

# Ugo Amaldi

## Sempre più veloci

Perché i fisici accelerano le particelle:  
la vera storia del bosone di Higgs

con la collaborazione di Adele La Rana

Chiavi di lettura a cura di  
Federico Tibone e Lisa Vozza

---

*indice*

<i>Introduzione</i>	5
1. I primi cinquant'anni	17
2. Piccoli acceleratori crescono	67
3. Particelle-materia e particelle-forza	117
4. Alla ricerca del campo di Higgs	145
5. La scoperta annunciata, SUSY e oltre	177
6. Acceleratori che curano	211
<i>Epilogo: il CERN risale il corso del tempo</i>	249
<i>Fonti delle immagini</i>	270
<i>Indice analitico</i>	272

---

# Introduzione

Gli atleti che partecipano alle Olimpiadi corrono e nuotano sempre più veloci, anche se con il passare del tempo diventa sempre più arduo battere i vecchi record.

Lo stesso può dirsi delle particelle che girano (quasi!) alla velocità della luce negli acceleratori, questi microscopi dell'infinitamente piccolo.

Tutti capiscono le motivazioni degli atleti e degli organizzatori di Olimpiadi; le ragioni dei fisici sono invece molto meno chiare ai non esperti.

E la domanda «Ma perché accelerare le particelle?» è divenuta ancora più frequente da quando nei laboratori del CERN di Ginevra i fisici del *Large Hadron Collider* (o brevemente LHC) hanno annunciato la scoperta del *bosone di Higgs*.

È una domanda a cui cercherò di rispondere, in questo libro, partendo dalla storia di alcune importanti scoperte della fisica e dai personaggi che ne sono stati protagonisti.

Come vedremo, è una storia in cui le ricerche su aspetti fondamentali della natura – dalla struttura della materia alla genesi dell'universo – si intrecciano con applicazioni di grande valore pratico, in particolare per la diagnosi e la cura delle nostre malattie.

## Ringraziamenti

Sono grato a Daniele Bergesio, che ha prestato la sua passione per la fotografia nel ritrarre i luoghi del CERN citati all'inizio dei capitoli. Ringrazio inoltre Paolo Magagnin per avermi aiutato a realizzare alcune difficili immagini tecniche e inedite presenti nel libro. Il mio grazie va infine a Federico Tibone, che con domande e preziosi consigli ha contribuito ad arricchire e migliorare il testo, mediando tra l'esigenza di rigore dello scienziato e le genuine curiosità del lettore.

### Microscopi subatomici, fabbriche di particelle

Il grande sviluppo degli acceleratori di particelle, dispositivi che di solito hanno forma circolare, ha avuto inizio circa ottanta anni or sono.

Inizialmente, per qualche decennio, li si è usati per studiare la struttura della materia: le particelle veloci, una volta accelerate, erano indirizzate contro un bersaglio, per esempio un piccolo pezzo di metallo. Osservando i prodotti dell'urto si ottenevano informazioni sulla struttura dei nuclei atomici della materia bombardata. Era un po' come esplorare il contenuto di una stanza buia lanciando al suo interno molte palline e osservandone i rimbalzi.

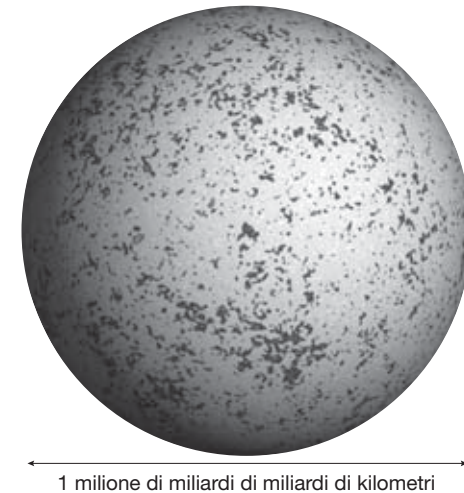
Successivamente l'attenzione dei fisici si è rivolta alle nuove particelle prodotte nell'urto tra una particella veloce e un nucleo atomico. Infatti l'energia si può trasformare in massa, come previsto dalla relazione  $E = mc^2$  scoperta da Einstein, e l'energia liberata nella collisione dà spesso luogo alla creazione di particelle che prima non esistevano. Queste particelle instabili, che sopravvivono per meno di un milionesimo di secondo dopo l'urto, non si trovano nella materia di cui è fatto il mondo intorno a noi e possono essere studiate soltanto se le si produce artificialmente con un acceleratore.

Dunque gli acceleratori, oltre a essere i «microscopi» del mondo subatomico (cioè del nucleo e di ciò che esiste all'interno del nucleo), possono essere anche visti come «fabbriche» di quelle particelle che – avendo massa e quindi energia maggiore delle par-

ticelle di cui è fatta la materia ordinaria – sono instabili e rapidissimamente *decadono* trasformandosi nelle usuali particelle stabili.

Ma perché i fisici si interessano all'effimera esistenza di particelle che sono tanto difficili da produrre e da osservare?

Perché vogliono interpretare l'immagine della figura 1. Non si tratta di un'immagine qualsiasi: si può dire anzi che sia la più antica «fotografia» che abbiamo dell'universo. Vediamo di capire meglio perché.



**Figura 1.** Questa è la più antica «fotografia» che mai potremo avere del nostro universo. Mostra l'intensità della *radiazione fossile* misurata dalla sonda WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe). Le microonde risalgono a circa 380 000 anni dopo il Big Bang, cioè all'epoca in cui il cosmo è diventato trasparente alle onde elettromagnetiche. Le gradazioni di grigio rappresentano minuscole fluttuazioni di temperatura.

## Perché non possiamo vedere il Big Bang

Quando puntiamo verso lo spazio cosmico i telescopi più potenti, osserviamo la luce proveniente da stelle della nostra galassia e da altre galassie.\*

La luce emessa dalle galassie più lontane ha viaggiato per miliardi di anni prima di essere registrata dai telescopi: dunque la sua fotografia ci dice oggi come quella galassia era miliardi di anni fa; nel frattempo essa potrebbe persino essere scomparsa. Dunque le galassie lontane sono le più vecchie e quelle vicine le più giovani; confrontando le immagini, perciò, è possibile studiare l'evoluzione delle galassie nel tempo.

Ma c'è di più: nel secolo scorso si è scoperto che le galassie si allontanano tutte le une dalle altre, e questa osservazione indica che lo spazio stesso si sta espandendo; è come se le galassie fossero coriandoli appiccicati sulla superficie di un palloncino che si sta gonfiando. Estrapolando all'indietro questo movimento, come se il palloncino si sgonfiasse, si può affermare che circa 14 miliardi di anni fa tutta l'energia dell'universo occupava un volume molto piccolo e la temperatura della materia che lo costituiva era altissima: questo era l'universo prodotto nel Big Bang.

Un milionesimo di milionesimo di secondo dopo il Big Bang, la materia aveva una temperatura di mi-

\* A occhio nudo vediamo soltanto qualche migliaio di stelle della nostra galassia, che in realtà ne contiene ben cento miliardi; e sebbene le altre galassie siano numerosissime, possiamo a malapena distinguere Andromeda, la più vicina.

liardi di miliardi di miliardi di gradi. Poi però, con il passare del tempo e con l'espansione dello spazio, la temperatura è gradualmente diminuita fino a raggiungere il valore che oggi si misura nello spazio cosmico:  $-270$  gradi Celsius, cioè 3 kelvin.\*\*

Naturalmente vi sono punti dell'universo in cui le temperature sono alte ancora oggi: la fotosfera del Sole per esempio è a circa 6000 kelvin, e nell'interno della nostra stella si raggiungono i 10 milioni di gradi. I freddissimi 3 kelvin si misurano invece nello spazio che separa le galassie, dove il contributo della luce emessa dalle stelle è trascurabile.

Fino a temperature di qualche migliaio di kelvin la materia è solida o liquida o gassosa, così come la conosciamo sulla Terra. Quando la si riscalda ulteriormente si incomincia a produrre il quarto stato della materia, il cosiddetto *plasma atomico*: le continue e violente collisioni tra gli atomi strappano alcuni elettroni dai nuclei intorno a cui normalmente orbitano.

Aumentare la temperatura vuol dire infatti aumentare in proporzione l'energia con cui gli atomi della materia continuamente si urtano, in quella danza sfrenata e scoordinata che i fisici chiamano *agitazione termica*. A diecimila gradi gli urti fanno distaccare soltanto gli elettroni degli atomi più leggeri, come l'idrogeno e l'elio; per strappare gli elettroni che ruotano vicino ai nuclei di atomi pesanti come il ferro bisogna superare invece il milione di gradi.

\*\* I fisici preferiscono usare come riferimento la minima temperatura possibile, zero kelvin o 0 K, che è pari a  $-273$  °C.

In ogni modo sopra i 10000 gradi una frazione significativa del plasma è fatta di particelle elettricamente cariche, in particolare di elettroni negativi liberi e di residui atomici elettricamente positivi, in quanto privati di uno o più elettroni, che sono detti *ioni*.

