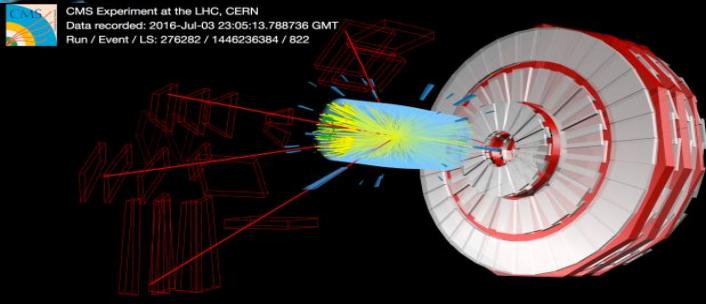
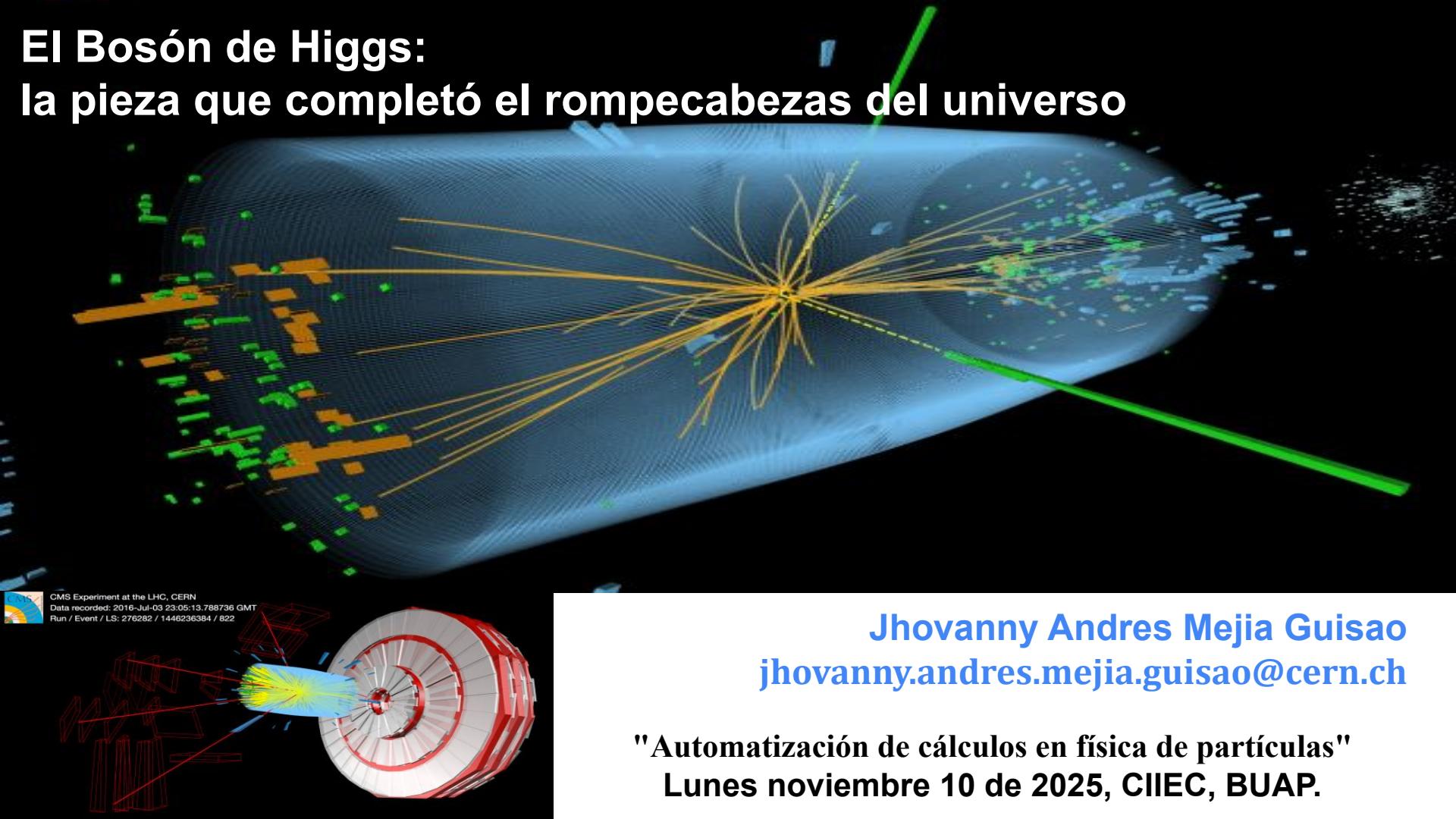


El Bosón de Higgs: la pieza que completó el rompecabezas del universo



Jhovanny Andres Mejia Guisao
jhovanny.andres.mejia.guisao@cern.ch

"Automatización de cálculos en física de partículas"
Lunes noviembre 10 de 2025, CIIEC, BUAP.

Contexto del Modelo Estándar y el papel del Bosón de Higgs



Modelo Estándar de Partículas

Describe partículas fundamentales y fuerzas excepto la gravedad, base de la física moderna.



Importancia del Bosón de Higgs

Explica cómo las partículas adquieren masa, esencial para la formación de la materia.



Descubrimiento Experimental

Detectado en 2012 en el Gran Colisionador de Hadrones, completando el Modelo Estándar.

Tabla periódica de partículas fundamentales o elementales

Componentes de la materia

Falta la gravedad



QUARKS	masa carga spin nombre	$\approx 2.4 \text{ MeV}/c^2$ 2/3 1/2 up	$\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2$ 2/3 1/2 charm	$\approx 172.44 \text{ GeV}/c^2$ 2/3 1/2 top	0 0 1 gluon	$\approx 125.09 \text{ GeV}/c^2$ 0 0 0 higgs
LEPTONS		$\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2$ -1/3 1/2 down	$\approx 95 \text{ MeV}/c^2$ -1/3 1/2 strange	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$ -1/3 1/2 bottom	0 0 1 photon	
		$\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$ -1 1/2 electron	$\approx 105.67 \text{ MeV}/c^2$ -1 1/2 muon	$\approx 1.7768 \text{ GeV}/c^2$ -1 1/2 tau	$\approx 91.19 \text{ GeV}/c^2$ 0 1 Z boson	SCALAR BOSONS
		$< 2.2 \text{ eV}/c^2$ 0 1/2 ν_e electron neutrino	$< 1.7 \text{ MeV}/c^2$ 0 1/2 ν_μ muon neutrino	$< 15.5 \text{ MeV}/c^2$ 0 1/2 ν_τ tau neutrino	$\approx 80.39 \text{ GeV}/c^2$ ± 1 1 W boson	GAUGE BOSONS VECTOR BOSONS

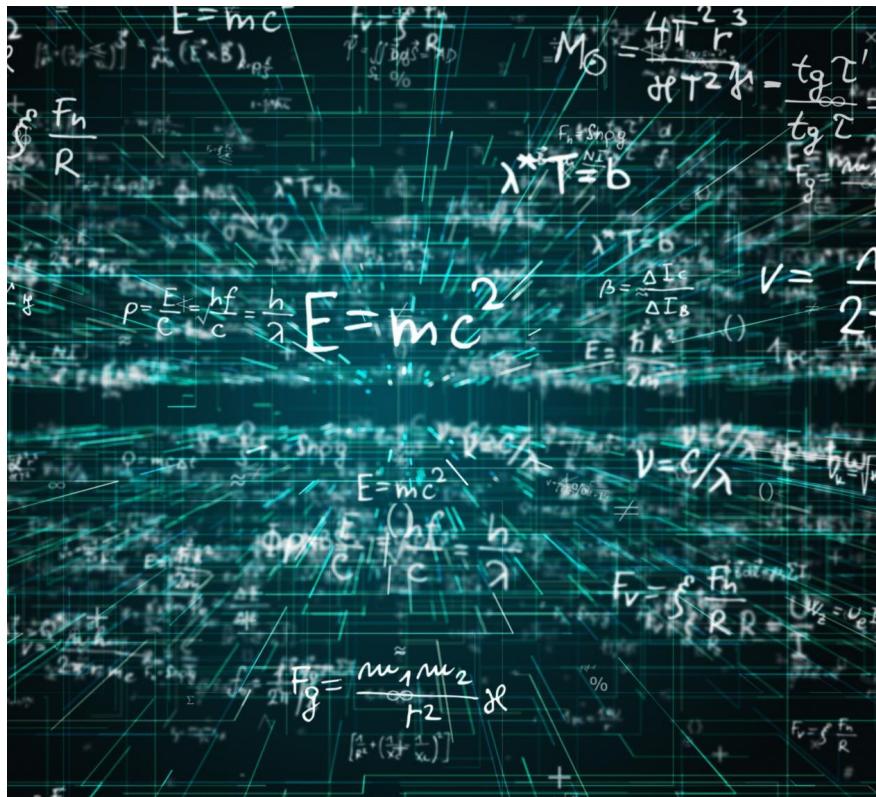
Interacción fuerte

"Da" masa a las demás partículas

Interacción electromagnética

Interacción débil

Propuestas teóricas de 1964



Ruptura espontánea de simetría

En 1964, la ruptura espontánea de simetría en teorías gauge explicó cómo las partículas fundamentales adquieren masa sin romper simetría.

