

# Cambia, todo cambia!

## La variazione delle costanti fondamentali

di Massimo Pietroni

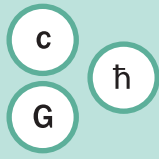
Ogni teoria fisica contiene un certo numero di parametri che non possono essere calcolati a partire dalla teoria stessa, ma devono essere determinati attraverso una misura sperimentale. Un esempio è la costante di Newton,  $G$ , che entra nella legge della gravitazione universale per la forza di attrazione  $F$  tra due masse  $m_1$  e  $m_2$ , poste a una distanza  $R$ :  $F = G m_1 m_2 / R^2$ . La teoria di Newton non fornisce alcuna indicazione sul valore di  $G$ , tanto che questo fu determinato per la prima volta solo nel 1798, e cioè 71 anni dopo la morte di Newton stesso, con le misure tramite bilance a torsione eseguite da Cavendish. Il valore dei parametri fondamentali, all'interno di un dato schema teorico, è *a priori* del tutto ignoto. Per questo motivo, in accordo con tutti i dati sperimentali disponibili in un certo momento, si assume che questi parametri siano costanti nel tempo, e li si indica come *costanti fondamentali*. Alcuni di questi parametri possono variare con l'energia del processo in cui vengono misurati, un fenomeno ben noto che va sotto il nome di *running* delle costanti. Se una nuova misura fisica dovesse mettere in evidenza anche una dipendenza dal tempo di questi parametri, vorrebbe dire che c'è un nuovo meccanismo responsabile di questa variazione temporale, che rende inevitabile modificare lo schema teorico. Il fisico teorico inglese Paul Dirac, uno dei padri della meccanica quantistica, fu tra i primi a proporre che alcune costanti fondamentali fossero in realtà variabili su scale dei tempi dell'ordine della vita dell'universo. Il suo punto di partenza fu l'osservazione che in Natura esistono alcuni numeri molto grandi, che difficilmente possono essere spiegati in modo naturale dalla teoria. Uno di questi è il rapporto fra la forza elettrostatica e quella gravitazionale che si esercitano tra un protone e un elettrone, che vale circa  $10^{40}$  e dà la misura della "forza" dell'elettromagnetismo rispetto alla gravità. La proposta di Dirac fu di spiegare questo numero enorme ipotizzando che la forza elettrostatica e quella

gravitazionale fossero inizialmente dello stesso ordine, e che il rapporto tra loro fosse cresciuto in modo proporzionale all'età dell'universo man mano che questo invecchiava. Concretamente, Dirac immaginò che la costante di Newton  $G$  variasse in modo inversamente proporzionale all'età dell'universo, rendendo la gravità sempre più debole col passare del tempo. Agli occhi di Dirac questa soluzione era attraente, poiché spostava il problema teorico dalla spiegazione di un numero enorme a quella di un numero di ordine uno (il rapporto iniziale tra le due forze) per cui può essere più plausibile immaginare una determinazione in termini di principi elementari.

a.  
Il fisico teorico inglese Paul Adrien Maurice Dirac.



## COSTANTI FONDAMENTALI



## COSTANTI DI INTERAZIONE



## MASSE

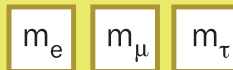
Higgs  $m_H$

$m_W$  bosoni di gauge

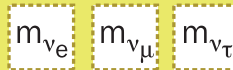
quark



leptoni carichi



neutrini



quark (matrice CKM)



neutrini (matrice PMNS)

## ANGOLI DI MESCOLAMENTO

## PARAMETRI DI VIOLAZIONE DI CP



In realtà, lo schema proposto da Dirac, oltre a basarsi su motivazioni opinabili, non resse ad analisi più approfondite. Per esempio Edward Teller calcolò che poiché, all'aumentare di  $G$ , la luminosità del Sole aumenta (proporzionalmente a  $G^7$ ) e, contemporaneamente, il raggio dell'orbita terrestre si riduce, nel passato la temperatura sulla superficie del nostro pianeta sarebbe stata molto più elevata, raggiungendo addirittura i 100 gradi centigradi tra 200 e 300 milioni di anni fa, rendendo così impossibile la vita così come la conosciamo oggi. Ciononostante, l'idea di base, e cioè la dipendenza dal tempo delle costanti fondamentali, è tuttora dibattuta dai fisici teorici e messa alla prova dalle osservazioni sperimentali.

