

FISICA DELLE PARTICELLE,

CERN

E

ORIZZONTI DELLA FISICA MODERNA

Indice

- **Introduzione**_____pag.2
- **Forze fondamentali e GTU**_____pag.3
 - Forze fondamentali e unificazione delle forze
 - GTU
- **Fisica delle particelle**_____pag.11
 - Storia ed evoluzione
 - Fisica delle particelle
 - Quark e Leptoni
 - Il modello standard
 - Costanti della fisica
 - Antimateria
- **Il Cern**_____pag.26
 - Storia
 - Lo scopo
 - Successi scientifici
 - Premi nobel
 - World Wide Web
- **Acceleratori di particelle**_____pag.34
 - Acceleratori elettrostatici
 - Acceleratori circolari
 - Acceleratori lineari
 - Anelli di accumulazione
- **Acceleratori al CERN**_____pag.42
 - LEP
 - LHC
 - ATLAS
 - CMS
 - ALICE
 - LHCb
 - Bosone di Higgs
 - Risultati dell'LHC
 - Pericolosità
- **Conclusione**_____pag.56
- **Bibliografia/Sitografia**_____pag.60

INTRODUZIONE

Il 10 settembre 2008 l'acceleratore di particelle LHC realizzato dal CERN di Ginevra, dopo 20 anni di duro lavoro che ha coinvolto un team di migliaia di ricercatori, fisici, ingegneri e tecnici, provenienti da tutto il mondo, era pronto a dare il via al più grande esperimento di fisica delle particelle mai realizzato. Dai dati ricavati dall'esperienza ad alte energie di LHC, i fisici speravano di trovare le risposte ad importanti interrogativi sull'origine dell'Universo ed in particolare sui primi istanti di vita del cosmo dopo il Big Bang.

Sfortunatamente, qualche giorno dopo l'avvio dell'LHC, l'esperimento si è dovuto interrompere a causa di un incidente nell'acceleratore.

Dopo questo fatto, giornali e televisioni hanno cominciato a dedicare approfondimenti agli studi effettuati al CERN e ai possibili effetti negativi che questi avrebbero potuto causare nell'universo, come la possibile creazione di buchi neri.

A tal proposito, abbiamo deciso di esaminare l'argomento ripercorrendo la storia della Fisica delle particelle dalle sue origini fino al recente esperimento del CERN, fornendo un breve quadro dello studio della fisica dei quanti, dell'antimateria e delle costanti della fisica, passando attraverso lo studio del funzionamento degli acceleratori di particelle e delle principali componenti della materia finora scoperte che sono entrate a far parte del modello standard.

FORZE FONDAMENTALI E GTU

Forze fondamentali e unificazione delle forze

Le forze di cui abbiamo esperienza sono molto diverse le une dalle altre e sembrano di difficile classificazione: si può pensare alla forza di gravità, alla forza del vento che muove le onde del mare, alla forza muscolare, alla forza con cui una calamita attira oggetti di ferro, alle spaventose forze messe in gioco da un'esplosione termonucleare...

Un enorme successo della fisica è quello di essere riuscita a ridurre la complessità del problema, arrivando ad individuare poche forze fondamentali responsabili di tutti i processi che avvengono in natura: la forza gravitazionale, la forza elettromagnetica, la forza nucleare debole e quella nucleare forte.

Il loro effetto è quello di attirare o respingere, ma mentre l'influsso di gravità e di elettromagnetismo si estende all'infinito, le altre due agiscono soltanto entro i ristretti confini del nucleo atomico.

Sono le forze a plasmare il mondo e a produrre i cambiamenti che osserviamo. Sono loro a dirigere qualsiasi processo fisico, chimico o biologico. Alcune forze agiscono per contatto, mentre altre, come la Luna sulle maree, paiono agire a distanza attraverso uno spazio vuoto.

L'unificazione delle forze ha in realtà richiesto un lungo processo di secoli. La prima grande unificazione fu fatta da Isaac Newton alla fine del XVII secolo: Newton stabilisce che un'unica forza, la forza di gravitazione universale, è responsabile di fenomeni apparentemente tanto diversi come la caduta dei corpi sulla Terra e il moto dei pianeti intorno al Sole

Nella seconda metà del XIX secolo, James Maxwell dimostrò che la forza elettrica che agisce su corpi carichi e la forza magnetica con cui una calamita attrae una sbarretta di ferro sono in realtà manifestazioni di un'unica forza, la forza elettromagnetica.

A partire dai primi anni del XX secolo, lo sviluppo sia teorico che sperimentale della fisica atomica e nucleare ha dimostrato l'esistenza di altre due forze fondamentali: la forza debole che interviene nei processi di decadimento radioattivo e la forza forte, responsabile della stabilità del nucleo atomico.

È storia recente l'unificazione della forza nucleare debole con la forza elettromagnetica (forza elettrodebole), prevista teoricamente da Steven Weinberg ed Abdus Salam negli anni '60 e dimostrata

sperimentalmente da Carlo Rubbia nel 1984.

Attualmente la frontiera della ricerca fisica è il tentativo, ancora vano, di raggiungere l'ulteriore unificazione delle forze, per arrivare ad un'unica forza di cui tutte le altre siano una manifestazione particolare. L'intensità della forza è massima per la nucleare forte: ponendo arbitrariamente questa forza uguale ad 1, la forza elettromagnetica ha una intensità 1/100 della forza forte, la nucleare debole oscilla tra valori comunque molto bassi, mentre la forza gravitazionale è di gran lunga la più debole di tutte le forze.

Per quanto riguarda il raggio d'azione, la forza gravitazionale e quella elettromagnetica fanno sentire i loro effetti a grandissima distanza (teoricamente infinita), mentre le forze nucleari hanno un piccolo raggio d'azione che, per la nucleare forte, è delle dimensioni del nucleo atomico e, per la nucleare debole, è ancora minore.

Infine, per quanto riguarda le particelle coinvolte, si passa dalla forza gravitazionale con selettività nulla poiché coinvolge tutti i tipi di particelle, alla nucleare forte che è la più selettiva in quanto coinvolge solo i cosiddetti adroni (protone, neutrone e mesoni). L'ipotetica forza, responsabile di tutti i fenomeni naturali, è detta supergravità.

Le quattro forze fondamentali (gravità, forza debole, forza elettromagnetica e forza forte) tenendo insieme le particelle e facendole interagire fra loro, danno forma alla materia e all'universo. Ognuna di esse è trasmessa da particelle molto particolari, chiamate bosoni, che vivono giusto il tempo di portare l'informazione da una particella materiale all'altra. La gravità è la forza più debole; viene trasmessa dal gravitone (particella non ancora rivelata sperimentalmente) ed è legata alla massa gravitazionale dei corpi. La forza più intensa è la forza forte, trasmessa dal gluone, che agisce dentro il nucleo, fra i quark che formano protoni e neutroni.

Di intensità intermedia sono la forza elettromagnetica, che agisce a livello atomico, e la forza debole, responsabile dei decadimenti radioattivi e di alcune reazioni nucleari che si compiono all'interno delle stelle: queste due forze, come fu dimostrato da Abdus Salam, Steven Weinberg e Sheldon Glashow (premi Nobel per la fisica nel 1979), sono due diversi modi di manifestarsi del medesimo tipo di interazione, la forza Elettrodebole.

In fisica, forse, è meglio parlare di "interazione" e non di forza, perché ci sono sempre almeno due "soggetti": quello che esercita la forza e quello che la subisce.

La forza gravitazionale

La gravità è la più familiare delle forze, essendo quella che ci tiene con i piedi per terra. Benché l'uomo ne sia sempre stato consapevole, il suo ruolo come forza della natura non è stato pienamente riconosciuto fino alla pubblicazione della teoria della gravitazione di Newton, alla fine del Seicento. Prima era diffusa l'idea aristotelica secondo cui tutti i corpi tendono al loro "luogo naturale". Che per i solidi e i liquidi è la terra e per questo cadono, mentre per i gas è il cielo, per cui salgono. Con Newton il motore del movimento diventa la gravità e la massa è la proprietà di ogni corpo che lo rende sensibile ad essa: più un corpo ha massa e più attrae altri corpi dotati di massa.

La legge è quella della gravitazione universale di Newton:

$$F = (GMm) / r^2$$

La forza elettromagnetica

La forza elettromagnetica è la seconda delle quattro in familiarità. E' la forza che governa tutte le comodità della vita moderna: luce, tv, telefono, computer... ma è nota all'uomo fin dai primordi grazie ai fulmini. Inoltre, si sapeva da millenni che alcuni materiali, come il vetro e l'ambra, emanano una forza d'attrazione se li si strofina. Solo nel Settecento, però, l'americano Benjamin Franklin comprese che lo strofinio carica elettricamente i corpi.

La carica elettrica gioca, infatti, lo stesso ruolo della massa per la gravità: determina quanto un corpo sia sensibile alla forza elettromagnetica, cioè quanto sia attratto o respinto da altri corpi carichi. Il fisico Coulomb riuscì a calcolare questa forza di attrazione/repulsione e stabilì che è possibile calcolarla per mezzo della formula:

$$F = k \frac{|q_1||q_2|}{d^2} \quad \text{dove} \quad k = \frac{1}{4\pi\epsilon}$$

Fino allora, forza elettrica e forza magnetica (quella esercitata dalle calamite e da altri materiali magnetizzati) erano però ritenute due fenomeni distinti. Finché nel 1820 il danese Christian Oersted ipotizzò che elettricità e magnetismo fossero intercambiabili e mostrò che un filo percorso da corrente elettrica agisce come un magnete, influenzando le bussole. Nel 1831, l'inglese Michael Faraday verificò l'opposto, cioè che dal movimento di un magnete si ricava corrente.

Fu poi James Clerk Maxwell nel 1873 a trovare anche la conferma matematica: un insieme di equazioni che descrivono contemporaneamente il comportamento di elettricità e magnetismo.

EQUAZIONI DI MAXWELL:

$$\Phi_s(\vec{E}) = \frac{\sum q_{\text{int}}}{\epsilon_0}$$

$$\Phi_s(\vec{B}) = 0$$

$$C_\gamma(\vec{B}) = \mu_0 i_{\text{conc}} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\Delta \Phi_s(\vec{E})}{\Delta t}$$

$$C_\gamma(\vec{E}) = -\frac{\Delta \Phi_s(\vec{B})}{\Delta t}$$

Interazione nucleare debole

È responsabile di alcuni decadimenti radioattivi della materia. Spiega dei fenomeni che accadono all'interno dei nuclei che non sarebbero spiegabili con la teoria nucleare classica (ad esempio, nel decadimento beta, sembrerebbe che ci sia un elettrone che, ad un certo punto, "emerge" da un nucleo che invece, come tutti sanno, contiene solo protoni e neutroni). È in base a questa interazione che "funzionano" le stelle.

Interazione nucleare forte

È l'interazione che permette ai nuclei di esistere. Come farebbero altrimenti tanti protoni nei nuclei a stare legati, a dispetto della repulsione elettrostatica che dovrebbero subire? La teoria che descrive tutto ciò è quella della cromodinamica quantistica, che si fonda sull'esistenza dei sei tipi di quark, ciascuno dei quali possiede tre cosiddette "cariche di colore", che interagiscono proprio attraverso la forza forte.

Le forze nucleari forte e debole ci sono meno familiari perché a differenza di gravità ed elettromagnetismo, la cui influenza si estende all'infinito, il loro raggio d'azione è limitato alle dimensioni dei nuclei atomici. Più in là non sono avvertibili. Ecco perché queste due forze sono state scoperte solo recentemente. D'altra parte, finché si pensava che il nucleo atomico fosse fatto di protoni (con carica positiva) e di elettroni (con carica negativa) sembrava

ragionevole supporre che la reciproca attrazione elettromagnetica bastasse a spiegare la stabilità del nucleo: dopo il 1930, però, quando il modello di atomo ispirato da Rutherford e Bohr fu definitivamente accettato (un nucleo di protoni e neutroni attorno al quale ruotano gli elettroni), si dovette riconoscere con sgomento che non si sapeva spiegare cosa tenesse insieme il nucleo: i protoni si sarebbero dovuti infatti respingere tra loro. Poiché l'interazione gravitazionale era troppo debole perché abbia degli effetti su scala atomica, si concluse che doveva esistere un'interazione nucleare ancora sconosciuta ma molto intensa, che per questo fu battezzata "forza forte". È questa forza a cortissimo raggio che tiene uniti i quark all'interno dei protoni e dei neutroni, e riesce a tenere stipati insieme protoni e neutroni nei nuclei atomici.

Quando normalmente si parla di forza si tende sempre a pensare a questi enti come a cose che "spingono" o "tirano" gli oggetti nello spazio. Inoltre si identifica in genere la forza con la cosiddetta "interazione a distanza" cioè con il concetto per cui gli oggetti fisici fanno sentire la propria presenza agli altri oggetti per via quasi mistica, nel senso che la forza agisce istantaneamente ad ogni distanza. Invece quando si vanno ad analizzare le interazioni (che sarebbe il termine moderno che viene generalmente preferito al suo sinonimo "forza") in ambito quantistico-relativistico, si scopre che le interazioni che si manifestano tra le particelle sono generate da uno scambio di altre particelle dette bosoni mediatori. Inoltre si scopre che a livello quantistico le forze possono provocare effetti diversi dal semplice modificare il moto di un oggetto, ma possono indurre delle vere e proprie trasformazioni, per esempio i gluoni fanno cambiare colore ai quark che li emettono e li ricevono. Le interazioni si manifestano tramite scambio di determinate particelle: per esempio la forza elettromagnetica è trasportata da fotoni, e, in particolare, l'elettrone dell'atomo di idrogeno sente il campo elettromagnetico generato dal protone del nucleo perché viene continuamente urtato dai fotoni mediatori emessi dal nucleo. La stessa cosa accade per le due forze nucleari, la forza forte si sente tramite lo scambio di gluoni da parte dei quark, mentre la forza debole si sente tramite lo scambio dei suoi propri bosoni mediatori che vengono chiamati W^+ , W^- , e Z^0 (che si leggono doppiavù-più, doppiavù-meno e zeta-zero). La differenza sostanziale sta nel fatto che, dato che le interazioni nucleari si esplicano solo a brevissima distanza, non abbiamo una descrizione macroscopica di queste forze in termini di vettori e di "spinte", perché non c'è mai stato bisogno di introdurle

e sarebbe anche sbagliato usarle perchè in nessun caso le interazioni nucleari si comportano come delle forze classiche.

Teoria	Interazione	Mediatore	Magnitudine relativa	Andamento asintotico	Raggio d'azione
Cromodinamica quantistica	Forza nucleare forte	gluone	10^{38}	r^0	$1,4 \cdot 10^{-15} \text{ m}$
Elettromagnetismo	Interazione elettromagnetica	fotone	10^{36}	$1/r^2$	∞
Teoria dell'interazione debole	Interazione debole	Bosoni Z, W+ e W-	10^{25}	$\frac{e^{-Mr}}{r}$	10^{-18} m
Teoria della relatività generale	Gravità	gravitone	10^0	$1/r^2$	∞

Teoria di grande unificazione

Uno degli scopi della fisica è di riportare teorie che sembrano non collegate tra loro ad un'unica e semplice teoria unificata. Il vantaggio di una teoria unificata rispetto a molte teorie frammentate è che una teoria unificata offre una spiegazione più elegante dei dati e può indicare nuove aree di studio.

Il Modello standard è una teoria che descrive tutte le particelle elementari ad oggi note e tre delle quattro forze fondamentali note, ossia le interazioni forti, quelle elettromagnetiche e quelle deboli. Si tratta di una teoria di campo quantistica, coerente sia con la meccanica quantistica che con la relatività speciale.

Attualmente, le previsioni del Modello standard sono state in larga parte verificate sperimentalmente con un'ottima precisione.

Tuttavia non può essere considerato una teoria completa delle interazioni fondamentali in quanto non comprende la gravità per la quale non esiste ad oggi una teoria quantistica coerente.

Oggi, uno degli scopi principali della fisica è quello di trovare un'unione delle quattro forze fondamentali (elettromagnetica, gravitazionale, nucleare forte e debole) in una "teoria di grande unificazione" (G.T.U.). Per ora siamo riusciti a trovare una teoria che unifichi le due forze nucleari e quella elettromagnetica, ma non ancora quella gravitazionale.

Negli ultimi anni della sua vita, Einstein tentò di scrivere una teoria che unificasse la gravità con altre teorie, ma i tempi non erano ancora maturi; si sapeva ben poco sulle forze nucleari, ed inoltre Einstein si rifiutava, a torto, poiché smentito dalle successive acquisizioni teorico-scientifiche, di credere nella realtà della meccanica quantistica e nel principio di indeterminazione (secondo cui non è possibile conoscere simultaneamente la qualità e la posizione di un'onda con certezza).

