

NELLA RETE

- Prove sperimentali a conferma del
campo di Higgs -



Davide Sampietro

Liceo Scientifico "L. Pepe – A. Calamo" - Classe VB

Tutor: prof. Salvatore Triarico, prof. Piero De Falco

A.S. 2012 - 2013

PREMESSA

Il bosone di Higgs, la cui esistenza fu teorizzata fin dal 1964, rappresenta ormai da decenni il Sacro Graal della fisica quantistica rappresenta il tassello mancante, necessario ad avere un mosaico completo (ma perfettibile) delle quattro interazioni fondamentali (forte, debole, elettromagnetica e, per l'appunto, gravitazionale) e del Modello Standard. L'annuncio della sua scoperta, pertanto, era uno dei più attesi da tutta la comunità scientifica.

La tanto agognata scoperta della "particella di Dio" fu annunciata solo il 4 luglio 2012, suscitando lo scalpore e le speranze del mondo intero, pur essendo una notizia ancora incerta. Infatti, la mole enorme di dati da elaborare non consentiva di affermare con certezza che si trattasse proprio di "quella" particella. La conferma definitiva è giunta finalmente il 6 marzo 2013: "Finora potevamo parlare soltanto di una particella simile al bosone di Higgs, ma adesso possiamo dire che è sempre più chiaro che è un Higgs", come ha dichiarato Sergio Bertolucci, direttore scientifico del CERN di Ginevra.

Il contributo dei ricercatori italiani è stato fondamentale: in particolare quello di Fabiola Gianotti e Guido Tonelli, rispettivamente direttori dell'esperienza ATLAS e CMS, i titanici rivelatori di particelle in cui per la prima volta il bosone di Higgs è stato "fotografato". La scoperta del Bosone di Higgs più che concludere un capitolo della fisica, ne apre uno nuovo, mettendo i ricercatori di tutto il mondo dinanzi a questioni di ancor più complessa interpretazione, quale l'origine della materia oscura. Ciò che appare chiaro oggi è che una scoperta di questo calibro, pur avendo un valore intrinseco enorme, ha principalmente la funzione di nuovo stimolo alla ricerca scientifica, di apripista per inaugurare una nuova stagione della fisica quantistica.



Figura 1 - L' LHC e i suoi principali rilevatori sotto il terreno di Ginevra

L'idea per questo saggio è nata dalla partecipazione ad una delle "International Masterclasses" organizzate dall'istituto IPPOG, in collaborazione con la Sezione di Lecce dell'INFN che ha l'obiettivo di portare gli studenti quanto più vicino possibile alla realtà della ricerca scientifica. In questo modo, si dà a circa 10000 studenti provenienti da ogni parte del mondo, l'opportunità di studiare, nei limiti delle loro conoscenze, i fenomeni legati alla fisica delle particelle. Ovviamente, per l'anno 2013, l'obiettivo era l'identificazione degli eventi (realmente registrati al CERN) riconducibili al decadimento del bosone di Higgs. La lezione si è tenuta all'università del Salento, che ha collaborato, tra l'altro, alla costruzione delle camere di rilevamento per muoni attualmente in servizio presso il rivelatore ATLAS.

LA "PARTICELLA DI DIO"

Con tono provocatorio è stata definita la "particella di Dio". Per sottolineare, forse, il primato della scienza sulla metafisica. O forse perché "ha costruito" e mantiene in piedi l'Universo, così come lo conosciamo. O, meno poeticamente, per un'imposizione dell'editore di Leon Lederman, che non gli ha consentito di intitolare il suo saggio "The goddamn particle".

Qualunque sia l'origine del suo nome, il bosone di Higgs, che per decenni è stato il simbolo della *fisica delle alte energie* e della ricerca scientifica avanzata, è stato finalmente catturato e fotografato al CERN di Ginevra, grazie all'altissimo potere di risoluzione di ATLAS e CMS e la formidabile energia sprigionata dall'LHC. Così la notizia tanto attesa è finalmente giunta, e le

rivoluzionarie teorie dei sei ricercatori che ne prevedero l'esistenza nel 1964 (Peter Higgs, Robert Brout, François Englert, Gerald Guralnik, Carl Hagen, Tom Kibble) sono state confermate.

Per comprendere appieno l'importanza epocale di questo risultato è necessario inquadrare l'ambito in cui esso si colloca, in modo da scoprire quale sia la sua funzione e le maniere che, ad oggi, abbiamo per studiarlo.

Ebbene, essa è solo una delle (adesso) 25 particelle che fanno parte del modello più audace della storia della fisica che sia stato mai verificato.

