

# La descoberta d'una nova partícula al CERN de Ginebra: és el bosó de Higgs?

Matteo Cavalli-Sforza

Institut de Física d'Altes Energies, Universitat Autònoma de Barcelona, 08193, Bellaterra (Barcelona), Spain  
matteo@ifae.es

*A les últimes tres dècades, un dels temes centrals de la investigació experimental en física de partícules ha estat la cerca del bosó de Higgs, una partícula d'importància transcendental per a la nostra comprensió de la matèria i de les seves interaccions a l'escala més petita que coneixem. El 4 de juliol de 2012, al CERN, s'ha anunciat la descoberta d'una nova partícula que podria ser aquest bosó. Aquesta notícia ha tingut un gran ressò tant en el món científic com entre el gran públic. L'objectiu d'aquest article és explicar què s'ha trobat, com s'ha trobat, i per què aquest descobriment és tan important.*

## 1 Introducció: triomfs i problemes de la física de partícules

Des dels anys seixanta del segle passat, la física de partícules ha conegut una època de grans avenços, tant teòrics com experimentals. Avui dia, sabem que la matèria es compon de dotze tipus de fermions, els quarks i els leptons, amb spin  $1/2$ , que considerem elementals perquè són de dimensions inferiors als  $10^{18}$  metres i no tenen cap estructura interna a escales superiors a aquesta; que podem descriure tres de les forces que governen les interaccions entre aquestes partícules amb teories quàntiques de camp del tipus gauge; que les tres forces (nuclear, electromagnètica i feble) es transmeten mitjançant partícules (bosons) de spin 1. El conjunt de teories de camp que descriuen les interaccions de totes aquestes partícules -anomenat model estàndard (MS, o SM en anglès)- concorda meravellosament amb els resultats experimentals -en alguns casos, fins a la dotzena xifra decimal.

Un dels grans èxits del model estàndard és la descripció unificada de les interaccions electromagnètiques i febles, que ha portat a la descoberta, a l'inici dels anys vuitanta, dels «bosons electrofebles»  $W^+$ ,  $W^-$  i  $Z$ . Un ingredient imprescindible d'aquesta descripció -coneguda com el model de Glashow, Salam i Weinberg [1-3]- és que existeixi un nou camp escalar, que omple el buit i que per un mecanisme conegut com a trencament espontani de simetria proporciona massa als bosons electrofebles, als quarks i als leptons. El mecanisme de trencament espontani de la simetria electrofeble -conegut com a mecanisme de Higgs- va ser proposat per P. Higgs i altres autors [4-7] l'any 1964, i va permetre a Weinberg (1967) i Salam (1968) d'unificar les interaccions febles i electromagnètiques de manera que els càlculs de les quantitats observables no donin resultats infinits, i per tant sense sentit físic.

El mateix Higgs va ser el primer a observar que les fluctuacions quàntiques del nou camp escalar es manifestarien com un bosó amb massa, de spin 0, i amb els mateixos números quàntics del buit. Aquest és el bosó de Higgs, que ara potser hem descobert.

### 1.1 Aproximació intuïtiva a les idees de Higgs

Potser val la pena de proposar una imatge intuïtiva del camp i de la partícula de Higgs, sense entrar en els aspectes matemàtics. Personalment, m'agrada imaginar el camp de Higgs -una quantitat escalar que té el mateix valor, diferent de zero, a tot l'espai- com una mena de tensió de l'espai, semblant a la tensió de la pell d'un tambor. No es pot detectar aquesta tensió -pel fet de ser la mateixa pertot arreu- sense pertorbar-la. En aquest exemple, la pertorbació és el que passa quan es toca un tambor: es genera una ona acústica que es propaga per un espai bidimensional, la pell. En mecànica quàntica, cada ona és també una partícula, i un camp està compost per partícules (virtuals, en el cas estàtic, i reals, si hi ha prou energia per crear una ona). Un bosó de Higgs és una

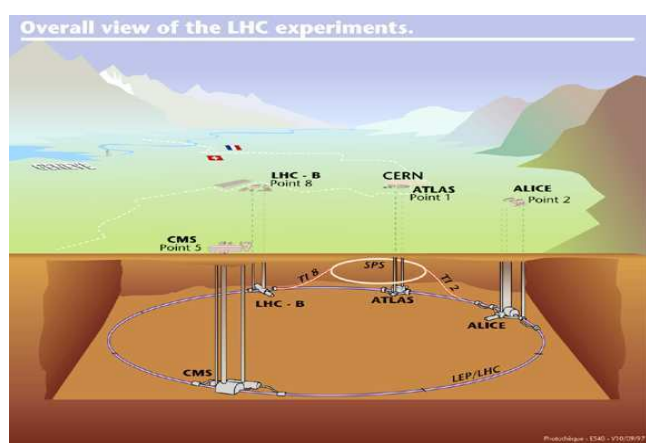


Figura 1: Situació de l'LHC, a prop del llac de Ginebra, i dels seus experiments: ATLAS, CMS, LHCb i ALICE



Figura 2: El túnel de l'LHC, amb uns dipòls superconductors

vibració -una pertorbació- del camp de Higgs.

