

Itinerario del viaggio...

1. Le forze della Natura
2. Teoria quantistica dei Campi
3. Il Modello “Standard”
4. Il mistero dell’Higgs
5. Oltre il Modello Standard?

1

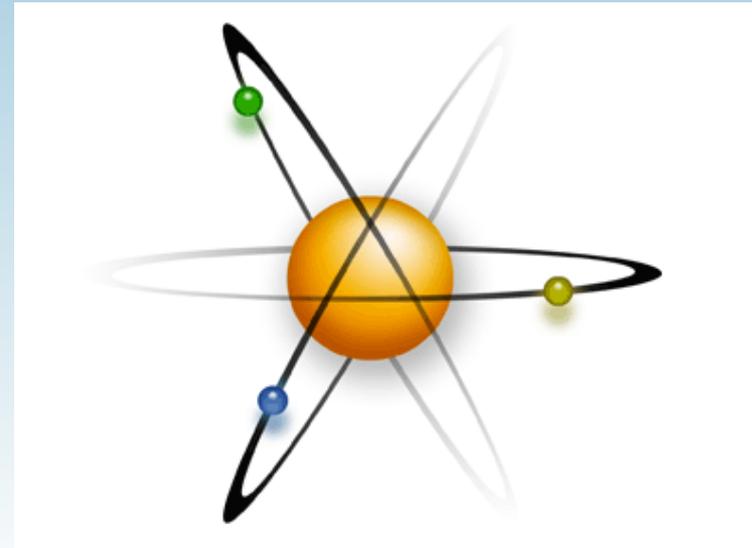
Le forze della Natura

Le 4 interazioni fondamentali

- ➔ **Elettromagnetiche**
- ➔ **Deboli**
- ➔ **Forti**
- ➔ **Gravitazionali**

Interazione elettromagnetica

- **tiene insieme atomi e molecole**
- **spiega tutti i fenomeni em & ottici**
- **raggio d'azione infinito**
- **mediata dal fotone (QED)**



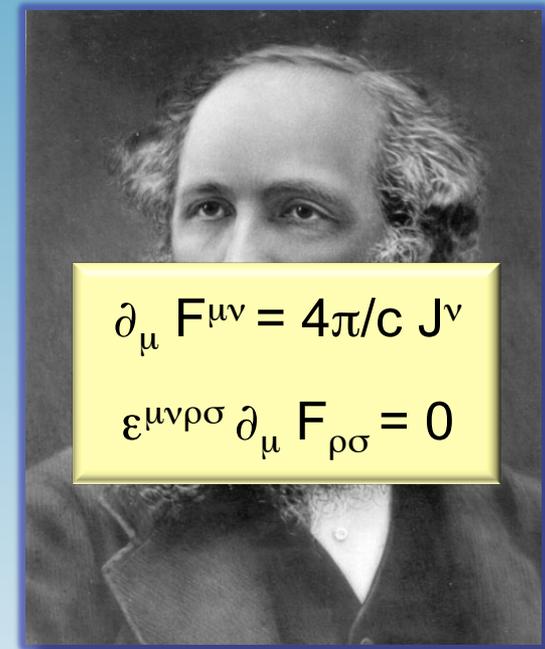
EM: Le equazioni di Maxwell

$$\text{I. } \nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

$$\text{II. } \nabla \times \mathbf{E} = - \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

$$\text{III. } \nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

$$\text{IV. } c^2 \nabla \times \mathbf{B} = \frac{\mathbf{j}}{\epsilon_0} + \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$$



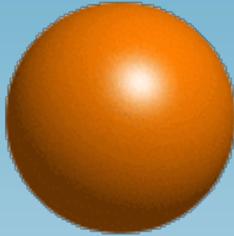
$$\partial_\mu F^{\mu\nu} = 4\pi/c J^\nu$$

$$\epsilon^{\mu\nu\rho\sigma} \partial_\mu F_{\rho\sigma} = 0$$

Unificando elettricità e magnetismo, Maxwell spiega la natura della luce: l'ottica diventa una branca dell'elettromagnetismo.

Con le sue equazioni inizia l'abbandono del meccanicismo in fisica.

Le interazioni deboli



Decadimenti β



Decadimento del muone

Le interazioni deboli

- Sono all'origine della radioattività naturale
- Sono deboli, ma solo a bassa energia
- Mediate da W e Z (massa pari a ~80 e 90 masse del protone)
- Distinguono tra particelle destrorse e sinistrorse (violano la parità)

Le 4 interazioni fondamentali

- ➔ Elettromagnetiche
 - ➔ Deboli
 - ➔ **Forti**
 - ➔ Gravitazionali
- } Elettrodeboli

Le interazioni forti

- tengono insieme i nuclei atomici
- confinano i quark nei protoni e neutroni
- sono mediate da gluoni (QCD)
- si indeboliscono a piccole distanze

Le 4 interazioni fondamentali

- ➔ Elettromagnetiche
- ➔ Deboli
- ➔ Forti
- ➔ **Gravitazionali**

Sono molto molto più deboli delle altre interazioni

Relatività generale
Einstein 1916

Non esiste una teoria quantistica
consistente della gravitazione

Le 4 interazioni fondamentali



Tutte le interazioni sono dettate da un **principio di simmetria**
(*simmetria di gauge*)

E' possibile unificare tutte le forze utilizzando simmetrie più ampie?

2

Teoria quantistica dei Campi

Teoria quantistica dei campi

- Combina tre fondamenti della fisica moderna:
 - La meccanica quantistica
 - La teoria della relatività
 - Il concetto di “campo”
- Unita al principio di **simmetria**, descrive le interazioni delle particelle elementari

Meccanica quantistica

Descrive il mondo dell'estremamente piccolo caratterizzato da:

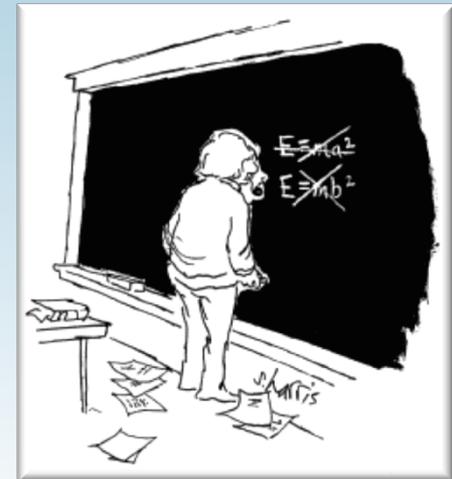
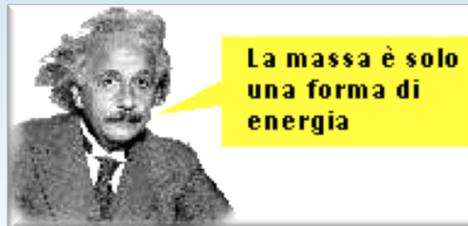
- **Incertezza intrinseca:** c'è un limite alla precisione con cui si possono misurare simultaneamente certe grandezze. Ad esempio, se si misura un qualsiasi oggetto, e se ne determina la componente $p_x = mv_x$ del suo impulso con una incertezza Δp_x , non si potrà, allo stesso tempo, conoscere la sua posizione x più accuratamente che $\Delta x = (h/2\pi) / \Delta p_x$. Questo è il principio di indeterminazione di Heisenberg. La costante $h = 6.626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ è chiamata costante di Planck.
- **Interpretazione comune di onde e particelle:** le prime possono comportarsi come le seconde, e viceversa.