IL "PARTICLE ZOO" E LE PARTICELLE ELEMENTARI

Il bosone di Higgs è solo una delle tante particelle che rientrano nel Modello Standard (MS), la teoria fisica che ad oggi descrive meglio la composizione e le interazioni della materia. Tuttavia, se da un lato vi è un gruppo ristretto di particelle la cui esistenza è prevedibile ricorrendo ai modelli matematici impiegati, d'altro canto le indagini condotte tramite gli acceleratori di particelle hanno rivelato la presenza di un numero enorme di corpuscoli, generando un vero e proprio "particle zoo" in cui era pressoché impossibile orientarsi.

Da qui sorse l'esigenza di individuare, in prima analisi, le cosiddette *particelle elementari*, ovvero quei corpuscoli non ulteriormente scomponibili che costituiscono i mattoni della materia. Gli scienziati e i fisici teorici si trovarono a risolvere un vero e proprio enigma: infatti, a livello quantistico, è praticamente impossibile utilizzare le leggi valide in ambito macroscopico, e ci si ritrova a dover fare i conti con dei veri e propri paradossi.

LE DIFFICOLTA' INTERPRETATIVE DEL MODELLO STANDARD (1)

LA SIMMETRIA E LA MANCATA INTEGRAZIONE DEL CONCETTO DI MASSA

Una delle (apparenti) contraddizioni di fondo del sistema proviene proprio dalla massa: attribuendo una massa a determinate particelle, il MS, che pure descrive adeguatamente molti fenomeni, perde il suo valore predittivo, e le equazioni di cui si serve giungono ad un punto morto. In effetti, il MS non contempla una spiegazione esaustiva del concetto di massa, e anzi, seguendo alla lettera i suoi principi, la forza di gravità non dovrebbe esistere. Ciò è dovuto al fatto che, nella sua teorizzazione, si è ricorsi al concetto di *simmetria*: nelle trasformazioni che coinvolgono le particelle, entrano in gioco diversi principi di conservazione, che sarebbero violati ammettendo che esse fossero dotate di massa. Nell'interazione forte, infatti, viene conservata la così detta *carica di colore*; il principio di conservazione delle cariche elettriche, valido anche a livello macroscopico, è un assunto fondamentale dell'elettromagnetismo. L'unica forza che non rispetta un preciso principio di conservazione è quella nucleare debole, e questo potrebbe essere alla base dell'esistenza della gravità nell'esperienza comune.

Nelle interazioni deboli, responsabili del decadimento radioattivo, non verrebbe rispettata la *simmetria P*, ovvero quella che entra in gioco nel momento in cui si inverte l'orientamento degli assi spaziali: è come dire che l'immagine che viene riflessa in uno specchio è diversa da ciò che l'ha generata. Tale tesi, introdotta da Yang e Lee, permetteva di risolvere il così detto *puzzle θ - τ* : le due particelle, dotate di massa uguale e perciò ipoteticamente identiche, possono decadere in maniera diversa, a seconda del "loro orientamento".

La situazione dovrebbe cambiare quando si supera una determinata soglia energetica: ebbene, la fisica delle particelle, non a caso definita *fisica delle alte energie*, prevede che anche le interazioni deboli rispettino le simmetrie cui sono sottoposte tutte le altre. Ciò tuttavia non avviene: e le componenti prime della materia non sono *massless* come il MS afferma. In questo senso, il bosone di Higgs è un vero e proprio *deus ex machina*, poiché consente di integrare il concetto di massa alle alte e basse energie, salvando la validità dell'intera teoria.

LE DIFFICOLTA' INTERPRETATIVE DEL MODELLO STANDARD (2), L'EQUIVALENZA MASSA/ENERGIA

Un altro concetto difficile da assimilare è la possibilità che le particelle hanno di trasformarsi: esse infatti, interagendo secondo le quattro forze fondamentali, mutano continuamente la loro natura.

Particelle massive, come era stato osservato in precedenza, possono persino trasformarsi in un fotone, che, come è noto, è privo di massa. Tale proprietà, descritta dalla celeberrima equazione di Einstein "E=mc²", è alla base del funzionamento degli acceleratori di particelle, che convertono l'energia cinetica accumulata in massa, necessaria a costruire le particelle pesanti non esistenti in natura. Inoltre, alcuni corpuscoli potrebbero essere semplici vettori che "trasmettono" le quattro forze di cui si è parlato. Detto questo, quali sono le *particelle elementari*?

PARTICELLE-MATERIA E PARTICELLE-FORZA: BOSONI E FERMIONI A CONFRONTO

Esse si dividono in due gruppi: *particelle-materia*, altrimenti dette *fermioni* e *particelle-forza*, che costituiscono la maggior parte dei *bosoni*. La differenza sostanziale tra le due risiede in una proprietà intrinseca di cui ogni corpuscolo è dotato, ovvero lo *spin*: esso si manifesta come il momento angolare posseduto da ciascuna particella, ed è espresso da un numero quantico. I *fermioni* hanno spin semi-intero, pertanto rispettano il principio di esclusione di Pauli, secondo il quale due particelle dello stesso tipo non si possono trovare contemporaneamente nello stesso stato quantico. I *bosoni*, seguendo la statistica *Bose-Einstein*, non lo rispettano.

