Il meccanismo di Higgs

Giovanni Organtini
Sapienza Università di Roma & INFN-Sez. di Roma

Il contenuto di questo post è adattato dal corrispondente Capitolo degli appunti di Fisica Sperimentale dell'autore. Il post è destinato agli insegnanti di fisica delle scuole secondarie superiori, pertanto il livello è insolitamente elevato rispetto a quello della maggior parte degli articoli che compaiono sulla rivista Asimmetrie dell'INFN.

La scoperta del bosone di Higgs avvenuta nel 2012 a opera degli esperimenti ATLAS [1] e CMS [2] all'acceleratore LHC del CERN rappresenta una delle imprese scientifiche piú ardite che l'uomo abbia mai realizzato. Per renderla possibile sono infatti state impiegate tecniche al limite della tecnologia.

Dopo la scoperta, che ha avuto grande enfasi su tutti i media, è risultato abbastanza noto a tutti che il bosone di Higgs è la particella responsabile del fatto che tutte le altre particelle possiedono una massa. Tuttavia, essendo abituati a pensare alla massa come a una proprietà intrinseca della materia, risulta difficile immaginare perché ci sia bisogno di un meccanismo per dare massa alle particelle e come sia possibile che questa proprietà emerga dall'interazione con un'altra particella.

In questo post descriviamo quello che si chiama il *meccanismo di Higgs*, che Peter Higgs teorizzò nel 1964 per spiegare un complesso problema di fisica fondamentale che ha a che fare con l'osservazione sperimentale della rottura di alcune simmetrie dell'Universo. La spiegazione originale di Higgs serviva di fatto a spiegare la differenza di massa tra i fotoni, responsabili dell'interazione elettromagnetica, e i bosoni vettori intermedi Z e W, responsabili dell'interazione debole, attraverso l'introduzione di una nuova particella, successivamente battezzata **bosone di Higgs**. È quindi possibile estendere in modo abbastanza naturale le interazioni di questa particella per fare in modo che possa dare la massa anche alle particelle di materia (quark e leptoni)[1].

La spiegazione di Higgs richiede l'introduzione della teoria quantistica dei campi, che va molto al di là degli scopi di questa pubblicazione, ma si può riformulare [3] in termini di fisica classica rovesciando il problema: spiegando cioè prima l'acquisizione della massa da parte delle particelle di materia e poi la differenza di massa tra i fotoni e i bosoni vettori intermedi (Z e W).

1 Richiami sul concetto di energia

Il concetto di energia è uno dei piú ostici per gli studenti, nonostante il fatto che, tutto sommato, il calcolo dell'energia di un corpo in una determinata condizione sia relativamente semplice. In questo contesto c'interessa osservare come, a dispetto delle apparenze, il calcolo dell'energia di un corpo in condizioni molto diverse, sia sempre esprimibile nella stessa maniera. Nel seguito consideriamo sempre corpi che, nel sistema di riferimento scelto, sono in quiete, per cui la loro energia cinetica è nulla.

Consideriamo inizialmente un corpo di massa m in un campo gravitazionale $\mathbf{G}$. L'energia assunta dal corpo in virtú dell'interazione con il campo è esprimibile come

$$U_G = m\mathcal{G}\,, \tag{1}$$

dove $\mathcal{G}$ è il cosiddetto *potenziale gravitazionale*. Vale la pena ricordare che il potenziale di un campo è una funzione scalare del campo stesso e delle coordinate. Nello specifico, scegliendo un punto a distanza infinita come riferimento, abbiamo che

$$\mathcal{G} = \int_{\infty}^{r} \mathbf{G} \cdot d\mathbf{r}\,. \tag{2}$$

Nell'equazione (2), $\mathbf{r}$ rappresenta il vettore che individua la posizione del corpo nel sistema di riferimento scelto. Nel caso semplice in cui il campo gravitazionale sia prodotto da un corpo di massa M possiamo dunque scrivere che

[1] Va detto che non tutta la massa degli adroni è dovuta all'interazione dei quark col campo di Higgs. Protoni e neutroni avrebbero comunque una massa, anche se il campo di Higgs non esistesse. Non è cosí, invece, per i leptoni.

$$U_G = GM\int_{\infty}^{r} \frac{\mathbf{r}\cdot d\mathbf{r}}{r^3}\,, \tag{3}$$

dove G è la costante di Newton. Data l'arbitrarietà con la quale si può scegliere il punto nel quale $U_G = 0$, l'energia del corpo è definita a meno di una costante che, proprio per quanto sopra, possiamo sempre scegliere essere uguale a zero (questa scelta è d'ora in poi considerata implicita).

Consideriamo ora un corpo con carica elettrica q immerso in un campo elettrostatico $\mathbf{E}$. Anche per il campo elettrostatico possiamo definire un potenziale $\mathcal{E}$[2] in maniera del tutto analoga a quanto fatto per il campo gravitazionale e in definitiva scrivere che

$$U_E = q\mathcal{E}\,. \tag{4}$$

Il potenziale $\mathcal{E}$ è ancora una volta una funzione scalare del campo e delle coordinate, la cui forma è identica a quella dell'equazione (2), avendo cura di sostituire $\mathbf{E}$ a $\mathbf{G}$.

