
LHC: I FISICI ITALIANI AL CERN DI GINEVRA*

ROBERTO CASALBUONI

Dipartimento di Fisica, Università di Firenze

1. Introduzione

Il 10 Settembre 2008 è stata ufficialmente inaugurata, al CERN di Ginevra, la più grande macchina acceleratrice di particelle mai realizzata. Si tratta del Large Hadron Collider (LHC), una macchina destinata a studiare le collisioni tra due fasci di protoni, ognuno dei quali è accelerato sino ad una energia di 7 TeV¹. Il CERN² è un centro europeo fondato nel 1954 a Ginevra, finanziato da venti paesi europei, con il compito di studiare la fisica delle particelle elementari. L'Italia si adoperò moltissimo per la costituzione del CERN, in particolare sotto la spinta di Edoardo Amaldi, fisico romano e collaboratore di Enrico Fermi. Il CERN ha una storia importante nella fisica delle particelle, perché moltissime scoperte sono state effettuate presso le varie macchine acceleratrici che si sono via via succedute nel tempo. Basti qui ricordare la scoperta dei mediatori delle interazioni deboli, i bosoni W e Z, da un team di fisici (tra cui molti italiani) guidati da Rubbia. La più recente macchina acceleratrice costruita al CERN è appunto il collisionatore LHC. Per capire le ragioni che hanno portato alla sua costruzione, inizieremo facendo una breve rassegna del modello che attualmente è considerato la base di questo tipo di fisica: il modello standard delle interazioni elettrodeboli. Come vedremo, questo modello non è completamente verificato sperimentalmente e inoltre presenta alcuni problemi che potrebbero essere risolti dagli esperimenti che verranno eseguiti a questa nuova macchina.

2. Il modello standard delle particelle elementari

Le ricerche moderne sulla struttura della materia iniziarono alla fine dell'Ottocento con la scoperta dell'elettrone. Successivamente fu stabilita la struttura dell'atomo, formata da un nucleo centrale di carica positiva circondato da elettroni in numero tale da rendere elettricamente neutro l'atomo. A sua volta il nucleo risulta composto da protoni, particelle di carica positiva e massa pari a quasi 2000 volte quella degli elettroni, e da neutroni, particelle neutre con massa quasi uguale a quella dei protoni. La carica dei protoni è esattamente uguale e opposta a quelle degli elettroni e quindi la neutralità dell'atomo è assicurata dall'aver ugual numero di elettroni e di protoni. A causa di

* Lezione tenuta a Carrara il 26 ottobre 2009 presso il Liceo scientifico Marconi e a Scandicci (Firenze) il 9 novembre 2009 presso l'Istituto Russell-Newton, nell'ambito dell'edizione 2009 di *Pianeta Galileo*.

questa relazione, torna utile usare come unità di misura della carica elettrica la carica del protone. Quindi il protone, in queste unità di misura, ha carica +1 e l'elettrone -1. Il neutrone ha invece carica 0.

Negli anni Settanta è stato poi scoperto (sebbene già supposto precedentemente per via teorica) che il protone e il neutrone sono composti da nuove particelle, i quark. I quark hanno carica frazionaria e sia il protone che il neutrone sono costituiti da tre quark. I quark costituenti sono di due tipi il tipo "up" (abbreviato u) e il tipo "down" (abbreviato d). Il quark u ha carica +2/3 mentre il d ha carica -1/3. Quindi il protone ha una struttura uud, mentre il neutrone ddu. Fin qui le particelle elementari sembrerebbero essere l'elettrone, il quark u ed il quark d. A queste andrebbe aggiunto il neutrino, la cui esistenza fu predetta da Pauli negli anni Trenta. Queste quattro particelle, che indicheremo con ν , per neutrino, e per elettrone, u e d per i quark, costituiscono quella che viene chiamata la prima famiglia delle particelle elementari, dato che nel corso degli anni gli esperimenti hanno portato alla scoperta di altre due famiglie, costituite da particelle del tutto simili a quelle della prima famiglia ma di massa via via crescente.

Leptoni	Massa(Gev/c ²) ³	Carica elettrica	Quark	Massa(Gev/c ²)	Carica elettrica
ν_e	<10 ⁻⁸	0	u	3x10 ⁻³	+2/3
E	5x10 ⁻⁴	-1	d	6x10 ⁻³	-1/3
ν_μ	<2x10 ⁻⁴	0	c	1.3	+2/3
μ	0.1	-1	s	0.1	-1/3
ν_τ	<0.02	0	t	175	+2/3
τ	1.8	-1	b	4.3	-1/3

Tavola 1. Le tre famiglie corrispondono alle righe orizzontali della tabella. Nella prima riga a sinistra ci sono l'elettrone, il suo neutrino ed i quark u e d. Analogamente per le altre due famiglie. Le particelle corrispondenti all'elettrone si chiamano muone (μ) e tau (τ). Le particelle corrispondenti ai quark u e d sono i quark charm (c) e strano (s) della seconda riga e top (t), bottom (b) della terza. Le particelle alla sinistra della riga centrale più spessa si chiamano leptoni (dal greco "lepton", che significa "sottile", "leggero") perché sono in genere più leggere di quelle sulla destra, mentre quelle sulla destra si chiamano genericamente quark.