Teoria della relatività speciale

Descrive il moto modificando le previsioni della meccanica newtoniana tanto più le velocità sono prossime a quella della luce:

$$c \sim 300000 \text{ km/sec}$$

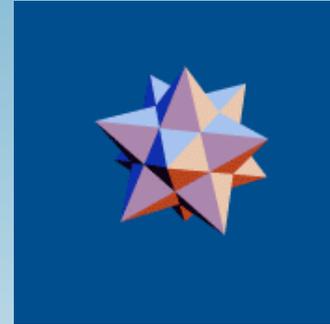
- La velocità della luce nel vuoto c è finita e non dipende dal moto della sorgente. E' la velocità limite.
- La massa "efficace" aumenta con la velocità. Energia e massa "efficace" sono la stessa cosa.



Simmetrie

In fisica parliamo di *simmetria* quando un sistema è invariante rispetto a una certa trasformazione (per es di coordinate).

Le simmetrie possono essere *discrete*,



oppure *continue*



Ad ogni simmetria continua corrisponde la conservazione di una grandezza fisica. **Le simmetrie dello spazio-tempo determinano le costanti del moto** (per esempio: invarianza per traslazioni → conservazione della quantità di moto).

“La simmetria detta l’interazione”

C.N. Yang

Oggi pensiamo che la simmetria determini
le leggi fondamentali della fisica

La moderna teoria delle interazioni tra particelle
elementari è una teoria quantistica dei campi di

“gauge”

in cui l’invarianza è rispetto a rotazioni locali
generalizzate in uno spazio “interno”

Un procedimento simile sta alla base della
relatività generale





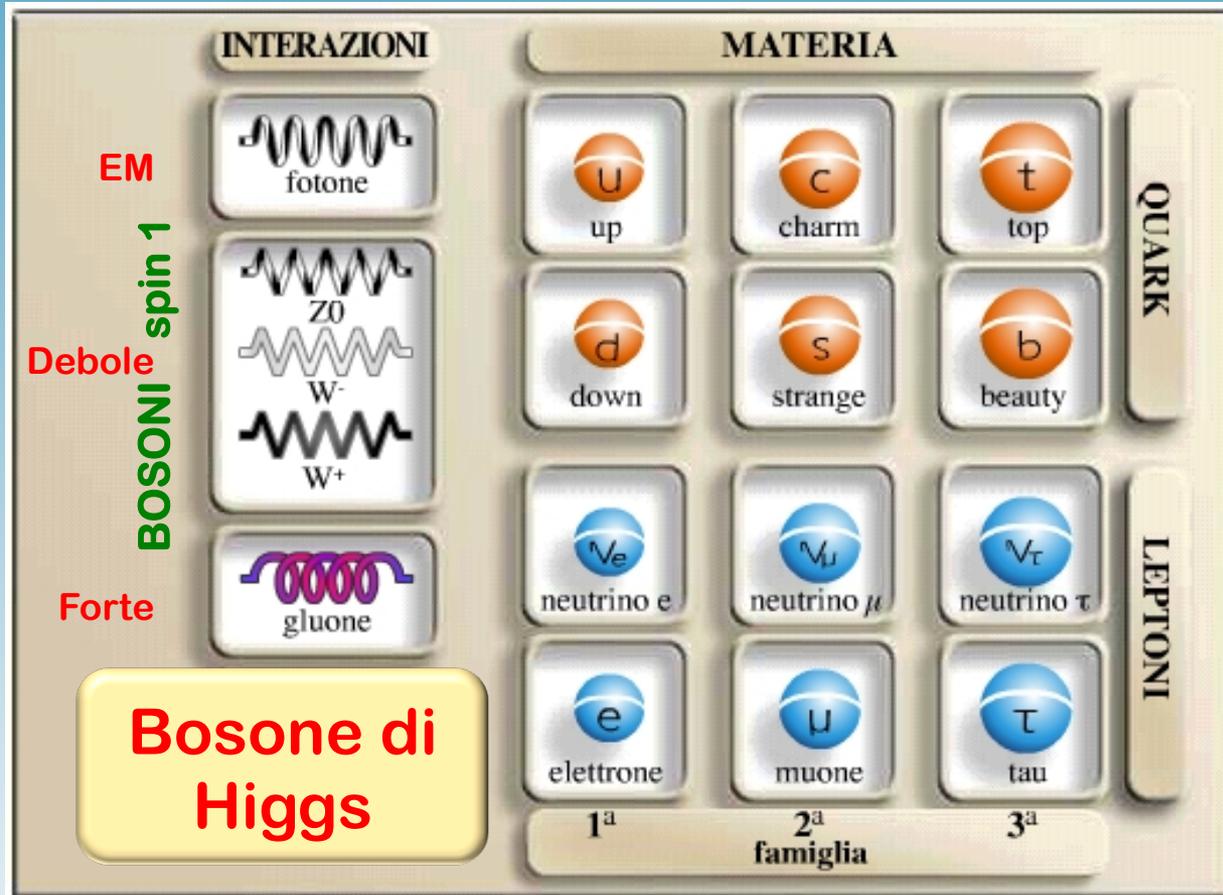
**C'è qualcosa di
chiaro fin qui?**

Caption
City

3

Il Modello “Standard”

Il Modello Standard

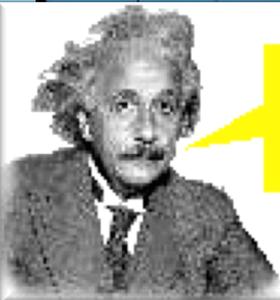


(non c'è, ad oggi, alcuna evidenza di una struttura dei leptoni e dei quark)

