

Un colabrodo di precisione II (24/10/11)

Esaurito il discorso sulla prima famiglia di particelle elementari, bisogna prendere in considerazione le altre due, cominciando da “three quark for Muster Mark” di Joyce. Perché Gell-Mann e Zweig, attorno al 1964, cominciarono a parlare di tre, e non due, strutture matematiche (per allora) definite “quark”? Forse perché all’interno del protone e del neutrone ci sono tre quark della prima famiglia? No. Il motivo era da ricercarsi nella necessità che esistessero almeno tre quark di tipo diverso, per spiegare lo *zoo di particelle* prodotte negli acceleratori fino a quel momento. In particolare, servivano i quark *up*, *down* e *strange*. Ma, dalla tabella, vediamo che il quark *strange* sembra solo una versione più pesante del quark *down*: perché non bastava quest’ultimo, magari presente in più copie? Il motivo è da ricercarsi in *stranezze* nel decadimento delle particelle (sono tante) che lo contengono: se ci fossero solo quark *down*, gli *strange* potrebbero decadere attraverso l’interazione forte, e quindi molto rapidamente. Invece, i loro tempi di vita sono molto più lunghi, e decadono solo per interazione debole. Ciò ha richiesto l’introduzione di un nuovo numero quantico, definito per l’appunto “stranezza”, e la presenza del quark *strange* come unità a sé stante. Poi, al passare del tempo, sono via via emerse nuove particelle

che hanno richiesto la presenza di altri quark, fino al *bottom*. Trovato questo, la completezza del modello richiedeva anche il quark *top* che, essendo pesante quanto un intero atomo di tungsteno, non forma particelle composite, almeno per quanto ne sappiamo ora.

In verità, la prima particella elementare della seconda famiglia, l’*elettrone pesante* μ , già da molto tempo era stata individuata nei raggi cosmici. Infatti, è prodotta in grandi sciame dalla radiazione ad alta energia che colpisce gli strati superiori dell’atmosfera, e giunge fino alla superficie terrestre. Ma si pensava che fosse una particella composta, un *mesone*, ed era stata accantonata nel conteggio delle particelle elementari. Nel 1974, poi, fu osservato per la prima volta l’*elettrone pesantissimo* τ , e fu chiaro che ci si doveva attendere una terza famiglia di quark.

Qui s’intrecciano diverse domande, e bisognerà prenderle in esame una per volta via via che saranno sollevate. Personalmente, a me sembra più importante di tutte la domanda: «Perché definiamo le particelle

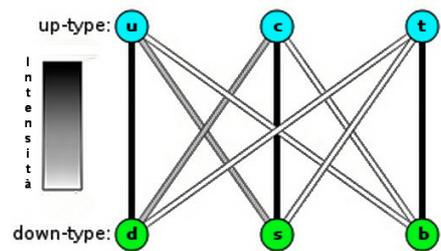
| Three Generations of Matter (Fermions) | | | | |
|---|--|--|--|---|
| | I | II | III | |
| mass→ | 2.4 MeV | 1.27 GeV | 171.2 GeV | 0 |
| charge→ | $\frac{2}{3}$ | $\frac{2}{3}$ | $\frac{2}{3}$ | 0 |
| spin→ | $\frac{1}{2}$ | $\frac{1}{2}$ | $\frac{1}{2}$ | 1 |
| name→ | u up | c charm | t top | Y photon |
| Quarks | 4.8 MeV | 104 MeV | 4.2 GeV | 0 |
| | $-\frac{1}{3}$ | $-\frac{1}{3}$ | $-\frac{1}{3}$ | 0 |
| | $\frac{1}{2}$ | $\frac{1}{2}$ | $\frac{1}{2}$ | 1 |
| | d down | s strange | b bottom | g gluon |
| Leptons | <2.2 eV | <0.17 MeV | <15.5 MeV | 91.2 GeV |
| | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | $\frac{1}{2}$ | $\frac{1}{2}$ | $\frac{1}{2}$ | 1 |
| | ν_e electron neutrino | ν_μ muon neutrino | ν_τ tau neutrino | Z weak force |
| | 0.511 MeV | 105.7 MeV | 1.777 GeV | 80.4 GeV |
| | -1 | -1 | -1 | ± 1 |
| | $\frac{1}{2}$ | $\frac{1}{2}$ | $\frac{1}{2}$ | 1 |
| | e electron | μ muon | τ tau | W$^\pm$ weak force |

Bosons (Forces)

della seconda e terza famiglia come *elementari* in senso stretto? Non potrebbero essere semplici *stati eccitati* di quelle della prima famiglia, poiché le loro vite sono comunque effimere e, con decadimenti semplici, finiscono sempre per creare particelle della prima famiglia?». La risposta è che si tratta davvero di particelle elementari a pieno diritto, e adesso cercherò di fornire alcuni indizi sul perché. Facendo notare anzitutto come la seconda e terza famiglia presentino una differenza importante rispetto alla prima: le loro particelle “*in alto*”, e cioè quelle con carica elettrica $+2/3$, sono *più pesanti di quelle “in basso”* mentre nella prima famiglia avviene il contrario. Ma passiamo ad altre considerazioni.