El mecanisme pel qual el camp de Higgs dóna massa a altres partícules es pot veure com una interacció amb les partícules en la qual el camp s'oposa a canvis a les seves velocitats proporcionalment a la massa de les partícules. Una forma no gaire precisa de veure'n l'efecte és que el camp és com un mitjà viscos (però la viscositat genera una resistència proporcional a la velocitat, no a l'acceleració).

### 1.2 Propietats i importància del bosó de Higgs

S'ha de posar l'accent sobre el fet que el mecanisme de Higgs és un ingredient imprescindible de la nostra comprensió de la física de partícules, perquè sense aquest mecanisme no sabríem d'on vénen les masses i no les podríem fer servir als càlculs sense generar infinits.

L'existència del bosó de Higgs està basada, doncs, en raons essencialment teòriques. El gran èxit de les prediccions del model estàndard ha motivat l'acceptació general de la idea del trencament espontani de la simetria electrofeble i les cerques experimentals del bosó de Higgs.

D'altra banda, el camp (i el bosó) de Higgs no són l'única manera de poder dur a terme el trencament de la simetria i per tant d'obtenir que les partícules tinguin massa. Encara que el bosó de Higgs potser sigui la hipòtesi conceptualment més econòmica, és possible que la cerca doni lloc a un escenari diferent.

També s'ha d'observar que dins del model estàndard totes les propietats del bosó de Higgs hi estan previstes, amb l'important excepció de la massa. En funció de la massa del bosó, sabem en quines reaccions buscar-ho, com sovint es produirà i en quines partícules es desintegrarà.

## 2 Com es pot buscar el bosó de Higgs

La descoberta dels bosons W i Z els anys vuitanta, amb les masses previstes pel model estàndard, han donat molta

credibilitat al mecanisme de Higgs i han fet imprescindible trobar aquest bosó, o partícules que expliquessin els mateixos efectes.

Consideracions teòriques limiten l'interval de masses on podria estar el bosó de Higgs entre uns GeV/c i aproximadament 1000 GeV. Cerques experimentals directes als col·lisionadors de partícules els anys noranta van establir que la massa havia de ser superior a 114 GeV/c -és a dir, un bosó de massa inferior als 114 GeV s'hauria ja produït i detectat en un dels experiments que ho buscaven.

Per tal de produir partícules amb un col·lisionador és necessari que l'energia disponible al centre de massa de la col·lisió sigui superior a la massa de la partícula que es busca. Per dalt de 114 GeV, només el Tevatron, col·lisionador de protons i antiprotons del Fermi National Accelerator Center a prop de Chicago, EUA, i el Large Hadron Collider (LHC), que fa col·lisionar protons, al CERN, han tingut la possibilitat de produir bosons de Higgs.

La condició sobre l'energia disponible està ben lluny de ser suficient per a l'observació d'aquest bosó, per dues raons:

- el protó està compost per quarks i gluons (portadors de la força que uneix els quarks), i són les col·lisions d'aquests components les que produeixen el bosó -i gluons i quarks porten només una part de l'energia del protó;
- la interacció que produeix el bosó és una interacció feble, i per això la freqüència d'aquestes interaccions és força baixa.

Concretament: a l'LHC es pot produir un bosó de Higgs amb una massa de 126 GeV en només una de quasi  $10^{10}$  col·lisions.

Finalment, com que el bosó és inestable, només es pot detectar reconstruint la seva massa pels productes de la seva desintegració. A l'interval de massa en qüestió, el bosó de Higgs es pot desintegrar en molts canals diferents. Per tal de detectar el bosó i mesurar-ne les característiques l'aparell experimental ha de poder identificar i mesurar tots els canals possibles.

## 3 Com s'ha buscat el bosó de Higgs al CERN

En aquest apartat descriurem breument l'LHC, els dos detectors -ATLAS i CMS- que han descobert el nou bosó, i uns dels reptes que han afrontat.

### 3.1 Large Hadron Collider (LHC)

El Consell del CERN va decidir la construcció de l'LHC, l'any 1994, després d'uns anys d'estudis i d'R+D. L'objectiu científic és l'exploració dels fenòmens a la frontera de les altes energies, especialment el mecanisme de trencament de la simetria electrofeble (mitjançant, o no, el bosó de Higgs), i qualsevol altre fenomen al nou domini d'energies obert per aquest accelerador.

L'LHC fa servir el túnel del col·lisionador anterior, el Large Electron Positron Collider (LEP), de 27 km de cir-