Il principio di esclusione di Pauli afferma che due fermioni non possono trovarsi nel medesimo stato quantico, ovvero almeno uno dei parametri che li descrive deve essere diverso. Concettualmente, è come affermare che due persone non possono occupare uno stesso posto a sedere. Per tale ragione ogni orbitale atomico non può essere occupato da più di due elettroni contemporaneamente dovendo avere spin antiparallelo: in caso contrario non potrebbero coesistere, in quanto alla repulsione elettrostatica si aggiungerebbe quella generata dallo spin concorde (che, manifestandosi come momento magnetico, equivale a due campi prodotti da correnti discordi).

I FERMIONI – CLASSIFICAZIONE GENERALE

I *fermioni* sono a loro volta divisi in due categorie: i *quark*, le uniche particelle sottoposte a tutte e quattro le forze elementari, e i *leptoni*, che invece interagiscono prevalentemente in maniera elettromagnetica e/o debole.

I LEPTONI (ELETTRONI, MUONI, TAUONI, NEUTRINI)

I *leptoni* non possono unirsi per formare agglomerati più complessi, pertanto si trovano isolati. Appartengono a questa categoria i ben noti elettroni (e⁻), i muoni (μ⁻) e i tauoni (τ⁻), che hanno carica elettrica -1 (carica elementare dell'elettrone), e spin ±1/2. Si distinguono soltanto per la massa che li caratterizza: l'elettrone, il più leggero, e pertanto più stabile, ha massa pari a 511 eV, il muone 105,6 MeV, il tauone 1,8 GeV. Per il resto, le caratteristiche sono omogenee, tanto che muone e tauone possono essere pensati semplicemente come elettroni supermassivi, destinati a decadere in breve tempo in un leptone di ordine inferiore (e quindi, in ultima analisi, in un elettrone). Fanno parte dei leptoni anche i neutrini (ν), che possono essere appunto elettronici, muonici o tau, di carica neutra e massa anche in questo caso crescente. I neutrini si generano nel momento in cui gli altri leptoni decadono debolmente.

Figura 2 - Il prospetto delle particelle elementari

		Three generations of matter (fermions)					
		I		II		III	
mass		2.4 MeV/c ²	1.27 GeV/c ²	171.2 GeV/c ²	0	0	125 GeV/c ²
charge		2/3	2/3	2/3	0	0	0
spin		1/2	1/2	1/2	1	1	0
name		u up	c charm	t top	γ photon	H Higgs boson	
	Quarks	d down	s strange	b bottom	g gluon		
		4.8 MeV/c ²	104 MeV/c ²	4.2 GeV/c ²			
		-1/3	-1/3	-1/3			
		1/2	1/2	1/2			
		e electron	ν _e electron neutrino	ν _μ muon neutrino	ν _τ tau neutrino	Z ⁰ Z boson	
	Leptons	0.511 MeV/c ²	105.7 MeV/c ²	1.777 GeV/c ²			
		-1	-1	-1			
		1/2	1/2	1/2			
		e electron	μ muon	τ tau	W [±] W boson		
							Gauge bosons

I QUARK E L'INTERAZIONE NUCLEARE FORTE

I *quark* hanno carica frazionaria e non possono esistere isolati in natura. Essi tendono a unirsi in

forme più complesse, dando vita ai così detti *adroni*. L'LHC, o *Large Hadron Collider*, porta alla disintegrazione proprio di questa tipologia di particelle, nella fattispecie protoni. Esistono tre generazioni di quark: analogamente ai leptoni, la differenza principale tra una generazione e l'altra è la massa, che in genere privilegia, in quanto a stabilità, i quark più leggeri. Poiché ogni generazione contiene due quark, aventi rispettivamente carica $+2/3$ e $-1/3$, esistono in totale sei tipologie, o *sapori*, di quark aventi tutti spin $\pm 1/2$, e le rispettive antiparticelle.

Un quark può combinarsi con il rispettivo antiquark (di carica opposta) dando vita ad un *mesone*, che, avendo spin intero, è a tutti gli effetti un *bosone*. In alternativa si possono combinare tre quark, in modo che la carica complessiva sia un multiplo della carica elettrica elementare. In questo caso, si formano *barioni*.

I quark *up* e *down*, i più frequenti in natura, costituiscono i protoni ed i neutroni: avendo rispettivamente carica $+1$ e 0 , ogni protone sarà *uud*, mentre ogni neutrone *udd*.

