

Simone Paoletti

La scoperta del bosone di Higgs

The discovery of the Higgs boson

INFN – Sezione di Firenze



Il Colle di
Galileo

Sommario. Individuato presso i laboratori del CERN il bosone di Higgs.

Parole chiave. Higgs, CERN, LHC, CMS, Atlas, INFN, particelle, scoperta, bosone, tracciatore, Modello Standard.

È il 4 luglio 2012 quando Fabiola Gianotti e Joe Incandela, i portavoce delle collaborazioni ATLAS e CMS (ATLAS 2012, CMS 2012) annunciano in un seminario congiunto la scoperta di una nuova particella, di massa prossima a $125 \text{ GeV}/c^2$, con caratteristiche simili a quelle aspettate per il bosone di Higgs.

La notizia ha una risonanza mondiale perché il bosone di Higgs è il “ricercato numero uno” nella lista delle particelle mancanti all’osservazione sperimentale. A questa particella è infatti legata l’autoconsistenza del Modello Standard, la teoria che riassume le nostre conoscenze sulle particelle elementari e le loro interazioni. Secondo l’idea sviluppata nel corso del 1964 da Robert Brout, Francois Englert, Peter Higgs, Gerald Guralnik, Carl Richard Hagen, Tom W. B. Kibble, è tramite

Abstract. The Higgs boson identified at the CERN laboratories.

Keywords. Higgs, CERN, LHC, CMS, Atlas, INFN, particles, discovery, boson, tracker, Standard Model.

On 4 July 2012 Fabiola Gianotti and Joe Incandela, the spokespersons for the ATLAS and CMS collaborations (ATLAS 2012, CMS, 2012), announced at a joint seminar the discovery of a new particle with a mass of around $125 \text{ GeV}/c^2$ and characteristics consistent with those predicted for the Higgs boson.

The news was a global bombshell, since the Higgs boson was number one on the wanted list of particles as yet undetected by experimental observation. Indeed the self-consistency of the Standard Model, the theory that recapitulates human knowledge about elementary particles and their interactions, is intimately bound up with this particle. According to the concept

l'accoppiamento con un campo scalare neutro, appunto il campo di Higgs, che i portatori dell'interazione elettrodebole W^+ , W^- e Z acquistano massa, giustificando così la differenza di raggio d'azione tra le interazioni elettromagnetiche e le interazioni deboli, nel quadro unitario previsto dal Modello Standard. Sempre interagendo col campo di Higgs acquistano massa anche i fermioni elementari della teoria, cioè i leptoni ed i quark.

La particella di Higgs viene lungamente cercata all'acceleratore LEP (Large Electron-Positron collider), presso i laboratori del CERN, per tutti gli anni '90, fissando il limite inferiore per la sua massa a $114.4 \text{ GeV}/c^2$. La ricerca è proseguita all'acceleratore Tevatron (presso il Fermi National Laboratory), dove è stata esclusa una regione di massa intorno ai $160 \text{ GeV}/c^2$.

In seguito alla chiusura di LEP, avvenuta nel 2000, viene realizzato al CERN l'acceleratore LHC: il Large Hadron Collider. Si tratta di una macchina che fa collidere fasci di protoni molto intensi, fino ad energie di 14 TeV nel centro di massa. Il suo programma scientifico è vario, ma uno dei principali obiettivi è proprio la ricerca del bosone di Higgs e di eventuali segnali di nuova fisica, che si ritiene si possano manifestare a queste energie. LHC inizia a funzionare con intensità ridotta nel novembre 2009. È negli anni 2011 e 2012 che le intensità dei suoi fasci divengono interessanti per la ricerca della particella di Higgs. Solo una collisione protone-protone su 10 miliardi produce in media un bosone di Higgs, e di questi solo una piccola frazione decade in modo utile da poter essere rivelata e distinta dal fondo combinatorio dovuto alle altre interazioni. L'analisi richiede dunque alta statistica e rivelatori molto precisi ed efficienti.

developed in the course of 1964 by Robert Brout, Francois Englert, Peter Higgs, Gerald Guralnik, Carl Richard Hagen and Tom W. B. Kibble, it is through the coupling with a neutral scalar field, that is the Higgs field, that the W^+ , W^- and Z particles, mediators of the electroweak interaction, acquire their mass, thus giving grounds for the difference in the range of action between electromagnetic interactions and weak interactions, within the unification picture predicted by the Standard Model. It is again by interacting with the Higgs field that the elementary fermions of the theory, that is the quarks and the leptons, acquire mass too.