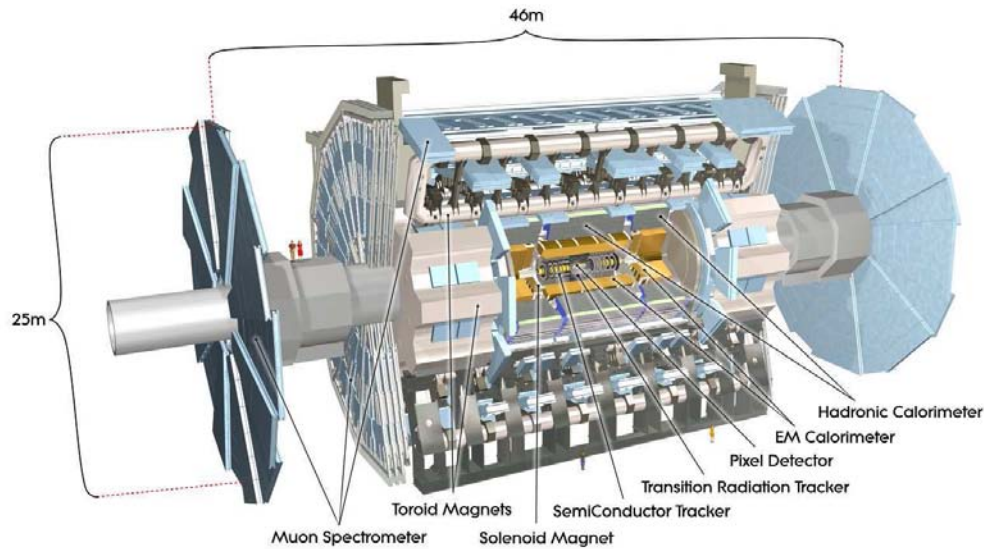


Figura 3: El detector ATLAS, el més gran dels dos detectors dissenyats per tal de buscar nous fenòmens a l'LHC. A la figura, es poden apreciar les dimensions totals (25 x 46 m) del detector

cumferència, a 70-140 m sota terra (vegeu la figura 1). S'acceleren i es posen en col·lisió dos feixos de protons, produïts per la xarxa d'acceleradors del CERN; els dos feixos circulen en òrbites tancades, en sentits oposats. Allà on els feixos es creuen hi ha col·lisions entre protons. L'energia màxima de les col·lisions, 13 o 14 TeV en el centre de massa (de 6,5 a 7 TeV per feix), s'assolirà a partir de 2015. En aquest moment, amb 8 TeV en el centre de massa, l'LHC és l'accelerador de més alta energia del món.

Els protons es mantenen en òrbita amb imants superconductors, a una temperatura d'1,9 °K, inferior a la de l'espai intergalàctic (2,7 °K, per la radiació de fons còsmica), cosa que fa que l'LHC sigui el lloc extens més fred de l'Univers. El circuit magnètic inclou uns 9600 imants, entre els quals els més notables són els 1200 dipòls, de 15 m de llarg cadascú [8,9].

L'LHC ha produït les primeres col·lisions entre protons el 2009, i després d'unes revisions importants, degudes a una avaria inesperada, a finals de 2010 s'ha engegat el programa de física. En el moment d'escriure aquest article, els feixos de protons col·lisionen cada 50 ns, i es produeixen de l'ordre de  $10^8$ /s col·lisions entre protons.

### 3.2 ATLAS i CMS

Aquests aparells s'han pensat per observar un espectre molt ampli de fenòmens que es puguin presentar a les

energies de l'LHC, tant els que es preveuen amb les teories existents -entre els quals, òbviament, el bosó de Higgs és un objectiu d'alta prioritat- com altres fenòmens més especulatius.

A causa d'aquest paper d'exploració, ATLAS i CMS són els detectors més grans i els més complexos que s'han fet fins ara. Ambdós s'han dissenyat els primers anys noranta [10-12] i s'han construït durant quasi vint anys. Cadascun té les dimensions d'una casa de diversos pisos, pesa mils de tones, i ha necessitat la dedicació d'uns tres mil físics o enginyers, de més de 170 institucions de tot el món.

Esquemàticament, el disseny dels dos detectors es pot veure en les figures 3 i 4.

Encara que facin servir tecnologies diferents, conceptualment ATLAS i CMS s'assemblen bastant, perquè els requisits quant a la detecció de partícules són els mateixos. Específicament, el que es necessita és:

- cobrir més del 99 % de l'angle sòlid al voltant dels punts de col·lisió, per tal de detectar gairebé totes les partícules produïdes;
- tenir un camp magnètic intens a la part més interna del detector, equipant aquest volum amb detectors que mesurin les trajectòries de totes les partícules amb càrrega elèctrica (el moment de les partícules es

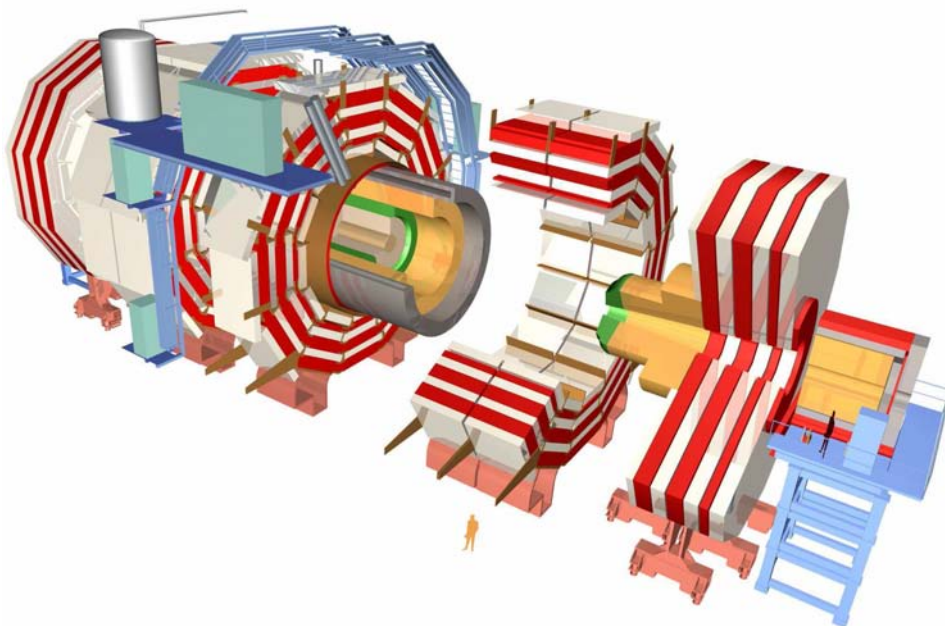


Figura 4: El detector CMS, més compacte que ATLAS, però més massiu, a causa de l'acer que proporciona el retorn del flux del seu intens camp magnètic

mesura per la curvatura de les trajectòries en aquest camp);

- identificar i mesurar l'energia de fotons, electrons, muons, quarks i gluons, identificant quan es pugui els tipus de quarks.