Tre generazioni:

lo zoo delle particelle ridotto a mattoni fondamentali

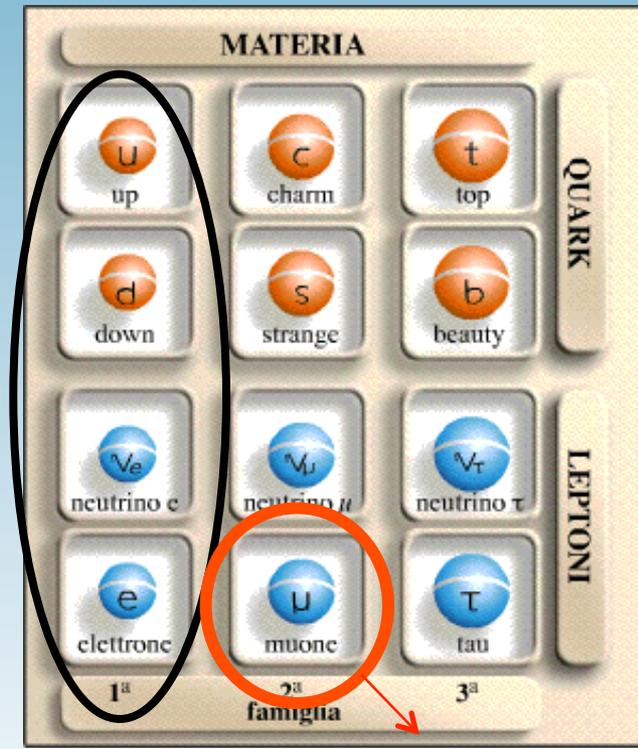
Mesons $q\bar{q}$
Mesons are bosonic hadrons.
There are about 140 types of mesons.



La massa è solo una forma di energia

η_c	eta-c	$c\bar{c}$	0	2.980	0
----------	-------	------------	---	-------	---

A prima vista solo la prima famiglia entra nella vita di tutti i giorni



L'unità energetica di base è l'electron Volt (eV) che è la variazione di energia potenziale di un singolo elettrone che attraversa una differenza di potenziale di 1 Volt.

nei raggi cosmici

Per osservare i mattoni più pesanti sono necessari gli acceleratori

Nuove particelle? 2 strade complementari:

Produzione diretta
“relativistic way”

ma anche

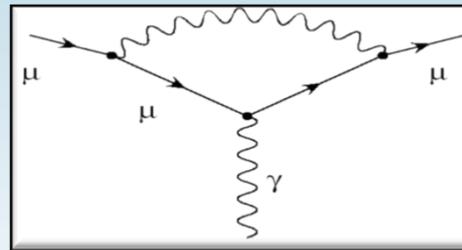
Ricerca indiretta:
“quantum way”

Le particelle pesanti producono effetti virtuali (“correzioni quantistiche”) piccoli, ma che possono essere molto utili:



Esempio: il momento magnetico anomalo del muone, misurato con la fantastica precisione di 0.5 parti per milione (!), è sensibile a possibili effetti di fisica al di là del MS

Diagramma di Feynman →



Segnali indiretti hanno talvolta anticipato scoperte dirette (x es: il quark top):

Test di precisione ed il quark top

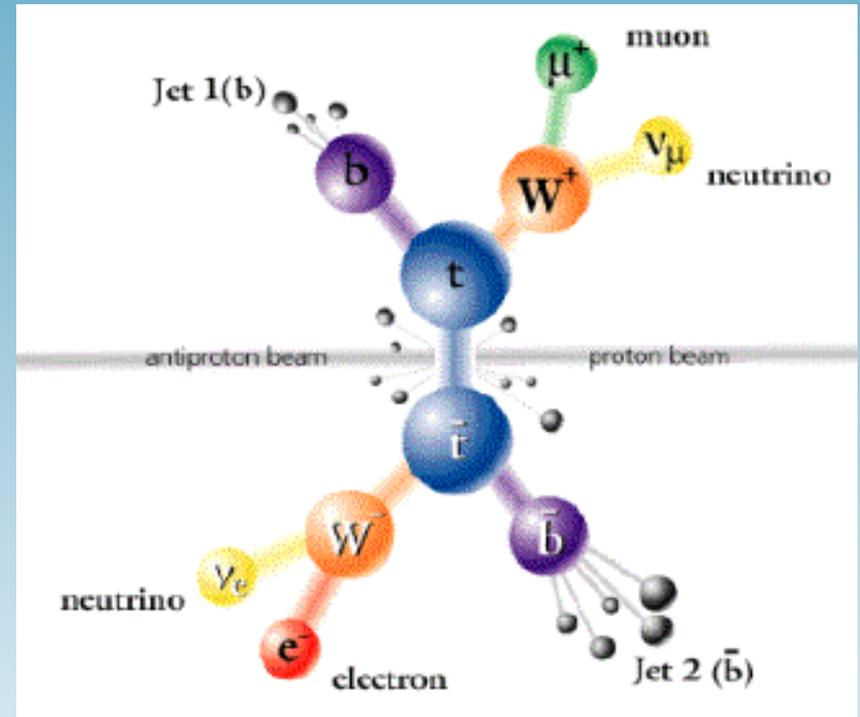
Nov 1994: i fit alle misure di precisione indicano:

$$M_{\text{top}} = 178 \pm 11^{+18}_{-19} \text{ GeV}$$

Marzo '95: Fermilab scopre il quark top. Oggi è:

