

Un colabrodo di precisione I (12/10/11)

Riprendiamo il discorso sul Modello Standard, i suoi successi, i suoi limiti, e il suo (prevedibile) futuro con un riassunto brevissimo sulle cinque interazioni fondamentali di natura oggi conosciute (attenzione: “*Interazioni*” è la dizione corretta; quella tradizionale, “*Forze*”, è un po’ antiquata e imprecisa):

- 1) Repulsione cosmica
- 2) Gravitazione
- 3) Elettromagnetismo
- 4) Nucleare *debole*
- 5) Nucleare *forte* o “*di colore*”

Le prime due sono ben descritte nel contesto della Relatività Generale. Per la verità, sulla prima di esse sappiamo ancora ben poco, tranne che tutte le osservazioni finora eseguite trovano un buon riscontro quantitativo inserendo un termine di *pressione negativa* nelle equazioni di Einstein; un termine che, essendo costante, viene simulato per l’appunto con la cosiddetta “costante cosmologica” Λ . In ogni caso, serviranno altre conferme osservative per capire se le cose sono così semplici.

La seconda, la gravitazione, la conosciamo bene: descrive l’attrazione tra masse come curvatura dello spaziotempo, e non ci spenderò sopra molte altre parole. Infatti, il Modello Standard si occupa esclusivamente delle interazioni che possono essere descritte per mezzo della Meccanica Quantistica, e nessuno è mai riuscito a fornire una descrizione quantistica della gravitazione. Ogni sforzo si scontra con “infiniti” di diverso tipo che piagano le equazioni che si cerca di scrivere e, dunque, non hanno alcun significato fisico. Al più, s’ipotizza (badate bene: s’ipotizza e niente di più) l’esistenza del cosiddetto *gravitone* che, per questioni correlate alla forma delle equazioni di Einstein, deve essere una particella priva di massa e carica, avente spin 2. Detto in termini brutali, il gravitone procede come una caramella che si scartoccia e accartoccia (vi mostro come con le dita). Ma troppa strada bisogna ancora fare per individuarlo sperimentalmente – se esiste – poiché anche la prima misurazione di un’onda gravitazionale, che da una decina d’anni a questa parte tutti si aspettano da un giorno all’altro, non dirà ancora nulla sui gravitoni, ma sarà solo un’altra conferma della Relatività Generale (se servisse).

Passiamo dunque alle altre tre interazioni: dall’elettromagnetismo a quella nucleare forte. In trent’anni di lavoro, i fisici sono riusciti a inserire queste interazioni nello stesso contesto – per l’appunto quello della Meccanica Quantistica – senza però che si possa parlare di *unificazione* in senso stretto. Il Modello Standard, infatti, non è una “Teoria del quasi tutto” come a volte si dice, ma solo una collezione ordinata di fenomeni ed equazioni, inseriti nello stesso ambito logico, che nel seguito prenderemo a descrivere. Sarebbe meglio che questa dualità irrecuperabile della fisica contemporanea fosse ben chiara prima di partire: su cinque interazioni, di due non ci occupiamo per nulla, e le altre tre *non sono* soltanto aspetti diversi di una sola interazione, ma sono proprio tre, e l’unica unificazione è che possono essere trattate all’interno di un unico schema logico-matematico. Come vedremo più avanti, due di esse sono state *unificate* sul serio, e quel che ne viene fuori non è per nulla semplice (ma chi dice che avrebbe dovuto esserlo?)

Il Modello Standard, che d’ora in poi abbrevierò con MS, comprende un certo numero di elementi. Per il momento li tratterò come se fossero slegati tra loro; più avanti si vedrà come le particelle e le interazioni siano un po’ rimescolate tra loro. E introduciamo il primo elemento; si tratta delle vere e proprie particelle elementari, o meglio: quelle che oggi riteniamo essere tali. Come secondo elemento abbiamo i cosiddetti *mediatori* delle interazioni, e cioè le *particelle* che non sono propriamente definibili *materia*, ma piuttosto somigliano a *energia*, anche se sono trattate come se fossero *oggetti singoli*. L’esempio più classico è il *fotone*, che trasmette l’interazione elettromagnetica. Il terzo elemento è un armamentario grafico-matematico che serve a calcolare, in ogni configurazione possibile, le leggi che regolano il movimento delle particelle materiali sottoposte a una o più interazioni. Da ultimo c’è – o forse non c’è perché, secondo alcuni, si tratterebbe piuttosto di una *configurazione di oggetti* – un elemento un po’ ibrido, che dovrebbe completare il MS: si tratta di un *mediatore* molto

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	γ photon
Quarks	4.8 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ d down	104 MeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ s strange	4.2 GeV $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ b bottom	0 0 1 g gluon
	<2.2 eV 0 $\frac{1}{2}$ ν_e electron neutrino	<0.17 MeV 0 $\frac{1}{2}$ ν_μ muon neutrino	<15.5 MeV 0 $\frac{1}{2}$ ν_τ tau neutrino	91.2 GeV 0 1 Z⁰ weak force
	0.511 MeV -1 $\frac{1}{2}$ e electron	105.7 MeV -1 $\frac{1}{2}$ μ muon	1.777 GeV -1 $\frac{1}{2}$ τ tau	80.4 GeV ± 1 1 W[±] weak force
Leptons				Bosons (Forces)

particolare, che *fornisce la massa* a particelle e altri mediatori. Higgs, ovviamente. Per qualche Salotto ci soffermeremo sulle vere e proprie particelle elementari.