Ancora oggi relatività generale e meccanica quantistica, pur rappresentando i due pilastri fondamentali della fisica, hanno campi d'indagine differenti. La relatività generale trova la sua applicazione solo nell'infinitamente grande, la meccanica quantistica solo nell'infinitamente piccolo. Le due grandi teorie della fisica del XX secolo, perciò, non possono essere giuste entrambe, sono incompatibili fra loro. Questo significa che ci rivolgiamo di volta in volta alla relatività generale oppure alla meccanica quantistica. La speranza resta quella di trovare una teoria unificata, coerente e completa che includa tutte le teorie parziali che descrivono invece solo un ambito limitato di fenomeni. La difficoltà principale nel trovare la grande teoria unificata è data dal fatto che la relatività generale è una teoria classica, ossia non incorpora il principio di indeterminazione, tuttavia sembra che tale principio costituisca un tratto fondamentale dell'universo in cui viviamo; una teoria unificata, per poter raggiungere il proprio obiettivo, deve quindi necessariamente incorporare questo principio.

Il grande astrofisico S. Hawking, nel suo libro "La teoria del tutto" sostiene che "un primo passo da compiere nella ricerca è quello di combinare la relatività generale con il principio di indeterminazione, ciò può portare a conseguenze notevoli come l'idea che i buchi neri non siano così neri, che l'universo sia racchiuso in se stesso e privo di confine, che lo spazio vuoto sia in realtà pieno di particelle e antiparticelle virtuali".

La ricerca della "grande teoria unificata" mira alla descrizione di tutte e quattro le forze fondamentali e di tutta la materia nell'ambito di un unico quadro concettuale onnicomprensivo, attraverso formule ed equazioni sempre più complesse, ma può tenere anche conto di ciò che è definito "principio antropico" enunciato per la prima volta negli anni '50 da R.H. Dicke, secondo il quale "la spiegazione del perché l'universo ha le proprietà che osserviamo sta nel fatto che, qualora queste proprietà fossero differenti, è probabile che la vita non sarebbe emersa e, di

conseguenza, noi esseri umani non saremmo qui ad osservare tali differenze. La peculiarità che contraddistingue la combinazione di forze e particelle del nostro universo è quella di permettere il formarsi della vita. L'esistenza della vita, della vita intelligente in particolare, è un presupposto necessario per potersi domandare perché il nostro universo ha le proprietà che ha". In altre parole le cose nel nostro universo sono come sono perché se fossero diverse noi non saremmo qui ad osservarle.

"Molti organismi si comportano come oscillatori accoppiati cioè sistemi composti da molti elementi legati da una grandezza il cui valore in una unità del sistema influenzerebbe tutte le altre." Il matematico Steven Strogatz, docente di matematica applicata alla Cornell University e al Massachusetts Institute of Technology, dopo venti anni di studi, sostiene questa tesi; i risultati ottenuti dimostrano perciò che l'uno, non solo è parte del tutto ma ne condiziona il funzionamento globale in un interscambio di informazioni dando luogo alle manifestazioni osservabili. Il matematico si spinge ad affermare, altresì, che alcuni comportamenti umani stranamente ritmici potrebbero essere spiegati dallo studio e dall'applicazione di questa nuova disciplina divenuta nota con il nome di "scienza dell'ordine spontaneo". Infatti, come in un corpo ogni cellula contribuisce e partecipa al funzionamento dell'organismo, così, sia nell'universo (infinitamente grande) che nell'atomo (infinitamente piccolo), ogni parte interagisce con il tutto. Purtroppo, tranne le incoraggianti previsioni fornite dalla teoria delle Superstringhe, secondo la quale la trama microscopica dell'universo è un intricato labirinto a più dimensioni in cui stringhe unidimensionali vibrano senza posa dando il ritmo alle leggi naturali, a causa dell'assenza di una teoria unificata, non possediamo ancora le equazioni adeguate e compatibili per entrambe le realtà.

Il principio di indeterminazione ci ha fornito un indizio facendoci comprendere che non esistono proprietà dell'universo a livello microscopico che si possono determinare con precisione e che l'osservatore interagisce con l'osservato.

Sulla base di tali presupposti che rappresentano le ultime frontiere della ricerca scientifica, si può dedurre che l'uomo è una parte del tutto al quale partecipa e, come tale, quindi, probabilmente influenza le interazioni tra le particelle elementari.

FISICA DELLE PARTICELLE

Prima del Modello Standard, sono stati fatti diversi tentativi di unificazione delle forze. Ad esempio Isaac Newton, con la gravitazione universale, spiegò la caduta dei gravi ed il moto dei pianeti attraverso un'unica forza di gravità, così come le equazioni di Maxwell unificarono le forze elettriche e magnetiche nella stessa interazione elettromagnetica.

Tra gli anni '50 e '60 del XX secolo, si svilupparono in fisica nuovi strumenti in grado sia di osservare che di produrre un'inedita ed incredibile varietà di particelle. Ai fisici di quel periodo fu quindi subito chiaro che la teoria tradizionale, basata su pochi tipi di particelle (protoni, elettroni e neutroni e alcune particelle teorizzate ma mai osservate, come il neutrino e il mesone di Yukawa), non era più sufficiente per spiegare la grande quantità di nuove particelle rilevate.

Nel 1964 l'idea dei quark fu per la prima volta proposta dai fisici Murray

Gell-Mann e George Zweig, i quali ipotizzarono che i mesoni e i barioni fossero composti da due o tre quark o antiquark, chiamati up, down, o strange (u, d, s) con spin di $1/2$ e carica elettrica rispettivamente di $+2/3$, $-1/3$, $-1/3$. Tali quark, comunque, non erano stati ancora osservati, quindi non furono considerati come dei veri e propri oggetti fisici ma esclusivamente come una spiegazione matematica. Altri due fisici, Sheldon Glashow e James Bjorken, aggiunsero ai tre quark un quarto, che chiamarono "charm". Inizialmente, queste idee non ebbero molta credibilità, soprattutto perché l'esistenza dei quark non poteva essere verificata sperimentalmente.

Nel 1967, Steven Weinberg e Abdus Salam proposero entrambi, anche se separatamente, una teoria che unificava le forze deboli e le forze elettromagnetiche nella forza elettrodebole. Per confermare tale teoria, era però necessaria l'esistenza di un bosone neutro con azione debole e di un bosone massivo, che non furono comunque trovati.

Nei due anni successivi, con l'acceleratore lineare di Standford, fu evidente, durante un esperimento, che l'elettrone sembrava rimbalzare contro piccoli oggetti dentro il protone. I dati rilevati furono spiegati da James Bjorken e Richard Feynman: gli oggetti osservati non vennero chiamati quark, ma l'esperienza fu la prova della loro esistenza.

Nel 1970, Sheldon Glashow, John Iliopoulos, e Luciano Maiani riconobbero l'importanza decisiva del quarto tipo di quark nel contesto del Modello Standard.

I dati dell'esperimento dell'acceleratore di Stanford sulla struttura del protone furono ulteriormente spiegati da David Politzer, David Gross, e Frank Wilczek, che scoprirono che la teoria cromatica dell'interazione forte aveva una propria caratteristica: la libertà asintotica.

Il '73 fu anche l'anno che vide la formulazione di una teoria dell'interazione forte in termini di campo quantistico. Questa teoria di quark e gluoni (che farà parte poi del Modello Standard) era simile nella struttura all'elettrodinamica quantistica (QED), ma venne chiamata cromodinamica quantistica (QCD), a causa dei cambiamenti di colore dell'interazione forte. I quark furono dunque considerati particelle reali, dotate di carica di colore.

I gluoni, privi di massa, invece, furono considerati mediatori del campo di interazione forte. Harald Fritzsch e Murray Gell-Mann svilupparono tale teoria.

Il concetto di Modello Standard fu ufficialmente presentato per la prima volta da John Iliopoulos in una conferenza nel '74.

L'anno successivo, una nuova particella, chiamata J/psi fu scoperta attraverso gli esperimenti di Burton Richter e Samuel Ting.

Anche gli anni seguenti videro numerose scoperte: il '76 fu l'anno della scoperta del mesone D0 (composto da un quark charm e un anti-up) e del leptone tau.

Nel '77 i fisici della squadra di Leon Lederman scoprirono il nuovo quark detto bottom e il suo antiquark, indirizzando inoltre alla ricerca del sesto quark, il top.

Nel '79, un esperimento nel laboratorio DESY presso Amburgo, mostrò un'importante prova della produzione di gluone, grazie ad un acceleratore a fasci collidenti.

Nel '84, invece, un esperimento del CERN mise in luce i bosoni intermedi W^\pm e Z^0 , richiesti dalla teoria elettrodebole (esperimento di Rubbia).

Nel '89, attraverso esperimenti eseguiti a SLAC e al CERN, si accertò l'ipotesi dell'esistenza di tre generazioni di particelle fondamentali, la quale confermò anche l'esistenza del bosone Z^0 .

L'esistenza del quark top fu confermata, dopo anni di studi, nel '95.

Nel 1998, con l'esperimento Super-Kamiokande avvenuto in Giappone, si osservò un'oscillazione tra neutrini diversi, implicando

che la massa dei neutrini non era nulla proprietà che i fisici non avevano attribuito inizialmente ai neutrini nel Modello Standard. Il Modello fu dunque rivisto dai fisici, aggiungendo nove parametri liberi ai diciannove iniziali, mantenendo comunque il nome di Modello Standard.

Il Modello Standard, nonostante i positivi risultati sperimentali ottenuti, non comprende la gravità e l'esistenza di una materia oscura, costituente la maggior parte della materia dell'Universo. Questa teoria, dunque si può considerare coerente con la relatività speciale e con la meccanica quantistica, ma non è ancora una teoria completa delle forze fondamentali. Attualmente, gli sforzi di molti fisici sono rivolti all'estensione del Modello Standard nella GTU, la Grande Teoria Unificata.

Nella storia dell'umanità l'uomo si è interrogato sul mondo che ci circonda, sulla sua origine e sulla sua struttura. I fisici e i chimici hanno formulato delle teorie per spiegare qual è la natura della materia che forma ogni oggetto esistente. Nel Diciannovesimo secolo si è affermata la teoria atomica (che prende spunto dal concetto di atomo di Democrito che in greco *atomos* vuol dire non divisibile), secondo cui la materia è formata da unità indivisibili chiamate atomi.

Storia dell'atomo

Alla fine del diciannovesimo secolo, era convinzione diffusa che la materia fosse composta da atomi. Tuttavia, l'esistenza di circa cento elementi, con proprietà sistematicamente ricorrenti, era una chiara indicazione che gli atomi stessi dovessero possedere una struttura interna e che quindi non potessero essere considerati come oggetti "indivisibili".

Il moderno concetto di atomo emerse all'inizio del ventesimo secolo, come risultato in particolare degli esperimenti di Rutherford. Un atomo è composto da un nucleo denso, circondato da una nuvole di elettroni. Il nucleo stesso è composto da particelle più piccole: dopo la scoperta del neutrone, nel 1932, non vi fu più alcun dubbio che i costituenti dei nuclei fossero il protone e il neutrone, indicati complessivamente con il termine di nucleoni. All'elettrone e al protone si aggiunse più tardi una quarta particella il neutrino, la cui esistenza venne ipotizzata nel 1930 studiando i decadimenti beta.

L'elettrone fu il primo costituente dell'atomo a essere scoperto. Nel 1897 J.J. Thompson fu in grado di produrre fasci di elettroni all'interno di tubi a vuoto. Dalla misura della deflessione da essi subita sotto l'azione combinata di campi elettrici e magnetici, egli poté misurarne la velocità e dedurre il rapporto fra la massa e la carica della particella. Il risultato si rivelò indipendente dal tipo di gas e di catodo utilizzati. Egli aveva in altre parole, scoperto uno dei costituenti fondamentali della materia.

In seguito, riuscì a determinare la carica dell'elettrone, definita come negativa, utilizzando un metodo che venne poi significativamente migliorato da Millikan nel 1910 (il metodo della goccia).

Tale misura permise anche di dedurre la massa dell'elettrone.

Nei primi anni del novecento, diversi modelli dell'atomo vennero proposti e una di questi fu appunto il modello di Thompson nel 1907. In esso, gli elettroni e un'uguale quantità di carica positiva, sono distribuiti uniformemente sul volume atomico. L'atomo, pertanto, risulta essere elettricamente neutro. Rutherford, Geiger e Marsden riuscirono, in seguito, a mettere in evidenza l'inconsistenza di quel modello. Con il loro famoso esperimento, consistente nella diffusione di particelle alfa su atomi pesanti, e analizzando le distribuzioni angolari delle particelle, essi furono in grado di dimostrare che la gran parte della massa e tutta la carica positiva dell'atomo, sono concentrati in un regione limitata del volume atomico. Le distribuzioni angolari mostravano, infatti, particelle alfa diffuse a grande angolo, il che risultava incompatibile con una distribuzione di carica uniforme. Questi esperimenti stabilirono l'esistenza dell'atomo come composto da un nucleo piccolo, massivo e carico positivamente circondato da una nuvola di elettroni carichi negativamente orbitanti intorno ad esso.

Utilizzando particelle alfa, Rutherford, bombardò anche nuclei più leggeri. Bombardando con le particelle alfa atomi di azoto, egli osservò la produzione di particelle cariche positivamente in grado di percorrere distanze stranamente lunghe, che dovevano essere state emesse dall'atomo stesso.

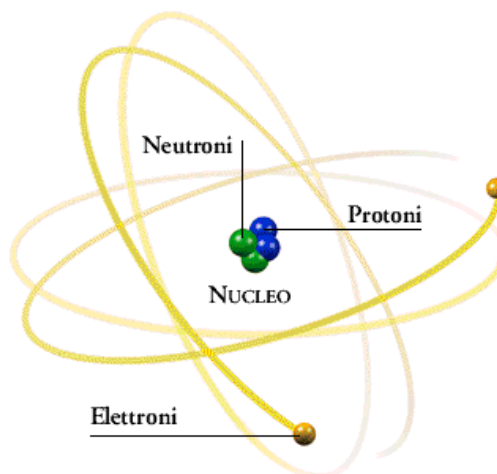
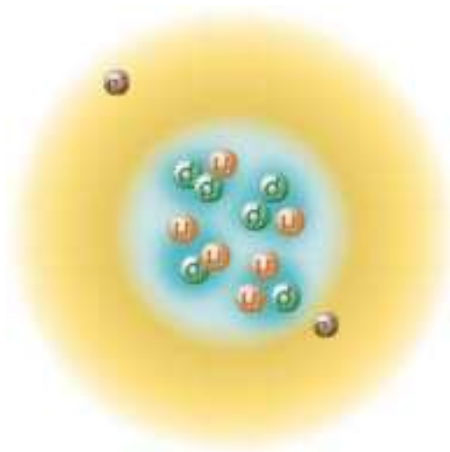
Da questo egli concluse che l'atomo di azoto doveva essere stato modificato nella reazione, e che un costituente leggero del nucleo era stato emesso.

Egli aveva già scoperto particelle simili, dette a lunga "range", negli esperimenti in cui utilizzava l'idrogeno come bersaglio. Da questo egli arrivò alla conclusione che queste particelle erano nuclei di idrogeno e che quindi, dovevano essere presenti allo stesso modo nei nuclei di azoto. Il nucleo di idrogeno poté essere quindi visto come uno dei costituenti naturali del nucleo atomico.

Anche il neutrone venne scoperto bombardando nuclei con particelle alfa. Nel 1932 Chadwick, studiò la radiazione neutra emessa da un campione di berillio irradiato con particelle alfa provenienti da una sorgente di polonio. Successivamente, utilizzò questa radiazione neutra su bersagli di idrogeno, elio e azoto. Dalla cinematica dell'urto egli fu in grado di dedurre che la massa della particella che costituiva la radiazione neutra doveva essere molto prossima quella del protone e diede a questa particella il nome di neutrone.

Ai fisici degli anni Sessanta l'atomo appariva così:

- L'atomo presenta una nuvola di elettroni (disposti su più livelli energetici discreti) in moto costante attorno al nucleo
- Il nucleo è formato da protoni e neutroni in moto
- I protoni e i neutroni sono formati da quark in moto al loro interno



Dimensioni dell'atomo

L'atomo compreso la nuvola di elettroni, ha un diametro dell'ordine di 10^{-10} metri.

Il nucleo è 10.000 volte più piccolo dell'atomo 10^{-14} m

Protoni e neutroni sono 10 volte più piccoli del nucleo 10^{-15} m

Non ci sono evidenze che quark abbiano dimensioni e comunque non possono superare l'ordine dei 10^{-18} m, dimensione oltre la quale si registrerebbe un'attrazione tra le particelle.