$$M_{\text{top}} = 173.1 \pm 1.3 \text{ GeV}$$

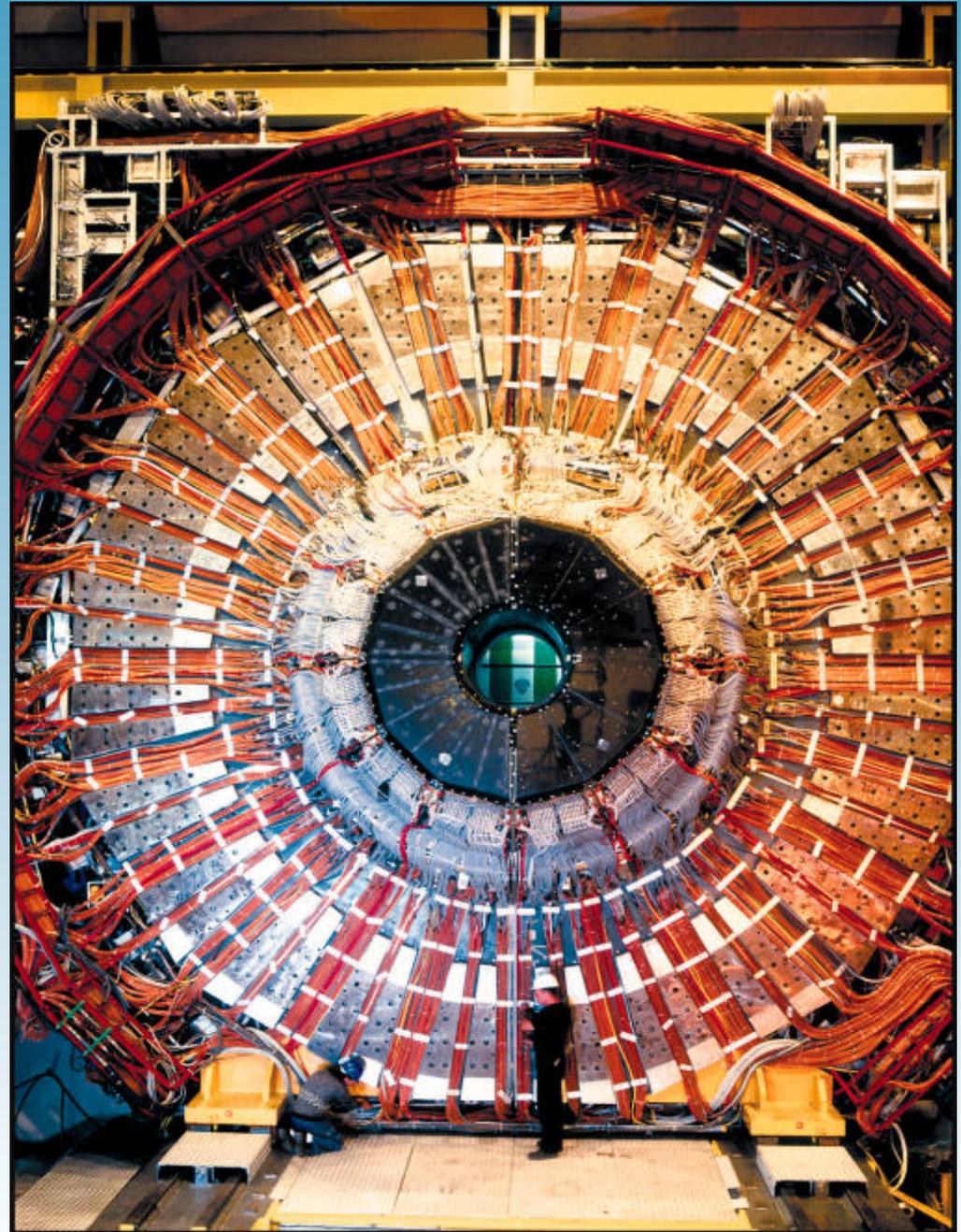
Grande successo di MS e programma sperimentale!



Si può ripetere quest'analisi con il bosone di Higgs? Sì, ma la sensitività alla sua massa è molto più debole. See later...

