



# La particella che dà la massa

di Roberto Petronzio

Spesso il nome di Lhc (*Large Hadron Collider*), il nuovo acceleratore di particelle che muove i suoi primi passi, ancora un po' incerti, è stato associato al *bosone di Higgs*, alla ricerca di una particella che riveste un ruolo così importante nel *Modello Standard* delle particelle elementari – la teoria che descrive oggi nel modo più completo le particelle elementari e le loro interazioni – da meritare il soprannome di “particella di Dio”. Il soprannome è esagerato, anche perché non siamo certi che si tratti di una particella elementare, seppur giochi come tale il ruolo di pietra angolare del Modello Standard.

Il bosone di Higgs è figlio del meccanismo omonimo e del più generale fenomeno chiamato *rottura spontanea della simmetria*. La simmetria in questione è quella che regola le interazioni elettromagnetiche e deboli, queste ultime responsabili della radioattività dei nuclei instabili e, tra l'altro, della longevità della nostra stella domestica, il Sole.

L'esistenza di simmetrie in natura semplifica enormemente la soluzione delle equazioni che ne descrivono le leggi: ad esempio, se ci troviamo in presenza di forze che sono simmetriche per rotazioni, ossia sono prive di un asse privilegiato, sarà sufficiente risolvere il problema per una direzione arbitraria nello spazio e generalizzare il risultato alle altre direzioni.

In natura esistono molti casi di simmetrie rotte spontaneamente: se si risale un pendio con gli sci ai piedi, agganciati a uno skilift, gli sci si muovono su una superficie di neve ondulata, tanto più scavata quanto più remota è l'ultima nevicata. Al contrario, se si è tanto fortunati da essere i primi sciatori dopo un'abbondante nevicata, si può scivolare su una superficie uniforme. Questa ultima garantisce una simmetria che rende equivalenti i punti sul pendio, la simmetria per traslazioni sul pendio, che appare invece violata dalle onde generate dalle folle di sciatori, che distinguono con valli e creste i punti del pendio: è un esempio di come una proprietà di simmetria possa essere rotta in modo casuale. Se si ripetesse però più volte l'esperimento di partire dallo stesso pendio uniforme con diverse schiere di sciatori, si formerebbero ovviamente avvallamenti, ma non negli stessi punti: la simmetria si manifesta nel fatto che la rottura si può realizzare in moltissimi modi equivalenti e indistinguibili, collegati tra di loro appunto dall'originale *invarianza* per traslazioni. La rottura spontanea di una simmetria non è una vera rottura ma solo una diversa realizzazione della simmetria stessa: la simmetria si manifesta nella equivalenza delle opzioni di rottura.

Il *meccanismo di Higgs* descrive ciò che accade quando viene spontaneamente rotta una simmetria che governa interazioni mediate da campi detti di *gauge*, come quelle elettromagnetiche e deboli. La parola *gauge*, calibro, indica che in qualche modo tali simmetrie consentono di calibrare da un punto all'altro dello *spaziotempo* la funzione che descrive le particelle elementari, in modo arbitrario. Tutte le interazioni fondamentali di cui si ha evidenza in natura sono legate a *simmetrie di gauge*. Tali simmetrie adottano dei mediatori per trasmettere le interazioni: *fotoni* del campo elettromagnetico che fanno interagire gli elettroni, *gluoni* del campo delle interazioni forti che fanno interagire i quark



a.

all'interno dei nuclei atomici, *deboloni* (coniato ora per indicare i campi delle interazioni deboli...) che fanno interagire i neutrini e, infine, *gravitoni* che fanno interagire tutto ciò che possiede energia sotto qualche forma. Nella teoria di gauge tali mediatori sono a massa nulla e questo garantisce interazioni *a lungo raggio*, quali quelle elettromagnetiche o gravitazionali delle quali è pervaso tutto l'Universo. L'evidenza sperimentale, tuttavia, ha introdotto un'eccezione a questa regola, in quanto le interazioni deboli sono mediate da particelle pesanti che sono caratterizzate da una massa con valore diverso da zero (vd. fig. a).

