

Le forze fondamentali e la struttura subatomica della materia

Di Daniele Gasparri

Le forze fondamentali della natura sono 4: forte, debole, elettromagnetica e gravitazionale. Solamente delle ultime due ne abbiamo esperienza diretta, mentre le prime due agiscono solo a livello subatomico. Attraverso il principio di indeterminazione, all'equivalenza massa-energia, e alle leggi di conservazione, siamo in grado di teorizzare il cosiddetto modello standard delle particelle subatomiche.

Ogni elemento presente sulla Terra e nell'Universo è composto da molecole, le quali a loro volta sono aggregati di atomi.

Descrivere qualitativamente un atomo è qualcosa di impossibile, poiché la sua struttura e il suo funzionamento sono totalmente diversi da tutte le esperienze comuni.

La parola atomo deriva dal greco e significa indivisibile. Gli antichi greci, per ragionamento deduttivo, identificarono questa entità come la più piccola possibile, raggiungibile secondo successive divisioni della materia.

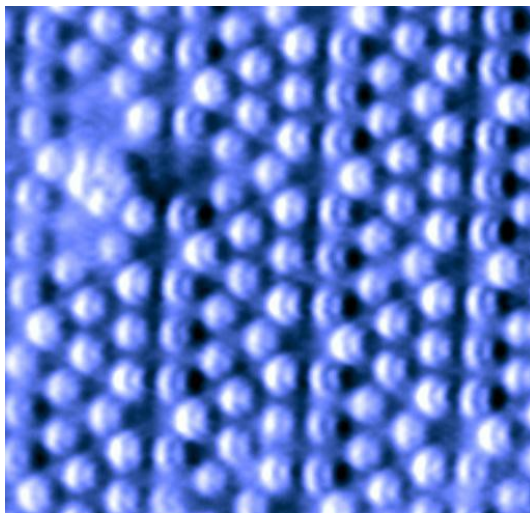
In effetti questo ragionamento filosofico non è affatto illogico. E' perfettamente possibile porsi la domanda: se si divide un sasso o un qualsiasi corpo in elementi sempre più piccoli, si arriva ad un punto nel quale la materia non si può più dividere? Si arriva ad un punto nel quale si individuano i mattoni primi della materia?

E' questo il concetto, sia pur semplificato, di atomo, come la più piccola entità costituente la materia, indivisibile per definizione.

Con lo sviluppo notevole della scienza nel diciannovesimo e ventesimo secolo, il significato della parola atomo ha trovato dei riscontri reali, misurabili ed oggettivi: l'atomo esiste davvero e con le moderne tecnologie è possibile osservarlo direttamente.

Come è fatto un atomo? E' davvero indivisibile come suggerisce il suo nome?

Inizialmente si pensava di sì, invece numerosi esperimenti hanno mostrato che l'atomo è solamente un aggregato di particelle, a loro volta formate da altre particelle, questa volta indivisibili, definite genericamente particelle elementari.



(c) 2005 University of Augsburg, Experimental Physics VI, <http://www.physik.uni-augs>

Questa immagine mostra la struttura atomica di un reticolo di un solido, ma non solo. Guardando attentamente si nota anche un accenno di struttura interna nei singoli atomi. L'atomo non è indivisibile, ma composto da altre particelle, denominate subatomiche.

Un atomo è un'entità formata da un nucleo, di dimensioni piccolissime, attorno a $10^{-15} m$ ed uno o più elettroni che in qualche modo vi si trovano intorno, in posizioni simili a delle orbite, ma mai definite (orbitali). Gli elettroni esterni definiscono i confini dell'atomo, sebbene non siano ben definiti.

L'atomo più semplice è quello di Idrogeno, formato da un nucleo composto da un protone ed un solo elettrone che in qualche modo "orbita" intorno.

Oltre il 99,99% del volume di un atomo è vuoto.

Un atomo di idrogeno ha un raggio tipico (raggio di Bohr) di $5,3 \cdot 10^{-11} m$, mentre le particelle che lo formano hanno raggi tipici dell'ordine di $10^{-15} m$ e densità elevatissime, dell'ordine di $\rho \approx 10^{14} g/cm^3$.

Sebbene il modello classico planetario sia facilmente visualizzabile, l'atomo non è un sistema solare in miniatura e gli elettroni non sono particelle ben definite che ruotano intorno al nucleo.

La struttura di un atomo non si può visualizzare correttamente perché totalmente diversa da qualsiasi situazione ed esperienza che noi uomini possiamo vivere ed osservare.

Gli elettroni e i protoni sono due particelle subatomiche, con dimensioni tipiche 10000 volte inferiori a quelle dell'atomo.

Sebbene l'idea degli antichi greci fu concettualmente corretta, gli scienziati del diciannovesimo secolo hanno avuto forse un po' troppa fretta nel definire atomo questa entità, che è solo l'inizio dell'infinitamente piccolo, la parte più grande che racchiude un mondo di particelle davvero complesso, che cercheremo di analizzare in questo paragrafo. Ogni atomo (tranne quello di idrogeno) è composto da 3 particelle subatomiche: protoni e neutroni sono confinati nel nucleo, gli elettroni si trovano intorno, posizionati in nuvole di probabilità chiamate orbitali, che possono avere forme davvero strane.

Gli elettroni sono particelle elementari o fondamentali, nel senso che non sono composte da altre particelle, non hanno cioè una struttura interna. Protoni e neutroni invece sono particelle composte. Le particelle subatomiche esistenti sono in realtà molte di più di quelle che formano un atomo; alcune sono altamente instabili ed hanno una vita media inferiore ad un milionesimo di secondo ($10^{-9} s$).

Per scoprire ed indagare le particelle subatomiche c'è essenzialmente un solo modo: far collidere a grande velocità (quindi con grande energia) particelle più grandi o già conosciute, come protoni, elettroni e neutroni, relativamente facili da trattare nei moderni acceleratori di particelle. Dall'analisi dei loro urti reciproci in funzione della loro energia, si possono individuare molte nuove particelle.

Nonostante il numero sia elevato, esse, come in ogni situazione scientifica, sono state catalogate in diversi gruppi in base a proprietà simili (massa, carica, vita media...), Questa classificazione dell'infinitamente piccolo, queste poche categorie, sono alla base della struttura e formazione di tutta la materia dell'Universo, i veri mattoni dell'Universo.

Le forze fondamentali della natura

Prima di analizzare in dettaglio le particelle subatomiche, occorre fare il punto della situazione sul “funzionamento” dell’Universo, analizzando i diversi tipi di forze che in esso vi sono.

Dalle esperienze quotidiane esistono diversi tipi di forza: la spinta di un carrello della spesa o il calcio dato ad un pallone sono due tipi di forze molto frequenti nelle comuni situazioni. Il moto stesso dei pianeti o la caduta degli oggetti sono fenomeni che si sviluppano a causa della presenza di forze. La repulsione o l’attrazione di due calamite rappresenta un altro esempio di forza.

Una forza è in generale e in parole semplici un qualcosa che causa l’accelerazione di un corpo.

Ogni forza è un’interazione che agisce su un corpo variando la sua velocità.

Osservando fenomeni molto comuni, quali l’accelerazione di una macchina, o il modo di un corpo su una circonferenza, o ancora il lancio di un sasso, ci si può chiedere, legittimamente: chi mette in moto questi corpi? Cioè, quale è la causa del moto? Dall’esperienza comune sappiamo che se lanciamo un sasso o spingiamo un carrello della spesa, questi corpi si mettono in moto, cioè subiscono un’accelerazione poiché partono da fermi e si ritrovano, dopo la spinta, con una certa velocità; in questi casi diciamo che sul corpo è stata applicata una forza, in questo caso dal nostro braccio, cioè il corpo ha interagito con un altro corpo che lo ha messo in moto. Cosa succede se non vi è interazione? Bè, la risposta è semplice: se non spingo il carrello o non lancio un sasso essi restano fermi nella posizione in cui si trovano. Siamo giunti allora ad una conclusione semplice ma efficace: se al corpo applico una spinta, una forza, esso si muove, altrimenti no.

Possiamo approfondire meglio questo discorso con altri esempi.

Potremmo questo punto chiederci se l’applicazione di una forza faccia variare solamente la velocità del corpo (ad esempio il sasso lanciato) oppure serva una forza anche per mantenere il corpo a velocità costante, come ad esempio il carrello della spesa trasportato per la strada. In effetti in questo caso se smetto di spingere esso dopo un po’ di tempo si ferma; allora serve una forza anche per mantenere un corpo a velocità costante? Sembrerebbe di sì, ma è meglio approfondire.

Consideriamo ad esempio la situazione in cui stiamo pattinando sul ghiaccio e una persona ci dà una spinta. La spinta ci fa muovere, cioè ci fa subire un’accelerazione poiché la nostra velocità passa da 0 all’istante iniziale ad un valore arbitrario dopo qualche secondo, ma quando essa finisce con essa finisce anche la nostra accelerazione; tuttavia, contrariamente al caso del carrello, noi continuiamo a muoverci per molti metri prima di fermarci (a meno di non incontrare qualche ostacolo!). Ancora più strano è il comportamento di un corpo che si muove su un cuscinetto d’aria, come ad esempio il disco posto su un tavolo di Hockey su aria come se ne trovano in molte sale giochi. Una piccola spinta al disco fermo lo mette in moto, provocando un’accelerazione che finisce quando finisce la spinta; in questo caso però il corpo non sembra rallentare, piuttosto sembra avere velocità costante e, contrariamente al carrello e al pattinatore, esso non si ferma affatto, se non quando incontra un ostacolo!

Perché le nostre 3 esperienze sono diverse?

