

LA SCOPERTA DEL BOSONE DI HIGGS

MARCO FRATERNALI (*)

Nota presentata dal m.e. Ferdinando Borsa
(Adunanza del 23 maggio 2013)

SUNTO. – Nel Luglio del 2012 i due esperimenti ATLAS e CMS, operanti ad LHC, l'anello di collisione protone-protone del CERN, hanno annunciato la scoperta di una nuova particella, compatibile con le caratteristiche previste per il bosone di Higgs. Questa osservazione conferma un ingrediente cruciale del Modello Standard delle particelle elementari: l'esistenza di un campo, che pervade l'Universo, attraverso il quale i costituenti elementari della materia acquisiscono la loro massa. In questo contributo ai Rendiconti viene descritta la sfida sperimentale che è stato necessario affrontare per giungere a questo risultato, e che ha comportato la costruzione dell'acceleratore di particelle più potente e dei rivelatori più complessi mai realizzati. Infine, vengono brevemente discussi la natura e il ruolo del CERN, dove è avvenuta la sperimentazione, e il significato e l'impatto sulla società della ricerca fondamentale.

ABSTRACT. – In July 2012, the two experiments ATLAS and CMS, operating at the CERN proton-proton collider LHC, announced the discovery of a new particle consistent with the Higgs boson. This observation confirms a key prediction of the Standard Model of particle physics, that the Universe is pervaded by a field which conveys mass to the elementary constituents of matter. This paper reviews the experimental effort which led to such a result, and the challenges that had to be overcome during the conception and construction of LHC and its experiments, the most powerful accelerator and the most complex detectors ever built. Finally, the nature and role of CERN and the meaning and impact of fundamental research are briefly discussed.

(*) Dipartimento di Fisica, Università degli Studi di Pavia. Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Pavia, Italy.
E-mail: marco.fraternali@unipv.it

Il 4 luglio del 2012 veniva annunciata al CERN, da parte dei fisici dei due esperimenti ATLAS e CMS operanti all'acceleratore LHC, la scoperta di una nuova particella dalle caratteristiche compatibili con quelle del bosone di Higgs, il tassello mancante per completare la teoria del mondo subatomico nota come Modello Standard.

Questo particella è stata a lungo l'oggetto più elusivo tra tutti gli ingredienti del Modello. La sua importanza risiede nel fatto che, oltre a dare coerenza matematica alla teoria, essa fornisce la spiegazione dell'esistenza di costituenti fondamentali dotati di massa. Infatti, attraverso il meccanismo di Higgs, i costituenti elementari del mondo subatomico interagiscono con il campo di Higgs (del quale la particella è la manifestazione) e vengono diversamente "frenati", acquisendo così una massa che in assenza del campo, secondo la teoria, dovrebbe essere nulla per tutti; fatto questo ovviamente contrario all'evidenza sperimentale.

Si spiega dunque l'estremo interesse e l'eccitazione suscitati nei fisici da questo annuncio. Ma anche al di fuori dell'ambiente degli addetti ai lavori la scoperta ha attirato su di sé l'attenzione mediatica mondiale.

La teoria del mondo subatomico- il Modello Standard- e la natura e il ruolo del bosone di Higgs sono stati ampiamente discussi in un altro contributo a questi Rendiconti [1].

In questo scritto l'attenzione viene posta sulla sfida sperimentale che è stato necessario affrontare per giungere alla rivelazione della nuova particella. Si può certamente affermare, infatti, che l'insieme dell'acceleratore, dei rivelatori, e degli strumenti di elaborazione dei dati sviluppati a questo fine costituiscono una delle imprese scientifiche e tecnologiche più grandi e complesse mai realizzate.

Nel seguito verranno descritte le caratteristiche principali di questi strumenti, e si cercherà di spiegare come gli sperimentatori siano arrivati al risultato, e quali difficoltà abbiano dovuto affrontare. Infine verrà brevemente descritto il CERN, dove l'esperimento è stato condotto, con alcune considerazioni sull'impatto e il significato delle ricerche che vi si svolgono.

L'ACCELERATORE: LHC, IL LARGE HADRON COLLIDER

Come è stato discusso in [1], dalla relazione di Einstein $E=mc^2$ consegue che in un urto di particelle i prodotti finali possano avere una massa maggiore delle particelle iniziali, se queste sono dotate di suffi-

ciente energia, che può essere trasformata in massa. È possibile in questo modo creare in laboratorio oggetti che sono espressione di meccanismi fondamentali della Natura.

Le particelle che abbiamo a disposizione per essere accelerate, e dunque acquisire energia, devono essere cariche e stabili. Infatti l'accelerazione avviene attraverso l'azione, prolungata nel tempo, di un campo elettrico. Le particelle utili a questo fine sono essenzialmente elettroni oppure protoni, assieme alle loro antiparticelle.

Esistono diversi tipi di acceleratori. In un sincrotrone -la categoria di acceleratori alla quale appartiene LHC- le particelle vengono fatte passare ripetutamente attraverso la zona di accelerazione, dove è intrappolato un campo elettrico oscillante che esse "cavalcano" un po' come un surfer sulla cresta dell'onda. A ogni passaggio si verifica un incremento di energia. Occorre quindi che le particelle seguano una traiettoria chiusa; per ottenerla, vengono guidate da un campo magnetico, fornito da elettromagneti in cui una corrente elettrica genera il campo che provvede a produrre la forza necessaria per mantenerle in orbita.