Le particelle elementari fin qui scoperte sono illustrate nella Tavola 1. In particolare, la linea divisoria al centro della Tavola separa le particelle in due gruppi, a sinistra i leptoni ed a destra i quark.

3. Le interazioni fondamentali

Le forze conosciute in natura sono di quattro tipi.

- La prima è l'interazione *gravitazionale*, responsabile del moto dei pianeti e la cui manifestazione più nota è il fatto che tutti i corpi cadono.
- Ci sono poi le interazioni *elettromagnetiche*, cioè quelle che danno luogo alle forze elettriche e magnetiche;

- e le interazioni *forti*, responsabili del legame nucleare. Infatti, se non ci fosse una forza ulteriore, i protoni del nucleo si respingerebbero, dato che le interazioni elettriche sono enormemente più grandi di quelle gravitazionali (vedi oltre), e non si avrebbe dunque la stabilità nucleare. Quindi deve esistere un'altra forza, o interazione, detta interazione forte (perché deve essere più grande di quella elettromagnetica).
- Esistono infine le interazioni *deboli*, che sono le responsabili dei decadimenti radioattivi.

È interessante conoscere in quale rapporto stiano tra loro le varie forze. A questo scopo si può calcolare quanto valgono se le riferiamo a due protoni. Se facciamo uguale a uno la corrispondente forza elettromagnetica si ha:

$$\text{Forza elettromagnetica} = 1$$

$$\text{Forza forte} = 20$$

$$\text{Forza debole} = 10^{-7}$$

$$\text{Forza gravitazionale} = 10^{-36}$$

Come si vede, la forza gravitazionale è enormemente più piccola di tutte le altre e per questo motivo viene spesso ignorata quando si discutono le interazioni delle particelle elementari.

Nella descrizione classica le interazioni sono trattate in termini ondulatori. Pensiamo al lancio di un sasso in uno stagno. Il sasso entrando nell'acqua genera delle onde che si propagano nello stagno. Analogamente per il campo elettromagnetico, una carica oscillante produce un campo elettrico (con associato un campo magnetico) che si propaga nello spazio. L'interazione tra due cariche si genera perché ognuna delle due cariche emette un campo elettromagnetico che, arrivando sull'altra, carica genera una forza. Ovviamente le due forze sono uguali e opposte. Lo stesso meccanismo si applica a tutte le altre interazioni. La descrizione quantistica è alquanto diversa perché dipende dal tipo di osservazione che viene effettuata. Per esempio, quando un'onda viene assorbita da un sistema atomico non si comporta affatto come un'onda, come invece succede durante la sua propagazione. Quando viene assorbita si comporta come una particella, viene cioè assorbita tutta insieme, invece che un poco alla volta.

Si dice che a ogni onda è associato un quanto (o particella). I quanti associati alle interazioni elettromagnetiche sono i fotoni, mentre quelli associati alle interazioni gravitazionali vengono detti gravitoni. Quelli associati alle interazioni forti gluoni⁴ e infine i quanti delle interazioni deboli sono le particelle W (di cariche elettriche +1 e -1) e la particella Z di carica nulla. Queste ultime particelle furono scoperte al CERN dal gruppo di Rubbia a metà degli anni Ottanta. Le stranezze della meccanica quantistica non finiscono qui, perché in modo perfettamente simmetrico a ogni particella materiale, come i quark, viene associato un campo. Avremo dunque un campo associato all'elettrone, un altro campo associato al quark u, eccetera. Quindi la meccanica quantistica non fa una reale distinzione tra materia e interazioni, almeno dal punto di vista della loro de-

scrizione. Questi elementi, le particelle elementari di Tavola 1 e le tre interazioni, forte, elettromagnetica e debole, sono i pilastri su cui si basa il cosiddetto modello standard. Come vediamo l'interazione gravitazionale rimane fuori da questa descrizione.

Rispetto alle tre interazioni descritte dal modello standard – deboli, forti ed elettromagnetiche – i leptoni sono soggetti solo alle interazioni deboli ed elettromagnetiche. In particolare i neutrini, essendo neutri, risentono solo delle interazioni deboli. Dunque i leptoni non sono soggetti alle interazioni forti. Viceversa i quark subiscono tutti e tre i tipi di interazioni.

Il modello standard è stato verificato sperimentalmente con ottima precisione sia grazie all'acceleratore elettrone-positrone⁵ (chiamato LEP) al CERN di Ginevra, sia grazie all'acceleratore di Stanford in California, e fino a ora non ci sono evidenze sperimentali che lo smentiscano. Però ci sono dei seri dubbi teorici sul fatto che il modello standard possa rimanere valido allorché lo si vada a verificare a energie più grandi di quelle finora usate (circa 220 GeV al CERN). Vediamo di capire perché i teorici hanno un tale dubbio nonostante le evidenze sperimentali. Così come lo abbiamo presentato sino a questo momento, il modello standard non è completo, manca di un elemento fondamentale, la cosiddetta particella di Higgs. La formulazione precedente del modello standard, con le particelle elementari divise in quark e leptoni e le tre forze, è consistente da un punto di vista matematico solo se ci sono particolari relazioni tra le interazioni di una data forza con le varie particelle.

