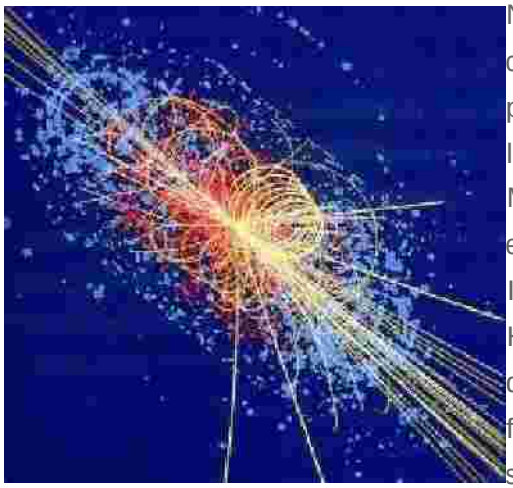
LA CACCIA AL BOSONE DI HIGGS
FRONTIERA DELLA RICERCA IN FISICA DELLE PARTICELLE ELEMENTARI

di *Andrea Donini**



Nel 2010 il Large Hadron Collider del Cern di Ginevra ha cominciato a funzionare: uno dei risultati che ci si aspetta a partire dai dati che si stanno raccogliendo è di poter osservare l'ultima particella che manca all'appello per dare coerenza al Modello Standard, l'attuale teoria nel campo delle particelle elementari.

Il percorso didattico che segue utilizza la "caccia al bosone di Higgs", come pretesto per introdurre i concetti di particella, interazione (visione moderna della "forza" della fisica classica) e simmetria (e sua rottura). Questi tre elementi sono alla base delle moderne teorie dei campi quantistiche-relativistiche (QR) che permettono di descrivere con precisione tutti i fenomeni osservati finora di interazione elettromagnetica, debole e forte, ma non le interazioni gravitazionali, per le quali non esiste ancora una teoria consistente che ne descriva le proprietà quantistiche (due possibili teorie della gravità QR possono essere trovate qui e qui).

Il percorso è accompagnato da un certo numero di allegati che ne sono parte integrante e sono stati preparati appositamente, anche per essere presentati direttamente in aula attraverso videoproiettori o lavagne multimediali.

Il percorso suggerisce accanto alla trattazione dei concetti, possibili divagazioni multimediali (video e musica reperibili in Rete) nell'ambito della cultura pop che si è spesso ispirata a questa branca della ricerca.

I concetti possono, ovviamente, essere approfonditi utilizzando le informazioni disponibili in Rete (sono forniti numerosi links).

Infine, ci si connette ad un'ottima pagina didattica preparata dal CERN (*Conseil Européenne pour la Recherche Nucléaire*) dove sono disponibili veri dati prodotti dall'LHC negli ultimi mesi ed è possibile seguire passo per passo un'analisi dei dati.

La struttura del percorso è la seguente:

[1] Breve introduzione alla fisica delle particelle

In questa sezione si introducono rapidamente le prime particelle "elementari" osservate e le interazioni elettromagnetiche, forti e deboli fra loro. Un approfondimento possibile potrebbe essere uno studio storico sull'evoluzione del concetto di particella (da Democrito ad oggi) e su come l'interpretazione di una particella come oggetto elementare è soggetta alla nostra capacità di esplorare distanze via via piú corte.

[2] Il Modello Standard delle Interazioni Fondamentali

In questa sezione si introduce il Modello Standard delle interazioni fondamentali (elettromagnetiche, forti e deboli) e le particelle di materia e d'interazione che lo compongono. L'importante concetto di simmetria e la moderna interpretazione del concetto di forza vengono introdotti qui. Un possibile

approfondimento potrebbe essere lo studio delle simmetrie e la loro relazione con le leggi di conservazione in fisica classica (conservazione dell'energia e del momento come invarianza sotto traslazioni temporali e spaziali, ad esempio).

