mai provata così a lungo, che rende difficile persino muovere la testa. Poi, il senso di schiacciamento sparisce d'incanto, cessa il rumore dei motori e si è proiettati in avanti dall'improvvisa decelerazione, come nel caso di una brusca frenata. Le cinghie di sicurezza del seggiolino impediscono di volare via ma, invece di ritornare seduti, si rimane a galleggiare tra il seggiolino e le cinture. Quando ci si sgancia e si prova a fluttuare liberamente, i normali riferimenti, il “su e giù”, non hanno più significato e il cervello rischia di confondersi. Se la percezione fisica di quell'insolita leggerezza può creare confusione, la vista della Terra dall'oblò contribuisce a sconvolgere la percezione della realtà. Mentre si compie un'orbita in appena novanta minuti, si susseguono immagini da



a.
Umberto Guidoni nella cabina dello Space Shuttle Columbia (Sts-75) il 22 febbraio 1996.



b.
Lancio dello Space Shuttle, il 19 aprile del 2001, con a bordo Umberto Guidoni. La missione Sts-100, della durata di 11 giorni, è stata la nona visita dello Shuttle alla Stazione Spaziale Internazionale (Iss).

capogiro; uno spettacolo sempre diverso a cui è difficile abituarsi. Da un lato, il nero dello spazio profondo trapuntato di stelle, dall'altro i colori cangianti dei continenti, degli oceani, delle montagne.

Ci vuole qualche ora per imparare a convivere con questa singolare dimensione, dove si è affrancati dalla schiavitù del peso. All'inizio si è maldestri, si compiono movimenti scomposti e si è confusi rispetto alla propria posizione dentro la navetta. Ben presto, però, si trova un nuovo equilibrio che permette di ridefinire i riferimenti spaziali: dove sono i miei piedi è basso e dove è la mia testa è alto, e in una frazione di secondo l'intera cabina ruota sottosopra per riportarmi con la "testa a posto". Sono gli altri membri dell'equipaggio a essere "fuori posto", visto che si ostinano a stare con i piedi su quello che è diventato per me il soffitto.

Fluttuare privi di peso è un'esperienza che espande la sfera dei sensi, introduce nuove situazioni e insoliti problemi di mobilità: per esempio non si può camminare né stare seduti. Mentre si impara ben presto a spostarsi con piccole spinte alle pareti, stare fermi è davvero difficile e basta pigiare sui tasti del computer per cominciare ad allontanarsi all'indietro. Per stabilizzarsi in una determinata posizione, occorre infilare i piedi nelle strisce di tessuto opportunamente sistemate sul pavimento.

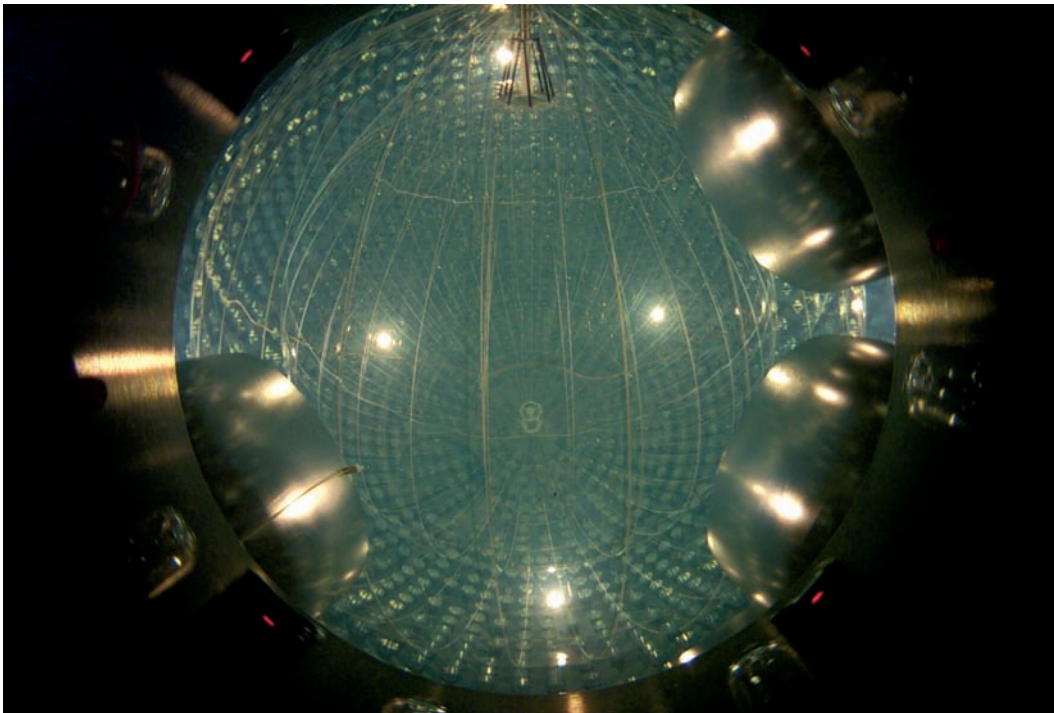
Si avvertono anche i cambiamenti che avvengono nel proprio corpo. Liberata dal suo fardello, la colonna vertebrale si distende e fa guadagnare qualche centimetro d'altezza, lo stomaco risale e il sangue affluisce in maggior quantità verso la testa. L'assenza di peso ha effetti su tutte le attività quotidiane che, sulla Terra, si fanno senza pensare. In un ambiente dove non c'è una direzione privilegiata e dove i riflessi innati non sembrano funzionare, bisogna reinventare come mangiare, dormire, lavarsi.