Perché non abbiamo considerato un effetto chiamato attrito, una specie di attrazione che ogni corpo esercita sull'altro, come ad esempio le ruote del carrello che rotolano sulla strada. L'attrito è una forza a tutti gli effetti che agisce in modo contrario al moto di ogni oggetto, frenandolo fino a farlo frenare.

Se ci mettiamo nelle situazioni in cui l'attrito è quasi inesistente, come il tavolo di hockey su ghiaccio, possiamo vedere il vero comportamento di un corpo sottoposto ad una sola forza: essa, per il tempo in cui è applicata, produce un'accelerazione; quando termina, termina anche l'accelerazione ma il corpo non si ferma, piuttosto prosegue il suo percorso di moto rettilineo uniforme, cioè a velocità costante.

In assenza di attrito un corpo sul quale non agiscono forze si muove di moto rettilineo uniforme o è in quiete. Queste due possibilità non sono in contraddizione, ma dipendono dal sistema di riferimento scelto: se osservo fermo il disco scivolare sul cuscinetto d'aria, lo vedrò muoversi a velocità costante, ma se mi muovo con la stessa velocità del disco lo vedrò perfettamente fermo rispetto al mio punto di vista. Sotto il punto di vista fisico gli stati di velocità costante e quiete sono la stessa cosa solamente visti sotto diversi punti di vista, o meglio, sistemi di riferimento. D'altra parte, quando applico una forza, sia se sto seguendo il moto del disco, sia se invece lo vedo muovere a velocità costante, l'accelerazione che esso subisce è sempre la stessa per ognuno dei due punti di vista. Questi sistemi di riferimento sono detti inerziali.

Fu Newton che per primo arrivò a formulare in modo completo queste osservazioni e a trasformarle nelle sue tre famose leggi della dinamica, con l'ausilio della matematica.

Prima Legge di Newton: se su un corpo agisce una forza netta nulla esso, se in quiete vi rimane; se invece è in moto (rispetto all'osservatore) continuerà a procedere con velocità costante

Seconda Legge di Newton: Se ad un corpo in quiete o in moto (uniforme) applico una forza (ad esempio lo spingo o lo trattengo) esso subisce un'accelerazione, cioè varia la sua velocità.

Di quanto viene accelerato? L'accelerazione dipende da quanta forza applico e da quanto è massiccio il corpo. Applicando una forza X su un pallone da calcio, posso imprimergli un'accelerazione elevata e scagliarlo molto lontano; applicando la stessa forza X su una montagna non avrò lo stesso effetto: essa non si muoverà neanche di 1 mm e probabilmente mi romperò il piede! L'accelerazione quindi dipende anche dalla massa dell'oggetto. La seconda legge di Newton afferma che $\vec{F} = m\vec{a}$. La relazione scritta ci dice che ogni forza produce un'accelerazione e viceversa un'accelerazione è il risultato di qualche forza. Questa semplice legge è la base della dinamica e regola il funzionamento dell'intero Universo, dal moto di un sasso a quello dei pianeti, delle stelle e delle galassie. Questa semplice relazione è stata la scoperta più importante per almeno 300 anni, fino a quando è stata corretta (leggermente) dalla relatività di Einstein.

Il significato della massa, nella seconda legge di Newton è semplice: essa è una costante, che dipende dal corpo, che quantifica la resistenza che lo stesso oppone alla forza impressa, o in alternativa, al moto. La massa che compare nell'equazione di Newton è detta massa inerziale.

Terza legge di Newton: detta anche legge di azione-reazione è probabilmente la meno intuitiva da capire. Essa prende in considerazione due corpi in interazione (cioè che esercitano delle forze l'uno sull'altro) ed afferma che se il corpo A esercita una forza sul corpo B allora anche il corpo B esercita una forza uguale e contraria sul corpo A. Per capirla consideriamo un libro tenuto su una mano. Se lo lasciamo andare, esso cade in terra con una certa accelerazione. Poiché esso accelera la prima legge di Newton ci dice che deve essere presente una forza netta, la seconda ci dice che l'intensità della forza è data da $F = ma$ dove m è la massa del libro ed a è l'accelerazione con cui cade. Ma a cosa è dovuta questa forza? Essa la forza di gravità della Terra che tende ad attrarre verso di se ogni oggetto.

Qualsiasi corpo sulla sua superficie è soggetto alla forza di gravità e quindi ad un'accelerazione, uguale per ogni corpo, detta accelerazione di gravità, chiamata g , che vale $9,81m/s^2$. Il libro che sollevato viene poi fatto cadere, è sottoposto alla forza di gravità che produce un'accelerazione pari a g , cioè $F_{Terra} = m_{Libro}g$: la Terra esercita sul libro una forza la cui intensità è data dalla relazione appena scritta. La terza legge di Newton ci dice allora che possiamo cambiare l'ordine di causa-effetto: il libro esercita sulla Terra una forza della stessa intensità ma di verso opposto: $F_{Libro} = -m_{Terra}g$. Le due forze sono uguali, ma di segno discorde. Naturalmente, date le enormi differenze di massa, il risultato finale è che l'accelerazione del libro è migliaia di miliardi di volte maggiore di quella che subisce la Terra, per questo vedrò solo il libro cadere.

Una forza generica può essere esercitata da chiunque, sia un essere umano che lancia un sasso o traina un oggetto, sia dall'ambiente circostante. Ci sono delle forze che agiscono sempre allo stesso modo e per questo sono più semplici da studiare ed analizzare nelle comuni situazioni. In particolare ne possiamo individuare 4, ovvero la forza peso, la forza elastica, la forza centripeta e l'attrito.

In realtà il mondo è pieno di altri tipi di forze, ma tutte, comprese quelle enunciate, sono diverse manifestazioni di pochi tipi fondamentali.

Se infatti si analizza in dettaglio e in modo approfondito la natura di queste forze, si scopre ben presto che ognuna può essere raggruppata in una famiglia ristretta di 2 tipi.

La caduta di un sasso oppure il moto dei pianeti intorno al Sole sono manifestazioni diverse di una stessa forza, quella gravitazionale.

L'attrito di un corpo che scivola su una superficie o l'attrazione di due cariche elettriche o la repulsione di due calamite, sono manifestazioni di una stessa famiglia di forze, quelle causate dalla forza elettrica e magnetica, cioè elettromagnetica.

Tutte le forze che possiamo osservare nella nostra vita quotidiana sono appartenenti a questi due gruppi: gravitazionale ed elettromagnetica.

Se indaghiamo la materia più a fondo, a livello molecolare ed atomico, scopriamo altre famiglie di forze, alcune poco evidenti ma fondamentali per l'esistenza della materia stessa dell'Universo, così come la conosciamo.

Considerando, ad esempio, un atomo semplice, quello di idrogeno e visualizzandolo attraverso il comodo modello planetario, scopriamo che è la forza elettromagnetica a

tenere uniti l'elettrone, di carica negativa, e il nucleo atomico, formato da un protone, di carica positiva. La forza elettrica (quella magnetica si può trascurare ma è sempre presente!) tiene uniti nucleo ed elettrone alla stregua di quella gravitazionale per il Sole e i pianeti o le Galassie e le Stelle.

Indaghiamo ora un nucleo atomico leggermente più complesso, quello dell' Elio (${}^4\text{He}$), formato da 2 neutroni e due protoni, legati strettamente in uno spazio dell'ordine di 10^{-15} m . Siete in grado di capire cosa c'è che non va con le conoscenze attuali? Chi tiene insieme in uno spazio di 10^{-15} m metri due particelle di carica positiva?

Dalle nostre conoscenze anzi, questo sembrerebbe impossibile, poiché sappiamo che tra due qualsiasi particelle cariche esiste una forza di natura elettromagnetica, che possiamo

approssimare con la forza di Coulomb, la cui intensità è data da: $F = k \frac{q_1 q_2}{r^2}$. Possiamo

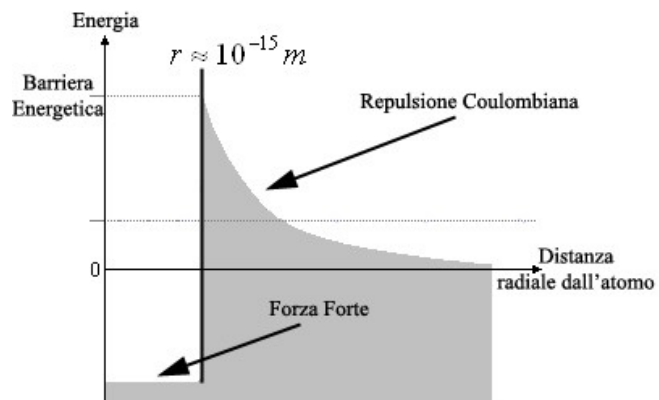
utilizzare questa relazione per calcolare, almeno in modo approssimato, la repulsione che due protoni dell'atomo di Elio sentono. La distanza è $r \approx 10^{-15} \text{ m}$, la carica è $q_1 = q_2 = +1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ (Coulomb), k è una costante che vale $k = 8,988 \cdot 10^9 \text{ Nm}^2 / \text{C}^2$. L'intensità della forza sentita da due protoni allora sarà:

$$F = 8,988 \cdot 10^9 \text{ Nm}^2 / \text{C}^2 \cdot \frac{2 \cdot 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}}{(10^{-15} \text{ m})^2} \approx 3 \cdot 10^{11} \text{ N}, \text{ cioè } 300 \text{ miliardi di Newton!!}$$

Per confronto la forza esercitata dalla Terra su una persona di media corporatura posta sulla sua superficie (forza peso) è di circa 700 Newton eppure ci sembra estremamente forte!