Mentre que la mesura de les trajectòries requereix un nombre molt elevat de canals de detecció -gairebé cent milions d'elements, majoritàriament píxels de material semiconductor, com a les càmeres digitals-, el tercer objectiu és el que domina el volum i la massa d'aquests detectors.

Electrons i fotons s'identifiquen per les cascades electromagnètiques que es produeixen en aparells que absorbeixen tota la seva energia i que per aquesta raó es diuen calorímetres electromagnètics. Aquest tipus de calorímetre constitueix la primera capa de detecció externament a la bobina superconductora que genera el camp magnètic intern.

Els quarks i els gluons, partícules elementals amb interaccions nuclears, es manifesten com jets (dolls) d'hadróns -pions, kaons, nucleons, etc.-, i dipositen la seva energia a la capa següent, el calorímetre hadrònic, on produeixen cascades hadròniques, amb característiques distribucions espacials de l'energia detectada. Els calorímetres hadrònics necessiten masses d'uns milers de tones per absorbir i mesurar gairebé tota l'energia dels dolls d'hadróns.

Per tal d'identificar i mesurar el moment dels muons,

que generen poques cascades i típicament no s'absorbeixen als calorímetres, es necessita una capa de gran volum, externa als calorímetres. A ATLAS [13], el moment dels muons es determina mesurant les seves trajectòries en un camp magnètic toroïdal, produït per bobines superconductores, que domina el volum d'aquest detector. A CMS [14], la trajectòria dels muons es mesura dins l'acer pel qual es retorna el flux magnètic de la bobina interna.

També és possible identificar els quarks més massius, el quark c (charm) i b (bottom), que podrien representar una fracció important de les desintegracions del bosó de Higgs. Aquests quarks es desintegren amb una vida mitjana relativament llarga, que fa que es moguin típicament uns mil·límetres abans de convertir-se en altres partícules. Els detectors de trajectòria són prou precisos per detectar aquestes desintegracions.

### 3 Els reptes de les mesures a l'LHC

Les  $10^8/s$  col·lisions («esdeveniments», com els diem els físics) que ara es generen -de mitjana- a l'LHC pujaran d'un factor  $> 10$  els pròxims anys. És tècnicament impossible -i no tindria interès- gravar totes aquestes dades. El repte és seleccionar els esdeveniments interessants dins aquest flux d'informació -separar el senyal del fons.

La selecció es fa en temps real, amb una primera etapa, on es busquen patrons interessants -per exemple, electrons, muons o dolls d'hadróns per damunt d'uns llinars d'energia- fent servir una combinació de microprocessa-



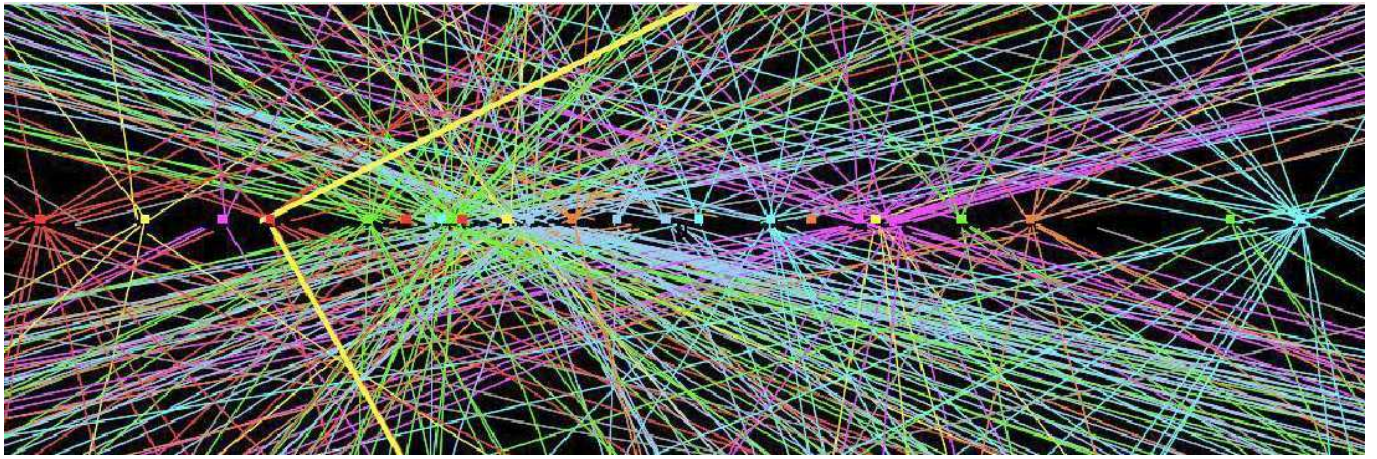


Figura 5: Un esdeveniment d'ATLAS on s'han reconstruït 25 col·lisions, en una de la quals s'ha produït un bosó Z que es desintegra en dos muons (traces grogues)

dors i d'ordinadors que reconstrueixen part de l'esdeveniment -fins a una granja de milers d'ordinadors que, funcionant paral·lelament, fa una reconstrucció preliminar però completa de cada esdeveniment. El resultat d'aquest procés és que es graven només uns centenars d'esdeveniments per segon -una reducció de 5 o 6 ordres de magnitud.

