

Il modello standard ed oltre ... Il *bosone* di Higgs

Ferdinando Casolaro¹ - Alberto Trotta²

Sommario. - *In questo lavoro ci proponiamo di riassumere alcuni risultati degli ultimi anni, relativi all'evoluzione della Fisica moderna, con l'obiettivo di dare un ordine anche alla lettura delle notizie che, giorno dopo giorno, ci vengono dagli scienziati ed anche dai mass-media. In particolare, ci soffermeremo su alcune questioni attinenti ai costituenti della materia descritte attraverso il Modello Standard.*

Abstract. - *In this work, we propose to summarize the results of the last years, related to the evolution of modern Physics, with the aim of giving an order also to the reading of the news that, day by day, come from the scientists and from the media too. In particular, we will focus on some issues related to the constituents of matter, depicted through the Standard Model.*

1. - Introduzione

Nelle Indicazioni nazionali e nelle Linee guida per la Scuola Secondaria di secondo grado, tra gli obiettivi da raggiungere, si chiede la conoscenza -con un'analisi critica- dell'evoluzione della Fisica moderna negli ultimi decenni.

Contrariamente allo sviluppo della Matematica, l'evoluzione della Fisica comporta ipotesi o aggiornamenti da verificare sperimentalmente con continuità. Infatti, la Fisica moderna è la frontiera del sapere e la base delle tecnologie di oggi: studiarla significa mettersi al passo coi tempi.

In questi ultimi anni si è parlato di alcune proprietà dei *neutrini*, del *bosone* di Higgs e del Modello Standard, argomenti che ovviamente non possono essere presenti nei libri di testo perché sono ancora in fase di discussione tra i ricercatori.

In ogni caso, però, la Scuola -più precisamente un docente di Matematica e Fisica- non può ignorare una discussione, o eventuali richieste di chiarimento da parte degli allievi, sugli eventi scientifici che giorno dopo giorno arrivano nelle nostre case con notizie non sempre precise perché riportate, attraverso flash, da giornalisti che raramente sono addetti ai lavori. Uno degli elementi centrali dello studio dei ricercatori è il Modello Standard che rappresenta un esempio di unificazione delle forze fondamentali, in particolare dell'*interazione elettromagnetica* e dell'*interazione debole*, entrambe manifestazioni di un'unica forza che prende il nome di *forza elettrodebole*. Tale modello è basato sulla teoria quantistica dei campi, ed è a tutt'oggi ritenuto coerente sia con la *meccanica quantistica* che con la *relatività ristretta*.

Anche se le previsioni del Modello Standard sono state in larga parte verificate sperimentalmente con un'ottima precisione, esso non può essere considerato una teoria completa delle interazioni fondamentali, in quanto non comprende la forza gravitazionale e non prevede l'esistenza della materia oscura, che costituisce gran parte della materia dell'universo.

¹ Università del Sannio

² IISS "Santa Caterina da Siena-Amendola" Salerno

2. - Status Quaestions

Il Modello Standard, che con successo descrive le interazioni tra le particelle elementari nelle scale di energia degli esperimenti, sarà ancora in grado di descrivere le interazioni nelle scale di energie superiori? Oppure è un modello ancora incompleto?

Certamente tale modello lascia aperti vari problemi come quello della distribuzione delle masse delle particelle e delle cosiddette generazioni. Anche l'oscillazione dei *neutrini* rappresenta un segnale dell'esistenza di qualcosa che va oltre il Modello Standard.

Siamo ad un bivio. Andremo verso una estensione del modello oppure dobbiamo percorrere altre strade ai fini della spiegazione delle leggi della natura?

La prova più eclatante dell'avvento di una nuova fisica è costituita dal fatto che i *neutrini* dispongono di una massa. È importante notare che per i risultati sperimentali a sostegno di questa ipotesi, è stato attribuito il premio Nobel per la Fisica 2015 a Takaaki Kajita e Arthur McDonald³.

Questo non è previsto nel Modello Standard che funziona molto bene in determinati intervalli (range) energetici, quelli al disotto dei TeV⁴, ma evidenzia i suoi limiti quando viene messo alla prova delle alte energie, tipiche dei nuovi acceleratori.