All'aumentare dell'energia, fissato il raggio dell'orbita, è necessario aumentare l'intensità del campo magnetico, sincronizzando la sua azione -assieme a quella del campo elettrico- con il passaggio delle particelle (da qui il nome sincrotrone). Fissata, invece, la massima intensità ottenibile per il campo magnetico, per raggiungere energie più elevate si deve aumentare il raggio dell'orbita, e quindi le dimensioni dell'acceleratore.

LHC, inoltre, è un anello di collisione. In questo tipo di macchina due fasci di particelle ruotanti in senso opposto vengono indirizzati a urtare uno contro l'altro: in tal modo l'energia che può essere utilmente sfruttata nella collisione è molto maggiore di quella liberata nell'urto contro un bersaglio fisso.

Oltre all'energia, un altro parametro di importanza fondamentale è l'intensità dei fasci. Infatti i prodotti dell'urto cercati, che corrispondono a fenomeni interessanti, sono il più delle volte estremamente rari: possono aver luogo anche soltanto una volta su molti miliardi di interazioni. Occorre quindi che i fasci siano molto intensi, costituiti da centinaia di migliaia di miliardi di particelle.

Per quanto riguarda il tipo di "proiettile", gli elettroni hanno il vantaggio di essere oggetti elementari, privi di sottostruttura: di conseguenza la configurazione delle particelle prodotte nella collisione è relativamente semplice, con una energia iniziale dell'urto perfettamente

definita. Questo consente di eseguire misure di estrema precisione. I protoni invece non sono elementari, essendo costituiti da quark e gluoni, che si spartiscono quote variabili di energia/impulso al loro interno. Ne risulta da un lato la possibilità di esplorare un vasto spettro di energie (e quindi masse) prodotte nell'urto dei sub- costituenti elementari; dall'altro canto però lo scontro produce configurazioni estremamente complesse, che possono includere diverse centinaia di particelle. Inoltre durante un'orbita chiusa le particelle cariche perdono energia emettendo una radiazione elettromagnetica (detta radiazione di sincrotrone). Questo fenomeno è molto più accentuato negli elettroni, e trascurabile nei protoni; perciò con i protoni è possibile raggiungere energie dei fasci più elevate. Acceleratori con protoni ed elettroni sono pertanto macchine complementari; i protoni sono maggiormente adatti a una prima esplorazione di nuove frontiere di energia.

Quando, negli anni '80 del secolo scorso, divenne chiaro che occorreva costruire nuovi acceleratori capaci di raggiungere energie più elevate di quelle che avevano consentito la scoperta di molte delle particelle sub-nucleari nell'ambito del Modello Standard, la scelta cadde quindi su un anello di collisione protone- protone. L'energia raggiunta dall'acceleratore doveva essere circa un ordine di grandezza maggiore di quella fornita dagli acceleratori a protoni esistenti, per consentire l'esplorazione di una regione di massa in cui nuove particelle, e in particolare il bosone di Higgs, avrebbero potuto essere prodotte, sulla base di considerazioni dettate da ragionevoli estrapolazioni della teoria.

Inoltre, diversamente dagli anelli di collisione della generazione precedente, nei quali si realizza la collisione di un fascio di protoni e un fascio di antiprotoni, la nuova macchina doveva far collidere due fasci di protoni. Nel primo caso infatti i due fasci, essendo di carica opposta, possono essere guidati nell'orbita da un unico sistema di magneti; tuttavia il fascio di antiprotoni è molto meno intenso di quello dei protoni, limitando così fortemente il potenziale di scoperta di eventi rari. Il prezzo da pagare per far circolare due fasci di protoni della stessa carica elettrica in verso opposto è quello di dover duplicare il sistema di magneti che li tengono in orbita.

Al CERN venne dunque progettato LHC, acronimo di Large Hadron Collider, un grande acceleratore in grado di far collidere fasci di protoni (che risentono dell'interazione forte, da cui il nome adroni) ed anche ioni di atomi pesanti, come il piombo. Il progetto prevedeva di raggiungere una energia di 7 TeV per ciascun fascio di protoni, cioè 7000

miliardi di elettronvolt. L'elettronvolt (eV) è l'unità di misura usata per l'energia, e corrisponde all'energia che una particella di carica unitaria come quella dell'elettrone acquista nel campo elettrico corrispondente alla differenza di potenziale di 1 volt (una comune pila stilo, quindi, darebbe a un elettrone o un protone l'energia di 1.5 eV).

La frequenza delle collisioni protone-protone doveva essere di 800 milioni al secondo, circa 100 volte maggiore di quella raggiunta negli acceleratori della generazione precedente.