Tot i que es faci aquesta selecció, la quantitat d'informació que es grava és aclaparadora: uns  $10^{15}$  bytes de dades «brutes» per any, per cada experiment. Analitzar aquestes dades representa un altre gran repte, que s'ha afrontat amb grans inversions en computació, que s'han conjuminat mitjançant la tecnologia Grid [15]. Treballant en Grid, un físic que posi en marxa un programa d'anàlisi no sap -ni li interessa saber-ho- en quin ordinador, a Europa, EUA o Japó, es fan els càlculs. És una xarxa mundial d'ordinadors que s'assembla a la xarxa elèctrica, que distribueix potència a l'usuari amb independència del seu origen.

En la reconstrucció dels esdeveniments hi ha un altre repte: cada cop que es creuen els feixos, hi ha típicament molt més que una col·lisió. Cada col·lisió deixa traces al detector de trajectòries, i diposita energia als calorímetres. S'han d'interpretar les dades per tal que els resultats de la col·lisió seleccionada pel seu interès físic no es confonguin amb els senyals espuris deguts a les altres col·lisions que han tingut lloc al mateix moment. La figura 5 ensenya les trajectòries reconstruïdes en un esdeveniment on es poden identificar 25 col·lisions.

#### 4 Com s'ha trobat la nova partícula?

Tot i que no preveu la massa del bosó de Higgs, el model estàndard preveu, en funció de la seva massa, totes les altres propietats d'aquesta partícula, entre les quals hi ha la secció eficaç de producció i la freqüència relativa de les seves desintegracions. La cerca del «Higgs»

a l'LHC va començar i continua analitzant tots els canals de desintegració físicament possibles, però ha cobrat especial intensitat analitzant els canals on la mesura de les quantitats cinemàtiques -els quadrivectors- de les partícules detectades permet reconstruir amb precisió la massa de la partícula d'origen. Es tracta de les reaccions

$$H \rightarrow \gamma\gamma \quad (1)$$

$$H \rightarrow ZZ \text{ on } Z \rightarrow e^+e^-; Z \rightarrow \mu^+\mu^- \quad (2)$$

Ja en el disseny inicial d'ATLAS i CMS es van optimitzar els detectors de fotons, electrons i muons per tal de poder detectar aquestes reaccions amb una discriminació excel·lent pel que fa als fons, i reconstruir la massa de la partícula d'origen amb precisió -aspecte que també ajuda a optimitzar la ràtio senyal/fons. Aquestes reaccions constitueixen una fracció petita de les desintegracions del Higgs del model estàndard: un 0,2 % pel canal (1) i un 0,01 % pel canal (2) si la massa del Higgs és al voltant de 120-130 GeV, però tenen fons relativament petits, especialment el segon canal, i calculables amb precisió.

En la figura 6 es pot veure la distribució de la massa invariante de dos fotons obtinguda per ATLAS [16], fent servir totes les dades recollides el 2011 i el 2012 (respectivament, amb 7 i amb 8 TeV al centre de massa de les col·lisions). Hi ha una acumulació d'esdeveniments a una massa de 126,5 GeV, que té l'amplada prevista per la resolució d'energia experimental, corresponent a una partícula amb una amplada inferior a aquesta resolució. En la figura 7 es veu la mateixa distribució amb les dades de CMS [17], que observa una acumulació semblant amb una massa invariante de 125 GeV. Els dos resultats són compatibles dins l'error de calibració de les energies dels fotons. La figura 8 ensenya un esdeveniment de CMS, on les energies dels dos fotons donen una massa invariante de 125 GeV.