Predicción del bosón de Higgs

Peter Higgs predijo la existencia del bosón de Higgs como manifestación cuántica del campo escalar que da masa a las partículas.

Mecanismo Brout–Englert–Higgs

El mecanismo [Brout–Englert–Higgs](#) es clave para el Modelo Estándar y fue confirmado experimentalmente en 2012 en el LHC.

Propuestas teóricas de 1964

<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.13.321>

BROKEN SYMMETRY AND THE MASS OF GAUGE VECTOR MESONS*

F. Englert and R. Brout

Faculté des Sciences, Université Libre de Bruxelles, Bruxelles, Belgium

(Received 26 June 1964)

[https://doi.org/10.1016/0031-9163\(64\)91136-9](https://doi.org/10.1016/0031-9163(64)91136-9)

BROKEN SYMMETRIES, MASSLESS PARTICLES AND GAUGE FIELDS

P. W. HIGGS

Tait Institute of Mathematical Physics, University of Edinburgh, Scotland

Received 27 July 1964

<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.13.508>

VOLUME 13, NUMBER 16

PHYSICAL REVIEW LETTERS

19 OCTOBER 1964

BROKEN SYMMETRIES AND THE MASSES OF GAUGE BOSONS

Peter W. Higgs

Tait Institute of Mathematical Physics, University of Edinburgh, Edinburgh, Scotland

(Received 31 August 1964)

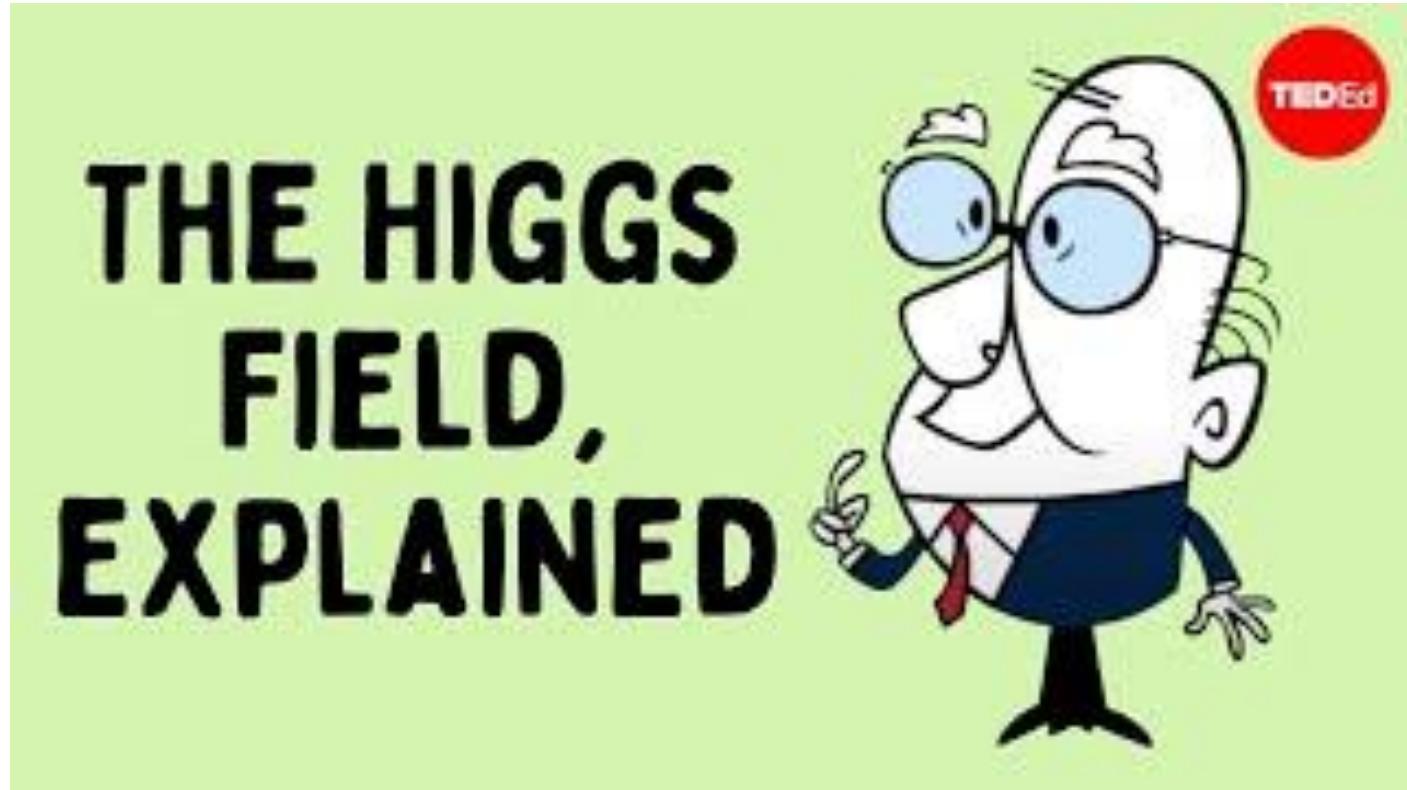
Propuestas teóricas de 1964

It is of interest to inquire whether gauge vector mesons acquire mass through interaction¹; by a gauge vector meson we mean a Yang-Mills field² associated with the extension of a Lie group from global to local symmetry.

The importance of this problem resides in the possibility that strong-interaction physics originates from massive gauge fields related to a system of conserved currents.³ In this note, we shall show that in certain cases vector mesons do indeed acquire mass when the vacuum is degenerate with respect to a compact Lie group.