Per limitare le opere di ingegneria civile venne proposto di costruire LHC nel tunnel sotterraneo che ospitava un altro acceleratore, il LEP, che faceva collidere elettroni e positroni. Essendo dunque il raggio del tunnel fissato, per mantenere i protoni in orbita alle energie di progetto era necessario generare campi magnetici di intensità di 8.5 tesla (circa 170000 volte il campo magnetico terrestre). Per ottenere l'intensità di corrente necessaria a sviluppare questo campo si deve ricorrere al fenomeno della superconduttività, per il quale in alcuni materiali conduttori, mantenuti a una temperatura di pochi gradi kelvin al di sopra dello zero assoluto (corrispondente a -273°C), la resistenza elettrica al passaggio della corrente viene annullata, eliminando così la produzione di calore che limita l'intensità di corrente raggiungibile in condizioni normali.

La realizzazione di un sistema di magneti superconduttori su una scala di grandezza, e con parametri di operazione, mai tentata prima era dunque la sfida principale, anche se non l'unica, per la realizzazione della nuova macchina.

LHC venne approvato nel 1994 e la sua costruzione iniziò nel 1998.

Un progetto per costruire un acceleratore analogo, ancora più potente, negli Stati Uniti (SSC, Superconducting SuperCollider) era stato fermato nel 1993, lasciando così il CERN come l'unico laboratorio al mondo in grado di intraprendere l'esplorazione della nuova frontiera di energia.

I primi fasci di LHC vennero fatti circolare nel 2008 e, dopo un incidente che ne ha ritardato le operazioni, l'acceleratore è entrato pienamente in funzione nel 2009, con una energia dei fasci ancora inferiore a quella di progetto di 7 TeV per fascio, prima di 3.5 TeV, e successivamente di 4 TeV: valori comunque di gran lunga superiori a quelli raggiunti dagli altri acceleratori esistenti. Attualmente (marzo 2015) LHC sta riprendendo le operazioni, dopo una pausa di due anni per revisionare la macchina, con fasci di energia accresciuta a 6.5 TeV ciascuno.

LHC è l'ultimo stadio sul percorso dei protoni di un complesso di acceleratori che si trovano alle porte di Ginevra, a cavallo del confine tra la Svizzera e la Francia (*Fig. 1*). Dopo alcune fasi iniziali di accelerazione, i protoni passano per il PS e l'SPS, due acceleratori –di dimensioni progressivamente crescenti– che nella loro storia hanno prodotto, e in alcuni casi continuano a fornire, importantissimi risultati sperimentali (con l'SPS sono stati scoperti ad esempio i bosoni intermedi W e Z dell'interazione debole). Lasciando l'SPS con l'energia di 0.450 TeV, i protoni entrano nel tunnel di LHC, scavato nel sottosuolo alla profondità media di 100 metri. Qui, nella configurazione di progetto, vengono accelerati fino all'energia di 7 TeV per fascio, e fatti collidere in quattro punti dove sono posti i rivelatori che studiano i prodotti dell'interazione. Alla fine della fase di accelerazione le particelle viaggiano a una velocità pari al 99.9999991% di quella della luce.



*Fig. 1 – Il complesso degli acceleratori del CERN.
L'anello più grande (sotterraneo) rappresenta LHC.*

L'elemento più importante della macchina, che provvede alla guida dei fasci, è il dipolo magnetico: esso ospita, in un'unica struttura, il sistema magnetico necessario a far circolare i protoni, all'interno di due camere a vuoto, in direzioni contrapposte (*Fig. 2*). Per ottenere il campo magnetico di 8.5 tesla, negli speciali cavi conduttori di titanio-niobio,

composti da sottili filamenti spessi 6 millesimi di millimetro per una lunghezza totale di più di un miliardo di chilometri, scorre una corrente di 12000 ampere (per confronto, in un comune appartamento la corrente è di qualche decina di ampere). Per consentire questa intensità di corrente i cavi devono essere raffreddati a 1.9 gradi kelvin, una temperatura più bassa di quella esistente nel vuoto intergalattico. Queste condizioni sono ottenute portando i magneti a contatto con 130 tonnellate di elio, che a questa temperatura si trova allo stato liquido ed ha particolari proprietà che lo rendono estremamente efficace nel dissipare il calore.



Fig. 2 – L'interno di LHC. Sono visibili i tubi a vuoto (al centro) circondati dai magneti.

Durante il ciclo di raffreddamento ciascuno dei 1232 dipoli (un terzo dei quali sono stati forniti dall'industria italiana), lungo circa 15 metri e pesante 35 tonnellate, deve mantenere, nonostante la contrazione causata dalla diminuzione di temperatura, una accuratezza di posizionamento entro il decimo di millimetro.

La superficie raffreddata è di 40 000 m², per una massa di 37 000 tonnellate.

In totale, il sistema magnetico comprende più di 9000 magneti, per curvare, focalizzare e gestire i fasci di protoni. La sua realizzazione è stata la parte più costosa e difficile di tutto il progetto.

I fasci sono organizzati in 2808 "pacchetti" contenenti ciascuno

100 miliardi di protoni, e si incrociano nelle quattro zone di interazione una volta ogni 25 miliardesimi di secondo. Durante la fase di accelerazione, che si protrae per circa 20 minuti, i protoni passano per 11 000 volte al secondo attraverso 8 dispositivi, dette cavità acceleratrici, ciascuna in grado di erogare 2 milioni di volt.