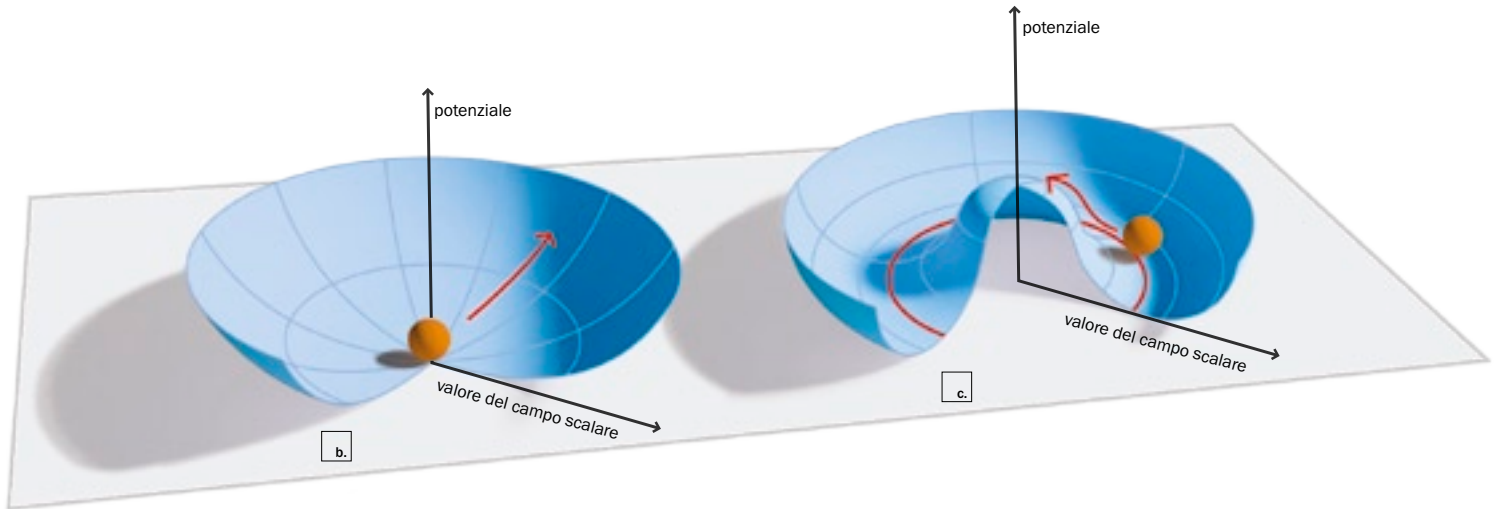
Per poter riconciliare una teoria di gauge con mediatori massicci come quelli delle interazioni deboli è necessario ipotizzare un fenomeno di rottura spontanea della simmetria e associarlo a una teoria che descriva una nuova interazione con particelle elementari, finora mai osservate.

Le particelle elementari coinvolte nelle interazioni fondamentali sono descritte in fisica quantistica da equazioni che regolano la distribuzione di insiemi di numeri (detti *campi*) nello spaziotempo, lo spazio relativistico a quattro dimensioni, che descrive fenomeni che si verificano in una certa posizione spaziale e in un certo istante. Dalle fluttuazioni di tali campi sono generati i moti delle particelle associate a un tipo di campo specifico. Un esempio quotidiano è dato dai fotoni, i quanti di luce associati al campo elettromagnetico, ossia l'insieme di quattro numeri definiti in ogni punto dello spaziotempo. Alla resistenza che il campo trova a fluttuare intorno al suo stato di minima energia è collegata la massa della particella associata al campo.

