

La Teoria del Tutto: il caso delle stringhe

Paolo Ciafaloni

E-mail: paolo.ciafaloni@le.infn.it

1 Il Modello Standard delle particelle elementari

Dal punto di vista del fisico delle particelle la realtà materiale è costituita da particelle elementari distinte in due ampie categorie: i quarks e i leptoni. Queste ultime interagiscono tramite i bosoni intermedi, che mediano le 4 forze fondamentali che conosciamo ad oggi: gravitazionale (mediata dal gravitone), nucleare debole (bosoni W, Z), nucleare forte (gluoni), elettromagnetica (fotone). Il Modello Standard delle particelle elementari descrive 3 di queste forze, escludendo la forza di gravità, nel linguaggio matematico della teoria dei campi.

Dal punto di vista del confronto con gli esperimenti, il successo del Modello Standard è impressionante: tenendo conto dell'incertezza delle predizioni teoriche e dell'incertezza sperimentale, teoria ed esperimento sono in ottimo accordo per un enorme intervallo di scale di energie, che vanno dalla scala atomica di 1 eV*, fino ad energie dell'ordine di 10^{11} eV, corrispondenti a distanze[†] di circa 10^{-18} m, cioè un miliardesimo di milionesimo di millimetro.

Malgrado questo, la maggioranza dei fisici delle particelle è convinta che il Modello Standard non sia “teoria ultima”, bensì che esista “fisica nuova”, non descritta dal Modello Standard stesso, ad energie più alte di quelle sperimentalmente ad oggi accessibili. Vi sono una serie di ragioni che danno forza a questa convinzione[‡]; vorrei evidenziarne qui solo due, rappresentative in realtà di categorie più ampie.

Un primo motivo di insoddisfazione è che si considera che il Modello Standard abbia un numero di parametri liberi (una ventina) troppo elevato per una teoria fondamentale. Si badi bene, questa non è una insoddisfazione puramente estetica, come è evidenziato dal problema della quantizzazione della carica elettrica: tutte le cariche delle particelle elementari che conosciamo sono infatti multiple di un'unità fondamentale. Così nel Modello Standard la carica dell'elettrone e quella del protone sono due parametri liberi completamente indipendenti; malgrado ciò l'elettrone e il protone hanno sperimentalmente la stessa carica (segno a parte) al livello di una parte su dieci milioni (!). Coincidenza? E' possibile[§], ma molti fisici teorici preferiscono pensare che questo sia una indicazione sperimentale del fatto che probabilmente esiste una relazione profonda fra i quarks, che hanno interazioni forti e compongono il protone,

*Nella fisica delle particelle masse ed energie si misurano in eV, che è l'energia che acquista un elettrone sottoposto alla differenza di potenziale di 1 volt

[†]la meccanica quantistica ci insegna che a grandi energie E corrispondono piccole distanze x , secondo la relazione $E \cdot x \sim 10^{-5}$ eV m

[‡]la prima, inconfessata ragione è che se davvero non c'è nulla aldilà del Modello standard, ai fisici delle particelle tocca cambiar mestiere...

[§]per usare una frase cara a Nando Boero, la probabilità di misurare la carica del protone e trovarla esattamente uguale a quella dell'elettrone è analoga alla probabilità che si scopra un nuovo villaggio in Nuova Zelanda e si trovi che vi si parla il dialetto di Patù (paesino in provincia di Lecce)

e i leptoni, che non hanno interazioni forti e sono completamente indipendenti dai quarks nel Modello Standard (vedi paragrafo 2).

Da un punto di vista teorico esiste poi un motivo di insoddisfazione ancor più grave: la meccanica quantistica e la relatività generale, che descrive la forza di gravità, sono fra loro incompatibili. Il linguaggio della teoria di campi, che descrive con successo meccanica quantistica e relatività speciale, si scontra con difficoltà di coerenza interna (apparire di “divergenze”, cioè infiniti non eliminabili) quando tenta di mettere insieme la relatività *generale*[¶] e la meccanica quantistica.

Attualmente la comunità dei fisici teorici delle particelle è grosso modo divisa in due ampi gruppi. Il primo, quelli dei fenomenologi, tende a dare maggior importanza agli esperimenti in atto o di un prossimo futuro (diciamo entro 10-15 anni) e alle indicazioni che tali esperimenti danno o sembrano dare, come la quantizzazione della carica. Il secondo gruppo, quello degli stringhisti, pensa invece che dobbiamo prima di tutto risolvere i problemi della teoria, in primo luogo quello della quantizzazione della gravità. A questo secondo tipo di atteggiamento è dedicato il paragrafo 3.