L'energia finale di ciascun protone, di 7 TeV, è molto piccola su scala macroscopica, data la sua piccolissima massa: corrisponde circa all'energia sviluppata da un insetto in volo. Tuttavia, essa è concentrata in una regione di dimensioni circa mille miliardi di volte inferiore: di conseguenza, la temperatura equivalente sviluppata negli urti è 100000 volte più alta di quella esistente all'interno del Sole.

Anche se l'energia di un singolo protone è quasi insignificante in termini macroscopici, l'insieme dei circa 300000 miliardi di protoni distribuiti in ciascun fascio trasporta una energia pari a 360 milioni di joule, come quella di un treno di 400 tonnellate lanciato a 150 km/h. La gestione e la distruzione dei fasci, una volta terminato la loro vita nell'acceleratore, costituisce quindi un problema non indifferente che i progettisti hanno dovuto affrontare.

I protoni viaggiano all'interno di tubi entro i quali, per limitare il più possibile l'urto contro molecole di gas che tendono a distruggere i fasci (i quali restano in circolazione per circa 10-20 ore) viene ottenuto un vuoto di 10^{-13} atmosfere, come quello esistente a una quota di 1000 chilometri di altezza. Il sistema di pompaggio deve estrarre il gas da un volume di 9000 metri cubi, pari a quello di una cattedrale.

Da questi numeri si può capire come tutto, in LHC, è portato a condizioni estreme. La sfida per costruire l'acceleratore ha richiesto un grande impegno organizzativo, il superamento di difficoltà tecniche e finanziarie, e decisioni talvolta difficili nella gestione del programma scientifico del CERN [2,3].

Ma gli sforzi sono stati premiati dalla realizzazione di questo gioiello tecnologico, la macchina più grande e complessa mai concepita.

I RIVELATORI DI PARTICELLE

Nei punti in cui si incrociano i fasci vengono posti dei rivelatori in grado di raccogliere la massima informazione possibile sul prodotto delle collisioni dei protoni, che nel linguaggio dei fisici viene denominato evento.

Ad LHC i fasci si incrociano in quattro zone, dove sono posti i rivelatori. Due di essi sono stati progettati per studiare ogni tipo di prodotto delle collisioni, mentre gli altri sono ottimizzati per obiettivi più specifici. Questi due rivelatori, chiamati ATLAS e CMS, sono i più grandi e complessi mai costruiti, e sono quelli che hanno annunciato la rivelazione del bosone di Higgs.

La Fig. 3 mostra lo schema dell'apparato di rivelazione dell'esperimento ATLAS, il più grande. È lungo 45 metri, con un diametro di 25 metri, e pesa circa 7000 tonnellate. CMS è più compatto, ma ancora più massiccio, con un peso totale di 13000 tonnellate.



Fig. 3 – L'apparato di rivelazione di ATLAS.

Questi giganteschi rivelatori, come si può capire dalla figura, sono composti da moltissimi strumenti diversi, ciascuno con un compito specifico. Nonostante la grande complessità, molte parti devono essere posizionate con precisione submillimetrica.

La struttura generale in un apparato di questo tipo è quella di una “cipolla cilindrica” composta da strati successivi di sottorivelatori. I fasci, diretti lungo l'asse del cilindro, si scontrano al centro. Tra le particelle prodotte nell'urto, molte (come il bosone di Higgs) si disintegrano (decadono) immediatamente in altre particelle. Quelle che vivono un tempo abbastanza lungo, nell'attraversare il rivelatore rilasciano un segnale che, opportunamente elaborato, consente di misurarne determinate caratteristiche, allo scopo di identificare la loro

natura. Occorre riconoscere un numero limitato di particelle note; dalla misura delle loro proprietà si risale a identificare quelle che si sono immediatamente disintegrate.

Una particella prodotta nell'urto incontra prima il rivelatore centrale, che deve tracciarne il percorso con estrema precisione. Qui la componente principale è costituita da tasselli o microstrisce di silicio che forniscono una risoluzione spaziale di poche decine di millesimi di millimetro. Nei due strati successivi alcune particelle interagiscono con un materiale molto denso, fino ad essere completamente assorbite, generando così, nella parte sensibile del rivelatore, un segnale proporzionale alla loro energia. Lo strato più interno, detto calorimetro elettromagnetico, misura l'energia di elettroni e fotoni; quello successivo, il calorimetro adronico, l'energia di particelle soggette all'interazione forte, come i protoni o i neutroni.

Lo strato più esterno dell'apparato rivela il percorso dei muoni, particelle della famiglia degli elettroni ma di massa maggiore, che, essendo molto penetranti, non vengono arrestati nel denso materiale fin qui attraversato.

Sul percorso delle particelle agisce un campo magnetico, prodotto da potentissimi elettromagneti: dal modo in cui la traiettoria di una particella carica viene curvata è possibile ottenere importanti informazioni sulle sue caratteristiche e proprietà.

L'apparato deve coprire quanto più possibile la regione di interazione, ed essere finemente segmentato, per poter ricostruire la configurazione della grande quantità di particelle prodotte.