I quark *charm* e *top* (quest'ultimo, dall'incredibile massa di 173100 MeV) sono le controparti supermassive del quark *up*, mentre *strange* e *bottom* del quark *down*. Essendo incredibilmente massivi, decadono in pochi nanosecondi in quark di ordine inferiore.

Una caratteristica interessante dei quark è la *carica di colore*: se in elettromagnetismo esistono solo cariche positive (+) o negative (-), nell'ambito dell'interazione forte vi sono tre "polarità", il *verde* (G), il *blu* (B), e il *rosso* (R). Come due ioni positivi, a causa della repulsione elettrostatica non possono coesistere, così, in un barione, si possono fondere solo tre quark di colore diverso, mentre in un mesone due antiquark di un colore del rispettivo anticoloro: in questa maniera, si generano particelle "bianche", o *colorless*, e il principio di esclusione di Pauli viene rispettato. La *color force*, oltre a tenere insieme gli adroni, è in grado di esercitare la sua attrazione all'interno dei nuclei atomici, mostrandosi così più intensa della repulsione elettrostatica, a distanze nell'ordine di 10^{-14} m. Secondo il MS, l'interazione forte comporta lo scambio continuo di *gluoni* fra i quark, che, di conseguenza, modificano costantemente la loro carica di colore.

IL RUOLO DEI BOSONI NELL'ECOSISTEMA DEL MS

Già nelle interazioni quantiche più elementari, quali il decadimento di un muone o di un quark *down*, e nella forza di colore, è emersa l'importanza che i *bosoni* rivestono nel MS: essi infatti sono i mediatori delle quattro forze elementari, che altrimenti non troverebbero spiegazione. I bosoni, pur non essendo costituenti diretti della materia, sono dunque necessari alla sua esistenza, in quanto permettono che essa interagisca e si organizzi in forme più complesse: senza di essi, l'Universo sarebbe una nube di particelle statiche, inerti e immutabili.

I *bosoni elementari*, o *bosoni di gauge*, fino a pochi mesi fa conosciuti erano quattro: i *gluoni*, i *fotoni*, i *bosoni W^\pm* e *Z^0* .

I BOSONI FONDAMENTALI

I *gluoni*, in quanto semplici mediatori dell'interazione forte, sono privi di massa, ma hanno una duplice carica di colore: quando due quark entrano in contatto, il gluone scambia la loro carica di colore, assumendo nel contempo un'anticarica necessaria a garantire la simmetria nella

Il concetto di fotone (o quanto di energia) ha giocato un ruolo fondamentale per l'evoluzione della fisica: fino a quel momento si riteneva infatti che tutte le grandezze fossero continue, e perciò moltiplicabili o divisibili in modo indefinito. L'idea di una particella, la cui energia è espressa come " $E = h f$ ", prodotto della frequenza per la costante di Planck, ha introdotto per la prima volta il concetto di quantizzazione. Esistono grandezze fisiche che variano in modo "discreto", come multipli interi di una grandezza minima (lo stesso principio si osserva a proposito della carica elettrica elementare). Tale assunto viola la legge della fisica classica "*natura non facit saltus*", portata avanti da Galileo e Leibniz.

trasformazione.

I *fotoni* (γ), anch'essi privi di massa, mediano l'interazione elettromagnetica, pur essendo più noti per essere alla base dei fenomeni luminosi. Essi sono da considerarsi quali pacchetti di energia che possono essere scambiati tra le diverse particelle. Un esempio del loro funzionamento può essere identificato nell'interazione tra due elettroni: nel momento in cui essi si avvicinano a tal punto che la repulsione elettrostatica supera la loro energia cinetica, essi scambiano un fotone virtuale che li porta ad allontanarsi reciprocamente. Tale fotone si dice virtuale in quanto esiste solo in relazione alle due particelle, e pertanto non è "libero", come quelli emessi da una fonte luminosa: in caso contrario, si genererebbe un *surplus* di energia che violerebbe la simmetria del sistema.

Infine, i *bosoni* W^\pm e Z^0 mediano l'interazione nucleare debole, consentendo a molte delle particelle conosciute di decadere e trasformarsi in altre, a patto di rispettare alcuni principi di conservazione. I bosoni W hanno carica ± 1 , trasmessa ad una delle particelle in cui si scindono (si veda il decadimento di un bosone W^- in e^-), senza violare il principio di conservazione delle cariche elettriche. Di contro, i bosoni Z^0 danno vita ad una *corrente debole neutra*, che non comporta il cambiamento di carica o sapore delle particelle coinvolte. Per tale motivo, tali fenomeni sono di più rari e di difficile individuazione.

Si tratta degli unici bosoni fondamentali dotati di massa non nulla, ed è questa loro proprietà a rompere uno degli assunti fondamentali del Modello Standard – la simmetria che dovrebbe governare anche le interazioni elettrodeboli.