Si fa appena in tempo ad adattarsi a questa nuova realtà che è già tempo di tornare. È difficile riabituarsi al proprio peso quando, alla fine della missione, si torna "con i piedi per terra". Dopo settimane di inazione, i muscoli dei polpacci sono indolenziti e si fa fatica a fare un passo dopo l'altro e a camminare in linea retta. Solo poche ore prima ci si spostava con il tocco di un dito, ora qualsiasi movimento richiede uno sforzo quasi sovrumano. Sulle prime, ho l'impressione di essere atterrato sul pianeta sbagliato! Ma la brezza marina e l'odore dell'erba umida, che avverto appena fuori dalla cabina dello Shuttle, mi confermano che sono a casa.

[as] riflessi

Messaggeri dal sottosuolo.

di Francesca Scianitti

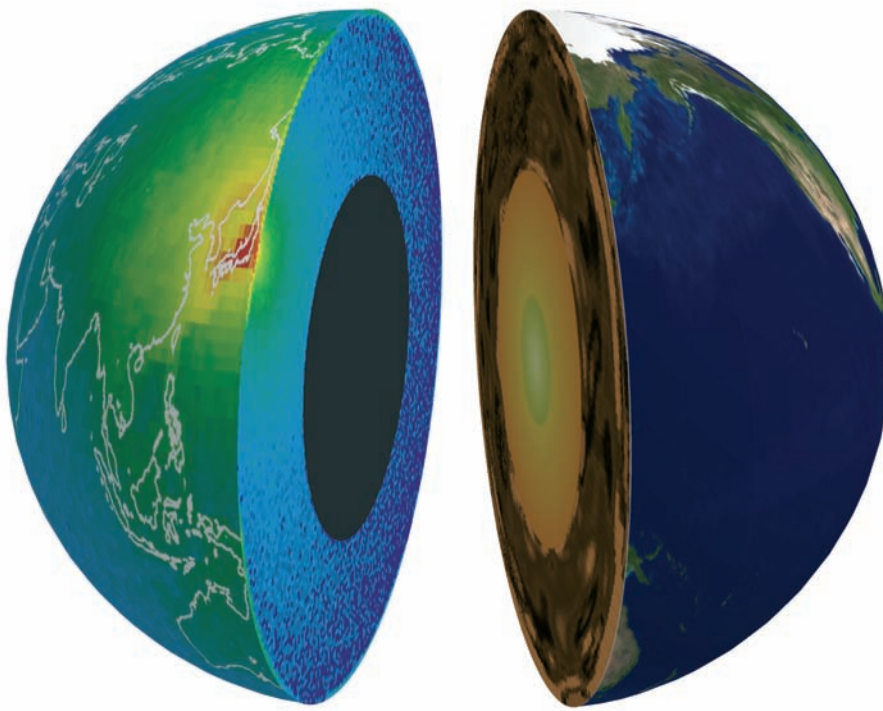


a.
Il rivelatore Borexino dal 2007 opera ai Laboratori del Gran Sasso. Oltre alla rivelazione dei geoneutrini, Borexino ha consentito di ottenere preziose informazioni sulla struttura del Sole e sulle proprietà dei neutrini solari.