Queste cariche elettriche assorbono immediatamente i pacchetti di energia luminosa, o *fotoni*, che sono continuamente emessi dagli atomi e dagli ioni stessi: un plasma atomico è quindi opaco alla luce, proprio come una lastra di ferro.\*\*\*

Perciò la «zuppa primordiale» di particelle – che poco dopo il Big Bang si trovava a miliardi di miliardi di miliardi di gradi – espandendosi si è raffreddata, ma è rimasta opaca alla luce fino a quando la temperatura non è scesa al di sotto dei diecimila gradi.

Le teorie sulla nascita dell'universo sono dette *modelli cosmogonici* e sono oggi sostenute da numerose misure di precisione. I modelli ci dicono che soltanto a partire da 380000 anni dopo il Big Bang – quando il cosmo era circa mille volte più piccolo rispetto a ora – tutto l'universo è divenuto in brevissimo tempo trasparente. Quando la temperatura è scesa ai valori dell'attuale fotosfera del Sole, il cosmo è divenuto sorgente di un'intensissima luce bianca, i cui fotoni hanno incominciato a viaggiare in ogni direzione alla velocità della luce.

\*\*\* Il ferro è opaco alla luce perché due tra i 26 elettroni di ogni atomo di Fe si muovono liberamente nel metallo, e perciò «divorano» ogni fotone che vi penetra. Il vetro invece è trasparente perché tutti gli elettroni sono attaccati ai loro atomi.

La luce emessa *prima* di quell'istante, assorbita dalla zuppa cosmica primordiale, non potrà mai raggiungere i nostri strumenti, per quanto sensibili essi siano.

### La radiazione fossile

Quando osserviamo l'universo, dunque, oggi possiamo vedere quei fotoni che sono stati prodotti 380000 anni dopo il Big Bang, in una sottilissima buccia sferica che oggi è all'enorme distanza da noi indicata nella figura 1. L'immagine rappresenta proprio questa sfera, al centro della quale si trova il satellite WMAP che ha scattato la foto.

Ma nel loro lungo cammino quei pacchetti di onde elettromagnetiche sono cambiati: l'espansione continua dello spazio, che ha fatto aumentare di mille volte le dimensioni dell'universo visibile, ha distanziato tra loro anche le creste delle onde, che sono diventate mille volte più lunghe.

E così i fotoni della luce bianca iniziale, che avevano una lunghezza d'onda di poco meno di un milionesimo di metro, ci giungono ora con una lunghezza d'onda di circa un millimetro: sono *microonde* invece che luce visibile.

L'immagine della figura 1 è stata quindi ottenuta osservando con strumenti sensibili alle microonde proprio questa *radiazione di fondo* che proviene da ogni parte del cielo.

La lunghezza d'onda media è praticamente la stessa ovunque si guardi, e coincide con quella che si mi-

surerebbe sulla Terra all'interno di un recipiente vuoto mantenuto a 3 kelvin, cioè a  $-270$  gradi centigradi.

Lo spazio cosmico che separa le galassie è quindi percorso in ogni direzione da una radiazione che è un «fossile» di un'epoca remota: 380 000 anni dopo il Big Bang era alla temperatura di 3000 gradi, mentre ora è molto, molto fredda e uniforme.

Questa uniformità non è però assoluta. In alcune porzioni di cielo la temperatura della radiazione di fondo supera di qualche centomillesimo di grado il valore medio, mentre in altre parti sta qualche centomillesimo di grado sotto la media: nella figura 1 queste zone sono rappresentate in gradazioni diverse di grigio.

Le zone più fredde erano anche quelle che avevano densità maggiore: l'attrazione gravitazionale era maggiore, perciò qui hanno avuto origine le prime stelle e le prime galassie, che hanno cominciato a formarsi qualche centinaio di milioni di anni dopo il Big Bang; la loro luce impiega quasi 14 miliardi di anni per arrivare fino alla Terra.

### Una macchina del tempo

Anche se i nostri posteri osserveranno la volta celeste con strumenti avanzatissimi, in grado di rivelare con sensibilità sempre maggiore onde elettromagnetiche di qualsiasi lunghezza d'onda, essi non riusciranno comunque a «vedere» ciò che accadde prima di 380 000 anni dal Big Bang.

Lo impedisce – e sempre lo impedirà – l'opacità della zuppa di particelle, che assorbiva tutti i fotoni quando si trovava a temperature maggiori di qualche migliaio di gradi.

Ma i fisici non si arrendono facilmente, e da tre decenni hanno scelto l'unica strada possibile per sormontare questa difficoltà: costruire modelli.

Questi modelli si basano sullo studio sperimentale delle reazioni che avvenivano tra le particelle nei primi 380 000 anni di vita del cosmo. E gli esperimenti si effettuano proprio con gli acceleratori di particelle, apparecchiature in cui si fanno scontrare granuli di materia dopo averli portati a velocità prossime a quella della luce.

Grazie all'equivalenza di Einstein tra energia e massa, in un acceleratore le collisioni permettono di creare nuove particelle (a patto che queste abbiano massa inferiore all'energia complessiva delle particelle che collidono) e di osservarne il successivo *decadimento*, cioè il processo che le porta a trasformarsi di nuovo in particelle ordinarie.

Se si usa un acceleratore più potente, si può osservare la creazione e il decadimento di particelle che nell'universo primordiale esistevano quando la temperatura era più alta.

In altre parole, acceleratori sempre più potenti permettono di riprodurre in laboratorio ciò che è accaduto sempre più indietro nel tempo.

Gli acceleratori non sono quindi soltanto microscopi subatomici e fabbriche di particelle instabili: sono anche «macchine del tempo».

Quando cinquant'anni fa, da poco arrivato al CERN, ho dato il mio primo, piccolo contributo a questi studi, le energie liberate nelle collisioni erano dell'ordine del GeV, cioè del miliardo di elettronvolt. Oggi sappiamo che tali energie erano caratteristiche delle collisioni che accadevano *un milionesimo di secondo* dopo il Big Bang.

Alla fine del 2000 il gruppo che coordinavo presso l'acceleratore LEP (*Large Electron Positron collider*), al CERN di Ginevra, raccoglieva dati su collisioni a 200 GeV.

Un aumento di cento volte nell'energia ci fa risalire all'indietro nel tempo di un fattore  $100^2 = 10000$ : grazie al LEP abbiamo così potuto comprendere in dettaglio che cosa accadeva appena *un decimillesimo di milionesimo di secondo* dopo il Big Bang.

Queste conoscenze, unite a ciò che si sapeva dagli studi sperimentali fatti a energie inferiori e ad alcuni nuovi e importanti sviluppi della teoria, hanno consentito di formulare un modello matematico che rende ragione anche dei dati osservativi contenuti nella figura 1, che come abbiamo visto risalgono a 380000 anni dopo il Big Bang.

Ma vorremmo saperne di più, esplorare tempi ancora più remoti, prima dei  $10^{-10}$  secondi, per cercare conferme alle intuizioni teoriche e avvicinarci sempre più all'istante in cui tutto ebbe inizio.

Il nuovo acceleratore LHC del CERN ci ha consentito di fare un ulteriore passo indietro nel tempo di un fattore 100, fino al *milionesimo di milionesimo di secondo* dal Big Bang.

## Dalla cosmologia alla medicina

Sono passati più di cento anni da quando la scoperta dei raggi X – resa possibile da uno dei più sofisticati acceleratori di particelle disponibili all'epoca – ha dato inizio alla fisica moderna.

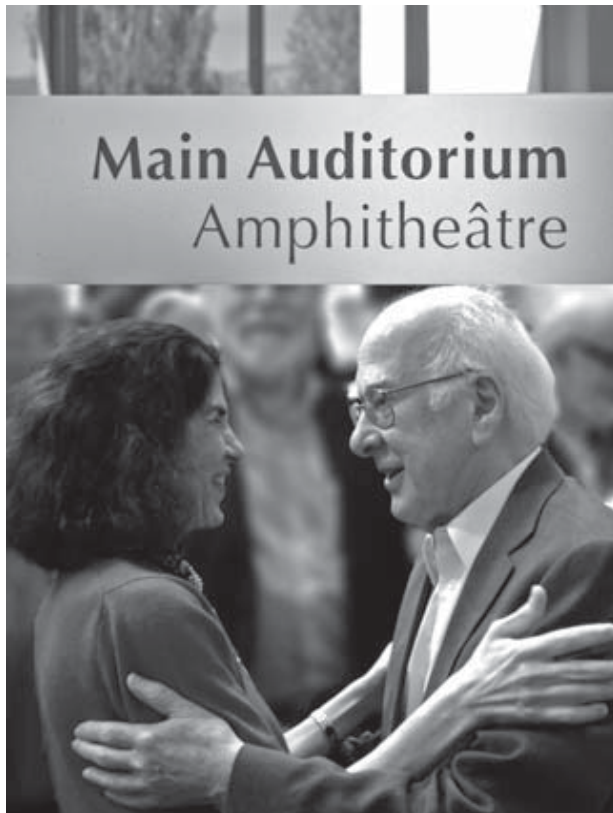
Nei prossimi capitoli ripercorreremo i principali eventi che in seguito a quella scoperta hanno portato allo sviluppo di acceleratori sempre più potenti e conosceremo la personalità di alcuni tra gli scienziati che, curiosi di capire la struttura degli atomi e del loro nucleo, hanno inventato, sviluppato e utilizzato queste macchine.