IL BOSONE DI HIGGS

Il *bosone di Higgs* si originerebbe da un campo scalare, detto appunto *campo di Higgs*, che interagendo con le altre componenti subatomiche, conferisce loro massa. Sebbene al momento

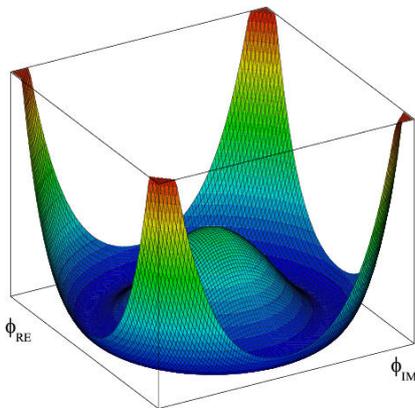


Figura 3 - Diagramma tridimensionale del campo di Higgs

non appare chiaro come ciò possa avvenire per i *fermioni*, il modello del *meccanismo di Higgs* spiega adeguatamente le ragioni per cui i bosoni che mediano l'interazione debole non siano *massless*. Il meccanismo di Higgs fa sì che il potenziale di cui è dotato il campo venga trasferito ad una particella che vi interagisce, esprimendosi come massa: poiché essa è comunque una forma di energia, è opportuno specificare che non si genera dal nulla, e che in ogni caso i principi di conservazione vengono rispettati. Il grafico del potenziale del campo di Higgs, pur essendo simmetrico, non ha il suo punto di minore intensità al suo centro: ciò fa sì che la sua forma a *cappello messicano* generi un sistema asimmetrico, nel momento in cui le particelle tendono, naturalmente, a raggiungere il grado di minor energia, acquisendo dunque una massa specifica.

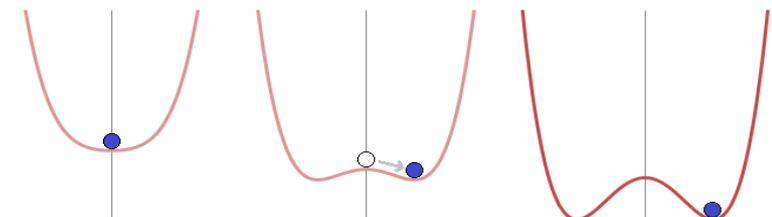


Figura 4 - Semplificazione del meccanismo di rottura della simmetria: la sfera è costretta ad incanalarsi a causa della presenza di un campo con energia potenziale non minima al suo centro

In questa maniera, pur essendo la simmetria rotta, le *invarianze di gauge* relative agli altri bosoni non sono violate, e il Modello Standard risulta nel suo complesso armonico e coerente.

L'eventualità di rompere la simmetria elettrodebole senza disobbedire agli altri principi si celava in alcuni casi limite del teorema di Goldstone.

Tale *rottura spontanea della simmetria* è la maniera più semplice per spiegare l'origine della forza di gravità senza dover revisionare totalmente il MS.

Il campo di Higgs attraversa tutto l'Universo fin dall'istante della creazione. Esso si genera nel momento in cui si scende sotto una determinata soglia energetica (raggiungibile solo nei primi istanti dopo il *Big Bang*), cosicché il suo effetto entri in atto. Infatti al di sopra di tale valore, il campo di Higgs perde la sua conformazione a cappello messicano, raggiungendo il suo minimo nel punto centrale (vedi [Figura 4](#), alla pagina precedente).

Per dimostrare indirettamente la teoria relativa al campo, è sufficiente rilevare sperimentalmente l'esistenza e le caratteristiche del bosone di Higgs. Tuttavia esso non può essere osservato direttamente, come molte altre componenti subatomiche.

LE MODALITÀ DI DECADIMENTO DI UN BOSONE DI HIGGS

Non tutte le caratteristiche del bosone di Higgs sono prevedibili ricorrendo al Modello Standard: appare chiaro che la carica elettrica e di colore debba essere nulla, e che il suo spin pari a 0, in linea con la definizione di bosone e di campo scalare.

Si supponeva che la massa della particella dovesse essere inclusa nell'intervallo di 115-180 GeV e non superare 1.4 TeV, oltre la quale il meccanismo avrebbe perso efficacia. In caso contrario, la teoria sarebbe confermabile in un ampio raggio di livelli energetici, fino addirittura alla *scala di Planck* (nell'ordine dei 10^{19} TeV).

È ovvio che la scoperta di una particella non ancora osservata, con massa stimata di 125-127 GeV e con modalità di decadimento compatibili con quelle dell'Higgs, abbia suscitato gli entusiasmi della comunità scientifica, e a buon diritto.

Ci sono diverse maniere in cui il bosone può manifestarsi ai rivelatori del CERN.