La più semplice teoria di campo, che mostra rottura spontanea di simmetria è quella che vede protagonista un campo definito da un insieme di coppie di numeri associate a ogni punto dello spaziotempo. Se rappresentiamo questo campo, che chiameremo *scalare complesso*, in uno spazio bidimensionale i cui assi rappresentano la coppia di numeri reali che lo definiscono, una rotazione in tale piano non modifica le equazioni del campo. Ci si aspetta che anche il campo che realizza lo stato di minima energia, detto il *vuoto*, sia invariante per la rotazione. Questo, però, dipende dall'andamento dell'energia per un campo costante, detta anche il *potenziale*, con le sue valli e le sue colline. Normalmente il potenziale, l'energia del campo, ha un minimo per valori nulli del campo. In altre parole, lo stato di minima energia (il vuoto) è quello "senza particelle", ossia a campo nullo. È questo il caso di potenziale con aspetto a scodella, con il minimo di energia del campo nel punto più basso e curvatura identica nelle varie direzioni. In questo caso, un semplice esempio di rottura della simmetria è ottenuto passando dalla forma a scodella a una forma del potenziale a fondo di bottiglia o a sombrero. Se la forma a scodella gode di una perfetta simmetria per rotazioni attorno al suo asse, lo stesso si può dire della forma a sombrero, quindi la simmetria è conservata nel passaggio dall'una all'altra configurazione. La seconda però presenta la rottura spontanea: una pallina posta sul fondo

a.

Simulazione del decadimento del bosone pesante Z, mediatore delle interazioni deboli, nell'esperimento Cms (*Compact Muon Solenoid*) dell'acceleratore Lhc al Cern. Il bosone Z, che sarà prodotto nella collisione tra fasci di protoni in Lhc, è instabile e decade producendo particelle più leggere. Nella ricerca del bosone di Higgs è fondamentale ricostruire accuratamente tutta l'energia depositata da questi decadimenti nel rivelatore e risalire dalla massa delle particelle prodotte alle caratteristiche delle particelle instabili che le hanno generate.



scivolerebbe da una parte, invece di posizionarsi nell'avvallamento centrale come farebbe nel caso della scodella. Se fatta oscillare, poi, in un caso oscillerebbe intorno al punto di equilibrio nello stesso modo, indipendentemente dalla direzione della spinta iniziale perché la curvatura della scodella è uguale in tutte le direzioni; nel secondo caso, invece, oscillerebbe attorno all'equilibrio se spinta in direzione della salita, ma non oscillerebbe affatto se spinta in direzione dell'avvallamento, perché esistono un'infinità di minimi equivalenti lungo il fondo circolare, tutti collegati dalla simmetria per rotazioni.

Nel caso della forma a sombrero, quindi, il minimo del campo si realizza sul fondo del recipiente dove il valore del campo è diverso da zero. Il vuoto, in questo caso, è riempito dal *rumore di fondo* del campo al suo minimo e la rottura di simmetria porta alla comparsa di due particelle di massa diversa, una per ognuna delle due possibilità di oscillazione attorno al minimo del potenziale.

Per le oscillazioni in direzione della salita, a frequenza diversa da zero, la particella del campo ha massa diversa da zero; per le oscillazioni a frequenza nulla, al contrario, lungo la valle dei minimi, la particella associata al campo è una particella a massa nulla, il *bosone di Goldstone*, dal nome del fisico inglese che per primo ha evidenziato questo fenomeno: è proprio l'apparizione di questa particella senza massa la firma della rottura spontanea della simmetria.

Una rottura di simmetria collegata a un campo scalare assicura che sia preservata l'invarianza che regge le leggi della relatività ristretta. Questa richiede, tra l'altro, che continui a valere l'invarianza per rotazioni: se il valore non nullo nel vuoto fosse ad esempio di un campo elettrico, la sua direzione definirebbe un asse privilegiato nell'Universo, dovuta al vuoto, che violerebbe l'invarianza per rotazioni.

Il fenomeno di Higgs è l'evoluzione del fenomeno di rottura spontanea della simmetria in presenza di un campo di gauge, come il campo elettromagnetico. E il bosone di Higgs nasce proprio dall'applicazione della rottura spontanea di simmetria all'invarianza di gauge che governa le interazioni dei campi.