Dai dati raccolti dall'esperimento Liquid Scintillator Detector (LSND) operativo negli anni Novanta a Los Alamos e dal Min Booster Neutrino Experiment (Mini Boo Ne) del Fermilab è emersa l'ipotesi di quattro sapori dei *neutrini* e non solo i tre conosciuti.

Alcune teorie esotiche hanno proposto l'esistenza di una quarta varietà, quella dei *neutrini sterili*, che non interagirebbero mai con la materia, pertanto sarebbero rilevabili solo indirettamente per via sperimentale.

Se il quarto sapore dovesse realmente esistere, i *neutrini* di tale tipo sarebbero quindi ancora più elusivi degli altri tre. Dal canto suo Janet Marie Conrad⁵, del MIT (Massachusetts Institute of Technology), è convinta che l'ipotesi dell'esistenza del quarto sapore può essere ammessa. Ella afferma che alcuni fenomeni come ad esempio l'*asimmetria tra neutrini ed antineutrini dell'universo primordiale*, potrebbe celare l'esistenza di neutrini sterili.

Gli scienziati hanno affrontato in diversi modi il mistero delle grandi famiglie di particelle e alcuni di loro hanno proposto molti ipotetici costituenti per *quark* e *leptoni*, ognuno con un diverso nome, ma si è affermato il termine *<preone>* come qualifica generica per tutti. Il più delle volte lo stesso nome è stato usato anche per i costituenti portatori delle forze agenti sulle particelle.

Il Modello Standard riesce a descrivere *quark*, *leptoni* e *bosoni* senza far riferimento ai *preoni*; pertanto spetta ai fisici cercare le sottili deviazioni sulle previsioni del modello o minuscole crepe nell'edificio della fisica moderna.

Vi sono almeno due aspetti del modello che meritano un'indagine più accurata:

- il primo è inerente alle dimensioni delle particelle in esame;
- il secondo è inerente ai concetti di *spin* e di *momento magnetico*.

Il Modello Standard tratta i *quark* ed i *leptoni* come se fossero puntiformi, cioè particelle nulle e prive di struttura interna.

³ Scientific Background on the Nobel Prize in Physics 2015 NEUTRINO OSCILLATIONS compiled by the Class for Physics of the Royal Swedish Academy of Sciences (motivazione per l'attribuzione del premio Nobel per la Fisica 2015).

⁴ TeV (Teraelettronvolt) è l'unità di misura dell'energia usata nella fisica delle particelle. Il TeV è un multiplo dell'elettronvolt ed equivale a 1.000 miliardi di eV, pari a 10^{-7} Joule.

⁵ Janet Marie Conrad - Prof.ssa di Fisica a Massachusetts Institute of Technology. Il 22 agosto 2010 ha affermato di avere nuovi elementi di prova che la materia e l'antimateria potrebbero comportarsi in modo diverso.

Se scopriremo che queste particelle hanno dimensioni diverse da zero, avremmo un forte indizio a favore dei *preoni*. Alcuni esperimenti hanno mostrato che protoni e neutroni hanno un raggio di azione di circa 10^{-15} metri. In particolare, gli esperimenti fatti presso i principali collisori di particelle hanno cercato prove del fatto che anche i *quark* o i *leptoni* possano avere dimensioni misurabili. Finora i dati a nostra disposizione sono coerenti con la dimensione zero o con la dimensione di un ordine di grandezza compresa tra 0,0002 e 0,001 volte quella del *protone*. Al fine di distinguere tra queste due possibilità bisogna fare misurazioni più precise. Mediante l'uso della macchina LHC⁶ potremo avere a disposizione un'enorme quantità di dati dalle collisioni che avvengono e da queste ricavarne utili informazioni sulle dimensioni dei *quark* e dei *leptoni*. Per quanto riguarda i *leptoni*, un'altro modo di verificare l'esistenza di una sottostruttura consiste nell'approfondimento dei concetti di *spin* e di *momento magnetico* strettamente collegati tra loro.