Come si dice, si devono avere delle particolari simmetrie, altrimenti la teoria non è matematicamente consistente. Si può però mostrare che affinché queste simmetrie siano operanti, tutte le particelle (quark, leptoni e i quanti delle interazioni) devono essere rigorosamente a massa nulla⁶. D'altra parte, sperimentalmente, tutti i quark e i leptoni (inclusi i neutrini) hanno massa diversa da zero così come i quanti delle interazioni deboli, W e Z. Le uniche particelle a massa nulla sono i gluoni e il fotone (al solito qui stiamo trascurando la gravitazione). Un certo numero di ricercatori, tra cui Higgs, hanno mostrato che è però possibile conservare queste simmetrie anche con masse non nulle, purché si introduca una particella speciale. Questa particella è stata appunto chiamata particella di Higgs. Dato che lo scopo di questa particella è di fornire un meccanismo con cui dare massa a tutte le altre, nella teoria viene introdotta una scala di massa che ha un valore di circa 250 GeV. Le masse di tutte le altre particelle sono allora proporzionali a questa massa fondamentale⁷.

4. I problemi del modello standard

Discutiamo adesso i motivi per cui il modello standard non può essere la teoria finale. Infatti, la gravità non è incorporata nel modello e, inoltre, i tentativi fin qui realizzati portano a risultati non coerenti. Quindi il modello standard si può al più considerare come una teoria effettiva/efficace?, sicuramente valida sino alle energie fin qui studiate (~200 GeV), ma a energie più elevate potrebbero emergere fatti nuovi. Il modello standard dovrà essere modificato e, se non succede nient'altro, ci aspettiamo che questa modifica debba necessariamente avvenire prima di quelle energie (o masse) a cui la gravità diventa importante per le particelle elementari.

A causa della piccolezza dell'interazione gravitazionale, questa diventa importante solo a scale di massa molto grandi e viene misurata attraverso la Massa di Planck, M_p , che vale circa 10^{19} GeV/ c^2 . Ciò non sarebbe necessariamente un problema, se non fosse che in una teoria effettiva di questo tipo, e in mancanza di situazioni particolari, le masse delle particelle devono essere tutte dell'ordine della massa sino alla quale la teoria è corretta. Per quark e leptoni questa situazione particolare è infatti presente. La simmetria che rende il modello consistente permette anche di controllare le masse e di poterle prenderle piccole a piacere. Ciò però non vale per la massa dell'Higgs, che dovrebbe quindi essere dell'ordine di M_p . Il punto è che la teoria dipende dal valore di questa massa e gli esperimenti fatti al CERN e a Stanford mostrano che, se il modello standard deve valere, allora la massa dell'Higgs deve essere dell'ordine della scala tipica del modello standard (~ 250 GeV). Quindi cadiamo in una palese contraddizione.

Il motivo principale, che ha spinto i fisici delle particelle a una impresa così importante come la costruzione di LHC, è appunto la possibilità di risolvere queste problematiche. Quello che ci aspettiamo da LHC è che porti alla scoperta del bosone di Higgs e delle sue caratteristiche. Questo ci permetterebbe di capire meglio la validità del modello standard. Inoltre, ci sono molti modelli che cercano di eliminare le difficoltà di cui abbiamo parlato, tramite l'introduzione, nella teoria, di nuove particelle. Quindi l'aspettativa dei fisici è che LHC sia in grado di suggerire come debba essere modificato il modello standard affinché possa diventare una teoria completamente coerente.

5. Come si osserva?

Per capire i meccanismi sui quali si basa una macchina come LHC per investigare le proprietà delle particelle subatomiche, iniziamo a discutere sul come facciamo a vedere un oggetto. Questo ci permetterà di esporre i principi generali dell'osservazione fisica. Il principio generale di osservazione è esemplificato nella Figura 1.

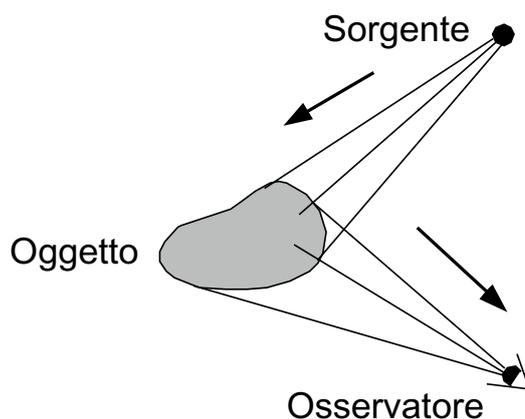


Figura 1. La luce emessa dalla sorgente viene riflessa dall'oggetto e assorbita dall'occhio dell'osservatore.