Come detto annunciando il mistero delle interazioni deboli, i mediatori di gauge, come i fotoni del campo elettromagnetico, sono di norma a massa nulla a garanzia della simmetria di cui godono. Nel caso di rottura spontanea della simmetria però, la propagazione del campo di gauge nel vuoto "riempito" dal campo scalare di fondo genera una massa dovuta all'interazione con questo. In un esempio assai divulgativo, chiunque di noi ha sperimentato almeno una volta la forte sensazione di appesantimento che si prova nel correre sulla sabbia piuttosto che su un terreno duro ed elastico. Allo stesso modo, la massa del campo di gauge è dovuta a una proprietà del vuoto anomalo del campo scalare: il valore di vuoto non nullo del campo scalare rende massiccio il campo

**b.**  
Il potenziale a scodella gode di una perfetta simmetria per rotazioni attorno al suo asse. Inoltre, una pallina oscilla intorno al punto di equilibrio nello stesso modo indipendentemente dalla direzione della spinta iniziale. Le oscillazioni attorno al minimo di potenziale corrispondono sempre a una particella con una certa massa perché hanno frequenza non nulla.

**c.**  
Anche la forma a sombrero gode di una perfetta simmetria per rotazioni, ma presenta una rottura spontanea che porta alla comparsa di due particelle di massa diversa: quella dotata di massa corrisponde alle oscillazioni in direzione della salita, a frequenza non nulla; la particella priva di massa (il bosone di Goldstone) corrisponde invece alle oscillazioni a frequenza nulla lungo il fondo circolare, luogo di infiniti minimi equivalenti collegati da simmetria per rotazioni.



d.	g.
e.	h.
f.	

Il comportamento di un gruppo di fisici durante un evento sociale affollato: l'analogia del meccanismo di Higgs, proposta da David J. Miller dell'University College di Londra. I fisici rappresentano il mezzo che permea lo spazio. È l'eccitazione stessa del mezzo – quindi del gruppo di fisici – a formare un corpo con una massa consistente, un meccanismo analogo alla formazione del bosone di Higgs.

**d.**  
Il vuoto di Higgs.

**e.**  
Einstein fa ingresso nella sala dove si sta tenendo un incontro tra fisici. Attraendo ammiratori, il suo passaggio crea nella stanza una perturbazione che aumenta progressivamente di intensità.

**f.**  
Questo aumenta la sua inerzia al moto: Einstein sembra acquistare massa, come una particella che si muove nel campo di Higgs.

**g.**  
Allo stesso modo, una notizia che attraversa la stanza...

**h.**  
... crea a sua volta lo stesso tipo di addensamento tra gli scienziati. Ecco la condensazione del bosone di Higgs.

elettromagnetico senza romperne le proprietà di simmetria. Questo fenomeno, detto di Higgs, riconcilia invarianza di gauge e mediatori di gauge dotati di massa, al prezzo di una nuova interazione nascosta con il campo scalare. La particella scalare a massa nulla dovuta alla rottura spontanea di simmetria, il bosone di Goldstone, viene tramutata in una nuova componente fisica del campo elettromagnetico, sotto la forma di polarizzazione longitudinale, ossia lungo la direzione del moto, del campo elettromagnetico. La particella a massa non nulla, corrispondente a fluttuazioni del campo fuori dalla valle dei minimi, resta quale testimone dell'esistenza di particelle scalari all'origine del meccanismo di Higgs: è il bosone di Higgs, la sola particella scalare in grado di confermare l'esistenza di un nuovo tipo di interazioni fondamentali, quelle delle particelle scalari.

