



# Spigolature astronomiche★

A cura di Annibale D'Ercole

INAF · Osservatorio Astronomico di Bologna

## Particelle, campi, simmetrie: il bosone di Higgs

Annibale D'Ercole

È DI pochi mesi fa l'annuncio ufficiale della scoperta, presso lo LHC (Large Hadron Collider) di Ginevra, di una particella che ha molte delle caratteristiche necessarie per poter essere identificata come la "ricercatissima" particella di Higgs. Questa scoperta ha suscitato grande entusiasmo tra i fisici perché rappresenta la conferma sperimentale del fatto che, come vedremo, forze apparentemente assai diverse come quella elettromagnetica e quella debole siano in realtà differenti manifestazioni di un'unica forza. Questa riduzione del numero delle forze fondamentali da quattro a tre rappresenta il maggior passo verso l'unificazione delle forze dai tempi della "fusione" della forza elettrica con quella magnetica ad opera di Maxwell, e costituisce un significativo avvicinamento al santo Graal della fisica moderna, ossia l'individuazione di un'unica Superforza da cui si sarebbe originato l'universo quale noi lo conosciamo. Vediamo meglio di cosa si tratta.

Vi sono quattro forze fondamentali che operano in natura. Due di esse, la gravità e l'elettromagnetismo, ci sono familiari perché agiscono su distanze apprezzabili nella vita quotidiana. Le altre due sono la *forza debole*, responsabile del decadimento radioattivo di alcuni nuclei, e la *forza nucleare* (o *forza forte*) che, oltre a tenere assieme le terne di quark che compongono protoni e neutroni, lega questi ultimi tra loro nei nuclei atomici; entrambe queste forze agiscono dunque su un intervallo spaziale inferiore alle dimensioni di un nucleo atomico (pari a un millesimo di miliardesimo di millimetro). Oggi sappia-

\* Questa rubrica si propone di presentare in modo sintetico e, per quanto possibile, autoconsistente argomenti che stanno alla base della conoscenza astronomica, spesso trascurati nella letteratura divulgativa, in quanto ritenuti di conoscenza generale oppure troppo difficili o troppo noiosi da presentare ad un pubblico non specialistico. Questi "fondamenti di astronomia", volutamente trattati in uno spazio limitato, possono essere letti a due livelli; eventuali approfondimenti per i lettori che desiderino ampliare la conoscenza dell'argomento vengono esposti in carattere corsivo e incorniciati. Si suggerisce questa rubrica, quindi, a studenti dei vari tipi e livelli di scuole. Le *Spigolature astronomiche* si possono trovare anche in rete, nel sito Web del «Giornale di Astronomia», [www.bo.astro.it/sait/giornale.html](http://www.bo.astro.it/sait/giornale.html).

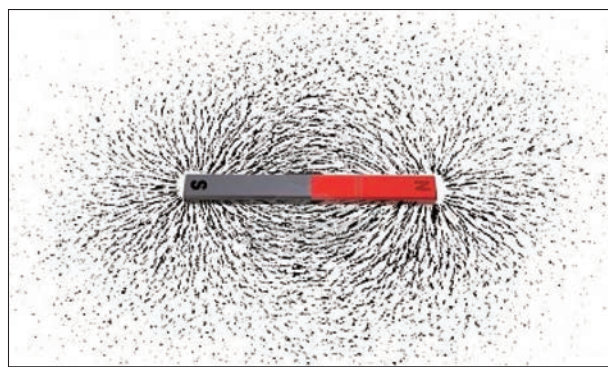


FIG. 1. Il campo magnetico di una calamita può essere evidenziato spargendo della limatura di ferro che tende a disporsi lungo le linee di forza del campo stesso.

mo che per descrivere la realtà a livello (sub) atomico è necessario ricorrere alla meccanica quantistica, che descrive l'interazione tra particelle in termini di campi piuttosto che di forze.

In verità il concetto di campo fu introdotto già da Faraday nell'Ottocento per descrivere le proprietà di una calamita; così come un corpo incandescente produce un alone di calore attorno a sé, una calamita è circondata da un alone, detto campo magnetico, tramite il quale interagisce con gli oggetti metallici. Possiamo chiaramente percepire l'azione del campo magnetico quando facciamo aderire un oggetto calamitato alla porta del frigorifero e riusciamo anche a "vederlo" disponendo della limatura di ferro attorno ad una calamita (FIG. 1). Analogamente, le particelle elettricamente cariche, come protoni ed elettroni, sono circondate da un campo elettrico. Le equazioni di Maxwell hanno poi evidenziato come i campi magnetici e i campi elettrostatici siano in realtà due manifestazioni particolari di un'unica forza, il campo elettromagnetico; queste stesse equazioni hanno anche mostrato che le particelle comunicano tra loro scambiandosi energia tramite onde elettromagnetiche, cioè segnali che si propagano attraverso il campo elettromagnetico come le onde sulla superficie dell'acqua. Infine, la meccanica quantistica ha modifi-