1. Sotto forma di quark ed antiquark (prevalentemente *bottom* e *charm*): tale decadimento avviene nel 70% dei casi. Per ogni collisione, si producono comunque consistenti *jets* (o *sprays*) di quark, che, rappresentando eventi di fondo e di disturbo, impediscono di individuare quelli "incriminati".

2. L'8.5% delle volte, invece, sotto forma di bosoni di gauge privi di massa: nel caso in cui essi siano due fotoni, è più semplice accertare che l'evento coinvolga il decadimento di un Higgs.

3. In una coppia di bosoni di gauge massivi (Z^0 o W^\pm), che a loro volta si scompongono in altre particelle. Un bosone W può decadere in una coppia di quark o in un leptone e neutrino, che, però, non interagendo con nessuna delle componenti del rivelatore, rende difficile la ricostruzione della dinamica. Quando però decade un bosone Z, si ha il 10% delle possibilità che esso produca una coppia leptone-antileptone, che rende la verifica dell'evento diretta e inconfutabile.

Data l'immediata rilevabilità di muoni ed elettroni, i ricercatori hanno puntato su questo tipo di analisi. In definitiva, dunque, il bosone di Higgs può produrre due coppie elettrone-positrone, due coppie muone-antimuone o una coppia per entrambi.

I FONDAMENTI: COME INDIVIDUARE UN HIGGS IN UN EVENTO LHC

Il bosone di Higgs può essere rilevato misurando la *massa invariante* delle particelle in cui decade, sfruttando il principio di conservazione più elementare (quello della massa-energia). È necessario, a tal proposito, individuare e catalogare le particelle che vengono prodotte nelle collisioni, misurarne massa, momento, energia, e verificare che la somma complessiva sia

compatibile con un Higgs.

Tuttavia non è sempre semplice, poiché gli *screen* degli eventi sono spesso affollati da particelle secondarie a bassa energia, che non giocano un ruolo essenziale. Per tale motivo viene applicato un “filtro”, che consente di discriminare i sottoeventi in base alla loro intensità, includendo solo quelli che superano la soglia energetica fissata.

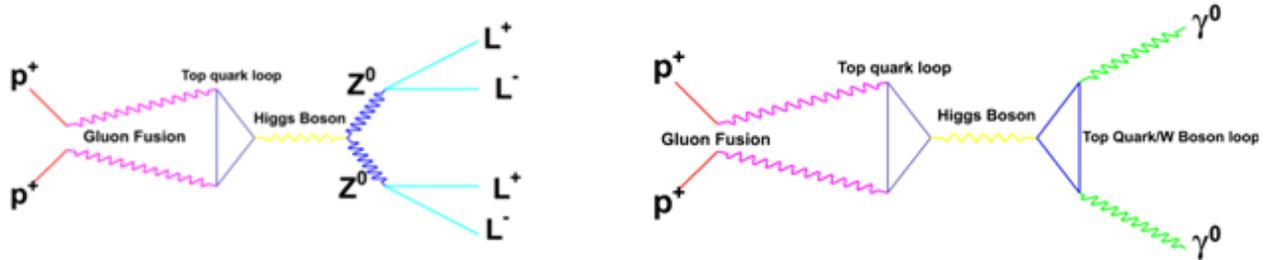


Figura 5 - Due diagrammi di Feynman rappresentanti i decadimenti dell’Higgs ricercati

IL SOFTWARE UTILIZZATO: DESCRIZIONE DI HYPATIA

Il software utilizzato nelle Masteclasses, HYPATIA (“Hybrid pupil’s analysis tool for interactions in ATLAS”), consente di analizzare *eventi* realmente avvenuti nell’LHC e derivati dalla collisione di protoni a 7 TeV di regime.

Nel momento in cui si carica un set di eventi, nella *Canvas Window* appare la sezione trasversale e longitudinale di ATLAS, che consente di individuare le particelle liberatesi dall’impatto tramite le tracce energetiche lasciate nei suoi complessi apparati.

Nella finestra *Tracks* compaiono appunto la carica delle particelle, che può essere positiva o negativa, gli angoli (necessari per garantire la conservazione della quantità di moto) e l’intensità dell’evento. I fotoni emessi (se presenti), compaiono invece nella scheda *Physics Objects*.

È opportuno applicare un “filtro”, in modo da isolare gli oggetti di maggior rilevanza: ponendo la soglia energetica minima ad un valore di 5 GeV, è possibile eliminare gli eventi e i rumori di fondo, che rendono la scena confusionaria. Ciò è particolarmente utile per escludere i *quark jets* che, in questo caso, non sono che di disturbo.

Se si presume che il bosone Z emesso da un Higgs sia decaduto in una coppia di leptoni, bisogna assicurarsi che essi abbiano carica opposta: in questa maniera viene infatti rispettato il principio di conservazione della carica elettrica, essendo la particella iniziale neutra.