L'affascinante storia degli acceleratori ci conduce fino alla recente osservazione della nuova particella chiamata *bosone di Higgs* e alle attuali frontiere della *fisica delle alte energie*, che LHC – il nuovo straordinario apparato del CERN – permetterà di esplorare.

Vedremo anche che gli acceleratori di particelle, inventati e usati per la ricerca pura nel campo della fisica fondamentale, si sono poi rivelati preziosi anche in medicina, rendendo possibile la realizzazione di nuove tecniche per la diagnosi e la cura di numerose malattie.

Si tratta di un esempio interessante che illustra un fatto del tutto generale: gli strumenti sviluppati dai fisici per la ricerca fondamentale hanno trovato – e troveranno sempre, ne sono convinto – applicazioni pratiche che vanno ben al di là delle intenzioni dei loro creatori e che, magari a lungo termine, portano benefici a tutti i cittadini.

## La scoperta annunciata, SUSY e oltre



*Il Main Auditorium è al primo piano dell'edificio centrale del CERN. Costruito nel 1954, ha mantenuto fino al 2011 gli stessi tavolini ribaltabili di legno e le stesse lunghe lavagne, sbiancate dalle troppe cancellature.*

*Vi sono entrato con grande soggezione nel 1960 per seguire le lezioni di tre personaggi storici del CERN: il francese Jacques Prentki, il tedesco Rolf Hagedorn e l'austro-americano Victor Weisskopf.*

*Qui con emozione ho fatto il mio primo seminario importante, seguito negli anni da molti altri. Lo affollavamo quasi in trecento durante le riunioni della collaborazione DELPHI, ed era stracolmo nel 1989 quando presentammo i risultati del primo mese di funzionamento del LEP.*

*Nel Main Auditorium hanno tenuto conferenze indimenticabili tutti i grandi fisici del mondo. All'inizio si scrivevano le formule sulle tre lavagne scorrevoli; poi si passò a un mastodontico proiettore di lucidi; oggi basta arrivare con una chiavetta USB per caricare le immagini sul computer. Memorabile rimane la presentazione del 1983 in cui Carlo Rubbia annunciò la scoperta del bosone intermedio W.*

*Nel dicembre del 2011 i due responsabili dei rivelatori ATLAS e CMS di LHC, gli italiani Fabiola Gia-*



*notti e Guido Tonelli, hanno esposto le prime indicazioni dell'esistenza del bosone di Higgs, con un livello di confidenza di 3 deviazioni standard.*

*Poi il 4 luglio 2012 la Gianotti e lo statunitense Joseph Incandela hanno presentato i dati che confermano la scoperta. Erano presenti quattro tra i sei fisici teorici che nel 1964 avevano proposto il campo scalare come soluzione al problema delle masse delle particelle. Nel Main Auditorium gremito di ricercatori, l'ottantatreenne Peter Higgs ha abbracciato commosso Fabiola Gianotti e ha dichiarato che non avrebbe mai pensato di veder confermata l'ardita ipotesi prima di chiudere gli occhi.*

### **Gli anni d'oro del Tevatrone**

Lo smontaggio dei magneti del LEP iniziò nel 2001 e il bastone di comando, nella ricerca del campo di Higgs, passò al laboratorio statunitense Fermilab, a sud di Chicago. Qui dal 1989 funzionava il *Tevatrone*, un collisore protone-antiprotone che è stato il primo a utilizzare magneti deflettori superconduttori.

I due fasci del Tevatrone raggiungevano ciascuno i 1000 GeV, ma nelle collisioni non tutti i 2000 GeV d'energia totale erano utilizzabili per produrre nuove particelle. Infatti nei fasci collidenti ogni protone (o antiprotone) è fatto di tre quark (o antiquark), di molti gluoni e di coppie particella-antiparticella che continuamente si creano e annichilano; ciascuno di questi componenti perciò trasporta un'ener-

gia molto minore di 1000 GeV. La cromodinamica quantistica prevede allora che le collisioni tra i componenti fondamentali del protone e dell'antiprotone collidenti liberino, in media, soltanto *un settimo* dei 2000 GeV totali. Nel caso del Tevatrone si parla quindi di circa 300 GeV, una volta e mezzo l'energia che avevamo a disposizione al LEP.

Il Tevatrone funzionò per vent'anni con due grandi rivelatori che hanno fatto importanti scoperte, in particolare quella del quark-*t*. Tuttavia del bosone di Higgs a Fermilab si è osservato un segnale con una significatività di sole 2,8 deviazioni standard, un risultato che il Department Of Energy degli Stati Uniti non ha ritenuto sufficiente per continuare a investire nel collisore.

Così il Tevatrone è stato spento nel settembre 2011, una decisione dovuta anche all'entrata in funzione dell'LHC, che stava già raccogliendo dati a energie ben superiori.

### **Il Large Hadron Collider e i suoi rivelatori**

L'insieme del collisore LHC e dei suoi quattro rivelatori costituisce il più grande progetto scientifico-tecnico mai realizzato sulla Terra.

Nell'LHC dal 2009 collidono due fasci di protoni. Siccome hanno la stessa carica, non possono circolare nella stessa «ciambella» come facevano i fasci di elettroni e positroni nel LEP; ruotano invece in senso opposto in due ciambelle separate, di circa 5

centimetri di diametro, sottoposte a campi magnetici di verso opposto (figura 53).

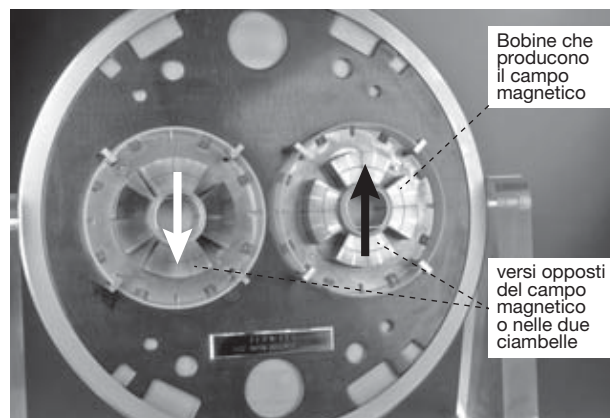
I pacchetti di protoni sono mantenuti per giorni sulla loro traiettoria circolare e continuamente focalizzati da 1232 magneti deflettori e 392 quadrupoli. Le bobine sono superconduttrici e percorse da una corrente di 12000 ampere (un normale cavo di rame fonderebbe anche con correnti dieci volte più deboli).

I due sincrotroni concentrici dell'LHC si intersecano nei punti dove sono collocati i quattro grandi rivelatori delle collisioni protone-protone.

Negli anni 2009–2012 hanno circolato protoni da 3500–4000 GeV, con energie nel baricentro della collisione pari a 7000–8000 GeV; nel 2015 si prevede di raggiungere i 13 000 GeV. Tenendo conto che l'energia liberata nelle collisioni tra i componenti dei due protoni è circa un settimo dell'energia totale, per i primi tre anni i fisici dell'LHC hanno avuto a disposizione collisioni a circa 1000 GeV, cinque volte le energie massime del LEP.

Si parla dunque a ragione di «alte energie», ma si intende in realtà «alte densità di energia»: ciascuno dei protoni che collidono ha infatti soltanto l'energia di un moscerino in volo, ma la densità è enorme perché nell'LHC quell'energia è portata da un singolo protone (mentre un moscerino è fatto da centinaia di miliardi di miliardi di protoni e neutroni).

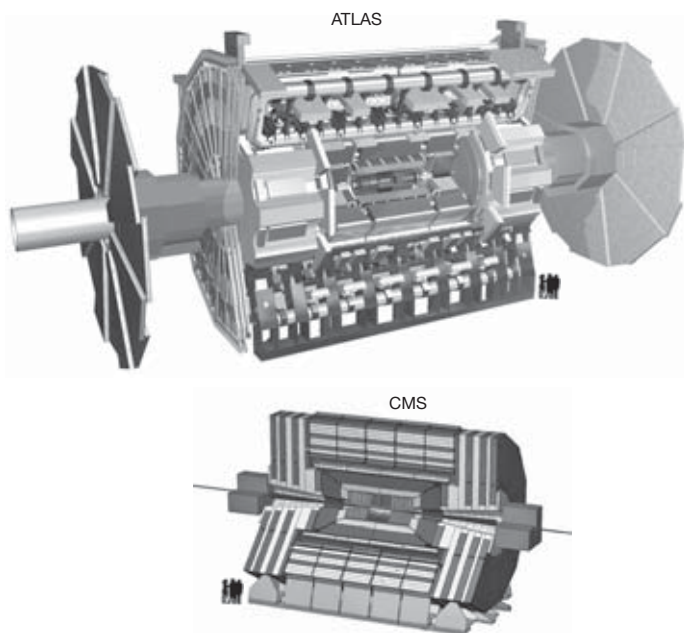
Nelle collisioni dell'LHC l'energia è così grande che si potrebbero produrre bosoni di Higgs fino a 800–900 GeV di massa. Questo è un tetto molto confortevole, perché nel 2000 le quattro collaborazioni



**Figura 53.** Il tunnel di LHC e la sezione di uno dei 1232 magneti deflettori, lunghi ciascuno 15 metri. Le frecce bianca e nera indicano che il campo magnetico ha verso opposto nelle due ciambelle, che distano tra loro 25 centimetri.

del LEP, introducendo nel Modello Standard *tutte* le osservazioni (e le non-osservazioni) fatte, conclusero che, se il bosone di Higgs esiste, la sua massa deve essere compresa tra 114 GeV e 200 GeV.