The Higgs boson was sought at length throughout the 1990s, using the LEP (Large Electron-Positron collider) at the CERN laboratories, and fixing the lower limit for its mass at $114.4 \text{ GeV}/c^2$. The research then continued at the Fermi National Laboratory using the Tevatron particle accelerator, excluding a region of mass around $160 \text{ GeV}/c^2$.

After the LEP was closed down in 2000, the Large Hadron Collider (LHC) was constructed at CERN. This machine collides two high-energy beams of protons, up to energies of 14 TeV in the center of mass. The scientific program of the LHC is varied, but one of the principal objectives is precisely the search for the Higgs boson and any signs of new physics, which are supposed to be disclosed at such energies. LHC first started up, at initially reduced intensity and energy levels, in November 2009. It was in the years 2011 and 2012 that the intensity and the energy level of the beams began to get interesting in terms of the search for the Higgs particle. On average, only one proton-proton collision out of 10 billion produces a Higgs boson, and of these only a tiny fraction decay in such a way that they can be detected and differentiated

Tra ricerca, progettazione, sviluppo e costruzione, la realizzazione degli apparati sperimentali di ATLAS e CMS è stata un processo molto complesso che ha richiesto circa vent'anni. Le collaborazioni contano circa 3000 fisici, un ordine di grandezza in più rispetto a quelle di LEP. Gli esperimenti sono dotati di rivelatori precisi, veloci, in grado di sostenere i flussi elevati di particelle generati dalle collisioni dei fasci di LHC. Questi utilizzano tecnologie innovative, adottate per la prima volta su scala così grande. Nomino qui, come esempio, il caso del tracciatore interno di CMS, alla realizzazione del quale il contributo fiorentino è stato importante. Si tratta del più grande rivelatore a silicio mai costruito: circa 25 mila sensori a micro-strisce di silicio, 200 m² di superficie sensibile, disposti in 10 strati attorno al punto di incrocio dei fasci. La sua realizzazione ha coinvolto laboratori e centri di ricerca internazionali distribuiti in otto paesi. La parte più interna è una creatura tutta italiana alla quale hanno lavorato sei strutture dell'INFN. Tra le attività svolte nei laboratori e nelle camere pulite della sede di Sesto Fiorentino vi sono: la caratterizzazione dei sensori, la realizzazione delle connessioni elettriche tramite microsaldatura, i test funzionali dei moduli, lo sviluppo del sistema di alimentazione, l'assemblaggio di metà della parte interna del rivelatore.

Torniamo dunque al 4 luglio 2012. Sei mesi prima ATLAS e CMS avevano presentato dei dati preliminari di particolare interesse: veniva esclusa una regione di massa molto ampia al di sotto di 600 GeV/c², individuando però un eccesso di eventi nella regione di massa tra i 115.5 e 127 GeV/c².

L'apporto di statistica fornito dai dati del 2012 è decisivo. I due esperimenti riportano, in modo indipendente, un chiaro eccesso di eventi sopra al fondo

from the combinatorial background due to other interactions. The analysis therefore calls for advanced statistics and extremely precise and efficient detectors.

Between research, design, development and construction the creation of the ATLAS and CMS experimental apparatuses was an extremely complex process that took almost twenty years to complete. The collaborating physicists are no less than 3,000, ten times more than those engaged in any of the LEP experiments. The experiments are equipped with rapid, precise detectors capable of recording the elevated flows of particles generated by the collisions of the LHC beams. They exploit ground-breaking technology adopted for the first time on such a vast scale. Here I should like to mention as an example the internal tracker of CMS, with a significant input to its development having been made by the Florentine contribution. This is the biggest silicon tracker ever built: with around 25 thousand sensors made of silicon microstrips arranged in ten layers around the point where the beams cross. Its development involved international laboratories and research centers scattered over eight countries. Its innermost part is an entirely Made in Italy creation, on which six sections of the INFN worked. Among the activities carried out in the laboratories and in the clean rooms of the Sesto Fiorentino site are: the characterization of the sensors, the creation of the electrical connections through micro-bonding, the functional tests of the modules, the development of the power supply system and the assembly of half of the internal part of the detector.

However, to return to 4 July 2012. Six months earlier ATLAS and CMS had submitted preliminary data of particular interest: a very broad region of mass of below 600 GeV/c² was exclud-

aspettato in ciascuno dei canali di decadimento sperimentalmente più rilevanti: decadimento in due fotoni, decadimento in due Z (con successivo decadimento delle Z in coppie di elettroni o muoni), decadimento in coppie di W (con successivo decadimento dei W in leptone più neutrino). Entrambi gli esperimenti riportano un segnale superiore a 5 deviazioni standard (vale a dire che la probabilità che quella osservata sia una fluttuazione statistica del fondo sperimentale è inferiore a uno su 3.5 milioni). Viene dichiarata la scoperta di una nuova particella di massa intorno ai $125 \text{ GeV}/c^2$.