Nel caso di una spira di area S, percorsa da corrente I e immersa in un campo magnetico $\mathbf{B}$, l'energia assunta dalla spira vale

$$U_B = -IS\hat{\mathbf{z}}\cdot\mathbf{B} \tag{5}$$

dove $\hat{\mathbf{z}}$ è un versore orientato in modo da essere perpendicolare al piano su cui giace la spira. Solitamente la quantità $\mathbf{m} = IS\hat{\mathbf{z}}$ è chiamata *momento magnetico* della spira $\boldsymbol{\mu}$, per cui si scrive che $U_B = -\boldsymbol{\mu}\cdot\mathbf{B}$. È ben noto che, nel caso del campo magnetico, non è possibile scrivere un potenziale scalare, ma abusando leggermente del vocabolario possiamo ridefinire il termine *potenziale* come un'opportuna funziona scalare dei campi e delle coordinate, tale per cui possiamo scrivere che

$$U_B = I\mathcal{B}\,. \tag{6}$$

Dal confronto delle ultime due equazioni si deduce immediatamente che il *potenziale* (cosí come da noi ridefinito) $\mathcal{B}$ del campo magnetico vale

$$\mathcal{B} = -S\hat{\mathbf{z}}\cdot\mathbf{B}\,. \tag{7}$$

Sarebbe forse piú opportuno definire un termine *ad hoc* per questa funzione, invece di usare il termine *potenziale*, ma per semplicità continuiamo a impiegare questo nome, scritto in caratteri diversi. In definitiva si può osservare come l'energia di un corpo immerso in un campo si possa scrivere sempre nella stessa forma, per tutti i campi noti a uno studente di liceo:

$$U = U_G + U_E + U_B = m\mathcal{G} + q\mathcal{E} + I\mathcal{B}\,. \tag{8}$$

Vale la pena osservare che la sorgente del campo gravitazionale è la massa, quella del campo elettrostatico la carica elettrica e quella del campo magnetico la corrente. Tutti i termini di questa somma hanno la stessa forma: una costante di accoppiamento che dipende dalla natura del campo con il quale la particella in esame interagisce (m, q o I) moltiplicata per il *potenziale* del campo di cui la particella stessa è sorgente ($\mathcal{G}$, $\mathcal{E}$ o $\mathcal{B}$).

2 Campi autointeragenti

Quanto sopra tiene conto dell'energia posseduta dai corpi immersi nei campi. È però noto anche a studenti di liceo che i campi elettrici e magnetici trasportano energia. Basta considerare un condensatore carico per rendersi conto che l'energia in esso contenuta non può che essere trasportata dal campo elettrico tra le armature; analizzando un circuito RLC, invece, si vede subito che il campo magnetico nell'induttanza deve poter trasportare una certa quantità di energia.

Nel caso classico l'energia del campo è distribuita all'interno di un volume (quello tra le armature del condensatore o all'interno della bobina negli esempi sopra riportati) e si parla dunque di densità di energia dei campi. Per i campi elettrici e magnetici nel vuoto le densità di energia u_E^a e u_B^a si calcolano rispettivamente come

$$u_E^a = \frac{\epsilon_0}{2}\mathbf{E}\cdot\mathbf{E} \tag{9}$$

e

[2] Di solito il potenziale elettrostatico si indica col simbolo V o ΔV, ma in questo caso preferiamo adoperare il simbolo $\mathcal{E}$ per rendere evidente il tipo di campo a cui si riferisce e per evitare di confondere il potenziale con il volume, che indichiamo, invece, con V.

$$u_B^a = \frac{1}{2\mu_0}\mathbf{B}\cdot\mathbf{B}\,. \tag{10}$$

Nelle equazioni sopra riportate l'indice a sta a indicare il fatto che questi contributi all'energia derivano dall'*autointerazione* dei campi in questione con sé stessi. Questo spiega perché un tale termine non sia presente per il campo gravitazionale, che non interagisce con sé stesso (possiamo comunque pensare che la sua densità di energia sia $u_G^a = \frac{\gamma}{2}\mathbf{G}\cdot\mathbf{G}$ con $\gamma = 0$). In un volume V in cui siano presenti sia campi elettrici che magnetici, l'energia contenuta dovuta alla presenza di questi campi è quindi

$$U_E^a + U_B^a = V\left(\frac{\epsilon_0}{2}\mathbf{E}\cdot\mathbf{E} + \frac{1}{2\mu_0}\mathbf{B}\cdot\mathbf{B}\right)\,. \tag{11}$$

3 Sul significato dell'energia

Considerato quanto sopra, l'energia contenuta in un volume V di Universo, nel quale sia presente una particella di massa m e carica elettrica q, che dunque generi una corrente $I = dq/dt$ se in moto, in presenza di campi elettrici e magnetici, si può scrivere come

$$\begin{aligned} U =& \frac{1}{2}m\mathbf{v}\cdot\mathbf{v} + m\mathcal{G} + q\mathcal{E} + I\mathcal{B} + \\ & V\left(\frac{\epsilon_0}{2}\mathbf{E}\cdot\mathbf{E} + \frac{1}{2\mu_0}\mathbf{B}\cdot\mathbf{B}\right)\,. \end{aligned} \tag{12}$$

Osserviamo intanto che il termine cinetico ha la stessa forma dei termini di autointerazione. Una costante $\frac{1}{2}m$ moltiplicata per una funzione scalare dei campi ($\mathbf{v}\cdot\mathbf{v}$). In un certo senso si potrebbe pensare alla velocità delle particelle come a un campo diverso da zero solo nel punto in cui si trova la particella che lo genera.