Seimila fisici di tutto il mondo hanno collaborato alla realizzazione di due enormi rivelatori ottimizzati per la ricerca del bosone di Higgs, ATLAS e CMS (figura 54), che sono stati montati 100 metri sotto terra.



**Figura 54.** ATLAS, raffigurato in alto, è il più grande rivelatore mai costruito. Il rivelatore della collaborazione CMS, in basso, è più piccolo di ATLAS (la C del nome sta per «compatto», ma pesa pur sempre 14500 tonnellate).

ATLAS occupa il volume di una palazzina di sei piani: sono dimensioni circa doppie rispetto ai rivelatori del LEP, perché le energie delle centinaia di particelle prodotte in una collisione protone-protone dell'LHC sono dieci volte più grandi.

ATLAS e CMS contengono camere a fili che coprono decine di migliaia di metri quadrati e permettono di ricostruire la traccia di una particella carica con la precisione di un decimo di millimetro.

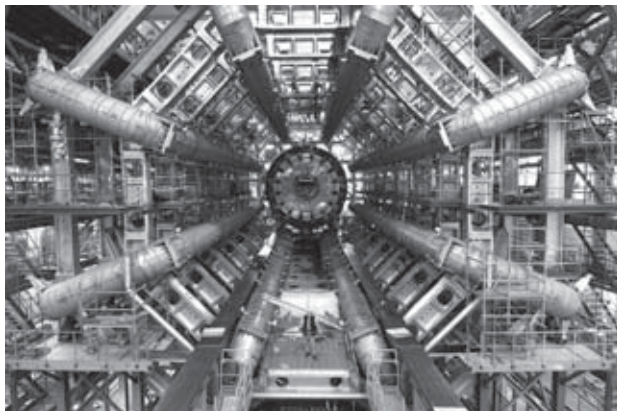
Come già nel LEP, le camere a fili sono disposte in strati concentrici attorno al punto in cui avvengono le collisioni. Gli strati distano qualche metro dal tubo a vuoto; più vicino al punto di collisione c'è una decina di strati di rivelatori al silicio, che misurano con precisione micrometrica la traiettoria delle particelle cariche che li attraversano.

Le energie delle particelle create nel punto della collisione sono dedotte misurando la curvatura delle loro traiettorie, piegata da enormi campi magnetici. Per questo CMS e ATLAS hanno al centro un solenoide superconduttore, simile a quelli dei rivelatori del LEP ma più grande e potente. Inoltre ATLAS è dotato di bobine superconduttrici disposte radialmente (figura 55), che permettono di misurare l'energia dei muoni, capaci di attraversare molti metri di ferro.

Nell'LHC ogni cinquanta miliardesimi di secondo avvengono miliardi di collisioni protone-protone; soltanto un centinaio di queste è registrato dai computer per l'analisi successiva. Per immagazzinare anche soltanto questa minuscola frazione dei dati complessivamente prodotti, occorrerebbero ben 10

milioni di DVD ogni anno. Perciò è stato necessario realizzare una nuova infrastruttura informatica, la *LHC Computing GRID*: è una rete mondiale composta da decine di migliaia di computer, che consente di memorizzare dati e condividere capacità di calcolo in tutto il globo.

Gli eventi appena registrati al CERN possono così essere immediatamente analizzati dai fisici di tutte le università e i laboratori della collaborazione. Senza la rete GRID non sarebbe possibile esaminare l'enorme quantità di dati prodotti dai quattro rivelatori dell'LHC; inoltre questa capacità di calcolo senza precedenti avrà certamente grandi ricadute tecnologiche anche in molti altri settori.



**Figura 55.** Le otto bobine superconduttrici di ATLAS, prima che l'interno fosse riempito da una decina di cilindri di rivelatori diversi. La persona in basso dà un'idea della scala.

GRID richiama alla mente un'altra formidabile invenzione del CERN, che risale agli inizi degli anni Novanta: il World Wide Web. Creato dall'inglese Tim Berners-Lee per permettere ai fisici di scambiarsi rapidamente dati a distanza, oggi è diventato uno dei motori dello sviluppo economico mondiale.

### La scoperta annunciata

A quarant'anni dalla prima previsione della sua esistenza, e dopo decenni di lunghi esperimenti andati a vuoto, l'inafferrabile bosone di Higgs è caduto infine nella rete di LHC.

Sono occorsi due anni di presa dati, ma il 4 luglio 2012 i coordinatori delle collaborazioni ATLAS e CMS hanno annunciato l'osservazione di alcune centinaia di eventi attribuibili al decadimento di bosoni di Higgs, con massa pari a 125 GeV e significatività statistica di 5 deviazioni standard.

L'Aula Magna del CERN era stracolma, l'atmosfera elettrica; decine di migliaia di persone seguivano da tutto il mondo le presentazioni via web, e vi sono stati applausi a scena aperta.

La copertura dei mezzi di comunicazione di massa è andata al di là di ogni aspettativa, tanto che si è parlato di «higgsteria»; la frase «Il CERN scopre la particella di Dio» campeggiava in tutte le lingue su giornali e siti web. Questa espressione è stata resa famosa dal titolo di un libro scritto nel 1993 dal premio Nobel americano Leon Lederman, insieme a

Dick Teresi. La scelta del titolo è stata commerciale più che filosofica e mescola piani che non hanno a che vedere uno con l'altro; ma l'appellativo purtroppo è divenuto moneta corrente. Se proprio si vuole usarlo, troverei più appropriato applicarlo al *campo* piuttosto che alla particella: il campo scalare potrebbe anche dirsi «campo di Dio», perché secondo il Modello Standard è l'entità fisica che dota di massa le particelle e ha, quindi, la funzione di «mantenerle nell'essere», atto che i teologi attribuiscono a Dio.

## I dati di LHC

Nell'LHC la creazione di un bosone di Higgs  $H^0$  è dovuta alla fusione tra un gluone di un protone di alta energia e un gluone dell'altro protone con cui collide; infatti lo scambio gluonico che lega i tre quark è tanto intenso che in un protone da 4000 GeV ben 2000 GeV sono trasportati da gluoni.

Appena prodotto, il bosone  $H^0$  decade in un gran numero di combinazioni di particelle più leggere. Le probabilità di questi diversi decadimenti, che si possono calcolare *in modo esatto* applicando la teoria dei campi quantistici al Modello Standard, sono riportate nella tabella 5.

In generale le probabilità di decadimento diminuiscono al calare della massa della particella-materia e dell'antiparticella-materia prodotte, perché l'interazione di una particella con il campo di Higgs è tanto più piccola quanto minore è la massa.

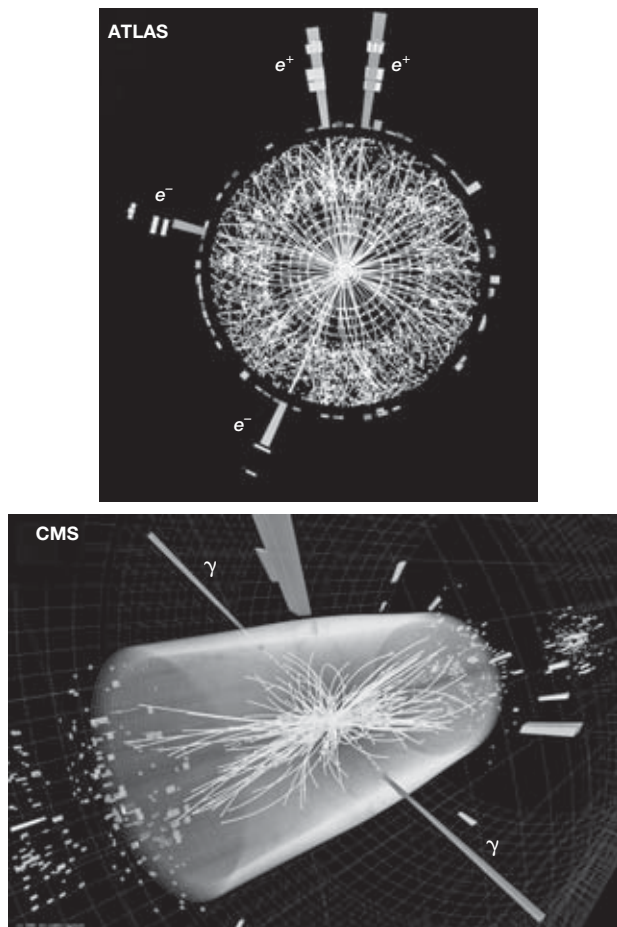
**Tabella 5.** Le probabilità di decadimento di un bosone di Higgs di 125 GeV di massa. Gli ultimi due modi di decadimento sono stati oggetto dei primi esperimenti dell'LHC.