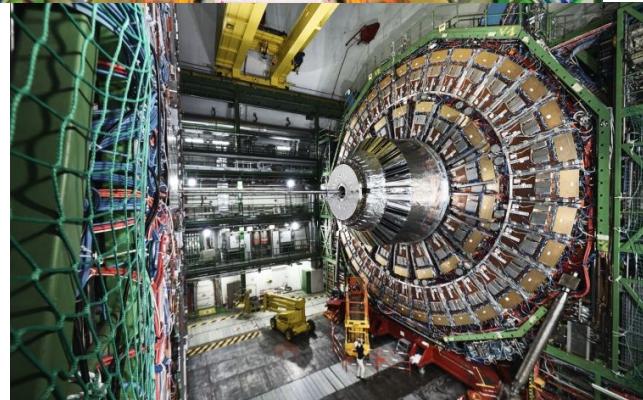
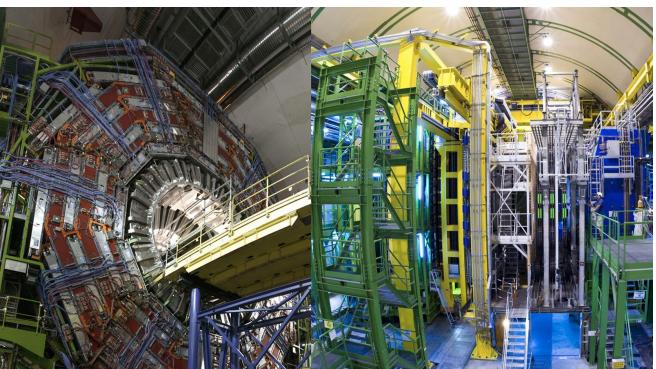
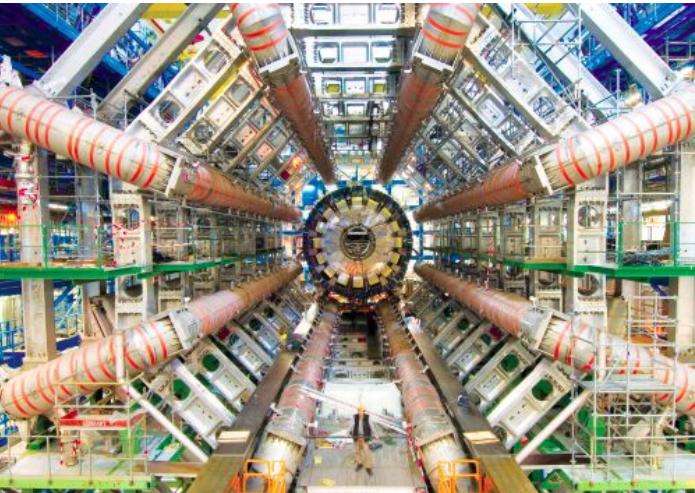
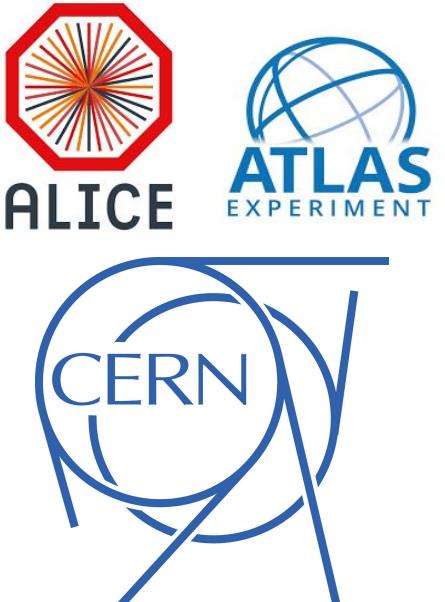
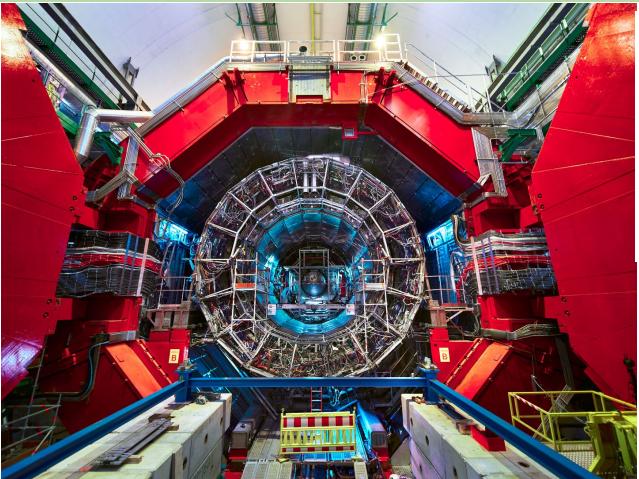
<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.13.321>

The Higgs Field, explained - Don Lincoln

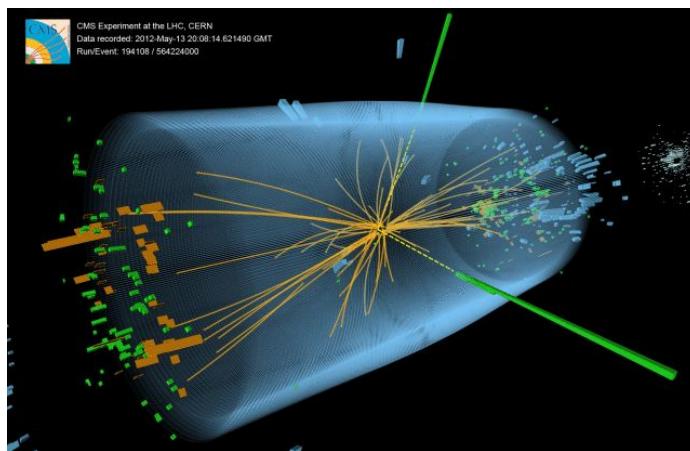
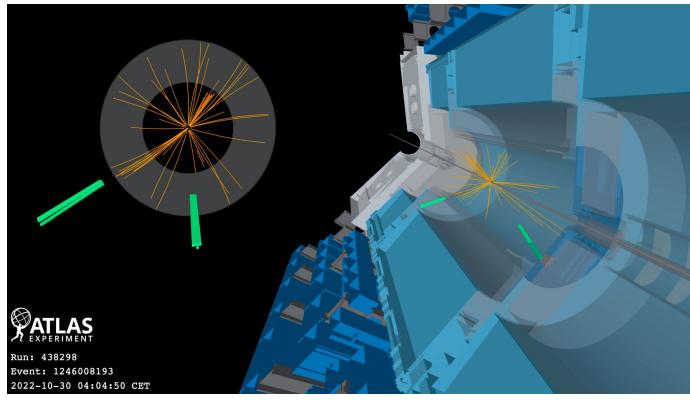


Famous Higgs analogy, illustrated: “Imagine a cocktail party...”

Large Hadron Collider (LHC) experiments



Gran Colisionador de Hadrones, Detectores ATLAS y CMS



El LHC colisiona protones a altas energías para recrear condiciones del universo temprano y estudiar partículas fundamentales.

Estos detectores gigantes observan productos de colisiones para encontrar señales del Bosón de Higgs y otras partículas.

Canal $H \rightarrow \gamma\gamma$

El canal $H \rightarrow \gamma\gamma$ ofrece una señal limpia con detección de fotones, clave para confirmar el Bosón de Higgs.

Distribución de masa invariante

El pico observado cerca de 125 GeV en dos fotones fue crucial para la confirmación del Bosón de Higgs.

CMS discovery paper

Observation of a new boson at a mass of 125 GeV with the CMS experiment at the LHC [☆]

CMS Collaboration*

CERN, Switzerland

This paper is dedicated to the memory of our colleagues who worked on CMS but have since passed away. In recognition of their many contributions to the achievement of this observation.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 31 July 2012

Received in revised form 9 August 2012

Accepted 11 August 2012

Available online 18 August 2012

Editor: W.-D. Schlatter

Keywords:

CMS

Physics

Higgs

ABSTRACT

Results are presented from searches for the standard model Higgs boson in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 7$ and 8 TeV in the Compact Muon Solenoid experiment at the LHC, using data samples corresponding to integrated luminosities of up to 5.1 fb^{-1} at 7 TeV and 5.3 fb^{-1} at 8 TeV. The search is performed in five decay modes: $\gamma\gamma$, ZZ, W^+W^- , $\tau^+\tau^-$, and bb. An excess of events is observed above the expected background, with a local significance of 5.0 standard deviations, at a mass near 125 GeV, signalling the production of a new particle. The expected significance for a standard model Higgs boson of that mass is 5.8 standard deviations. The excess is most significant in the two decay modes with the best mass resolution, $\gamma\gamma$ and ZZ; a fit to these signals gives a mass of $125.3 \pm 0.4(\text{stat.}) \pm 0.5(\text{syst.})$ GeV. The decay to two photons indicates that the new particle is a boson with spin different from one.

© 2012 CERN. Published by Elsevier B.V. Open access under [CC BY-NC-ND license](#).