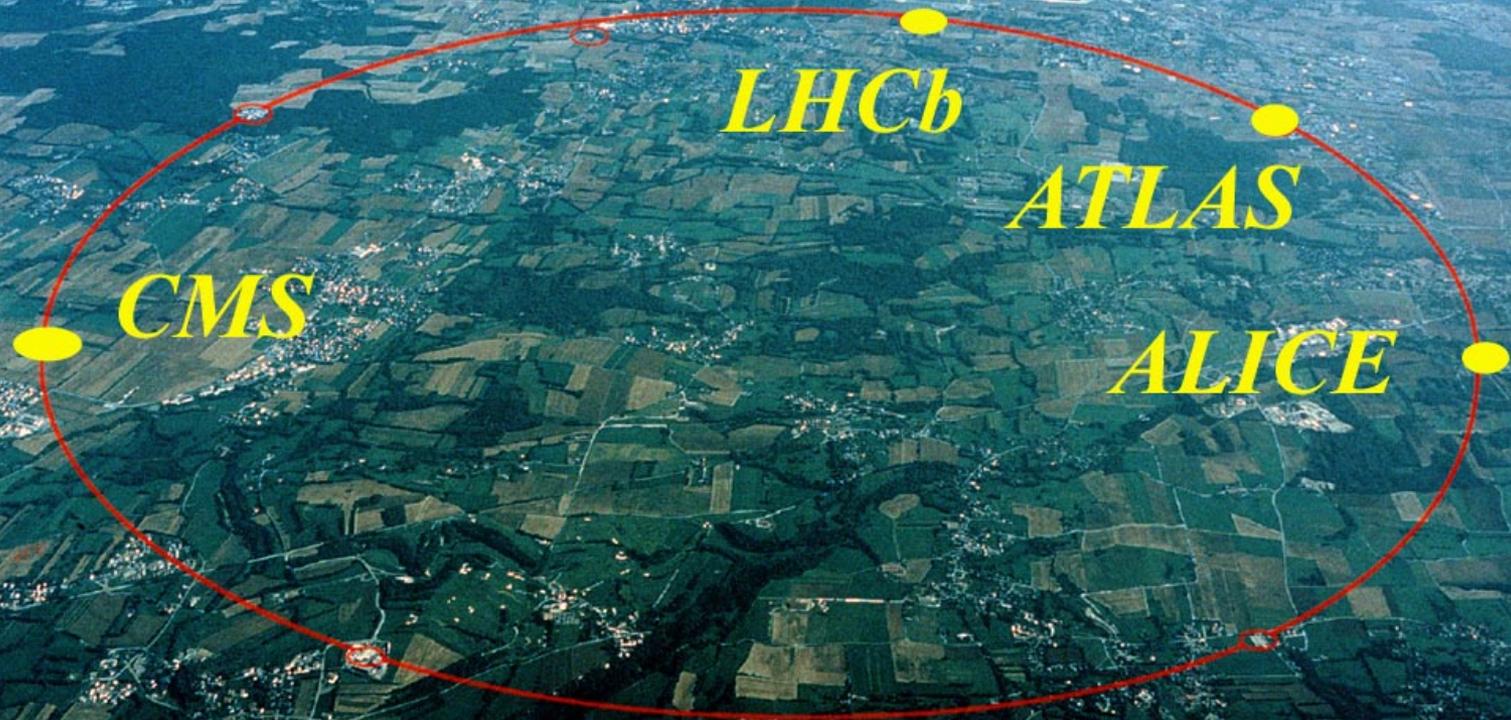
La lezione di LEP

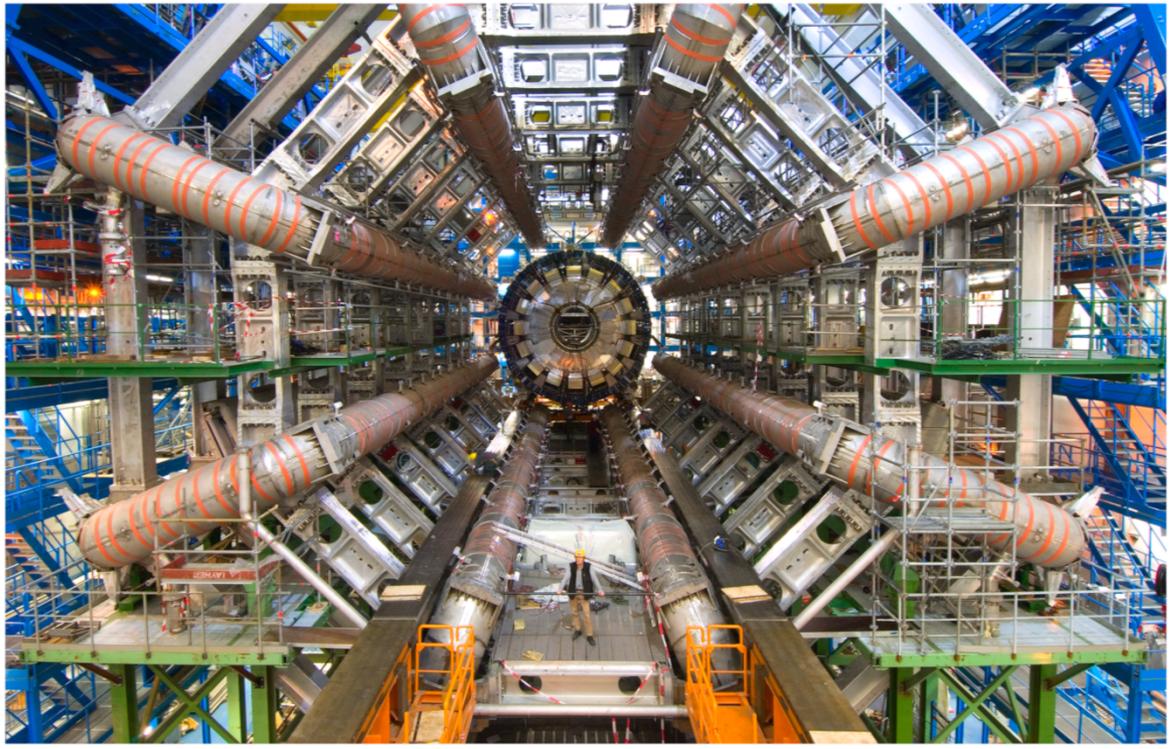
Il Large Electron-Positron Collider (LEP) (1989-2000) al CERN non ha scoperto nuove particelle ma ha confermato le interazioni di gauge del MS con una precisione fantastica: 0.1%!