Come a tutti i *fermioni*, all'*elettrone* si assegna *spin* $\frac{1}{2}$. Visto che l'*elettrone* è dotato di carica, la combinazione *carica spin* conferisce a questa particella un momento magnetico; pertanto, se da qualche misurazione di un *fermione* risultasse un momento magnetico diverso dalle previsioni teoriche, tale risultato suggerirebbe che le suddette particelle non siano puntiformi e quindi possano essere composte da *preoni*.

E' noto da tempo ai fisici che i momenti magnetici dell'*elettrone* e del *muone* sono diversi da quello di una particella puntiforme. Tuttavia questa piccola differenza non ha a che fare con i *preoni* ed è possibile spiegarla nel contesto del Modello Standard. Il Fermilab si sta impegnando nell'esplorazione di fenomeni rari.

Due degli esperimenti più interessanti per la ricerca dei *preoni* misureranno il momento magnetico dei *muoni* e cercheranno di rilevare il decadimento del *muone* in un *elettrone* e in un *fotone*. Continuano pertanto le ricerche delle prove di una dimensione diversa da zero per i *quark* e per i *leptoni* e di qualche indizio relativo al fatto che anche le *particelle-vettori* di forze, cioè i *bosoni* W e Z che mediano la forza nucleare debole, abbiano cugini più pesanti. In tal caso si aprirebbero nuovi scenari per il mondo quantistico .

3. - Il bosone di Higgs

Il 4 luglio 2012, in seguito dei risultati degli esperimenti ATLAS e CMS, gli scienziati del CERN annunciano di aver scoperto una particella di tipo Higgs a circa 125 GeV. Questa particella è coerente con il bosone di Higgs, previsto dal Modello Standard, come manifestazione del meccanismo di Brout-Englert-Higgs⁷.

Tale scoperta segna il culmine di una ricerca durata decenni. Negli anni precedenti, con la messa a punto del *Modello Standard della fisica delle particelle*, i ricercatori non disponevano delle spiegazioni del perché le particelle fossero dotate di massa. Una serie di scoperte teoriche avevano suggerito l'esistenza di un nuovo campo, oggi chiamato "*campo di Higgs*", tale da poter rallentare le particelle e conferire loro una certa inerzia.

La ricerca di questo campo, che doveva possedere una particella corrispondente, rappresenta l'inizio della ricerca del *bosone* di Higgs.

Attualmente, pochissimi fisici dubitano che sia apparsa una particella pesante. Ma di che tipo di particella si tratta?

⁶ LHC: Large Hadron Collider: macchina che accelera due fasci di particelle che circolano in direzioni opposte.

⁷ L'otto ottobre 2013, il Premio Nobel per la Fisica è stato assegnato congiuntamente a François Englert e Peter Higgs "per la scoperta teorica di un meccanismo che contribuisce alla nostra comprensione dell'origine della massa delle particelle subatomiche".

Tutto quello che si può dire è che abbiamo a che fare con una particella estremamente instabile e che decade in numerosi processi diversi o <canali>. Riportiamo qui di seguito quattro dei più importanti canali di decadimento.

1. *Decadimento in due fotoni. In tal caso un rivelatore può misurare la loro energia complessiva con accuratezza estremamente elevata, il che aiuta a ricostruire in modo preciso la massa della particella trovata.*

2. *Decadimento in una coppia di bosoni Z, ciascuno dei quali può decadere in un elettrone accoppiato con un antielettrone o in due muoni.*

3. *Decadimento in un quark bottom e nella sua antiparticella, ognuno dei quali decade rapidamente in un <getto> di particelle secondarie dette adroni.*

4. *Decadimento in due bosoni W, ognuno dei quali decade in un elettrone, antielettrone o muone, più un neutrino o antineutrino.*

I fisici parlano di tale particella con una certa cautela, insistendo sulla necessità di nuovi dati al fine di definire meglio le sue caratteristiche. Il CERN, infatti, non ha ancora dimostrato in modo definitivo che la nuova particella abbia *spin* zero, come richiesto dal Modello Standard, anche se un confronto con i dati di Tevatron (pubblicati il 2 luglio 2012) suggeriscono di sì. Inoltre, gli esperimenti stanno rilevando più eventi in due *fotoni* rispetto alle attese.