Un atomo *eccitato* è un atomo in cui un elettrone si trova su un’orbita più esterna rispetto a quella di minima energia, e quindi può ricadere nel suo livello fondamentale emettendo energia sotto forma di luce. Se il quark *charm* fosse uno stato eccitato del quark *up*, ci aspetteremmo che, durante il suo decadimento, la massa in eccesso sia emessa sotto forma di luce, e si formi un quark *up*. Invece, i quark “*in alto*”, non possono mai decadere direttamente in altri quark “*in alto*”, e viceversa. Il decadimento passa sempre da “*alto*” a “*basso*” e, se non si è ancora raggiunta la prima famiglia, da “*basso*” a “*alto*” in diagonale e così via. Siccome, in questo modo, si cambia la carica elettrica di un’unità, è emesso anche un bosone W^+ o W^- , mediatore dell’interazione debole, che poi decade in un elettrone più

neutrino, oppure in un paio di quark più leggeri. La figura qui accanto mostra quanto è probabile che un quark pesante decada in uno più leggero, e illustra bene il concetto appena spiegato. Come si vede, la massima probabilità è che un quark decada in uno più leggero della stessa famiglia; tra una famiglia e l'altra le probabilità di decadimento sono più basse, e cioè le vite medie sono più lunghe, ma non avviene mai una transizione "orizzontale" diretta, come invece ci aspetteremmo se i quark delle due famiglie superiori fossero solo livelli eccitati di quelli della prima famiglia. Perfino i leptoni μ e τ non decadono subito in elettroni più energia, ma passano anche loro attraverso il bosone W generando, tra l'altro, neutrini e antineutrini (questo lo fanno pure i quark).



Mi rendo conto che questo tipo di considerazioni convince più che altro gli addetti ai lavori. Infatti, dietro le poche parole che ho scritto qui, si nasconde una quantità enorme di meccanica quantistica con tutte le sue leggi che non possono essere violate, e che non è possibile tradurre in concetti intuitivi. Per questo motivo, dovranno bastarci gli indizi che ho riportato.

Altra domanda: come mai non esistono particelle che abbiano tre quark *up* o tre quark *down*? In realtà esistono, e si chiamano Δ^{++} e Δ^- , ma la loro vita media è brevissima. Il motivo? Poiché i quark hanno tutti spin $1/2$, se ce ne sono tre dello stesso tipo, finisce per forza che due hanno lo stesso spin. Il principio di esclusione di Pauli proibisce che esistano nello stesso luogo fermioni identici con lo stesso spin e dunque, malgrado questi tre quark si scambino la forza di colore, la vince Pauli e la particella non riesce a sopravvivere oltre 10^{-24} s.

La domanda successiva è, ovviamente, come possiamo essere sicuri che le famiglie sono soltanto tre. Per capirlo è necessario ricordare che il bosone Z^0 , essendo sprovvisto di carica elettrica, decade in tutta una serie di particelle che, alla fine, lasciano solo neutrini. Analizzando i decadimenti, e sapendo che i neutrini emessi sono della stessa famiglia delle particelle rivelate, risulta che esistono solo tre tipi di neutrini, e dunque solo tre famiglie. Ma spieghiamo meglio.

Data la sua enorme massa, il bosone Z^0 può decadere in tutti e tre gli "elettroni" e , μ e τ . Inoltre, può anche decadere in tutti e tre i quark "in basso", e nei primi due quark "in alto". Solo il quark *top* è troppo pesante perché sia generato nel decadimento del bosone Z^0 . Ora, affinché questi decadimenti possano avere luogo, è necessario che contemporaneamente siano emessi i corrispondenti neutrini e antineutrini. La meccanica quantistica permette di prevedere le probabilità di decadimento dello Z^0 in qualsiasi particella, e in particolare direttamente in neutrini (se la loro massa è molto piccola), in funzione del numero di famiglie esistenti. Questa probabilità teorica è del 20,5%. I dati sperimentali sono coerenti con l'esistenza di tre sole famiglie di neutrini e, di conseguenza, di tre famiglie in generale, poiché la frequenza osservata è del 20% (più o meno qualcosina). Ovviamente, esiste una possibile incertezza: se ci fosse una quarta, quinta ecc. famiglia i cui neutrini avessero massa molto grande, dell'ordine di grandezza di quella dello stesso Z^0 , allora il ragionamento cadrebbe perché, comunque, un decadimento in questi neutrini non potrebbe avere luogo. Ma la massa dei tre tipi conosciuti di neutrino è cento miliardi di volte inferiore a quella del bosone Z^0 : sembra molto improbabile che un'eventuale quarta famiglia possieda neutrini così massicci, senza che ci siano almeno famiglie intermedie con neutrini anche loro di massa intermedia, che potrebbero essere già presenti nel decadimento dello Z^0 . Quest'argomento sembra piuttosto convincente. La piccolissima discrepanza tra teoria e osservazione, invece, potrebbe essere dovuta a un quarto neutrino, cosiddetto "sterile" o "di Majorana" dal primo ideatore della particella. Questo sarebbe al di fuori di ogni famiglia e, in effetti, sembra sia stato osservato in esperimenti molto onerosi, anche se la sua scoperta ancora ha bisogno di conferme.

Domanda successiva: perché tre famiglie e non una sola, giacché tutta la materia osservabile è costituita dalla prima famiglia? Di questo parleremo la prossima volta.