Per osservare l'oggetto abbiamo bisogno di una sorgente luminosa. I raggi della sorgente vengono riflessi dall'oggetto e vanno poi a colpire l'occhio dell'osservatore che 'vede'

in questo modo l'oggetto. Inoltre, al fine di una buona osservazione, è necessario che la lunghezza d'onda della luce sia molto più piccola dell'oggetto da esaminare. In Figura 2 viene mostrata un'onda marina, che incontra un bastone di dimensioni trasversali piccole rispetto alla lunghezza d'onda. Il risultato è che l'onda prosegue indisturbata e quindi, osservando l'onda uscente, non siamo in grado di dire se questa ha incontrato un oggetto oppure no. Se invece le dimensioni dell'oggetto incontrato sono grandi, per esempio uno scoglio, l'onda si infrange producendo risultati ben visibili da parte di un eventuale osservatore. Questo spiega perché in astronomia si usano diverse lunghezze d'onda a seconda del tipo di indagine si vuol fare.

$$\lambda = 1\text{m}$$

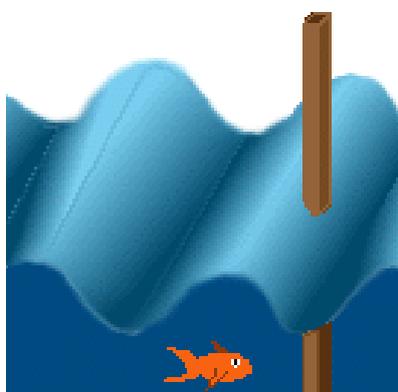


Figura 2. La figura rappresenta un'onda marina che incontra un ostacolo costituito da un bastone di dimensioni trasversali molto più piccole della lunghezza d'onda.

Un altro punto importante è che per la radiazione luminosa esiste una relazione precisa tra frequenza, ν , e lunghezza d'onda, λ , che è data da $\lambda = c/\nu$. Quindi, per vedere (o rivelare) oggetti piccoli, occorrono radiazioni di frequenza elevata (lunghezza d'onda piccola). È a questo punto che interviene la meccanica quantistica che ci dice che la radiazione luminosa è composta da corpuscoli (fotoni), la cui energia è legata alla frequenza dell'onda dalla relazione $E = h\nu$, dove h è la costante di Planck che vale 6.626×10^{-34} Joule per secondo.

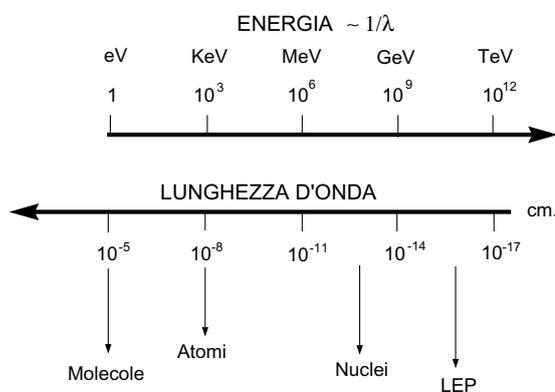


Figura 3. Corrispondenza tra scale di energia e di lunghezza.

Questo duplice aspetto corpuscolare-ondulatorio non è caratteristico della sola radiazione luminosa ma di tutte le particelle. Cioè, ad ogni particella come l'elettrone, i quark, ecc., è associata un'onda di frequenza pari a E/h , dove E è l'energia della particella. Dunque vediamo che, per esplorare le caratteristiche di oggetti molto piccoli, dobbiamo fare uso di particelle di grande energia, che quindi corrispondono a onde associate di piccola lunghezza d'onda. Questa corrispondenza tra scale di energia e scale di lunghezza è visualizzata in Figura 3. Quindi, l'energia necessaria per 'vedere' le molecole è dell'ordine dell'elettronvolt, mentre l'energia necessaria per vedere il nucleo è dell'ordine di un centinaio di MeV. Le energie raggiunte da LEP, che era la macchina del CERN preesistente a LHC, corrispondono a dimensioni di circa $10^{-15} - 10^{-16}$ cm. Con LHC (~ 10 TeV) si arriverà a dimensioni dell'ordine di 10^{-18} cm.

6. Gli acceleratori di particelle

Come abbiamo visto, per studiare distanze piccole occorrono grandi energie. A questo scopo si costruiscono delle macchine (acceleratori di particelle) che, tramite l'uso di campi elettrici, accelerano delle particelle (l'analogo della sorgente) elettricamente cariche, sino a fornirle dell'energia desiderata. A questo punto si fanno collidere con altre particelle (che costituiscono il bersaglio) e, tramite appositi rivelatori (l'analogo dell'occhio umano), si studiano le proprietà del bersaglio.

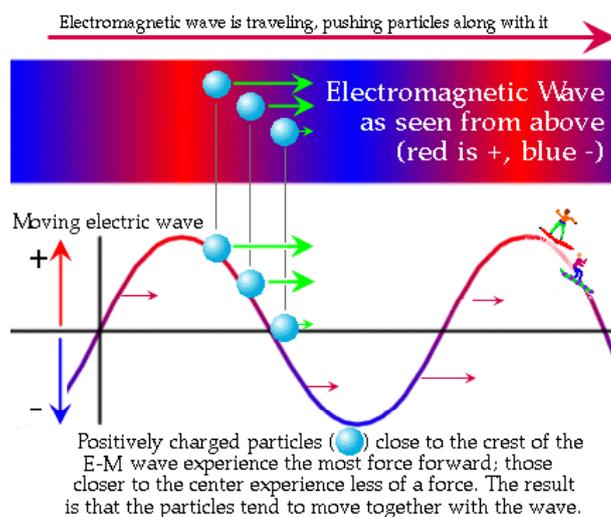


Figura 4. Illustrazione del principio di accelerazione coerente di un fascio di particelle.