Entro questo schema generale, ciascun esperimento adotta delle soluzioni specifiche, sia nella scelta del campo magnetico, che può essere solenoidale (parallelo alla direzione dei fasci) o toroidale (perpendicolare alla direzione dei fasci), sia nel modo in cui i sottorivelatori vengono realizzati (*Figg. 4-10*).

Ad LHC i rivelatori devono operare in condizioni estremamente difficili, mai incontrate prima. Ad ogni incrocio dei pacchetti di protoni possono emergere anche un migliaio di particelle, dotate di grande energia media. Ciò determina le dimensioni e la complessità degli apparati, ciascuno dei quali comprende decine di milioni di canali di elettronica, perfettamente sincronizzati per separare i diversi eventi che emergono dalle interazioni ogni 25 miliardesimi di secondo. In ciascun apparato le connessioni sono costituite da più di 50 000 cavi, per una lunghezza totale di 3000 chilometri. L'enorme flusso di particelle causa

inoltre un alto livello di radiazione, in cui gli strumenti devono operare per molti anni senza venirne deteriorati.

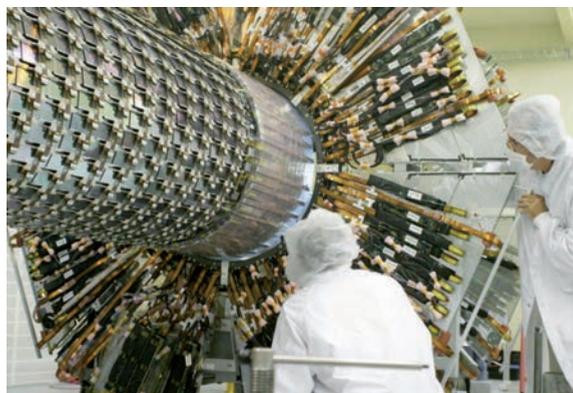


Fig. 4 – Il primo strato del rivelatore interno di ATLAS.

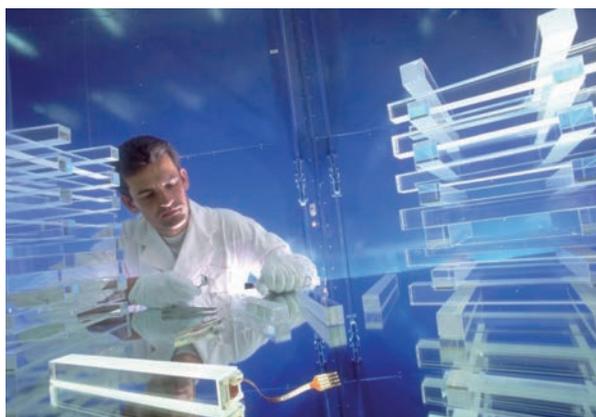


Fig. 5 – I cristalli di tungstato di piombo del calorimetro elettromagnetico di CMS.

Per far fronte a queste condizioni, è stato necessario portare al limite le tecnologie esistenti nella concezione dei rivelatori, e inventarne di nuove.

La costruzione si è svolta nell'arco di 10 anni, preceduti da un lungo periodo di progettazione e test di prototipi, ad opera di collaborazioni di dimensioni senza precedenti: più di 3000 tra fisici e ingegneri, appartenenti a circa 180 università e laboratori disseminate in circa 40

nazioni hanno lavorato in ciascuno dei due esperimenti per realizzare il progetto.

Anche la gestione del flusso dei dati ha posto problemi inediti.

In ogni apparato, i 40 MHz di dati prodotti inizialmente dai 100 milioni di canali di elettronica devono dapprima essere ridotti, mediante un processo di selezione, a 0.5 kHz -un fattore di circa 100 000- prima di essere registrati per la successiva analisi (non sarebbe infatti concepibile immagazzinarli tutti in memoria). Anche così facendo, l'informazione di questi eventi potenzialmente interessanti ammonta a qualche milione di gigabyte per anno.

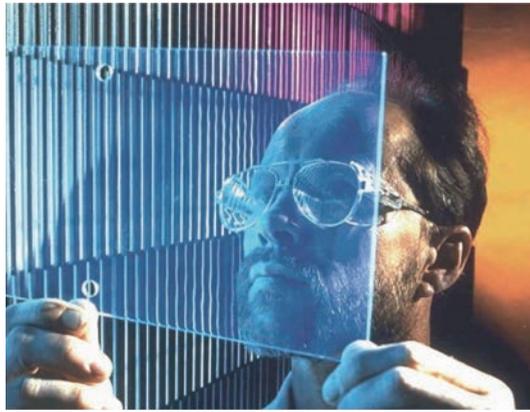


Fig. 6 – Le lastre di scintillatore nell'assorbitore in ferro del calorimetro adronico di ATLAS.



Fig. 7 – Il magnete solenoidale di CMS.

Per poterli elaborare è stata sviluppata la GRID, un sistema di calcolo distribuito che mette insieme la potenza di decine di migliaia di computer in una rete estesa a più di 140 istituti in 35 nazioni, alla quale gli utenti possono accedere da qualunque punto nel mondo.