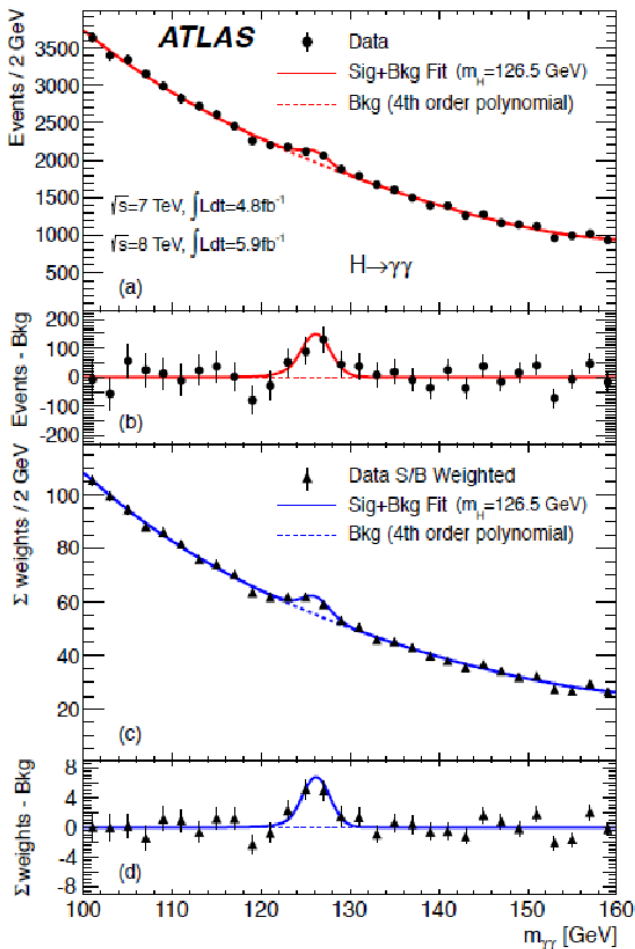


Figura 6: Massa invariante de dos fotons a les dades d'ATLAS a 7 i 8 TeV al centre de massa dels feixos. L'acumulació d'esdeveniments a 126,5 GeV destaca per damunt del fons. A les distribucions (c) i (d), cada esdeveniment entra amb un pes calculat en funció de la ràtio senyal/fons

Igualment s'han detectat acumulacions d'esdeveniments a una massa invariante de quatre leptons (parelles electró-positró i muó-antimuó) de 125-126 GeV tant per ATLAS com per CMS. La figura 9 dona el resultat d'ATLAS, i la figura 10 ensenya un esdeveniment d'aquest tipus, també d'ATLAS.

L'evidència de les quatre distribucions de massa, obtingudes de forma independent pels dos experiments, ha convençut la comunitat dels físics de l'existència d'una nova partícula amb aquesta massa. Quantitativament, el nivell de confiança estadística dels resultats de cada experiment és aproximadament de  $5\sigma$ , equivalent a una probabilitat de  $3 \cdot 10^{-6}$  quan es tracti d'una fluctuació estadística. Quan els dos experiments inclouen a l'anàlisi canals de desintegració que no donen mesures precises de la massa, on s'observa un nombre d'esdeveniments per damunt dels fons esperats, el nivell de confiança del resultat de cada experiment puja al voltant de  $6\sigma$ .

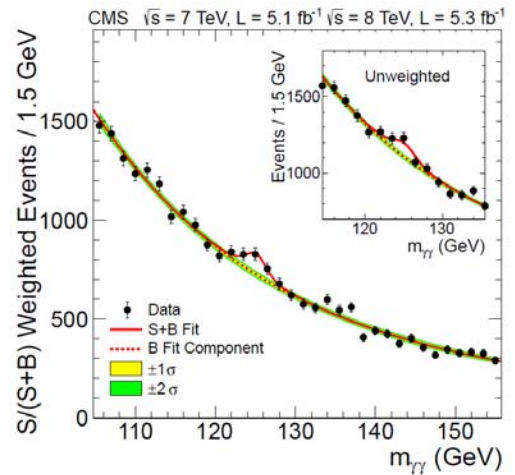


Figura 7: Massa invariante de dos fotons a les dades de CMS, a 7 i 8 TeV al centre de massa dels feixos. S'observa una acumulació d'esdeveniments que destaca del fons, a 125 GeV. A la distribució amb l'escala de masses més ample, els esdeveniments entren en funció del pes relatiu, com en el cas d'ATLAS. Les ratlles en color representen els errors en l'estimació del fons

També és important que no s'hagin trobat senyals consistents amb el Higgs del model estàndard a altres masses. ATLAS ho exclou per a masses de 111-122 GeV i 131-559 GeV, amb el 95% de confiança.

## 5 Hem trobat el bosó de Higgs?

Ara és crucial entendre si el que s'ha trobat és, o no, el bosó de Higgs.

La desintegració en  $\gamma\gamma$  i  $ZZ$  ensenya que es tracta d'un bosó neutre. La desintegració en  $\gamma\gamma$  indica que l'spin del bosó és 0 o 2 [18,19]; el camp de Higgs, escalar, correspon a l'spin 0.

La secció eficaç de producció i les fraccions de desintegracions en els canals presentats en aquest article també concorden, dins els errors, amb el Higgs del model estàndard. Fins ara, no hi ha cap indicació que no es tracti del bosó de Higgs del model estàndard. D'altra banda, hi ha models alternatius del trencament de la simetria electrofeble, que també requereixen un bosó neutre amb característiques no gaire diferents del que sabem, fins ara, del nou bosó.

Per tal d'esbrinar la naturalesa del nou bosó és necessari mesurar-ne les fraccions de desintegració en quarks i leptons  $\tau$ . La figura 11 ensenya que un bosó de Higgs de 126 GeV es desintegraria amb prou freqüència en aquests fermions. Avui dia, els resultats preliminars no permeten cap conclusió.