La massa della Terra è conosciuta con grande precisione, ma a causa della complessità della crosta terrestre e della sua estensione in profondità sappiamo molto poco sulla composizione del nostro pianeta. Abbiamo paradossalmente molte più informazioni sulle galassie primordiali, lontane nello spazio e nel tempo. Per questo, a fianco ai metodi tradizionali per la parametrizzazione della crosta e del mantello, quali il monitoraggio sismico o le perforazioni in profondità, possono dare un importante contributo metodi alternativi. Confermando un risultato analogo ottenuto dall'esperimento giapponese Kamland alcuni

anni prima, nel 2009 i fisici dell'esperimento Borexino dei Laboratori Nazionali del Gran Sasso dell'Infn hanno rivelato antineutrini elettronici prodotti da decadimenti radioattivi all'interno della crosta terrestre.

“L'interesse dei geofisici italiani per i geoneutrini nasce in occasione di una conferenza tenutasi nel giugno 2010 ai Laboratori del Gran Sasso”, racconta Alessandro Amato, ricercatore dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (Ingv). “La conferenza era stata organizzata per la presentazione dei risultati di Borexino, che aveva rivelato per la prima volta antineutrini



b.
L'esperimento giapponese Kamland studia le proprietà dei neutrini, osservando l'intenso flusso di queste particelle (visualizzato nella figura di sinistra) proveniente dalle centrali nucleari vicine (in rosso nella figura). Kamland ha anche permesso di identificare per la prima volta il debole flusso di geoneutrini (in azzurro), prodotti prevalentemente dai decadimenti dell'uranio e del torio all'interno della Terra.

provenienti dal mantello terrestre. Sembrò da subito un risultato molto promettente per lo studio del sottosuolo, perché apriva la strada alla misura diretta dei processi che avvengono in profondità nel nostro pianeta". La maggior parte dei neutrini che raggiungono la Terra è prodotto dalla stella più vicina, il Sole, e dalle collisioni dei raggi cosmici in atmosfera. Oltre ai neutrini solari, obiettivo primario di Borexino, tra il 2007 e il 2009 l'esperimento ha potuto rivelare una decina di antineutrini provenienti dalla crosta terrestre.

"Sulla base di un modello della crosta terrestre in cui si ipotizza la presenza di uranio e torio, e sapendo che i geoneutrini misurati da Borexino provengono sicuramente dal sottosuolo, è possibile risalire alla componente radiogenica (prodotta dai decadimenti radioattivi, ndr) del calore proveniente dal mantello terrestre. Questo fornirebbe informazioni dirette sulla composizione e struttura del mantello", spiega Nicola Piana Agostinetti, ex ricercatore dell'Ingv, oggi *principal investigator* di un progetto europeo di geotermia presso il Dublin Institute for Advanced Studies.

"È un'extrapolazione molto delicata che può essere fatta solo utilizzando un modello molto accurato della composizione e morfologia della crosta terrestre. Per ottenere un buon modello è necessario incrociare stime indipendenti prodotte da sismologi e geochimici ed eseguire delle perforazioni. Oltre i primi chilometri dalla superficie, tuttavia, la crosta diventa inaccessibile alle perforazioni e le uniche informazioni disponibili sono di tipo geofisico. Per questa ragione, sarebbe necessario affiancare al rivelatore una rete estesa di stazioni sismiche". "Per l'analisi dei dati di Borexino è stato utilizzato un modello approssimato della crosta nei dintorni dei laboratori, ottenuto dai dati geologici regionali", spiega Alessandro Amato. "Per migliorare tale modello, abbiamo iniziato ad analizzare i dati della stazione sismica interna ai laboratori che, grazie alla sua collocazione, è un'ottima stazione, soggetta a bassissimo rumore di fondo. Il suo contributo andrebbe integrato con i dati della rete di sismografi distribuiti nell'Italia centrale. Tali dati sono necessari inoltre per ricostruire un modello tridimensionale

del mantello continentale, che risulta altrettanto importante nella stima del flusso di geoneutrini di Borexino". Sebbene, in un primo lavoro, per i geoneutrini di Borexino sia stato utilizzato un modello della crosta molto semplificato, la misura ha permesso di escludere con buona approssimazione l'ipotesi, da tempo discussa, dell'esistenza di un reattore nucleare naturale alimentato da uranio nel nucleo del pianeta, capace di produrre gran parte del calore terrestre. Se questa ipotesi avesse reale fondamento, infatti, la quantità di antineutrini attesa dovrebbe essere paragonabile a quella dei neutrini emessi da una vicina centrale nucleare, di molto superiore a quella effettivamente rivelata. "A livello globale, lo sviluppo della tecnica consentirebbe di stimare il flusso di calore totale della Terra", precisa Nicola Piana. "Infatti, disponendo di un modello accurato del contesto geofisico e di un certo numero di rivelatori più piccoli, diffusi sulla crosta terrestre, sarebbe possibile risalire all'intera componente radioattiva della massa della Terra, ricostruendo le immagini ottenute con i geoneutrini da ogni rivelatore locale".