<https://doi.org/10.1016/j.physletb.2012.08.021> Phys. Lett. B 716 (2012) 30

ATLAS discovery paper

Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC[☆]

ATLAS Collaboration*

This paper is dedicated to the memory of our ATLAS colleagues who did not live to see the full impact and significance of their contributions to the experiment.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 31 July 2012

Received in revised form 8 August 2012

Accepted 11 August 2012

Available online 14 August 2012

Editor: W.-D. Schlatter

ABSTRACT

A search for the Standard Model Higgs boson in proton-proton collisions with the ATLAS detector at the LHC is presented. The datasets used correspond to integrated luminosities of approximately 4.8 fb^{-1} collected at $\sqrt{s} = 7 \text{ TeV}$ in 2011 and 5.8 fb^{-1} at $\sqrt{s} = 8 \text{ TeV}$ in 2012. Individual searches in the channels

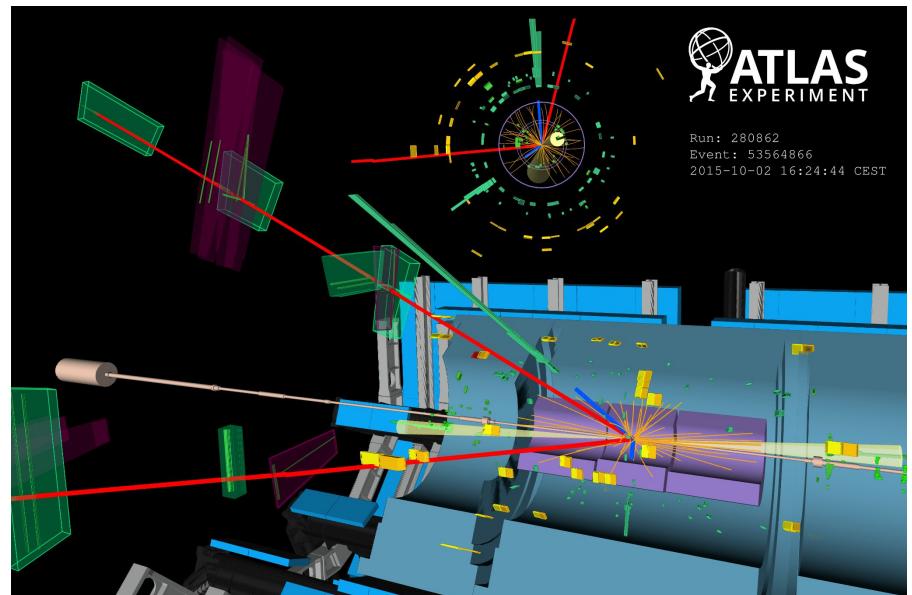
$H \rightarrow ZZ^{(*)} \rightarrow 4\ell$, $H \rightarrow \gamma\gamma$ and $H \rightarrow WW^{(*)} \rightarrow e\nu\mu\nu$ in the 8 TeV data are combined with previously published results of searches for $H \rightarrow ZZ^{(*)}$, $WW^{(*)}$, $b\bar{b}$ and $\tau^+\tau^-$ in the 7 TeV data and results from improved analyses of the $H \rightarrow ZZ^{(*)} \rightarrow 4\ell$ and $H \rightarrow \gamma\gamma$ channels in the 7 TeV data. Clear evidence for the production of a neutral boson with a measured mass of $126.0 \pm 0.4 \text{ (stat)} \pm 0.4 \text{ (sys)} \text{ GeV}$ is presented.

This observation, which has a significance of 5.9 standard deviations, corresponding to a background fluctuation probability of 1.7×10^{-9} , is compatible with the production and decay of the Standard Model Higgs boson.

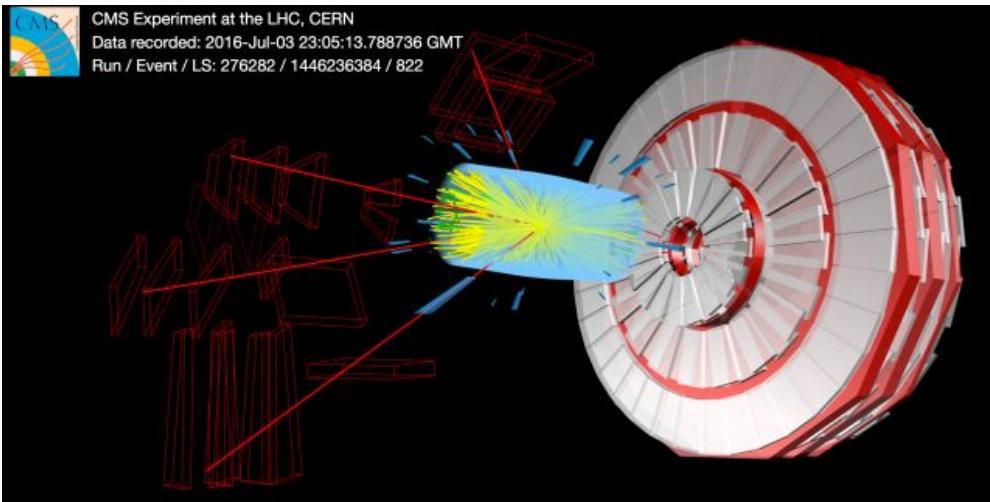
© 2012 CERN. Published by Elsevier B.V. Open access under [CC BY-NC-ND license](#).

<https://doi.org/10.1016/j.physletb.2012.08.020> Phys.Lett. B716 (2012) 1-29

Higgs boson decay to four leptons

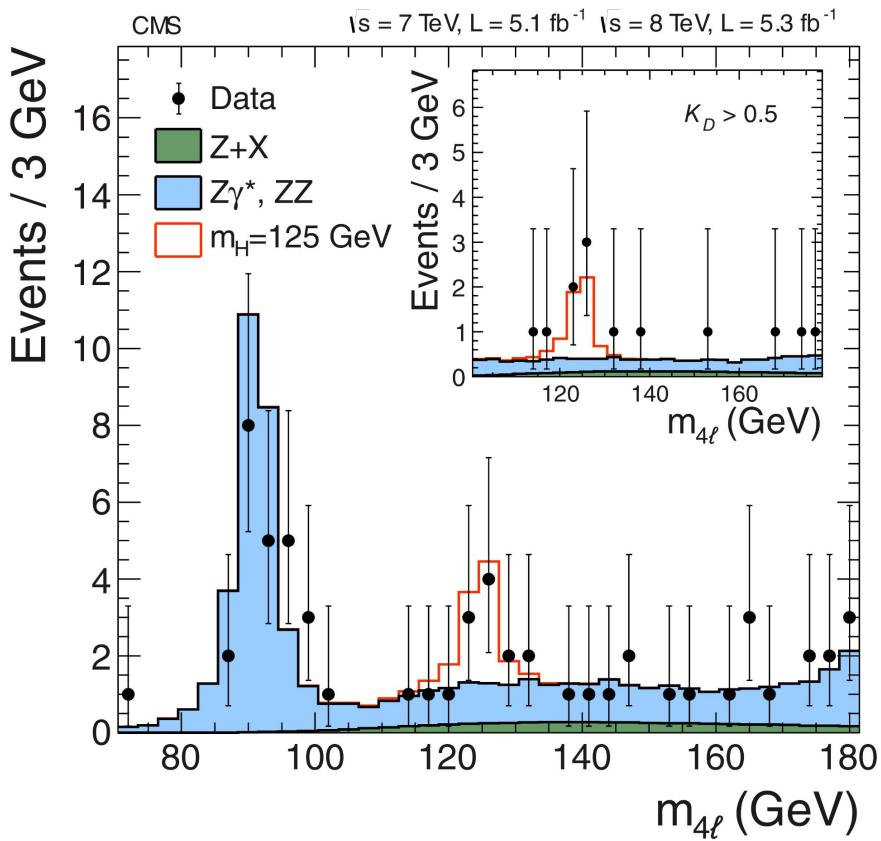
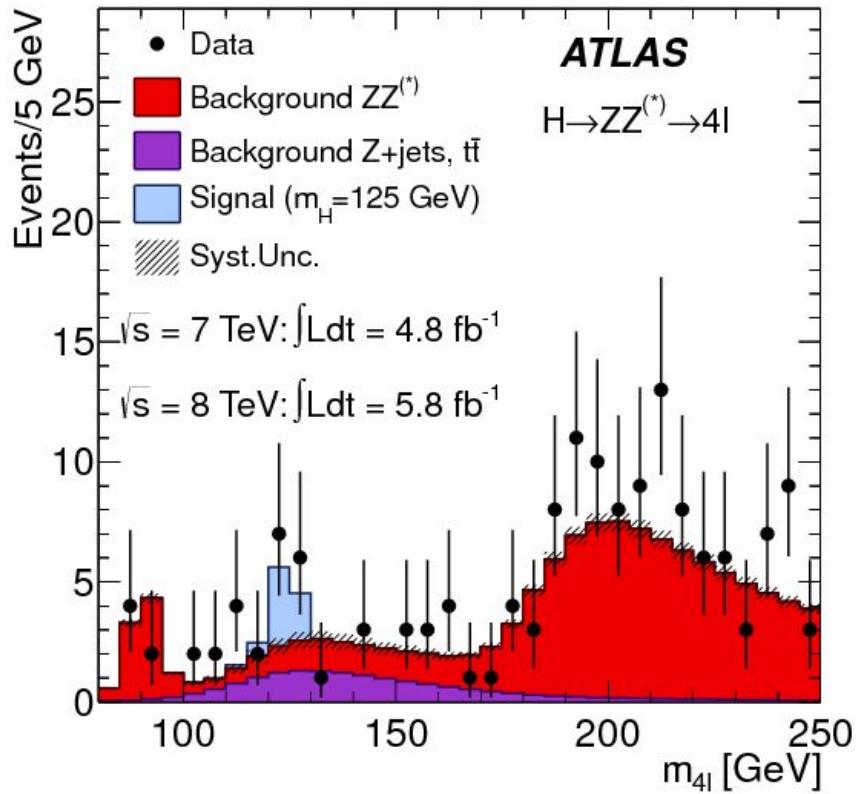


