

# Quark e sapori

Ricette per l'universo.

di Paolo Gambino



Nella simmetria risiede in buona parte la nostra capacità di descrivere la struttura fondamentale di ciò che conosciamo: su di essa poggia la teoria delle particelle elementari e delle interazioni fondamentali, il modello standard, e nelle simmetrie si realizza quella sintesi meravigliosa di leggi che la realtà fisica sembra manifestare. Ma se tutte le simmetrie fossero rispettate rigidamente – se la preziosa simmetria di gauge, in particolare, non fosse “rotta” – il mondo sarebbe tremendamente noioso e noi non saremmo qui a osservarlo. Il mondo che conosciamo, la sua varietà e la sua bellezza, il suo inafferrabile mistero, emergono proprio dal dialogo incessante tra simmetria e sua negazione.

Uno dei misteri più profondi dell'universo subnucleare riguarda la classificazione delle particelle elementari, quei mattoni fondamentali della materia, i quark e i leptoni, che per le loro caratteristiche possono essere suddivisi in tre famiglie, o *generazioni* (vd fig. b, ndr). E l'esistenza stessa di tre generazioni di quark e leptoni è ancora oggi un aspetto misterioso e affascinante della fisica delle particelle

elementari. Leptoni e quark si differenziano tra loro innanzitutto per la loro carica elettrica, avendo i primi – elettroni, muoni, tau e neutrini – carica elettrica di valore intero  $+1$ ,  $-1$  o  $0$  (i neutrini), mentre i secondi, i quark, hanno tutti carica elettrica frazionaria,  $+2/3$  o  $-1/3$ . Ciò che differenzia però quark e leptoni di famiglie diverse è la massa di queste particelle, che aumenta considerevolmente passando dalla prima alla terza generazione. L'etichetta che si usa per identificare i quark di tipo diverso è in inglese il *flavor* (*sapore*, in italiano). Così, quark e leptoni esistono in tre generazioni di sapore (in tre gusti, come fossero caramelle), che sarebbero identiche repliche se non fosse appunto per la massa, diversa per ogni sapore.

Le masse di queste particelle elementari sono molto diverse tra loro. Se la massa del neutrino è meno di un milionesimo di quella dell'elettrone, il quark top – un peso massimo – ha massa paragonabile a quella di un atomo di tungsteno e cento miliardi di volte maggiore di quella dei neutrini. Com'è possibile? Da dove hanno origine queste differenze gigantesche? La teoria