La Figura 4 illustra come sia possibile accelerare in maniera coerente le particelle che stanno in un fascio e che hanno inizialmente velocità diverse. L'onda elettromagnetica, prodotta da un dispositivo a radiofrequenza, accelera maggiormente le particelle che stanno sulla sinistra (che quindi si muovevano più piano), rispetto a quelle più a destra che si muovevano più velocemente. L'effetto finale è che le particelle seguono in maniera coerente la cresta dell'onda così come fa un surfista. Gli acceleratori possono essere

lineari o circolari. In quest'ultimo caso le particelle vengono riaccelerate tutte le volte che percorrono la circonferenza, sino al momento in cui vengono 'estratte' per farle collidere sul bersaglio. Infine si distingue tra acceleratori a bersaglio fisso e acceleratori a bersaglio mobile. Gli acceleratori a bersaglio mobile (detti anche collisionatori) sono particolarmente interessanti perché si compongono di due fasci accelerati in direzioni opposte. Questo tipo di macchine acceleratrici si è sviluppato in Italia, a Frascati, nel 1960. Il primo prototipo fu costruito a Frascati su progetto di Bruno Toushek, un fisico austriaco che era venuto a lavorare nel nostro paese. Questo prototipo si chiamava AdA (Anello di Accumulazione) e i due fasci consistevano di elettroni e di positroni (le antiparticelle degli elettroni e quindi di carica positiva). Dato che la direzione del moto di una particella carica in un campo elettrico dipende dal segno della carica, i due fasci si muovono in direzione opposta usando un solo campo elettrico. Inoltre, il vantaggio di una macchina di questo tipo è che si sfrutta tutta l'energia dei due fasci per la collisione, mentre in una macchina a bersaglio fisso se ne sfrutta una parte più modesta. In conseguenza i consumi e le dimensioni dei collisionatori sono più piccoli di quelli degli acceleratori a bersaglio fisso.



Figura 5. Il primo collisionatore elettrone-positrone (AdA) costruito nei Laboratori Nazionali di Frascati nel 1960. Le sue dimensioni sono dell'ordine di quelle di un normale tavolo.

Un ulteriore vantaggio dei collisionatori è che permettono la produzione di nuove particelle anche di massa superiori a quelle originarie, sfruttando la relazione massa-energia di

Einstein. Questo è illustrato in Figura 6 dove, se all'elettrone (e^-) ed al positrone (e^+) iniziali viene conferita una energia tale che l'energia della coppia sia superiore a $2 m_N c^2$ (con m_N abbiamo indicato la massa della particella N e della sua antiparticella N^*), è allora possibile produrre la coppia NN^* . Questo processo avviene tramite l'annichilazione della coppia elettrone-positrone in un fotone che poi si materializza in una coppia NN^* .

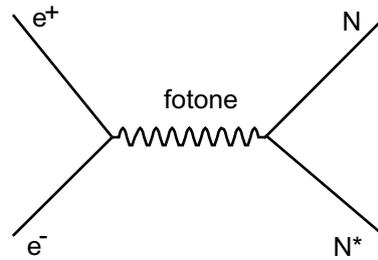


Figura 6. La creazione di una coppia di nuove particelle NN^* , tramite l'annichilazione della coppia elettrone-positrone che costituiscono i fasci del collisionatore.

7. Gli apparati di rivelazione (rivelatori)

Discuteremo qui la struttura degli apparati di rivelazione che vengono usati con i collisionatori. Si tratta in genere di grossi apparati inseriti lungo la linea dei fasci, con al centro la zona di collisione. In Figura 7 è rappresentato, in modo schematico, un tipico rivelatore.

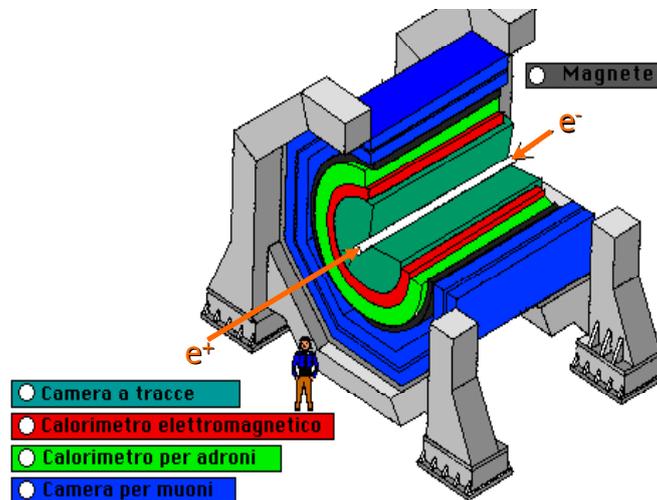


Figura 7. Un tipico rivelatore di particelle.

L'apparato è costituito da una serie di camere concentriche, ognuna con una sua propria funzione. A partire dal centro si ha la camera a tracce che rivela particelle cariche, si ha poi il calorimetro elettromagnetico nel quale si fermano, perdendo tutta la loro energia, le particelle leggere che hanno solo interazioni elettromagnetiche come gli elettroni ed i fotoni. Nel calorimetro adronico si fermano le particelle soggette alle interazioni forti, come i protoni e i neutroni. Infine i muoni⁸, μ , vengono rivelati nelle apposite camere più esterne. Al fine di una identificazione del segno della carica, tutto

il rivelatore è immerso in un campo magnetico. Infatti le particelle cariche che si muovono in un campo magnetico curvano a destra o a sinistra a seconda del segno della carica. Questa diversità di operazioni effettuate dalle singole camere permette una facile identificazione dei diversi tipi di particella, come si vede dalla Figura 8.