A parte quello cinetico, tutti i termini sono il risultato di un'interazione. Questo suggerisce che, se potessimo *spegnere* tutte le interazioni dell'Universo, l'energia contenuta in quest'ultimo sarebbe nulla. Di fatto possiamo interpretare l'energia come una grandezza fisica che caratterizza l'intero Universo il cui valore deve rimanere costante nel tempo. Una variazione dell'energia in una regione dell'Universo comporta una variazione contraria in una regione diversa e questo equivale al manifestarsi di un'interazione. Potremmo quindi affermare che in un Universo privo d'interazioni l'energia sarebbe nulla.

Tenendo conto di ciò possiamo esprimere l'energia contenuta in una regione di volume V nella quale siano presenti campi e particelle in quiete come

$$U = \sum_i \alpha_i\mathcal{F}_i + V\sum_i \beta_i\mathbf{F}_i\cdot\mathbf{F}_i\,, \tag{13}$$

dove i coefficienti α_i rappresentano le costanti di accoppiamento tra particelle e campi (che dipendono dalle caratteristiche delle particelle che sono a loro volta sorgenti dello stesso campo) e $\mathcal{F}_i$ opportune funzioni dei campi $\mathbf{F}_i$ che abbiamo chiamato *potenziali.* I coefficienti β_i invece rappresentano le costanti di accoppiamento dei campi con sé stessi.

Ad esempio, consideriamo un condensatore con armature di superficie S distanti d con il vuoto come dielettrico, con all'interno una particella di carica elettrica q vincolata in un punto a distanza δ dall'armatura a potenziale piú basso. L'energia in esso contenuta vale

$$U = q\mathcal{E}(\delta) + Sd\frac{\epsilon_0}{2}E^2 \tag{14}$$

con $\mathcal{E}(\delta) = E\delta$ ed $E = |\mathbf{E}|$, trascurando la gravità. Confrontando quest'espressione con la (13) vediamo che c'è un solo termine ($i = 1$) per ciascuno dei due addendi per cui $\alpha_1 = q$, $\mathcal{F}_1 = \mathcal{E}(\delta)$, $\beta_1 = \epsilon_0/2$ e $\mathbf{F}_1 = \mathbf{E}$. Se $\mathbf{E}$ fosse nullo $U = 0$.

4 L'introduzione della relatività

Quanto detto finora sul significato fisico dell'energia comincia a vacillare non appena si tenga conto della relatività speciale. In questo caso è noto che all'energia cinetica e a quella dovuta alle interazioni dev'essere aggiunto un termine mc^2 detto, per l'appunto, energia a riposo della particella.

Con la relatività viene a cadere il principio (del tutto arbitrario, se vogliamo, ma ragionevole) secondo il quale l'energia contenuta in una regione di spazio dipenda esclusivamente dall'interazione di qualcosa con qualcos'altro. Il termine mc^2 non ha affatto la forma degli altri termini. Dipende esclusivamente dalla natura della particella considerata e sarebbe non nullo anche in assenza di ogni interazione.

È abbastanza naturale chiedersi (sebbene nessuno se lo sia chiesto per molti decenni) perché mai un tale termine debba entrare nella determinazione dell'energia di una particella quando tutti gli altri dipendono dal fatto che la particella in questione interagisce con un campo. E ammettendo che questo sia del tutto ragionevole, perché non esiste un termine del tipo qk^2 dove k^2 sia una combinazione di costanti aventi le dimensioni di un'energia per unità di carica elettrica?

5 Il Meccanismo di Higgs

A queste domande risponde il Meccanismo di Higgs. Supponiamo di tornare nella condizione prevista dalla fisica classica, secondo la quale vale l'equazione (13). Supponiamo, inoltre, che oltre ai campi già noti ne esista un altro che indichiamo con W, il cui *potenziale* indicheremo con $\mathcal{W}$. Si noti che il campo W è un campo scalare e non un campo vettoriale. Per quanto stiamo considerando, tuttavia, questo non fa differenza.