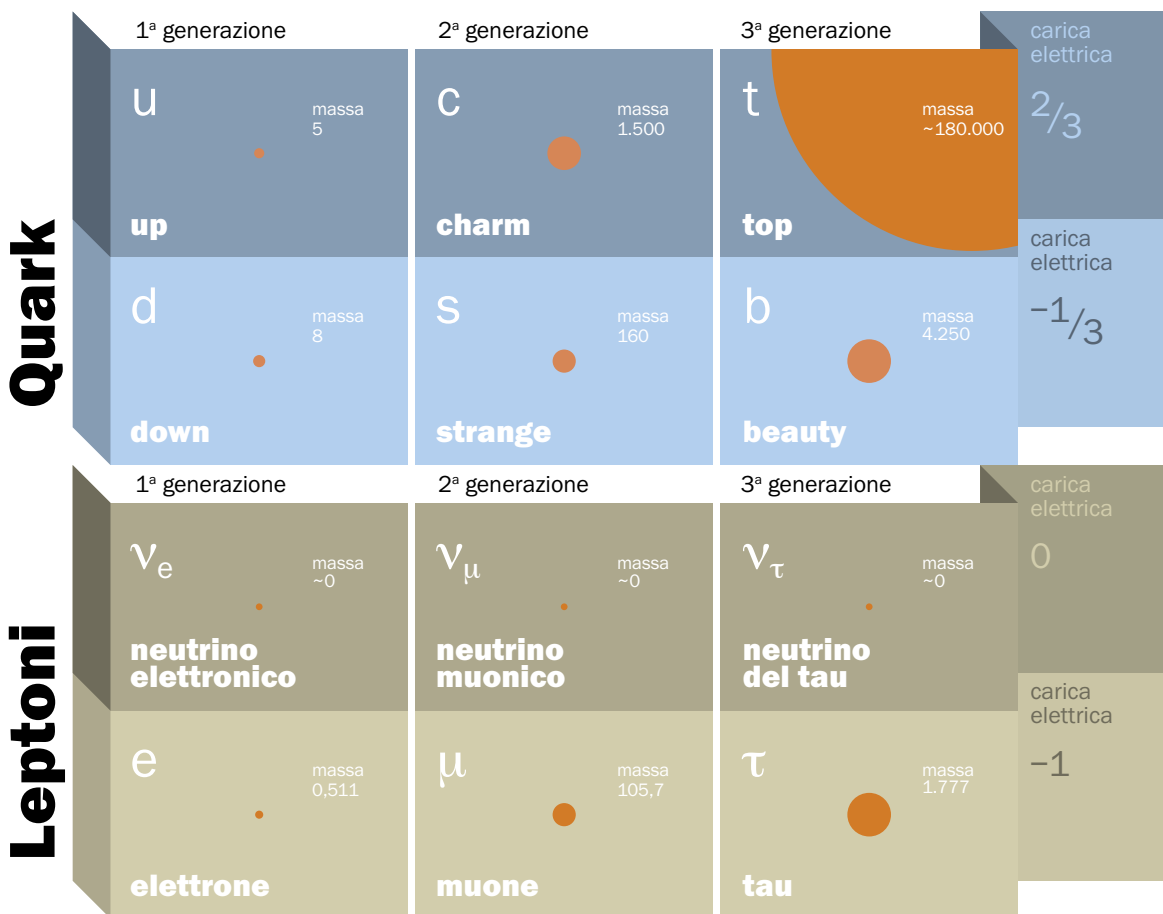
a.  
L'esperimento Babar presso lo Stanford Linear Accelerator Center (SLAC) in California. L'obiettivo principale di Babar è stato lo studio della violazione della simmetria CP, osservando il diverso comportamento dei mesoni B e delle loro antiparticelle, i mesoni  $\bar{B}$  (Bbar), prodotti nelle collisioni di un fascio di elettroni e un fascio di positroni (le antiparticelle dell'elettrone) accelerati rispettivamente all'energia di 9,0 GeV e 3,1 GeV nell'acceleratore PEP-II di Slac. Le misure effettuate a Babar e Belle hanno permesso di confermare la validità del meccanismo CKM (vd. p. 22, ndr).

che abbiamo non dà risposte. Le speculazioni naturalmente abbondano specialmente riguardo ai neutrini, la cui massa, piccolissima, si riteneva essere addirittura nulla fino al decennio scorso. Tuttavia, la ragione per cui le particelle elementari hanno masse così diverse tra loro rimane uno dei misteri più impenetrabili della fisica attuale.

Le forze attraverso cui queste particelle interagiscono sono completamente determinate dalla simmetria di gauge che ha originato l'interazione stessa e la massa non è altro che una conseguenza della rottura spontanea della simmetria. Se la simmetria di gauge fosse esatta, tutte le particelle dovrebbero avere massa nulla, come la particella mediatrice della forza elettromagnetica, il fotone o quanto di luce. A partire dalle tre generazioni, uno strano fenomeno permette di realizzare