L'LHC prendrà dades fins a finals de 2012 -unes setmanes més que al programa inicial- per acumular més estadística. S'espera duplicar o triplicar les dades del juliol



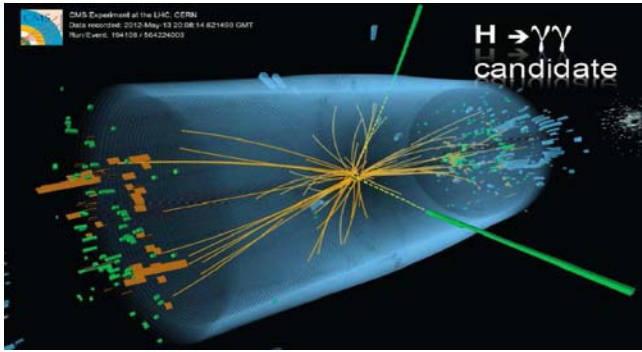


Figura 8: Un esdeveniment de CMS, amb dos fotons d'alta energia. El llarg de les línies verdes representa l'energia de les partícules detectades al calorímetre electromagnètic. Les dues més llargues són fotons amb una massa compatible amb l'acumulació a 125 GeV

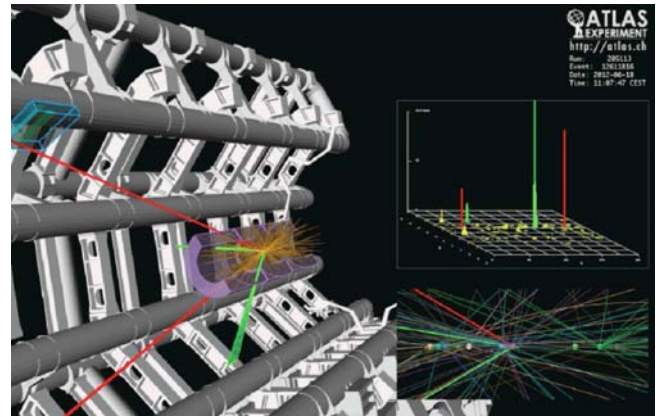


Figura 10: Un esdeveniment d'ATLAS, amb quatre leptons amb massa invariant de 123,9 GeV. La massa invariant de la parella electró-positró (en verd) és de 87,9 GeV, com per un Z real; la de la parella de muons, en vermell, és de 19,6 GeV. A la gràfica «lego», es veuen les energies al calorímetre electromagnètic, en verd, i a l'espectròmetre de muons, en vermell, en funció dels angles. En aquest esdeveniment hi ha dotze col·lisions de protons

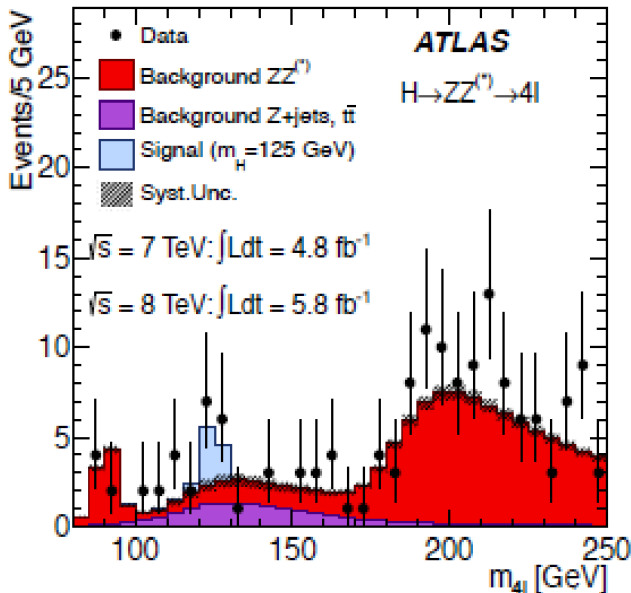


Figura 9: La massa invariant de quatre leptons, com s'observa amb les dades d'ATLAS. L'acumulació al voltant de 200 GeV representa la producció de dos bosons Z reals, mentre que els esdeveniments amb massa invariant per sota dels 100 GeV corresponen a la producció de dos Z virtuals. S'observa un senyal a 125 amb una massa invariant de 125 GeV, degut al nou bosó

de 2012, però aquest increment no serà necessàriament decisiu pel que fa a la naturalesa del nou bosó.

El 2013 i 2014, l'LHC es revisarà a fons, per tal de poder funcionar amb 13-14 TeV al centre de massa. En aquest nou règim els estudis sobre el nou bosó podran progressar molt més ràpidament.

## 6 Conclusió: què més ens espera?

Tant si el nou bosó és la partícula de Higgs, manifestació d'un camp escalar que omple tot l'espai, com si és un altre tipus de partícula -com per exemple una partícula composta, manifestació d'una altra interacció, activa a molt més alta energia-, aquesta descoberta és d'importància històrica per a la física.

Si es tracta del bosó de Higgs, s'obre tota una altra sèrie de problemes: la teoria ensenya que la seva massa pateix correccions degudes a processos virtuals que la farien pujar de molts ordres de magnitud. Doncs perquè ho observariem amb una massa molt més petita?

La solució d'aquest dilema podria venir d'un altre conjunt de teories, les teories supersimètriques, que postulen tot un altre zoo de partícules elementals, entre les quals hi hauria cinc bosons de Higgs. Les teories supersimètriques tenen bons candidats per a la matèria fosca, aquest tipus de matèria que no hi cap, al model estàndard, i que sembla ser necessària per explicar l'equilibri dinàmic de les galàxies, i altres observacions astronòmiques. Es busquen molt activament a les dades de l'LHC partícules supersimètriques i de matèria fosca, però fins ara no se n'han obtingut resultats. L'abast d'aquestes cerques serà molt més gran quan l'LHC assoleixi la seva energia de disseny, 13 o 14 TeV.