In presenza di questo nuovo campo l'equazione (13) diventa

$$U = \sum_i \alpha_i \mathcal{F}_i + a\mathcal{W} + V\left(\sum_i \beta_i \mathbf{F}_i \cdot \mathbf{F}_i + bW \cdot W\right) , \tag{15}$$

dove nelle somme abbiamo inclusi i soli campi già noti per rendere esplicito il fatto che il campo W non è tra questi. Il campo è peculiare per un'altra ragione: a differenza di tutti gli altri campi, il cui potenziale $\mathcal{F}_i$ assume il valore minimo quando il campo è nullo, il campo W possiede un potenziale il cui minimo si ottiene per $W = W_0 \neq 0$. Vedremo piú avanti il significato di questa scelta. Per il momento prendiamola per buona e scriviamo il campo $W = W_0 + H$. Corrispondentemente $\mathcal{W} = \mathcal{W}_0 + \mathcal{H}$. L'energia si scrive dunque come

$$\begin{aligned} U = &\sum_i \alpha_i \mathcal{F}_i + a\left(\mathcal{W}_0 + \mathcal{H}\right) + \\ &V\left(\sum_i \beta_i \mathbf{F}_i \cdot \mathbf{F}_i + b\left(W_0 + H\right)^2\right) , \end{aligned} \tag{16}$$

ed espandendo il quadrato otteniamo

$$\begin{aligned} U = &\sum_i \alpha_i \mathcal{F}_i + a\mathcal{W}_0 + a\mathcal{H} + \\ &V\left(\sum_i \beta_i \mathbf{F}_i \cdot \mathbf{F}_i + bW_0^2 + bH^2 + 2bW_0H\right) . \end{aligned} \tag{17}$$

Ora consideriamo uno per uno i termini in piú comparsi nell'espressione rispetto a quella originale.

Il termine $a\mathcal{W}_0$ è una costante che dipende unicamente dalle caratteristiche della particella presente nella regione di spazio considerata. La costante a, infatti, rappresenta l'intensità dell'accoppiamento tra questa particella e il nuovo campo, che va preso quando assume il valore minimo in cui il potenziale è $\mathcal{W}_0$. In altre parole, questo termine è del tutto analogo a $m\mathcal{G}$ o a $q\mathcal{E}$. L'unica differenza è che il valore del campo con il quale la particelle interagisce è costante in tutto l'Universo e vale W_0. Di fatto $a\mathcal{W}_0$ rappresenta l'energia d'interazione di una particella con un campo la cui intensità è costante ovunque. Questo termine perciò dev'essere uguale dappertutto e può solo dipendere dalla natura della particella attraverso la costante d'accoppiamento a. Se per accidente $a\mathcal{W}_0 = mc^2$ questo termine rappresenta proprio l'energia a riposo di una particella.

È cosí che una particella priva di massa con *carica di Higgs* a acquista una massa (inerziale) m interagendo con il campo nella sua configurazione di minima energia W_0. Ma cosa vogliono dire gli altri termini?

Il prodotto $a\mathcal{H}$ rappresenta l'interazione delle particelle con il campo di Higgs in eccedenza rispetto al valore che rende minimo il suo potenziale. In altre parole è possibile che in una regione di spazio sia presente un campo di Higgs piú intenso rispetto a quello nel quale il potenziale di Higgs è minimo. Questo non conduce a una maggiore o minore massa per la particella, ma a un'interazione tra la particella e il campo residuo per certi versi paragonabile a quella di una carica con un campo elettrico. Se l'effetto del campo W fosse quello di attrarre o di respingere particelle (non lo sappiamo, in verità), questo termine provocherebbe l'attrazione o la repulsione delle particelle da parte del campo, ma solo in quelle regioni in cui il campo dovesse essere diverso da quello minimo W_0. Quest'attrazione o questa repulsione sarebbe tanto piú intensa quanto piú intenso è il campo W e sarebbe proporzionale a una sorta di *carica di Higgs* delle particelle che la subiscono.

bW_0^2 è un termine del tutto irrilevante ai fini della dinamica. Infatti questo è davvero un termine costante, che dipende solamente dal campo nella sua configurazione di minima energia e dalla sua interazione con sé stesso. Questo addendo è uguale in tutti i punti dell'Universo e può essere eliminato ridefinendo la costante additiva arbitraria come $-bW_0^2$.

Il termine bH^2, analogo a $\epsilon_0 E^2/2$, rappresenta l'interazione del campo di Higgs in eccesso con sé stesso, mentre quello che si scrive come $2bW_0H$ rappresenta l'interazione del campo H con il campo W_0. Da una parte questo è analogo a $\epsilon_0 E^2/2$ rappresentando l'interazione di un campo con un altro della sua stessa natura; dall'altra il termine in questione è simile, per certi versi, a $a\mathcal{W}_0$, perché uno dei campi coinvolti è proprio quello che determina il valore minimo del potenziale. In sostanza questo addendo nell'energia dipende solo dal campo di Higgs in eccesso (perché tutto il resto è costante) e cresce proporzionalmente alla *quantità* di campo presente. Rappresenta dunque quello che potremmo chiamare la *massa del campo*. Il campo di Higgs, dunque, è un campo massivo.

6 Sulla forma del potenziale di Higgs

Nella sezione precedente abbiamo visto che il campo di Higgs possiede due caratteristiche che, in qualche modo, lo rendono diverso dai campi elettrico e magnetico:

- il valore minimo del potenziale di autointerazione non si ottiene per $W = 0$, ma per $W \neq 0$.
- è scalare.