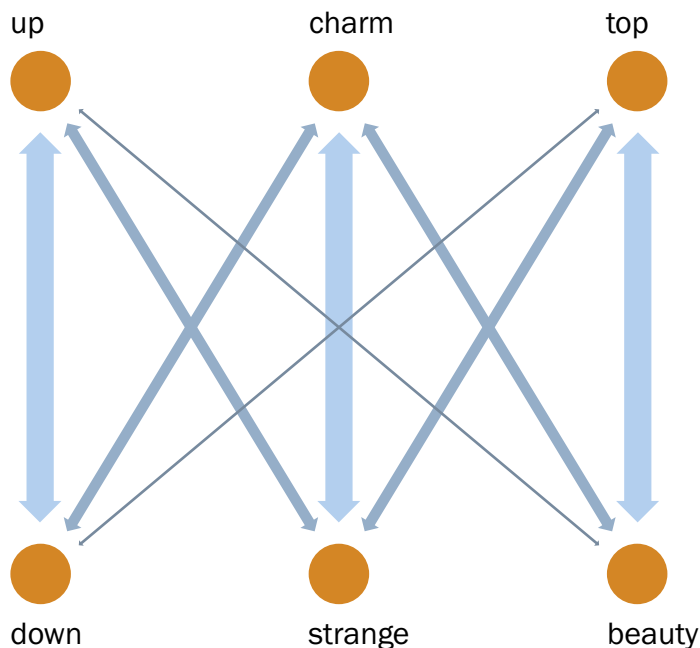
scenari inaspettati. Si tratta del *mescolamento tra generazioni*, introdotto per la prima volta nel 1963 da Nicola Cabibbo con due sole generazioni, ed esteso a tre generazioni dai giapponesi Kobayashi e Maskawa, nel 1973. Il mescolamento delle generazioni è strettamente legato all'origine delle masse: in assenza di masse le tre generazioni sono indistinguibili e il mescolamento non è osservabile. Per capire di che cosa si tratti, consideriamo le cosiddette forze deboli, responsabili dei decadimenti radioattivi di alcuni nuclei atomici. Queste forze possono trasformare un quark di carica  $+2/3$  (cioè un quark di tipo up, charm o top) in un quark di carica  $-1/3$  (di tipo down, strange o beauty), e viceversa. La differenza di carica che si genera in questa trasformazione è trasferita ad altre particelle (leptoni o quark) dal bosone W mediatore dell'interazione debole,

b. Le particelle elementari, quark e leptoni, sono suddivise in base alla loro massa in tre famiglie o generazioni, in ordine di massa crescente (qui espressa in MeV/c<sup>2</sup>). Nel caso dei leptoni, i neutrini sono elettricamente neutri e hanno massa molto piccola, dell'ordine di una frazione di eV/c<sup>2</sup>. Un'analogia tabella contiene le antiparticelle, che si indicano con una linea sopra al loro simbolo (p.es. l'antiquark up si indica  $\bar{u}$ ).



b.