2 Unificazione e simmetria

Un ingrediente di fondamentale importanza nel Modello Standard è la cosiddetta “simmetria di gauge”. In fisica, la parola “simmetria” ha un significato un po' più astratto e preciso che nel linguaggio comune:

Simmetria

- *Se le leggi che descrivono i fenomeni naturali sono invarianti sotto un dato gruppo di trasformazioni, si dice che le trasformazioni sono una simmetria delle leggi in questione.*

Così per uno scienziato che conduce un esperimento in un laboratorio, non fa nessuna differenza che il laboratorio sia orientato verso ovest piuttosto che verso nord: il risultato dell'esperimento è identico. Possiamo generalizzare questa osservazione dicendo che il sistema di riferimento originale (ovest) e quello ruotato (nord) sono equivalenti, e cioè “le leggi della fisica sono invarianti sotto la simmetria del gruppo delle rotazioni attorno a un dato asse”. Il principio di relatività generale, che descrive la forza di gravità, fa riferimento a simmetrie di questo tipo, che sono dette simmetrie dello spazio-tempo, appunto perchè agiscono sui punti dell'universo a 4 dimensioni in cui viviamo.

La simmetria di gauge è un tipo diverso di simmetria, in quanto agiscono sui gradi di libertà interni di una particella, cioè sulle caratteristiche che ne definiscono le proprietà rispetto alle interazioni fondamentali. Ad esempio il neutrino (ν) e l'elettrone (e) hanno, rispetto alle interazioni deboli, una carica diversa, detta di isospin: il neutrino ha carica debole $+\frac{1}{2}$ e l'elettrone

[¶]La relatività speciale tratta sistemi di riferimento in moto relativo uniforme, cioè con velocità relativa costante. La relatività generale tratta invece sistemi in moto relativo qualunque, anche accelerato. il quadro descrittivo è quello delle simmetrie dello spazio tempo (vedi paragrafo 2)

$-\frac{1}{2}$. La simmetria di isospin debole, che è la simmetria di gauge legata alla forza debole, agisce cambiando la carica debole da $+\frac{1}{2}$ a $-\frac{1}{2}$, e trasforma quindi un neutrino in elettrone. Analogamente le 3 forze descritte dal Modello Standard (forte, debole, elettromagnetica) sono descritte in termini di 3 tipi diversi di simmetria di gauge: isospin forte, isospin debole, carica elettrica.

La simmetria di isospin debole è una buona simmetria delle interazioni solo ad energie molto più alte delle masse degli oggetti su cui agisce, in modo tale che le differenze ad esempio, fra le masse di neutrino ed elettrone possano essere trascurate: solo in tale limite il doppietto (ν, e) può essere pensato come un unico oggetto che può esistere in due possibili stati di diversa carica. A energie più basse la simmetria è rotta, ma viene recuperata ad energie molto maggiori della scala di 100 GeV. Il meccanismo attraverso cui la simmetria presente ad alta energia si rompe a bassa energia è di fondamentale importanza in quanto è legato alla generazione delle masse delle particelle, ma dal punto di vista sperimentale di tale meccanismo sappiamo ancora poco o nulla: il Modello Standard ne fornisce una possibile spiegazione, legata all'elusivo "bosone di Higgs" che si spera possa essere identificato negli esperimenti di un prossimo futuro.

In generale, e l'isospin debole ne è un esempio, ad energie elevate corrispondono gradi di unificazione maggiori e simmetrie più generali. Così ad esempio elettricità e magnetismo, che vennero unificati nell'elettromagnetismo tramite le equazioni di Maxwell, sono a loro volta descritti insieme alle interazioni deboli nella teoria delle interazioni elettrodeboli, inclusa nel Modello Standard. Al momento attuale esiste però una separazione netta fra i quarks, che hanno carica forte e quindi interazioni forti, e i leptoni, che non ne hanno. La maggior parte dei fisici delle particelle è comunque convinta che ad alte energie^{||} le forze si unifichino e le particelle si organizzino in un unico "multipletto" (che potremmo chiamare "leptoquark"), trasformandosi fra loro sotto una data simmetria, al momento ignota. Da qui il concetto di

*Unificazione***

- *tutte le forze sono manifestazioni di un'unica forza fondamentale*
- *tutte le particelle sono stati diversi di un'unica particella fondamentale*

3 La Teoria del Tutto

E' possibile portare il principio di unificazione alle sue estreme conseguenze? E' possibile cioè determinare "La" teoria richiedendo che sia realizzato al massimo grado questo criterio, per così dire, estetico? La speranza è, intanto, che questa Teoria esista, cioè che esista una Teoria del Tutto in grado di descrivere la realtà materiale a tutte le scale di energia. Questa speranza ha, almeno in parte, un fondamento metodologico nel concetto di "teoria efficace"

^{||}qui e nel seguito per "basse energie" intendo le energie fino ad oggi sperimentalmente accessibili, inferiori a circa 10^{11} eV. Le "alte energie" sono invece le energie finora inesplorate, diciamo da 10^{12} eV in su