A un nivell encara més fonamental, sobre el camp de Higgs es va basar, a finals dels anys setanta, el concepte d'inflació, la teoria cosmològica més revolucionària dels últims cinquanta anys. Segons aquesta teoria, que sembla estar d'acord amb les observacions de la radiació còsmica de microones, abans del Big Bang l'espai hauria passat

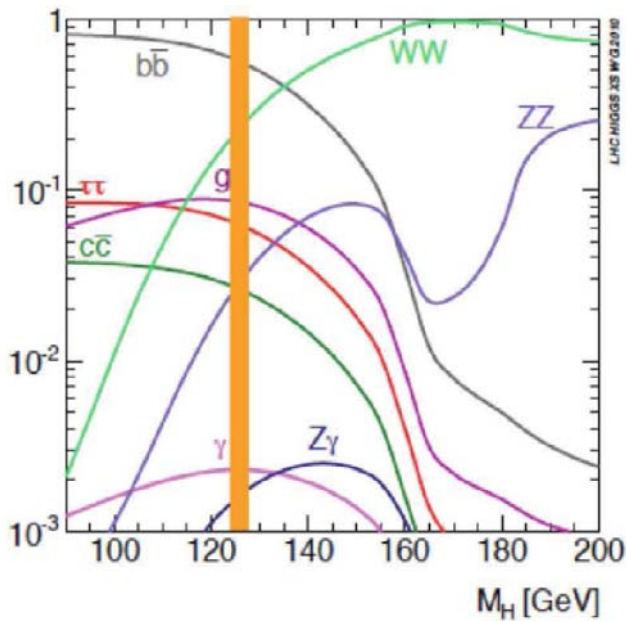


Figura 11: Les fraccions de desintegració del bosó de Higgs del model estàndard, en escala logarítmica, en funció de la seva massa. A la massa del nou bosó, la gran majoria de les desintegracions produeix parelles de quarks  $b$  o  $c$ , o de leptons

per una fase d'enorme expansió, potser d'uns 50 ordres de magnitud. La inflació resol diversos problemes cosmològics, i uns dels seus aspectes depenen de la forma del camp de Higgs.

En conclusió, la descoberta d'aquest nou bosó pot resultar la peça final del model estàndard, i pot ser el primer senyal del que hi ha més enllà.

És ben conegut que cada nova descoberta obre un nou món de preguntes. És fascinant que a la física de partícules cada nou conjunt de preguntes va sempre més al fons de la realitat.

## Bibliografia

- [1] S. L. GLASHOW, Partial-symmetries of weak interactions, *Nucl. Phys.*, **22**, 579 (1961).
- [2] S. WEINBERG, A model of leptons, *Phys. Rev. Lett.*, **19**, 1264 (1967).
- [3] A. SALAM, *Elementary Particle Physics: Relativistic Groups and Analyticity*, Proceedings of the Eighth Nobel Symposium, ed. N. Svartholm, Almqvist and Wiksell, Stockholm, (1968) p. 367.
- [4] F. ENGLERT, R. BROUT, Broken symmetry and the mass of gauge vector mesons, *Phys. Rev. Lett.*, **13**, 321 (1964).
- [5] P. W. HIGGS, Broken symmetries, massless particles and gauge fields, *Phys. Lett.*, **12**, 132 (1964).
- [6] P. W. HIGGS, Broken symmetries and the masses of gauge bosons, *Phys. Rev. Lett.*, **13**, 508 (1964).
- [7] G. S. GURALNIK, C. R. HAGEN, T. W. B. KIBBLE, Global conservation laws and massless particles, *Phys. Rev. Lett.*, **13**, 585 (1964).
- [8] L. EVANS, *The Large Hadron Collider, a Marvel of Technology*, EPFL Press, Lausanne, Switzerland, (2009).
- [9] L. EVANS, P. BRYANT, *LHC machine*, JINST 3, S08001 (2008).
- [10] N. ELLIS, T. S. VIRDEE, Experimental challenges in high luminosity collider physics, *Annu. Rev. Nucl. Part. Sci.*, **44**, 609 (1994).
- [11] ATLAS COLLABORATION, *Technical Proposal*, CERN-LHCC-1994-043 (1994).
- [12] CMS COLLABORATION, *Technical Proposal*, CERN-LHCC-1994-038 (1994).
- [13] ATLAS COLLABORATION, *The ATLAS Experiment at the CERN Large Hadron Collider*, JINST 3, S08003 (2008).
- [14] CMS COLLABORATION, *The CMS experiment at the CERN LHC*, JINST 3, S08004 (2008).
- [15] LHC COMPUTING GRID, *Technical Design Report*, CERN-LHCC-2005-024 (2005).
- [16] ATLAS COLLABORATION, Observation of a new particle in the search for the standard model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC, *Phys. Lett. B*, **30**, 716 (2012).
- [17] CMS COLLABORATION, Observation of a new boson at a mass of 125 GeV with the CMS experiment at the LHC, *Phys. Lett. B*, **30**, 716 (2012).
- [18] L. D. LANDAU, , *Dokl. Akad. Nauk.*, **60**, 207 (1948).
- [19] C. N. YANG, Selection rules for the dematerialization of a particle into two photons, *Phys. Rev.*, **77**, 242 (1950).