Quark e Leptoni

Nel 1963, due fisici statunitensi Murray Gell-Mann e George Zweig, ipotizzarono di poter spiegare le proprietà di molte particelle considerandole composte da particelle elementari.

I due tipi fondamentali di particelle elementari, sono i leptoni, che comprendono l'elettrone e il neutrino e i quark. Al presente si conoscono sei tipi di leptoni e sei tipi di quark. Questi possono essere raggruppati, in base a certe caratteristiche nelle cosiddette "generazioni" o "famiglie".

Esistono un certo numero di varietà diverse di quark chiamati "sapori" ed essi sono: up, down, charm, strange, top e bottom. In accordo con il modello standard della fisica delle particelle, il Quark up ed il Quark down sono i costituenti fondamentali dei nucleoni; il protone contiene due quark up e un quark down, mentre il neutrone contiene un quark up e due quark down. In base alla teoria della cromodinamica quantistica (QCD), i quark possiedono un'altra proprietà chiamata "carica di colore" (che non ha niente a che vedere con i colori reali), invece di due tipi differenti di carica.

La carica di colore è di tre tipi: "rosso", "verde" e "blu" (6 se contiamo le anticariche). Attualmente non sono state osservate particelle "colorate": tutte le particelle conosciute hanno "colore neutro". I barioni sono quindi composti da un quark rosso, uno verde e uno blu; il protone ed il neutrone ne sono i principali esempi. I mesoni, invece, sono composti da un quark e da un antiquark del corrispondente "anticolore". I colori dei quark non sono statici, ma vengono scambiati, sempre mantenendo il risultato neutro, dai gluoni: particelle anch'esse dotate di carica di colore e

responsabili della propagazione dell'interazione forte. È proprio l'interazione forte che tiene insieme i quark, a formare mesoni e barioni; un effetto "secondario" di questa forza è quello di tenere neutroni e protoni uniti nel nucleo atomico.

A causa della estrema intensità della forza nucleare forte, i quark non si trovano mai liberi. Sono sempre legati in barioni e mesoni. Quando si cerca di separare i quark, come avviene negli acceleratori di particelle, la forza nucleare forte aumenta con l'aumentare della distanza tra i quark. A un certo punto diventa più favorevole, dal punto di vista energetico, creare altri due quark per cancellare la forza crescente, e due nuovi quark (un quark e un antiquark) spuntano dal nulla. Questo processo viene detto adronizzazione o fragmentazione, ed è uno dei processi meno compresi della fisica delle particelle. Come risultato della fragmentazione, quando i quark vengono prodotti negli acceleratori, invece di vedere l'individuale quark nei rilevatori, gli scienziati vedono "getti" di molte particelle color-neutre (mesoni e barioni) impacchettate assieme.

Un leptone, è una particella subatomica che ad oggi si ritiene sia puntiforme, quindi fondamentale, cioè non composta da altre particelle (al contrario degli adroni che sono composti da quark). I leptoni sono suddivisi in tre famiglie: gli elettroni, i muoni ed i tauoni; ad ognuna di queste è associato un particolare neutrino. Tutti i leptoni conosciuti fanno parte della famiglia dei fermioni, poiché hanno tutti spin $1/2$ (era: "inoltre hanno tutti carica"). Ci sono sei tipi di leptoni: tre con carica negativa e tre con carica neutra.

L'elettrone, il muone e il tauone si differenziano per la loro massa. In tal senso, una delle sfide più importanti della fisica moderna riguarda proprio la ricerca del motivo di questa differenza in massa.

Il modello standard

Il modello standard è una teoria che cerca di classificare e comprendere le interazioni tra le particelle principali che costruiscono la materia.

Le particelle sono degli enti dotati di: massa m (tranne le particelle prive di massa), una carica elettrica q , uno spin s e una vita media τ .

Per comprendere questa teoria bisogna innanzitutto distinguere le particelle con massa e quelle senza massa:

Particelle senza massa, come il fotone e il gravitone (quest'ultimo previsto solo in teoria), sono particelle portatrici di energia che si muovono alla velocità della luce, velocità limite della fisica relativistica, che non è raggiungibile dalle particelle con massa diversa da zero. Esse, inoltre, hanno una caratteristica comune: la stabilità. Infatti quando una particella instabile decade può solo trasformarsi in una particella con massa inferiore (per il principio di conservazione dell'energia), quindi, non avendo masse, tali particelle non possono decadere e se non incontrano ostacoli o non vengono assorbite la loro vita è eterna. Particelle con massa: nell'ultima metà del secolo scorso sono state scoperte una quantità innumerevole di particelle subatomiche che oggi classifichiamo in base alle Forze fondamentali attraverso le quali esse interagiscono tra di loro.

Leptoni: interagiscono attraverso la forza nucleare debole e comprendono l'elettrone, il muone, il tau e tre tipi di neutrini (ν_e , ν_τ , ν_μ).

Adroni: interagiscono attraverso la forza nucleare forte si suddivono in due gruppi aventi spin zero o intero, i mesoni, o aventi spin semintero, i barioni.

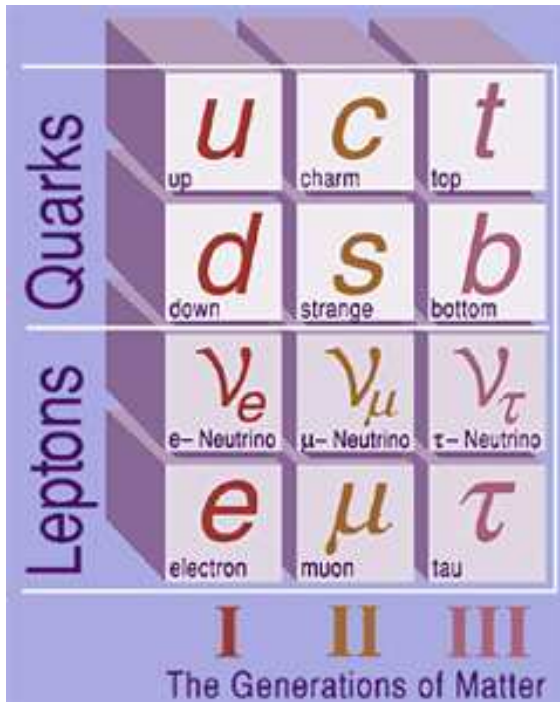
Tutti gli adroni sono composti da quark, due nel caso dei mesoni e 3 nel caso dei barioni.

Bosoni di Gauge: sono una classe di particelle (responsabili della trasmissione delle forze fondamentali. Questi quanti sono i fotoni, responsabili dell'interazione elettromagnetica, i gluoni, responsabili dell'interazione tra i quark (interazione forte), e i tre bosoni W^+ W^- Z^0 che mediano le forze nucleari deboli. Non è ancora dimostrata invece l'esistenza di una particella in grado di trasportare la forza gravitazionale, quindi i gravitoni restano, per ora, solo una teoria. Come abbiamo visto, questa classificazione comprende anche particelle composte da altre particelle più piccole come i protoni e i neutroni. Il modello standard vuole invece definire una serie di particelle che siano veramente elementari (chiamate anche quanti elementari, da qui teoria quantistica), ovvero non divisibili in altre particelle più piccole.

Fino ad oggi il modello standard ha individuato 12 particelle elementari (6 quark e 6 leptoni), ma solo quattro di queste compongono la materia ordinaria: due tipi di leptoni (elettrone e

neutrino) e due tipi di quark u e d; questi quattro elementi sono stati definiti di prima generazione. I fisici hanno poi individuato altre due generazioni di particelle la seconda e la terza generazione, che comprendono particelle molto rare, difficili da individuare e con una vita media molto breve, come ad esempio i muoni.

Tabella delle 3 generazioni di quark e leptoni:



Particella	Massa	Carica elettrica	Carica debole	Carica forte
Elettrone	0,00054	-1	-1/2	0
Neutrino elettronico	<10-8	0	1/2	0
Quark up	0,0047	2/3	1/2	Rosso,verde,blu
Quark down	0,0074	-1/3	-1/2	Rosso,verde,blu
Particella	Massa	Carica elettrica	Carica debole	Carica forte
Muone	0,11	-1	-1/2	0
Neutrino muonico	<0,0003	0	1/2	0
Quark charm	1,6	2/3	1/2	Rosso,verde,blu
Quark strange	0,16	-1/3	-1/2	Rosso,verde,blu
Particella	Massa	Carica elettrica	Carica debole	Carica forte
Tau	1,9	-1	-1/2	0
Neutrino tau	<0,033	0	1/2	0
Quark top	189	2/3	1/2	Rosso,verde,blu
Quark bottom	5,2	-1/3	-1/2	Rosso,verde,blu

Costanti della fisica

Studi matematici e fisici sono stati in grado di trovare, attraverso calcoli di alta precisione, dei numeri, apparentemente casuali, spesso presenti nelle formule fondamentali, di basilare importanza affinché esse acquistino senso e spieghino la realtà così come la percepiamo; essi sono denominati costanti della fisica, in quanto ciascuno ha un determinato valore, sempre uguale e apparentemente casuale.

Una costante fisica è una grandezza fisica che è universale in natura e indipendente dal tempo. Esistono costanti dimensionali e adimensionali: mentre le prime sono associate a convenzioni nelle unità di misura e dipendono dalla scelta delle stesse, le seconde, le più rare e "importanti", sono indipendenti dall'unità di misura e appaiono come un fattore arbitrario in una teoria. Un esempio è la costante di struttura fine α , che è un parametro che mette in relazione le principali costanti fisiche dell'elettromagnetismo. Il più delle volte, però, le costanti adimensionali vengono successivamente eliminate grazie ad un ampliamento delle teorie a cui appartenevano. Il valore numerico delle costanti fisiche dimensionali dipende dal sistema di unità di misura usato (ad esempio il SI) e per questo motivo i valori numerici come quello della velocità della luce c , espresso in metri al secondo, non sono prevedibili a priori dalle teorie fisiche.

Principio antropico debole

Parlando di costanti fisiche, non si può fare a meno di introdurre il principio antropico, secondo il quale la vita si è formata su questo pianeta solo grazie al fatto che le costanti fisiche hanno questi determinati valori e non altri.

Di fronte a ciò si creano così due e più scuole di pensiero: c'è chi semplicemente afferma che le costanti hanno questi valori e non altri perché voluti da un'entità intelligente e c'è chi invece introduce l'idea dell'esistenza di infiniti mondi paralleli governati dalle stesse leggi fisiche del nostro, ma con valori differenti delle costanti.

Interessanti sono poi le varie supposizioni che riflettono su cosa succederebbe se determinate costanti avessero valori diversi

Cosa succederebbe se...

...se le costanti fisiche avessero dei valori diversi da questi?

Questa domanda ha tormentato per molto tempo e continua a farlo, centinaia di scienziati e fisici, in quanto, non avendo ancora chiarito il perché delle costanti fisiche, è impossibile prevedere cosa succederebbe se esse fossero diverse.

Nonostante ciò, la teoria più accreditata è che, se le costanti fisiche avessero valori anche solo leggermente diversi, l'universo come lo conosciamo noi, semplicemente non esisterebbe. Per esempio i rapporti tra le forze attrattive e repulsive tra le particelle elementari sarebbero diversi, con conseguenze sulla costituzione della materia e l'attività delle stelle. In un universo con costanti differenti noi stessi potremmo non esistere.

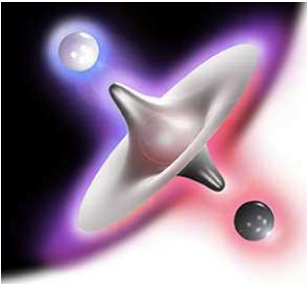
Ma le riflessioni più feconde e interessanti stanno non nelle supposizioni estreme, bensì nel mezzo: a livello pratico, cosa succederebbe all'universo, alla Terra, agli organismi, se la Costante di Gravità fosse maggiore, ad esempio? Quali sarebbero le conseguenze e come l'evoluzione reagirebbe? Di che entità sarebbero i cambiamenti risultanti? Etc.

Le costanti fisiche sono veramente "così" immutabili nel tempo?

Due anni fa, analizzando la luce proveniente da quasar ai confini dell'universo conosciuto -una luce che per giungere sulla Terra ha impiegato circa 10 miliardi di anni-, un gruppo di astronomi produsse dei dati che potevano essere spiegati ipotizzando che la costante di struttura fine fosse cambiata durante l'evoluzione dell'Universo. Questa costante, indicata con il simbolo α dai fisici, determina l'entità dell'interazione tra campo elettromagnetico e materia e dipende essenzialmente dalla velocità della luce nello spazio vuoto. In particolare, secondo le stime ricavate dagli astrofisici la costante α , sarebbe variata in dieci miliardi di anni di un fattore pari a circa sette milionesimi ($-0.72 \pm 0.18 \times 10^{-5}$). Bisognerà quindi rivedere le certezze fin'ora ritenute tali?

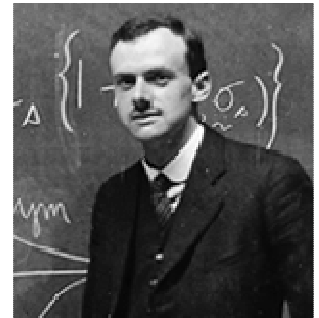
Grandezza	Simbolo usuale	Valore	unità	legge fisica
<u>Velocità della luce</u> nel vuoto	c	299 792 458	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	<u>Equaz.di Maxwell</u>
<u>Costante dielettrica del vuoto</u>	ϵ_0	$8,854\ 187\ 817\dots \times 10^{-12}$	$\text{F}\cdot\text{m}^{-1}$	<u>Equaz.di Maxwell</u>
<u>Permeabilità del vuoto</u>	μ_0	$4\pi \times 10^{-7}$	$\text{T}\cdot\text{m}\cdot\text{A}^{-1}$	<u>Equaz.di Maxwell</u>
<u>Costante di gravitazione universale</u>	G	$6,672\ 59(85) \times 10^{-11}$	$\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{s}^{-2}$	Legge gravitazione di
<u>Costante di Planck</u>	h	$6,626\ 068\ 76(52) \times 10^{-34}$	$\text{J}\cdot\text{s}$	<u>Effetto fotoelettrico</u>
<u>Carica dell'elettrone</u>	e	$1,602\ 176\ 462(63) \times 10^{-19}$	C	
<u>Massa a riposo dell'elettrone</u>	m_e	$9,109\ 381\ 88(72) \times 10^{-31}$	kg	
<u>Massa a riposo del protone</u>	m_p	$1,672\ 621\ 58(13) \times 10^{-27}$	kg	
<u>Massa a riposo del neutrone</u>	m_n	$1,674\ 927\ 16(13) \times 10^{-27}$	kg	
<u>Unità di massa atomica</u>	1 amu	$1,660\ 538\ 73(13) \times 10^{-27}$	kg	
<u>Numero di Avogadro</u>	L oppure N_A	$6,022\ 141\ 99(47) \times 10^{23}$	mol^{-1}	
<u>Costante di Boltzmann</u>	k	$1,380\ 6503(24) \times 10^{-23}$	$\text{J}\cdot\text{K}^{-1}$	<u>Legge dei gas</u>
<u>Costante di Faraday</u>	F	$9,648\ 534\ 15(39) \times 10^4$	$\text{C}\cdot\text{mol}^{-1}$	
<u>Costante dei gas</u>	R	8,314 472(15)	$\text{J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{mol}^{-1}$	
<u>Costante di struttura fine</u>	α	$7,297\ 352\ 533(27) \times 10^{-3}$		
<u>Raggio di Bohr</u>	a_0	$5,291\ 772\ 083(19) \times 10^{-11}$	m	
<u>Costante di Rydberg</u>	R_∞	$1,097\ 373\ 156\ 8549(83) \times 10^7$	m^{-1}	
<u>Magnetone di Bohr</u>	μ_B	$9,274\ 008\ 99(37) \times 10^{-24}$	$\text{J}\cdot\text{T}^{-1}$	
<u>Volume molare per gas ideale a 1 bar, 0°C</u>		22,710 981(40)	$\text{L}\cdot\text{mol}^{-1}$	
<u>Energia di Hartree</u>	\dot{E}'_h	$4,359\ 743\ 81(34) \times 10^{-18}$	J	
<u>Momento magnetico dell'elettrone</u>	μ_e	$-9,284\ 763\ 62(37) \times 10^{-24}$	$\text{J}\cdot\text{T}^{-1}$	
<u>Momento magnetico del protone</u>	μ_p	$1,410\ 607\ 61(47) \times 10^{-26}$	$\text{J}\cdot\text{T}^{-1}$	
<u>Magnetone nucleare</u>	μ_N	$5,050\ 786\ 6(17) \times 10^{-27}$	$\text{J}\cdot\text{T}^{-1}$	
Rapporto giromagnetico del protone	γ_p	$2,675\ 221\ 28(81) \times 10^8$	$\text{s}^{-1}\cdot\text{T}^{-1}$	
<u>Costante di Stefan-Boltzmann</u>	σ	$5,670\ 400(40) \times 10^{-8}$	$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}$	
Prima costante di <u>radiazione</u>	c_1	$3,741\ 774\ 9(22) \times 10^{-16}$	$\text{W}\cdot\text{m}^2$	
Seconda costante di radiazione	c_2	$1,438\ 769\ (12) \times 10^{-2}$	$\text{m}\cdot\text{K}$	
<u>Accelerazione di gravità</u> (livello del mare)	g_n	9,80665	$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$	

Antimateria



Dirac

Uno dei principali problemi della fisica moderna è quello di conciliare la teoria della relatività di Einstein, che spiega l'infinitamente grande, con la meccanica quantistica, che spiega l'infinitamente piccolo, in una Grande Teoria Universale (GTU) che possa riassumere tutte le leggi che governano l'Universo.