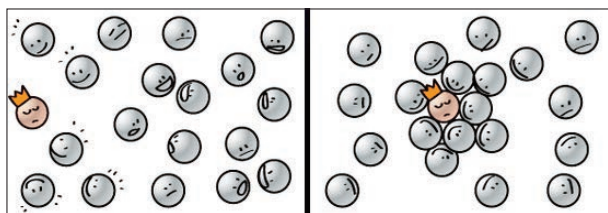


FIG. 2. Una simpatica quanto popolare metafora illustra il meccanismo di Higgs che fornisce massa alle particelle. Quando un personaggio molto famoso (la particella) cammina tra la gente (i bosoni di Higgs) viene immediatamente circondato da una folla di curiosi che offre resistenza al suo movimento. Tanto più il personaggio è famoso, tanto maggiore è il numero di curiosi e la conseguente resistenza al movimento (la massa della particella).

cato questa visione ondulatoria, sostituendo i quanti di energia – detti *fotoni* – alle onde elettromagnetiche. In questo quadro, l'azione repulsiva che si esercita tra due elettroni che si scambiano fotoni può essere assimilata a quella che si realizza tra due individui su pattini che si lanciano reciprocamente e ripetutamente una palla: i continui lanci e le successive prese causano il rinculo dei due pattinatori, e la reciproca “repulsione”.<sup>1</sup>

Questi concetti attinenti all'elettrodinamica quantistica sono stati estesi anche alle altre forze. In particolare, l'attuale Modello Standard del mondo subatomico prevede l'esistenza di campi “forti” e “deboli”. Analogamente al campo elettromagnetico, composto da fotoni, il campo forte è costituito da *gluoni*, mentre quello debole da particelle dette *W* e *Z*. L'esistenza di tutte queste particelle mediatrici di forze è stata confermata sperimentalmente (in particolare, la scoperta delle particelle *W* e *Z* ha fruttato nel 1984 il premio Nobel al fisico italiano Carlo Rubbia e all'olandese Simon van der Meer). La teoria prevede anche l'esistenza del “gravitone”, responsabile dell'interazione gravitazionale; quest'ultima particella non è stata ancora rivelata (più in generale, va sottolineato che a tutt'oggi non abbiamo una teoria coerente che inglobi gravitazione e fenomeni quantistici). Riassumendo (e semplificando), possiamo dire che in natura esistono due tipi di particelle: le particelle “materiali” dette *fermioni* (quali i quark che, aggregandosi in protoni e neutroni, formano la materia ordinaria cui siamo abituati), e le particelle mediatrici di forze, indicate col generico nome di *bosoni* (fotoni, gluoni, particelle *W* e *Z*), che compongono i campi quantistici.

Le equazioni di Maxwell, unificando la forza elettrica *E* e quella magnetica *B*, hanno messo in luce la simmetria esistente tra queste due forze (le equazioni rimangono sostanzialmente invariate se si scambia *E* con *B*). La “fedè” in una più generale simmetria della natura ha condotto Sheldon Glashow, Steven Weinberg e Absus Salam a compiere un ul-

<sup>1</sup> Naturalmente quest'analogia non si estende alle forze attrattive.

teriore passo verso l'unificazione finale, dimostrando che la forza elettromagnetica e quella debole sono due aspetti di un'unica *forza elettrodebole* (e ricevendo per questo il Premio Nobel nel 1979). Per comprendere di cosa si tratta, e quale sia la relazione con il bosone di Higgs, occorre prima capire quali sono state le difficoltà da superare.

Apparentemente la forza elettromagnetica e quella debole non hanno nulla in comune. La forza elettromagnetica è mediata dai fotoni, particelle stabili che hanno massa nulla; per questo motivo il suo raggio d'azione è infinito. La forza debole è mediata dai bosoni *W* e *Z* che sono instabili e con massa non nulla (circa cento volte quella di un protone). Questi bosoni (al pari di altre particelle) vengono creati dal nulla, prendendo in prestito l'energia necessaria dallo spazio vuoto grazie al principio di indeterminazione,<sup>2</sup> a patto, però, di restituire il prestito (cioè sparire) tanto più rapidamente quanto maggiore è l'entità del prestito stesso, ovvero quanto maggiore è la massa della particella creata. Pertanto i mediatori della forza debole hanno vita breve, pari a un decimilionesimo di miliardesimo di miliardesimo di secondo ( $10^{-25}$  s), e possono muoversi solo per un breve tratto prima di sparire: questo è il motivo per cui la forza debole ha un raggio d'azione corto, dell'ordine del millesimo del diametro del protone, circa un milionesimo di miliardesimo di millimetro ( $10^{-15}$  mm).