Una volta assegnata l’identità ad un eventuale fotone, elettrone, muone, il software calcola automaticamente la massa invariante delle componenti segnalate e catalogate: nella *Invariant Mass Window*, sotto la dicitura “M(4) [GeV]”, compare il responso. Se la massa invariante si aggira tra i 120-130 GeV (aumentando l’intervallo, si compensano eventuali errori di misura o interferenze dall’esterno), con molta

L’**esperimento ATLAS** include quattro componenti primarie, che consentono l’analisi dei dati più importanti relativi alle particelle liberate.

Il *tracciatore (tracker)* in silicio (in grigio in HYPATIA) consente di individuare le traiettorie e la deflessione delle particelle sotto l’azione di un intenso campo magnetico, in modo da stabilirne il momento e la carica. Tutte le particelle dotate di massa vi interagiscono.

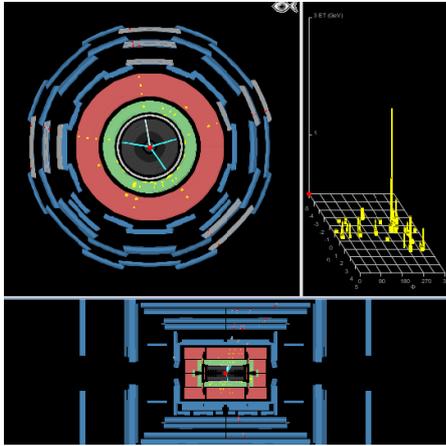
Il *calorimetro elettromagnetico* (in verde), assorbe e determina l’energia delle particelle soggette alla forza elettromagnetica. Esso è fondamentale per individuare elettroni, quark, fotoni, ma è coadiuvato da un *calorimetro adronico* (in rosso) in grado di registrare le tracce di adroni, che interagiscono prevalentemente in maniera forte. Infine, le *muon chambers* o *spettrometro per muoni* (in blu),

“illuminandosi” solo al passaggio di *muoni*, permettono l’identificazione di tali particelle, tanto importanti nel processo di decadimento di un Higgs.

probabilità, l'evento ha portato al decadimento di un bosone *Higgs-like*, come veniva definito in un primo momento.

UNA BREVE CASISTICA DEGLI EVENTI ANALIZZATI

Alcuni eventi, selezionati appositamente a fini didattici, sono particolarmente semplici da esaminare. Si analizzi il seguente (Figura 6):

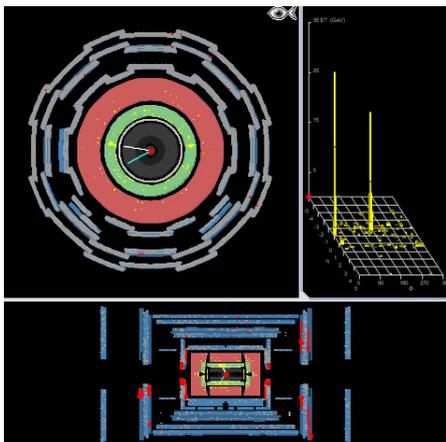


Le quattro particelle, avendo lasciato delle tracce inequivocabili nelle camere esterne (in blu) sono certamente muoni.

Il fatto che derivino dal decadimento di uno Z è confermato dalla loro polarità: si parla infatti di due coppie muone-antimuone. Calcolando la massa invariante, si ottiene un valore di 129.904 GeV.

NON TUTTE LE CIAMBELLE ESCONO CON IL BUCO – ERRORI SPERIMENTALI E IL BOSONE Z'

Una tipologia di eventi in cui “i conti non quadrano” sono quelli legati ad un bosone atipico (Figura 7):



Catalogando la coppia di particelle come elettroni, e aggiungendovi i fotoni, la massa invariante è pari a 669.859 GeV, ma non mancano casi in cui si raggiungano valori più elevati. Secondo delle estensioni del MS, infatti, dovrebbe esistere un'altra particella che, pur avendo caratteristiche e decadimento analoghi ad un normale Z^0 , ha massa estremamente elevata: questa particella supermassiva, definita *bosone Z'*, affolla gli eventi relativi all'Higgs. Pur essendo ricorrente, l'elevato intervallo in cui la sua massa varia (da 600 a 1200 GeV) impedisce di accreditarne l'esistenza, sulla quale gli esperti sono ancora scettici. Si pensa che buona parte di questi eventi siano generati da interferenze provenienti dall'esterno dell'LHC.

interferenze provenienti dall'esterno dell'LHC.

Malgrado eccezioni previste ed imprevedute, l'identificazione dell'Higgs è stata quasi sempre corretta e i dati raccolti ed inviati al CERN hanno mostrato degli evidenti picchi in corrispondenza dei valori di massa invariante cercati, ed eventualmente, in corrispondenza di bosoni Z' .