	decadimento	in simboli	probabilità
1	in una coppia $b\bar{b}$	$H^0 \rightarrow b + \bar{b}$	65%
2	in una coppia $\tau\bar{\tau}$	$H^0 \rightarrow \tau + \bar{\tau}$	5,5%
3	in una coppia $c\bar{c}$	$H^0 \rightarrow c + \bar{c}$	2,0%
4	in due gluoni	$H^0 \rightarrow g + g$	5,7%
5	in due fotoni	$H^0 \rightarrow \gamma + \gamma$	0,25%
6	in quattro leptoni carichi	$H^0 \rightarrow e^- + e^+ + e^- + e^+$ $H^0 \rightarrow e^- + e^+ + \mu^- + \mu^+$ $H^0 \rightarrow \mu^- + \mu^+ + \mu^- + \mu^+$	0,008%

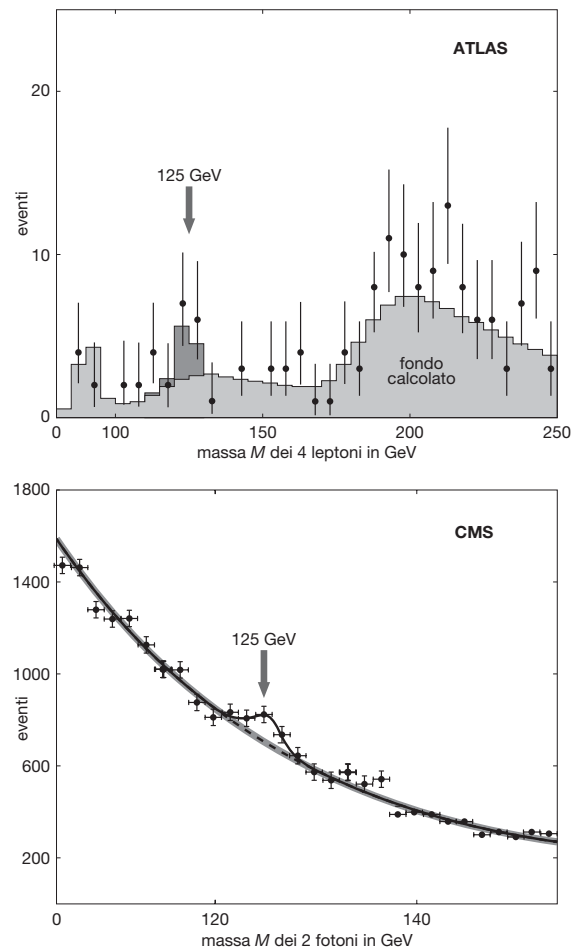
Perciò il decadimento in un quark- $b$  e un anti-quark- $\bar{b}$  (riga 1 della tabella) è molto più probabile del decadimento in  $\tau\bar{\tau}$  (riga 2) che, a sua volta, è più probabile del decadimento  $c\bar{c}$  (riga 3); ma tutti questi fermioni decadono a loro volta in molte altre particelle e individuarli, tra le decine di tracce che escono dal punto di collisione, è veramente difficile.

Anche l'abbondante decadimento in due gluoni della riga 4 della tabella è difficile da ricostruire. Per esclusione, nel 2011 e nel 2012 ATLAS e CMS hanno studiato con particolare cura i decadimenti del bosone di Higgs  $H^0$  in due fotoni (riga 5) e in quattro leptoni carichi (riga 6), come mostra la figura 56.

Questi decadimenti hanno probabilità molto piccole, ma sono più facili da identificare e permettono una determinazione diretta della massa della parti-



**Figura 56.** Due eventi attribuibili al decadimento di un bosone di Higgs in ATLAS (in 4 leptoni carichi) e in CMS (in 2 fotoni). I coni chiari accanto ai simboli  $e^+$ ,  $e^-$ ,  $\gamma$  rappresentano le energie di queste particelle.



**Figura 57.** Riportando il numero di eventi a 7000–8000 GeV, con 4 leptoni e 2 fotoni, in funzione della massa  $M$  (ricostruita dalle energie e direzioni delle particelle finali), si osservano due picchi intorno al valore  $M = 125$  GeV.

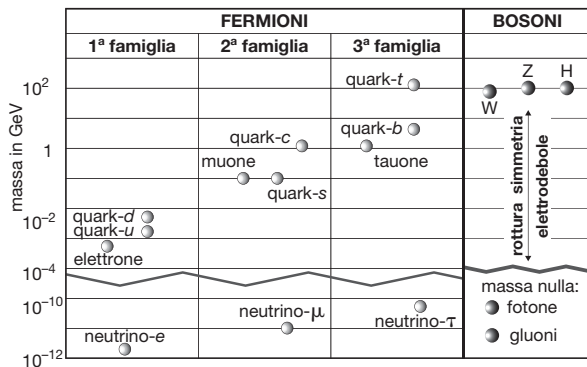
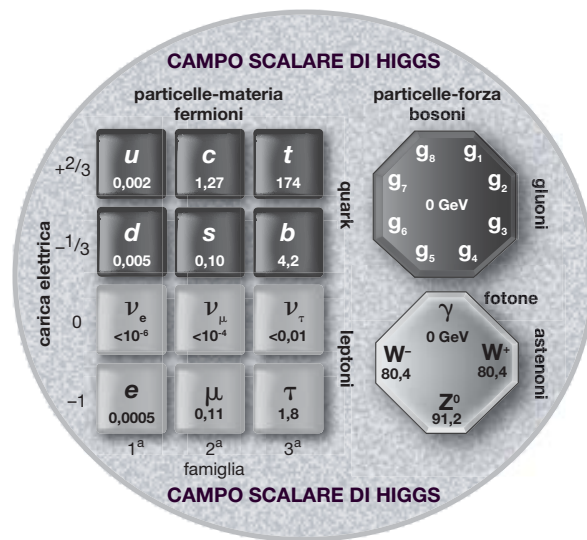
cella che li ha prodotti, poiché i due rivelatori sono in grado di misurare con grande precisione le energie e le direzioni di *tutte* le particelle finali.

I grafici della figura 57 rappresentano insieme di eventi prodotti dalle collisioni protone-protone raccolti tra il 2011 e 2012. In entrambi i casi sotto i picchi vi sono molti eventi «di fondo». Per questo, quando si mostra un evento che appartiene a uno di questi picchi – come gli eventi della figura 56 – non si può essere *certi* che esso sia dovuto al decadimento di una particella  $H^0$ : si sa soltanto che è un evento *attribuibile* al decadimento di un bosone di Higgs.

Attraverso l'analisi dei segnali ottenuti nei diversi canali di decadimento, le due collaborazioni internazionali ATLAS e CMS hanno osservato – ciascuna indipendentemente dall'altra e con la significatività di 5 deviazioni standard – la produzione di un nuovo tipo di bosone con massa pari a 125,5 GeV (si tratta di un bosone perché un fermione non può decadere producendo due fotoni, che sono bosoni).

Se il nuovo bosone è proprio l'ondella del campo che – secondo il meccanismo di Higgs – dà massa alle altre particelle, allora possiamo rappresentare il Modello Standard aggiornato al 2012 con l'immagine della figura 58.

Qui abbiamo aggiunto alla figura 44 di pagina 149 un disco che sorregge i simboli delle 12 ondelle-forza e delle 12 ondelle-materia, per indicare che esse sono immerse in un campo presente *dappertutto*, con il quale interagiscono continuamente, acquistando così massa.



**Figura 58.** In alto, una rappresentazione del Modello Standard dopo la scoperta del bosone di Higgs, e quindi del campo scalare che rompe la simmetria elettro-debole. Il grafico in basso aiuta a confrontare tra loro le masse delle particelle.

Ma il nuovo bosone scoperto possiede davvero le proprietà previste dal Modello Standard per il bosone di Higgs?

Nella conferenza del luglio 2012 i rappresentanti di ATLAS e di CMS hanno prudentemente dichiarato che i decadimenti misurati sono «compatibili» con quelli attesi per una particella che risponde alle caratteristiche del bosone di Higgs. Infatti le misure della probabilità di produzione e delle probabilità di decadimento riportate da ATLAS e CMS nel luglio 2012 sono ancora grossolane, e in alcuni casi non corrispondono con quelle della tabella 5.

Gli errori di misura sono grandi e ci vorranno anni per determinare le proprietà del nuovo bosone con precisione sufficiente per concludere, in via definitiva, che tutte sono esattamente quelle previste nel quadro del Modello Standard.

Oggi siamo in molti a sperare che a un certo punto si trovi qualche discrepanza con le previsioni della tabella 5, perché ciò vorrebbe dire che l'universo subatomico è più ampio e sfaccettato di come lo descrive il Modello Standard completato con *un solo* bosone di Higgs.

Ma se sarà confermato che la scoperta riguarda proprio un campo scalare che dà massa alle particelle fondamentali, allora potremo dire che essa porta a compimento la fisica iniziata nell'anno 1900, quando lo scienziato tedesco Max Planck ipotizzò che l'energia di un fascio di luce sia trasportata da pacchetti di energia indivisibili, introducendo il concetto di *quanto*. Infatti i quanti di Planck, ondelle

del campo elettromagnetico, sono particelle-forza e quindi bosoni, come i gluoni e gli astenoni. L'ultimo bosone che mancava all'appello del Modello Standard, il bosone di Higgs, è giunto all'appuntamento nel 2012, poco dopo la fine di quello che gli scienziati ricorderanno come «il secolo della fisica».\*

La scoperta definitiva della validità del meccanismo di Higgs aprirà anche la strada, io spero, a un cambiamento lessicale: si diffonderà l'uso del termine compatto «higgson» – che suona come «fermione» e «bosone» – al posto della più ostica dizione «particella di Higgs».