Un modo per far sí che l'energia sia minima quando il campo è diverso da zero è il seguente. Supponiamo di avere un campo autointeragente W. Seguendo l'analogia finora esposta con i campi elettrici e magnetici scriveremmo il contributo all'energia dovuto all'autointerazione come

$$U = \alpha W^2 \tag{18}$$

ma cosí facendo per $W = 0$ si avrebbe $U = 0$ che corrisponde al valore minimo dell'energia. Si vede subito, infatti, che U è una parabola nel piano (W, U). Senza rinunciare all'ipotesi secondo la quale i contributi all'energia sono imputabili alle interazioni tra particella e campo e tra campo e campo, possiamo tranquillamente assumere che l'interazione tra campi di Higgs proceda in modo tale da contribuire all'energia secondo l'equazione

$$U = \alpha W^2 + \beta W^4\,. \tag{19}$$

In fondo, il termine W^2 rappresenta il solito contributo all'energia dovuto all'autointerazione dei campi, ma dal momento che W è un campo scalare, il termine W^2 si può pensare anch'esso come un campo scalare che autointeragendo dà luogo al termine βW^4. Nel caso dei campi vettoriali questo non avviene perché il campo ha carattere vettoriale, mentre l'energia è uno scalare. Ma nel caso di campi scalari è possibile. Seguendo questa linea di pensiero potremmo anche ammettere l'esistenza di termini con potenze superiori di W. Questo non è escluso. Anzi, è possibile che $\alpha W^2 + \beta W^4$ rappresenti solo i primi termini dello sviluppo di Taylor di una funzione piú complicata del campo W in cui, evidentemente, i termini di ordine superiore sono abbastanza piccoli da potersi trascurare.

Troviamo il minimo di (19): questo si ha quando

$$\frac{dU}{dW} = 2\alpha W + 4\beta W^3 = 0\,, \tag{20}$$

e cioè per

$$W^2 = -\frac{\alpha}{2\beta}\,. \tag{21}$$

Se β e α sono discordi (prendiamo, tanto per fissare le idee $\alpha < 0$ e $\beta > 0$) il minimo del potenziale si ha naturalmente per $W \neq 0$. Se si fa un grafico dell'andamento di U in funzione di W si ottiene la figura mostrata in Fig. 1.

Dalla figura si vede che il minimo dell'energia si ottiene quando $W = \sqrt{-\alpha/2\beta} \simeq 2.5$, avendo scelto $\alpha = -13$ e $\beta = 1$. L'energia che si ottiene in questo modo è negativa, ma è sufficiente scegliere una costante arbitraria opportuna da sommare a questo valore per renderla positiva o nulla. Lo stato di vuoto *classico* (quello in cui particelle e campi sono assenti) possiede dunque un'energia maggiore di uno stato in cui è presente una certa quantità di campo. Questo implica che un tale stato di vuoto è instabile e tende spontaneamente a evolvere in uno stato di energia piú bassa, nel quale è presente un campo di Higgs non nullo. Dobbiamo quindi pensare che il *vero* stato di vuoto sia quello nel quale abbiamo rimosso tutti i campi e le particelle, tranne il campo di Higgs che si riformerà spontaneamente anche se riuscissimo a rimuoverlo. Per questo lo stato nel quale $W = W_0$ si può considerare l'effettivo stato di vuoto che non è quello in cui *non c'è nulla*, ma quello di minima energia.

Questo spiega anche perché abbiamo scelto un campo scalare. Un primo argomento è, come abbiamo visto, che il campo scalare può interagire con sé stesso dando luogo a contributi all'energia con potenze maggiori di due. Inoltre il campo di Higgs, quando si trova nello stato di minima energia deve essere rappresentativo dello stato di vuoto (che è quello stato nel quale non si misura nulla). Il vuoto non può avere una direzione privilegiata come avrebbe se il campo di Higgs fosse vettoriale.