[as] spazi

Il dono della massa.

di Francesca Gatti

a.
L'installazione interattiva sul
meccanismo di Higgs, *Il dono
della massa*.



Cosa ci accadrebbe se potessimo rivivere i primissimi istanti di vita dell'universo, prima che il meccanismo di Higgs generasse le masse delle particelle come le conosciamo oggi?

L'installazione interattiva *Il dono della massa*, presente a Genova al Festival della Scienza 2012, ha proposto ai visitatori uno sforzo di immaginazione, per vivere sulla propria pelle un'esperienza impossibile: tornare ai primissimi istanti dopo il Big Bang e passare dallo stato disordinato ad altissima temperatura dell'universo primordiale, caratterizzato da continue collisioni tra le particelle, a quello a più basse temperature che sopravvive ancora oggi, nel quale il campo di Higgs determina un nuovo ordine e genera le masse delle particelle elementari.

Il dono della massa, ideata dall'Ufficio Comunicazione dell'Infn e realizzata in collaborazione con Embrio.net e Paolo Scoppola, è un'installazione interattiva sul meccanismo di Higgs. Il pubblico, immerso in una scenografia interattiva e multimediale, è stato invitato a stimolare la propria immaginazione, tema dell'edizione 2012 del Festival della Scienza, per vivere l'esperienza virtuale di perdere e acquisire la propria massa.

I visitatori si vedevano proiettati sulle pareti come in una sorta di specchio. All'inizio ognuno di loro appariva informe, circondato dal continuo movimento dell'universo primordiale.

Immergendosi progressivamente nell'installazione, il corpo iniziava a prendere consistenza e forma, esperienza che invitava il pubblico a riflettere sul famoso bosone di Higgs e sul significato fisico della massa.

Che cos'è la massa? era anche la domanda principale della mostra che precedeva l'exhibit interattivo. Un allestimento labirintico di pannelli su cui si raccontavano trame parallele: l'ipotesi sviluppata da Peter Higgs sull'esistenza del bosone; la lunga caccia alla particella "dannata" portata avanti per decenni dai fisici di tutto il mondo; lo sviluppo tecnologico da record necessario alla costruzione degli acceleratori di particelle, in particolare Lhc; la passione con cui la comunità del Cern porta avanti le proprie ricerche.

Negli undici giorni di Festival la mostra, allestita alla Loggia della Mercanzia, ha ricevuto la visita di un pubblico variegato: scolaresche di ogni età, da gruppi di prima elementare alle ultime classi dei licei, ma anche curiosi, visitatori di passaggio e persone interessate a conoscere qualcosa di più sulla recente scoperta.

"Credo che dopo quest'esperienza seguirò con maggiore interesse l'evolversi delle ricerche al Cern," racconta Silvia, una studentessa che ha visitato la mostra, che continua: "Prima avevo sentito parlare del bosone solo in maniera abbastanza confusa nei telegiornali. Dopo aver visitato la mostra, finalmente ne so qualcosa di più!".



b.
Uno scorcio dell'allestimento della mostra al Festival della Scienza di Genova.

[as]

In ricordo di Marco Stulle

artista dell'immagine, ideatore della veste grafica di *Asimmetrie*
e suo art director per molti anni



[as] illuminazioni

Particelle sulla bilancia.