Se due protoni sono così vicini e sottoposti ad una così grande forza elettrica schizzerebbero immediatamente via l'uno dall'altro a velocità prossime a quelle della luce! Questo fortunatamente non succede: i nuclei atomici sono stabili e non si disintegrano sotto l'azione repulsiva dei protoni di cui sono composti.

Quale è la conclusione più logica di questa osservazione? Che a livello subatomico debba esistere un'altra forza, di natura attrattiva, superiore alla repulsione Coulombiana, in grado di tenere insieme i protoni confinati nei nuclei atomici.



Andamento (approssimato) dell'energia potenziale di un protone in funzione della distanza radiale. Fino ad una distanza di 10^{-15} m la forza di Coulomb modella il potenziale e le proprietà della particella. Oltre questa barriera la forza cambia verso e diventa circa 100 volte più intensa della repulsione colombiana.

Questa forza effettivamente esiste ed è chiamata forza forte. La sua intensità è elevatissima e riesce a vincere la repulsione colombiana e a tenere insieme i nuclei atomici.

Il suo raggio d'azione però è estremamente ridotto, dell'ordine di $10^{-15} m$. In altre parole, se due particelle si trovano a queste distanze allora la forza forte le unisce, le fonde, per formare un nucleo atomico, altrimenti, oltre questo raggio, la forza di repulsione vince e fa allontanare le particelle le une dalle altre.

Questo concetto è alla base della fusione nucleare: quando si fanno scontrare due protoni, se la loro energia (cinetica) è così elevata da portarli a distanza dell'ordine dei $10^{-15} m$ allora a questo punto la forza forte li unisce e si forma un nucleo di elio (abbiamo semplificato, trascurando i neutroni, ma il procedimento a grandi linee è questo). Se l'energia cinetica non è sufficiente, allora i due protoni si avvicinano fino ad un certo punto, poi si allontanano sotto l'azione della forza elettrica.

Esiste un altro tipo di forza che riguarda le particelle subatomiche e particolari modi di interazione e decadimento, la cosiddetta forza debole. Questa forza è alla base del decadimento neutronico (detto decadimento Beta) che trasforma un neutrone in un protone, un elettrone ed un antineutrino elettronico, alla base dei processi di fusione nucleare all'interno delle stelle.

Molti altri decadimenti sono regolati da questa forza che è alla base dello sviluppo e compressione dell'Universo stesso. Vedremo addirittura come l'abbondanza di materia sull'antimateria sia da ricondurre ad un'asimmetria nel decadimento di particelle elementari chiamati Kaoni, alla cui base c'è proprio l'interazione debole.

Nell'intero Universo, nonostante si possano osservare tantissimi fenomeni apparentemente diversi tra di loro, esistono questi 4 gruppi di forze: ogni fenomeno è regolato da una di queste interazioni, sebbene l'effetto, i corpi coinvolti e le modalità di interazione possano sembrare estremamente diverse le une dalle altre.

Ricapitolando, nell'Universo 4 interazioni fondamentali che sono:

- 1) **Interazione gravitazionale o forza di gravità.** E' la forza che regola il mondo macroscopico, fino all'intera struttura dell'Universo. Essa è sempre attrattiva ed ha un raggio d'azione infinito, poiché dipende dall'inverso del quadrato della distanza, in modo molto simile alla forza elettrica. Per due masse puntiformi o sferiche, la forza di gravità (intensità) è data da: $F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$. E' decisamente la forza più debole dell'Universo, essendo circa 10^{38} volte più debole dell'interazione forte.
- 2) **Interazione elettromagnetica o forza elettromagnetica.** E' alla base della struttura di atomi e molecole, nonché delle loro interazioni e del comportamento macroscopico di particolari oggetti, quali le pulsar o in generale il plasma, particolare stato della materia che rappresenta il 99% dell'Universo. Il plasma è un gas estremamente caldo nel quale i nuclei atomici sono separati dagli elettroni (ionizzazione). Il comportamento del plasma è descrivibile molto bene tenendo presenti le interazioni elettromagnetiche. Anche i campi magnetici di galassie,

stelle e pianeti sono causati dall'interazione elettromagnetica. Il suo raggio è infinito, ma poiché esistono cariche positive e negative, ovvero, la forza può essere attrattiva o repulsiva, essa è generalmente schermata, e la materia, nel suo complesso tende ad essere neutra, quindi relativamente insensibile a questa interazione.

- 3) **Interazione forte o forza forte.** E' la più intensa delle forze fondamentali, in grado di tenere insieme i nuclei atomici, composti da particelle con la stessa carica (protoni) in uno spazio piccolissimo, dell'ordine di $10^{-15} m$. Il suo raggio d'azione è dello stesso ordine di grandezza. E' una forza dominante nelle reazioni, nei processi di fusione e fissione nucleare e in alcuni decadimenti, insieme alla forza debole. E' circa 100 volte più intensa di quella elettromagnetica e non dipende dalla distanza (essa agisce o no, l'intensità resta costante)
- 4) **Interazione debole o forza debole.** Circa 10000 volte meno intensa della forza forte, ha un raggio d'azione inferiore a $10^{-15} m$ e regola alcuni importanti decadimenti. Non ha influenza invece sui legami nucleari, governati esclusivamente dalla forza forte.

Ad ogni interazione appena vista sono associati dei tempi tipici che dipendono dall'intensità della forza stessa.

E' infatti semplice capire che, se si portano due particelle o in generale due oggetti alla distanza di azione delle interazioni, il tempo richiesto affinché la forza agisca (ad esempio si completi una reazione, un decadimento o uno scontro tra corpi celesti) dipende dall'intensità della forza stessa.

Questo dato è molto importante perché permette, dall'analisi dei tempi, di stabilire con ragionevole certezza l'interazione responsabile di quel determinato processo.

Il tempo di azione della forza forte, la più intensa di tutte, è dell'ordine di $\tau \approx 10^{-23} s$. Una particella che ha una vita media attorno a questo valore, per poi decadere, è con ogni probabilità sottoposta all'azione della forza forte.

Il tempo di azione della forza debole è dell'ordine di $10^{-13} < \tau < 10^{-8} s$ (la notazione $a < x < b$ indica che x è compresa tra a e b . Nel nostro caso il tempo caratteristico è compreso tra 10^{-13} e 10^{-8} secondi).

Il tempo di azione della forza elettromagnetica è $10^{-20} < \tau < 10^{-14} s$ e la sua intensità è circa 100 volte inferiore a quella forte, 100 volte superiore a quella debole. Il raggio d'azione è infinito

Il tempo di azione della forza di gravità invece è dell'ordine degli anni, con un raggio infinito.

Queste interazioni, apparentemente molto diverse le une dalle altre nell'Universo così come lo conosciamo ora, hanno invece molte cose in comune, tanto che diverse teorie, suffragate da molti esperimenti, teorizzano l'unificazione di queste forze sotto particolari condizioni.

In altre parole, aumentando l'energia, la temperatura, quindi la densità, è possibile che queste 4 forze si raggruppino, diventino la stessa cosa, un'unica grande forza.

L'unificazione delle forze è spesso un concetto oscuro e molto astratto, ma non è così. La prima grande opera di unificazione fu fatta da Maxwell, quando osservando fenomeni elettrici e magnetici, che producevano apparentemente effetti e forze indipendenti l'uno dall'altro, si accorse che in realtà erano tutte appartenenti alla stessa famiglia delle interazioni elettromagnetiche.

Gli esperimenti di Oersted e Faraday dimostrarono infatti che fenomeni magnetici possono generare campi elettrici e fenomeni elettrici possono generare campi magnetici, quindi l'interazione elettrica e magnetica sono collegate, come lo stesso Maxwell arrivò a teorizzare qualche anno più tardi. La teoria elettromagnetica, come visto nelle pagine precedenti, è alla base dello sviluppo della relatività ristretta di Einstein.

Da quella unificazione un po' casuale, gli scienziati del ventesimo secolo si sono chiesti se sotto certe condizioni le altre interazioni della Natura possano essere accorpate, unite sotto una teoria che le descrivesse tutte, invece di considerarle come entità indipendenti le une dalle altre.

In effetti nel 1979 si arrivò a teorizzare che la forza debole e quella elettromagnetica sono in realtà manifestazioni diverse di una stessa interazione, chiamata forza elettrodebole, quando le energie delle particelle sono piuttosto elevate.

Questo fatto curioso fu dimostrato studiando le collisioni tra particelle con elevate energie, notando che il comportamento della forza elettromagnetica e debole, per queste energie, è esattamente lo stesso.

Le particelle di campo

Come funzionano le quattro interazioni fondamentali a livello atomico e subatomico?

Ogni forza agisce a distanza su almeno due corpi, ma cosa succede realmente? Come è possibile che un corpo senta l'attrazione o la repulsione di un altro sebbene non sia in contatto? Come è possibile ad esempio che il Sole eserciti una forza sulla Terra se in mezzo c'è praticamente uno spazio vuoto? Come si esercita fisicamente un'interazione?

Il discorso è un po' complicato e richiede nozioni di meccanica quantistica che non verranno date in queste pagine. Per cercare di capirlo possiamo vedere alcune esperienze.

Al tempo di Newton c'era il concetto semplice e per nulla approfondito di azione a distanza.

Con lo sviluppo della teoria elettromagnetica fu introdotta la nozione di campo.

Ogni corpo produce un campo, una modificazione dello spazio secondo le sue proprietà e il tipo di interazione in grado di sviluppare. Due particelle quindi interagiscono tra di loro a causa del campo da esse generato. L'interazione non è tra particelle ma tra campi.