### Supersimmetria e superparticelle

Anche se il bosone di Higgs identificato all'LHC avesse tutte le proprietà previste, i fisici non diranno mai che il Modello Standard è del tutto soddisfacente. Esso non è infatti in grado di spiegare perché le interazioni del campo di Higgs con i campi-materia – che determinano le enormi differenze di massa tra le particelle – siano tanto diverse da un caso all'altro.

Vi sono anche altre ragioni per sostenere che, con questa scoperta, la fisica delle particelle non sia finita.

\* La storia non si fa con i «se», ma non posso fare a meno di rilevare che, se negli anni 1995–1996 il Direttorato del CERN avesse deciso di investire cinquanta milioni di franchi svizzeri nella costruzione di cavità superconduttrici, il LEP avrebbe raggiunto i 220 GeV e il bosone di Higgs da 125 GeV sarebbe stato scoperto nel 2000, proprio allo scadere del secolo della fisica.



Qui descriverò soltanto due di queste ragioni:

1. *Problema della massa*: se si applica la teoria dei campi quantistici al Modello Standard della figura 58, si possono giustificare i valori delle masse delle 24 particelle-forza e particelle-materia, ma al contempo si ottiene un risultato assurdo: *la massa del bosone di Higgs assume un valore enorme*;
2. *Problema della Grande Unificazione*: nei dati raccolti negli anni Novanta al LEP è racchiuso il messaggio che *i 25 campi non sono sufficienti* a descrivere il mondo subatomico se si vuole avere, oltre all'unificazione elettro-debole, anche l'unificazione della forza forte con quella elettro-debole.

Entrambi questi problemi sarebbero risolti se all'LHC venissero osservati nuovi tipi di particelle, ipotizzate da alcuni modelli teorici e così diverse dalle particelle della figura 58 da aver meritato il nome di *superparticelle*.

Vediamo per prima cosa come l'esistenza di questi nuovi corpuscoli risolverebbe il Problema della massa.

Il bosone di Higgs può trasformarsi – per i tempi brevissimi stabiliti dal solito principio di indeterminazione – in una coppia virtuale particella-antiparticella (elettrone-positrone o muone-antimuone o quark-antiquark). Calcolando con la teoria dei campi quantistici tutti questi processi, si trova che la massa della particella di Higgs dovrebbe essere molto, ma molto maggiore dei 125 GeV misurati.

Fin dagli anni Settanta i migliori fisici del mondo hanno cercato di ottenere una previsione più reali-

stica per la massa. La soluzione più soddisfacente è stata trovata nell'ipotesi che esista *una nuova forma di simmetria tra fermioni e bosoni*.

Nella descrizione data sinora, essi appartengono a due mondi diversi: le particelle-materia (i fermioni) sono le sorgenti delle particelle-forza (i bosoni), che creano e assorbono continuamente. I fermioni sembrano determinare l'esistenza dei bosoni: c'è dunque un'evidente mancanza di simmetria.

La *Supersimmetria* – che i fisici chiamano familiarmente SUSY – ipotizza invece che a ogni fermione noto corrisponda un nuovo bosone, e a ogni bosone un nuovo fermione.

Si tratta di un'ipotesi al contempo esigente e potente, perché ha come conseguenza un mondo fisico in cui vi è completa simmetria tra i fermioni (particelle *esclusive*, le cui ondelle occupano ciascuno un proprio stato) e i bosoni (particelle *inclusive*, le cui ondelle si sovrappongono con grande facilità, come avviene per i fotoni dei fasci laser e i bosoni del condensato di Higgs).

Poiché il Modello Standard inquadra in tutto 12 particelle-materia e 12 particelle-forza e un bosone di Higgs, il Modello Supersimmetrico ne prevede dunque altre 24 e inoltre – per essere coerente – richiede addirittura che esistano *ben cinque higgsioni!*

Per queste superparticelle sono stati inventati nuovi nomi: per i bosoni superpartner dei fermioni si aggiunge il prefisso «s», mentre per i fermioni superpartner dei bosoni si modifica la finale in «ino», come riassunto nella tabella 6.

**Tabella 6.** SUSY prevede che a ogni fermione corrisponda un bosone supersimmetrico, e viceversa.

fermioni	bosoni supersimmetrici
quark- <i>u</i> , quark- <i>d</i>	squark- <i>u</i> , squark- <i>d</i>
quark- <i>c</i> , quark- <i>s</i>	squark- <i>c</i> , squark- <i>s</i>
quark- <i>t</i> , quark- <i>b</i>	squark- <i>t</i> , squark- <i>b</i>
elettrone, muone, tauone	selettrone, smuone, stauone

bosoni	fermioni supersimmetrici
higgsone	higgsino
gluone	gluino
fotone	fotino
astenone	astenino
gravitone	gravitino

Sappiamo che le masse delle particelle non superano i 174 GeV del quark-*t*. Le masse delle superparticelle invece sono certamente maggiori di 200 GeV, visto che fino a oggi non se ne è ancora scoperta nessuna. È necessario quindi che anche in SUSY esista un meccanismo di rottura di simmetria alla Higgs, che renda ciascuna superparticella molto più massiva della corrispondente particella.

Grazie alla presenza delle nuove particelle, nel modello supersimmetrico un bosone di Higgs ha molte più possibilità di trasformazione, poiché può creare anche coppie virtuali superparticella-superantiparticella. Se si calcola il contributo alla massa

del bosone di Higgs di questi nuovi processi virtuali, si scopre che esso *compensa esattamente* l'enorme contributo dovuto alle particelle del Modello Standard (purché le masse delle superparticelle non siano maggiori di 1000–2000 GeV): con una cancellazione aritmetica che ha del miracoloso, si ottiene così un valore della massa di  $H^0$  compatibile con i 125 GeV misurati da ATLAS e da CMS.

Un ulteriore vantaggio del modello SUSY è che prevede in modo naturale, anzi necessario, l'esistenza di higgsioni: il meccanismo della rottura della simmetria elettro-debole non va introdotto *ad hoc*, ma nasce dalla teoria stessa senza bisogno di ipotesi aggiuntive.

Ma c'è di più. SUSY prevede non soltanto che esista almeno un bosone di Higgs, ma anche che la massa dell'higgsone più leggero debba essere compresa tra 120 e 130 GeV! Per questo motivo la scoperta del 2012 è da molti considerata una conferma indiretta del modello SUSY.

Se poi la massa superasse i 130 GeV, il vuoto pieno dell'universo sarebbe in uno stato instabile e potrebbe decadere in ogni momento in un altro tipo di vuoto, facendo scomparire ogni forma nota di materia. Ecco perché, dopo la scoperta dell'higgsone da 125 GeV, qualche giornalista ha scritto che «l'universo danza sull'orlo dell'abisso».

Finora nessuna superparticella è stata osservata; la speranza è che qualcuna tra le più leggere possa essere rivelata – attraverso i suoi prodotti di decadimento – dai rivelatori dell'LHC. Tuttavia le prime ricerche, condotte in parallelo con la scoperta del

bosone da 125 GeV, hanno portato soltanto a conclusioni negative. D'altra parte, se si adottano i più semplici modelli SUSY per calcolare la probabilità dei processi di produzione di nuove particelle, le masse degli squarks e del gluino devono essere maggiori di 1000 GeV.

### Gli accoppiamenti dipendono dall'energia scambiata

L'ipotesi della Supersimmetria permette di risolvere anche l'altro problema lasciato aperto dal Modello Standard, quello della Grande Unificazione tra le forze forte, elettromagnetica e debole della figura 59.

Per capire come ciò avvenga, bisogna ricordare che ciascuna forza è caratterizzata dal valore della massa della particella-forza e dal suo accoppiamento, cioè dalla probabilità che essa sia emessa o assorbita dalla particella-materia.

Il punto-chiave è che per ciascuna forza *il valore dell'accoppiamento dipende dall'energia scambiata*. Nella figura 59 abbiamo riportato i valori della tabella 3, che però sono validi soltanto a  $\epsilon = 0,5$  GeV; a energie diverse, gli accoppiamenti cambiano.

Infatti, come abbiamo visto nel capitolo 2, ogni forza ha un «raggio d'influenza»  $R$  legato all'energia  $\epsilon$  del mediatore virtuale dalla relazione  $R = 0,2 / \epsilon$ .

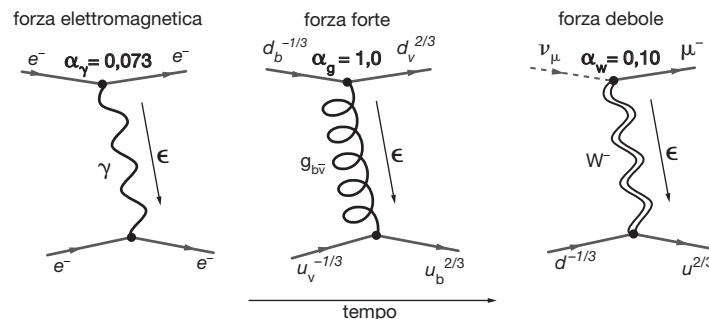
Quanto più energetico è il mediatore virtuale, dunque, tanto più piccolo è il suo raggio di azione e tanto minore la sua distanza dalla particella «sorgente della forza» che l'ha emesso.