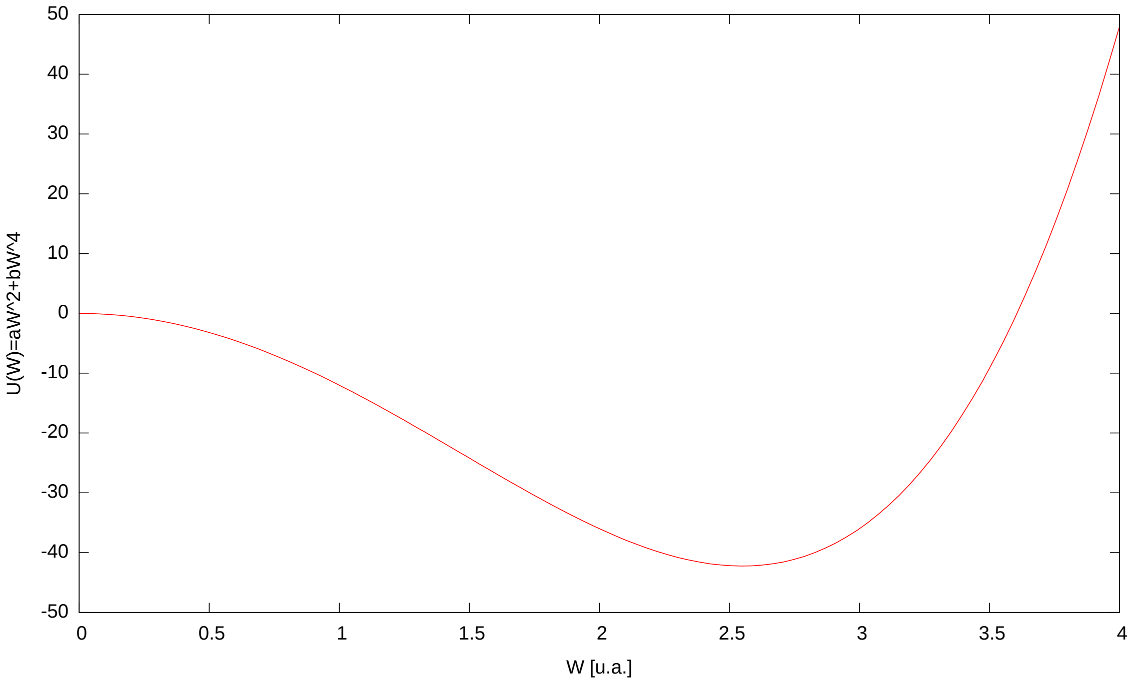

Figura 1: Il potenziale del campo di Higgs in funzione dell'intensità del campo in unità arbitrarie. Abbiamo scelto $\alpha = -13$ e $\beta = 1$.

7 Un modello qualitativo

Possiamo farci un'idea abbastanza precisa di quel che accade quando una particella, di per sé priva di massa, interagisce con il campo di Higgs usando un'analogia. Consideriamo una piscina di palline, come quelle che si trovano nei parchi giochi o in alcuni centri commerciali per intrattenere i bambini mentre i genitori fanno shopping. Ammettiamo che la nostra piscina di palline rappresenti un volume di Universo che possiamo osservare. Se la osserviamo da fuori, seduti su una panchina, le palline piú in superficie sono sotto il bordo e non sono visibili. La piscina, per noi, è vuota. Non nel senso usuale del termine (la piscina è piena di palline), ma nel senso che è impossibile osservare piú di quanto riusciamo a vedere in queste condizioni. Un bambino fuori dalla piscina si muove liberamente, come una particella a massa nulla. Ma se lo facciamo entrare nella regione di spazio in cui è presente il campo di Higgs rappresentato dalle palline, si muoverà con difficoltà. Se si muove lentamente non smuoverà le palline abbastanza da renderle visibili e noi potremo concludere che la massa del bambino nella piscina è maggiore perché occorre una forza maggiore per accelerarlo rispetto a quando si trovava fuori della piscina e aveva *massa nulla*.

Se si muovesse piú rapidamente la sua interazione con il campo aumenterebbe e potrebbe causare la comparsa di un campo misurabile (vedremmo saltellare di quando in quando delle palline oltre il bordo). In sostanza, muovendosi rapidamente, il bambino cederebbe abbastanza energia al campo di Higgs minimo, da consentirgli di produrre campo in eccesso. Per noi, infatti, osservare le palline balzare oltre il bordo della piscina è come osservare un aumento del campo. Il bambino può, muovendosi, anche scontrarsi con qualcuna delle palline che ha generato trasferendo energia al campo di vuoto. Questo fenomeno è quello descritto dal termine $a\mathcal{H}$ dell'energia.

Se il campo in eccesso è abbastanza intenso, poi, potremmo osservare anche l'interazione del campo residuo con sé stesso bH^2 come palline che si toccano e si scontrano, una volta rese visibili dal passaggio (dall'interazione) del bambino attraverso la piscina.

Il termine bW_0^2 invece rappresenta l'energia delle palline sotto il bordo: perché sia possibile che le palline arrivino abbastanza vicine al bordo da poter essere osservate in presenza di altre particelle è necessario che le palline interagiscano tra loro: e in effetti lo fanno perché quando una sta sopra l'altra quella in alto non può stare piú in basso di quanto sia.

Infine il termine $2bW_0H$ rappresenta l'interazione tra campo residuo e campo minimo che si può raffigurare come quella che esiste tra una pallina in volo (visibile) che rimbalza sulle palline sotto il bordo della piscina piú in superficie.

Questa metafora del funzionamento del meccanismo di Higgs è stata oggetto di una pubblicazione [4] che potrebbe portare alla realizzazione di un dispositivo dedicato in un importante museo scientifico.