Per aggirare questi problemi, Glashow, Weinberg e Salam sono partiti da un'ipotesi, formulata nel 1964 dal fisico britannico Peter Higgs, secondo cui esiste un ulteriore campo (oltre quelli fin qui considerati) che permea tutto lo spazio. Le particelle associate a questo campo – i bosoni di Higgs – interagiscono con intensità diverse con le diverse altre particelle. Una pallina da ping-pong spinta attraverso la melassa opporrebbe una resistenza decisamente superiore rispetto a quando viene spinta attraverso l'aria; analogamente, particelle che interagiscono più intensamente con il campo di Higgs mostrano una resistenza maggiore al moto rispetto a particelle che interagiscono più debolmente: in altre parole, le prime esibiscono una massa maggiore

<sup>2</sup> L'energia di un fotone è pari a  $E = h\nu$ , dove  $h$  è la costante di Planck e  $\nu$  la frequenza della radiazione. Per conoscere  $E$  bisogna allora misurare  $\nu$ ; ma per ottenere un valore accurato è necessario che il tempo di osservazione  $\Delta t$  sia sufficientemente lungo da permettere al fotone un'oscillazione completa. Per intervalli temporali inferiori l'errore sulla misura dell'energia,  $\Delta E$ , è tanto maggiore quanto minore è  $\Delta t$ , secondo la relazione di indeterminazione  $\Delta E \cdot \Delta t > h/2\pi$  (si veda questa rubrica nel n. 1 del «Giornale di Astronomia» del 2009). Questa relazione vale per tutte le particelle e porta a notevoli conclusioni riguardo allo spazio “vuoto”. In tale spazio non è possibile che l'energia (o, equivalentemente, la massa) sia del tutto nulla, perché questo sarebbe contrario al principio di indeterminazione. Di conseguenza, in momentanea violazione del principio di conservazione dell'energia, nello spazio si formano in continuazione particelle elementari che poi tornano a sparire. L'esistenza di queste effimere particelle virtuali è stata dimostrata sperimentalmente tramite, ad esempio, l'effetto Casimir (si veda questa rubrica nel n. 4 del «Giornale di Astronomia» del 2004).

rispetto alle seconde.<sup>3</sup> Gli stessi bosoni di Higgs possiedono una massa (pari a circa 130 volte quella del protone) derivante dall'interazione di ciascuno di essi con quelli circostanti. I fotoni, che non interagiscono con il campo, hanno massa nulla.

Secondo l'attuale teoria, quella appena descritta rappresenta la situazione presente. Ma quando l'età dell'universo era inferiore a un centesimo di miliardesimo di secondo ( $10^{-11}$  s) e la temperatura era superiore ad un milione di miliardi di gradi Kelvin ( $10^{15}$  K) – cento milioni di volte la temperatura al centro del Sole – il campo di Higgs era strutturato diversamente. In seguito, il raffreddamento dell'universo (conseguente alla sua espansione) ha portato ad una *transizione di fase* del campo di Higgs, che ha così acquisito le sue caratteristiche odierne.

Non è difficile imbattersi in sistemi fisici che subiscono una transizione di fase regolata da un cosiddetto *parametro d'ordine* quale, ad esempio, la temperatura. Il caso più comune è dato dall'acqua che, raffreddandosi al di sotto di 0 °C, passa dallo stato liquido a quello solido. In questo passaggio essa riduce la propria simmetria (FIG. 3). Poiché questo avviene senza alcun intervento esterno, si parla di *rottura spontanea di simmetria*. Tale rottura non è una specifica conseguenza dell'esempio appena discusso, ma è un risultato generale associato a qualunque tipo di transizione di fase, indipendentemente dal sistema fisico coinvolto (si veda qui il livello avanzato).

Torniamo ora al campo di Higgs. Subito dopo il Big Bang la temperatura era così alta da “nebulizzare” tale campo. Esso, pur contenendo un'energia complessiva elevata, era composto da particelle così “piccole” da non essere in grado di interagire con nulla. Pertanto, per quanto abbiamo detto più sopra, nessuna particella aveva massa, e neanche, in particolare, i bosoni W e Z. Inoltre, queste particelle, data l'elevatissima temperatura (ed energia) presente, venivano prodotte senza bisogno di “rubare” energia al vuoto; esse erano a tutti gli effetti particelle reali con un tempo di vita potenzialmente infinito e dunque con un raggio di azione anch'esso infinito. In queste condizioni vi era dunque la simmetria tra fotoni e bosoni W e Z ricercata da Glashow, Weinberg e Salam. Con il verificarsi della transizione di fase, però, il campo di Higgs si è “coagulato” negli attuali, massicci, omonimi bosoni. Questo ha portato ad una rottura spontanea di simmetria della forza elettrodebole iniziale, all'acquisizione di massa da parte della materia e all'attuale differenziazione tra forza elettromagnetica e forza debole.