MontBlanc

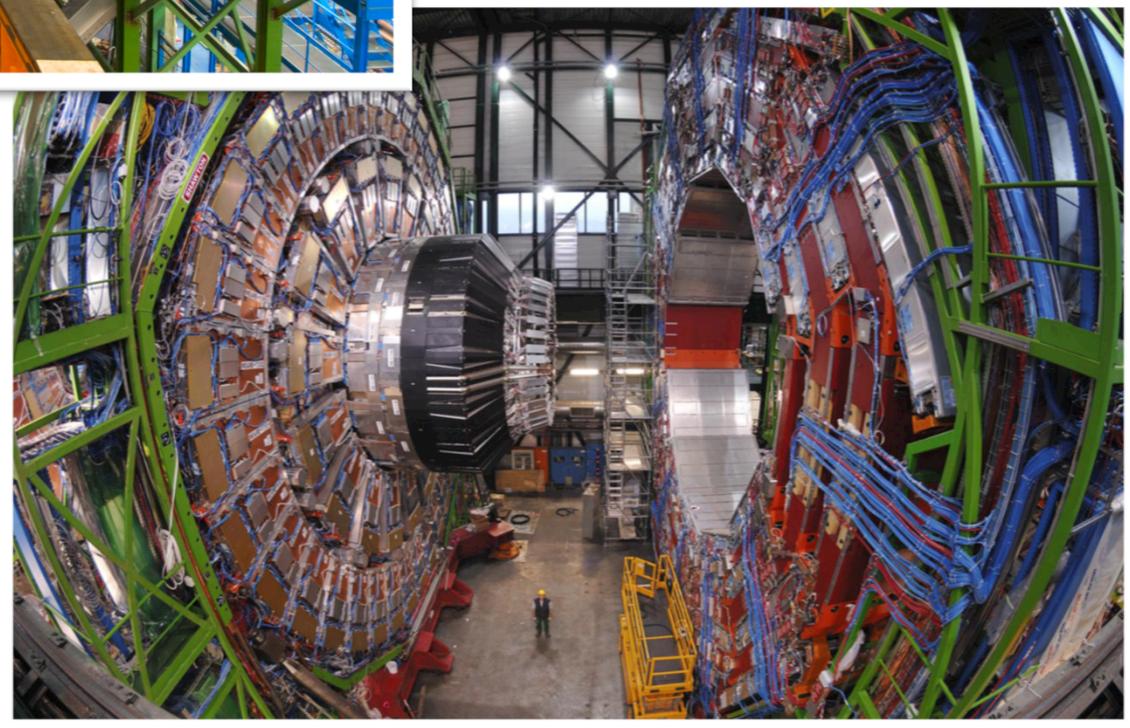
LHC al CERN di Ginevra

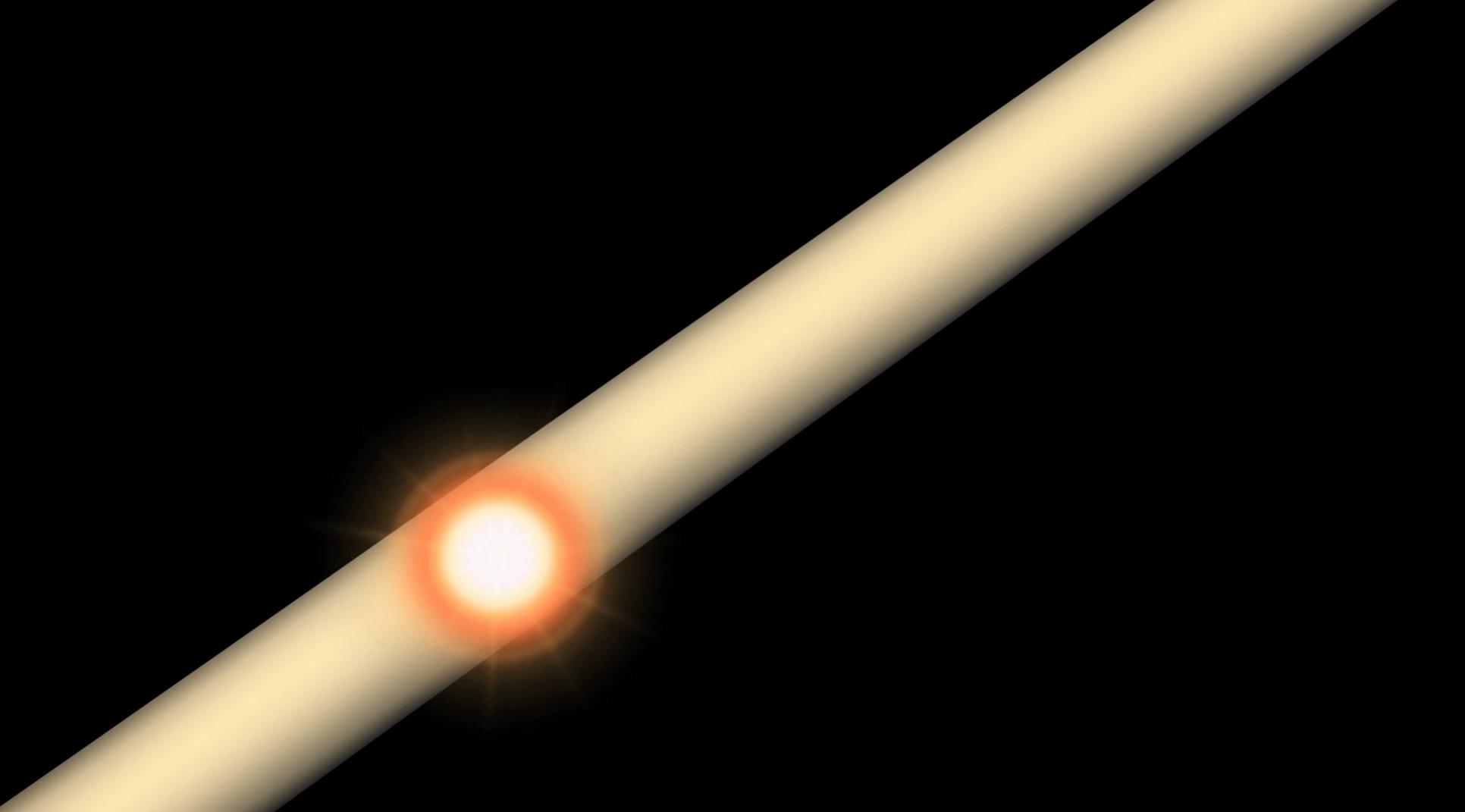




CMS

ATLAS

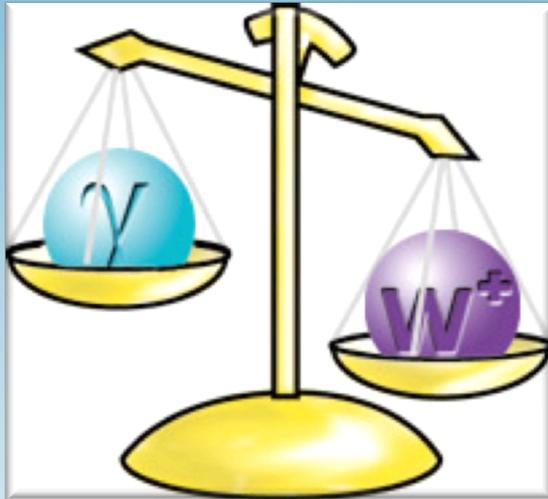




ATLAS: Animazione di una reale collisione di protoni avvenuta nel 2011. I due fotoni prodotti nella collisione sono indicati dai loro cluster di energia (in verde). ATLAS Experiment © 2012 CERN.

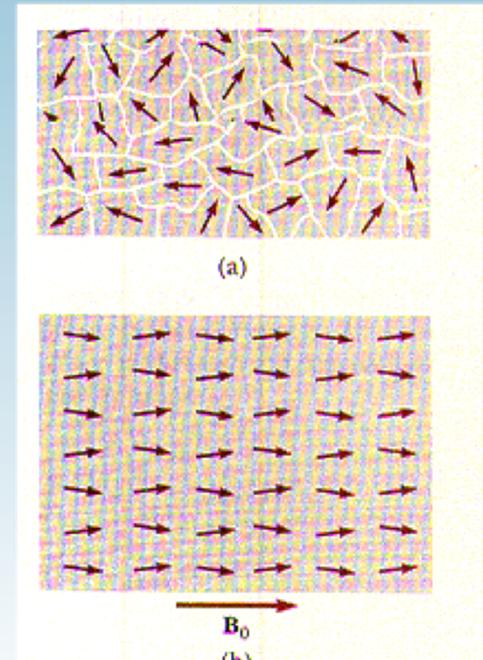
Simmetrie infrante

Il MS unifica interazioni deboli & elettromagnetiche. Ma se sono “unificate”, perché ci appaiono così diverse? Esse hanno un raggio d’azione molto diverso. Crediamo che...

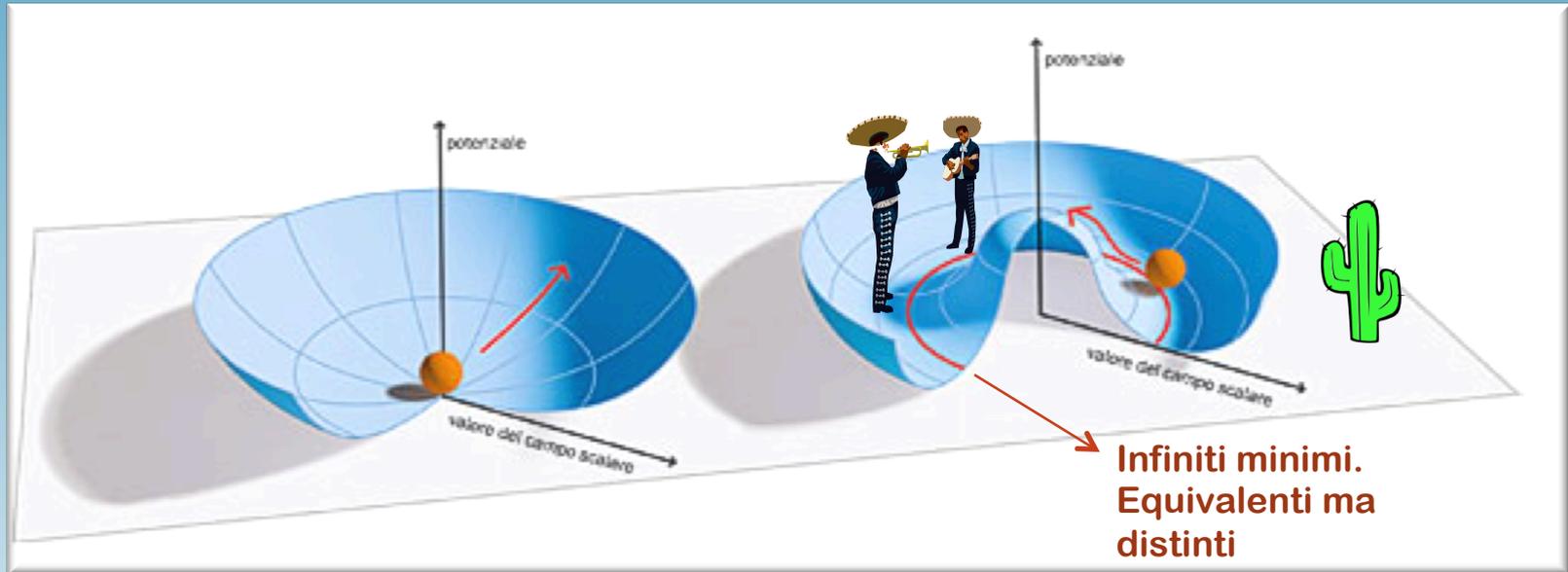


... la simmetria che le unifica sia “nascosta”, cioè lo stato di minima energia (il “vuoto”) non sia simmetrico.