8 Campi massivi

L'idea di un campo con massa è forse la piú difficile da assimilare per uno studente. Per comprendere cosa sia un campo con massa possiamo fare cosí: supponiamo di avere una particella di massa M che produce un campo di qualche tipo (per esempio gravitazionale). Il campo prodotto è privo di massa e per questo la particella conserva la sua massa M. Se il campo prodotto avesse massa m, per la conservazione di quest'ultima, la massa della particella che lo produce dovrebbe diminuire e diventare $M-m$. Ma cosí facendo, prima o poi la particella perderebbe tutta la sua massa. Se infatti in un punto P c'è un campo $\mathbf{G}$, trascorso un certo tempo Δt, questo campo si è propagato in un punto che dista $c\Delta t$ da P, dove c è la velocità di propagazione del campo (nel caso del campo elettrico sarebbe la velocità della luce). Per fare in modo che in P continui a esserci un campo $\mathbf{G}$ la sorgente deve rimpiazzarlo perdendo un'ulteriore frazione della sua massa e cosí via.

Se ammettiamo che la particella possa perdere una frazione della sua massa per un tempo limitato Δt_{max} possiamo però ammettere che produca un campo massivo di massa m (diventando una particella di massa $M-m$) il quale, trascorso questo tempo, non può piú esistere e deve essere per cosí dire riassorbito dalla particella che lo ha prodotto. La particella sorgente infatti deve tornare ad avere la massa originale M trascorso il tempo Δt_{max}. Questo implica che il campo può al massimo raggiungere una distanza dalla particella pari a circa

$$L_{max} \simeq c\Delta t_{max}\,. \tag{22}$$

In altre parole un campo massivo non è altro che un campo a raggio limitato. Oltre una certa distanza dalla sorgente, non si osserva piú alcun campo.

9 La massa dei bosoni vettori

Riscriviamo l'equazione che ci fornisce l'energia contenuta in un volume V di Universo in un caso particolare: prendiamo come volume V quello all'interno di un condensatore carico all'interno del quale sia presente una particella elettricamente carica, con carica q. Trascurando la gravità, l'energia contenuta in questo condensatore è la somma dell'energia elettrostatica della carica q e di quella immagazzinata sotto forma di campo elettrico. Se non avessimo il campo di Higgs quest'energia ammonterebbe a

$$U = U_{em} = q\mathcal{E} + V\frac{\epsilon_0}{2}\mathbf{E}\cdot\mathbf{E}\,. \tag{23}$$

In presenza anche di interazioni deboli, all'energia dovremmo sommare un termine del tipo

$$U_{weak} = w\mathcal{Z} + V\frac{\zeta_0}{2}\mathbf{Z}\cdot\mathbf{Z} \tag{24}$$

dove $\mathbf{Z}$ rappresenta il campo debole, $\mathcal{Z}$ il suo *potenziale* e ζ_0 è una costante che si deve determinare sperimentalmente e che indica l'intensità dell'autointerazione del campo debole. La simmetria tra le due espressioni è evidente, perciò possiamo riscrivere tutto come

$$U = U_{em} + U_{weak} = \mathbf{c}\cdot\mathcal{D} + V\frac{1}{2}\mathbf{D}\cdot\mathbf{D}\,, \tag{25}$$

dove $\mathbf{D}$, $\mathcal{D}$ e $\mathbf{c}$ sono vettori di due componenti. Le componenti del vettore $\mathbf{D}$ sono i moduli di due vettori spaziali:

$$\mathbf{D} = \begin{pmatrix} \sqrt{\epsilon_0}\,E \\ \sqrt{\zeta_0}\,Z \end{pmatrix}\,. \tag{26}$$

Le componenti di $\mathcal{D}$ sono

$$\mathcal{D} = \begin{pmatrix} \mathcal{E} \\ \mathcal{Z} \end{pmatrix}\,, \tag{27}$$

mentre quelle del vettore $\mathbf{c}$ sono le costanti di accoppiamento ai rispettivi campi:

$$\mathbf{c} = \begin{pmatrix} q \\ w \end{pmatrix}\,. \tag{28}$$

Questi vettori, naturalmente, non sono vettori nello spazio ordinario: *vivono* in uno spazio astratto bidimensionale i cui assi sono allineati lungo direzioni che dipendono dalle interazioni. In altre parole, la direzione di questi vettori nello spazio astratto definisce in qualche maniera l'intensità relativa tra le diverse interazioni. In un Universo in cui ci siano solo interazioni elettromagnetiche, il vettore $\mathbf{D}$ assumerebbe una data direzione in questo spazio astratto, mentre in un Universo in cui siano presenti sia interazioni elettromagnetiche che deboli, il vettore formerebbe un angolo non nullo con quello precedente. Infine, in un Universo in cui le interazioni elettromagnetiche scomparissero, il vettore $\mathbf{D}$ avrebbe una direzione perpendicolare al primo.