Con lo sviluppo della teoria quantistica si rivoluzionò di nuovo il meccanismo di interazione. I campi, concetti piuttosto astratti fino a quel momento, sono trasportati da altre particelle elementari, dette quanti di quel campo o semplicemente particelle di campo.

In parole semplici, quando due particelle interagiscono, esse, a seconda del tipo di interazione, si scambiano altre particelle che hanno il compito di trasmettere il campo da esse generato, una sorta di postini che trasportano l'informazione della particella.

Quando due particelle interagiscono possiamo affermare allora che una emette i quanti di campo e l'altra li assorbe.

Questi quanti, piuttosto astratti e difficili da capire, esistono, e l'esempio migliore è il fotone, cioè i quanti scambiati dalle interazioni elettromagnetiche.

L'interazione elettromagnetica tra due particelle può essere vista in termini di emissione e assorbimento di fotoni, i quanti del campo elettromagnetico.

Tutti i campi, originati dai 4 tipi di interazioni fondamentali, hanno le loro particelle di campo; molti sono stati già osservati, alcuni solamente teorizzati.

Può sembrare strano e sicuramente contro intuitivo pensare che due particelle interagiscono emettendo a loro volta altre particelle con energia, quindi massa, non nulla. Ci si potrebbe chiedere: ma il principio di conservazione dell'energia? Come è possibile non violarlo?

La risposta è molto profonda e complessa.

Il mondo della meccanica quantistica che indaga, per ora, l'infinitamente piccolo, è quanto di più lontano dall'esperienza comune possa esserci, per questo di difficile comprensione.

Nella prima metà del ventesimo secolo (1927) il fisico Werner Heisenberg formulò il famoso principio di indeterminazione, applicato al mondo delle particelle atomiche e subatomiche.

Negli anni successivi questo principio venne chiarito e modificato ed ora esso è un teorema dimostrabile con i postulati della meccanica quantistica, che noi non indagheremo.

Il principio di indeterminazione afferma che per una particella è impossibile conoscere simultaneamente, con una precisione arbitraria, una coppia di grandezze legate, le più importanti sono la posizione e la quantità di moto, ovvero la velocità.

In altre parole questo prelude al fatto, messo in evidenza anche da De Broglie, che le particelle hanno un comportamento duale, sia corpuscolare che ondulatorio. Poiché esse si comportano anche come delle onde, è impossibile stabilirne con estrema precisione la posizione e la velocità: le particelle sono delle entità definite fino ad una certa precisione.

Nella forma matematica, il principio di indeterminazione afferma che: $\Delta x \Delta p \geq \frac{h}{4\pi}$, dove

Δx è l'errore sulla posizione, Δp quello sulla quantità di moto ($\vec{p} = m\vec{v}$) e h è detta costante di Planck $h = 6,6260689633 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$ (Joule per secondi). Come già detto, è **impossibile determinare simultaneamente la posizione e la velocità di una particella**

con una precisione migliore di $\frac{h}{4\pi}$.

Il principio è valido anche per la coppia energia-intervallo di tempo: $\Delta E \Delta t \geq \frac{h}{2\pi} \rightarrow$

$\Delta E \geq \frac{h}{2\pi \Delta t}$. In parole semplici, è impossibile determinare, con una precisione illimitata sia l'energia sia la coordinata temporale della particella. In altre parole l'energia di una particella non è conosciuta e non è possibile conoscere in modo migliore di $\frac{h}{2\pi \Delta t}$.

Minore è l'intervallo di tempo, maggiore è l'incertezza sull'energia della particella. Un'incertezza maggiore sull'intervallo di tempo, invece, consente di migliorare la precisione dell'energia.

Δt può essere anche identificato come la durata di una determinata osservazione e con questo concetto possiamo vedere come il principio di conservazione dell'energia resti salvo, perché nell'intervallo di tempo Δt l'energia della particella ha un'incertezza ΔE . Questo significa che se il tempo di osservazione è abbastanza breve, l'incertezza nella misura dell'energia della particelle può essere abbastanza grande da consentire l'esistenza di particelle di scambio massive senza violare il principio di conservazione dell'energia. Vediamo un caso concreto.

L'interazione forte, quella presente ad esempio tra due protoni in un nucleo di Elio, è mediata da delle particelle dette pioni. In pratica un protone emette pioni e l'altro li assorbe e in questo modo viene trasmesso il campo di forza.

I pioni esistono veramente e sono stati scoperti negli acceleratori di particelle, alla stregua dei fotoni, mediatori del campo elettromagnetico. L'energia a riposo dei pioni è di 140 Mev (Mega elettronvolt), allora possiamo fare il seguente esempio:

Quale è il massimo intervallo di tempo durante il quale possiamo misurare l'energia a riposo di un protone con un'incertezza pari all'energia a riposo di un pione?

Il principio di indeterminazione ci viene incontro in questo facile calcolo: $\Delta E \geq \frac{h}{2\pi \Delta t}$ il

tempo massimo si avrà per: $\Delta E = \frac{h}{2\pi \Delta t}$. L'energia a riposo di un pione sarà data dalla

formula di Einstein: $\Delta E = m_\pi c^2$. Invertendo la relazione del principio di indeterminazione e sostituendo l'energia a riposo del pione (π) il tempo diventa:

$\Delta t = \frac{h}{2\pi \Delta E} = \frac{h}{2\pi m_\pi c^2}$. Sostituendo tutte le variabili, con $h = 4,14 \cdot 10^{-15} eV \cdot s$ e

$\Delta E = m_\pi c^2 = 140 MeV$ si ricava: $\Delta t = 4,7 \cdot 10^{-24} s$. Entro questo intervallo di tempo l'incertezza nella conoscenza dell'energia del protone è così elevata da permettere ad esso di emettere un pione senza violare il principio di conservazione dell'energia, semplicemente perché l'incertezza snella conoscenza della sua energia è elevata.

Se il pione viaggia a velocità prossima a quella della luce, il suo tragitto massimo sarà dato da: $d = c \Delta t = 1,4 \cdot 10^{-15} m$ che è proprio il raggio d'azione della forza forte!

Due protoni posti entro queste distanze, possono interagire tra di loro con forza forte, attraverso lo scambio di pioni.

L'antimateria e le antiparticelle

La materia ordinaria, dalle stelle ad un sasso posto sulla superficie terrestre, è formata, a livello microscopico, da molecole, le quali sono formate da atomi più o meno complessi, ma tutti composti da un nucleo positivo contenente protoni (carica uguale e contraria a quella dell'elettrone) e neutroni (elettricamente neutri). Attorno al nucleo, in una zona di spazio assimilabile in modo piuttosto rozzo a delle orbite planetarie, si trovano gli elettroni, particelle elementari con carica negativa, in numero uguale ai protoni del nucleo, in modo che la carica totale dell'atomo risulti nulla.

Queste sono le esperienze che noi abbiamo fatto sul nostro pianeta, la Terra. Se usciamo fuori da questa visione limitata, frutto delle indagini nel nostro mondo, che non necessariamente rispecchia tutti i fenomeni possibili nell'Universo, possiamo porci una semplice domanda: perché la materia è fatta in questo modo? Ovvero, perché il nucleo atomico è sempre positivo e gli elettroni hanno sempre carica negativa? E? così in tutto l'Universo?

Se siamo di mentalità abbastanza aperta, possiamo porci una domanda successiva: Esistono atomi fatti al contrario? Cioè, è possibile che esista un protone con carica negativa ed un elettrone con carica positiva?

In fondo, perché la materia deve essere fatta rigorosamente in questo modo? Chi o cosa ha deciso eventualmente così?

Alcune persone vi risponderanno con teorie filosofico-religiose, noi cerchiamo di indagare con gli strumenti della scienza, cercando di fornire, per quanto possibile, risposte oggettive e provabili con le misurazioni.

Nella prima metà del novecento un gruppo di scienziati si pose esattamente queste domande e arrivò ad ipotizzare che non c'è motivo alcuno per il quale nell'Universo non debba esistere anche l'antimateria, cioè materia "fatta al contrario".

L'antimateria, almeno a livello teorico, è tutta quella materia formata da antiparticelle, cioè particelle con massa esattamente uguale ma altre caratteristiche, come la carica, opposte rispetto alla materia ordinaria.

Se esiste un elettrone con una certa massa e carica negativa, perché non deve esistere anche un antielettrone, cioè un positrone, identico all'elettrone ma con carica positiva?

E perché non deve esistere un antiprotone, con massa identica ma carica opposta al protone?

Cosa vieta nell'Universo l'esistenza di antiparticelle, quindi di antiatomi, ergo di antimateria?

Apparentemente nessuna legge fisica allora scoperta vietava l'esistenza di questa particolare materia.

Fu così che partirono speculazioni teoriche e successivi esperimenti che confermarono l'esistenza dell'antimateria.

La prima particella di antimateria è stata scoperta nel 1932 da Carl David Anderson, dopo essere stata teorizzata da Paul Dirac (1928). Il positrone, cioè un elettrone con carica positiva, fu scoperto analizzando i raggi cosmici impattanti gli strati superiori dell'atmosfera terrestre. Da quel momento l'antimateria divenne non più un'ipotesi teorica quasi esotica, ma un fatto reale.

Ora sappiamo che il positrone è relativamente facile da generare ed è prodotto anche nei processi di decadimento radioattivo.

Successivamente alla scoperta del positrone, altre antiparticelle furono teorizzate e poi scoperte. Ora sappiamo che **ogni particella dell'Universo ha la sua antiparticella**.

Ogni particella ha una propria antiparticella, cioè una particella con la stessa massa ma numeri quantici diversi.