Nel 1928 il fisico inglese Paul Dirac elaborò un'equazione per studiare il moto degli elettroni, combinando insieme le due teorie. La nuova teoria descriveva in modo estremamente preciso i risultati sperimentali, ma aveva una particolarità: prevedeva l'esistenza di antiparticelle, che avevano la stessa massa delle loro particelle corrispondenti, ma carica elettrica opposta.

Esistevano ad esempio gli antielettroni (positroni), gli antiprotoni o gli antineutroni.

Prove sperimentali

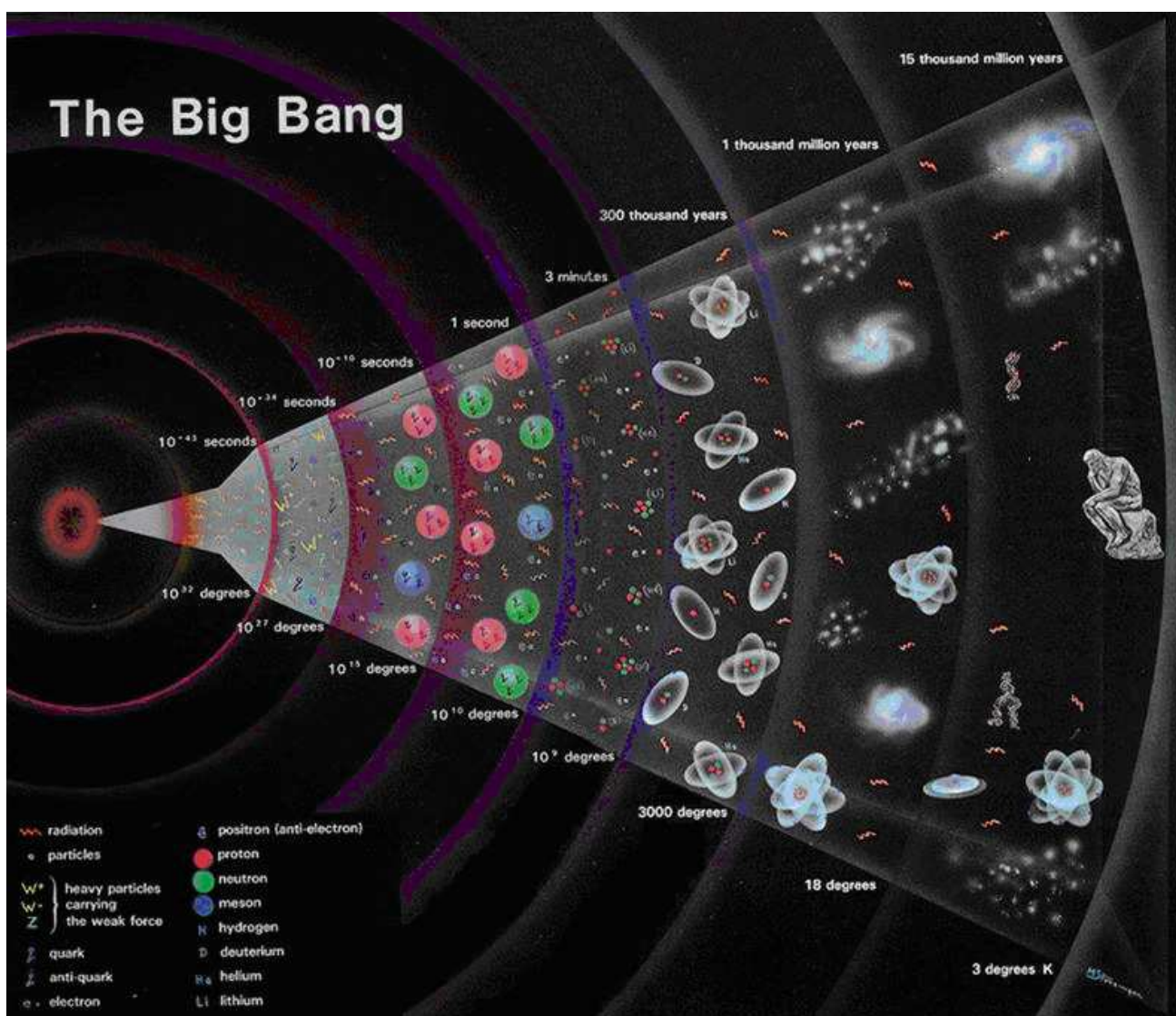
La prima prova sperimentale dell'esistenza dell'antimateria fu la scoperta, da parte del fisico americano Carl David Anderson, della presenza di positroni (elettroni con massa uguale a quella degli elettroni ma carica elettrica positiva) nei raggi cosmici.

Con l'avvento di acceleratori di particelle sempre più potenti, come quello del CERN di Ginevra, si scoprirono poi antiprotoni, antineutroni, antideutroni e gli antinuclei di antielio 3 e di antitritio. Al CERN si produsse poi antiidrogeno.

L'origine dell'Universo

La teoria del Big Bang spiega come l'Universo si sia originato da una grande esplosione, che produsse quantità uguali di materia e antimateria: particelle e antiparticelle, quindi si annichilavano in

continuazione, dando origine a radiazioni, che poi scontrandosi le ricreavano. Nei primi attimi dell'Universo, il tutto era così compresso in piccole dimensioni, che perfino la luce non poteva allontanarsi e l'Universo era opaco. Circa 10^{-34} secondi dopo il Big Bang si ebbe un piccolissimo eccesso di particelle rispetto alle antiparticelle. L'Universo si espandeva e si raffreddava, fino a una temperatura alla quale non fu più possibile la creazione di nuove particelle e antiparticelle. In tutti gli scontri materia e antimateria si annichilarono, e rimase solo quel minuscolo eccesso di materia che formò finalmente l'Universo. Si sta ancora cercando di capire quali furono i fattori che permisero alla materia di sopravvivere.



Ricerca di antimateria

Alcuni studiosi sostengono la possibilità che esista nell'Universo una certa quantità di antimateria, che potrebbe addirittura formare antistelle e antigalassie. Poiché, quando l'antimateria viene a contatto con la materia ordinaria si annichila producendo radiazioni elettromagnetiche, si è pensato di rivelare la presenza di antimateria tramite la radiazione prodotta nelle annichilazioni, ma finora non si sono ottenuti risultati soddisfacenti. Dato, allora, che si ritiene che i nuclei leggeri, come protoni e nuclei di elio, siano stati prodotti nei primi attimi di vita dell'Universo, mentre i nuclei più pesanti, come il carbonio, ferro e tutti gli altri che troviamo sulla Terra, siano stati prodotti in seguito all'interno delle stelle pesanti, e sparsi nello spazio dopo la loro esplosione, il trovare anche pochi antinuclei di anti-C o di anti-Fe ci direbbe che esistono regioni dello spazio in cui si trovano antistelle.

IL CERN

Storia

L'European Organization for Nuclear Research in inglese, o Organisation européenne pour la recherche nucléaire in francese, più conosciuto come CERN (acronimo del francese Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire), è il più grande laboratorio al mondo di fisica delle particelle. Si trova al confine tra Svizzera e Francia alla periferia ovest della città di Ginevra. Qui i fisici cercano di esplorare i segreti della materia e le forze che regolano l'universo. La convenzione che istituiva il CERN fu firmata il 29 settembre 1954 da 12 stati membri. Oggi fanno parte del CERN 20 stati membri più alcuni osservatori anche extraeuropei.

Dopo la seconda guerra mondiale si sentì il bisogno di fondare un centro europeo all'avanguardia per la ricerca, per ridare all'Europa il primato nella fisica, dato che in quegli anni i principali centri di ricerca si trovavano tutti negli Stati Uniti. A questo scopo venne riunito un consiglio di scienziati, che decise di costruire il laboratorio. C'è un po' di confusione a proposito del vero significato della prima lettera dell'acronimo, tanto che informalmente viene modificato in Centre Européen pour la Recherche Nucléaire (Centro Europeo per la Ricerca Nucleare). Tuttavia la ragione sociale del CERN è da molti anni European Organization for Nuclear Research.

Lo scopo

Il CERN esiste soprattutto per fornire ai ricercatori gli strumenti necessari per la ricerca in fisica delle alte energie attraverso complessi esperimenti. Questi strumenti sono principalmente gli acceleratori di particelle, che portano nuclei atomici e particelle subnucleari ad energie molto elevate e i rivelatori che permettono di osservare i prodotti delle collisioni tra fasci di queste particelle. Ad energie sufficientemente elevate, i prodotti di queste reazioni possono essere radicalmente differenti dai costituenti originali dei fasci, e a più riprese sono state prodotte e scoperte in questa maniera particelle fino ad allora ignote.

Risultati

Da quando il LEP entrò in funzione, nel 1989, gli esperimenti hanno effettuato misure accuratissime dei parametri del Modello standard,

confermando l'esistenza di tre famiglie di leptoni, dato non deducibile dalla teoria, e permettendo di mettere a punto la classificazione delle particelle elementari. Con i dati di LEP è stato possibile anche fare previsioni della massa del bosone di Higgs, una particella non ancora osservata sperimentalmente, ma la cui esistenza è essenziale per la coerenza del Modello standard. Queste informazioni saranno un'utile guida per gli scienziati che hanno appena iniziato la ricerca del bosone di Higgs con LHC, costruito principalmente a questo scopo.

A partire dal 29 settembre 1954 il CERN di Ginevra ha portato al raggiungimento di numerosi e importanti traguardi in campo fisico. Importanti sono in particolare i successi nel campo della fisica delle particelle:

- La scoperta della corrente neutra e della sua conseguente interazione tra particelle tramite il bosone Z^0 neutro, avvenuta nel 1973 nella camera a bolle.

Conseguentemente a questa scoperta ne sono derivate quelle dei bosoni W e Z.

- La scoperta dei bosoni W e Z nel 1983 negli esperimenti di fisica delle particelle UA1(Carlo Rubbia) e UA2 (Carlo Rubbia e Simon van der Meer) grazie all'utilizzo dell'SPS(Super Proton Synchrotron) un potente acceleratore di particelle. Con la conseguente assegnazione del premio Nobel per la fisica a Carlo Rubbia e Simon van der Meer per questa scoperta.

A partire dal 1989 fino al 2000 il Large Electron-Positron (LEP) collider è stato il progetto principale del CERN che ha portato a importanti risultati:

- Dimostrare che esistono solo 3 neutrini ossia delle particelle elementari di massa minuscola e sono privi di carica, possono quindi interagire solo in presenza di una forza nucleare debole

- Verificare che il bosone Higgs può esistere veramente, confermando la teoria della presenza di questa particella elementare prevista dal modello standard della fisica delle particelle.

- Uno studio approfondito sul bosone Z responsabile dell'interazione debole

- Misurare la massa del bosone W

- Il 10 Settembre 2008 l'acceleratore di particelle LHC (Large Hadron Collider) con il compito di accelerare protoni a velocità mai viste e farli scontrare tra di loro del CERN di Ginevra è entrato in funzione con successo.

-Il 19 Settembre 2008 l'acceleratore di particelle LHC del CERN di Ginevra ha avuto un guasto dovuto ad un collegamento elettrico mal funzionante.

Alcuni importanti successi nel campo della fisica delle particelle sono stati possibili grazie agli esperimenti del CERN. Per esempio:

- La scoperta della corrente neutra nel 1973 nella camera a bolle Gargamelle.
- La scoperta dei bosoni W e Z nel 1983 negli esperimenti UA1 e UA2 dell'SPS.

Nel 1983 il premio Nobel per la fisica fu assegnato a Carlo Rubbia e Simon van der Meer per quest'ultima scoperta.

Nel 1992 il premio Nobel per la fisica fu assegnato a Georges Charpak "per l'invenzione e lo sviluppo dei rivelatori di particelle, in particolare della camera proporzionale multifilo".

Premi Nobel

Carlo Rubbia

Carlo Rubbia è nato in Gorizia il 31 marzo 1934. Nel 1957 si laurea in fisica alla Normale di Pisa e trascorre un anno presso la Columbia University. Ritorna in Italia all'Università La Sapienza di Roma.

Nel 1960 diventa ricercatore presso il CERN di Ginevra dove si occupa di ricerche inerenti la fisica delle particelle elementari. Lì promuove la modifica dell'esistente acceleratore SPS in un collisionatore protone-antiprotone; con questo nel 1983 scopre le particelle che sono responsabili dell'interazione debole, cioè i bosoni vettoriali W^+ W^- e Z. Riesce ad avere anche la conferma dell'unificazione della forza elettromagnetica e della interazione debole nella forza elettrodebole.

Nel 1984 riceve, insieme all'olandese Simon van der Meer, il premio Nobel per la fisica per queste scoperte. Dirige il CERN dal 1989 al 1993. Dal 1971 al 1988 insegna anche fisica presso l'Harvard University. Dal 1999 è Presidente dell'ENEA.

Collabora con il CIEMAT (centro di ricerca sull'energia, l'ambiente e la tecnologia), un organismo spagnolo simile all'italiano ENEA, per

lo sviluppo del "solare termodinamico", progetto iniziato all'ENEA e non conclusosi in Italia a causa del licenziamento di Rubbia.

È socio onorario nazionale dell'Accademia Nazionale dei Lincei.

Le sue ricerche coprono molti aspetti della fisica delle particelle elementari in cui è estremamente attivo. Negli anni dopo il Nobel comincia a interessarsi ai problemi energetici e studia un reattore a fissione sicuro in cui i neutroni della reazione a catena vengono prodotti tramite un acceleratore di particelle. Il reattore resta però allo stadio di progetto.

Si è anche occupato di neutrini cosmici, della stabilità del protone, di fusione nucleare controllata; ha ideato un motore (il progetto 242) che usando solo 2,5 kg di americio 242 può portare un'astronave fino a Marte in un tempo molto minore degli attuali propulsori. Attualmente si interessa al problema della materia oscura. L'esperimento da lui proposto, WARP (Wimp Argon Programme), si propone di rivelare la presenza di materia oscura sotto forma di WIMP (Weakly Interacting Massive Particles). Attualmente è trasferito in Spagna per costruire le prime centrali solari termiche che mirano a sostituire le attuali centrali elettriche. Ha accettato l'invito dell'ex-Ministro dell'ambiente Alfonso Pecoraro Scanio a ritornare a lavorare in Italia nello sviluppo delle fonti energetiche rinnovabili.

Simon Van der Meer

Simon Van der Meer nacque a l'Aia nel 1925. Fu insignito del premio Nobel per la fisica nel 1984, insieme al fisico italiano Carlo Rubbia, per il suo contributo alla scoperta di alcune particelle subatomiche la cui esistenza era stata prevista, ma non confermata sperimentalmente. Questa scoperta ha fornito ulteriore evidenza alla teoria proposta da Albert Einstein, secondo la quale le forze in natura possono essere unificate, e ha contribuito alla spiegazione delle reazioni fra particelle subnucleari regolate dalla interazione debole.

Si laureò in ingegneria nel 1952 presso la Technische Hogeschool di Delft, specializzandosi nella tecnologia delle misure e dei controlli elettronici. Dopo aver lavorato per diversi anni nell'industria elettronica, si trasferì al CERN, il Centro europeo per la fisica delle

particelle, presso Ginevra, dove ha continuato a svolgere la sua attività di ricerca fino alla pensione.