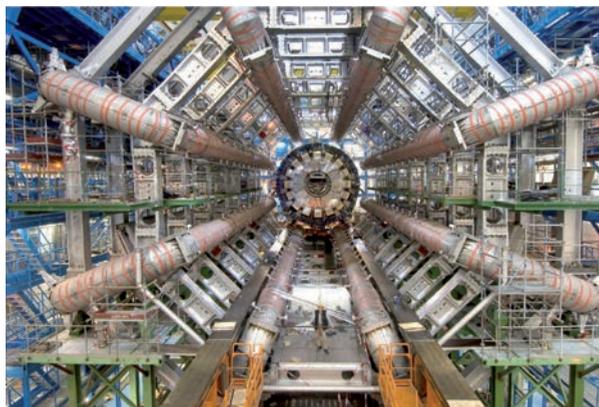


Fig. 8 – Le 8 grandi bobine del magnete toroidale di ATLAS per il rivelatore di muoni.

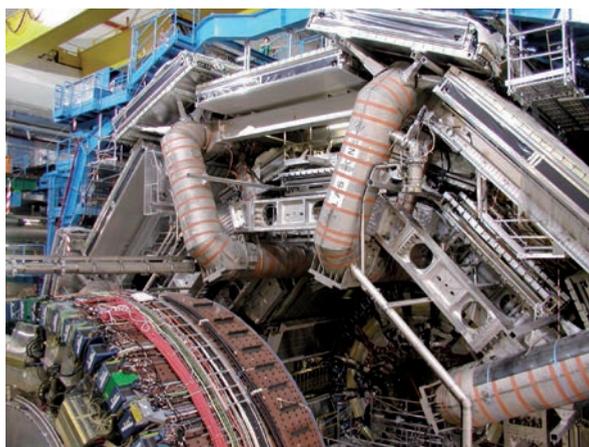


Fig. 9 – Le camere per i muoni installate tra le bobine del magnete nel rivelatore centrale di ATLAS.

Dopo l'invenzione del World Wide Web, questo è un ulteriore sviluppo nell'informatica a cui il CERN sta dando un fondamentale contributo.

L'esito delle sfide poste dalla costruzione e dal funzionamento dei rivelatori era forse, al momento della loro concezione, ancora più incerto di quello riguardante l'acceleratore. Invece, nei tempi previsti, le diverse parti degli apparati, realizzate in tutto il mondo, sono arrivate puntuali per l'assemblaggio, e con sorprendente rapidità strutture così complesse hanno raggiunto l'operatività di regime.



Fig. 10 – Le camere per i muoni nella parte in avanti del rivelatore di ATLAS.

Quando, nel 2009, LHC ha iniziato a produrre le prime collisioni, gli esperimenti erano pronti a esplorare la nuova frontiera di energia.

L'ANALISI DEI DATI E LA SCOPERTA

Nel 2012, i due esperimenti ATLAS e CMS avevano raccolto una messe di dati nella nuova regione di energia, prima con fasci di 3.5 TeV, poi di 4 TeV; questo aveva reso possibile riprodurre i risultati già noti dalla sperimentazione precedente, confermando la validità del Modello Standard.

Ma il risultato più clamoroso fornito dall'analisi di quei dati è stata la scoperta di una nuova particella, dalle caratteristiche compatibili con il bosone di Higgs.

Il bosone di Higgs viene prodotto molto raramente nell'urto protone-protone, circa una volta su un miliardo. Inoltre può disintegrarsi in diversi prodotti finali, detti canali di decadimento. Alcuni di questi canali sono più difficili da misurare.

Inizialmente gli sperimentatori si sono concentrati sul decadimento in due fotoni e su quello in 4 leptoni, cioè in elettroni oppure muoni.

Questi decadimenti sono molto rari (nel secondo caso, una volta ogni 10 000 miliardi di collisioni), ma sono più facilmente identificabili di altri che avvengono con frequenza maggiore.

La *Fig. 11* mostra un evento nel rivelatore di ATLAS compatibile con il decadimento dello Higgs in due fotoni.

Ma la difficoltà non sta solo nella rarità del segnale cercato. Infatti, oltre che dal bosone di Higgs, questi eventi potrebbero essere prodotti, in modo del tutto indistinguibile, da altri processi noti, che costituiscono il fondo rispetto al segnale (come una sorta di falsari che imitano perfettamente la “firma” della particella).

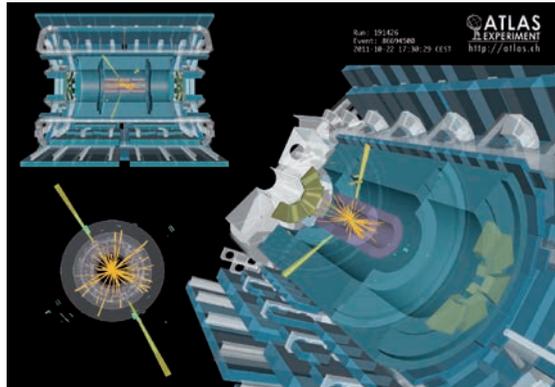


Fig. 11 – Un evento compatibile con il decadimento di un bosone di Higgs in due fotoni (i coni verdi) nel rivelatore di ATLAS (vista trasversa e longitudinale).

Tuttavia, ricostruendo dalla configurazione dell'evento e dall'energia dei prodotti rivelati la massa del potenziale progenitore, se la nuova particella esiste si manifesta come un accumulo di eventi (un “picco”) sul fondo.