A conclusione di questa nota, vogliamo sottolineare un aspetto significativo del bosone di Higgs.

<sup>3</sup> L'analogia con la melassa è in parte fuorviante. La pallina nella melassa è destinata a fermarsi a causa dell'attrito. Invece, l'interazione con il campo di Higgs avviene solo se la particella è in moto accelerato. In caso di moto rettilineo uniforme, l'interazione è nulla e la particella non subisce alcun rallentamento.

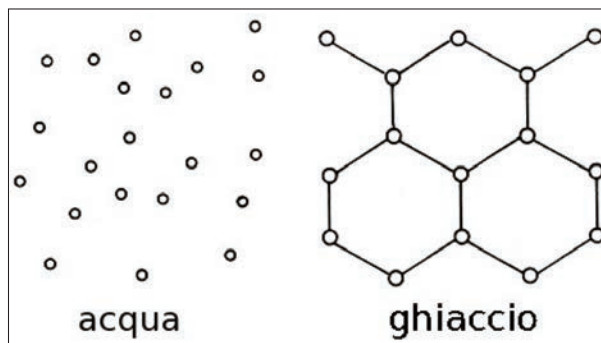


FIG. 3. Rappresentazione bidimensionale schematica dell'acqua e del ghiaccio. Allo stato liquido le molecole hanno grande mobilità e, nel loro insieme, hanno una distribuzione caotica. Per temperature inferiori a 0 °C le molecole si “incastrano” tra loro formando celle esagonali. Benché il ghiaccio possa apparire più simmetrico dell'acqua, in realtà è vero il contrario. L'aspetto caotico dell'acqua, infatti, non cambia, da qualunque punto di vista la si osservi: in altre parole, l'acqua è altamente simmetrica perché invariante per qualunque tipo di rotazione. Il ghiaccio, invece, è invariante solo per rotazioni di (multipli di) 60 gradi, e presenta quindi una simmetria inferiore.

Molti fisici e filosofi, in passato, hanno cercato di capire quale sia l'origine della massa, cioè della proprietà inerziale dei corpi di opporre resistenza ad ogni tentativo di variare il loro stato di quiete o di moto rettilineo uniforme (ne abbiamo parlato nelle *Spigolature* del n. 3 del «Giornale di Astronomia» del 2009, e del n. 3 del Giornale di Astronomia del 2011). Per tutti, essa deriva dall'accelerazione rispetto ad un riferimento esterno: lo spazio assoluto per Newton, le stelle distanti per Mach, lo spazio-tempo per Einstein. Si tratta in ogni caso di risposte parziali. Con il campo di Higgs, oggi, forse i fisici sono giunti ad una risposta più profonda.

*Nel livello base abbiamo visto come la massa delle particelle e la rottura di simmetria della forza elettrodebole siano conseguenza della transizione di fase del campo di Higgs. Una transizione di fase è un fenomeno in base al quale, ad una determinata temperatura, le proprietà di un sistema fisico cambiano completamente. La trasformazione dell'acqua in ghiaccio, la condensazione di un gas in liquido, la trasformazione dell'elio liquido in superconduttore sono tutti esempi di transizione di fase. Nonostante la diversità di questi fenomeni, essi condividono una caratteristica comune: alla transizione si accompagna un cambiamento di simmetria. Questo aspetto è assolutamente generale ed indipendente dai dettagli del sistema fisico in considerazione. Per capirne l'essenza possiamo allora considerare il comportamento di un oggetto familiare, come una calamita, e applicare successivamente il risultato al campo di Higgs.*

*Immaginiamo un materiale magnetico quale il ferro. Esso è sottoposto ad una transizione di fase in corrispondenza della temperatura di Curie, pari a*

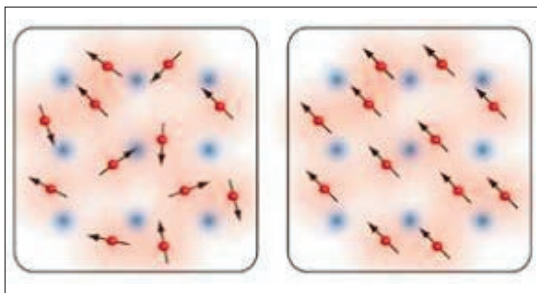


FIG. 4. Per temperature superiori ad un determinato valore critico una calamita perde la propria magnetizzazione. Quest'ultima, infatti, è data dalla somma dei campi magnetici dei singoli atomi che, a causa della forte agitazione termica, si orientano in maniera casuale (pannello a sinistra). A temperature inferiori a quella critica si verifica una transizione di fase: gli atomi riescono a disporre i propri campi magnetici lungo una stessa direzione, dando luogo alla magnetizzazione della calamita.