I numeri quantici sono valori discreti (interi) che identificano alcune proprietà delle particelle, come la carica elettrica, lo spin, cioè la rotazione (verso ed intensità) e, nel caso dei barioni, il numero barionico, un valore che assume +1 per le particelle e -1 per le antiparticelle e che viene conservato in ogni interazione e decadimento.

Se ci sono particelle con numeri quantici tutti nulli, come il fotone, allora l'antiparticella coincide con la particella.

Quando un'antiparticella incontra la relativa particella, avviene un fenomeno strano, detto annichilazione: le due particelle si trasformano completamente in energia, sottoforma di fotoni gamma, secondo la relazione di Einstein $E = mc^2$.

Il processo di annichilazione tra materia ed antimateria è sicuramente il più efficiente meccanismo di produzione dell'energia, in quanto tutta la massa iniziale viene trasformata, con un rendimento pari ad 1. A titolo di esempio, le reazioni di fusione nucleare tra due atomi di idrogeno hanno un rendimento dello 0,7%, cioè solo il 7 per mille della massa delle particelle coinvolte (protoni) viene trasformata in energia.

Se paragoniamo questo rendimento a quello del petrolio, la situazione diventa imbarazzante: 1 Kg di materia che si annichila con 1 Kg di antimateria produce un'energia di circa $E \approx 2 \cdot 10^{17} J$. La fusione di 1 Kg di idrogeno produce un'energia di $E \approx 2,5 \cdot 10^{15} J$. Il bruciamento di 1 Kg di petrolio produce un'energia di $E \approx 4,2 \cdot 10^7 J$, cioè quasi 100 milioni di volte meno della fusione nucleare e 10 miliardi in meno dell'annichilazione materia-antimateria.

Sfortunatamente nell'Universo l'antimateria non esiste allo stato libero e sfruttarla per processi energetici efficienti non è possibile. Produrla e poi sfruttarla per generare energia è chiaramente improponibile, perché per il principio di conservazione dell'energia, per produrre un elettrone ed un positrone occorre fornire un'energia almeno uguale a quella che compete alla loro massa a riposo, cioè 1,022 MeV.

Concentriamoci per un momento su questo ultimo punto. Se nell'Universo l'antimateria non sembra esistere se non in casi isolati (raggi cosmici), si aprono a questo punto due domande:

1) Perché non esiste l'antimateria e c'è solo la materia?

2) Come si produce l'antimateria?

Al punto primo non risponderemo, in quanto il problema è ancora aperto ed esula dal tema di questo articolo. Si ipotizza che nei primi secondi di vita dell'Universo esisteva la continua produzione di materia ed antimateria, a partire dalla radiazione. Il fatto che oggi osserviamo solamente materia è da imputare, a quanto pare, al differente comportamento dell'antimateria rispetto alla materia per certe proprietà. La cosiddetta rottura della simmetria CP (Carica e Parità) tra materia e antimateria ha prodotto un leggero eccesso (1 parte su 1 miliardo) di materia rispetto all'antimateria nei primi minuti di vita dell'Universo, lasciando un ambiente con una leggera abbondanza di materia e pressoché privo di antimateria, perché annichilatasi con una quantità esattamente uguale di materia. Per quanto riguarda il punto 2, la risposta la potreste già conoscere.

Se escludiamo i processi di decadimento che effettivamente riescono a produrre alcune particelle di antimateria (perlopiù positroni ed antineutrini), la produzione di antimateria parte dal processo contrario a quello di annichilazione.

Quando una particella incontra la relativa antiparticella, esse scompaiono e si formano fotoni. Nel caso dell'elettrone e del positrone questa interazione si scrive nel seguente modo: $e^+ + e^- \rightarrow \gamma + \gamma$ dove $\gamma + \gamma = 2\gamma$ sono 2 fotoni di lunghezza d'onda gamma, la cui energia è naturalmente uguale, per il principio di conservazione, all'energia a riposo delle particelle annichilate, cioè $0,511MeV$ ciascuno.

Se particella e antiparticella possiedono anche una notevole energia cinetica, allora i fotoni di annichilazione devono contenere anche questa energia, oltre quella a riposo.

La risposta alla nostra domanda, ovvero come si produce l'antimateria, è contenuta nella relazione che descrive il processo di annichilazione. La reazione $e^+ + e^- \rightarrow \gamma + \gamma$ è, infatti, invertibile, poiché nessun principio fisico lo vieta: questo è il modo più semplice ed intuitivo per produrre antimateria.

Il realtà non è così semplice, poiché due fotoni gamma non producono antimateria se non interagiscono con altre particelle o atomi che fanno da "catalizzatori" o "attivatori", altrimenti l'Universo, che pullula di raggi gamma, diventerebbe un'immensa reazione a catena con la continua comparsa di antimateria e successiva annichilazione a contatto con la materia.

La produzione di antimateria parte da almeno un fotone gamma di energia sufficiente a formare la coppia particella-antiparticella, il quale interagisce con la materia. Ad esempio, quando un fotone gamma di energia di almeno $1,022MeV$ urta contro un bersaglio, generalmente un reticolo di Berillio, esso colpisce un nucleo atomico, il quale devia il fotone e lo divide in due fotoni gamma che vanno a produrre una coppia elettrone-positrone.

Questi processi sono chiamati produzione di coppie, perché a partire da energia (fotoni gamma) si forma sempre una particella e la relativa antiparticella.

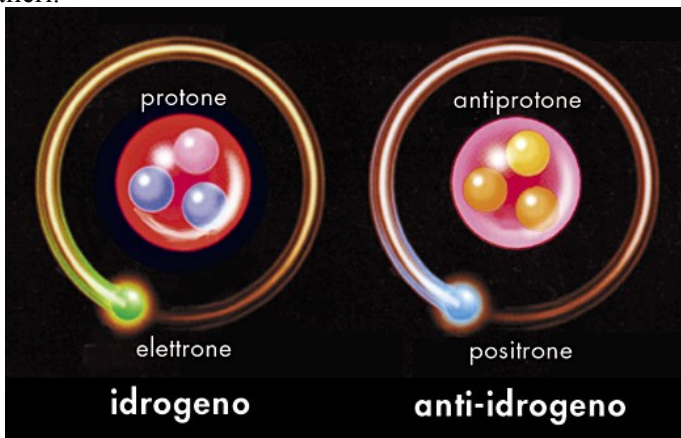
Per energie di $1,9GeV$ si ha la produzione di protoni-antiprotoni e così via: l'energia della radiazione richiesta è almeno uguale a quella a riposo della coppia particella-antiparticella che si vuole formare.

Negli acceleratori di particelle si riescono effettivamente a creare particelle di antimateria, le quali, dopo pochissimi istanti, incontrando la rispettiva particella si annichilano.

In ogni caso il fatto che si tratti di un fenomeno raro che dura per miliardesimi di secondo non attenua in alcun modo la validità e la realtà dell'antimateria.

Alcune antiparticelle sono utilizzate anche nei laboratori medici per effettuare alcuni esami come il PET, la Tomografia ad Emissione di Positroni, un esame utilizzato per ottenere immagini ad alta definizione degli organi interni dei pazienti, ormai largamente praticata in molti centri ospedalieri.

Come la materia, anche le particelle di antimateria possono formare aggregati più complessi, come gli antiatomi; questo è stato provato nel 1999 quando al CERN di Ginevra un gruppo internazionale di ricercatori ha creato circa 50000 antiatomi di idrogeno, composti cioè da un antiprotone ed un positrone.



A titolo di curiosità, è stato creato anche un atomo (protonio, instabile) un po'

Un atomo di anti-idrogeno funziona allo stesso modo di un atomo di idrogeno, solamente che è composto da anti-particelle. Non c'è alcuna differenza a livello fisico.

particolare, formato da un protone ed un antiprotone. La sinterizzazione di questa specie atomica è stata la prova che materia ed antimateria possono interagire anche ad un livello diverso oltre al fenomeno già descritto dell'annichilazione.

Famiglie di particelle e antiparticelle

Le particelle subatomiche sono numerose ed è lungo e noioso, nonché privo di senso, elencarle tutte.

Come in ogni ambito della natura, gli scienziati le hanno raggruppate secondo classi che racchiudono proprietà comuni.

Inizialmente il fattore discriminante fu la massa. Successivamente la classificazione prese in esame caratteristiche più significative, come ad esempio il tipo di interazione alle quali sono sottoposte, o lo spin, un numero che rappresenta il momento angolare delle particelle, ovvero, in modo un po' approssimato, il modo di rotazione attorno al proprio asse.

Esistono due principali famiglie di particelle subatomiche: adroni e leptoni.

Gli **adroni** sono particelle composite, ovvero con una struttura interna, suddivise in **barioni e mesoni**.

I barioni sono particelle che interagiscono attraverso la forza forte, con spin semintero. A questa classe fanno parte i protoni (P) ed i neutroni (n), oltre ad un grande numero di particelle, tutte con vita media compresa tra 10^{-12} e 10^{-10} secondi.

L'unico barione stabile nel tempo è il protone, con una vita media sicuramente maggiore di 10^{33} anni.

Il neutrone è stabile solo quando confinato nei nuclei atomici, altrimenti ha una vita media di 887 secondi, cioè circa 15 minuti, prima di decadere attraverso il decadimento beta, attivato dalla forza debole: $n \rightarrow e^- + p + \bar{\nu}_e$ dove e^- è un elettrone e $\bar{\nu}_e$ un antineutrino elettronico, che presto analizzeremo brevemente.

I mesoni sono tutte particelle instabili, generalmente prodotto di processi causati dall'interazione forte. I mesoni prodotti decadono in altri mesoni o in altre famiglie di particelle.