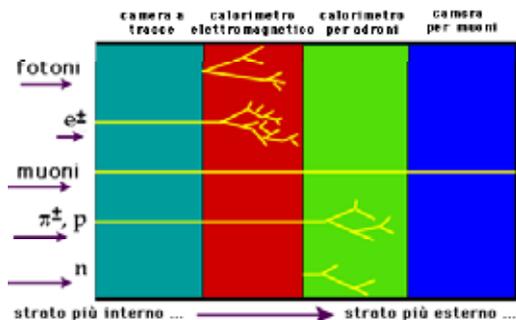


Figura 8. Le varie camere permettono l'identificazione dei diversi tipi di particelle.

Per esempio, i fotoni non lasciano traccia nella prima camera, ma sono osservati nel calorimetro elettromagnetico. Gli elettroni lasciano una traccia nella prima camera e depositano la loro energia nella seconda.

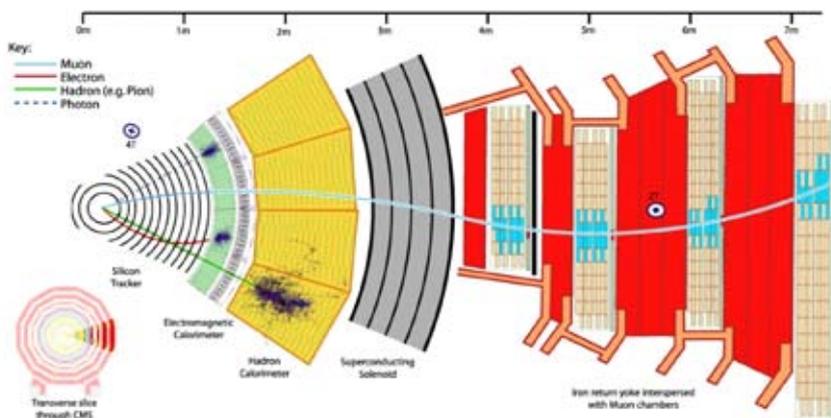


Figura 9. Schema del rivelatore CMS (compact magnetic solenoid).
Parte fondamentale di uno dei vari esperimenti che verranno effettuati ad LHC.

I pioni carichi (π^+, π^-) lasciano traccia nelle prime due camere e finiscono nella terza. Mentre i neutroni, non avendo carica elettrica, non sono visibili nelle prime due camere, ma depositano la loro energia nel calorimetro adronico. Infine i muoni lasciano una traccia in tutte le camere e spesso escono fuori dal rivelatore stesso. In Figura 9 abbiamo riportato lo schema del rivelatore CMS che è uno dei grossi rivelatori installati al collisionatore LHC. Come si vede, segue esattamente lo schema generale che abbiamo illustrato.

8. Il CERN, LHC e il contributo dei fisici italiani

LHC è una macchina acceleratrice circolare che è stata realizzata presso il CERN di Ginevra, [1], utilizzando il tunnel che era stato costruito negli anni Ottanta per ospi-

tare un collisionatore di elettroni su positroni, il LEP. All'interno di LHC circolano invece due fasci di protoni. Prima di entrare più in dettaglio nelle caratteristiche della macchina, parliamo più in generale del CERN di Ginevra. Come abbiamo già detto, questo Laboratorio, fortemente voluto dalla comunità europea e in particolare dall'Italia, è stato fondato nel 1954 al confine tra Svizzera e Francia.



*Figura 10. Una vista aerea dell'area CERN.
La locazione principale si trova alla sinistra della circonferenza più piccola.*

In Figura 10 mostriamo una vista aerea dell'area del CERN. La locazione principale è alla sinistra della circonferenza piccola che corrisponde all'acceleratore SpS (quello in cui furono scoperti da Rubbia e collaboratori le particelle W e Z) e che attualmente funziona da preacceleratore di LHC. Il tunnel di LHC corrisponde alla circonferenza più grande lunga circa 27 Km. Nella foto, in primo piano, è visibile l'aeroporto di Ginevra con le piste di decollo e di atterraggio. La linea tratteggiata è il confine tra Francia e la Svizzera.

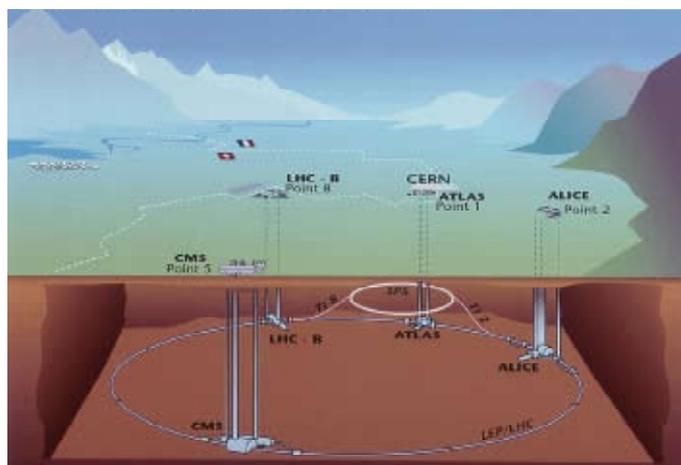


Figura 11. Rappresentazione schematica di LHC e delle aree sperimentali.