Sappiamo già che la forza *forte* diventa più intensa quando la distanza aumenta, perché i gluoni scambiati – che si attraggono, essendo particelle-forza «colorate» – formano quella sorta di elastico che lega i quark e gli antiquark.

Ciò implica che l'accoppiamento di un quark al gluone, che vale  $\alpha_g = 1$  per  $\epsilon = 0,5$  GeV, *diminuisce* al crescere dell'energia scambiata, cioè quando la distanza diminuisce. E infatti al LEP si è misurato per  $\epsilon = 100$  GeV un valore otto volte più piccolo:  $\alpha_g = 0,125$ .

L'opposto accade per la forza *elettromagnetica*, che aumenta con il diminuire della distanza, come illustrato nella figura 60.

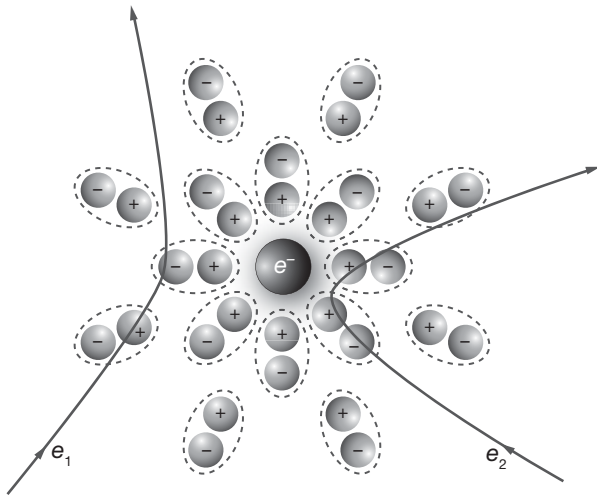
Un elettrone è sempre circondato da coppie virtuali elettrone-positone *polarizzate*, cioè orientate con la carica positiva affacciata verso la carica negativa



**Figura 59.** Le tre forze fondamentali: ai diagrammi della figura 40 qui abbiamo aggiunto i valori degli accoppiamenti che sono validi per energia scambiata  $\epsilon = 0,5$  GeV.

dell'elettrone-sorgente. Di conseguenza, un secondo elettrone che passa lontano risente di una forza repulsiva ridotta, perché la carica dell'elettrone centrale è schermata dalla polarizzazione delle coppie virtuali. Se invece il secondo elettrone passa vicino, sarà più deflesso perché un minore numero di coppie schermo la carica negativa dell'elettrone-sorgente.

Con i rivelatori del LEP si è misurato che l'accoppiamento elettromagnetico  $\alpha_{\gamma}$ , che vale 0,0073 a 0,5 GeV, *aumenta gradualmente* al crescere dell'energia, diventando  $\alpha_{\gamma} = 0,0078$  quando l'energia scambiata è  $\epsilon = 100$  GeV.



**Figura 60.** La forza che si esercita su una carica che passa vicino all'elettrone è meno schermata – e quindi maggiore – della forza subita da una carica che passa lontano.

## La Grande Unificazione

Dunque al crescere dell'energia l'accoppiamento forte diminuisce, mentre quello elettromagnetico aumenta: la forza forte diventa *più flebile*, quella elettromagnetica *più intensa*.

E che cosa accade all'accoppiamento *debole* al variare dell'energia?

I dati raccolti al LEP negli anni Novanta hanno confermato, con molta più accuratezza, ciò che già si sapeva da misure fatte negli acceleratori precedenti: fino all'energia  $\epsilon = 100$  GeV l'accoppiamento debole *diminuisce* al crescere dell'energia, come l'accoppiamento forte.

I dati sperimentali sono riportati nella banda grigia a sinistra nella figura 61. In questa figura l'asse verticale riporta l'*inverso* dell'accoppiamento (perché così le curve risultano quasi rettilinee): valori numerici piccoli indicano perciò un grande accoppiamento, cioè una forza più intensa.

La scala orizzontale è logaritmica: a ogni tacca l'energia aumenta di un fattore 100. I valori degli accoppiamenti a energie maggiori di 100 GeV sono calcolati applicando la teoria dei campi quantistici e usando i valori misurati delle masse di tutte le particelle e antiparticelle (infatti abbiamo visto che sono proprio le coppie virtuali particella-antiparticella a far sí che gli accoppiamenti varino con l'energia scambiata).

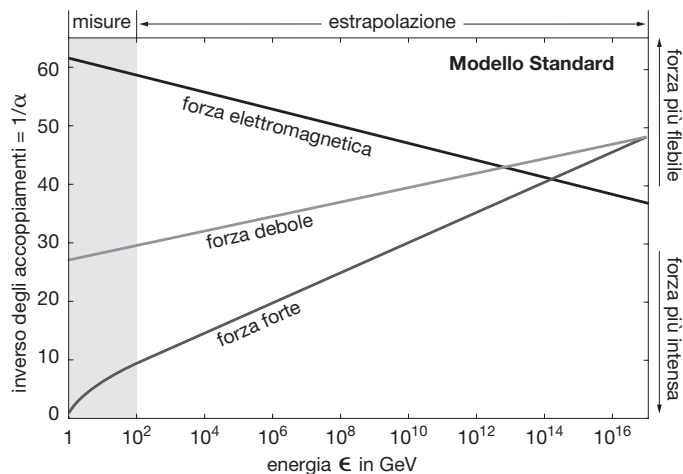
Come si vede dal grafico, gli accoppiamenti delle tre forze tendono a convergere ma «mancano il ber-

saglio»: intorno ai  $10^{15}$  GeV sono quasi uguali, ma le tre curve *non* passano per uno stesso punto.

Nel quadro del Modello Standard, dunque, a nessuna energia le tre forze fondamentali hanno la stessa intensità: la «Grande Unificazione» non è valida.

Un punto di unificazione «elettro-forte» si può trovare invece nell'ipotesi che valga la Supersimmetria (tenendo quindi conto, nel calcolo dell'andamento degli accoppiamenti, anche della creazione virtuale di superparticelle e di anti-superparticelle).

La figura 62 mostra gli accoppiamenti che ho calcolato nel 1991 con il collega Wim de Boer e il laureando Hermann Furstenau.

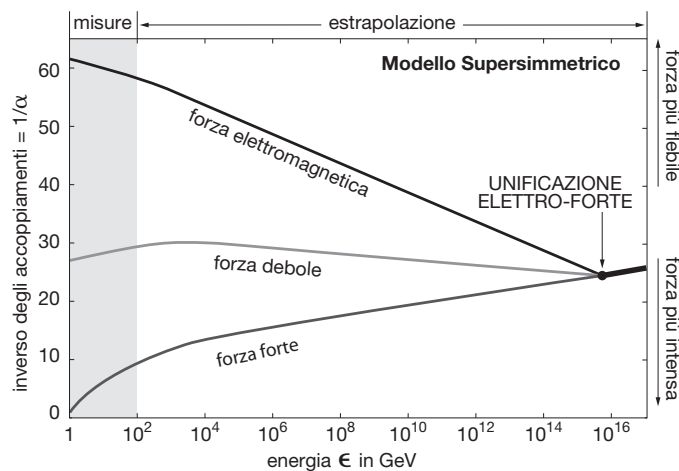


**Figura 61.** Gli inversi degli accoppiamenti alle particelle-materia delle tre forze fondamentali in funzione dell'energia della particella-forza, secondo il Modello Standard.

Nelle equazioni ricavate dalla teoria quantistica dei campi, assegnammo alle masse delle particelle supersimmetriche valori tali da ottenere la convergenza dei tre accoppiamenti in un solo punto. Stabilimmo così che le masse di queste superparticelle devono essere comprese all'incirca tra 300 GeV e 3000 GeV.

Il nuovo grafico mostra che nell'intorno dei 1000 GeV le tre curve cambiano pendenza – a causa dei processi virtuali nei quali compaiono e scompaiono anche le particelle e le antiparticelle supersimmetriche – e ciò produce un punto di unificazione delle forze.

Come osservammo all'epoca, questa convergenza *non dimostra* la validità della teoria della Supersim-



**Figura 62.** La figura è del tutto analoga alla precedente, ma qui si è fatta l'ipotesi che esistano anche le particelle supersimmetriche, con masse comprese tra 300 e 3000 GeV.

metria: è però una chiara indicazione della *plausibilità* di questa ipotesi elegante e rivoluzionaria, che è suggerita da molti altri ragionamenti indipendenti e porta all'*unificazione elettro-forte*.

Negli anni successivi il nostro approccio è stato migliorato, e spesso complicato, ma la sostanza non è cambiata: senza nuove particelle e antiparticelle di energia maggiore di qualche centinaio di GeV – oppure senza nuovi ingredienti da aggiungere al Modello Standard – non si può ottenere l'unificazione elettro-forte. SUSY oggi è la teoria più soddisfacente in grado di produrre questo grande risultato.

Il nostro lavoro sulla plausibilità della Supersimmetria ebbe molta risonanza e nel 2004 – quando il CERN compì 50 anni – faceva parte della Top Ten degli articoli più citati tra i circa diecimila pubblicati.