# Quark

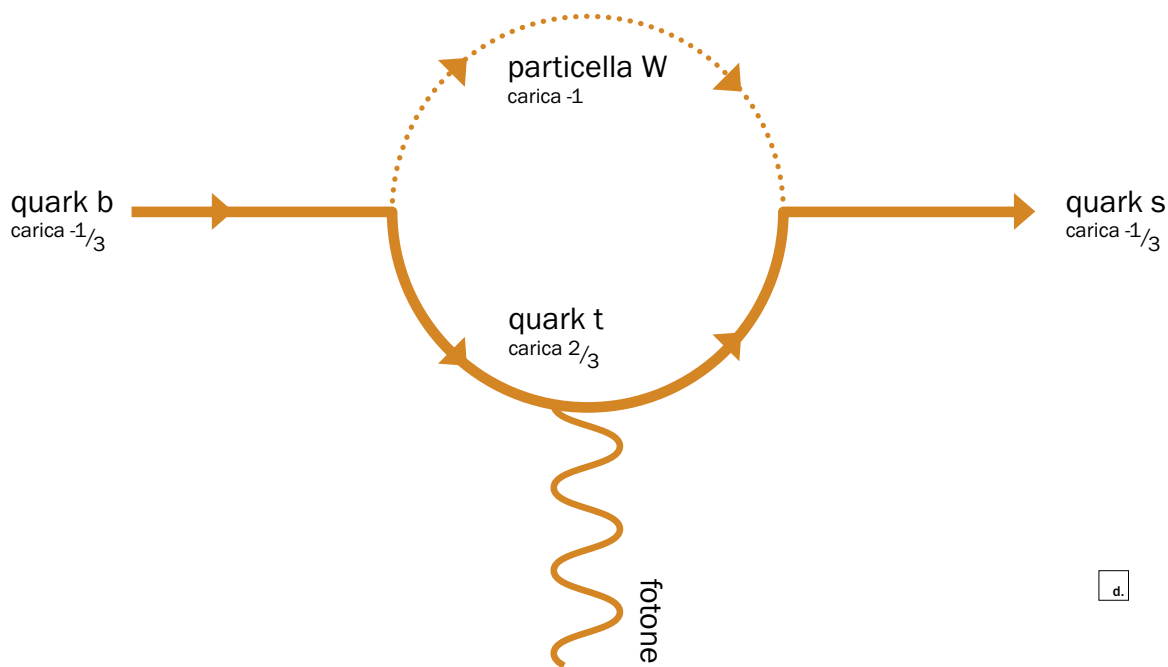


c.

una sorta di fotone pesante con carica elettrica positiva o negativa in base alla particolare interazione in cui è coinvolto (indicato in quei casi  $W^+$  o  $W^-$ ). Nel caso dei decadimenti beta, per esempio, un quark down all'interno di un neutrone è trasformato in un quark up con emissione di un elettrone e di un antineutrino. Il neutrone decade così in un protone e una coppia di leptoni. In linea di principio il quark up potrebbe anche trasformarsi in un quark strange o beauty, ma questi ultimi sono troppo pesanti per essere prodotti in un decadimento beta: si violerebbe la conservazione dell'energia! In processi caratterizzati da energie più grandi, invece, le transizioni indicate in fig. c sono tutte possibili, ma non tutte con la stessa probabilità. La forza debole totale che agisce su un quark up è fissata dalla simmetria di gauge, ma come un fiume che si divide in tre canali essa si ripartisce tra le varie generazioni, e non tutte le transizioni hanno la stessa probabilità di realizzarsi. Di fatto, il bosone W interagisce quindi con una combinazione di sapori: se associamo un colore primario (rosso, blu, giallo) a ogni sapore di quark, possiamo immaginare che solo una combinazione di colori primari, per esempio arancione o verde, sia legata al bosone W. La simmetria di gauge impone quindi dei vincoli al modo in cui la forza debole si può ripartire tra le generazioni ed esistono

semplici relazioni matematiche tra le forze che intervengono nelle varie transizioni mediate dal bosone W. Queste relazioni sono al centro del *meccanismo* del mescolamento, chiamato CKM dalle iniziali dei suoi scopritori (Cabibbo, Kobayashi e Maskawa). A determinarne il trionfo è stata la sua verifica sperimentale; l'impegno in questo senso è culminato nello studio dei decadimenti dei quark beauty negli esperimenti *Babar* (negli USA) e *Belle* (in Giappone) che hanno recentemente concluso la presa dati, con il contributo essenziale di molti ricercatori dell'Infn nel caso di Babar. Ma non si è trattato solamente di un impegno sperimentale: anche i fisici teorici hanno contribuito in maniera determinante. I quark infatti non possono essere osservati da soli, ma solo a gruppi di due o tre all'interno di una sorta di "bozzolo" (l'adrone), creato dalle interazioni forti per trattenerli. Per riuscire a interpretare correttamente nell'ambito del meccanismo CKM i risultati di esperimenti molto precisi, diventa allora indispensabile saper individuare il "bozzolo" dovuto all'interazione forte tra i quark e valutarne le caratteristiche. Si tratta di un problema molto difficile, una sfida formidabile, per la quale ci si avvale anche di simulazioni numeriche su supercomputer (vd. p. 25, ndr). La teoria del meccanismo CKM presenta due aspetti misteriosi. Il primo ha a che fare con la

c.  
Tabella delle possibili transizioni tra quark di tipo diverso. Esse sono mediate dal bosone W e permettono di collegare generazioni diverse. Le transizioni più probabili sono sempre quelle all'interno della stessa generazione (freccie verticali). Le relazioni matematiche tra le forze associate a ognuna di esse costituiscono il meccanismo di Cabibbo, Kobayashi e Maskawa. Nella figura, le linee con uno spessore maggiore rappresentano le transizioni più probabili.