ATLAS Event Display: candidate Higgs boson decay to four leptons - [CERN Document Server](#)

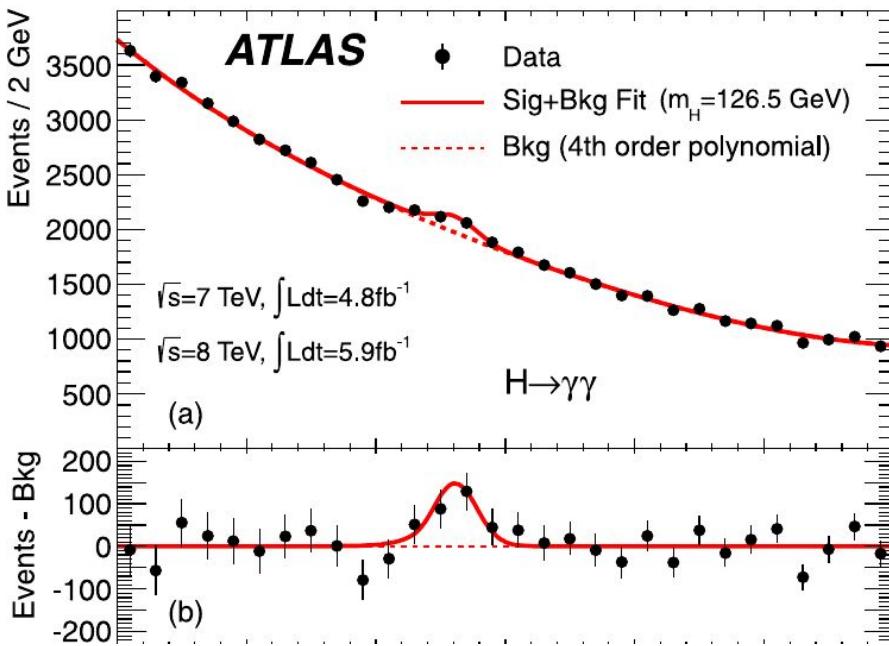
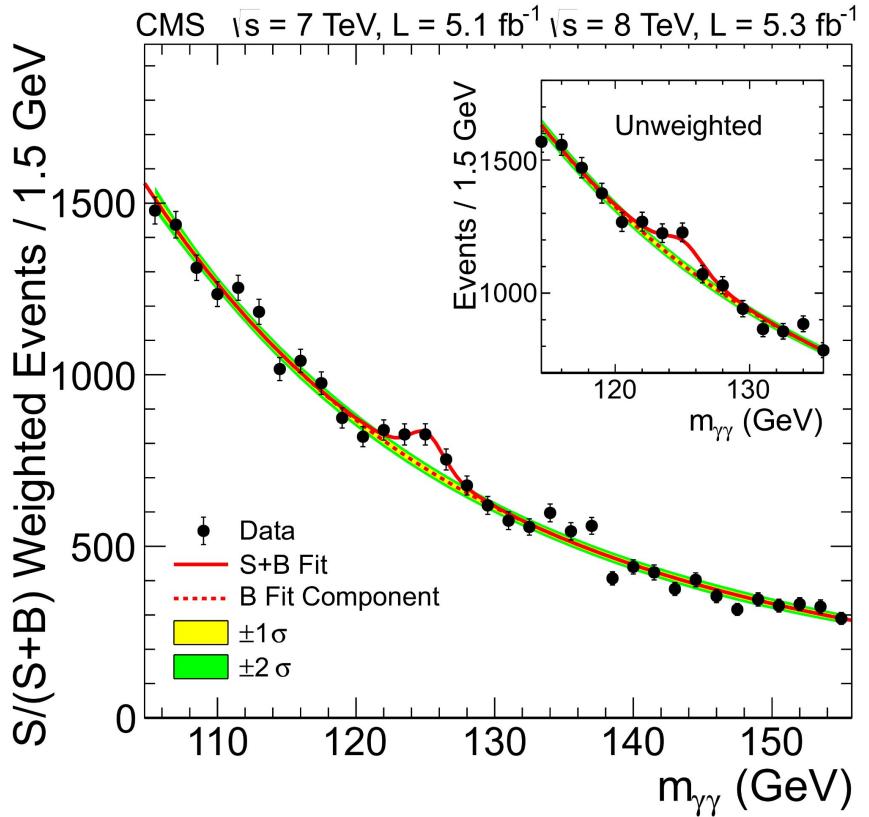


An event where two Z candidates are produced and each decay into two muons, each given by the red lines. This event has 27 reconstructed vertices. (**CMS** SketchUp model by Tai Sakuma) ([Image: CERN](#))

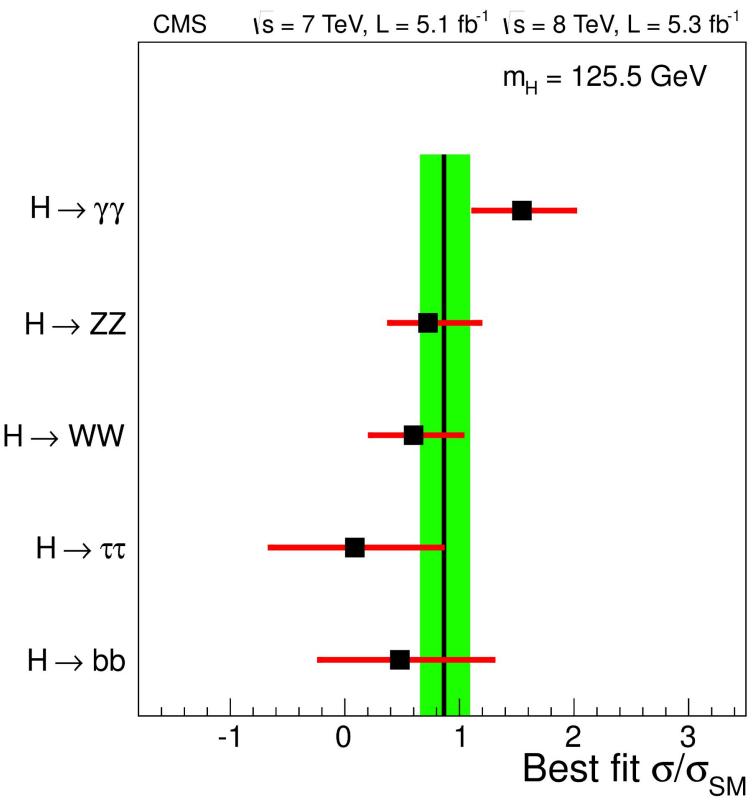
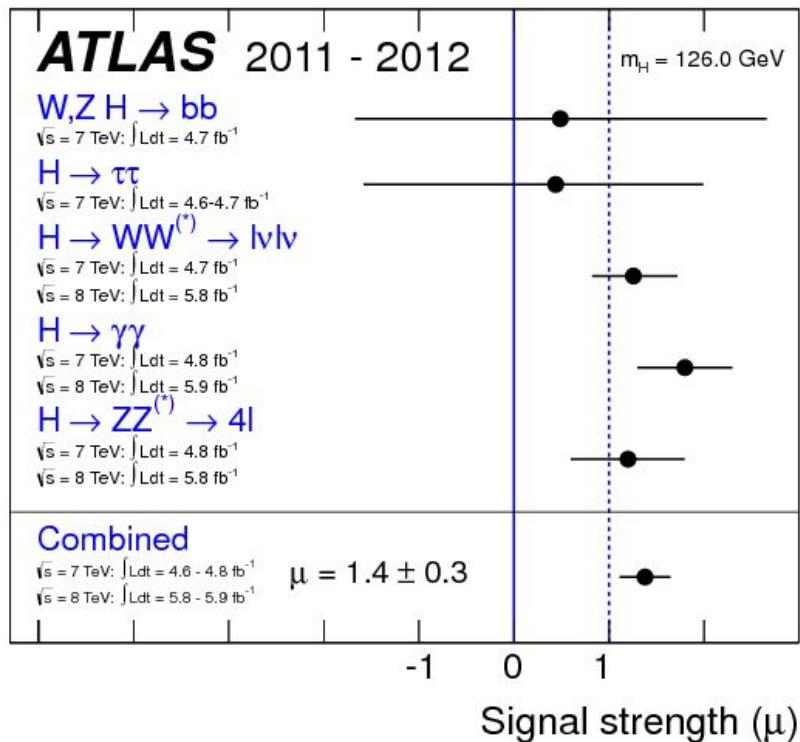
Higgs boson decay to four leptons