Nel modello standard le quantità non calcolabili sono almeno 25 e determinano il valore delle masse delle particelle elementari (quark, leptoni, bosoni W e Z, particella di Higgs), le intensità delle interazioni elettrodeboli e forti e il mescolamento tra loro delle tre famiglie di quark e delle tre dei leptoni (vd. fig. b). Allo stato attuale non abbiamo alcun modo per calcolare questi

parametri, sebbene esistano teorie più generali, ancora non confermate sperimentalmente, in cui alcuni di essi possono essere calcolati in termini di altri, perdendo così il loro status di parametri fondamentali.

Oggi sappiamo che anche nel modello standard diversi parametri fondamentali, nei primissimi istanti di vita dell'universo, avevano un valore diverso dall'attuale. Si tratta della *costante di Fermi*, che regola l'intensità delle interazioni nucleari deboli, e delle masse dei quark e dei leptoni, che vengono tutti determinati dal valore del campo di Higgs (vd. Asimmetrie n. 14 p. 22, ndr). Questo ha subito una transizione nell'universo primordiale, all'incirca  $10^{-27}$  secondi dopo il Big Bang, passando da zero al valore a cui è rimasto "congelato" fino ai nostri giorni. Sebbene questa variazione sia avvenuta troppo indietro nel tempo per aver lasciato tracce osservabili, è possibile che un comportamento simile sia ancora all'opera, oggi, per altri campi analoghi al campo di Higgs. Nell'ambito della teoria delle stringhe, per esempio, le costanti fondamentali sono tutte fissate dal valore di particolari campi dinamici, alcuni dei quali

b.

Il modello standard della fisica delle particelle contiene, oltre alle tre costanti fondamentali,  $c$  (velocità della luce),  $G$  (costante di Newton) e  $\hbar$  (costante di Planck), altri 26 parametri che vengono considerati costanti nel tempo, ma che potrebbero anche essere variabili in una teoria più estesa. Questi fissano l'intensità delle interazioni ( $G_F$ ,  $\alpha$ ,  $\alpha_s$ ), le masse delle particelle, il mescolamento fra le diverse famiglie di quark e leptoni e la violazione della simmetria CP.



c.  
Il quasar RX J1131 distante circa sei miliardi di anni luce.

potrebbero essere ancora in moto. In questo scenario, per esempio, anche l'interazione elettromagnetica, quella che è misurata con la precisione più elevata, potrebbe aver subito una variazione nel corso delle epoche cosmologiche recenti. Un destino analogo potrebbero avere avuto, per esempio, il rapporto tra massa dell'elettrone e massa del protone o l'intensità delle interazioni nucleari.

La memoria dei valori passati di queste ipotetiche "costanti incostanti" potrebbe riemergere in osservazioni di varia natura; per esempio, studiando le abbondanze di diversi isotopi nella miniera di Oklo, in Gabon, un sito eccezionale in cui circa due miliardi di anni fa si realizzarono le condizioni per l'accensione di un vero e proprio reattore nucleare naturale. Queste abbondanze, infatti, sarebbero sensibili a una variazione della *costante di struttura fine*, che regola l'intensità della radiazione elettromagnetica.

Altre tracce verrebbero dalla cosmologia che, attraverso lo studio della formazione dei nuclei primordiali, è oggi in grado di fornire limiti su una possibile variazione di  $G$  nell'epoca compresa tra un secondo dopo il Big Bang e oggi, che per essere in accordo con le osservazioni non dovrebbe essere più grande di pochi punti percentuali.

Al momento attuale, l'unica (flebile) traccia di variazione di costanti fondamentali è quella riportata dal gruppo di astronomi guidati da John Webb, che, osservando la luce proveniente da quasar lontani qualche miliardo di anni luce, ha notato una anomalia nelle righe spettrali, che può essere spiegata se la costante di struttura fine fosse stata più piccola in passato di una parte su centomila. Queste osservazioni sono però tuttora sotto esame da parte della comunità scientifica e una risposta definitiva appare ancora lontana, a causa dell'estrema difficoltà di queste misure.

#### Biografia

**Massimo Pietroni** è ricercatore dell'Infn della sezione di Padova. In questi ultimi anni si è occupato principalmente del problema della materia e dell'energia oscura nell'universo e delle sue possibili spiegazioni nell'ambito della fisica delle particelle.

#### Link sul web

<http://physics.nist.gov/cuu/Constants/introduction.html>

<http://www.nature.com/nature/journal/vaop/ncurrent/full/nature13433.html>

<http://www.media.inaf.it/2014/06/18/una-misura-per-la-costante-gravitazionale/>