770 °C. A temperature maggiori il ferro perde il suo magnetismo, mentre a temperature minori esso si magnetizza automaticamente. Questo comportamento può essere illustrato da un modello semplificato in cui gli atomi – dotati ognuno di un piccolo campo magnetico – sono assimilabili ciascuno all'ago di una bussola che, per semplicità, assumiamo possa posizionarsi soltanto in direzione su-giù o viceversa. Sappiamo dalla termodinamica che ogni sistema fisico tende ad assestarsi nella configurazione di minima energia (si pensi al masso che rotola a valle per sbarazzarsi della propria energia potenziale o all'elettrone di un atomo eccitato che ricade sull'orbita di minor energia). I microscopici aghi tendono ad allinearsi in modo da minimizzare l'energia del sistema, ossia in modo che il polo nord di uno “veda” il polo sud del suo vicino; con questo comportamento coerente il loro effetto si somma producendo il campo magnetico macroscopico del magnete. Tuttavia, ad alte temperature l'agitazione termica produce un orientamento casuale dei singoli atomi e il materiale perde le sue proprietà magnetiche macroscopiche (FIG. 4).

Questa transizione di fase può anche essere descritta in termini di simmetria. Al di sopra della temperatura critica ogni ago microscopico punta in una direzione casuale e il sistema nella sua totalità non distingue la direzione su-giù da quella giù-su: il sistema macroscopico è dunque simmetrico rispetto a questa direzione e disordinato a livello microscopico. La simmetria si perde a temperature inferiori a quella critica, quando la maggior parte degli atomi si allinea lungo la stessa direzione, e il sistema è più ordinato. Per approfondire la relazione tra simmetria ed ordine, definiamo un parametro che descriva il grado di ordine del sistema:

$$M = (n_+ - n_-) / (n_+ + n_-).$$

Qui  $n_+$  e  $n_-$  rappresentano gli atomi che puntano, rispettivamente, in su e in giù. Il grado di magne-

tizzazione è dato dall'eccesso di atomi che puntano in una determinata direzione diviso il numero totale di atomi. Sopra la temperatura critica il disordine cresce con la temperatura, fino ad essere tale per cui  $n_+ \sim n_-$ , e dunque  $M \sim 0$ . Abbiamo già detto che il sistema tende sempre ad acquisire la minima energia possibile  $E$ ; una relazione esatta tra tale energia e  $M$  è impossibile da ottenere, data la complessità del sistema. È però possibile scrivere una relazione approssimata data da un polinomio del tipo<sup>4</sup>

$$E(M) = a_1 M + a_2 M^2 + a_3 M^3 + \dots + a_n M^n + \dots \quad (1)$$

In questa formula, tuttavia, possiamo escludere tutti i termini con  $n$  dispari. Tali termini, infatti, implicano per il sistema una diversa energia, a seconda che un ugual eccesso di atomi punti in su piuttosto che in giù (nel primo caso i termini dispari darebbero un contributo positivo, e nel secondo un contributo negativo); dal momento che le due direzioni sono equivalenti, è necessario che nell'eq. (1) siano presenti solo i termini con  $n$  pari. Inoltre, possiamo anche eliminare i termini pari con  $n > 4$  in quanto trascurabili rispetto a quelli con  $n = 2$  e  $n = 4$ . Pertanto, riscrivendo  $\alpha = a_2$  e  $\beta = a_4$  per adeguarci alla notazione convenzionale, l'eq. (1) diventa

$$E(M) = \alpha M^2 + \beta M^4. \quad (2)$$

Dal pannello in alto della FIG. 5 si capisce che  $\beta$  deve essere positivo, giacché per  $\beta$  negativo avremmo il caso, privo di significato fisico, di un sistema senza un minimo assoluto di energia. Dalla stessa figura (pannello intermedio) vediamo che per  $\alpha$  positivo l'energia presenta un unico minimo per  $M = 0$ . Invece, per  $\alpha$  negativo l'energia possiede due minimi, entrambi posizionati ad  $M \neq 0$ . L'interpretazione di questi risultati è la seguente. Sappiamo che il sistema tende sempre ad acquisire la minima energia possibile; per temperature maggiori di quella critica la magnetizzazione è assente e dunque il minimo di energia si deve realizzare per  $M = 0$ . Per temperature inferiori a quella critica, quando  $M \neq 0$ , si concretizza la situazione illustrata nel pannello in basso di FIG. 5. Dunque  $\alpha$  passa da valori positivi a valori negativi quando si verifica la transizione di fase. Durante tale transizione, il sistema,