La natura spesso utilizza gli stessi principi in contesti diversi. Una delle proprietà più sorprendenti della materia condensata è la *superconduttività*, grazie alla quale correnti elettriche circolano in un superconduttore senza incontrare alcuna resistenza. Un materiale superconduttore, inoltre, "espelle" il campo magnetico che può penetrarne solo alcuni strati sottili in prossimità della superficie. Questo contraddice il comportamento usuale del campo elettromagnetico che si propaga nello spazio senza attenuarsi e che ha un'influenza a lungo raggio, come conseguenza della massa nulla dei suoi mediatori, i fotoni. È come se nel mezzo speciale costituito dal superconduttore il campo acquistasse una massa e questo valore non nullo definisse una distanza tipica entro quale il campo può far sentire i suoi effetti. È il meccanismo di Higgs all'opera e la massa al campo elettromagnetico è fornita, come nell'esempio descritto precedentemente, dall'interazione con un campo scalare di vuoto. In realtà nel superconduttore non ci sono campi scalari, ma solo gli elettroni e i nuclei degli atomi. Seguendo l'interpretazione della *teoria BCS*, dal nome dei suoi ideatori, Bardeen, Cooper e Schiffer che grazie a essa hanno ottenuto il premio Nobel, il campo scalare si ottiene accoppiando due a due gli elettroni per formare stati legati di *spin intero*, ossia

*bosoni* (gli elettroni singoli, invece, sono *fermioni* caratterizzati da spin pari a  $\frac{1}{2}$ ), le cui interazioni possono essere descritte tramite campi scalari. Si tratta quindi di un campo scalare "efficace", ossia di una descrizione del fenomeno tramite un modello: un campo scalare con la rottura della simmetria che ne catturi il meccanismo di base. Se ne deducono due lezioni: la prima è che il fenomeno di Higgs è davvero utilizzato dalla natura almeno nel caso più semplice dell'interazione con un campo elettromagnetico; la seconda è che il campo di Higgs non è in questo caso un campo fondamentale, una nuova particella elementare, ma semplicemente un modo per descrivere il comportamento delle coppie di elettroni che lo compongono. Come vedremo descrivendo il Modello Standard e le sue questioni aperte, quella della elementarietà del campo di Higgs è una delle principali. Oltre a conciliare l'invarianza di gauge con l'esistenza di mediatori di gauge dotati di massa non nulla, il meccanismo di Higgs assolve a un'altra funzione essenziale per ottenere una descrizione dello spettro delle particelle conosciute, quella di fornire il meccanismo attraverso il quale le particelle acquisiscono una massa. Di nuovo, è la propagazione delle particelle nel vuoto non banale generato dal potenziale di Higgs che fornisce a esse una massa proporzionale alle forze con cui le particelle scalari interagiscono con ciascuna delle particelle note. La massa delle particelle elementari che costituiscono la materia fondamentale ha quindi origine da nuove interazioni fondamentali, dette di *Yukawa*.

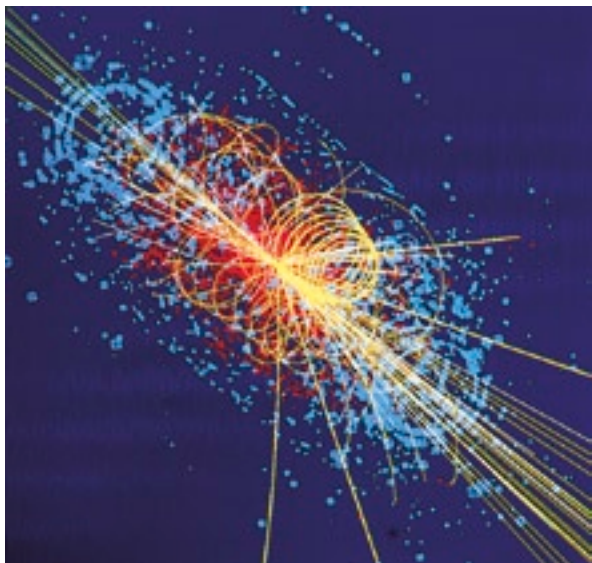
Le particelle scalari, quindi, generano una massa per il bosone di Higgs attraverso la forza di auto-interazione, una massa per i campi di gauge attraverso le forze delle interazioni di gauge con le particelle scalari e, infine, una massa per tutte le particelle di materia attraverso delle forze "su misura" per ogni particella, le interazioni di Yukawa, che danno a ciascuna il suo *sapore*, la sua massa. In natura abbiamo trovato tre famiglie di particelle, ciascuna contenente un modulo standard di particelle, tutte di sapore affine, ossia di masse simili. Le interazioni di Yukawa possono anche coinvolgere particelle appartenenti a famiglie diverse, rendendo possibile il mescolamento tra particelle