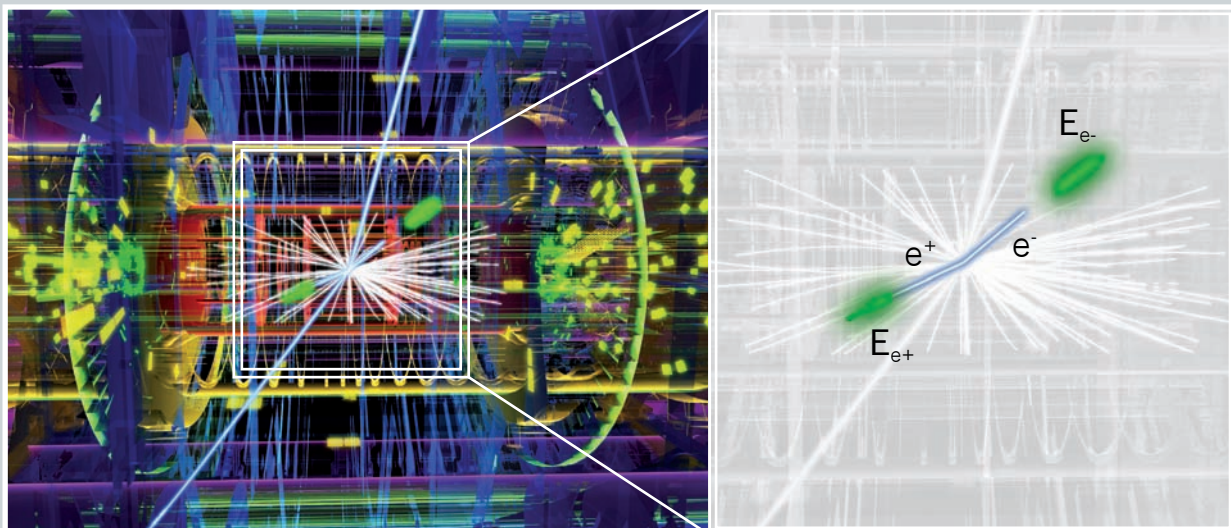
Misurare la massa. Il gesto istintivo è prendere un oggetto e metterlo sulla bilancia. Gesto banale che diviene impossibile quando gli “oggetti” da misurare non sono raggiungibili (come all'interno di una stella di neutroni), sono piccolissimi (un protone) o vivono per tempi brevissimi (miliardesi di miliardesi di secondo) o di cui non sappiamo, se esistono e di che cosa sono fatti (la materia oscura). Eppure nel corso dei secoli i fisici hanno trovato il modo per misurare tutte queste masse. Nulla che possa essere fatto a casa o in classe? Sì e no. No, perché alcune misure richiedono il lancio di satelliti o la costruzione di acceleratori di particelle e rivelatori grandi come palazzi. Sì perché una volta costruiti satelliti o acceleratori e raccolti i dati, il risultato – la misura della massa – può essere ottenuto con poco sforzo.

Un modo possibile è usare parte del materiale del progetto Masterclass (www.physicsmasterclasses.org/) che da anni porta studenti liceali di tutto il mondo a eseguire misure come veri e propri fisici delle particelle (l'esperienza vissuta da un gruppo di studenti è raccontata in *Asimmetrie* n. 4 “Materia oscura”, p. 47).

La misura che vi proponiamo è quella della massa del bosone Z, un “cugino” pesante del fotone (circa 100 volte

la massa del protone, mentre il fotone ha massa nulla) e che vive per poco più di un milionesimo di miliardesimo di miliardesimo di secondo. Quando finisce di vivere, il bosone Z si trasforma (si dice che “decade”) in altre particelle, per esempio in due elettroni. Questo fatto permette di misurare con precisione la massa dello Z. L'equazione $E=mc^2$ deve essere modificata nel caso di una particella in moto per tenere conto del suo impulso (vedi figura). Applicando la conservazione dell'energia e dell'impulso, si possono ottenere le grandezze relative al bosone Z dalla somma di quelle dei prodotti di decadimento, i due elettroni nel nostro caso. Per misurare l'impulso di una particella carica si sfrutta il fatto che la particella curva in campo magnetico in modo inversamente proporzionale all'impulso stesso; misurare quanto curva equivale a misurarne l'impulso. Anche l'energia può essere misurata con precisione quando la particella interagisce con un opportuno materiale.

L'esercizio è spiegato in dettaglio sulla pagina web <http://atlas.physicsmasterclasses.org/it/zpath.htm>: un percorso della durata di circa un'ora e mezza che, partendo da una breve introduzione teorica, porta alla misura della massa dello Z fatta usando i dati raccolti dall'esperimento Atlas nel 2010. [Barbara Sciascia]



A sinistra, rappresentazione di un evento, in cui il bosone Z decade in una coppia elettrone-antielettrone, visto dal rivelatore Atlas. Tra i tanti segnali visibili sono ben riconoscibili, a destra, quelli lasciati da ciascun elettrone: la traccia (in azzurro), da cui si può misurare l'impulso p_e , seguita dal segnale (in verde) lasciato nel calorimetro elettromagnetico, da cui si può misurare l'energia E_e . Dalla conservazione di energia e impulso si misura la massa dello Z: $(m_Z c^2)^2 = E_Z^2 - (p_Z c)^2$, dove $p_Z = p_{e1} + p_{e2}$ e $E_Z = E_{e1} + E_{e2}$.

**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 8068547
schiavon@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

rivista online
www.asimmetrie.it