UN BILANCIO SULLA SCOPERTA DEL BOSONE DI HIGGS – I LIMITI DELLA TEORIA

Malgrado la loro importanza, i risultati ottenuti sono tutt'altro che definitivi, in quanto alcune questioni di vitale importanza non sono soddisfatte dalle teorie scientifiche attualmente *in auge*. Il bosone di Higgs paradossalmente non spiega perché esso stesso sia dotato di massa, peraltro di molto inferiore a quella prevedibile, e non consente di dar vita alla *Grande Unificazione*, che mira alla fusione delle interazioni elementari in un'unica super-forza, quella che probabilmente era in atto nell'Universo *pre-inflazionistico*.

La ragione di tali “falle” nel sistema risiede nel fatto che la teoria del *campo di Higgs*, inizialmente non prevista dal MS, è stata introdotta per aggiustarne le imprecisioni, così che essa risulti

“aliena”: a tal proposito basti osservare le differenze sostanziali tra le particelle precedenti all’Higgs e quest’ultimo, che si pone tra la definizione di *fermione* e *bosone*.

LA SUPERSIMMETRIA – “VI PRESENTO SUSY”

Per risolvere questa incongruenza, e al contempo mantenere eleganza e semplicità, i fisici teorici immaginano che debba esistere una qualche forma di simmetria tra *bosoni* e *fermioni*, che spieghi come l’Higgs sta rispetto alle altre particelle, e che includa di per sé il concetto massa.

Tale teoria della *Super Symmetry* (*SUSY*, per comodità), comporta l’esistenza di particelle supersimmetriche gemellate a quelle conosciute, di massa molto elevata (superiore almeno ai 200 GeV): se ad esempio il quark up è un fermione, lo s-quark up sarà il relativo *bosone supersimmetrico*. Tale teoria, a mio avviso, contiene diversi punti deboli: sebbene spieghi al meglio le interazioni tra bosoni e fermioni, ha la necessità di ricorrere ad un numero di particelle doppio e ad un nuovo principio di rottura della simmetria, che creerebbe gli stessi inconvenienti presenti attualmente nel MS.

Inoltre essa sarebbe in grado di proporre un’unificazione tra sole tre delle forze fondamentali, escludendo, ancora una volta, quella gravitazionale. Una prova a sua favore esiste: la SUSY prevede l’esistenza di ben cinque “higgsoni”, il cui meno massivo ha le stesse caratteristiche dell’unico riscontrato fino a questo momento.

CONSIDERAZIONI PERSONALI

Le interpretazioni che si affacciano sulla scena della fisica teoretica sono davvero molte, tanto da rendere complicato scegliere le direzioni in cui muoversi: la conferma dell’esistenza del Bosone di Higgs, sulla base di puri calcoli teorici, è in parte dovuto alla fortuna di un’intuizione, che sorge però sulle spoglie degli innumerevoli tentativi falliti da parte di altri studiosi.

Arrivati a questo punto, con la conferma del MS nei limiti che esso si è imposto fin dall’inizio, è ovvio che vi sia una grande attesa per il prossimo futuro, anche se solo un visionario può prevedere come la scena si evolverà, e su quali teorie sarà più opportuno focalizzare l’attenzione. A mio avviso sarebbe opportuno guardare alle esigenze di ricerca più immediate e vicine alle nostre possibilità, in modo da preparare il terreno teorico per nuove scoperte e garantire un sufficiente sviluppo tecnologico per confermarle. Starà ai grandi esperti in materia agire con ponderazione e fissare programmaticamente i prossimi obiettivi di ricerca, in modo da dar vita ad un processo di scoperta graduale ma costante.

Per quanto mi riguarda, dalla limitata prospettiva che sono riuscito ad offrire sull’argomento, questa esplorazione della fisica delle particelle è stata estremamente interessante, perché mi ha consentito di dar sfogo a delle curiosità che ho sempre nutrito verso l’infinitamente piccolo (e l’infinitamente grande). Sono soprattutto soddisfatto di essere riuscito a dare un taglio sia teorico che operativo, facendo riferimento all’esperienza delle Masterclasses a Lecce: per me è un grande onore aver avuto l’opportunità di rielaborare personalmente i dati raccolti al CERN, collaborando telematicamente con giovani studenti da ogni parte del mondo, come Granada, Teheran, Tel – Aviv e Gerusalemme. La scienza è un linguaggio comune a tutti i popoli, che consente di superare divergenze culturali per le quali ancora oggi si combatte, come quelle fra israeliani e palestinesi. Forse è stato questo, nonostante tutto, il maggior significato della nostra esperienza.

-Davide Sampietro