Nel suo libro *Le immagini della scienza* (Mondadori 2009) l'astrofisico inglese John Barrow ha riprodotto i due grafici della nostra pubblicazione, simili alle figure 61 e 62, e ha scritto:

La convergenza [dei tre accoppiamenti] suggerisce che l'unificazione esista effettivamente e ha portato allo studio della storia dell'universo primordiale, a una spiegazione dell'attuale prevalenza della materia sull'antimateria al suo interno e alla ricerca del modo corretto per includere la gravità nello schema di unificazione. È un simbolo semplice della profonda unità dell'universo a fronte di una superficiale diversità, che è poi ciò che intendiamo per bellezza.

Dopo la ricerca del campo di Higgs, la caccia alle particelle supersimmetriche è il secondo punto foca-

le della sperimentazione all'LHC. L'energia che sarà disponibile nei prossimi anni nelle collisioni protone-protone permetterà infatti di produrre particelle e superparticelle con massa fino a 2000–3000 GeV.

Nonostante le analisi più accurate, non si è trovata alcuna traccia di superparticelle nei dati raccolti all'LHC fino al 2012. Ciò sembra escludere i modelli più semplici di Supersimmetria, ma i fisici teorici hanno ideato modelli più complessi che sono compatibili con l'assenza di segnale alle energie ottenute finora, e portano comunque alla Grande Unificazione.

In ogni caso, qualora la Supersimmetria venisse confermata da risultati sperimentali, la convergenza delle tre curve della figura 62 rappresenterà la più convincente manifestazione della Grande Unificazione elettro-forte: se ne potrà concludere che, a energie scambiate di  $10^{15}$ – $10^{16}$  GeV, le forze forte, elettromagnetica e debole sono aspetti diversi di un'unica forza, definita da un solo accoppiamento.

## Le stringhe

Una teoria supersimmetrica delle particelle e delle forze fondamentali è esteticamente attraente, prevede l'esistenza del campo di Higgs, risolve in modo naturale il problema della massa delle sue ondelle e conduce all'unificazione elettro-forte. Eppure si tratta ancora di un'unificazione parziale. Manca infatti all'appello la quarta forza che agisce in natura: la forza gravitazionale.

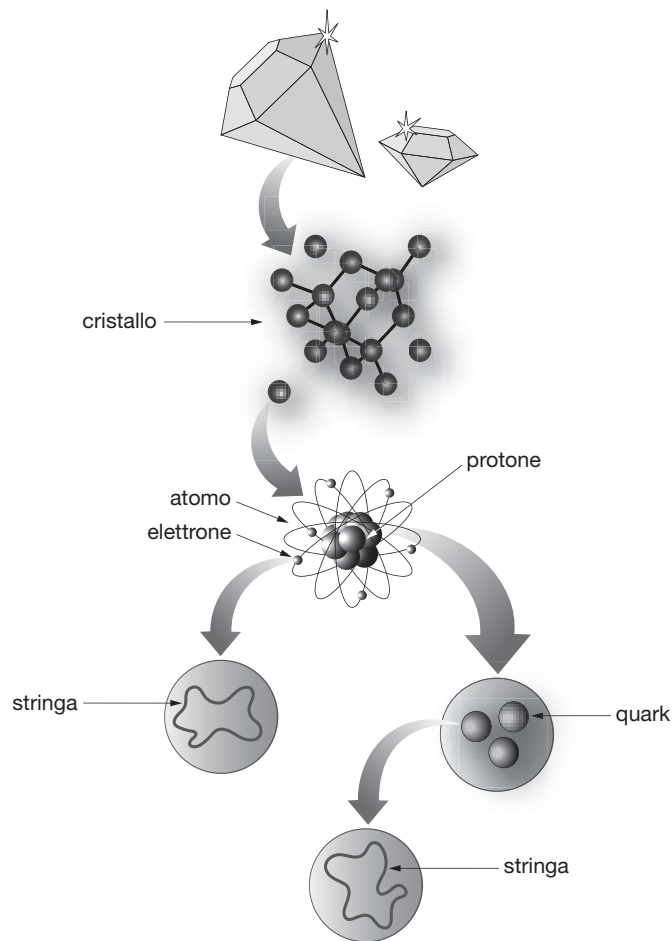
Un'ulteriore unificazione sarà enormemente ardua, perché è molto difficile far coesistere la teoria quantistica, che è alla base del Modello Standard, con la teoria della relatività generale di Einstein, che spiega la gravità come effetto della curvatura dello spazio-tempo; per farlo, occorrerà cambiare qualcuno dei loro ingredienti fondamentali. A questo riguardo i fisici matematici hanno formulato molte proposte, ma fino a oggi nessuna è del tutto convincente.

Accennerò soltanto alla costruzione teorica che ha goduto di maggiore credito negli ultimi trent'anni, in attesa di future conferme o smentite sperimentali. Si tratta della «teoria delle corde quantistiche», detta comunemente *teoria delle stringhe* per assonanza con la parola inglese *string*, «corda».

Se nel Modello Standard le particelle sono considerate puntiformi, questa teoria le vede invece come infinitesimi *anellini*, capaci di vibrare in modi diversi, così come una corda di chitarra può emettere note diverse a seconda della sua lunghezza. Ogni modo di oscillazione appare come una particella differente: in un caso un elettrone, in un altro un quark, come indicato nella figura 63.

Nella teoria a cui i fisici teorici hanno dedicato più attenzione, le stringhe non sono strutture dello spazio a tre dimensioni che ben conosciamo. Esse abitano invece uno spazio molto più ricco di possibilità, in quanto ha *dieci dimensioni spaziali* oltre alla dimensione temporale.

Secondo la teoria, le sette dimensioni che non cadono sotto i nostri sensi sarebbero «accartocciate»



**Figura 63.** Dai cristalli alle stringhe, qui rappresentate come minuscole corde che vibrano nello spazio tridimensionale ordinario; la teoria delle stringhe è però formulata in uno spazio a dieci dimensioni.

su se stesse in ogni punto dello spazio, tanto da non essere rivelabili neanche alle più piccole distanze che possiamo esplorare con i più potenti acceleratori.

Nell'usuale spazio tridimensionale le stringhe hanno dimensioni dell'ordine della *lunghezza di Planck*, la più piccola distanza che si ottiene «mescolando» i parametri fondamentali della teoria quantistica dei campi (la velocità della luce  $c$  e la costante di Planck  $h$ ) e della teoria della gravitazione universale (la costante gravitazionale  $G$ ):

$$\text{lunghezza di Planck} = \sqrt{h G/c^3} = 1,6 \cdot 10^{-35} \text{ metri.}$$

Dato il valore minuscolo della lunghezza di Planck, non meraviglia che le stringhe appaiano puntiformi se rapportate alle dimensioni di un protone, che è cento miliardi di miliardi di volte più grande.

La teoria delle stringhe è molto generale e non è possibile ricavarne in modo univoco il Modello Standard, con le sue specifiche particelle e forze (anche se il Modello Standard può essere inquadrato in una opportuna teoria delle stringhe).

Ma le teorie delle stringhe, nella loro generalità, godono di una proprietà importantissima: ciascuna delle loro «particelle» *deve avere* la propria «superparticella». In altre parole, si tratta di teorie *intrinsecamente* supersimmetriche.

È però improbabile che si possa mettere questo tipo di teorie alla prova sperimentale in modo *diretto*, poiché le dimensioni in gioco sono molto più piccole della risoluzione spaziale ottenibile perfino all'LHC (che raggiunge «soltanto» i  $10^{-19}$  m, come indicato

nella figura 30 di pagina 111). Oggi non è possibile nemmeno immaginare acceleratori così potenti da raggiungere una risoluzione di  $10^{-35}$  m, ben 16 ordini di grandezza più spinti dei limiti attuali. Ovviamente non è escluso che in qualche modo si possano ottenere – magari tra molti anni – conferme *indirette*.

Dunque le prospettive sperimentali sono evanescenti, e inoltre il numero delle possibili teorie delle stringhe si moltiplica di anno in anno. Ciò ha fatto nascere tra i fisici un movimento di opinione molto critico che include anche Lee Smolin, uno dei costruttori della teoria. La polemica ha scosso il mondo della fisica delle particelle e ha dato fiato a diverse teorie alternative preesistenti. Tuttavia, come molti colleghi, io sono ancora convinto che le stringhe, nonostante le difficoltà e le molte indeterminazioni, restino il candidato più valido nella ricerca dell'unificazione della forza elettro-forte con la forza gravitazionale.

Voglio sottolineare comunque che la natura potrebbe essere supersimmetrica anche senza che le particelle siano infinitesime corde vibranti. Ed è proprio l'eventuale conferma – oppure la confutazione – della teoria supersimmetrica delle particelle a costituire l'attuale frontiera della fisica fondamentale.

Molti fisici pensano che, dopo aver scoperto la particella di Higgs, l'LHC darà inizio alla fisica sperimentale del ventunesimo secolo rivelando almeno la più leggera tra le ipotetiche superparticelle, la particella neutra chiamata *neutralino*. Come vedremo nell'Epilogo, questa superparticella potrebbe avere anche un ruolo molto importante per la stabilità delle galassie.