[3] Rottura Spontanea di un simmetria

In questa sezione si spiega come le osservazioni sperimentali richiedono l'aggiunta di un nuovo campo necessario per rompere la simmetria SU(2) responsabile delle interazioni deboli, le cui fluttuazioni sono interpretabili come particelle chiamate bosoni di Higgs.*********

[4] Il *Large Hadron Collider* e la ricerca dell'Higgs

In questa sezione si introduce il concetto di acceleratore di particelle e si descrive brevemente la struttura del moderno LHC del CERN. Un esempio di come si effettua un'analisi dei dati prodotti dall'LHC viene fornito attraverso un link didattico pr to dal CERN stesso.

[1] Breve introduzione alla fisica delle particelle

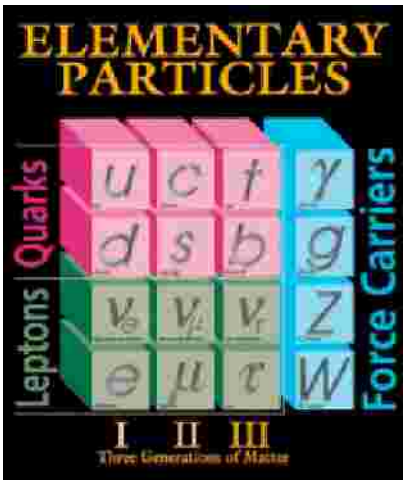
La **fisica delle particelle** (o *fisica delle Alte Energie*) si occupa dello studio delle interazioni fra particelle elementari. Nella vita quotidiana (per modo di dire), le uniche particelle con le quali abbiamo a che fare sono l'elettrone, il protone e il neutrone. Tutta la materia che vediamo intorno a noi è composta di atomi le cui proprietà differiscono in funzione del numero di elettroni, protoni e neutroni che li compongono. Le interazioni fra elettroni e protoni per formare gli atomi, fra atomi per formare molecole e fra molecole per formare ogni altra cosa sono di tipo elettromagnetico, e vengono descritte in fisica delle particelle come scambio di fotoni, quanti del campo elettromagnetico. Le interazioni fra protoni e neutroni per formare i diversi nuclei atomici, invece, vengono chiamate "interazioni forti", e vengono descritte come scambio di gluoni (un esempio di quello che, cinematograficamente parlando, potrebbe succedere se venisse improvvisamente annullata l'interazione forte può essere trovato qui).

Oltre a queste due interazioni fondamentali, tuttavia, esiste una terza forma di interazione fra particelle chiamata "interazione debole". Il caso più noto di processo mediato dalle interazioni deboli è il "decadimento ß" del neutrone, per cui un neutrone si trasforma in un protone emettendo un elettrone e un neutrino elettronico, $?_e$. Questo processo è comunemente noto

come radioattività e fu osservato per la prima volta nel 1896 da Henri Bequerel nell'uranio uranio, e successivamente da Marie e Pierre Curie in torio, polonio e radio (da cui il nome). In fisica delle particelle, questo tipo di processi viene descritto come scambio di tre nuove particelle chiamate W^+, W^- e Z.

[2] Il Modello Standard delle Interazioni Fondamentali

L'insieme delle tre forme di interazione elettromagnetiche, forti e deboli fra particelle elementari viene



descritto da una teoria unificata chiamata Modello Standard delle Interazioni Fondamentali (MS).

Il MS può essere costruito a partire dall'introduzione di 12 particelle chiamate *di materia*, osservate sperimentalmente fra il 1897 e il 2000. Queste particelle sono suddivise in due gruppi: sei quark (u, d, c, s, t, b) e sei leptoni ($?_e$, e, $?_\mu$, μ, $?_t$, t).