In natura è piuttosto comune che lo stato a più bassa energia non sia quello simmetrico: x es. un ferromagnete. La simmetria (rotta) si manifesta nell’equivalenza delle opzioni di rottura.



Rottura spontanea di simmetria



Crediamo che questo processo di rottura (cosiddetta “spontanea”) della simmetria sia l’origine delle masse delle particelle → ci sono buone probabilita’ che LHC ci aiuti a capirlo meglio!

4

Il mistero dell'Higgs

Il mistero dell'Higgs



Peter Higgs

Il bosone di Higgs

Deve esistere un qualcosa che rompe la simmetria del “vuoto”
e, interagendo con le particelle, dà loro massa

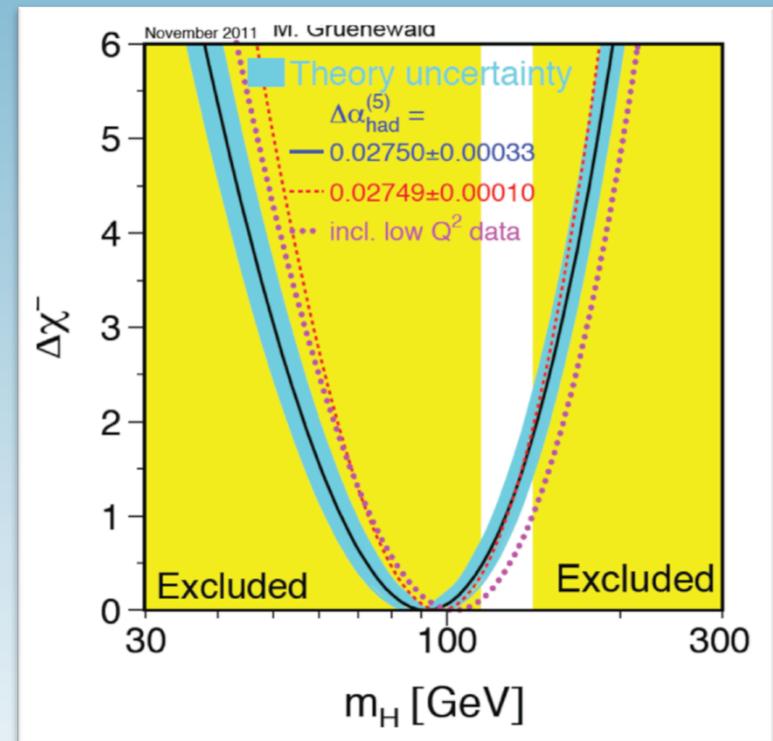
Può essere un nuovo campo elementare: il BOSONE di HIGGS
(o la manifestazione di qualcosa di più elaborato)

**Il meccanismo di rottura della simmetria elettrodebole
è il problema centrale attuale della fisica delle particelle**

Che cosa sapevamo dell'Higgs qualche anno fa?

Ricerche dirette a LEP: la sua massa è $M_H > 114.4 \text{ GeV}$

Confrontando le misure sperimentali con le predizioni del MS che dipendono da M_H si sono ottenute informazioni indirette su M_H : netta preferenza per un Higgs “leggero” (sotto i $\sim 150 \text{ GeV}$)



L'Higgs è stato scoperto! (o no?)

Luglio 2012: ATLAS e CMS annunciano di aver scoperto una particella con una massa di circa **125 GeV** (*) e proprietà consistenti con quelle del bosone di Higgs predetto dal MS:

Physics Letters B 716 (2012) 1–29

Contents lists available at SciVerse ScienceDirect

 **Physics Letters B**

www.elsevier.com/locate/physletb



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 $H \rightarrow ZZ^{(*)}$, $WW^{(*)}$, bb 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. All rights reserved.