È proprio quello che è risultato dall'analisi dei dati, come è mostrato in *Fig. 12* per il canale di decadimento in due fotoni. Un picco sopra il fondo è stato osservato anche nel canale in 4 leptoni, cen-

trato anch'esso attorno a una massa di 125 GeV, circa 135 volte la massa di un protone.

Inoltre osservare un picco nella distribuzione non basta: occorre avere dati sufficienti per dimostrare che l'accumulo degli eventi non è frutto del caso (una "fluttuazione statistica"). È stato necessario scrutinare un milione di miliardi di interazioni protone-protone per ottenere, nella regione dove si manifesta l'accumulo, poche centinaia di eventi nel canale fotone-fotone, e poche decine nel canale in 4 leptoni. Questo è stato sufficiente, sulla base di rigorosi criteri statistici, perché nel 2012 si potesse annunciare la scoperta della nuova particella [4,5,6].

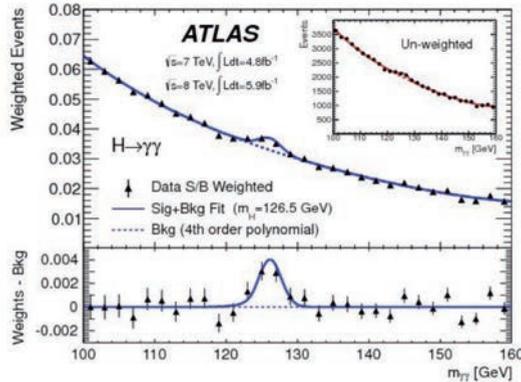


Fig. 12 – La distribuzione di massa nel canale in cui lo Higgs decade in due fotoni. È visibile il picco attorno a 125 GeV.

In quella occasione i fisici avevano prudentemente parlato di “Higgs-like particle”, cioè una particella con proprietà compatibili con quelle previste per il bosone di Higgs. I dati analizzati successivamente hanno consentito di studiarne altre caratteristiche. Lo spin (una proprietà quantomeccanica che rappresenta una sorta di momento angolare intrinseco) risulta essere quasi con certezza zero, come richiesto dalla teoria per il bosone di Higgs. Inoltre sono stati misurati diversi altri modi di decadimento, che devono esistere se la particella è quella cercata.

Dalla fine del 2013 si può affermare che la nuova particella è proprio il bosone di Higgs, il quanto del campo che dà massa ai costituenti elementari, legittimando così la teoria del Modello Standard.

Tuttavia questa scoperta non è solo un punto di arrivo. Come

spesso avviene in fisica, e nella scienza in generale, è anche una porta di accesso verso nuovi territori.

La massa della particella, combinando i dati di ATLAS e CMS, è misurata (marzo 2015) in 125.09 GeV, con una piccola incertezza sperimentale (0.2%).

Il Modello Standard non dà indicazioni sul valore di questa massa; però, una volta che essa è determinata sperimentalmente, può prevedere esattamente tutte le proprietà del bosone di Higgs. Per ora, il Modello risulta perfettamente compatibile con i dati; ma se, aumentando la precisione delle misure, si manifestasse una deviazione quantitativa da alcune delle previsioni, si aprirebbe la strada a una teoria più generale, di cui il Modello Standard è solo una approssimazione. Sappiamo infatti, per diversi motivi [1], che il Modello Standard non può essere la teoria finale.

Nel 2015 LHC sta ritornando in operazione, con una energia quasi doppia rispetto a quella fin qui ottenuta, e con la prospettiva di raccogliere nei prossimi tre anni una quantità di dati circa 3-4 volte maggiore di quelli ora a disposizione. Questa nuova fase potrebbe rivelare territori di fisica inesplorati, attraverso la scoperta di nuove particelle, come quelle supersimmetriche [1], ma anche mediante lo studio dettagliato delle proprietà del bosone di Higgs. Alcuni modelli teorici inoltre, a differenza del Modello Standard, prevedono l'esistenza di più di un bosone di Higgs.

La sperimentazione ad LHC, con diversi miglioramenti della macchina, proseguirà ancora per molti anni, e aumenterà le nostre conoscenze sia dei meccanismi che governano le leggi del mondo microscopico, sia di quelli che regolano l'evoluzione dell'Universo. Infatti, sperimentare ad energie delle interazioni sempre più elevate vuol dire anche risalire il corso del tempo, poiché in tal modo vengono sondate, almeno in parte, le condizioni esistenti pochi istanti dopo l'inizio del Big Bang [7,8].

IL CERN E LA RICERCA FONDAMENTALE

Una impresa scientifica e tecnologica così complessa può essere realizzata soltanto tramite un grande sforzo collettivo. Il CERN, l'Organizzazione Europea per la Ricerca Nucleare, il più grande laboratorio di fisica al mondo, ha gestito il progetto che ha visto una partecipazione planetaria.