Nella Figura 11 sono rappresentate le aree sperimentali di LHC, cioè le aree dove sono posizionati i rivelatori. I due grossi rivelatori dedicati alla ricerca della particella di Higgs sono ATLAS e CMS. LHCb e ALICE sono altri due rivelatori dedicati a esperimenti più specifici e che non abbiamo qui la possibilità di descrivere. Il tunnel di LHC è posizionato a una profondità variabile tra 50 e 175 metri. Il tunnel ha una larghezza di circa 4 metri (vedi Figura 12) e come abbiamo detto si estende per 27 Km. Nel tunnel viaggiano, in direzione opposta, due fasci di protoni che, con opportuni campi magnetici, vengono deflessi per poi farli collidere nelle quattro aree sperimentali. L'energia dei protoni in ogni fascio sarà di circa 7 TeV per una energia complessiva a disposizione di 14 TeV. A queste energie ciò che realmente avviene è un urto tra i componenti elementari del protone, cioè tra i quark. Quindi la vera energia da considerare, ai fini dei processi elementari, è più piccola e dell'ordine di alcuni TeV. È interessante sapere che a queste energie i protoni hanno una velocità pari al 99,9999991% della velocità della luce.



Figura 12. Il tunnel di LEP con il tubo che trasporta i due fasci di protoni.

Ovviamente il costo energetico per mantenere i campi elettrici e magnetici necessari al funzionamento di LHC è molto elevato, ma il costo è stato molto ridotto tramite l'uso massiccio della superconduttività, che permette la trasmissione delle correnti elettriche con dispersioni del tutto trascurabili. In pratica, i tubi (nei quali scorrono i protoni e i magneti che li guidano) sono tenuti a una temperatura molto vicina alla zero assoluto, pari a 1,9 °K. Questa temperatura è mantenuta facendo uso di elio liquido raffreddato. La quantità di elio liquido a queste temperature, usata a LHC, è circa 100 tonnellate, la più elevata su tutto il nostro pianeta.

Veniamo ora a discutere il ruolo dei fisici italiani a questa avventura scientifica unica nel suo genere⁹. Occorre premettere che il ruolo degli italiani al CERN è sempre stato di grande rilevanza. A partire da Edoardo Amaldi, che è stato uno dei maggiori propugnatori dell'idea di un laboratorio di fisica europeo, e che ne è stato Vice-Presidente del Consiglio nel periodo 1961-63 e Presidente nel 1970-71. La struttura generale del CERN prevede un Direttore Generale che sovrintende tutta la gestione della struttura e nel periodo 1954-77 abbiamo avuto tre italiani investiti di questa ca-

rica, Edoardo Amaldi, Carlo Rubbia e Luciano Maiani. Inoltre, la politica scientifica del CERN viene definita dall' SPC (Scientific Policy Committee). In questo comitato, sempre nel periodo considerato in precedenza (1954-77), ci sono stati ben 12 italiani. Ampia è stata anche l'impegno su altre cariche come Direttori di Ricerca (7), Direttori degli Acceleratori (3) e Capi Divisione (10).

Per quanto riguarda in particolare, LHC, l'Italia ha contribuito alla costruzione sia della macchina sia degli apparati di rivelazione con un impegno umano di circa seicento fisici. È interessante sapere che due donne sono le coordinatrici dei fisici italiani nei due esperimenti più grandi (ATLAS e CMS); e, ancora, un'italiana è diventata di recente la responsabile internazionale dell'esperimento ATLAS, così come sono italiani i vice-rappresentanti dei tre maggiori esperimenti e il capo della divisione ricerca.

Anche l'industria italiana ha avuto una parte importante nella costruzione di LHC, in particolare per le parti superconduttive. Dato che LHC è stato finanziato dal CERN con il suo budget ordinario, il contributo finanziario dell'Italia è da calcolarsi sulla base del suo contributo ordinario, ovvero il 12,3% dell'intero bilancio CERN. Complessivamente l'Italia ha sborsato 77 milioni di Euro con un ritorno dalle commesse del CERN a industrie italiane pari a 88 Milioni. Inoltre, tutte le attività della fisica italiane sono coordinate dal nostro INFN (Istituto Nazionale di Fisica Nucleare) che ha sezioni presso tutte le maggiori Università italiane. Quindi nel ritorno alle industrie è anche da considerare tutto quello che le singole sezioni INFN hanno speso per finanziare la loro parte di ricerca ad LHC. Complessivamente l'Italia è terza nelle tecnologie del vuoto e della criogenia (parti fondamentali della tecnologia superconduttrice) ed è seconda nei settori di ingegneria civile, meccanica ed elettrica. Risulta seconda anche nel calcolo complessivo delle forniture, dietro alla Francia e davanti alla Germania.