Physics Letters B 716 (2012) 30–61

Contents lists available at SciVerse ScienceDirect

 **Physics Letters B**

www.elsevier.com/locate/physletb



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

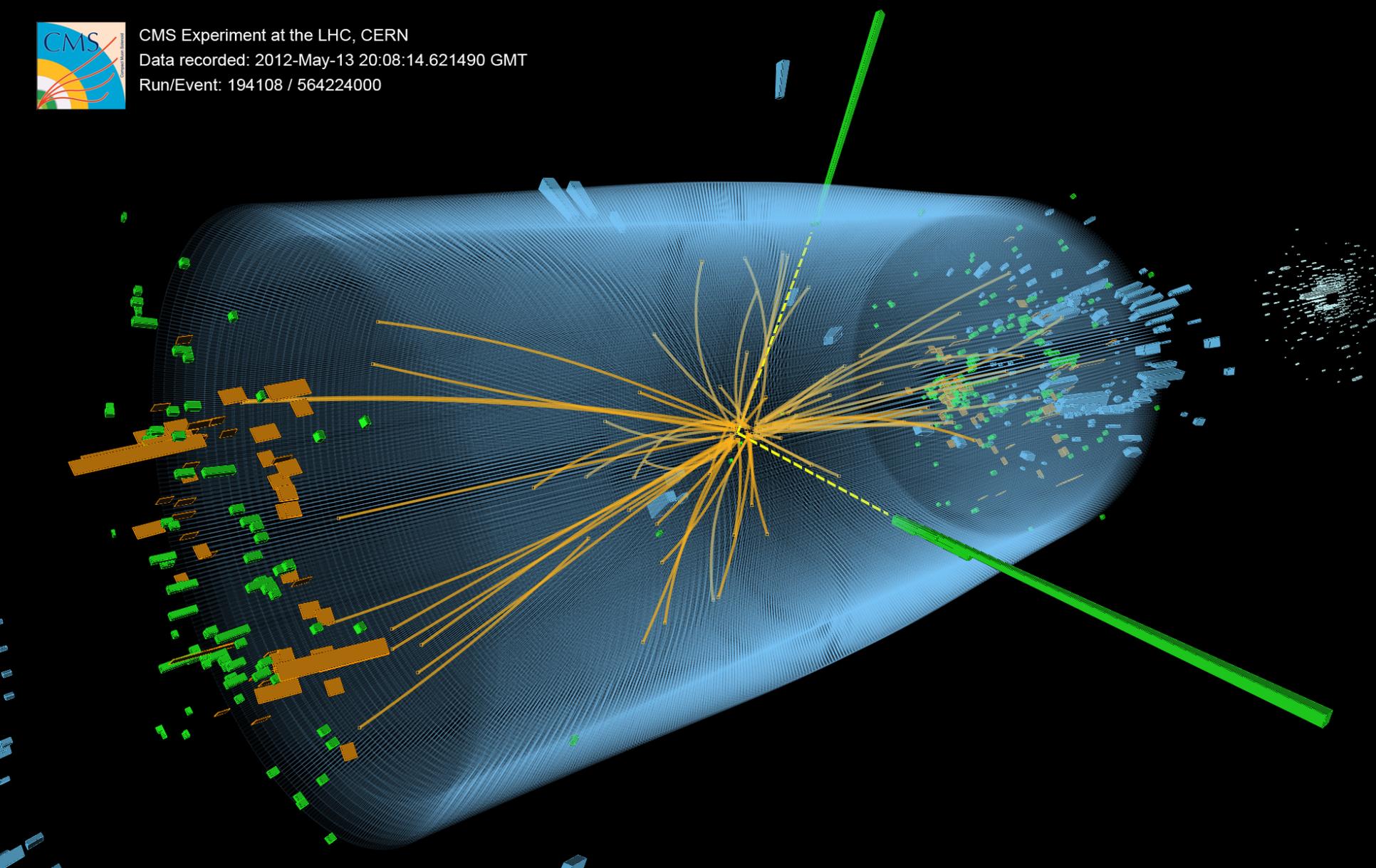
ABSTRACT

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 $125.3 \pm 0.4 \text{ (stat.)} \pm 0.5 \text{ (syst.)} \text{ GeV}$. The decay to two photons indicates that the new particle is a boson with spin different from one.

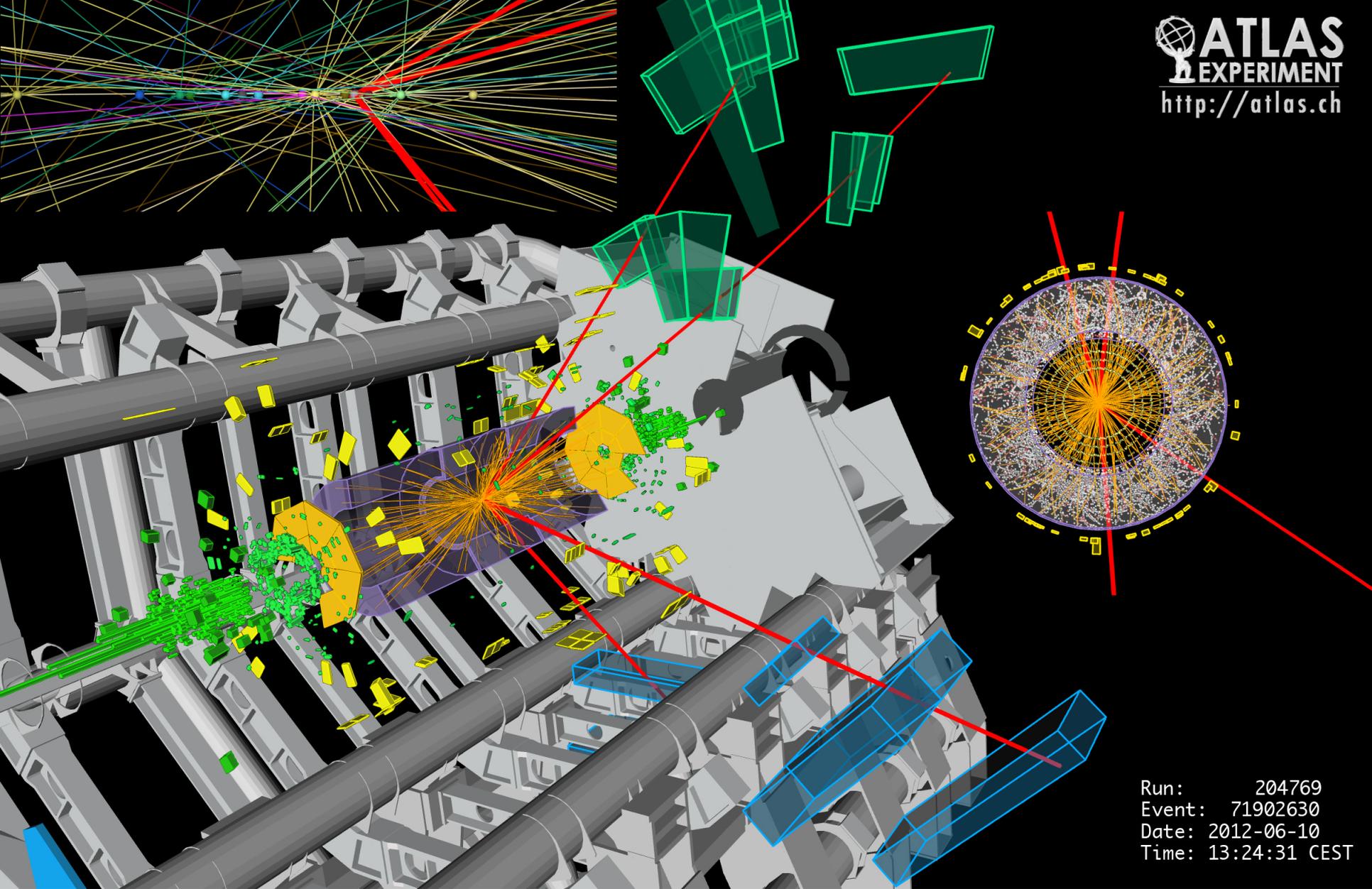
© 2012 CERN. Published by Elsevier B.V. All rights reserved.

Ma è proprio l'Higgs del Modello Standard? E' ancora presto per dirlo, ma i dati di LHC ci permetteranno di scoprirlo!

(*) la massa del protone è circa 1 GeV



CMS: L'evento mostra caratteristiche attese dal decadimento di un bosone di Higgs del MS in una coppia di fotoni (linee gialle tratteggiate e barre verdi). NB: l'evento può anche essere dovuto a noti processi di background del MS. CMS Experiment © 2012 CERN.



Run: 204769
Event: 71902630
Date: 2012-06-10
Time: 13:24:31 CEST

**ATLAS: Evento candidato per un decadimento di un bosone di Higgs del MS in 4 muoni (in rosso).
L'origine dei 4 muoni è un vertice primario comune. ATLAS Experiment © 2012 CERN.**

5

Oltre il Modello Standard?

Perché non crediamo al MS??

La scoperta dell'Higgs è parte di un progetto più ambizioso: capire l'origine della rottura di simmetria che genera le masse e la natura della scala elettrodebole

Il Modello Standard ha passato moltissimi test, eppure:

- **Troppi parametri. Perché 3 famiglie?**
- **Incompleto: e la gravità? Perché è così debole?**
- **Non spiega la piccolezza della massa dei neutrini**
- **Non spiega la materia (e l'energia) oscura osservata, nè la bariogenesi.**

Il MS deve avere un completamento che ancora non conosciamo. La supersimmetria? Dimensioni extra ??



Il viaggio dell'LHC è appena iniziato...

Backup Slides