A partire dagli anni Cinquanta, i fisici teorici avevano cercato una conferma della teoria dell'unificazione delle forze di Einstein, nella quale tutte le forze che agiscono in natura (ad esempio magnetismo e gravità) vengono messe in relazione. Una parte indispensabile di questa conferma era l'esistenza, prevista ma mai evidenziata sperimentalmente, dei bosoni W e Z0, particelle che costituiscono il tramite dell'interazione debole, la forza responsabile del decadimento delle particelle. I bosoni W e Z0 sono circa cento volte più pesanti dei protoni che si trovano nel nucleo atomico. In un esperimento progettato da Rubbia, i ricercatori speravano di poter osservare la particella W, con carica positiva o negativa, e la particella Z0, facendo collidere un fascio di protoni con un fascio di antiprotoni. Il contributo più significativo di Van der Meer alla riuscita di questo esperimento fu lo sviluppo di un metodo per creare fasci concentrati di protoni e antiprotoni, essenziali per lo svolgimento della ricerca. In particolare, Van der Meer ideò un metodo, chiamato "raffreddamento stocastico", che permetteva di accumulare gli antiprotoni, cosa di estrema difficoltà a causa dell'instabilità di tali particelle, e di comprimerli in fasci densi, come richiesto per la sperimentazione. Nel gennaio del 1983 i bosoni W e Z0 vennero rivelati per la prima volta, confermando l'unificazione delle interazioni elettromagnetica e debole.

George Charpak

George Charpak (Dabrowica, Polonia 1924), fisico francese di origine polacca, insignito del premio Nobel per la fisica nel 1992, per l'invenzione di una serie di rivelatori di particelle, tra cui la camera proporzionale a molti fili. Emigrato in Francia con la famiglia all'età di cinque anni, nel 1943, durante l'occupazione nazista, fu imprigionato dal governo di Vichy per aver militato nella resistenza e deportato nel campo di concentramento di Dachau, dove rimase prigioniero fino alla liberazione, nel 1945. Tornato in Francia, compì studi di ingegneria civile, seguiti da una specializzazione in fisica nucleare al Collège de France di Parigi. Divenuto cittadino francese, iniziò le ricerche sulla progettazione di dispositivi per l'individuazione delle particelle elementari.

Nel 1958 divenne ricercatore al CERN (Centro Europeo per la Ricerca Nucleare).

Charpak costruì la sua prima camera proporzionale a molti fili nel 1968. Si tratta di un dispositivo costituito da una coppia di lamine piane metalliche collegate da un certo numero di fili elettrici, il tutto contenuto all'interno di una camera di gas ionizzato. I fili attraggono gli elettroni generando correnti che vengono analizzate da un computer. Utilizzata per rivelare le particelle prodotte dalle collisioni ad alta energia negli acceleratori di particelle, è capace di rivelare fino a un milione di tracce al secondo, contro le 1-2 tracce al secondo della precedente camera a bolle. La sua adozione nei laboratori di ricerca permise straordinarie scoperte, tra cui quella delle particelle W e Z da parte del fisico italiano Carlo Rubbia.

Tre elementi strutturali fondamentali accomunano tutte le macchine di questo tipo: una sorgente di particelle, un tubo in cui è fatto il vuoto, dentro il quale si muove il fascio delle particelle, e diversi dispositivi per imprimere l'accelerazione. In anni più recenti, Charpak focalizzò la sua attenzione sulla ricerca medica, analizzando la struttura delle proteine con raggi X superveloci e studiando i recettori cerebrali. Reduce da un'esperienza di prigionia, Charpak è il fondatore della commissione SOS del CERN, che difende i diritti degli scienziati contro i governi illiberali. È membro dell'Accademia francese delle Scienze.

Quindi possiamo dedurre che il campo prediletto dagli studi di Charpak è stato quello delle particelle elementari, ovvero il complesso delle particelle subatomiche conosciute. In origine la stessa espressione veniva usata per indicare le particelle ritenute i costituenti fondamentali della materia, ossia le più piccole porzioni di materia, prive di struttura interna e dunque indivisibili. Nel tempo gli esperimenti hanno mostrato che la maggior parte delle particelle un tempo credute "elementari" di fatto non lo è: il termine è tuttavia rimasto nell'uso degli scienziati e oggi si riferisce in generale a tutte le particelle subatomiche. Le particelle elementari scoperte e classificate finora sono più di trecento. La fisica che studia le particelle elementari e le loro interazioni è nata all'inizio del XX secolo. È chiamata anche "fisica delle alte energie", perché la ricerca in questo campo necessita delle alte energie raggiungibili all'interno degli acceleratori di particelle: dispositivi che hanno lo scopo di accelerare fasci di particelle

cariche, portandoli ad alti valori di energia cinetica. Essi sono utilizzati dai fisici per lo studio della struttura fondamentale della materia e delle forze che regolano le interazioni fra particelle. In particolare il suo merito, come già detto prima è stato l'invenzione dei rivelatori di particelle; un dispositivo attivo, che reagisce al passaggio delle particelle in esame, e un sistema di misurazione, che trasforma in un segnale l'evento osservato. Le dimensioni e la struttura di un rivelatore di particelle variano dal semplice, portatile contatore Geiger alle più complesse camere a bolle e a scintillazione, che hanno dimensioni pari a quelle di una stanza.

La camera a bolle, fu inventata nel 1952 dal fisico statunitense Donald A. Glaser. Un liquido pressurizzato è tenuto a una temperatura poco più bassa del punto di ebollizione. Appena prima del passaggio delle particelle subatomiche la pressione viene ridotta, abbassando il punto di ebollizione, ma per qualche istante il liquido non bolle a meno che non vi si introduca qualche impurezza o disturbo. Le particelle di alta energia che attraversano la camera generano questo "disturbo": in seguito al loro passaggio si formano nel liquido delle minuscole bollicine che, fissate su fotografia, rendono visibile la loro traiettoria. Anche nel caso della camera a bolle è possibile misurare l'energia delle particelle ponendo il rivelatore tra i poli di un magnete: per ottenere campi più intensi ed efficaci si usano spesso magneti superconduttori. Una camera a bolle riempita con idrogeno liquido consente lo studio delle interazioni tra particelle accelerate e nuclei di idrogeno.

Invece Le particelle di alta energia che entrano in una camera a scintilla ionizzano l'aria o il gas posto tra un sistema di piastre o un reticolo di fili metallici, che hanno alternativamente carica positiva e negativa. Le scintille si sviluppano lungo il percorso di ionizzazione delle particelle, rendendo visibile il loro passaggio, e possono essere fotografate. Alcune di tali apparecchiature prevedono l'invio delle informazioni registrate direttamente a un computer, evitando l'uso della fotografia. La camera a scintilla opera velocemente ed è capace, se opportunamente regolata, di selezionare e rendere visibili solo le tracce del tipo di particelle che si vogliono studiare. Questo vantaggio è importante negli studi delle particelle cosiddette rare, ovvero che si creano a seguito di reazioni molto difficili a prodursi; per contro, le immagini riprese con una camera a scintilla

hanno una risoluzione e una finezza di dettaglio inferiori a quelle di una camera a bolle.

World Wide Web

Un fisico, Tim Berners-Lee, ha scritto una proposta per la gestione delle informazioni che mostra come le informazioni potrebbero essere trasferite facilmente in Internet utilizzando l'ipertesto.

L'idea era quella di collegare l'ipertesto con il personal computer e Internet, così che una singola rete di informazioni potesse aiutare i fisici del CERN a condividere tutte le informazioni memorizzate dal computer in laboratorio.

Berners-Lee ha creato un browser-editor con l'obiettivo di sviluppare uno strumento per rendere il web uno spazio creativo di condividere e modificare le informazioni e costruire un ipertesto comune. Così nasce, nel maggio 1990, il WorldWideWeb.

ACCELERATORI DI PARTICELLE

I due acceleratori più importanti e conosciuti sono l'LHC (Large Hadron Collider) e il LEP (Large Electron-Positron collider).

Il Large Electron-Positron (LEP) collider è stato il progetto principale al Cern dal 1989 al 2000. Questa macchina è stata in grado di accelerare elettroni e positroni fino a 100 GeV, un'energia cinetica che corrisponde a velocità prossime a quelle della luce.

Gran parte del lavoro che viene svolto attualmente al CERN è incentrato sul Large Hadron Collider e alla preparazione degli esperimenti collegati.

L'acceleratore di particelle è una macchina in cui si utilizzano campi elettrici e magnetici opportuni allo scopo di accelerare fino a una data velocità (ottenendo quindi un'energia fissata) particelle elettricamente cariche di tipo atomico e subatomico, come elettroni, protoni, deutoni, particelle alfa ecc. Durante la fase di accelerazione delle particelle, la loro energia cinetica (che si misura in multipli di elettronvolt) cresce da valori trascurabili fino a valori varianti tra qualche centinaio di keV (10^3 eV) e qualche centinaio di GeV (10^9 eV), secondo il tipo di particelle e di acceleratori; tuttavia l'intensità di corrente corrispondente al fascio di particelle è in genere molto piccola, dell'ordine del milliampere o del microampere. Le particelle escono dall'acceleratore sotto forma di fascio dalle caratteristiche fissate e predeterminate per quanto riguarda intensità, uniformità, dimensioni ecc.; all'azione del fascio viene solitamente esposto un bersaglio, costituito da altre particelle (molecole, atomi, nuclei); si studiano poi le loro interazioni, sia dal punto di vista della ricerca teorica fondamentale, sia per esperienze di tipo applicativo. Spesso un bersaglio, bombardato con un fascio di particelle cariche uscenti da un acceleratore, può produrre intensi fasci secondari di neutroni, di raggi gamma, di mesoni ecc. Soprattutto questo secondo fenomeno è di notevole interesse applicativo.

In generale, infatti, l'analisi dei risultati del bombardamento di un bersaglio con un fascio di particelle accelerate apporta informazioni sulla struttura dei nuclei, sul meccanismo delle reazioni nucleari e sulle proprietà delle particelle elementari; si possono ottenere inoltre dati essenziali per il progetto di reattori nucleari. Dopo la prima realizzazione, nel 1918, di una reazione nucleare da parte di Rutherford, che utilizzò particelle alfa emesse da sostanze

radioattive naturali, dal 1920 vennero compiuti numerosi tentativi per accelerare le particelle in laboratorio mediante campi elettrici molto intensi. Nel 1930, Cockcroft e Walton riuscirono, con un generatore di alta tensione da loro inventato, a realizzare la prima reazione nucleare prodotta artificialmente dall'uomo: i protoni accelerati da una tensione di 300.000 volt provocarono la trasformazione del litio in elio. Questo risultato straordinario diede origine allo studio e allo sviluppo di numerosi tipi di acceleratore. Tuttavia, le gravi difficoltà associate alle tensioni elettriche elevate, necessarie per accelerare le particelle, non permisero in un primo tempo di superare i valori di alcune centinaia di keV. In realtà, era già stato scoperto (da Wideroe, nel 1928) il principio dell'accelerazione multipla o ripetitiva: in base a questo principio, una particella che passi più volte attraverso un campo di tensione data, acquista un'energia sempre più elevata a ogni passaggio, senza bisogno che esista una tensione elettrica elevata in misura corrispondente. Nel 1929, appreso il principio di Wideroe, Lawrence realizzò il ciclotrone, un tipo di acceleratore in cui il passaggio ripetuto attraverso un campo elettrico accelerante alternato viene realizzato costringendo le particelle a muoversi su orbite circolari mediante un campo magnetico. Si tratta di macchine impressionanti tanto per le dimensioni, quanto per il costo.

Acceleratori elettrostatici

Il nome di questi acceleratori è dovuto alla natura del campo elettrico impiegato, che è statico, cioè non varia nel tempo. Il moltiplicatore di tensione di Greinacher e Cockcroft e Walton consente di raggiungere energie dell'ordine di 1 MeV (10^6 eV), in un tubo di accelerazione alimentato da una sorgente ionica e munito di elettrodi per guidare gli ioni immessi. L'invenzione di Van de Graaff, che consiste nel trasferire, mediante un nastro trasportatore, le cariche elettriche all'interno di un elettrodo ad alta tensione, permette di raggiungere circa 10 MeV. Gli acceleratori moderni di questo tipo sono stabilizzati in maniera rigorosa e costituiscono il principale strumento di sperimentazione per la fisica della struttura nucleare. (Un sistema derivato e particolarmente ingegnoso, detto acceleratore tandem, permette di raggiungere energie ancora superiori).

Acceleratori circolari

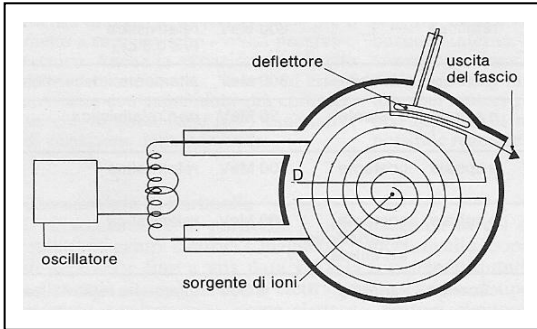
Tutti questi acceleratori utilizzano un campo magnetico che agisce sulle particelle in movimento, in maniera da costringerle ad attraversare il sistema accelerante in modo ripetitivo su orbite circolari, spiraliformi ecc.

Come si è accennato, il campo magnetico ha una configurazione geometrica spaziale scelta in modo tale che le forze focalizzanti agiscano sia in direzione radiale sia in direzione assiale, mantenendo le particelle in un "fascio" che compie oscillazioni stabili, le oscillazioni di betatrone, intorno all'orbita teorica. Il campo elettrico accelerante è ad alta frequenza e le particelle devono muoversi in modo tale da attraversarlo soltanto nel momento in cui la loro fase produce un'accelerazione.

I sistemi acceleranti ad alta frequenza sono alimentati da oscillatori simili a quelli impiegati nelle stazioni radio.

Il ciclotrone è formato da una camera a vuoto circolare in cui sono presenti due elettrodi semicircolari cavi a forma di D. I due elettrodi sono come due gusci accostati per le aperture (la parte piatta della D). Questi elettrodi possono essere colpiti da particelle spurie che ne causano il riscaldamento e devono essere raffreddati mediante circolazione di acqua in appositi tubi. La camera è posta tra le espansioni polari di un potente magnete, in modo che il campo attraversi il piano su cui giacciono gli elettrodi. Quando una particella viene introdotta tangenzialmente alla camera, ortogonalmente al campo magnetico, essa viene deviata e mantenuta su un'orbita circolare per effetto della forza di Lorentz. Nel vuoto la particella è libera di ruotare, ma, perdendo lentamente energia (tutte le cariche elettriche, se accelerate, emettono fotoni, detti di Bremsstrahlung), percorre una traiettoria a spirale fino al centro.

Se ora viene applicata una opportuna differenza di potenziale alternata ad alta frequenza tra i due elettrodi, le particelle subiscono un'accelerazione ogni volta che passano nello spazio tra essi. Accelerando, il diametro dell'orbita aumenta, fino a quando il fascio non fuoriesce tangenzialmente dal bordo del dispositivo.



Il ciclotrone opera con passaggi ripetuti delle particelle fra due elettrodi cavi, dalla caratteristica forma a mezzaluna (la « D » della macchina), servendosi di un campo magnetico costante per incurvare la traiettoria.

In altri termini: il ciclotrone ha un campo magnetico B omogeneo. In un campo di questo genere la velocità angolare ω di una particella di massa m e di carica e vale

$$\omega = B e / m$$

ed è quindi indipendente dall'energia.

Un elettrodo del sistema di accelerazione, la cui tensione varia con frequenza uguale a quella di rivoluzione della particella, accelera la particella all'entrata e all'uscita, mentre la particella resta per così dire nascosta all'interno della D (dove non esiste campo elettrico, secondo le leggi dell'elettrodinamica) per tutto il tempo durante il quale la tensione ad alta frequenza viene invertita. Accelerato in questa maniera giro per giro, il fascio di particelle descrive un'orbita spiraliforme di raggio r crescente secondo la relazione

$$R = mv / e B$$

dove v è la velocità. Le equazioni del ciclotrone sono però applicabili soltanto finché la massa m della particella è costante.

Quando l'energia aumenta oltre un certo limite, la meccanica relativistica dimostra che si verifica un incremento della massa in base alla relazione

$$m = \gamma m_0 = \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

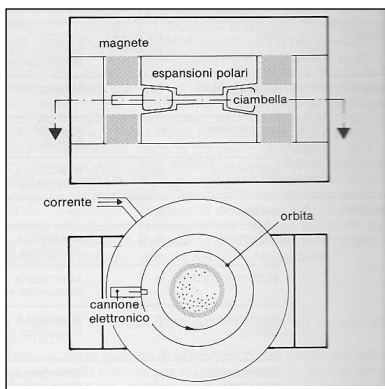
e ciò limita l'applicazione del ciclotrone classico a circa 10 MeV, per i protoni. I principi del ciclotrone restano comunque fondamentali per il funzionamento di tutti gli acceleratori circolari.

Per superare i limiti impliciti nel funzionamento «a risonanza» del ciclotrone tradizionale, e spingere le particelle a velocità per le quali l'aumento relativistico della massa diventa significativo, si ricorre alle macchine «sincrone», varianti del ciclotrone quali il sincrociclotrone (nel quale al variare della massa della particella varia la frequenza della tensione acceleratrice) e il sincrotrone (nel quale varia sia la frequenza della tensione sia l'intensità del campo magnetico guida), oppure a ciclotroni di nuovo disegno (ciclotroni isocroni o AVF).