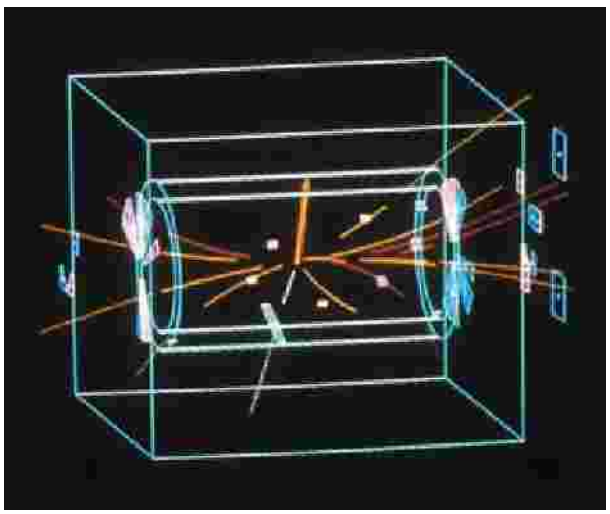
L'elettrone è il leptone carico piú leggero (μ e t sono piú pesanti e i tre neutrini,$?_e$, $?_\mu$ e $?_t$, sono neutri).

I quark u e d sono i costituenti elementari di protone e neutrone (che non sono particelle elementari).

Gli altri quark (c, s, t e b) sono molto più pesanti di u e d, e si osservano come costituenti elementari di particelle con vita media molto corta che si disintegrano molto rapidamente a causa delle interazioni deboli (queste particelle sono chiamate mesoni e barioni).

Le ultime particelle di materia che sono state osservate sperimentalmente sono il quark t, nel 1995, e il neutrino n_t, nel 2000, entrambe nel laboratorio FermiLab di Chicago. Una lista completa di tutte le particelle osservate (elementari e non elementari) e delle loro proprietà (massa, vita media, prodotti di disintegrazione) può essere trovata qui.

L'esistenza, a lato di queste particelle "di materia", di particelle *d'interazione* è una condizione necessaria della richiesta che il MS soddisfi tre trasformazioni di simmetria, chiamate SU(3), SU(2) ed U(1). Le particelle d'interazione associate a queste tre simmetrie sono, rispettivamente, i gluoni, i bosoni W e Z ed i fotoni.



La costruzione del MS ha occupato tutta la seconda metà del XX secolo ed è culminata con l'osservazione sperimentale dei bosoni W e Z nel 1983 da parte della collaborazione UA1 in collisioni protone-antiprotone effettuate nell'acceleratore di particelleSPS del CERN (per la quale il Prof. C. Rubbia ha ottenuto il premio Nobel nel 1984).

[3] Rottura spontanea di una simmetria

Per completare la costruzione del MS è necessario introdurre un ultimo ingrediente. Sperimentalmente, infatti, la simmetria SU(2) si osserva in processi di alta energia, ma non si osserva in processi di bassa energia. A bassa energia, non "esistono" interazioni deboli, ma solo le interazioni elettromagnetiche e quelle forti (infatti, come dicevamo all'inizio, le uniche particelle che possiamo osservare nella vita quotidiana sono gli elettroni ed i quark che formano protoni e neutroni).