<sup>4</sup> La funzione  $y(x)$  rappresenta una curva nel piano  $x$ - $y$ . Sotto determinate ipotesi, tale curva può essere riprodotta nell'intorno di un punto  $x_0$  come somma infinita di curve, ognuna espressa da una potenza di  $x$  (sviluppo in serie di Taylor). Ad esempio, per  $x_0 = 0$  possiamo scrivere  $y(x) = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + a_3 x^3 + \dots + a_n x^n + \dots$ , che vale per  $x < 1$ ; gli  $a_n$  sono opportuni coefficienti costanti. Dal momento che  $x < 1$ , il valore di  $x^n$  decresce rapidamente al crescere di  $n$ ; in molte applicazioni, per ottenere un'approssimazione adeguata, è sufficiente troncare la serie dopo i primi  $n$  termini, con  $n$  determinato dal grado di approssimazione richiesto. Nell'equazione per  $E(M)$  incontrata nel testo, il primo termine non è stato considerato perché quello che ci interessa è l'andamento di  $E(M)$  con  $M$ , indipendentemente dal valore costante  $a_0$ .

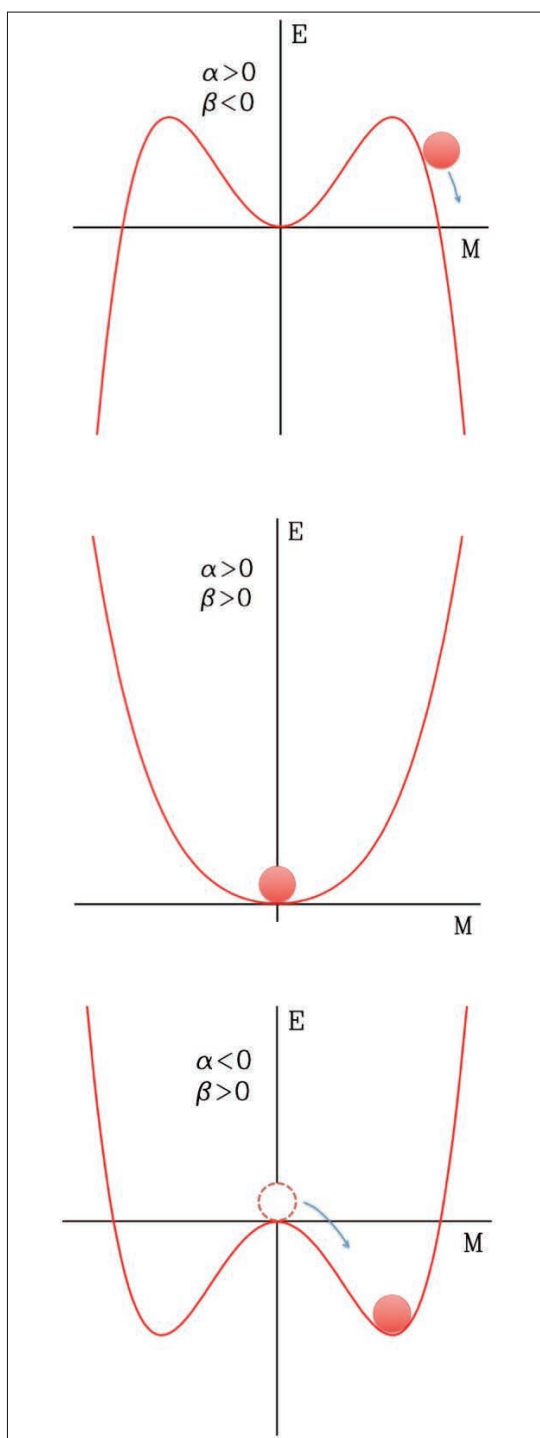


FIG. 5. Andamento dell'energia del sistema in funzione del grado di magnetizzazione. Pannello in alto: in questa configurazione il sistema (simboleggiato dalla sfera), nel tentativo di assestarsi a livelli energetici sempre più bassi, acquista una magnetizzazione sempre maggiore destinata a diventare infinita; questa soluzione matematica è dunque da escludersi per la sua inconsistenza fisica. Pannello intermedio: questa configurazione energetica descrive bene il comportamento del magnete a temperature superiori a quella critica; il sistema si assesta nel minimo di energia, in corrispondenza del quale la magnetizzazione è nulla. Pannello in basso: alla transizione di fase il sistema si ritrova in cima ad una "collina energetica" ed è "costretto" a scendere in uno dei due avvallamenti (con scelta casuale); il magnete torna in possesso di un campo magnetico il cui verso (su-giù o giù-su) dipende da quale dei due minimi viene effettivamente occupato dal sistema (nella figura è rappresentata la scelta  $M > 0$ , ma con pari probabilità il magnete può scegliere  $M < 0$ ).