Il sincrociclotrone utilizza un campo omogeneo, ma permette di raggiungere velocità «relativistiche» (cioè prossime alla velocità della luce) adattando la frequenza del campo accelerante alla frequenza di rivoluzione, che diminuisce col crescere della massa. In questo caso viene accelerato non un fascio continuo, ma solo un «pacchetto» di particelle per volta. Per quanto la corrente (cioè l'intensità del fascio) sia limitata, sono proprio i sincrociclotroni gli acceleratori che hanno consentito i progressi maggiori per la fisica delle particelle tra il 1948 e il 1960.

Il sincrotrone per protoni, o protosincrotrone, è costruito per arrivare a energie elevatissime (altamente relativistiche). Poiché il raggio delle orbite diventa in questo caso enorme, ci si deve limitare a un magnete a forma di anello, con una camera a vuoto a forma di ciambella che delimita e definisce un'orbita fissa. Il campo magnetico ha un certo valore, minimo, nell'istante in cui un pacchetto di particelle, preaccelerato da un iniettore, viene introdotto nell'anello; successivamente il campo viene fatto aumentare contemporaneamente al crescere dell'energia delle particelle. La difficoltà maggiore consiste nel mantenere in fase le particelle con la tensione acceleratrice. I sincrotroni moderni utilizzano la focalizzazione forte: i singoli magneti, disposti in gran numero lungo l'orbita, sono espansioni polari in grado di produrre un campo alternato; un magnete ha un campo crescente, il successivo un campo decrescente verso l'esterno. I protosincrotroni di Brookhaven (3 e 30 GeV), di Berkeley (6 GeV), del CERN a Ginevra (30 GeV) e di Serpukhov (70 GeV), costruiti secondo questi principi, hanno consentito l'enorme sviluppo della fisica delle particelle elementari verificatosi nel corso degli ultimi decenni e hanno portato alla scoperta di numerosissime nuove «particelle».

Il sincrotrone per elettroni, o elettrosincrotrone, ha una struttura simile a quella del sincrotrone per protoni. Tuttavia la piccola massa degli elettroni li rende altamente relativistici fin dall'inizio; essendo quindi la loro velocità praticamente costante (e pari all'incirca alla velocità c della luce), la frequenza di accelerazione è fissa e soltanto il campo magnetico aumenta all'aumentare della massa relativistica degli elettroni con l'energia. Un problema particolare è costituito dalla radiazione elettromagnetica (-bremsstrahlung) emessa dagli elettroni accelerati dalla forza centripeta sulla loro orbita; questa radiazione, formata principalmente da raggi X,



Sezione verticale e pianta di un betatrone: questa macchina accelera soltanto elettroni, seguendo il principio del trasformatore per corrente alternata, cioè con un campo magnetico alternato e un "secondario" costituito dalla stessa corrente di elettroni (che circola nella ciambella).

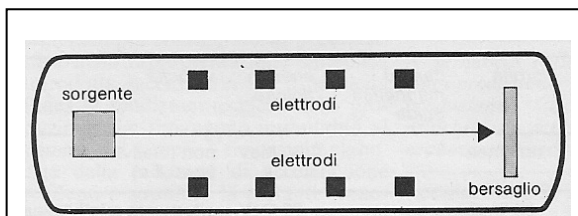
rallenta gli elettroni e non consente di raggiungere che energie di pochi GeV. Elettrosincrotroni da 6 GeV sono in funzione a Cambridge (USA) e ad Amburgo.

Il betatrone accelera elettroni (raggi beta), utilizzando un principio elettrodinamico particolarmente interessante, suggerito da Kerst nel 1940, che è in pratica un'applicazione del principio di funzionamento del trasformatore elettrico. Il circuito primario (che è costituito da un avvolgimento elettrico impulsato in modo da creare un campo magnetico crescente su una camera a vuoto a forma di ciambella) agisce sul circuito secondario (un fascio di elettroni circolanti nella camera); per le leggi dell'induzione di Faraday, il campo magnetico crescente fornisce agli elettroni il campo elettrico necessario all'accelerazione, mentre mantiene gli elettroni su un'orbita circolare.

Il ciclotrone isocrono (o AVF, cioè a campo magnetico variabile azimutalmente) permette di estendere il principio fondamentale del ciclotrone (cioè rivoluzione delle particelle con frequenza costante, o isocronismo) a energie relativistiche. Negli anni Trenta, Thomas dimostrò che un campo magnetico variabile in senso azimutale

(lungo l'orbita) permette di conservare una focalizzazione assiale delle particelle, se il campo magnetico cresce al crescere del raggio in modo da conservare l'isocronismo tra la velocità di rotazione del fascio di particelle e il campo elettrico acceleratore allorché la massa aumenta secondo le leggi relativistiche. Il vantaggio del ciclotrone isocrono consiste nell'accelerazione continua del fascio e quindi nella possibilità di ottenere una corrente (intensità) che supera di parecchi ordini di grandezza quella dei sincrociclotroni. Numerosi ciclotroni isocroni, per energie dell'ordine di 100 MeV, vengono prodotti industrialmente. Due grandi ciclotroni isocroni sono in funzione dal 1974 a Vancouver, in Canada, e a Zurigo, in Svizzera, il primo per 500 e il secondo per 600 MeV; il loro scopo è principalmente la produzione di fasci di mesoni π ad alta intensità.

Acceleratori lineari



L'acceleratore lineare opera con una serie di elettrodi mantenuti a tensione gradualmente crescente e con traiettoria rettilinea delle particelle accelerate

Negli acceleratori lineari le particelle cariche vengono accelerate su una traiettoria rettilinea, facendole passare attraverso campi elettrici ad alta frequenza successivi, stabiliti fra elettrodi vuoti posti all'interno di cavità risonanti. Qui i campi elettromagnetici acceleranti vengono eccitati attraverso una guida d'onda che convoglia la potenza fornita da un klystron o da un magnetron. Poiché gli elettroni raggiungono rapidamente la velocità della luce, le cavità di lunghezza differente sono le prime due o tre, le altre sono di lunghezza costante. La sezione con le cavità di lunghezza differente è detta buncher e, oltre ad accelerare gli elettroni, ha anche il compito di formare i pacchetti di particelle. Come nel caso delle D dei ciclotroni, le particelle restano "nascoste" negli elettrodi durante la fase opposta della tensione di accelerazione. Per quanto il principio fondamentale sia stato enunciato, come abbiamo detto, da Wideroe nel 1928, la realizzazione pratica di questi acceleratori è stata possibile soltanto molto più tardi, dopo la costruzione di potenti amplificatori a frequenza altissima; la potenza necessaria è infatti enorme, poiché ogni particella attraversa ciascun elettrodo una volta soltanto.

Anche il problema della conservazione del fascio sull'asse è stato risolto per i protoni soltanto dopo la scoperta della focalizzazione con magneti quadripolari.

Alcuni acceleratori lineari per protoni, da 200 MeV, vengono utilizzati attualmente come iniettori per i sincrotroni. L'acceleratore lineare più potente (800 MeV e una corrente prevista di 1 mA) è in funzione a Los Alamos (USA) al fine di compiere ricerche analoghe a quelle del ciclotrone isocrono di Zurigo.

Gli acceleratori lineari per elettroni sono di più facile costruzione, poiché gli elettroni raggiungono quasi immediatamente una velocità costante, praticamente uguale a quella della luce. Acceleratori di questo tipo funzionano nei centri di Frascati (Roma) e Orsay (Parigi) con circa 1 GeV; il più potente, che raggiunge 20 GeV ed è lungo 3,2 km, viene utilizzato per ricerche di elettrodinamica e di fisica delle particelle a Stanford (USA).

Anelli di accumulazione

Nell'utilizzazione normale di un acceleratore le particelle ad alta energia vengono dirette verso un bersaglio di materia, dove si verificano reazioni nucleari o produzione di altre particelle elementari. A livelli elevatissimi di energia (altamente relativistici), l'energia disponibile in una collisione nucleone-nucleone di questo tipo, cioè a bersaglio fisso, aumenta lentamente (come vi con l'energia cinetica della particella incidente (legge di meccanica relativistica). Per evitare questo cattivo «rendimento», basta fare in modo che particelle rapide si urtino « frontalmente », basta cioè generare una collisione tra fasci che si intersecano. La difficoltà, tuttavia, risiede nella densità di particelle, che è estremamente debole nei fasci emessi dagli acceleratori. La soluzione è stata trovata con la costruzione di anelli di accumulazione, nei quali il fascio viene immesso e accumulato, finché una corrente dell'ordine dell'ampere circola in un anello analogo a un sincrotrone.

ACCELERATORI AL CERN

Large Electron-Positron Collider (LEP)

Large Electron-Positron Collider (LEP) è stato uno dei più grandi acceleratori di particelle mai costruito. Ha operato al CERN di Ginevra a partire dal 1989. Era un anello di accumulazione



circolare, di 27 chilometri di circonferenza, costruito in un tunnel sotterraneo al confine tra Svizzera e Francia. È stato disattivato nel 2000 e successivamente rimosso per fare posto al Large Hadron Collider (LHC). Gli elettroni e i positroni erano accelerati in modo da ruotare in sensi opposti nel tubo a vuoto della macchina, che aveva una sezione del diametro di circa 12 cm: le particelle

potevano raggiungere velocità prossime a quella della luce, incrociandosi in quattro punti dell'anello, chiamati punti di interazione. In ciascuna di queste posizioni erano stati realizzati quattro rivelatori: ALEPH, DELPHI, L3 e OPAL. L'aspetto esterno di questi esperimenti, di solito, è un grosso cilindro, un magnete, all'interno del quale si genera un campo magnetico che permette di distinguere i diversi tipi di particelle osservate: le dimensioni tipiche di un esperimento sono di una decina di metri sia in lunghezza sia in diametro, mentre il peso è di alcune migliaia di tonnellate.

All'interno del magnete vengono posti vari rivelatori di particelle, sistemati in strati concentrici, come le foglie di una cipolla.

Quando LEP entrò in funzione nel 1989 accelerava elettroni e positroni fino ad un'energia totale sufficiente per la produzione del bosone Z. L'acceleratore fu aggiornato successivamente per aumentare l'energia massima, migliorando la precisione delle misure del bosone Z e sui bosoni W^{\pm} e permettendo di tentare la ricerca del bosone di Higgs.

Sfortunatamente, però, la scarsa massa degli elettroni fece sì che esso perdesse costantemente dell'energia cinetica convertendola in raggi X.

Per questo motivo, è probabile che LEP abbia raggiunto il limite massimo per la tecnologia del collider elettrone-positrone, e dunque

alla fine del 2000 fu spento e smantellato per consentire la costruzione del nuovo LHC nel suo tunnel.

L'LHC

Gran parte del lavoro che viene svolto attualmente al CERN è incentrato sul Large Hadron Collider e alla preparazione degli esperimenti collegati.

LHC è l'oggetto più freddo dell'universo: 1,9 Kelvin, meno di due gradi sopra lo zero assoluto, mentre lo spazio cosmico è a 2,7. L'8 agosto un primo fascio di particelle è stato immesso nell'anello di 1700 magneti. Il 22 agosto è stata la volta del secondo fascio. Il 25 si è ottenuta la sincronizzazione dei vari acceleratori che in stadi successivi portano i protoni vicinissimi alla velocità della luce, per poi farli scontrare nei quattro giganteschi laboratori sotterranei dove sono collocati gli esperimenti: rivelatori di particelle grandi come edifici di cinque piani. Questi da qualche mese sono accesi. Sono stati osservati «raggi cosmici» provenienti dallo spazio curvati da questo potentissimo campo magnetico (milioni di volte quello della Terra che orienta l'ago della bussola). Come tutti gli acceleratori di particelle, LHC è una macchina in divenire. Solo nel 2010 raggiungerà il top delle sue possibilità, e gli esperimenti continueranno almeno fino al 2016.

Al momento della collisione, l'energia raggiunta all'interno dell'LHC sarà di 14 TeV. L'acceleratore necessiterà di un fortissimo campo magnetico per mantenere il fascio nella traiettoria dei 27 km e sarà utilizzata la tecnologia dei superconduttori. La progettazione dell'LHC ha richiesto una precisione straordinaria, basti pensare ad esempio che è necessario tenere conto dell'influenza della forza di attrazione gravitazionale esercitata dalla Luna sulla crosta terrestre e dei disturbi elettrici provocati dal passaggio dei treni in superficie ad un chilometro di distanza.

L'obiettivo per il quale un così impressionante strumento scientifico è stato fortemente voluto dai fisici è quello di ricreare le condizioni che si verificarono nell'Universo ad un tempo di un milionesimo di milionesimo di secondo dopo il Big Bang, avvenuto 13,7 miliardi di anni fa, e trovare il bosone di Higgs, grazie al quale si spiegherebbe il perché della massa della materia.

Per indagare la struttura più intima della materia, i fisici utilizzano da tempo il metodo più intuitivo, quello che usavamo da bambini quando rompevamo il gioco per vederne l'interno: con gli acceleratori si ottengono "scontri" tra gruppi di particelle e, con le collisioni, si "rompono" le particelle stesse.

Uno degli obiettivi di questo esperimento è di arrivare alle componenti elementari della materia i quark e di "vedere" particelle come il bosone di Higgs. Per ottenere ciò, nella macchina vengono iniettati due fasci di protoni che circolano in direzioni opposte.

Prima i protoni (che non sono altro che il nucleo di atomi di idrogeno ai quali è stato strappato l'elettrone) vengono accelerati da strumenti connessi all'LHC e, successivamente, iniettati in due tubi all'interno dei quali è stato prodotto il vuoto, un vuoto molto spinto, paragonabile a quello dello spazio intergalattico.

L'accelerazione avviene grazie a un campo magnetico generato in speciali cavità: i protoni sono particelle cariche positivamente e vengono "spinte" da altre cariche positive che le respingono e danno loro un'accelerazione. Aumentando l'intensità del campo magnetico, si aumenta la "spinta" e quindi l'accelerazione.

I fasci così accelerati raggiungono una velocità prossima, ma non uguale, a quelle della luce e percorrono 11.245 giri al secondo; dato che ogni giro misura 27 km e l'apparecchio lavora 10 ore al giorno, i nostri protoni percorrono circa 10 miliardi di km ogni giorno, come un viaggio andata e ritorno Terra-Nettuno.

I due fasci di protoni hanno direzioni opposte e collidono in quattro punti lungo l'orbita, in corrispondenza di grandi sale nelle quali sono stati installati gli "occhi" di LHC, cioè i rivelatori. Affinché nei punti di collisione avvengano un numero significativo di collisioni, è necessario che i fasci siano il più possibile compatti, cioè che non si disperdano, cosa che accade dato che abbiamo a che fare con particelle ugualmente cariche che si respingono. Per controllare la "forma" dei fasci sono stati installati lungo tutta la circonferenza circa 2000 magneti superconduttori che producono un campo magnetico con un intensità pari a 8 Tesla, 200.000 volte più intenso del campo magnetico terrestre. Questi magneti superconduttori per funzionare devono essere tenuti ad una temperatura di circa 2°K (-

271,30 C°), la temperatura dello spazio interstellare. Aumentando la velocità delle particelle si aumenta anche la loro energia.

L'energia, nella fisica degli acceleratori, si misura in elettronvolt (eV). L'eV equivale ad una quantità di energia molto piccola e corrisponde all'energia che un elettrone acquisisce quando attraversa un campo elettrico la cui tensione è 1 Volt.

Le collisioni vengono osservate in quattro principali esperimenti di fisica delle particelle: ATLAS (A Toroidal LHC ApparatuS), CMS (Compact Muon Solenoid), LHCb (Large Hadron Collider beauty) ed ALICE (A Large Ion Collider Experiment). Si tratta di enormi apparati costruiti in caverne alte come un palazzo di sei piani e dislocate lungo l'anello dell'acceleratore. Sono costituiti da numerosi rivelatori che utilizzano tecnologie diverse per "fotografare" le collisioni. Ognuno di questi strumenti ha un compito ben preciso.

ATLAS ha come scopo principale la dimostrazione dell'esistenza del bosone di Higgs, che dovrebbe spiegare perché la materia ha massa. I rivelatori sono in grado di misurare le traiettorie degli oggetti dispersi dopo la collisione e, da queste, ricavare moltissime informazioni. E' stato costruito per dare risposte alle numerose domande sulla materia oscura della quale non si conosce né l'origine né la composizione. Deve inoltre verificare due Teorie: la Teoria della Grande Unificazione, secondo la quale le forze della natura sono in realtà un'unica forza, e la Teoria della Supersimmetria che prevede l'esistenza di altre particella ancora sconosciute.