d.

simmetria CP (vd. p. 16, ndr), la cui violazione mostra che il nostro mondo differisce da quello a esso speculare fatto di antiparticelle. L'aspetto sorprendente è che la violazione della simmetria CP è una conseguenza del mescolamento dei quark: esistono pertanto relazioni precise tra le asimmetrie di CP e il mescolamento dei sapori. Questo sorprende perché implica una connessione tra proprietà apparentemente molto diverse delle particelle. E d'altra parte non possiamo illuderci di avere compreso la violazione di CP, dal momento che la violazione di CP osservata nel settore dei quark non è sufficiente a spiegare l'asimmetria tra materia e antimateria nell'universo. Il secondo aspetto misterioso è che il fenomeno del mescolamento dei quark è fortemente gerarchico: le transizioni favorite sono sempre quelle tra quark della stessa generazione. Questa gerarchia sembra suggerire un ordine nascosto, forse il residuo di una simmetria originaria, che il meccanismo CKM si limita a registrare.

Un altro aspetto caratteristico del meccanismo CKM è che il mescolamento dei quark non può avvenire attraverso lo scambio di particelle elettricamente neutre, come il fotone o il bosone  $Z^0$ , il terzo mediatore, privo di carica, delle interazioni deboli. Il mescolamento avviene sempre attraverso lo scambio del bosone carico W. Il decadimento di un quark in un altro quark

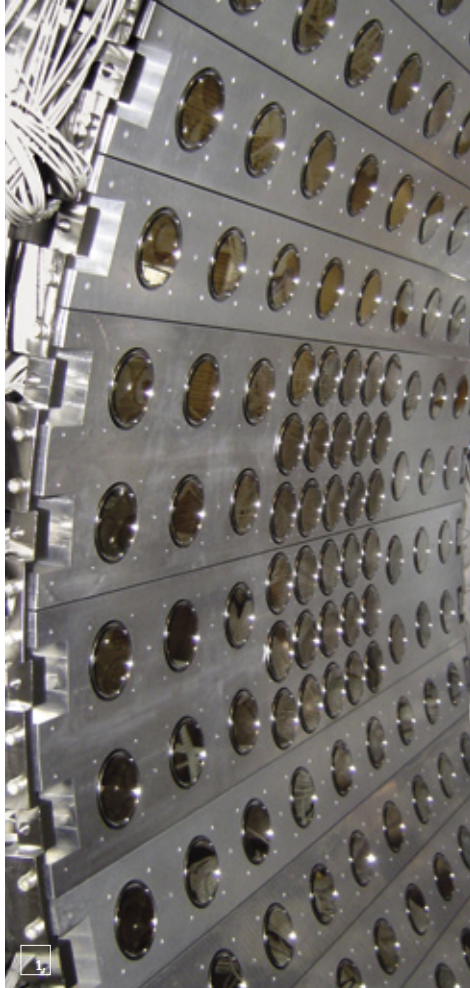
con la stessa carica può allora avvenire solo facendo agire due volte il W sui quark (vd. fig. d, ndr), il che diminuisce drasticamente l'intensità della forza debole e rende il decadimento molto meno frequente. I rari fenomeni di questo tipo, chiamati FCNC (*Flavor Changing Neutral Currents*), sono importantissimi e permettono verifiche di precisione del modello standard. Quanto detto finora riguarda i quark.

Per i leptoni vale qualcosa di analogo, ma in questo caso i misteri si infittiscono. Intanto, non conosciamo ancora l'esatta natura degli sfuggenti neutrini.

Nel settore dei leptoni non sono mai state osservate sperimentalmente transizioni fra leptoni carichi di sapore diverso: si tratta delle FCNC del settore leptonic che nel modello standard sono praticamente impossibili. Nuovi risultati in questo senso sono attesi da Meg (*Muone in Elettrone e Gamma*), un esperimento coordinato dall'Infn e condotto in Svizzera, al Paul Scherrer Institut di Zurigo.