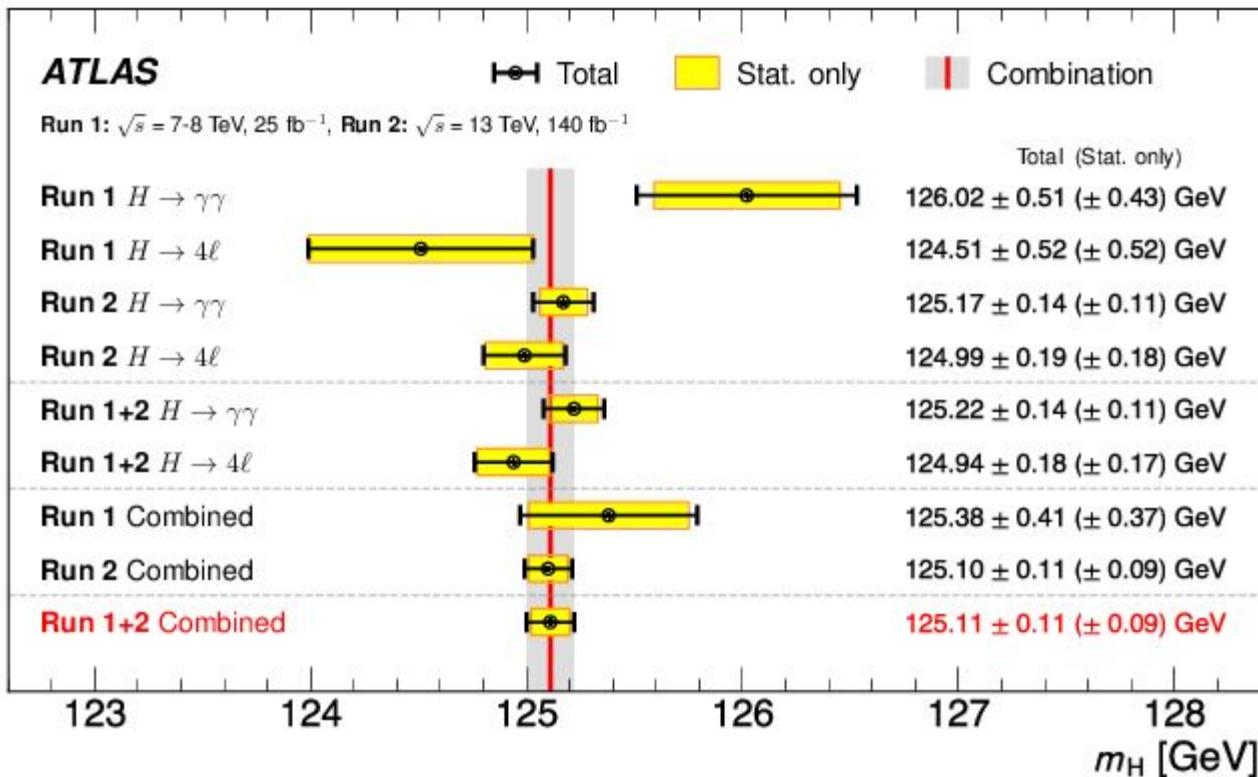
Higgs boson decay to two photon



The observed best-fit signal strength



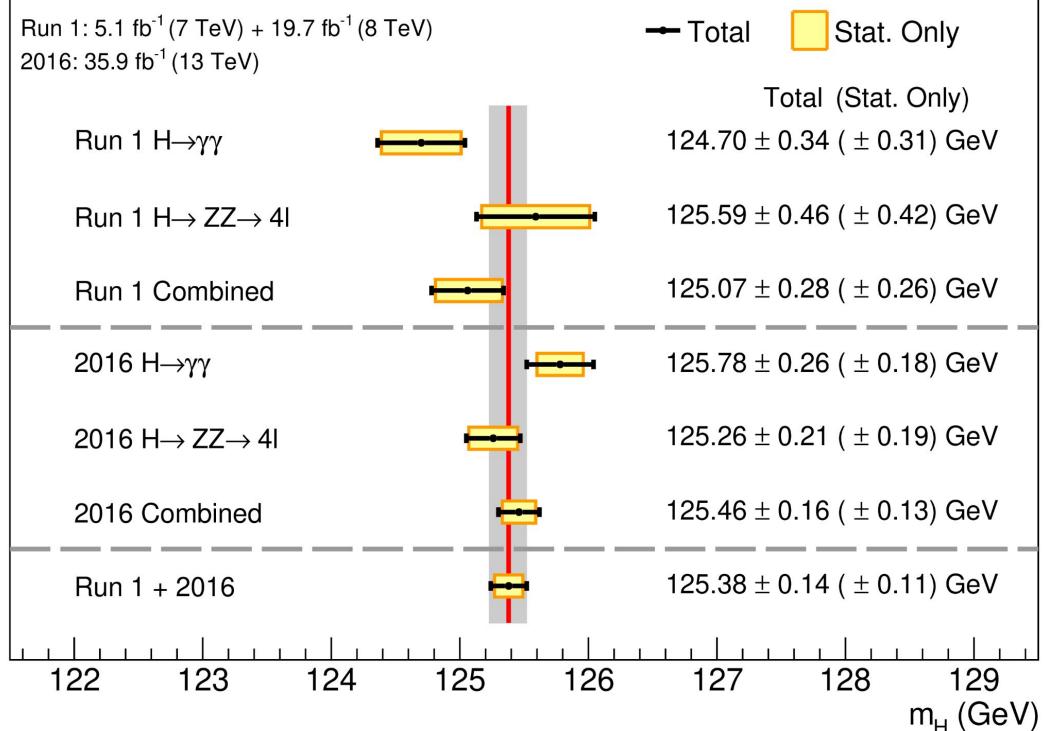
Combined measurement of the Higgs with the ATLAS detector



DOI: [10.1103/PhysRevLett.131.251802](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.131.251802)