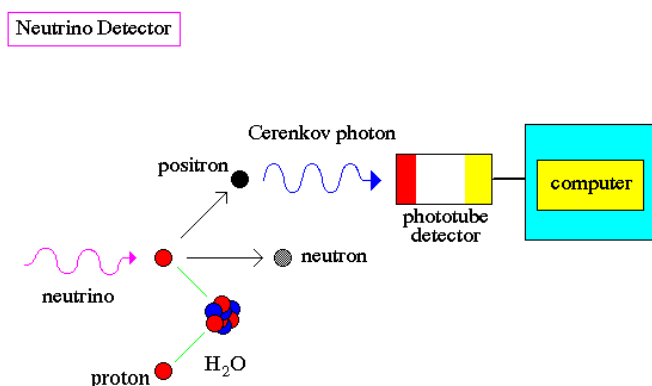
I **leptoni** sono particelle fondamentali, cioè senza struttura interna, che interagiscono solamente attraverso l'interazione debole ed elettromagnetica, mai con quella forte, alla quale sono del tutto insensibili. Il leptone più famoso è sicuramente l'elettrone e la relativa antiparticella (positrone). Al momento sono 6 i tipi di leptoni conosciuti, ognuno dei quali forma una coppia composta dalla particella, con carica negativa, e dal relativo neutrino, molto meno massiccio e con carica nulla. All'elettrone, ad esempio, è associato il neutrino di tipo elettronico (ν_e), mentre al muone (μ^-) quello di tipo muonico (ν_μ); alla particella Tau (τ^-) quello tauonico (ν_τ).

I **neutrini** sono in assoluto le particelle più elusive e strane dell'Universo.

Esse sono prodotte da processi di decadimento nucleare, come quello beta, che porta al decadimento del neutrone. Si tratta di particelle che interagiscono pochissimo con la materia, tanto che il loro cammino libero medio è dell'ordine degli anni luce, ovvero un neutrino percorre in media qualche anno luce prima di interagire con la materia.

Ad esempio, il libero cammino medio di un neutrino in acqua è di circa $\approx 1,7 \cdot 10^{17} m$ cioè circa 18 anni luce! Nel piombo, uno dei materiali più densi, il libero cammino medio dei neutrini si abbassa di un fattore 10, cioè a circa 2 anni luce! In altre parole, per rilevare un neutrino utilizzando un serbatoio di acqua di 1 metro cubo, occorre un flusso di almeno 10^{17} neutrini!

Il Sole, data la vicinanza, è la più forte sorgente stabile di neutrini, molti generati dalla prima reazione della



Schema per la rilevazione dei neutrini. Un neutrino urta un protone di una molecola d'acqua. L'urto produce un neutrone ed un positrone. Il positrone, muovendosi ad una velocità maggiore di quella della luce nel mezzo (acqua) emette radiazione Cerenkov, la quale viene rilevata da un fototubo e analizzata da un computer.

catena protone-protone (decadimento beta): $p + p \rightarrow d + e^+ + \nu_e$. I neutrini di tipo elettronico prodotti nel nucleo, al contrario della radiazione elettromagnetica, riescono a sfuggirvi senza praticamente interagire con la materia, seppur densissima, del nocciolo solare, liberandosi nello spazio e raggiungendo anche la Terra.

Lo studio dei neutrini è fondamentale ed è l'unico strumento in grado di farci studiare l'interno del nostro Sole e delle stelle in generale, poiché è l'unica informazione che proviene in modo diretto ed inalterato dalle zone nucleari.

Rilevare i neutrini non è per niente semplice ed occorrono rivelatori davvero giganteschi, come il Super-Kamiokande, in Giappone, un immenso serbatoio contenente 50000 tonnellate di acqua, il cui il compito è di rilevare il passaggio di neutrini quando essi interagiscono con le molecole d'acqua.

Con questo apparato è stato in effetti possibile misurare il flusso di neutrini solari ed avere finalmente le prime prove a sostegno di teorie fisiche e astrofisiche riguardanti le stelle, il loro funzionamento e la struttura e comportamento stesso dei neutrini.

Si può rilevare la presenza di una particella solamente quando essa interagisce con il nostro apparato di misurazione o, in generale, con altra materia. Se non c'è interazione non c'è misurazione, quindi non esiste rilevazione, anche se ciò chiaramente non esclude la presenza di tali tipi di particelle.

I neutrini sono così debolmente interagenti che solamente uno ogni 10 miliardi, di quelli che attraversano l'intero diametro terrestre, interagisce con un protone o un neutrone, sempre attraverso l'interazione debole. Gli altri attraversano il nostro pianeta (e noi stessi) senza sentire la presenza della materia di cui è fatto. Si capisce come sia estremamente difficile costruire apparati di rilevazione efficienti.

Ad ogni leptone è associato un neutrino; la differenza tra in tre "sapori" diversi (flavour in inglese) è sostanzialmente nella massa, che secondo le recenti teorie ed esperimenti, condotti proprio al Super-Kamiokande, è compresa tra 100000 e 1 milione di volte minore di quella dell'elettrone, quindi dell'ordine di qualche elettronvolt.

Il decadimento o la formazione di leptoni è sempre accompagnato da neutrini del tipo leptonico interessato. Non troverete mai, ad esempio un neutrino di tipo muonico nel decadimento beta, nel quale viene prodotto un positrone, quindi un neutrino di tipo elettronico. Contrariamente ai leptoni ai quali sono associati, i neutrini dei 3 sapori diversi sono tutti stabili, con vita media molto maggiore dell'età dell'Universo.

Le ultime osservazioni e conteggi dei neutrini solari, suggeriscono che i tre tipi diversi di neutrini non sono poi così indipendenti l'uno dall'altro. La teoria prevede che se essi sono dotati di massa, come si pensa, possono cambiare sapore, trasformarsi cioè in ognuno dei tre tipi finora scoperti.

Questa possibilità è l'unica che fornisce una spiegazione al cosiddetto e famoso problema dei neutrini solari: solamente 1/3 dei neutrini elettronici prodotti dal Sole sono stati effettivamente osservati e misurati; degli altri non si ha traccia. Si pensa che nel loro tragitto verso la Terra (essi si muovono a velocità molto prossime a quelle della luce), alcuni di essi cambino sapore, trasformandosi in neutrini muonici o tauonici.

In effetti, benché non si sia assistito direttamente a nessun evento di trasformazione, o meglio, di oscillazione del neutrino, la prima prova, seppure indiretta, è stata fornita nel 1999, dal solito rivelatore Super-Kamiokande, con il seguente esperimento.

Negli strati superiori dell'atmosfera, l'impatto di raggi cosmici, cioè particelle alpha (nuclei di elio), protoni, elettroni e fotoni gamma, produce particelle tau che a loro volta decadono in elettroni e neutrini muonici. Se si considera il flusso di raggi cosmici costante su tutta la superficie terrestre, il numero di neutrini muonici osservato dovrebbe essere lo stesso in ogni direzione. Ebbene, il numero di neutrini muonici osservati provenienti dagli strati posti sopra l'osservatore differisce dal numero proveniente dalla parte opposta del globo terrestre. Poiché i neutrini attraversano la Terra praticamente senza interagire, non si spiega in alcun modo questa differente popolazione, se non con il fatto che durante il maggior tragitto effettuato dai neutrini provenienti dalla parte opposta del globo, alcuni di essi abbiano oscillato, cambiando in questo modo tipo (o sapore).

Ultimo, ma non per importanza, dato l'altissimo numero di neutrini presenti nell'Universo e prodotti dalle stelle, la misurazione esatta della loro massa potrebbe dare una mano concreta al conteggio della materia dell'Universo e a definire meglio quale teoria cosmologica descrive meglio la passata, l'attuale e la futura storia, forma e sorte dell'Universo.

Le **particelle di campo**, già descritte in precedenza, sono particelle elementari che hanno il compito di trasportare le 4 interazioni fondamentali, o meglio, di trasportare il campo a loro associato. La particella di campo più famosa è sicuramente il fotone, mediatore dell'interazione elettromagnetica. Il fotone ha massa a riposo e carica nulla e viaggia sempre alla velocità della luce.

L'antiparticella del fotone è il fotone stesso, quindi esse coincidono.

Per le altre 3 interazioni fondamentali troviamo altre particelle, alcune già scoperte, altre solamente teorizzate.

Le particelle di campo sono anche chiamate bosoni, perché esse rispondono alla statistica di Bose-Einstein, cioè hanno un comportamento statistico molto diverso rispetto a tutte le altre.

I mediatori della forza debole furono scoperti nel 1983 da un gruppo di ricercatori, tra i quali l'italiano Carlo Rubbia.

La teoria prevedeva che queste particelle, per energia dell'ordine di 100GeV , potevano essere rilevate ed avere un comportamento simile a quello dei fotoni ad alta energia (raggi gamma). In effetti fu proprio studiando urti ed interazioni tra particelle con energie così elevate che furono scoperti i bosoni W^+ , W^- , Z^0 mediatori della forza debole, detti per questo bosoni deboli. W^+ e W^- hanno carica rispettivamente +1 e -1 (rispetto all'elettrone) ed energie a riposo (cioè massa) di $80,4\text{GeV}$, mentre Z^0 è neutro ed ha una massa a riposo di $91,2\text{GeV}$.

Sempre all'inizio degli anni ottanta furono trovate le prime prove dell'esistenza del gluone, particella di campo responsabile della trasmissione della forza forte, quella che tiene insieme i nucleoni (protoni e neutroni) nei nuclei atomici.

Il gluone (g) è simile al fotone, non avendo carica, e con un'energia a riposo nulla, cioè senza massa.

L'unica particella di campo ancora non scoperta è quella portatrice della forza di gravità, chiamata gravitone.

