

# 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.

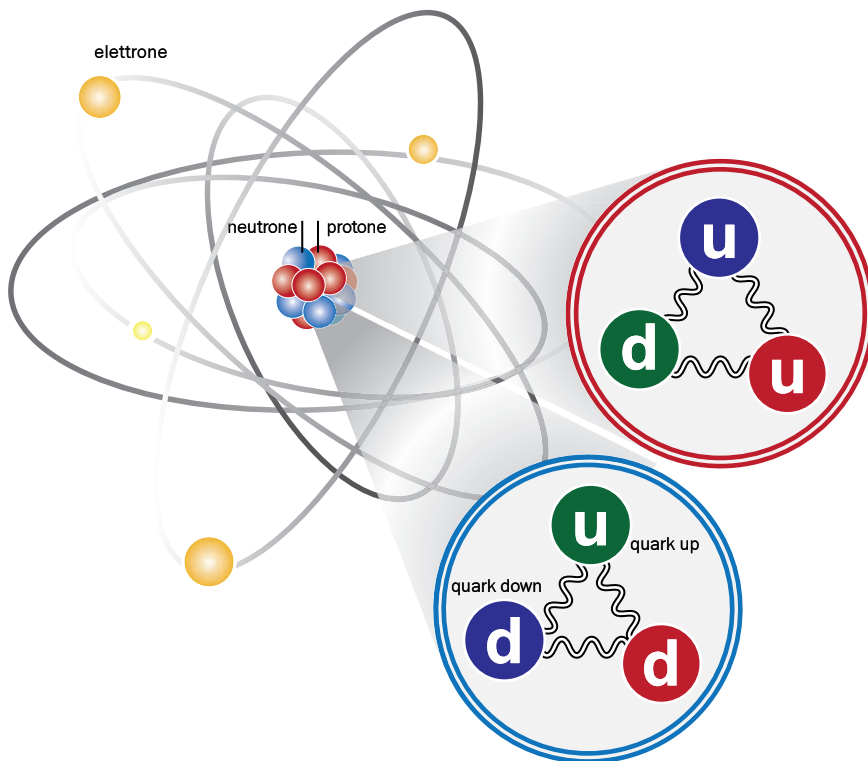
Per comprendere l'origine della massa di protoni e neutroni si deve ricorrere alla ben nota equazione di Einstein  $E=mc^2$  che esprime l'energia di un corpo di massa  $m$  quando questo è in quiete (privo dunque di energia cinetica).

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 per cento, 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

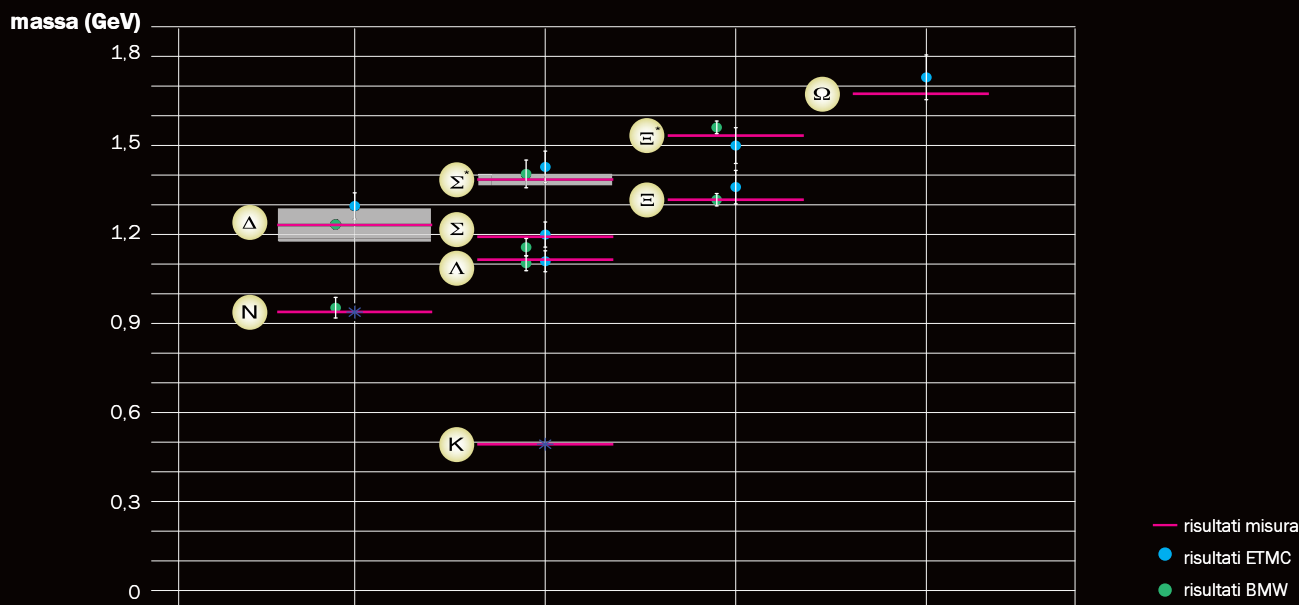


**b.** Schema (non in scala) della struttura di un atomo fino ai suoi componenti elementari. Sono visibili gli elettroni intorno al nucleo, i neutroni e i protoni nel nucleo e, infine, i quark e i gluoni che costituiscono protoni e neutroni.

# Calcoli massivi

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](http://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.

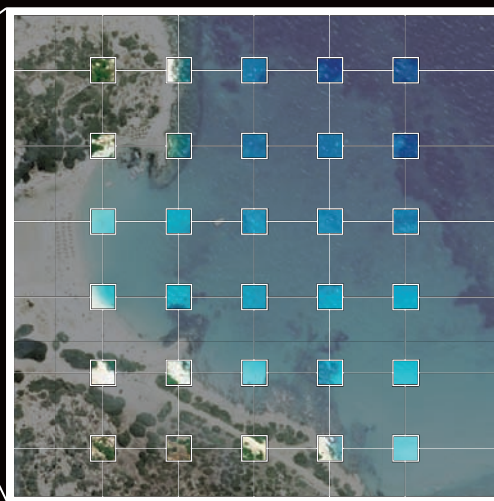
A dispetto però della loro eleganza e semplicità formale la risoluzione delle equazioni della QCD è estremamente complessa. Essa richiede l'impiego di tutta la potenza dei più moderni supercomputer per simulare il comportamento quantistico della nuvola di gluoni e quark, calcolarne l'energia e ottenere 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/>