Abbiamo oggi alcune indicazioni che il grandioso edificio del modello standard nasconde probabilmente qualcosa di ancora più mirabile, una *nuova fisica* che agisce a distanze ancora più piccole di quelle che abbiamo esplorato finora, e che forse potrà spiegare alcuni dei misteri sopra accennati. Ma è difficilissimo osservare gli effetti di quello che succede a

d.  
Il mescolamento dei quark avviene sempre attraverso lo scambio del bosone carico W. Nella figura è rappresentato il *diagramma di Feynman* del decadimento di un quark beauty in un quark strange e un fotone. I decadimenti di un quark in un altro quark di carica uguale, come il caso rappresentato, sono possibili solo facendo agire due volte il W sui quark. I fenomeni di questo tipo sono chiamati FCNC (*Flavor Changing Neutral Currents*) e sono molto rari.



[as] box

## Meg e il sapore dei leptoni

L'esperimento Meg (Muone in Elettrone e Gamma) ha come principale obiettivo la ricerca della violazione del *sapore leptonic* nel rarissimo decadimento del muone in elettrone e fotone (raggio gamma).

Meg sfrutta un fascio di circa 100 milioni di muoni per secondo, ottenuto facendo incidere su un bersaglio di grafite il fascio di protoni dell'acceleratore del Paul Scherrer Institut a Zurigo, in Svizzera. I muoni hanno vita breve, di circa due milionesimi di secondo, e decadono nella maggior parte dei casi in un elettrone e due neutrini.

Per rivelare gli eventuali rarissimi decadimenti in elettrone e fotone, Meg è dotato di rivelatori

1.

Il calorimetro elettromagnetico a xenon liquido dell'esperimento Meg, equipaggiato con 846 fotomoltiplicatori.

in grado di misurare contemporaneamente la direzione, l'energia e il tempo di arrivo di queste particelle. Il calorimetro elettromagnetico a xenon liquido, in particolare, equipaggiato con 846 fotomoltiplicatori, permette di rivelare la luce di scintillazione prodotta dai fotoni quando attraversano il mezzo sensibile.

Compatibili con lo stesso decadimento, un elettrone e un fotone rivelati in coincidenza temporale sarebbero la prima prova sperimentale di un processo che viola il sapore leptonic. La loro rivelazione dimostrerebbe in modo inconfutabile la necessità di superare il modello standard.

distanze più piccole di quelle accessibili con le collisioni prodotte nei grandi acceleratori di particelle come Lhc, al Cern di Ginevra: i segnali sono inevitabilmente molto deboli, e per poterli rivelare è necessario limitare la raccolta di eventi "non interessanti", ovvero *abbassare il rumore di fondo*, per usare il dialetto dei fisici. I decadimenti rari mediati da FCNC sono importanti proprio perché permettono di abbassare il rumore di fondo dovuto alle forze del modello standard, e possono quindi diventare lo spiraglio da cui osservare la nuova fisica. Nuove particelle finora sconosciute potrebbero infatti affiancarsi al bosone W in processi come quello di fig. d e far sentire la loro debole voce, rendendo un poco più frequente un decadimento molto raro. Forse si tratterà di particelle supersimmetriche (vd. p. 4, ndr), che come suggerisce il nome sono i fossili di una nuova e profondissima simmetria. Forse, potendo studiare le relazioni di CKM in maggiore dettaglio, scopriremo che non sono poi così ben soddisfatte in natura, e che la nuova fisica le modifica in modo sistematico. È quindi evidente che gli studi di fisica del sapore sono complementari alla ricerca di nuove particelle al grande acceleratore Lhc e permetteranno di comprendere meglio le scoperte che tutti ci auguriamo. E, chissà, di azzardare forse qualche risposta ai misteri del sapore.

### Biografia

**Paolo Gambino** è professore di fisica teorica all'Università di Torino dal 2006, dopo aver lavorato in Germania, al Cern e all'Infn. Si occupa di ricerche sulla fisica del sapore.

### Link sul web

<http://www-public.slac.stanford.edu/babar>

<http://meg.pi.infn.it>