C'è forse qualcosa che non va? O questo eccesso ci fa intravedere una nuova fisica?

Gli accoppiamenti della particella con *fotoni* ad alta energia hanno stimolato molto interesse. Visto che il campo di Higgs conferisce la massa alle particelle elementari, esso deve interagire più intensamente con le particelle più pesanti. I *fotoni*, avendo massa a riposo nulla, sono prodotti dal *bosone* di Higgs attraverso un meccanismo che coinvolge altre particelle dotate di massa. Queste ulteriori particelle pesanti, richieste dalla simmetria e da altre teorie, potrebbero contribuire al processo, come sembra stia accadendo in base ai nuovi dati.

Se dovesse mantenersi questa tendenza, verrebbe suggerita con forza una nuova fisica, oltre quella descritta dal Modello Standard. La scoperta di questa particella (il *bosone* di Higgs) pone fine ad una lunga era della fisica delle particelle e segna l'inizio dello studio dei fenomeni nella scala delle energie di TeV. Molte domande potrebbero trovare una risposta nelle nuove ricerche su tale particella e sui suoi possibili partners. Tra le tante, ne poniamo alcune:

- *Ha un ruolo nel meccanismo dell'inflazione?*

- *Interagisce con particelle di materia oscura?*

Questa particella ci pone di fronte ad un ampio ventaglio di ulteriori esperimenti.

Altre fondamentali domande sono le seguenti:

- *Le sue proprietà sono esattamente quelle previste?*

- *Le apparenti discrepanze nei primi dati potrebbero essere fluttuazioni casuali che spariranno in breve tempo, o forse ci offrono i primi intriganti indizi di una fisica del tutto nuova?*

4. - Il dilemma delle dimensioni del protone

Due esperimenti hanno ottenuto valori significativamente diversi per il raggio del protone. Questa discrepanza ha animato la comunità scientifica, visto che le misurazioni hanno

confermato che il suo raggio è $0,8409 \text{ femtometri}^8$, più o meno $0,0004$. Questo è un dato dieci volte più accurato di qualsiasi misurazione precedente, ma ne differisce del 4%, che è un divario notevole.

Quattro anni dopo l'enigma del raggio del *protone*, i fisici hanno esaurito le spiegazioni semplici, come possibili errori di misurazioni o di calcolo. Adesso hanno ipotizzano altre possibilità più affascinanti e si sono posti alcune domande; ad esempio, come reagisce realmente il *protone* all'attrazione del *muone*? E' noto che la forza elettrostatica del *muone* deforma il *protone* in maniera analoga alla gravità della luna che genera maree sulla terra. Il *protone* deformato modifica lievemente l'orbitale $2s$ dell'idrogeno muonico. Generalmente si è portati a pensare che tale fenomeno sia ben compreso, ma il *protone* è un sistema così complesso che potrebbe sfuggirci qualcosa. La possibilità è che tali misurazioni possano dar luogo ad una nuova fisica che vada oltre il Modello Standard. Probabilmente l'universo contiene una particella non ancora individuata che in qualche modo fa sì che i *muoni* si comportino in maniera differente dagli *elettroni*.

Alcuni fisici, infatti, avendo preso in considerazione questa possibilità, non sono ancora riusciti a definire una nuova particella che non produca anche conseguenze osservabili in contrasto con i risultati degli esperimenti.

Un altro enigma da risolvere è perché il momento magnetico del *muone* non corrisponde ai calcoli del QED (elettrodinamica quantistica). Forse nuovi fenomeni spiegheranno la misurazione del raggio del *protone* e l'anomalo momento magnetico del *muone*. Per dare risposte a questi dubbi sono stati proposti nuovi esperimenti. Queste misurazioni daranno luogo a verifiche indipendenti e metteranno alla prova alcune delle spiegazioni proposte. Solo il tempo dirà se l'enigma del raggio si rivelerà un bizzarro errore o l'accesso verso una più profonda conoscenza dell'universo.