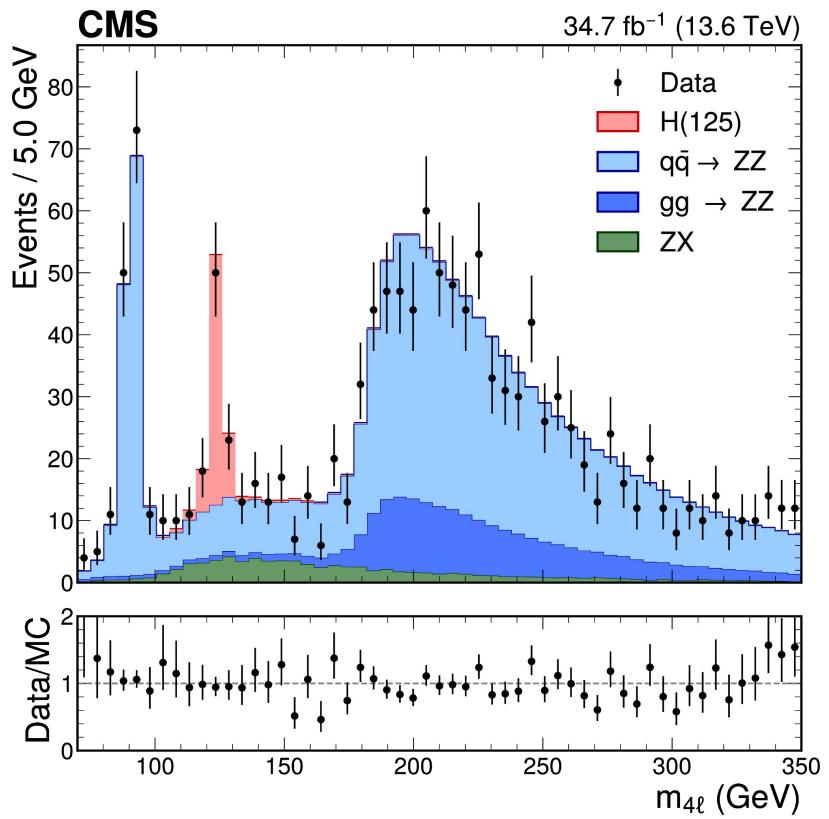
A measurement of the Higgs boson mass in the diphoton decay channel

CMS

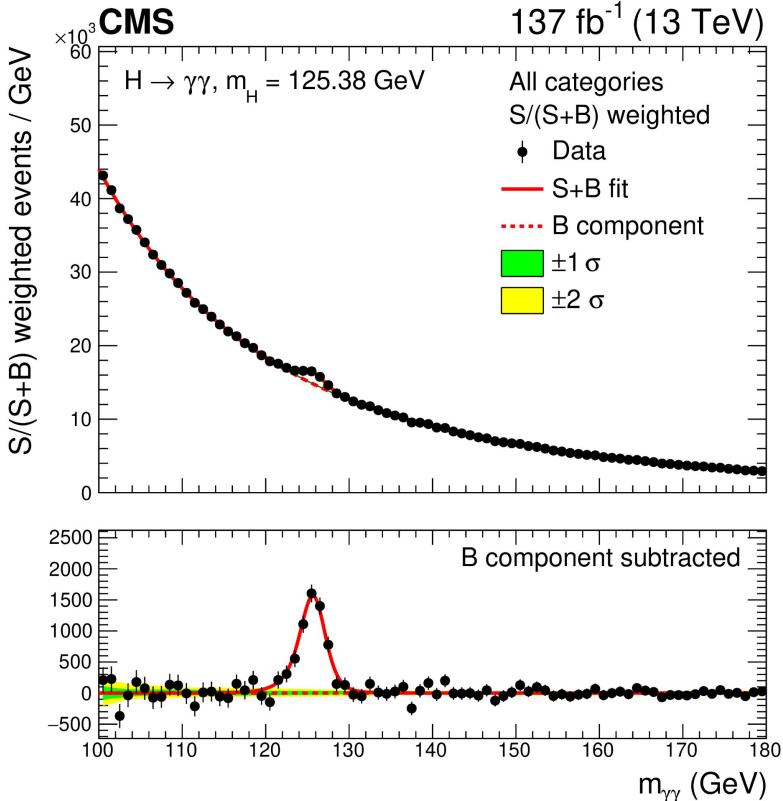


Phys. Lett. B 805 (2020) 135425

CMS. Higgs boson mass



[JHEP 05 \(2025\) 079](#)



[JHEP 07 \(2021\) 027](#)

Confirmación del Modelo Estándar y nuevas preguntas

Confirmación experimental del Bosón de Higgs

La detección del Bosón de Higgs en 2012 validó el Modelo Estándar y explicó el origen de la masa en partículas fundamentales.

Limitaciones del Modelo Estándar

El modelo no explica la materia oscura, energía oscura ni la gravedad, dejando preguntas abiertas en la física moderna.

Física más allá del modelo actual

Problemas como la jerarquía sugieren nuevas teorías como supersimetría(?) o dimensiones adicionales para explicar el universo.

Estudio continuo del Bosón de Higgs

La investigación sigue para comprender propiedades, **desintegraciones e interacciones** [del Bosón de Higgs con otras partículas.](#)

Resumen y perspectivas futuras

Importancia del Bosón de Higgs

El Bosón de Higgs es fundamental para explicar la masa en el Modelo Estándar de la física de partículas.

Rol del LHC y experimentos

El **LHC** y los experimentos **ATLAS** y **CMS** fueron cruciales para descubrir el Bosón de Higgs y avanzar en la física.

Importancia del canal $H \rightarrow \gamma\gamma$

El canal $H \rightarrow \gamma\gamma$ fue fundamental para la detección clara y precisa del Bosón de Higgs en experimentos del LHC.

Perspectivas futuras en física

El estudio del Higgs abre preguntas sobre materia oscura, energía oscura y teorías más allá del Modelo Estándar.

Nueva era en física

El descubrimiento marca el inicio de una nueva era de exploración en la física de partículas, **no su final**.

THANKS for listening!



GAUGE AND HIGGS BOSONS, PDG

H DECAY MODES		Fraction (Γ_i / Γ)	Scale Factor/ Conf. Level	$P(\text{MeV}/c)$
Mode				
Γ_1	WW^*	$(25.7 \pm 2.5) \%$		▼
Γ_2	ZZ^*	$(2.80 \pm 0.30) \%$		▼
Γ_3	$\gamma\gamma$	$(2.50 \pm 0.20) \times 10^{-3}$	62600	▼
Γ_4	$b\bar{b}$	$(53 \pm 8) \%$		▼
Γ_5	$e^+ e^-$	$< 3.0 \times 10^{-4}$	CL=95%	62600 ▼
Γ_6	$\mu^+ \mu^-$	$[2.6 \pm 1.3] \times 10^{-4}$	62600	▼
Γ_7	$\tau^+ \tau^-$	$[6.0^{+0.8}_{-0.7}] \%$	62575	▼
Γ_8	$Z\gamma$	$(3.4 \pm 1.1) \times 10^{-3}$	29392	▼
Γ_9	$Z\rho(770)$	$< 1.21 \%$	CL=95%	29384 ▼
Γ_{10}	$Z\rho(1020)$	$< 3.6 \times 10^{-3}$	CL=95%	29378 ▼
Γ_{11}	$Z\eta_c$		29276	▼
Γ_{12}	ZJ/ψ	$< 1.9 \times 10^{-3}$	CL=95%	29267 ▼
Γ_{13}	$Z\psi(2S)$	$< 6.6 \times 10^{-3}$	CL=95%	29214 ▼
Γ_{14}	$J/\psi\gamma$	$< 2.0 \times 10^{-4}$	CL=95%	62561 ▼
Γ_{15}	$J/\psi J/\psi$	$< 3.8 \times 10^{-4}$	CL=95%	62523 ▼
Γ_{16}	$\psi(2S)\gamma$	$< 1.05 \times 10^{-3}$	CL=95%	62546 ▼
Γ_{17}	$\psi(2S)J/\psi$	$< 2.1 \times 10^{-3}$	CL=95%	62507 ▼
Γ_{18}	$\psi(2S)\psi(2S)$	$< 3.0 \times 10^{-3}$	CL=95%	62491 ▼
Γ_{19}	$\Upsilon(1S)\gamma$	$< 2.5 \times 10^{-4}$	CL=95%	62242 ▼
Γ_{20}	$\Upsilon(1S)\Upsilon(1S)$	$< 1.7 \times 10^{-3}$	CL=95%	61881 ▼
Γ_{21}	$\Upsilon(2S)\gamma$	$< 4.2 \times 10^{-4}$	CL=95%	62199 ▼
Γ_{22}	$\Upsilon(3S)\gamma$	$< 3.4 \times 10^{-4}$	CL=95%	62172 ▼

Simetrías gauge.

Resumen y Puntos Clave

¿Qué son? Son simetrías que permiten elegir sistemas de referencia o "calibraciones" de manera independiente en cada punto del espacio-tiempo.

¿Por qué son importantes? Porque generan las interacciones (fuerzas) de la naturaleza. La exigencia de una simetría gauge obliga a la existencia de un campo de fuerza.

Los "mensajeros": Las partículas portadoras de estas fuerzas (fotones, gluones, bosones W/Z) se llaman bosones gauge.