Il CERN è stato concepito, più di 60 anni fa, da un gruppo di scienziati (di cui faceva parte l'italiano Edoardo Amaldi, collaboratore di Fermi) con lo scopo di diventare il Laboratorio Europeo dedicato alla ricerca fondamentale. Erano i tempi difficili del primo dopoguerra, con i paesi europei indeboliti dal conflitto e che fino a poco tempo prima si erano combattuti tra loro. Occorreva una visione davvero illuminata e coraggiosa per immaginare (tra virgolette le parole dello Statuto) *“la collaborazione tra stati europei”* dedita solo a *“ricerche di carattere scientifico e fondamentale”*, che *“non avrà nulla a che fare con ricerche in campo militare”* e in cui *“i risultati del lavoro saranno pubblicati o comunque resi disponibili a tutti”*.

Quella visione, oggi, si è pienamente realizzata. Dal nucleo iniziale di 12 paesi, ora gli Stati membri a pieno titolo sono 21. Con il CERN collaborano più di 10000 scienziati provenienti da tutto il mondo, in un ambiente in cui si lavora senza barriere di ideologie, di razza, di paese di provenienza.

Questa ricaduta immateriale delle ricerche che vi si conducono non può essere ignorata. Ma, naturalmente, esistono anche delle conseguenze di altro tipo.

Il progresso scientifico porta ad esiti inaspettati di una nuova teoria o di un risultato sperimentale, anche se al momento non se ne intravede l'utilità pratica, come illustrato in (1). Questo vale anche per la fisica subnucleare.

Tuttavia, gli strumenti e le tecnologie che occorre sviluppare per portare avanti queste ricerche hanno già ora importantissime ricadute in svariati campi, dalla medicina all'industria, alla tecnologia dell'informazione, che giustificano pienamente l'investimento fatto per sostenerle [1,3,7].

Il bilancio del CERN ammonta (dati del 2014) a 1100 milioni di franchi svizzeri (circa 850 milioni di euro al cambio in quel momento). Ogni paese membro vi contribuisce in proporzione al PIL (l'Italia con il 10.5%).

L'investimento totale per realizzare gli strumenti che hanno consentito la scoperta del bosone di Higgs (acceleratore e rivelatori), con le incertezze dovute soprattutto ai costi per la costruzione dei rivelatori, può essere stimato attorno agli 8 miliardi di franchi svizzeri [3]. Questo stanziamento ha avuto un grande ritorno sotto forma di investimento nelle industrie dei paesi partecipanti, le quali hanno potuto sviluppare tecnologie di avanguardia che non si sarebbero mai realiz-

zate senza lo stimolo della ricerca fondamentale [3].

Inoltre moltissimi giovani, anche nel caso in cui proseguano poi la loro carriera in altri campi, acquisiscono una formazione e una mentalità che li rende capaci di risolvere problemi e lavorare in gruppo, in un ambiente internazionale, rispettando i tempi esecutivi anche in situazioni di grande pressione.

Tuttavia, al di là delle ricadute, la prima molla per questo tipo di ricerca, il suo valore fondante, è il bisogno di conoscere, di esplorare l'Universo che ci circonda, come ci ricorda l'Ulisse di Dante.

Un episodio, giustamente celebre, esprime bene questo punto. Nel 1969 Robert Wilson, direttore di un grande laboratorio americano per la fisica delle particelle, venne chiamato a giustificare di fronte a una commissione del Congresso la spesa prevista per la costruzione di un nuovo acceleratore. A un senatore, che continuava a incalzarlo sull'utilità del progetto per la sicurezza nazionale (cioè, per le applicazioni militari...) Wilson rispose:

“Ha solo a che vedere con il rispetto che ci dobbiamo l'un l'altro, con la dignità degli uomini e il nostro amore per la cultura... Non ha niente a che fare direttamente con la difesa del nostro paese, se non per il fatto di renderlo degno di essere difeso”.

La ricerca e la scoperta del bosone di Higgs sono una tappa, importante ed emblematica, nel cammino della Scienza, questa “grande avventura dei nostri tempi” [9].

BIBLIOGRAFIA

- [1] Oreste Nicosini, *Una pietra miliare nella comprensione del microcosmo: il bosone di Higgs*, in questi Rendiconti.
- [2] Lyndon Evans (Editor), *The large Hadron Collider: a Marvel of Technology*, EPFL Press.
- [3] Luciano Maiani, *A caccia del bosone di Higgs*, Mondadori.
- [4] M. Della Negra, P.Jenni, T.S.Virdee, *Journey in the Search for the Higgs Boson: the ATLAS and CMS Experiments at the Large Hadron Collider*, Science Vol. 338 (6114) pp.1560-1568 (2012).
- [5] The ATLAS Collaboration, *A Particle Consistent with the Higgs Boson Observed with the ATLAS Detector at the Large Hadron Collider*, Science Vol. 338 (6114) pp.1576-1582 (2012).

- [6] The CMS Collaboration, *A New Boson with a Mass of 125 GeV Observed with the CMS Experiment at the Large Hadron Collider*, Science Vol. 338 (6114) pp.1569-1575 (2012).
- [7] Ugo Amaldi, *Sempre più veloci*, Zanichelli.
- [8] Gian Francesco Giudice, *A Zeptospace Odissey*, Oxford.
- [9] L'espressione è di Richard P. Feynman, in: *The meaning of it all*, ed. it: *Il senso delle cose*, Adelphi.