CMS, come ATLAS, indaga l'esistenza del bosone di Higgs e cercherà di confermare la bontà del Modello Standard con cui i fisici descrivono l'Universo.

ALICE è un esperimento in cui vengono studiate le collisioni tra nuclei di piombo, molto più pesanti dei protoni. Nell'urto tra i nuclei di piombo e protoni e neutroni, si dovrebbe osservare un plasma di quark e gluoni: il plasma è un gas composto solo da particelle cariche, i quark sono le particelle fondamentali cariche che costituiscono tutto, a partire dai protoni, mentre i gluoni (il cui nome deriva dalla parola inglese glue che vuol dire colla) sono i responsabili dell'interazione forte, la forza che tiene insieme i quark

che formano tutte le particelle note e ancora da scoprire. Ottenere un plasma di quark e gluoni vuol dire capire come la materia si aggrega.

LHCb ha l'obiettivo di spiegare l'asimmetria tra materia e antimateria: la teoria dice che, subito dopo il Big Bang, materia e antimateria sono comparse in quantità uguali, eppure oggi quello che conosciamo è composto solo da materia.

Teoria delle Stringhe

Alla domanda "che dire della cosiddetta «teoria del tutto» o «teoria delle stringhe», tanto in voga tra i fisici di tutto il mondo" Tullio Regge, noto fisico e matematico di Torino, risponde in questo modo: "Secondo tale ipotesi gli oggetti fondamentali, alla base della materia esistente, sono cordicelle (stringhe) di dimensioni pari alla lunghezza di Planck (10 elevato alla -33 centimetri) che vibrano e, in base a come vibrano, danno luogo a diverse particelle subatomiche e alle forze che le governano"

La teoria delle stringhe vede la sua nascita nel 1968, quando un fisico italiano Gabriele Veneziano, riuscì ad abbattere la barriera dell'inspiegabilità delle interazioni forti. Quando si parla di interazioni forti si vuole definire quel tipo di interazioni, mediata dai gluoni che, fra i quark. Questo scambio di gluoni tra un i quark produce un campo attrattivo che si oppone alle forze elettromagnetiche repulsive del nucleo.

La QED, ovvero la teoria elettrodinamica quantistica che si occupa di fotoni, elettroni e positroni e i processi d'urto fra particelle, fu molto limitata nell'applicare i suoi metodi risolutivi sulle particelle soggette a forte interazione a causa dell'estrema intensità di queste forze.

I risultati che si ottenevano erano concreti solo sotto particolari ipotesi.

Veneziano ebbe allora l'intuizione di collegare alla descrizione matematica di un processo d'urto tra due particelle e la funzione BETA di Eulero.

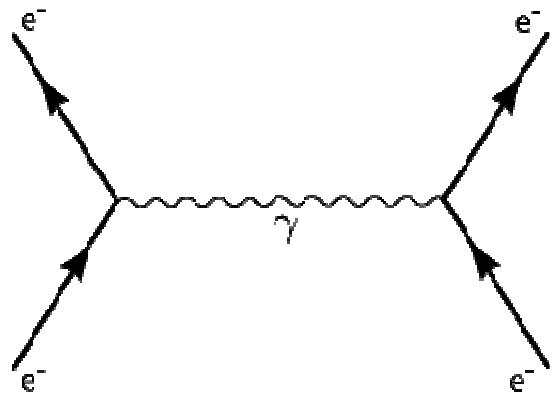
La funzione funzionava anche se nessuno sapeva spiegare il perché, e fu subito chiaro che i risultati ottenuti da Veneziano davano

origine ad una teoria molto più complessa di ogni altra precedentemente nuova.

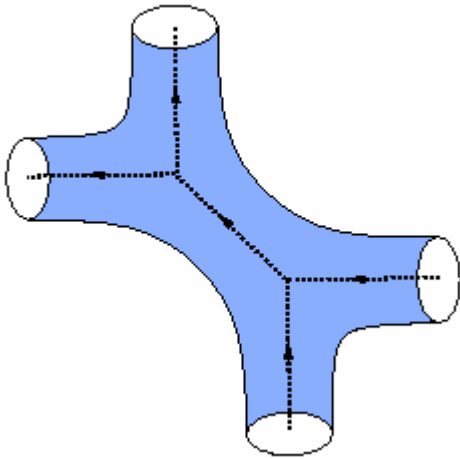
Due anni dopo, due scienziati Yoichiro Nambù, e Leonard Susskind, notarono che i nuovi risultati erano possibili se le linee descritte dalle particelle, nel diagramma di Feynman, venivano sostituite con tubi o nastri, ovvero da stringhe chiuse o aperte. In questo modo, rappresentando la forza nucleare con stringhe ad una sola dimensione la funzione di Eulero descrive perfettamente queste forme.

Il diagramma di Feynman è uno strumento inventato dall'omonimo fisico statunitense che permette di calcolare un'ampia classe di fenomeni che coinvolgono più particelle nella teoria quantistica dei campi. Nel diagramma le linee rappresentano le particelle e il luogo di incontro delle linee viene chiamato vertice.

Il diagramma di Feynman.



Questo è un semplice esempio di diagramma, dove si ha $e^- + e^- \rightarrow e^- + e^-$. Viene descritta la situazione dove due elettroni si avvicinano uno all'altro ed a un certo istante uno dei libera un fotone (la linea ondulata) che viene raccolto dall'altro dopo un tempo pari a Δt . Va considerato però che questi diagrammi sono in realtà una descrizione matematica e non fisica dell'interazione, pertanto le linee rappresentanti gli elettroni e il fotone sono immaginarie.



Esempio di diagramma di Feynman con stringhe chiuse.

Nonostante gli sforzi di questi fisici, i risultati previsti della forza attraverso le stringhe non corrispondevano alla realtà, è allora il mondo fisico continuò a riferirsi al modello standard. Solo qualche anno dopo, nuovi fisici statunitensi, cercarono di considerare la stringa allo stesso modo di un messaggero la vibrazione della stringa, e constatarono che le nuove proprietà della stringa coincidevano perfettamente con quelle del gravitone, ossia una particella ipotetica responsabile della trasmissione della gravità. Questo legame tra teoria delle stringhe e universo consentiva il ricorso ad un meccanismo di "compattazione" che consente di legare l'universo, nell'ambito della relatività generale, a dimensioni microscopiche. Il risultato di questa teoria fu la cosiddetta stringa bosonica che vista in relazione all'azione di Polyakov si riesce a dedurre che ogni stringa vibra in modo diverso e che ogni stato di vibrazione rappresenta una particella diversa. La massa di cui è dotata la particella e i vari modi in cui può interagire, sono determinati dai modi in cui la stringa vibra — essenzialmente, dalla nota che la stringa vibrando produce. La scala delle note, ad ognuna delle quali corrisponde una particella, è denominata "spettro energetico" della teoria. Però la stringa bosonica apparve incompleta. Le particelle elementari comprendono infatti un gran numero di fermioni, le tre generazioni di quarks e i leptoni presenti nel modello standard. Il modello di stringa conosciuto necessitava quindi di un'estensione in grado di descrivere particelle fermioniche. Venne introdotta allora la stringa fermionica che richiedeva però un universo con nove dimensioni spaziali e la sua formulazione matematica presentò per diversi anni una caratteristica inusuale poiché alcune delle sue particelle sembravano violare il principio di esclusione di Pauli che afferma : "due fermioni identici non possono occupare simultaneamente lo

stesso stato quantico". Questo ostacolo fu superato con la "proiezione GSO" che restringeva gli spazi ammissibili dalla stringa fermionica in modo tale che tutti e solo i suoi fermioni fossero soggetti al principio di Pauli.

La "super simmetria" che stabiliva una corrispondenza tra particelle bosoniche e fermioniche. Questa proiezione era stata motivata in origine con l'intento di trovare una "supersimmetria" che stabiliva una corrispondenza tra bosoni e fermioni. Nella sua realizzazione più semplice questa simmetria prevede l'esistenza, apparentemente non realizzata in natura, di bosoni e fermioni di uguale massa. Ad esempio, il modello standard non contiene questa simmetria. La proiezione GSO era nata con lo scopo di collegare la stringa fermionica ad un modello simile definito in dieci dimensioni (9 spaziali più il tempo) e noto come supergravità I. Il risultato ottenuto venne chiamato superstringa I ed è caratterizzato dalla presenza simultanea di stringhe chiuse e aperte. Le numerose anomalie della superstringa I vennero annullate nel 1984 da Michael Green e John Schwarz che con il loro rivoluzionario metodo di cancellazione diedero via ad un'esplosione di interesse per le stringhe, tanto si associa il 1984 come l'anno della "prima rivoluzione delle superstringhe". Negli anni novanta Witten e altri trovarono forti prove a dimostrazione che le differenti teorie delle superstringhe sono diversi limiti di una sconosciuta teoria a undici dimensioni chiamata M-teoria. Queste scoperte stimolarono la seconda rivoluzione delle superstringhe.

Se da un lato comprendere i dettagli delle teorie delle stringhe e delle superstringhe richiede la conoscenza di una matematica abbastanza sofisticata, alcune proprietà qualitative delle stringhe quantistiche possono essere capite in modo abbastanza intuitivo. Per esempio, le stringhe sono soggette a tensione, più o meno come le tradizionali corde degli strumenti; questa tensione è considerata un parametro fondamentale della teoria. La tensione della stringa è strettamente collegata alla sua dimensione. Si consideri una stringa chiusa ad anello, libera di muoversi nello spazio senza essere soggetta a forze esterne. La sua tensione tenderà a farla contrarre in un anello sempre più stretto. L'intuizione classica suggerisce che essa potrebbe ridursi ad un punto, ma questo contraddirebbe il principio di indeterminazione di Heisenberg. La dimensione caratteristica della stringa sarà quindi determinata dall'equilibrio fra la forza di tensione, che tende a

renderla più piccola, e l'effetto di indeterminazione, che tende a mantenerla "allargata". Di conseguenza, la dimensione minima della stringa deve essere collegata alla sua tensione.

Bosone di Higgs

Incominciamo innanzitutto con il dare una definizione di "bosone". Nel campo della fisica quantistica, tutte le particelle dell'universo a noi note si dividono in due gruppi: i fermioni ed i bosoni. I fermioni costituiscono la materia ordinaria, hanno energia di stato fondamentale negativa, spin semintero (come $\frac{1}{2}$) e, a differenza dei bosoni, obbediscono al principio di esclusione di Pauli (un singolo stato quantico non può essere occupato da più di un fermione).

A differenza loro, i bosoni, sono invece liberi di affollare in gran numero uno stesso stato quantico. La luce laser ne è un caso specifico relativo ai fotoni (un tipo di bosoni). Inoltre i bosoni hanno energia di stato fondamentale positiva e spin intero (0,1,2). I bosoni danno origine a interazioni tra i fermioni, come la forza gravitazionale e la luce.

Nella teoria della supergravità, si ha un ugual numero di fermioni e bosoni, poiché le loro rispettive energie di stato fondamentali si elidono tra loro, essendo una negativa e una positiva.

La proprietà di obbedire o meno al principio di esclusione di Pauli si traduce matematicamente nel fatto che i bosoni seguono la statistica di Bose-Einstein mentre i fermioni la statistica di Fermi-Dirac. Le conseguenze sono che bosoni e fermioni presentano proprietà diverse di simmetria sotto lo scambio di due particelle: un sistema composto di particelle identiche della classe bosonica si trova sempre in uno stato globale completamente simmetrico sotto lo scambio di due particelle. Un sistema composto di fermioni identici, al contrario, si trova sempre in uno stato antisimmetrico sotto lo scambio di due fermioni.

Quindi, il nucleo di un atomo può essere un bosone oppure un fermione: dipende dal numero dei suoi protoni e neutroni (se è pari sarà un bosone, se è dispari un fermione). Questa proprietà spiega lo strano comportamento dell'elio, che, a bassissime temperature, è un superfluido, per cui, tra le altre cose, non ha viscosità: i suoi nuclei sono bosoni e possono passare uno attraverso l'altro.

Il Modello Standard, teoria che descrive tutte le particelle elementari a noi oggi note e tre delle quattro forze fondamentali, ossia le interazioni forti, elettromagnetiche e deboli. Si tratta di una teoria di campo quantistica coerente sia con la meccanica quantistica che con la Relatività speciale

All'interno di questa teoria i bosoni ricoprono il ruolo di particelle mediatrici delle forze.

Alla base della formulazione del Modello standard viene posto un principio di simmetria. Questo consiste nell'invarianza della teoria sotto opportune trasformazioni, dette trasformazioni di gauge. L'invarianza di gauge garantisce la coerenza matematica e la capacità di previsione della teoria, ossia quella che tecnicamente viene definita la "rinormalizzabilità" della teoria.

Le trasformazioni di gauge sono relative a dei generatori: i bosoni vettori che descrivono le forze osservate in natura che sono quelle descritte dal gruppo unitario $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$. Questo gruppo è costituito dal prodotto del gruppo $SU(2) \times U(1)$ che descrive le interazioni elettromagnetiche e deboli, ed il gruppo $SU(3)$ che descrive le interazioni forti.

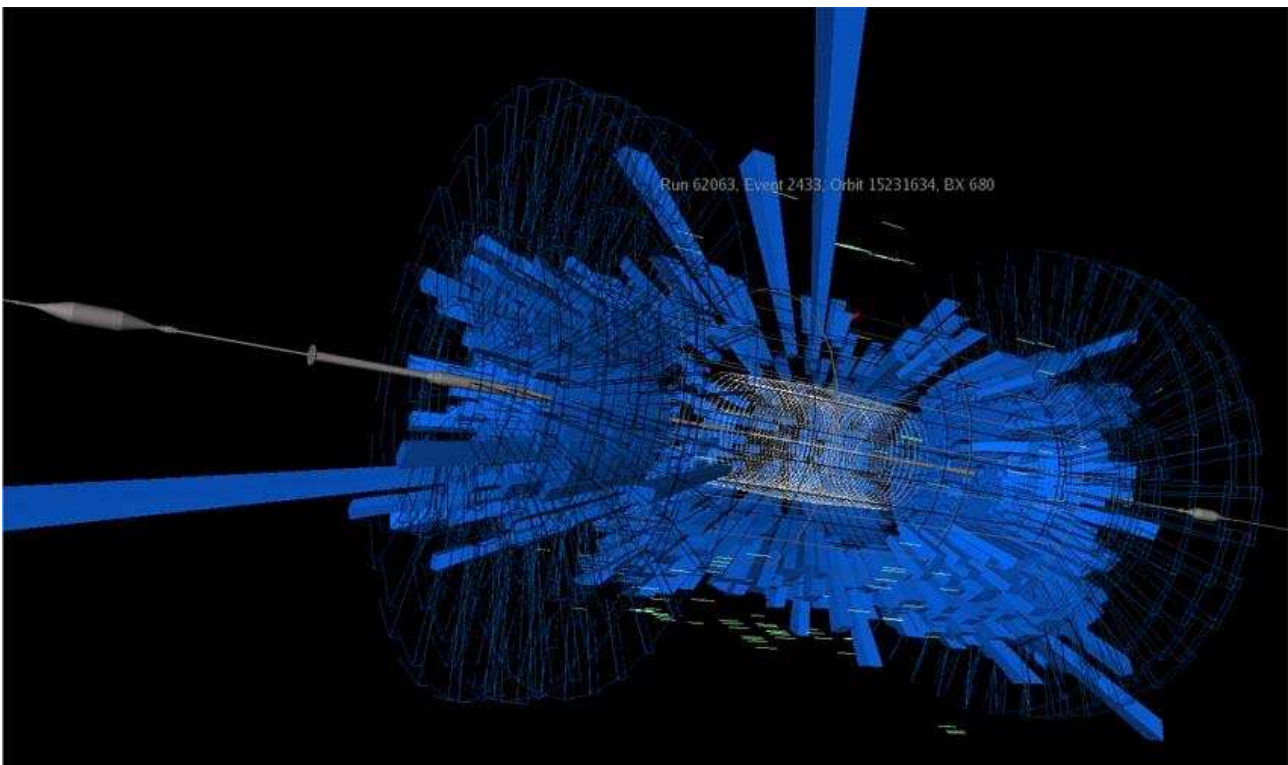
La descrizione delle interazioni elettromagnetiche attraverso il gruppo $U(1)$ prende il nome di elettrodinamica quantistica, o QED, mentre la descrizione delle interazioni forti attraverso il gruppo $SU(3)$ prende il nome di cromodinamica quantistica, o QCD.