Come possiamo spiegare questo fenomeno? Immaginando che la simmetria SU(2) sia esatta ad alta energia, ma non a bassa energia. Che conseguenze può avere questa ipotesi sui mediatori delle interazioni deboli? Queste.
Pertanto, abbiamo bisogno di rompere la simmetria SU(2). Questa rottura, però, deve avvenire in modo "controllato", perché abbiamo bisogno che la simmetria esista per alte energie. Il fenomeno che ci interessa si chiama rottura spontanea di una simmetria, ed è molto importante non solo in fisica delle particelle ma anche in fenomeni quali lasuperconduttività.
Immaginiamo un sistema invariante sotto una certa simmetria. Lo stato fondamentale del sistema può essere ben definito e corrispondere al minimo di un certo potenziale (chiamato "vuoto"). In questo caso parliamo di simmetria "esatta". La teoria dei campi che descrive il sistema verrà sviluppata come piccole eccitazioni dello stato di minimo. Le eccitazioni (particelle) dovranno rispettare certe leggi di conservazione di alcune quantità (numeri quantici) nei loro processi di diffusione, *scattering* o disintegrazione.
Il "vuoto" del sistema, però, non è necessariamente unico. In alcuni casi, possono esistere diversi stati energeticamente equivalenti, connessi fra loro da trasformazioni della simmetria. La teoria di campo che descrive il sistema, tuttavia, deve essere sviluppata intorno ad uno ed uno solo di questi stati di minimo. Una volta scelto uno degli stati, pertanto, la simmetria originaria è rotta spontaneamente.
Affinché una simmetria possa essere rotta spontaneamente è necessario aggiungere al modello un campo scalare (il cui potenziale ha vari minimi). Le fluttuazioni di questo campo sono quello che chiamiamo bosone di Higgs. Una rappresentazione sonora della sua ricerca può essere trovata qui e qui.

[4] Il *Large Hadron Collider* e la ricerca del bosone di Higgs

Il concetto di acceleratore di particelle risale alla fine del XIX secolo. In un linguaggio moderno, l'esempio fornito (il tubo di Crookes) è un prototipo di acceleratore lineare. Immaginiamo, invece, di immergere l'acceleratore in un campo magnetico disegnato in modo tale che le particelle percorrano una traiettoria circolare. In questo modo, potremo accelerarle sempre di piú facendole passare a ogni giro attraverso una sezione con campi elettrici longitudinali.

Aggiustando il campo magnetico in modo tale che al giro successivo le particelle mantengano la loro traiettoria circolare (e compensando per la perdita di energia per irraggiamento delle particelle cariche in un campo esterno) potremo accelerarle nuovamente, e così via fino ad arrivare alla velocità desiderata.

Un acceleratore circolare, pertanto, può raggiungere energie più elevate di un acceleratore lineare (che deve essere tanto più lungo quanto più alta sia l'energia alla quale si vogliono accelerare le particelle). Questo è il caso del *Large Hadron Collider* del CERN, che è un acceleratore circolare con una circonferenza di 27 Km ed è stato disegnato per accelerare protoni all'energia di 7 TeV (1 TeV = 10^{12} eV), in modo tale da ottenere urti fra fasci di protoni con un'energia nel centro di massa di 14 TeV. Attualmente, i protoni immessi sono accelerati "solo" a 3.5 TeV e le collisioni avvengono con un'energia nel centro di massa di 7 TeV. Si è deciso di continuare per un altro anno a "bassa" energia, per testare l'acceleratore e non forzare le macchine, per poi passare nel 2012 all'energia massima, alla quale ci si aspetta di vedere, finalmente, i primi bosoni di Higgs. L'impatto (a volte travisato) del bosone di Higgs nella *pop culture* si può trovare qui.

Un esempio di come si analizzano i dati (reali) dell'LHC si può trovare qui. Oltre alla ricerca del bosone di Higgs (per la quale è stato costruito l'LHC), molte esten no essere studiate.
In questo allegato vengono presentate brevemente alcune di queste possibili estensioni.
Un esempio di musica extradimensionale

Nota Didattica

Visti i riferimenti a molti dei temi e dei concetti pr enti nei curricoli di fisica, il percorso può essere efficacemente proposto e apprezzato nel quinto anno come sintesi e culmine di tutto il lavoro svolto e come scorcio sulle possibili prospettive di studi successivi.

*Ricercatore in Fisica Teorica presso l'Istituto di Fisica Teorica di Madrid e l'Istituto di Fisica Corpuscolare diValencia, centri del Consejo Superior de Investigaciones Cientificas. Si occupa di Fisica delle Alte Energie dal 1997.
Pubblicato il 23/3/2011