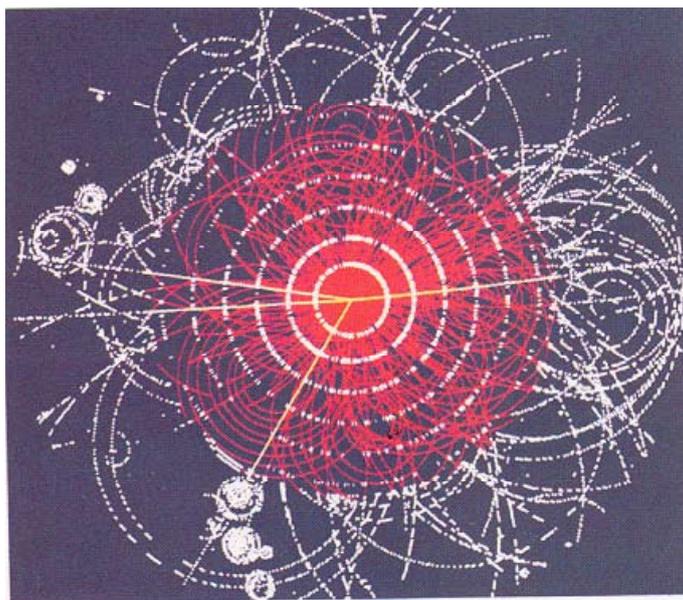


Figura 13. La ricostruzione di una collisione ad LHC.

Un altro punto molto importante da sottolineare è l'impegno nel settore del calcolo computerizzato. In ogni singola collisione a LHC vengono prodotte molte decine di particelle (vedi Figura 13) per ognuna delle quali il sistema del rivelatore fornisce tutte le informazioni necessarie, quali carica, massa, traiettoria ecc. Inoltre gli eventi si susseguono a intervalli di tempo microscopici. Il flusso di dati corrispondente è circa di 300 Gigabyte/sec. Dato che si studiano eventi con caratteristiche particolari, esiste un sistema di filtraggio che permette di rigettare moltissimi degli eventi osservati e di ritenere solo quelli interessanti. Questo dà luogo a un flusso di dati filtrati pari a 300 Megabyte/sec. L'elaborazione di un flusso di dati così imponente ha richiesto la messa a punto di un sistema di calcolo diffuso a livello globale, la rete di supercalcolo GRID, della quale l'INFN è stato uno degli attori fondamentali. Inoltre l'INFN sta coordinando il progetto di ampliamento della rete GRID nei paesi asiatici, in modo particolare Cina e India.

In definitiva, LHC rappresenta uno sforzo enorme della collettività mondiale, dato che negli esperimenti sono coinvolti fisici di tutto il mondo. Come abbiamo già detto, l'inaugurazione ha avuto luogo il 10 Settembre 2008 ed è stata verificata la funzionalità dei fasci. Purtroppo un incidente di tipo elettrico ha prodotto danni alla macchina. La macchina è stata adesso riparata e questo autunno ha ricominciato a funzionare superando l'energia record di 2 TeV. Se tutto andrà come ci si aspetta a partire dal 2010 arriveranno i primi risultati di fisica.

Ovviamente i fisici delle particelle di tutto il mondo sono in fremente attesa dei primi dati che arriveranno da questa macchina e che potranno portare una nuova luce sui meccanismi che regolano la materia e le sue interazioni.

NOTE

¹ Nella fisica delle particelle elementari le energie si misurano facendo uso dell'elettronvolt (eV), cioè, l'energia che un elettrone acquista passando attraverso una differenza di potenziale di 1 Volt. I multipli più usati dell'eV sono il MeV = 10^6 eV, il GeV = 10^9 eV ed il TeV = 10^{12} eV.

² Il nome CERN deriva dalla denominazione, in francese, del Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire, organo fondato nel 1952 con il compito di creare un centro di fisica fondamentale in Europa. Quando fu istituito ufficialmente nel 1954, prese il nome di European Organization for Nuclear Research, ma mantenne l'acronimo originale.

³ Dalla relazione di Einstein $E=mc^2$ segue che le masse hanno dimensioni di una energia divisa per il quadrato di una velocità e quindi si misurano in eV/c².

⁴ Gluoni origina dalla parola inglese "glue" che significa colla. Cioè i gluoni 'incollano' assieme i quark all'interno del nucleo.

⁵ I positroni sono le antiparticelle degli elettroni. Sono cioè identici agli elettroni, salvo per la loro carica che è opposta, hanno cioè carica +1. Lo stesso è vero per tutte le particelle di Tavola 1: a ogni particella è associata un'antiparticella con le stesse proprietà ma con carica opposta.

⁶ In teoria della relatività le dizioni «la particella ha massa nulla» o «la particella si muove a velocità pari a quella della luce» sono equivalenti.

⁷ Per una panoramica, vedi [2].

⁸ Particelle identiche agli elettroni ma con massa circa 200 volte più grande (vedi Tavola 1).

⁹ Un'ottima rassegna del contributo italiano al CERN è in [3] e [4].

BIBLIOGRAFIA

- [1] Llewellyn Smith, C., Il Large Hadron Collider, *Le Scienze*, 476, 2008.
- [2] Maiani, L. (a cura di), *Le particelle fondamentali*, Le Scienze Quaderni, 103, 1998.
- [3] Menzinger, F. (a cura di), *L'Italia al CERN. Le ragioni di un successo*, INFN Laboratori Nazionali, Frascati 1995.
- [4] Petronzio, R., L'Italia nel Large Hadron Collider, *Le Scienze*, 476, 2008.