Il gravitone si ipotizza essere una particella con massa e carica nulla, ma fino ad ora non è stata mai osservata, questo fondamentalmente perché la forza di gravità nel mondo subatomico è estremamente debole, quindi difficile da osservare e studiare.

Non c'è motivo alcuno però, per escludere la presenza dei gravitoni, preludio ad una spiegazione quantistica della gravità, simile a quella data per l'elettromagnetismo e le altre due interazioni fondamentali. Il fatto che ancora non si sia scoperta questa particella non esclude che essa non debba esistere. Anzi, la sua non esistenza sarebbe una forte eccezione alle teorie finora proposte e alle osservazioni fatte delle altre interazioni fondamentali.

Gli adroni sono divisi in mesoni e barioni; a questi ultimi appartengono il protone e il neutrone. Tutti gli adroni sono particelle composite, cioè formate da altre particelle, questa volta elementari, chiamate **quark**.

L'esistenza di una struttura interna per gli adroni fu proposta su base teorica nel 1964 indipendentemente da due fisici: Murray Gell-Mann e George Zweig. I due scienziati analizzarono bene il comportamento dei processi nei quali erano coinvolti barioni e mesoni e scoprirono. Queste particelle, durante le interazioni e i decadimenti, sono soggette a due principi di conservazione: la carica elettrica (Q) e la stranezza (S). La stranezza, termine abbastanza curioso, è un numero quantico che contiene in se delle regole per le quali in natura certe reazioni possono o non possono avvenire.

In altre parole, osservando molti processi di decadimento ed interazione tra nucleoni, soggetti all'interazione forte, fu osservato che alcune combinazioni, sebbene teoricamente ammesse, non si verificavano. A questo punto fu introdotto, per spiegare i fatti sperimentali, il numero quantico della stranezza, che in qualche modo doveva regolare questi processi ad interazione forte. Esso fu legato agli altri numeri quantici già esistenti come la carica e il numero barionico. In effetti, le interazioni tra mesoni e barioni sono regolate da tre leggi di conservazione:

- 1) conservazione della carica: in ogni processo la carica totale resta costante
- 2) Conservazione del numero barionico: in ogni processo il numero totale dei barioni resta costante
- 3) Conservazione della stranezza.

Non c'è bisogno di indagare oltre, ma solo capire che l'introduzione di numeri quantici, cioè di numeri che descrivono qualche proprietà di una famiglia di particelle, è fatta in base agli esperimenti osservati. Le proprietà da essi racchiuse devono giustificare le osservazioni.

Nel caso della stranezza, non importa sapere cosa essa sia, perché è impossibile da immaginare. Essa è semplicemente una proprietà che spiega perché in natura avvengono certe reazioni ed altre no. Senza l'introduzione della stranezza, la teoria avrebbe previsto decadimenti che in realtà non sarebbero stati possibili.

Negli anni 60 del ventesimo secolo fu notato come la stranezza, il numero barionico e la carica fossero collegati da una relazione semplice: $Q = I_3 + \frac{B + S}{2}$ dove Q è la carica elettrica, I_3 un numero quantico chiamato isospin, che non ci interessa, B è il numero barionico ed S la stranezza.

Questa relazione tra carica (Q) e stranezza (S) ci dice che non sono possibili tutte le combinazioni tra queste due grandezze, anzi, che esse sono legate.

Il fatto che esiste questa relazione e valori di carica e stranezza ben definiti, portò ad ipotizzare che mesoni e barioni, cioè gli adroni, siano particelle composite, formate da unità più piccole la cui combinazione, secondo certe regole, spiega la relazione tra carica e stranezza.

Queste particelle furono chiamate quark e furono effettivamente scoperte attraverso esperimenti di diffusione sui nucleoni, nei quali si osserva una struttura interna costituita da tre entità puntiformi con le proprietà previste dal modello.

L'esistenza e le proprietà dei quark sono state prima teorizzate e poi il modello è stato posto a severe verifiche che ha superato tutte con estremo successo, anzi, è riuscito a prevedere comportamenti e proprietà di particelle scoperte dopo la sua enunciazione! Il modello di quark oggi accettato prevede l'esistenza di 6 particelle fondamentali, chiamate convenzionalmente Up (u), Down (d), Top (t), Bottom (b), Strange (s) e Charm (c). I nomi sono stati volutamente assegnati in modo semplice e piuttosto buffo; d'altra parte è più semplice ed utile catalogare gli oggetti con nomi divertenti per farli ricordare meglio, tanto sicuramente, le proprietà che descrivono non dipendono dal nome con il quale vengono identificati!

Secondo il modello standard, la materia adronica, composta da barioni e mesoni, è formata da combinazioni dei 6 quark e i relativi antiquark; in totale una combinazione di 12 particelle elementari, che combinandosi attraverso la forza forte danno vita a Protoni, Neutroni e tutte le altre particelle appartenenti al gruppo degli adroni.

I quark non sono mai stati osservati allo stato libero ma sempre uniti ad altri a formare le particelle già descritte. Tutte le particelle composite sono formate da combinazioni di 2 (mesoni) o 3 (barioni) quark e/o antiquark.

Esse sono particelle piuttosto strane, con una carica frazionaria rispetto a quella dell'elettrone; forse proprio per questo motivo non sembra possano esistere isolati, ma a gruppi a formare particelle con carica intera (l'elettrone rappresenta anche il quanto di carica, cioè la carica minima possibile in Natura e questa sembra essere una legge ben provata).

Con la teorizzazione e la scoperta dei quark, abbiamo finalmente concluso il nostro modello elementare della materia:

- 1) La materia si divide in 3 grandi categorie: leptoni, adroni e particelle di campo
- 2) I leptoni sono particelle fondamentali che interagiscono solamente tramite forze deboli ed elettromagnetiche. Questa famiglia è composta da 3 particelle cariche: elettrone, muone e tauone e i relativi neutrini, particelle con massa molto piccola e carica nulla, che interagiscono pochissimo con la materia

- 3) Gli adroni sono particelle composite. Ogni adrone è formato da una combinazione di 2 quark (e/o antiquark) e allora prende il nome di mesone, o di 3 quark, portando alla nascita dei barioni, famiglia alla quale appartengono i nucleoni, cioè le particelle presenti nei nuclei atomici: protoni e neutroni
- 4) Le particelle di campo, dette anche bosoni, sono particelle fondamentali che hanno il compito di trasferire il campo associato alle 4 interazioni fondamentali. Esse possono essere pensate come trasportatrici dell'informazione in merito alle interazioni fondamentali presenti in natura

THE STANDARD MODEL						
		Fermions			Bosons	
Quarks		u up	c charm	t top	γ photon	Force carriers
		d down	s strange	b bottom	Z Z boson	
Leptons		ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	W W boson	
		e electron	μ muon	τ tau	g gluon	
		Higgs* Higgs boson				

*Yet to be confirmed

Source: AAAS

Il modello standard delle particelle elementari. Tutta la materia è costituita da quark e leptoni, che interagiscono tra di loro attraverso le 4 interazioni fondamentali, scambiandosi bosoni, le particelle di campo ad esse associate. Il modello standard non assegna massa alle particelle. Questa proprietà si pensa sia data da un campo, detto campo di Higgs al quale è associata una particella, detta bosone di Higgs. Il campo di Higgs permea tutto l'Universo e conferisce massa ad ogni particella elementare.

Questo è il cosiddetto modello standard della materia.

Tutta la materia dell'Universo è composta da particelle fondamentali, dette fermioni, che interagiscono tra di loro attraverso le 4 forze fondamentali, scambiandosi particelle di campo (anche esse elementari) chiamate bosoni.

Gli stessi nucleoni, cioè i protoni e i neutroni, costituenti di ogni atomo, sono combinazioni di 3 quark. In particolare un protone è composto da due quark Up e da uno Down. Il neutrone è formato da due quark Down ed uno Up. Tutti i barioni sono formati da 3 quark. Tutti i mesoni sono formati da 2 quark (e/o relativi antiquark). Mesoni e barioni fanno parte della famiglia degli adroni.

Possiamo dividere la materia in altre due grandi categorie, in base a delle proprietà che assumono le particelle quando si trovano raggruppate tra di loro, o in altre parole, in base al loro comportamento statistico: fermioni e bosoni.

I fermioni, in onore al grande fisico italiano Enrico Fermi, sono tutte le particelle fondamentali e quindi anche quelle composite (barioni e mesoni). Esse obbediscono al principio di esclusione di Pauli.

Tutti i fermioni possiedono infatti uno spin semi-intero. Come già accennato, lo spin di una particella è il suo momento angolare; in parole semplici esso ci identifica la rotazione della particella attorno al proprio asse (intensità, direzione e verso). Nel mondo subnucleare e nucleare, lo spin delle particelle ha un valore minimo discreto, cioè fissato; un'unità fondamentale alla stregua del metro o centimetro, base per tutti gli altri valori.

Questo fatto succede molto spesso: le orbite degli elettroni attorno ai nuclei hanno raggi definiti multipli di un raggio fondamentale; un fotone può avere solamente un'energia multiplo di una quantità fondamentale; la carica elettrica può assumere solo valori multipli di un'unità fondamentale, che è quella dell'elettrone.

Nel caso dello spin non si ha eccezione: le particelle della natura non possono avere un valore di momento angolare arbitrario, ma multiplo intero o semi-intero rispetto ad un valore fondamentale, definito come $\frac{h}{2\pi} = \hbar$. Ogni particella della natura può assumere

valori di spin maggiori o uguali di questa quantità, secondo multipli interi ($0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm n\hbar$) o semi-interi ($0, \pm \frac{1}{2}, \pm \frac{3}{2}, \dots, \pm (2n+1)\frac{\hbar}{2}$).