che è posizionato ad  $M = 0$ , si ritrova improvvisamente su un massimo di energia invece che in un minimo. Esso allora "scivola" verso uno dei due minimi, acquisendo una magnetizzazione non nulla. I due minimi sono assolutamente equivalenti; il verso della magnetizzazione assunto dal materiale (su-giù, oppure giù-su) è dunque del tutto casuale, ed è determinato dalle fluttuazioni termiche.

È importante sottolineare il punto saliente di quanto detto fin'ora, ossia il collegamento tra transizione di fase e rottura di simmetria. Tale rottura si verifica, come abbiamo visto, per l'insorgere di un campo magnetico macroscopico che introduce una direzione privilegiata, spezzando l'equivalenza (e dunque la simmetria) tra le direzioni su-giù e giù-su e riducendo la simmetria da sferica (rotazione attorno ad un asse qualunque) a cilindrica (rotazione attorno all'asse magnetico). Ma questa rottura di simmetria spaziale ha un'origine più profonda e "nascosta" legata all'energetica del sistema. Quando quest'ultimo si raffredda, la minima energia cui esso tende si verifica per uno dei due possibili valori  $M \neq 0$ : "scegliendo" (casualmente) uno di questi due valori, il sistema provoca la perdita di simmetria.

Supponiamo infine che il campo magnetico macroscopico, invece di assumere un'unica direzione (come abbiamo imposto nel nostro modello semplificato), sia libero di orientarsi in una direzione qualsiasi su di un piano; allora il grafico dell'energia per  $\alpha < 0$  avrebbe la forma di un sombrero ed il sistema, "scivolando" casualmente in un determinato punto del "canyon" circolare, selezionerebbe una specifica direzione di magnetizzazione nel piano (FIG. 6).

Come abbiamo detto in apertura, gli argomenti appena esposti hanno validità generale. Ed in effetti, il fisico britannico Peter Higgs, adattando questi ragionamenti ai cambiamenti di fase che si ritiene si siano verificati nell'universo nei primissimi istanti della sua esistenza, ha gettato le basi per la comprensione di come la forza debole e quella elettromagnetica, oggi così diverse, siano in realtà aspetti differenti di un'unica forza, detta elettrodebole.

Il problema principale nell'elaborazione di un modello che unifichi la forza debole e quella elettromagnetica consiste nel fatto che quest'ultima è trasportata dai fotoni che, essendo stabili e privi di massa, conferiscono alla forza elettromagnetica un raggio di azione potenzialmente infinito. Al contrario, la forza debole è mediata dai bosoni W e Z, massivi e instabili, con un raggio d'azione più corto delle dimensioni di un protone. La soluzione si basa sull'ipotesi di Higgs, pubblicata nel 1964 e ripresa successivamente da Glashow, Weinberg e Salam, secondo la quale la differenziazione tra fotoni e bosoni W e Z, inizialmente assente, si verifica a

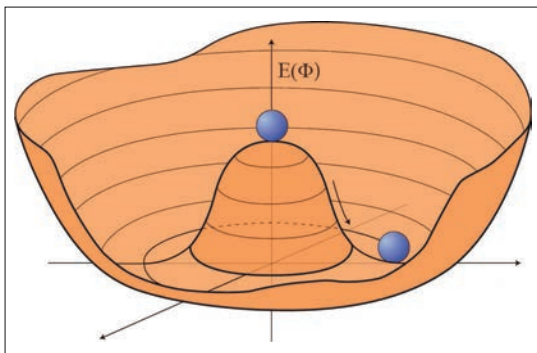


FIG. 6. Figura analoga alla FIG. 5 (pannello in basso), ma nel caso in cui il magnete possa scegliere una qualunque direzione dell'asse magnetico (rimanendo su un piano). Come nel caso unidimensionale, la distanza dell'avvallamento dal centro determina il valore della magnetizzazione. La posizione (casuale) occupata dal sistema all'interno del canale determina la direzione del campo magnetico sopra un piano. Una struttura simile vale anche per il campo di Higgs; in questo caso, la posizione finale occupata dal sistema determina la massa di tutte le particelle.

causa di una rottura di simmetria conseguente ad una transizione di fase particolare.