Ripetendo il ragionamento fatto sopra circa la necessità d'introdurre un nuovo campo per giustificare la presenza di un termine di massa nell'espressione dell'energia, dovremmo aggiungere all'equazione (25) un campo $\boldsymbol{\phi}$ che, per potersi sommare a quelli già presenti, deve essere rappresentato da un vettore di campi:

$$\boldsymbol{\phi} = \begin{pmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \end{pmatrix} . \tag{29}$$

Il campo $\boldsymbol{\phi}$ deve essere autointeragente e presentare un termine di autointerazione del tipo $\boldsymbol{\phi}^4$. In questo caso l'energia si scriverebbe come

$$U = \mathbf{c} \cdot \mathcal{D} + V\frac{1}{2}\mathbf{D} \cdot \mathbf{D} + \mathbf{a} \cdot \boldsymbol{\Phi} + Vb\boldsymbol{\phi} \cdot \boldsymbol{\phi} + Vc\boldsymbol{\phi}^4 + g\mathbf{D} \cdot \boldsymbol{\phi}\,, \tag{30}$$

dove $\boldsymbol{\Phi}$ rappresenta il *potenziale* di $\boldsymbol{\phi}$. In questo spazio il potenziale del campo ha la forma che si ottiene facendo ruotare la curva della Figura 1 attorno all'asse delle ordinate: sarebbe quindi una superficie con la forma di un *sombrero*. È evidente che in questo caso non c'è un solo minimo del potenziale, ma ce ne sono infiniti. Ogni stato di minimo è equivalente all'altro e rappresenta uno stato di minima energia del tutto simmetrico a ogni altro che possiamo scegliere. Se scegliamo uno dei possibili stati di minima energia, fissiamo le coordinate (ϕ_1^0, ϕ_2^0) in questo spazio e possiamo scrivere il vettore $\boldsymbol{\phi}$ come

$$\boldsymbol{\phi} = \begin{pmatrix} \phi_1^0 + \eta_1 \\ \phi_2^0 + \eta_2 \end{pmatrix} . \tag{31}$$

In questo modo l'interazione del campo $\mathbf{D}$ col campo $\boldsymbol{\phi}$, $g\mathbf{D} \cdot \boldsymbol{\phi}$, fa apparire due addendi nell'energia:

$$gE\sqrt{\epsilon_0}\left(\phi_0^1 + \eta_1\right) + gZ\sqrt{\zeta_0}\left(\phi_2^0 + \eta_2\right) . \tag{32}$$

A questo punto osserviamo che $gE\sqrt{\epsilon_0}\phi_1^0$ e $gZ\sqrt{\zeta_0}\phi_2^0$ sono costanti che possono essere pensate come a quei termini che danno origine ai contributi delle masse dei campi $\mathbf{E}$ e $\mathbf{Z}$. La massa del campo $\mathbf{E}$, come sappiamo, è nulla, mentre quella del campo $\mathbf{Z}$ non lo è. Perché questa differenza?

Essendo tutti gli stati di minima energia del potenziale di Higgs equivalenti tra loro, potremmo certamente scegliere uno stato per cui $\phi_1^0 = 0$ e si avrebbe che $\boldsymbol{\phi} = (0, \phi_2)$. Non abbiamo nessuna ragione per preferire uno stato di minimo piuttosto che un altro e l'equazione che ci dà l'energia è perfettamente simmetrica, ma una volta scelto lo stato di minimo la simmetria viene **rotta**. Del resto, anche la direzione degli assi che definiscono le diverse interazioni sono in un certo senso arbitrarie. Quello che possiamo pensare, perciò, è che la direzione dell'asse delle interazioni elettromagnetiche sia proprio quella definita dal punto di minima energia del campo di Higgs, mentre quella dell'asse delle interazioni deboli sia quello perpendicolare. In questo modo i mediatori delle interazioni elettromagnetiche vengono ad assumere automaticamente una massa nulla, mentre quelli delle interazioni deboli acquistano una massa.

In definitiva possiamo ritenere che prima dell'apparizione dell'Universo non fosse presente alcun campo né materia. Alla nascita dell'Universo compare una certa quantità di campo di Higgs, la cui energia non è necessariamente la minima possibile. Di conseguenza i campi di Higgs cominciano a interagire portando l'energia dal valore assunto alla nascita al valore minimo possibile. Di stati nei quali avviene questo ce ne sono infiniti e naturalmente l'Universo *cadrà* in uno solo di questi infiniti stati. Questo definisce una direzione privilegiata nello spazio astratto delle interazioni per cui lungo questa direzione si sviluppa un tipo d'interazione a raggio infinito e a massa nulla, mentre nelle direzioni perpendicolari se ne sviluppano altre a corto raggio.

Riferimenti bibliografici

[1] ATLAS Collaboration, "Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC", Phys. Lett. B **716** (2012) 1, doi:10.1016/j.physletb.2012.08.020.

[2] CMS Collaboration, "Observation of a new boson at a mass of 125 GeV with the CMS experiment at the LHC'', Phys. Lett. B **716** (2012) 30, doi:10.1016/j.physletb.2012.08.021.

[3] G. Organtini, "Unveiling the Higgs mechanism to students", Eur. J. Phys. 33 (2012) 1397-1406, doi:10.1088/0143-0807/33/5/1397

[4] G. Organtini, "A Ball Pool Model to illustrate the Higgs physics to the public, Phys. Educ. 52 (2017) 023001, doi: 10.1088/1361-6552/aa4f8a

Fisicast

Il bosone di Higgs è stato oggetto di una puntata speciale di Fisicast: http://www.radioscienza.it/2012/07/24/il-bosone-di-higgs/.