Belleza y Potencia: Este principio es el corazón del Modelo Estándar de la física de partículas, *la teoría más precisa y probada experimentalmente que tenemos*.

Derivada covariante

¿Por qué la derivada covariante es clave?

En una teoría gauge, la derivada ordinaria no sirve porque no respeta la simetría local.

Se introduce la **derivada covariante**: $D_\mu = \partial_\mu + igW_\mu + ig'B_\mu$ (para el caso electrodébil).

Esta construcción asegura que las ecuaciones son invariantes bajo transformaciones gauge, **incluso después de la ruptura espontánea**.

Cuando el campo de Higgs adquiere un valor distinto de cero en el vacío, los términos de masa para W y Z aparecen **de manera natural** en el lagrangiano, sin romper la simetría gauge en la formulación.

Fundamentos del mecanismo de Higgs

BOSÓN DE HIGGS: EXPLICACIÓN TÉCNICA

- El problema original
- El mecanismo de *Higgs*
- Derivada covariante y masa

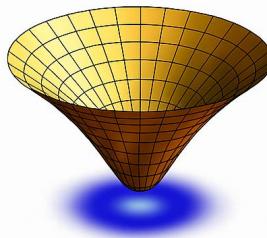
$$D_\mu = \partial_\mu + igW_\mu + igB_\mu$$

$$m_W = \frac{1}{2}gv \quad m_Z = \frac{1}{2}g^2 + g^2v$$

- El bosón de Higgs

Excitación con a masa

$$m_H = \sqrt{2\lambda}v$$



El problema original

Las teorías gauge (como la electrodébil) requieren simetría para ser renormalizables. Si añadimos términos de masa directamente para los bosones W y Z, rompemos esa simetría y la teoría deja de ser consistente.

El mecanismo de Higgs

Introducimos un **campo escalar complejo** (el campo de Higgs) con un potencial en forma de sombrero mexicano.
donde $\mu^2 < 0$ produce un mínimo no en cero.

El campo adquiere un **valor esperado en el vacío (VEV)** distinto de cero: $\langle \phi \rangle = v \neq 0$.

Esto rompe la simetría **espontáneamente**, pero las ecuaciones siguen siendo invariantes gauge.

Derivada covariante y masa

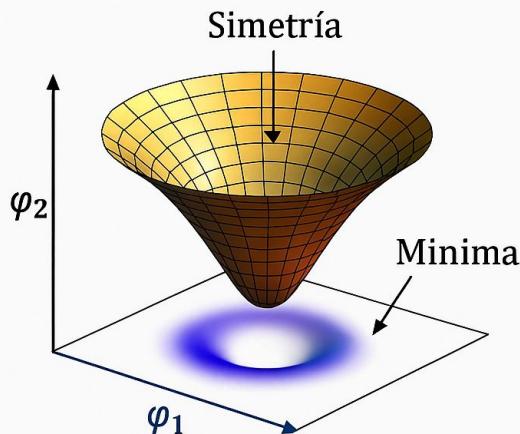
El lagrangiano incluye la derivada covariante.

Cuando el Higgs toma su VEV, aparecen términos proporcionales a v que actúan como masas para W y Z, fundamentales en la interacción electrodébil.

Ruptura Espontánea de Simetría

RUPTURA ESPONTÁNEA DE SIMETRÍA

- Las ecuaciones pueden tener simetría, pero el estado fundamental puede no ser simétrico
- El campo de Higgs tiene un valor distinto de cero en el vacío
- Analogía: Pelota en la cima de un “sombrero mexicano”, que cae espontáneamente a un punto asimétrico



- En física de campos, el vacío es el estado de menor energía. Para el Higgs, ese mínimo no está en cero, sino en un valor distinto, lo que rompe la simetría espontáneamente.”
- Esto permite que las partículas adquieran masa sin romper la estructura matemática.
- La simetría se mantiene en las ecuaciones, pero no en la configuración del universo.

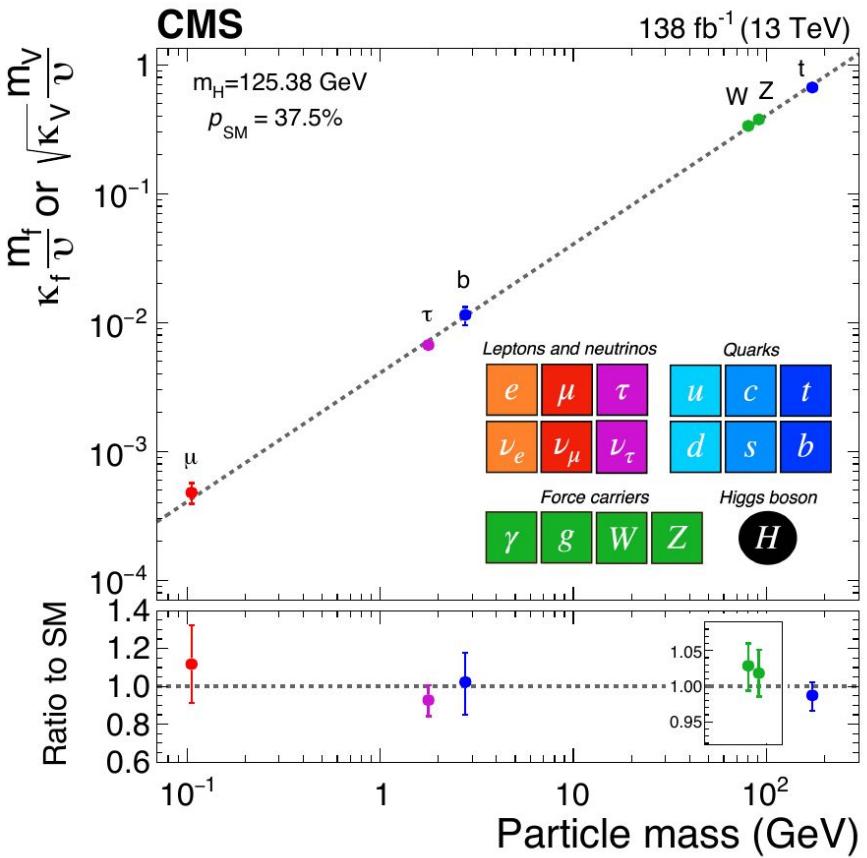
Lectura recomendada, CERN Courier: [The thrill of the chase](#)

Mediciones de acoplamientos del bosón

Summary of the fits for deviations in the coupling for the generic five-parameter model not effective loop couplings, expressed as function of the particle mass:

<https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/CMSPublic/PhysicsResultsHIG>

Fermión	Masa (GeV)	$g_{\text{eff}} = m_f / v$
Electrón	0.000511	0.000002
Muón	0.10566	0.000430
Tau	1.77686	0.007223
Quark bottom	4.18	0.016992
Quark top	172.76	0.702276



Masa del fermión, y el término lineal da el acoplamiento

El Lagrangiano Yukawa es:

$$\mathcal{L}_{\text{Yukawa}} = -y_f \bar{\psi}_L \phi \psi_R + \text{h.c.}$$

Cuando reemplazas $\phi(x) = v + h(x)$:

$$\mathcal{L}_{\text{Yukawa}} \rightarrow -y_f \bar{\psi}_L (v + h(x)) \psi_R$$

Esto genera:

- Un término constante:

$$-y_f v \bar{\psi} \psi \rightarrow \text{masa del fermión: } m_f = \frac{y_f v}{\sqrt{2}}$$

- Un término lineal en $h(x)$:

$$-y_f h(x) \bar{\psi} \psi \rightarrow \text{interacción Higgs-fermión}$$

Potencial del Higgs

$$V(\phi) = \mu^2 \phi \phi + \lambda (\phi \phi)^2$$

$$\phi(x) = v + h(x)$$

Término cuadrático
en h

Masa del Higgs

$$m_H^2 = 2\lambda v^2$$

Término de Yukawa

$$\mathcal{L}_{\text{Yukawa}_\mu} = -y_f \bar{\psi} \phi \nu + \text{h.c.}$$

$$\mathcal{L}_{\text{Yukawa}_u} \rightarrow -y_f (v + h(x)) \nu_R$$

Término constante

Término lineal en h

Masa del Acoplamiento

$$m_f^2 = \frac{y_f}{\sqrt{2}} \quad -y_f h(x)$$