Tutti i quark e i leptoni sono particelle con spin semi-interi ed obbediscono al principio di esclusione di Pauli, quindi sono classificate come fermioni. Il loro comportamento è descritto da una relazione di tipo statistico (cioè di gruppo) della statistica di Fermi-Dirac. Tutte le altre particelle che non vi obbediscono, cioè tutte e sole quelle di campo, sono dette bosoni, poiché obbediscono ad un comportamento statistico definito dalla statistica di Bose-Einstein e non al principio di esclusione di Pauli.

Il principio di esclusione di Pauli è fondamentale per descrivere l'intero Universo, dal comportamento e struttura dell'atomo, all'esistenza di nane bianche e stelle di neutroni, oggetti frutto dell'evoluzione finale di quasi tutte le stelle dell'Universo.

Il principio, afferma che due particelle, due fermioni, non possono occupare lo stesso stato quantico. In uno stesso stato quantico possono esserci al massimo due fermioni, a patto che abbiano spin opposto.

Il principio è meglio intuibile considerando gli elettroni ed un semplice modello atomico. Sappiamo che gli elettroni si trovano in qualche modo attorno al nucleo, occupando percorsi simili ad orbite, con un ben determinato raggio ed energia. Queste orbite, o meglio porzioni di spazio, sono definite orbitali.

In un orbitale il principio di esclusione di Pauli dice che ci possono essere al massimo due elettroni, a patto che abbiano spin (cioè rotazione) opposta. Nessuna altra combinazione è possibile.

Consideriamo ad esempio un atomo di elio, composto da un nucleo formato da due protoni e due neutroni (Elio 4, esiste anche l'Elio 3 formato da un solo neutrone) e da due elettroni che si posizionano nell'orbita con minore energia, cioè quella più vicina al nucleo. Il principio di Pauli dice che essi possono condividere la stessa orbita solo se

ruotano in versi opposti (spin contrario). Se consideriamo un atomo di litio, composto da 3 elettroni, è impossibile che essi condividano la stessa orbita, lo stesso orbitale. Mai in Natura potrà verificarsi una cosa del genere. Due elettroni, con spin opposti, occuperanno l'orbita più interna, il terzo si andrà a posizionare sull'orbita immediatamente vicina (in termini di energia) a quella più interna.

Possiamo proseguire la trattazione aumentando a piacere il numero degli elettroni, ma il risultato non cambia: la struttura di un atomo è definita dal principio di Pauli: gli elettroni si sistemano su orbite via via più esterne, al massimo a gruppi di due, dando una struttura e un raggio definiti ad ogni atomo che diventa praticamente incompressibile.

Il Principio di Pauli è reale e misurabile e riesce a spiegare fenomeni molto importanti come le nane bianche e le stelle di neutroni, essendo di fatto, l'unico meccanismo che impedisce a questi oggetti estremamente compatti di collassare completamente.

Solamente quando la massa è enorme il principio di Pauli non è più sufficiente a contrastare il collasso gravitazionale e ad impedire la comparsa di un buco nero.

Il campo e il bosone di Higgs

Il modello particellare appena descritto e confermato quasi interamente per via sperimentale (ad eccezione del gravitone), si chiama modello standard e fu proposto per la prima volta negli anni 70.

Il modello così espresso funziona quasi alla perfezione.

Le particelle fondamentali sono i mattoni di tutta la materia.

La combinazione dei quark dà luogo ai nucleoni, costituenti primi dei nuclei atomici.

Un protone è costituito, ad esempio, da due quark up ed uno down; un neutrone è formato da due quark down ed uno up. La loro combinazione produce i nuclei atomici, tenuti insieme dalla forza forte, aiutati dalla forza debole responsabile di alcuni processi fondamentali, come il decadimento beta e, in generale, molti processi radioattivi.

La combinazione dei nuclei atomici con gli elettroni dà vita agli atomi, grazie alla forza elettromagnetica. Gli atomi si combinano e danno origine a molecole, le quali danno vita a strutture più grandi, fino ai pianeti e le stelle, regolati dalla forza di gravitazione.

Le particelle fondamentali, quindi tutta la materia in generale, risentono di 4 interazioni fondamentali. Le particelle interagiscono le une con le altre attraverso lo scambio di altre particelle, responsabili della propagazione del campo associato ad una determinata interazione. Così, ad esempio, i quark per costituire un protone o un neutrone attraverso la forza forte si scambiano continuamente gluoni. Nuclei atomici ed elettroni, nel momento in cui si combinano a formare l'atomo a causa della forza elettromagnetica, si scambiano fotoni, le particelle di campo associate a questa interazione.

Possiamo affermare, quindi, che le particelle fondamentali, costituenti della materia, per parlarsi, quindi interagire le une con le altre per mezzo delle quattro interazioni, le 4 "lingue" che conoscono, utilizzano le particelle di campo, lettere e parole di ogni alfabeto.

Fin qui tutto bene, tuttavia esistono dei problemi. Se escludiamo quelli relativi alla formulazione di una teoria quantistica che descriva correttamente la gravità e l'esistenza, per ora solo teorica, del gravitone, il problema maggiore è un altro.

Tutte le equazioni che descrivono il modello standard, quindi le famiglie di particelle, e le loro proprietà, quali lo spin e la carica, nonché il modo in cui esse interagiscono, hanno una grande lacuna: non sono in grado di descrivere la massa, o meglio, la teoria non include la massa delle particelle. La teoria delle particelle afferma, anzi, che le particelle non dovrebbero avere massa. Se si introduce un termine che dia questa informazione, le equazioni perdono di significato e tutto il modello crolla su se stesso.

Questa sembra essere una grande contraddizione: tutta la materia ha massa, anche le stesse particelle, la cui massa è stata misurata sperimentalmente. Allora, come è possibile che il modello standard preveda così bene tutti i comportamenti osservati ma vada in crisi su una grandezza così fondamentale quanto palesemente reale?

L'imbarazzo era notevole ai tempi dell'enunciazione del modello standard, tanto che si pensava che esso andasse totalmente riscritto o comunque pesantemente modificato, fino all'intuizione del Fisico britannico Peter Higgs. Egli sembrò aver risolto il problema della massa, affermando che il modello standard era corretto ma incompleto.

Effettivamente la mancanza della massa nel modello che descrive le proprietà delle particelle è corretta, poiché essa è una proprietà esterna ad esse, associata ad un campo, analogo a quello responsabile delle 4 interazioni fondamentali, detto campo di Higgs.

E' difficile descrivere il campo di Higgs; una trattazione approfondita richiederebbe nozioni superiori di matematica e fisica quantistica, per questo mi limiterò solamente a dire di cosa si tratta e come può essere immaginato.

Secondo la teoria attuale, le particelle in se non contengono massa; questa è una quantità che emerge in quanto esse si muovono attraverso un campo, il campo di Higgs.

Il campo di Higgs può essere immaginato come una fitta trama gelatinosa che permea tutto lo spazio, nella quale le particelle, prive di massa, si muovono, ma per qualche motivo incontrano una resistenza al moto. Questa resistenza ha lo stesso effetto di una massa inerziale, definita proprio a partire dalla resistenza che essa esercita alla variazione dello stato di moto (seconda legge di Newton).

Introducendo in termini matematici l'idea di questo campo di Higgs ed integrandola al modello standard, al quale non compete la massa delle particelle, il tutto sembra funzionare alla perfezione.

Il modello standard descrive le particelle e le loro proprietà, ad esclusione della massa, la quale non è una proprietà intrinseca delle particelle, piuttosto il risultato della loro interazione con il campo di Higgs, ovvero con la resistenza che esse incontrano muovendosi in questo reticolo.

Alla stregua di ogni campo che descrive una qualsiasi interazione, si suppone che anche il campo di Higgs abbia dei portatori di informazione, dei bosoni chiamati, appunto, bosoni di Higgs.

Qui la teoria non sembra ancora essere d'accordo.

Il modello standard, che descrive le particelle fondamentali, richiede solamente un tipo di bosone di Higgs per funzionare. Tuttavia, l'esistenza nell'Universo della materia oscura, di cui non si conosce ancora l'origine, presuppone l'esistenza di più bosoni di Higgs, ognuno dei quali agisce su un tipo di materia.

Il bosone di Higgs, a prescindere dai sapori che può assumere (alla stregua dei sapori dei quark) è una particella fondamentale, chiamata addirittura la particella di Dio. Se essa venisse confermata, avremmo raggiunto un'ottima conoscenza dei costituenti primi della materia e di come funziona il mondo, dall'infinitamente piccolo all'infinitamente grande. Attualmente la gran parte degli sforzi dei fisici delle particelle si rivolge verso la rilevazione sperimentale di questa particella, che si pensa avere una massa non più grande di $m \approx 200\text{GeV} \approx 3,5 \cdot 10^{-25} \text{Kg}$, circa 200 volte maggiore della massa del protone.

Per rilevare la sua presenza occorre che gli acceleratori di particelle siano in grado di raggiungere questa energia.

Questa energia è alla portata del nuovo acceleratore LHC (Large Hadron Collider) di Ginevra e del Fermilab di Chicago.

Si spera, nell'immediato futuro, di riuscire a rilevare con assoluta certezza questa particella e confermare in questo modo la teoria del nuovo modello standard.

Fino ad ora ci sono stati degli eventi, delle collisioni, che sembrano mostrare l'evidenza di questa elusiva particella, ma il loro numero è troppo esiguo e l'interpretazione non sembra essere univoca.

Occorrerà aspettare l'immediato futuro per conoscere risposta a queste domande, e sapere, con certezza, se la particella di Dio esiste veramente.