Qui accanto abbiamo una rappresentazione delle particelle (Fermioni, a sinistra) e dei vettori delle interazioni (Bosoni, a destra) presenti nel MS. Questa tabella ci accompagnerà a lungo, e ve la riproporrò abbastanza spesso. Stavolta c'interessa la prima colonna a sinistra, dove sono presenti le diciture: **u**, **d**, **ν_e**, **e**. Essendo vecchi volponi della fisica, già sappiamo che si tratta dei quark **up** e **down**, del neutrino associato all'elettrone e dell'elettrone stesso. Sono anche presenti informazioni sulla massa, sulla carica elettrica, e sulla rotazione (spin). Per leggere la tabella nel modo giusto bisogna ricordare che le masse vi sono scritte in unità di energia, perché nel mondo dei fisici particellari, che è anche quello degli acceleratori, si ragiona in termini di energia, e non

di massa, per capire quali particelle possono essere generate. Il raccordo con le masse in senso tradizionale è semplice: $E = mc^2$, ma giova molto di più alla comprensione ricordare che la massa dell'elettrone è circa mezzo milione di elettronvolt, e cioè ~0,5 MeV. Il protone, invece, ha una massa ~2000 volte maggiore di quella dell'elettrone. Siccome ci basteranno gli ordini di grandezza, d'ora in poi diremo: $m_e \sim 0,5 \text{ MeV}$; $m_p \sim 1000 \text{ MeV}$.

Qui incontriamo le prime difficoltà, semplicemente leggendo le masse in tabella. Quella del quark **up** è 4,7 volte quella dell'elettrone, e anche il più massiccio quark **down** pesa solo quanto 9,4 elettroni. Ma allora, come fa il protone, composto di due **up** e un **down**, a pesare tanto? Dovrebbe aggirarsi sui 20 MeV, mentre è quasi 1000. Da dove viene il resto? Anticipando appena appena, la risposta è nell'energia che tiene legati i tre quark nel protone. Essa è così enorme, che supera di cinquanta volte la massa a riposo dei quark. Annotiamoci il problema per il prossimo futuro.

Altro concetto da memorizzare: le particelle sono suddivise in *leptoni* (oggetti leggeri) e quark. Perché? Una risposta parziale è che i quark sono soggetti all'interazione nucleare forte (e dunque sono *colorati*), mentre i leptoni no. Ma ci sono altre risposte, che verranno fuori via via.

Ora bisogna dire due parole, ma solo due, su un argomento doloroso: lo spin. Rappresenta il momento di rotazione espresso in unità di $\hbar/2\pi$, dove \hbar è la costante di Planck. E qui sorgono diversi problemi concettuali. Il primo è: dal punto di vista classico, nella definizione di momento angolare di un oggetto non interviene soltanto la massa, ma ci sono anche la forma e la velocità di rotazione. Se una particella elementare è puntiforme, il suo momento angolare dovrebbe essere zero per definizione. Come fa a essere $\frac{1}{2}$ per tutte le particelle? Ma non finisce qui: spin $\frac{1}{2}$ significa che, se immaginiamo la particella come una minuscola trottola e la facciamo ruotare perpendicolarmente al suo asse di spin, non basterà farla percorrere un giro intero, e cioè 360° , per riportarla alla condizione di spin iniziale, ma serviranno *due giri*! L'esempio che si riporta frequentemente è quello di un nastro di Möbius. Se adagiamo una particella sul nastro, affinché lo spin ritorni nella posizione di partenza, dovremo far percorrere alla particella un giro completo del nastro e cioè, nello spazio normale, 720° . È inutile scervellarsi più di tanto: lo spin è una caratteristica definibile solo nel mondo dei quanti, e la sua rappresentazione mentale sfugge alla nostra intuizione. Al più, potremmo pensare a una quarta dimensione spaziale, microscopica, in cui s'incanala il nastro di Möbius lungo il quale scivola la particella, quando la costringiamo a ruotare lungo le tre direzioni dello spazio normale. Ma è un modellino intuitivo che non può essere spinto oltre, e pertanto concludiamo qui il salotto di oggi. Abbiamo esaminato la *prima Famiglia* di particelle elementari.