Le teorie di gauge, di per sé, non sono in grado di descrivere bosoni *vettori* dotati di massa, e questo contraddirebbe quanto viene osservato sperimentalmente. D'altra parte, bosoni *vettori* massivi renderebbero la teoria non rinormalizzabile, quindi incoerente dal punto di vista matematico. Per descrivere correttamente particelle massive, nel Modello standard viene anche introdotto un meccanismo di rottura spontanea della simmetria. Il sottogruppo $U(2) \times U(1)$ viene *rotto* spontaneamente, e di conseguenza un ulteriore bosone massivo, detto bosone di Higgs, viene introdotto nella teoria. Il meccanismo di Higgs è anche in grado di spiegare, ma non prevedere quantitativamente, la presenza delle masse dei fermioni, oltre alle masse dei bosoni vettori.

Risultati dell' LHC

Il 10 Settembre 2008, dopo quasi vent'anni di progettazione e 9 miliardi di euro, entra finalmente in funzione il nuovo acceleratore di particelle, il "Large Hadron Collider", o più semplicemente "LHC".

L'acceleratore è stato azionato per la prima volta, dagli scienziati del CERN, alle ore 10:28 della mattina. L'avvio della costosissima macchina ha suscitato l'entusiasmo di tutto il personale coinvolto. Gli scienziati hanno quindi proiettato in successione, quasi alla velocità della luce, due diversi raggi protonici all'interno dell'acceleratore di particelle e sebbene la prima vera collisione fosse prevista in data 21 ottobre 2008, poco dopo la sua attivazione il LHC ha prodotto la prima immagine, riportata qui sotto, che mostra alcuni protoni accelerati.



"C'e' un raggio nell'acceleratore!", ha esclamato a un certo punto la responsabile del progetto, Lyn Evans, reagendo così alla comparsa sui monitor del tanto atteso segnale luminoso. Il prossimo passo consisterà nell'ottenere che i protoni concludano la loro traiettoria all'interno del tunnel anche nella direzione opposta rispetto a quella finora seguita, onde accertare che il tracciato sia interamente percorribile.

Anche Robert Aymar, direttore generale del CERN si è dimostrato molto soddisfatto e fiducioso rispetto a questo esperimento, ha

infatti riferito: "L'LHC é una macchina scoperta, il suo programma di ricerca ha il potenziale di cambiare la nostra visione dell'Universo profondamente, continuando la tradizione della curiosità umana che é antica quanto il genere umano stesso".

Ma l'avvio non è stato importante solo per i ricercatori coinvolti, bensì per tutto il mondo, come ha riferito la rivista "New Scientist", questo è sicuramente l'evento più seguito nella storia della fisica, come un'audience televisivo di quasi un miliardo di persone e ben 5853 articoli pubblicati solo sulla notizia del primo giro completo dell'anello.

Come è già stato detto uno degli esperimenti attualmente più importanti del CERN è quello noto come "esperimento CMS". I ricercatori sperano di riuscire a verificare la possibilità che si crei materia e più specificatamente che compaia un "bosone di Higgs". Questo sarebbe dovuto avvenire proprio grazie al nuovo acceleratore, cercando di produrre una serie infinita di micro-collisioni tra fasci di protoni, i quali avrebbero dovuto riprodurre le condizioni in cui avvenne il "Big Bang" e si creò quindi l'universo.

Pericolosità

"Esiste la possibilità che una micro-singularità creata artificialmente assuma uno stato stabile o meta-stabile che le permetta di persistere abbastanza a lungo da accumulare massa in quantità considerevole, fino a espandersi e inghiottire l'intero sistema solare."

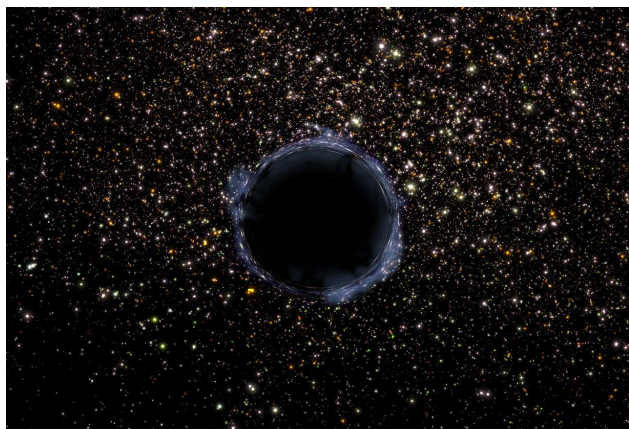
Professor Ernst Krankfurt, Lawson University , Wisconsin

Il progetto del Large Hadron Collider, il cui obiettivo è operare per portare delle risposte riguardo alle origini del nostro universo, si pone al limite tra scienza e semi-occulto. Tale affermazione può senz'altro suscitare scetticismo nel lettore incurante di tutto ciò che non è dimostrabile attraverso dei numeri, ma non può non stuzzicare gli animi di chi si confessa ignorante di fronte a una materia di tale complessità come quella della fisica moderna. Prendiamo in esempio due professori protagonisti di una discussione al riguardo: da una parte il professor Langsberger della Stanford University che dichiara le possibilità di un disastro troppo

limitate per essere prese in considerazione, e dall'altra il professor Ernst Krankfurt già citato, che dà valore alle ipotesi di disastro a discapito dell'importanza dei risultati ottenibili.

Cerchiamo quindi di spiegare in maniera più precisa a cosa punti l'esperimento e come mai esso possa essere definito "pericoloso". L'obiettivo è quello di creare dei micro-buchi neri garantendo loro una velocità di movimento relativamente bassa affinché possano così essere studiati dall'uomo come mai ha avuto occasione. Così facendo raggiungeremmo la possibilità di valutare in modo più preciso e pratico l'antimateria e la teoria delle super stringhe. Punto fondamentale di questa ricerca è, su tutto, la speranza di identificare il bosone di Higgs, ironicamente definito "particella di Dio". A questo bosone sarebbe attribuito il ruolo di creatore della massa delle particelle di tutto l'universo, permeando tutta la materia con quello che viene chiamato "campo di Higgs", il fisico scozzese che negli anni sessanta ne teorizzò per primo l'esistenza. Il discorso dei rischi ruota quindi attorno alla questione energetica; l'acceleratore di particelle, prima di questo esperimento aveva raggiunto livelli di energia massimi a 115 giga elettronvolt, ma per il compiersi di questo esperimento, dovrebbe raggiungere la cifra mai toccata di 200 GeV.

Ecco quindi che ci inseriamo nel frangente dell'ignoto, per "giustificare" le paure connesse alla creazione di queste "nuove" e "sconosciute" forze. Infatti la temibilità dell'esperimento ruota proprio intorno all'impossibilità di prevedere gli effetti ultimi del processo; così come non si conosce in maniera esatta che cosa si stia puntando a ottenere, allo stesso modo sono ancor più dubbi gli effetti che tali risultati avranno. E' abbastanza diffuso un



sentimento di "paura" di fronte a questo ignoto, che è però paragonabile alle paure di chi invece crede in ciò la cui esistenza non è provabile scientificamente, ma appartiene quasi al pianeta spirituale. Nell'eventualità in cui si verifici effettivamente un risultato negativo, data dal mantenersi

stabile di uno dei buchi neri creati artificialmente, effettivamente l'intero sistema solare sarebbe risucchiato, ma le probabilità sono

quantificabili ad una percentuale minore dello 0,000001, senza calcolare la teoricità di base dell'eventualità proposta.

Altre possibilità che vengono elencate sono quelle connesse alla poca conoscenza effettiva dell'uomo nei confronti dei prodotti che potrebbero compiersi: per esempio i buchi neri creati potrebbero semplicemente avere comportamenti diversi da quelli pensati, così come gli strangelet o per esempio la radiazione di Hawking. Nel caso specifico della radiazione, teorizzata dal grande fisico moderno Stephen Hawking, che è la radiazione che prevede il decadere del buco nero, non esistono certezze, né per quanto riguarda la sua esistenza, né per ciò che concerne i suoi effetti.

Insomma siamo di fronte ad un esperimento di una levatura impressionante, al quale lavorano centinaia di scienziati da anni, nel quale molte tra le più grandi menti del pianeta ripongono ampissime speranze. Di fatto è indubbio sostenere che "il gioco vale la candela", considerando i generi di scoperte che si spera di ottenere.

CONCLUSIONE

In seguito alla stesura cartacea della ricerca, è stata doverosa una visita guidata al CERN stesso.

Essa ha avuto luogo il 23 aprile 2009 e aveva lo scopo di permetterci di vedere "dal vero" i laboratori, le strutture, il progetto e di sentire parlare i fisici stessi dell'argomento sul quale abbiamo lavorato durante l'anno, ma soprattutto di comprendere cosa esso comportasse in pratica, quale fosse la sua portata effettiva e quanto impegno e quanta passione fossero stati messi da migliaia di fisici, ingegneri, tecnici ed esperti.

Sfortunatamente, per motivi di sicurezza, l'accesso alla struttura sotterranea era limitato a sette persone ogni ora, rendendoci così impossibile la discesa a 200m sotto terra.

L'accoglienza è stata ottima e la proiezione di una presentazione, insieme alle spiegazioni di uno dei fisici che lavorano al progetto ATLAS, ci sono serviti da ripasso, in quanto sono state ripercorse, dalle origini fino ad oggi, la storia della fisica delle particelle, le nuove scoperte, la funzione del CERN, i risultati attesi e ciò che essi comporteranno.

Il pomeriggio si è suddiviso in due momenti: nel primo siamo entrati in uno degli edifici in cui vengono compiuti alcuni dei test di verifica dei magneti, che in seguito verranno montati o sostituiti nei grandi acceleratori sotterranei, mentre nel secondo momento abbiamo avuto modo di visitare la sede del progetto ATLAS.

Per arrivare nei locali dei test abbiamo dovuto passare il confine tra Francia e Svizzera, mentre ci è stato detto che i dipendenti del CERN, per evitare di dover compiere ogni volta il controllo dei documenti, hanno accesso ad una galleria al di sotto della strada principale che collega più comodamente le diverse parti dell'impianto.

Ad aspettarci c'era un ingegnere, il quale ci ha subito mostrato il meccanismo dei superconduttori, materiali che, portati ad una certa temperatura (molto bassa, circa $1,9\text{K}^\circ$ vicina allo zero assoluto) ed avvicinati a magneti, acquisiscono un campo magnetico molto forte, che può essere sfruttato in molti modi, dai treni ad alta velocità, agli acceleratori di particelle.

I cilindri dell'acceleratore, infatti, sono formati da una serie di strati concentrici, che hanno al loro centro i due veri e propri tubi in cui vengono accelerate le particelle, circondati da condutture in cui

scorre l'elio superfluido (ad altissime pressioni) e stretti in magneti e superconduttori (nello specifico, di niobio-titanio), in modo che le particelle siano costrette (dai magneti e dai campi elettrici) a muoversi al centro dei cilindri, senza colpire le pareti.

Poiché, però, le forze che influiscono e interagiscono tra loro, seppur all'apparenza siano molto piccole, in realtà sono in grado di deformare con facilità l'intero cilindro, i magneti sono bloccati da potenti ganasce e blocchi di acciaio.

Siamo passati poi alla descrizione delle componenti specifiche, prese nella loro singolarità: i quadripoli, le connessioni tra cilindri, i tubi esterni (forati tramite un processo di randomizzazione, per evitare che in campi magnetici generino interferenze costruttive o distruttive) etc.

Prove di questo genere, ci è stato detto, vengono compiute numerose volte, prima, dopo e durante gli esperimenti del CERN. L'incidente, infatti, non è stato causato da un problema di funzionamento dell'apparato, bensì dalla formazione di una scintilla nelle fasi di riscaldamento dei magneti, che ha provocato un foro nei condotti dell'elio superfluido, che, espandendosi tutto in una volta, ha provocato un'esplosione meccanica che ha deformato le apparecchiature limitrofe.

A seguito di tale esplosione, ovviamente, la temperatura nel tunnel è scesa improvvisamente e di molti gradi, rendendo impossibile per alcune settimane, ogni intervento di riparazione.

Con tristezza ci è stato comunicato che probabilmente gli esperimenti connessi all'LHC riprenderanno non prima dell'anno nuovo.

La seconda parte del pomeriggio si è svolta in un edificio vicino, riconoscibile tra gli altri dalla grande scritta ATLAS, ben evidente sulle pareti esterne.

Qui ci si è divisi in due gruppi; il primo è rimasto nella stanza in cui erano esposte componenti elettroniche del rivelatore dell'ATLAS e il vero e proprio laboratorio in cui fisici e tecnici ricevono e studiano i dati ottenuti dalle collisioni nel piccolo acceleratore sottostante, mentre il secondo si è recato a visitare il tunnel verticale di 200m che è servito a calare nel sottosuolo le parti che hanno composto il cuore del progetto, il rivelatore entro il quale le particelle collidono. Nella stanza principale, un fisico ci ha mostrato in sezione, il modo in cui i dati vengono registrati da questi gusci concentrici di rivelatori: ogni rivestimento, dal più interno al più esterno, ha il compito di notificare la presenza di determinate particelle,

originatesi dalla collisione; in questo modo, studiando la distribuzione e il tipo di "getti", si può capire se tra di essi c'è anche il tanto ricercato Bosone di Higgs.

Adiacente alla stanza e visibile tramite pareti di vetro, c'è invece l'ambiente in cui i fisici che lavorano al progetto analizzano i dati: decine di computer, scienziati e pareti con proiettori grafici, numeri e modelli erano gli stessi ripresi dalle tv e visti in tutto il mondo, il giorno in cui l'LHC si è acceso per la prima volta.

Abbiamo inoltre avuto la fortuna che la guida che ci ha mostrato l'ATLAS, fosse anche una delle creatrici effettive dei circuiti al silicio lì esposti: questa donna, insieme a giapponesi e scandinavi, ha lavorato 10 anni, nella progettazione e nella realizzazione di piccoli pannelli formati da numerosi filamenti di silicio di qualche micron di larghezza, per poi vederli prodotti su larga scala e oggi montati sul cuore del rivelatore stesso.

Era evidente l'emozione con cui lei ci parlava del lavoro dei fisici, degli ingegneri e dei tecnici che hanno operato in questo progetto e che ora ne vedono la realizzazione: è sicuramente una grande soddisfazione pensare che anche una piccola componente, sul quale però si è speso molto tempo, molte energie e molto impegno, è ora una parte fondamentale di un progetto che ha lo scopo di scoprire l'origine del nostro universo.

Nello stesso tempo, il secondo gruppo, invece, si stava affacciando dal tunnel profondo 200 metri, sotto al quale si snoda l'acceleratore e il rivelatore dell'ATLAS.

Guardando in basso era inevitabile pensare alle dimensioni delle parti che lo compongono rispetto alle misure umane, al dispendio di tempo e materiali necessari al suo allestimento.

Per far arrivare i coperchi esterni (del peso di molte tonnellate) sono state impiegati, a volte dei mesi e spesso delle settimane sono state necessarie anche solo alla loro discesa nel tunnel, dovuti alla loro fragilità.

Il risultato di questa visita è stato senza dubbio quello di stupirci enormemente, di sorprenderci, in primis, per quanto sia effettivamente grande l'intero apparato del CERN, per quanto la scienza sia progredita e allo stesso modo la tecnologia.

Credo però, che oltre alla meraviglia per le implicazioni e le scoperte che questi esperimenti comportano, quello che è arrivato a noi "visitatori", sia la passione, la voglia e l'impegno che i

dipendenti e i ricercatori del CERN hanno investito e alla quale continuano a attingere.

Vedere a cosa l'essere umano, la scienza, la ricerca e l'avanzamento tecnologico possono portare è stato incredibilmente stimolante e appassionante.

Non resta che attendere l'anno nuovo e vedere se il tanto ricercato Bosone di Higgs esiste davvero.

Come ha detto il dottor Higgs: "Finding the Higgs Boson is the end of an era. The more exciting thing is what comes after that, and ATLAS should open the way".

Bibliografia

- "Particelle e nuclei introduzione ai concetti fisici" B.Povh, K. Rith C.Scholz, F.Zetsche ed.Bollati Boringhieri
- "Fisica 3" A. Caforio, A. Ferilli ed. Le Monnier
- "I numeri dell'Universo-Le costanti di natura e la Teoria del Tutto", John D. Barrow, ed. Oscar Mondadori

Sitografia

- http://www.fisica.uniud.it/~cobal/Standard_Model.ppt
- <http://www.infn.it/multimedia/particle/paitaliano/history/smt.html>
- <http://www.moebiusonline.eu/fuorionda/immagini/atomoElio.gif>
- <http://www.scienzapertutti.it>
- <http://www.infn.it>
- http://it.wikipedia.org/wiki/Costante_fisica
- http://guide.supereva.it/fisica_applicata/interventi/2003/05/135435.shtml
- <http://www.scienzagiovane.unibo.it/antimateria/2-antimateria-storia.html>
- www.wikipedia.it
- www.cern.ch
- www.lastampa.it
- <http://it.wordpress.com>
- www.cern.ch
- www.atlas.ch