Le intensità dei segnali ed i modi di decadimento osservati sono compatibili, entro gli errori sperimentali, con quanto ci si aspetta dal bosone di Higgs nel Modello Standard, ma per capire meglio le proprietà della nuova particella servono studi più dettagliati e maggiore statistica. Gli esperimenti continuano a raccogliere dati e, grazie anche alla prestazione straordinaria di funzionamento fornita da LHC, alla fine del 2012 la quantità di dati raccolti dagli esperimenti è cinque volte superiore a quella del 2011.

I risultati presentati in via preliminare alle conferenze invernali del 2013 mostrano il seguente quadro: il segnale della nuova particella è confermato in tutti i canali di decadimento già osservati, con livelli di significatività maggiori. Viene rivelato anche il segnale del decadimento in coppie di quark b e coppie di leptoni τ . Le intensità relative di produzione e di decadimento nei vari canali sono in accordo, entro gli errori sperimentali, con quelle previste dal Modello Standard. Le distribuzioni angolari dei decadimenti (legate alle proprietà della particella) sono compatibili con quelle aspettate per il bosone di Higgs, sfavorendo altre ipo-

ed, while identifying an excess of events in the region of mass between 115.5 and 127 GeV/c^2 .

The statistical contribution provided by the 2012 data is decisive. The two experiments independently record a clear excess of events above the expected background in each of the experimentally more relevant decay channels: decay to two photons, decay to two Zs (with subsequent decay of the Zs to pairs of electrons or muons), decay to pairs of Ws (with subsequent decay of the Ws to lepton plus neutrino). Both the experiments reported a signal superior to 5 standard deviations (in other words, the probability that the one observed is a statistical fluctuation of the experimental background is less than 1 in 3.5 million). The discovery of a new particle of a mass of around $125 \text{ GeV}/c^2$ was announced.

The intensity of the signals and the modes of decay observed are compatible, within the margin of experimental error, with the predictions for the Higgs boson in the Standard Model. However, to achieve a better understanding of the new particle, more statistics and more detailed studies are called for. The experiments continue to collect data and, largely thanks to the extraordinary functioning performance of the LHC, at the end of 2012 the quantity of data collected by the experiments was five times that of 2011.

The results presented in a preliminary manner at the winter conferences of 2013 show the following picture: the signal of the new particle is confirmed in all the decay channels already observed, with greater levels of significance. The signal of decay to pairs of b quarks and pairs of leptons has also been observed. The relative intensities of production and decay in the various channels are in agreement, within the margin of experimental error, with those predicted

tesi. Le collaborazioni non hanno ancora completamente ufficializzato i risultati, ma ormai non ci sono più dubbi che si tratti proprio della particella di Higgs.

Adesso LHC è in manutenzione. Quando la macchina sarà riaccesa, nel 2015, saranno accessibili energie ed intensità maggiori, rendendo possibile lo studio più dettagliato delle proprietà di questa particella, che potrebbe aprire le porte ancora a nuove scoperte.

Bibliografia

Atlas Collaboration (2012), *Physics Letters B* 716, 1.

CMS Collaboration (2012), *Physics Letters B* 716, 30.

Simone Paoletti è ricercatore dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare. Si occupa di fisica sperimentale delle alte energie e collabora all'esperimento CMS. Si è laureato in fisica all'Università di Firenze ed ha conseguito il dottorato di ricerca presso l'Università di Roma "La Sapienza". Ha lavorato presso il CERN ed all'Università di Padova.

in Standard Model. The angular distributions of the decays (connected with the properties of the particle) are compatible with those predicted for the Higgs boson, penalizing other theories. The collaborations have not yet rendered the results completely official, but by now there can no longer be any doubt that it is the Higgs particle.

At present the LHC is under maintenance. When it is started up again in 2015, even higher energies will be available, making possible a more detailed study of the properties of this particle, which could throw open the door to other new discoveries.

Bibliography

Atlas Collaboration (2012), *Physics Letters B* 716, 1.

CMS Collaboration (2012), *Physics Letters B* 716, 30.

Simone Paoletti is a researcher at the Italian Institute for Nuclear Physics. He deals with high energy experimental physics and collaborates on the CMS experiment. He graduated in physics at the University of Florence and took a PhD at the "La Sapienza" University in Rome. He has worked at the CERN and at the University of Padua.