5. - Alcune considerazioni sul modello standard. La Super-simmetria

Il Modello Standard descrive particelle e forze combinando la *meccanica quantistica* e la *teoria della relatività ristretta*. Esso offre un'eccellente descrizione di quello che accade nel mondo subatomico.

Viene spontaneo, però, chiedersi: perché prevede solo quelle particelle e quei mediatori di forze?

E' necessario studiare la natura ad un livello più profondo per poter dare una adeguata risposta a questa domanda.

In questi ultimi anni molta attenzione è stata posta nei confronti della *super-simmetria*, che non è un modello in sé, ma uno schema per elaborare modelli dell'universo (Lincoln Don 2023)

La *super-simmetria* è una teoria complessa, formulata per definire i fenomeni della fisica delle particelle che rimangono inspiegati nell'ambito del Modello Standard, la cui particolarità è associare ad ogni *particella bosonica*, dotata di *spin intero*, una *particella fermionica* dotata di *spin semintero*, che rappresenta il suo super partner fermionico.

Allo stesso modo, ogni *fermione* ha un super partner bosonico. Tale teoria prevede l'esistenza di particelle che potrebbero costituire la materia oscura e consente di unificare tre delle forze fondamentali della natura, una volta raggiunte le energie più elevate, permettendo inoltre di risolvere anche il problema della gerarchia, che è inerente al

⁸ *femtometro* (simbolo: *fm*) è un'unità di misura di lunghezza utilizzata, nel Sistema Internazionale, per misure atomiche e subatomiche. E' un sottomultiplo del metro; si chiama (dal danese: *femten*, "quindici") ed è pari a 10^{-15} m.^[1] Sia il protone sia il neutrone hanno raggio pari a circa 1 fm .

notevole divario esistente fra l'intensità della *forza nucleare debole* e la *forza gravitazionale*, di 32 ordini di grandezza a favore della forza debole.

Non si è disposti a pensare a questo divario come ad un frutto del caso. Infatti, per i fisici che si occupano delle interazioni fondamentali, una stranezza del genere è indizio di una spiegazione ignota che si trova ad un livello molto più profondo di quello che si è riusciti a raggiungere.

Si è cercata la conferma di un impianto teorico del genere con l'uso di *acceleratori di particelle* sempre più potenti, ma nulla sembra confermare la teoria, almeno nella sua semplice forma originaria. Per il momento nulla si intravede oltre il Modello Standard, per il quale permangono alcuni problemi come quello della gerarchia. Questo ostacolo è agevolmente superato mediante la teoria della *super-simmetria*, che prevede, come già detto, l'esistenza di partner supersimmetrici, e si può comprendere considerando la teoria di Higgs (Tonelli Guido 2012)

Questa teoria ritiene *che tutto lo spazio sia pervaso (riempito) uniformemente dal campo di Higgs, il quale è disturbato dal <bollore> delle particelle virtuali che emergono e annichilano nel vuoto quantico.*

Questo fenomeno dovrebbe conferire al campo di Higgs una notevole energia ed avere come effetto l'incremento del bosone di Higgs. Ma il campo ha una energia relativamente bassa, incompatibile con questo fenomeno.

Una spiegazione è che i contributi di tutte le particelle si compensino a vicenda; in tal modo, il bosone di Higgs può avere un ragionevole valore, secondo un principio chiamato "*regolazione fine*". Proprio quello che succede alle particelle ed ai partners supersimmetrici.

Una delle richieste della *super-simmetria* è che i partners siano più massicci delle particelle note. Al fine di salvare il principio di regolazione fine, sono state apportate modifiche sempre più complesse, con partner sempre più pesanti.

Per dare una risposta più corretta alla teoria, la parola è passata all'LHC⁹ di Ginevra e solo il tempo potrà verificare se è necessario dar vita ad una nuova fisica.

Il Modello Standard non spiega diverse cose come la materia e l'energia oscura.