di famiglie distinte, tramite interazioni deboli: un fenomeno legato a parametri detti *angoli di mescolamento*. A questi angoli è affidata, tra l'altro, la spiegazione della lievissima asimmetria tra materia e antimateria nell'evoluzione dell'Universo, che ha consentito a quel residuo di materia in eccesso di sopravvivere all'annichilazione con la corrispondente antimateria, permettendo al nostro mondo di esistere.

Il bosone di Higgs non è stato trovato alle energie finora esplorate. La sua massa dipende dalle forze, che chiamerò *scalari*, con cui auto-interagiscono le particelle scalari, che rappresentano una vera e propria nuova interazione oltre alle quattro fondamentali ampiamente soggette a studi e verifiche sperimentali. Trattandosi di una particella di massa troppo elevata per essere stata prodotta negli esperimenti conclusi o in fase di conclusione fino a oggi, essa ha potuto tuttavia influenzare le proprietà di interazione delle particelle attraverso le *correzioni radiative*, o fluttuazioni quantistiche, della sua massa. Lo studio di queste correzioni è stato sviluppato con estrema precisione nell'ultima decade del secolo scorso presso l'acceleratore a elettroni e positroni *Lep* di Ginevra e ha portato a dare indicazioni sulla presenza del bosone di Higgs, restringendo il campo dei valori possibili per la sua massa in una zona di prossima esplorazione.

Come già detto, senza l'osservazione del bosone di Higgs la nostra comprensione del mondo delle particelle elementari rimane monca di uno dei suoi tasselli cruciali, l'unico a dipendere dalle forze scalari.

Il nuovo millennio si affaccia con l'entrata in funzione di Lhc, il più importante acceleratore mai costruito prima, che grazie alle energie raggiunte dovrebbe produrre il bosone di Higgs permettendo così di chiarirne le proprietà e, soprattutto, l'elementarietà. Il nuovo acceleratore si presenta come il più promettente tra quelli costruiti finora. Segna anche l'ingresso in un'epoca di strategie globali che la fisica sta intraprendendo per far fronte a investimenti economici e di persone sempre più ingenti. Al nuovo acceleratore operante al Cern di Ginevra lavoreranno non solo le comunità degli stati membri europei, ma le comunità degli Stati Uniti,



i.

della Federazione Russa, del Giappone, dell'India, di Israele, della Cina, della Corea, in una impresa di conoscenza mai tentata prima e unificata dal linguaggio scientifico.

Se gli impegni economici sono rilevanti, lo sono anche le ricadute tecnologiche nel settore dello sviluppo degli acceleratori e dell'informatica. Di notevole rilievo sono inoltre lo sviluppo del *middleware*, il codice di programmazione che realizza sempre nuovi protocolli di comunicazione e di condivisione di database e di risorse di calcolo, e delle tecnologie legate alla superconduttività o all'elettronica veloce.

Se l'osservazione del bosone di Higgs rappresenta il coronamento dell'attuale quadro interpretativo delle particelle elementari, la sua presenza suscita interrogativi che trovano risposte solo in un'estensione del Modello Standard che comprenda nuovi fenomeni. Il prossimo decennio potrebbe mutare la nostra comprensione delle particelle elementari o semplicemente confermare con la sola scoperta del bosone di Higgs l'attuale architettura del Modello Standard. Alcune indicazioni, spesso basate su criteri di consistenza a energie quasi impensabili, propendono per la prima ipotesi. Da queste potrebbero discendere la supersimmetria o la dissoluzione del bosone di Higgs in una sottostruttura fatta di costituenti più elementari, legati da nuove interazioni. Persino nuove dimensioni dello spazio tempo potrebbero diventare visibili alla risoluzione del gigantesco microscopio rappresentato da Lhc, aprendo la via a una rivoluzione che potrebbe relegare il concetto di particella al passato, abbandonando l'identificazione di elementare con puntiforme in favore di stringhe dalle cui vibrazioni sarebbero generate tutte le teorie di campo, compresa quella scalare da cui nasce il bosone di Higgs.

i.

