

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.

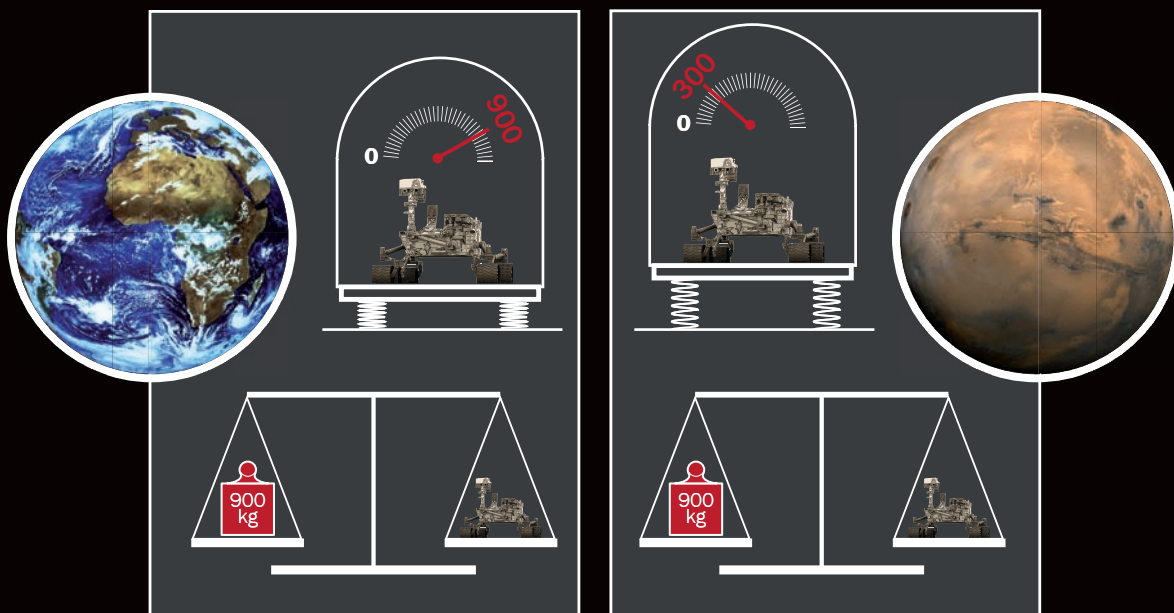
La massa di “Asimmetrie”, così come quella di tutta la materia ordinaria, è concentrata quasi interamente nei nuclei dei suoi atomi, fatti di protoni e neutroni. Questi, a loro volta, sono composti da *quark*, particelle elementari prive di struttura interna, attualmente considerate i costituenti ultimi 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

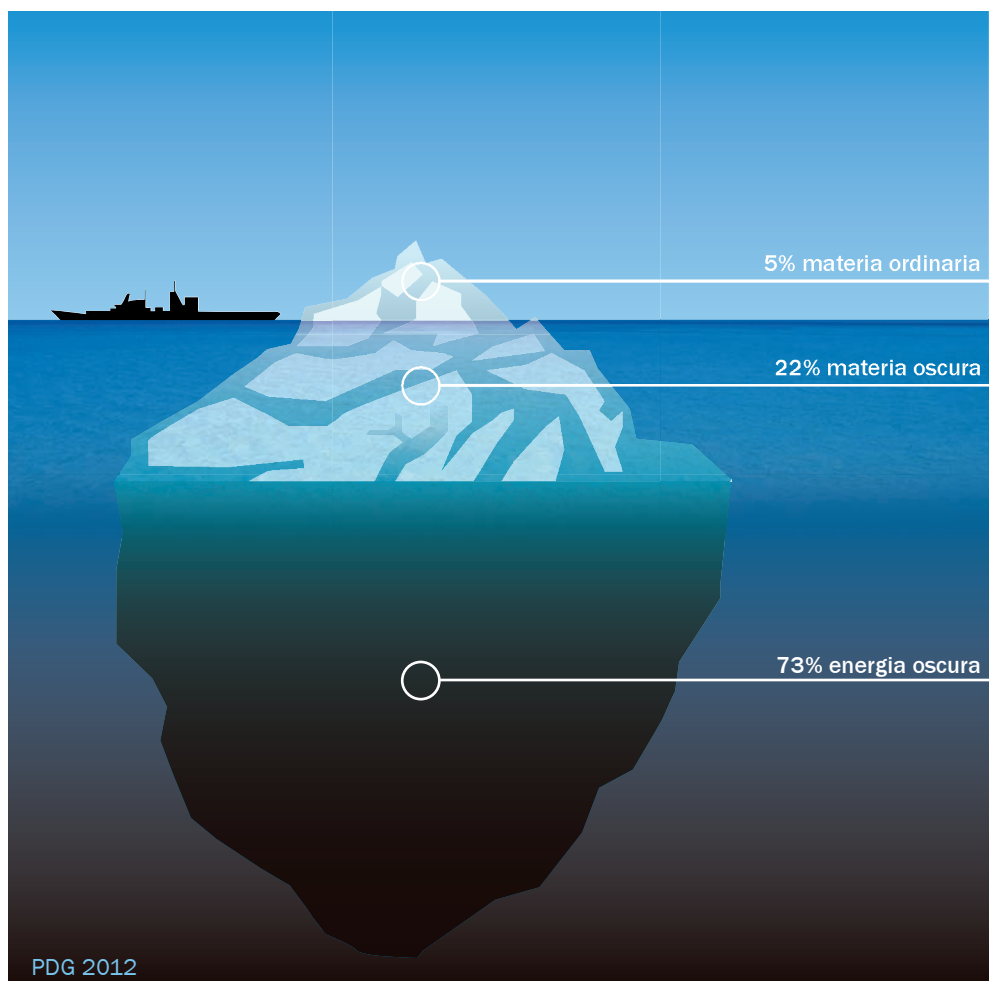
masse non sono note ma si stima siano inferiori al decimo di eV/ c^2 , la più pesante è il quark top, la cui massa (174 GeV/ c^2) è pari all'incirca alla massa di dieci molecole di acqua. Un'avvertenza: i fisici di solito omettono il c^2 nelle misure delle masse, che sono quindi espresse semplicemente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