Il gruppo di ricerca LHC ha presentato prove di un decadimento del *mesone* β e la misurazione effettuata mostra una deviazione delle predizioni del Modello Standard. Queste deviazioni rispecchiano con esattezza i calcoli precedentemente fatti da un team di fisici formato da Joaquin Matias¹⁰ e Javier Virto¹¹ dell'Università Autonoma di Barcellona e Sebastian Descotes Genon¹² del Centro Nazionale della Ricerca Scientifica Francese, per i quali è possibile spiegare tale fenomeno introducendo un nuovo *bosone* ϕ , in ogni caso, qualcosa non prevista dal Modello Standard. Tale *bosone* potrebbe costituire la base per una nuova fisica.

Secondo il fisico Joaquin Matias, mentre il *bosone* di Higgs completa il puzzle del Modello Standard, questa scoperta potrebbe essere il primo tassello di un puzzle più grande.

6. - Quale futuro?

Se le super partner saranno scoperte nella prossima serie di esperimenti a LHC, sarà l'inizio di un'affascinante avventura intellettuale. In caso contrario ci troveremo di fronte alla rottura del paradigma del modello fondamentale della fisica quantistica.

Saremo quindi indotti ad un radicale ripensamento dei fenomeni alla base dell'universo. Certamente un ruolo fondamentale lo avrà il *bosone* di Higgs, che potrebbe interagire con

⁹ L'LHC (Large Hadron Collider; in italiano *Grande Collisore di Adroni*), è l'acceleratore di particelle più grande e potente finora realizzato. Può accelerare adroni fino al 99,9999991% della velocità della luce.

¹⁰ Joaquin Matias, Professore di Fisica all'Università Autònoma de Barcelona.

¹¹ Javier Virto, Professore di Fisica all'Universität Siegen - Germany.

¹² Sebastian Descotes Genon, Professore di Fisica al Laboratoire de Physique Théorique - Université Paris-Sud.

la materia oscura aprendo nuovi filoni di ricerca ed è probabile che per la fisica sarà necessario descrivere un altro modello in grado di spiegare quello che il Modello Standard non riesce a definire.

Bibliografia

[1] F. Casolaro - A. Trotta, "*I neutrini*" - Journal of Science & Philosophy Divulcation - Fascicolo 1 (2014) pag. 238-241.

[2] F. Casolaro (con R. Pisano): "*An Historical Inquiry on Geometry in Relativity: Reflections on Early Relationship Geometry-Physics (Part One)*" - History Research - Vol. 1, Number 1, December 2011 - pag. 47-60.

[3] F. Casolaro (con R. Pisano): "*An Historical Inquiry on Geometry in Relativity: Reflections on Early Relationship Geometry-Physics (Part two)*" - History Research - Vol. 2, Number 1, January 2012 - pag. 57-65.

[4] Jayawardhana Ray – "*Cacciatori di Neutrini*" - Le Scienze, edizione italiana di Scientific American. Supplemento al N. 550 di Giugno 2014.

[5] Bernanuer Jan - Pohl Randolf, "*Il dilemma del protone*" - Le Scienze, edizione italiana di Scientific American. Aprile 2014, N.548.

[6] Lincoln Don – "*L'universo è un luogo complesso ed intricato*" - Le scienze, edizione italiana di Scientific American. Gennaio 2013, N. 533.

[7] Tonelli Guido, Wu San Lau, Riordan Michael – "*Il bosone di Higgs, finalmente*". Le Scienze, edizione italiana di Scientific American. Ottobre 2012, N. 530.

[8] Quigg Chriss – "*L'imminente rivoluzione della fisica delle particelle*". Le Scienze, edizione italiana di Scientific American. Aprile 2008, N.476.

[9] Collins Graham – "*Dossier, La macchina delle scoperte*". Le Scienze, edizione italiana di Scientific American. Aprile 2008, N. 476.

[10] Kane Gordon – "*Il mistero della massa*" - Le Scienze, edizione italiana di Scientific American. Ottobre 2005, N. 446.

[11] Kane Gordon - "*La fisica, oltre il modello standard*". Le scienze, edizione italiana di Scientific American. Luglio 2003, N. 419.