Simulazione al computer del decadimento del bosone di Higgs in quattro muoni, dei quali sono ben visibili le tracce, in giallo. La rivelazione del decadimento è simulata in questa immagine all'interno del rivelatore Cms, uno dei quattro grandi esperimenti pronti a registrare gli urti tra protoni che avverranno in Lhc.

### Biografia

**Roberto Petronzio** è professore di Fisica Teorica presso l'Università di Roma Tor Vergata e Presidente dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare dal 2004. Alcuni dei suoi contributi originali nello studio delle

forze di legame dei quark, delle interazioni deboli e della meccanica statistica sono alla base delle analisi dei dati sperimentali, applicabili agli acceleratori di particelle attuali e di prossima generazione.

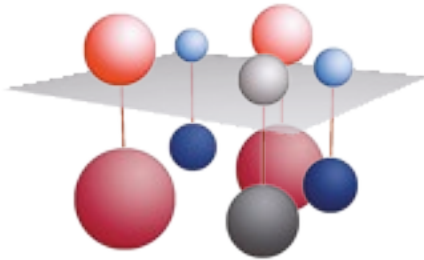
### Link sul web

<http://public.web.cern.ch/public/en/Science/Higgs-en.html>

<http://ulisse.sissa.it/chiediAulisse/domanda/2002/Ucau020510d001>

<http://www.symmetrymagazine.org/cms/?pid=1000569>

# Naturalità e supersimmetria



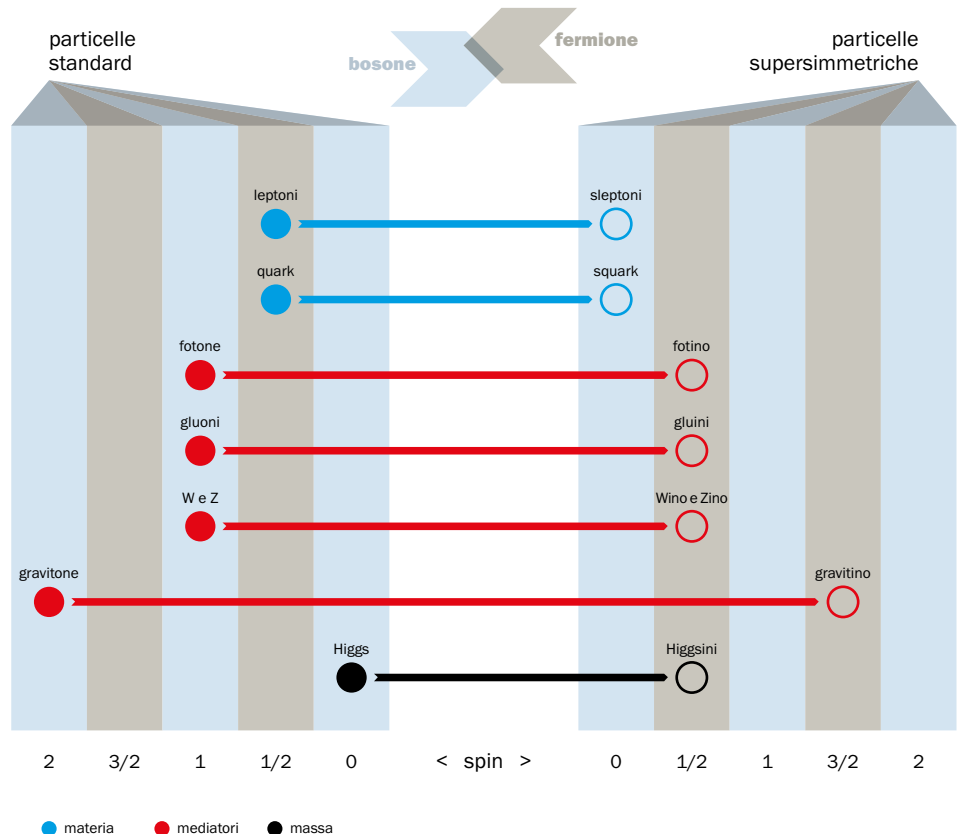
1.