^{**}si potrebbe essere ancora più ambiziosi e dire "forze e particelle sono manifestazione di un unico Ente fondamentale". Che io sappia però nessuno ha pensato a portare fino in fondo questo punto di vista piuttosto radicale

che viene utilizzato con successo nell'ambito della teoria dei campi. In sostanza, attraverso un ben preciso meccanismo matematico, si riesce, presa una teoria di alta energia T_1 , a ridurla a una teoria diversa T_2 di ambito più ridotto, che descrive fenomeni di energia più bassa, ma che risulta considerevolmente semplificata rispetto alla teoria originaria eliminando i gradi di libertà inessenziali e facendo emergere solo quelli atti alla descrizione della fisica di bassa energia. Chi parla di Teoria del Tutto è quindi, come si vede, riduzionista fino alle estreme conseguenze, e pensa che tutte le teorie esistenti, che descrivono la fisica in un intervallo più o meno ampio di energie, siano in realtà limiti particolari della Teoria del Tutto. Un tentativo in tale direzione ha portato negli ultimi anni una parte della comunità dei fisici teorici delle particelle a disinteressarsi quasi interamente dei risultati sperimentali, per cercare questa specie di "Sacro Graal" della fisica teorica, con gli strumenti matematici della teoria di stringa.

Come già accennato, risulta impossibile descrivere insieme la relatività generale e la meccanica quantistica nell'ambito della teoria dei campi. Il problema è che ci si aspetta che questa incongruenza si manifesti sperimentalmente alle distanze in cui gli effetti quantistici diventano importanti per la gravità. Data la debolezza della forza di gravità rispetto alle altre forze fondamentali, tali distanze sono incredibilmente piccole e sono fissate dalla costante di gravitazione universale ad essere dell'ordine della lunghezza di Planck: 10^{-35} metri cioè un miliardesimo di miliardesimo di millesimo di millimetro! Per dare una descrizione unificata delle 4 forze è stato necessario ricorrere a un linguaggio nuovo e fundamentalmente diverso da quello della teoria dei campi: quello della teoria di stringa. Quest'ultima è descritta in termini di oggetti monodimensionali fondamentali, le stringhe appunto, con dimensione tipica pari alla lunghezza di Planck^{††}. Dal punto di vista intuitivo, possiamo pensare che la dimensione dell'oggetto unidimensionale stringa definisca una sorta di "distanza minima" oltre la quale non si può andare. E' importante notare che, dato il valore astronomicamente piccolo della costante di Planck, questa specie di "granulosità" dello spazio-tempo è del tutto inavvertibile non solo alla scala di distanze ordinarie (1 m), ma anche alla scala atomica (10^{-10} m) e alle più piccole distanze fino ad oggi osservate (10^{-18} m).

L'ambizioso tentativo di unificazione della teoria di stringa si è fino ad oggi scontrato con varie difficoltà che sono a mio modo di vedere riconducibili a due grossi filoni.

Da un lato, si è infatti capito che la teoria non viene univocamente determinata dalla semplice richiesta di descrivere le forze fondamentali in una maniera unificata e matematicamente coerente: difatti esistono infinite teorie^{‡‡} che soddisfano a tali requisiti! Peraltro, la speranza di discriminare fra le infinite teorie isolando quella che ha il Modello Standard come teoria effettiva a basse energie, è pure finora naufragata di fronte alle enormi difficoltà matematiche di traduzione dal linguaggio delle teoria di stringa a quello della teoria di campo.

Ma la teoria di stringa si scontra col problema (ancora più grave a mio parere) di non

^{††}per confronto, nella descrizione che la teoria dei campi fa di una particella elementare come un elettrone ad esempio, non appare nessuna scala fondamentale intrinseca: il campo è una funzione matematica definita in ogni punto dello spazio e la distanza fra due punti può essere arbitrariamente piccola

^{‡‡}gli "stringhisti" continuano però a sperare che queste infinite teorie siano in realtà diverse manifestazioni di una unica teoria più generale, la Teoria-M (?).

poter essere sottoposta a verifica sperimentale. Difatti, come già visto, ci sono ben 17 ordini di grandezza (!) fra la lunghezza di Planck, alla quale gli effetti della teoria di stringa diventano osservabili, e la minima distanza raggiunta nelle osservazioni sperimentali. Per come la vedo io, una verifica diretta in laboratorio attraverso lo strumento finora utilizzato nella fisica delle particelle, e cioè tramite gli acceleratori, non sarà mai possibile. E' difatti molto probabile che il limite socio-politico venga raggiunto molto prima del limite tecnologico: chi approverà il progetto di un acceleratore di particelle grande quanto la Terra e che consumi tutta la potenza di cui la Terra dispone? Esistono, forse, altre possibilità (cosmologia? buchi neri?), ma si tratta, al momento, solo di ipotesi speculative su quelli che potrebbero essere gli esperimenti di un lontano futuro.