Higgs ipotizzò l'esistenza di un ulteriore campo  $\Phi$  (in aggiunta a quelli che caratterizzano le quattro forze fondamentali) che pervade l'intero spazio, e la cui energia si esprime in maniera del tutto analoga all'eq. (2):  $E(\Phi) = \alpha\Phi^2 + \beta\Phi^4$ . Quando l'età dell'universo era inferiore a  $10^{-11}$  secondi, e la temperatura era superiore a  $10^{15}$  gradi Kelvin, il campo di Higgs era effettivamente nullo perché, in analogia a quanto accade per la magnetizzazione, il parametro  $\alpha$  era positivo e la minima energia si realizzava per  $\Phi = 0$ . Ma il raffreddamento dell'universo conseguente alla sua espansione ha portato ad una transizione di fase, riducendo  $\alpha$  fino a renderlo negativo. L'energia del campo di Higgs ha assunto allora la struttura illustrata in FIG. 6, dando luogo ad una situazione paradossale: la minima energia non si realizza più per un valore nullo del campo, ma per uno dei valori caratterizzanti il "fondovalle" circolare. Scivolando casualmente verso uno di questi valori il campo di Higgs ha operato una rottura di simmetria in quanto ha selezionato un punto particolare tra tutti quelli (inizialmente equivalenti) del canyon.

Così come la rottura di simmetria "nascosta" nell'energetica del magnete porta ad una asimmetria "pratica" dovuta alla comparsa del campo magnetico, la rottura di simmetria del campo di Higgs ha portato ad una distinzione "tangibile" tra i va-

ri bosoni. Dal momento che la massa di queste particelle dipende dal loro grado di interazione con il campo di Higgs, evidentemente prima della transizione di fase la loro massa era nulla giacché tale campo era assente. La sua comparsa ha prodotto una distinzione tra i fotoni, che non interagiscono col campo stesso e che hanno quindi continuato ad essere privi di massa, e i bosoni W e Z, che ne hanno acquisita una. Pertanto, la forza trasportata dai fotoni ha mantenuto un raggio di azione infinito, mentre quella veicolata dai bosoni W e Z lo ha ridotto drammaticamente, "sdoppiando" la forza elettrodebole originaria in forza elettromagnetica e forza debole. La comparsa di un mare di bosoni di Higgs che pervade l'intero spazio ha naturalmente dato origine alla massa di tutte le altre particelle, siano esse "materiali" quali i quark e gli elettroni, oppure mediatrici di forze (gli altri bosoni quali i gluoni, relativamente alla forza forte, e i gravitoni, relativamente alla forza gravitazionale). La stessa massa dei bosoni di Higgs è dovuta all'interazione di ognuno di essi con gli altri circostanti.

Concludiamo queste note con un fugace accenno alle cosiddette teorie GUT (Grand Unified Theories). Il successo della teoria della forza elettrodebole ha spinto i fisici a cercare di unificare quest'ultima con la forza forte. Queste teorie GUT ipotizzano un altro campo simile a quello di Higgs i cui bosoni avrebbero masse  $10^{13}$  volte la massa del bosone di Higgs. La transizione di fase, e la associata rottura spontanea di simmetria, avverrebbero ad un'età dell'universo pari a  $10^{-35}$  secondi e a temperature  $10^{10}$  volte superiori alla temperatura critica del campo di Higgs (date le alte energie coinvolte, una verifica sperimentale di questi bosoni supermassicci è al di là delle odierne capacità). Al momento della transizione di fase cosmica, questo campo, similmente a quello di Higgs, si troverebbe in cima ad una "collina energetica"; scivolando a valle verso energie minori, il campo si sbarazzerebbe del suo surplus energetico che verrebbe utilizzato per imprimere all'espansione dell'universo un'accelerazione esponenziale, detta "inflazione". Nel breve volgere di  $10^{-35}$  secondi, l'inflazione indurrebbe una crescita del cosmo di un fattore  $10^{30}$  o più; è come se un pisello diventasse più grande dell'intero universo osservabile in un tempo pari ad un milionesimo di miliardesimo di miliardesimo di miliardesimo di un battito di ciglia. Questa fase inflazionaria risulta necessaria per porre rimedio ad alcuni aspetti insoddisfacenti della teoria classica del Big Bang. Ne parleremo nel prossimo numero.

**Annibale D'Ercole** si è laureato in Fisica all'Università di Roma "La Sapienza". Astronomo associato presso l'INAF · Osservatorio Astronomico di Bologna, si occupa di simulazioni numeriche di idrodinamica, applicate alle nebulose e al gas interstellare delle galassie. È autore di numerosi articoli divulgativi pubblicati presso questa e altre riviste.