Dal punto di vista teorico, un ulteriore elemento che rende in qualche modo diverso il bosone di Higgs è l'influenza delle correzioni dovute alle fluttuazioni quantistiche sulla sua massa: a differenza di quanto accade per le particelle ordinarie di materia, infatti, come gli elettroni o i quark, tali correzioni rischiano di essere per la particella di Higgs assai più grandi dei valori che esse stesse dovrebbero correggere. Il problema delle correzioni fuori controllo viene detto della *naturalità* o della *gerarchia* e rappresenta uno scenario assai innaturale. Per addomesticare le correzioni è necessario individuare dei meccanismi di cancellazione potenti che proteggano il bosone di Higgs dalle sue fluttuazioni quantistiche. L'unico meccanismo efficace si basa su una simmetria non ancora riscontrata in natura: la *supersimmetria*. Questa prevede l'esistenza di un compagno per ogni particella nota, assicurando così la cancellazione delle correzioni quantistiche più pericolose: la presenza di questi "angeli custodi" supersimmetrici realizzerebbe le cancellazioni in modo naturale, grazie a un principio di simmetria. La supersimmetria è rotta in natura, poiché i partner

supersimmetrici non hanno la stessa massa dei loro compagni. La rottura di simmetria legata al campo di Higgs dovrebbe nascere proprio come conseguenza della rottura della supersimmetria, quindi alla stessa scala di energia: la scala di energia del bosone di Higgs sarebbe così legata a quella della massa dei partner supersimmetrici e le correzioni quantistiche a energie superiori sarebbero perfettamente schermate. Se ci fosse la supersimmetria, una pletora di nuove particelle dovrebbe popolare la sperimentazione al nuovo acceleratore Lhc, tutti i partner supersimmetrici delle particelle che già conosciamo. Tra essi, il più leggero sarebbe stabile se protetto da una particolare simmetria, la *R parità*, che sancisce che una particella partner debba necessariamente transire in un altro partner quando decade. Questo ne farebbe un candidato ideale per impersonare quella *materia oscura* che le osservazioni cosmologiche hanno evidenziato non essere composta dalle particelle che conosciamo. La richiesta di naturalità del bosone di Higgs può dunque implicare nuove interazioni, una nuova simmetria e una possibile spiegazione per la materia oscura.

1. Le teorie supersimmetriche prevedono che ogni particella nota abbia una corrispondente particella "speculare": ad esempio, per ogni quark ci dovrebbe essere un corrispondente "squark", all'elettrone si affiancherebbe il "seletttrone" e così via. Una delle particelle costituite da "mattoni supersimmetrici", il neutralino di minor massa, potrebbe essere quella che compone la materia oscura, la cui natura è tuttora ignota (vd. *Asimmetrie* n. 4).

2. Uno "specchio" supersimmetrico: per ogni particella ordinaria esisterebbe una particella con spin che differisce di  $\pm 1/2$ . Ai *fermioni* ordinari, con spin semi-intero (pari cioè ad  $1/2, 3/2, \dots$ ) corrispondono quindi bosoni supersimmetrici con spin intero (pari cioè ad  $0, 1, 2, \dots$ ), mentre ai bosoni ordinari corrispondono fermioni supersimmetrici. Nello schema sono rappresentati, a sinistra, i costituenti della materia ordinaria (quark e *leptoni*), i mediatori delle interazioni forti (gluoni), elettromagnetiche (fotoni), deboli (W e Z) e gravitazionali (gravitoni) e la particella di Higgs, responsabile della massa di tutte le particelle. A destra, sono raffigurati i corrispondenti partner supersimmetrici: queste particelle non sono ancora state osservate sperimentalmente e si ritiene abbiano massa più elevata rispetto alle particelle standard.



2.