



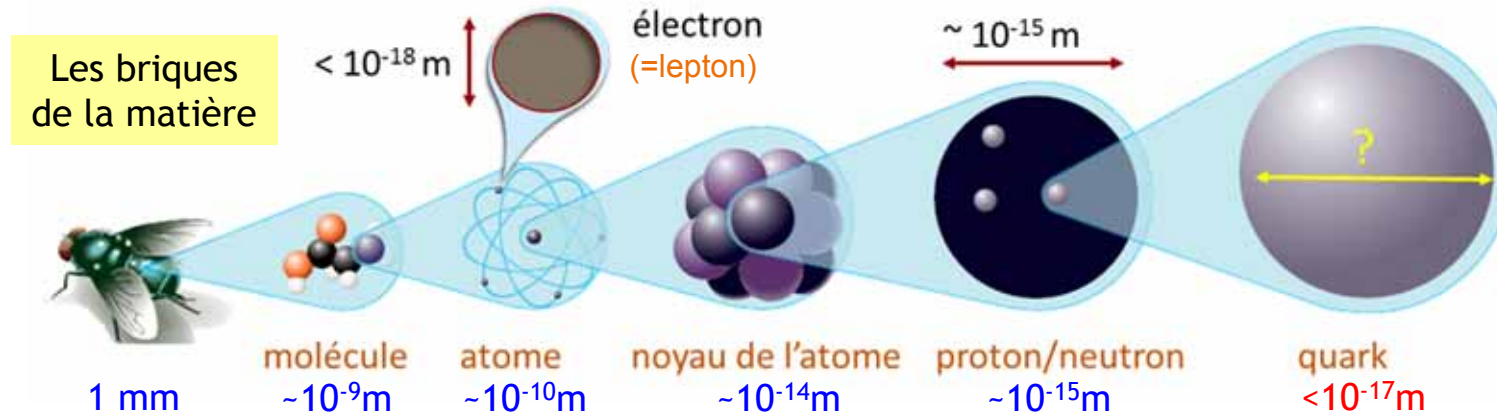
Boson de Higgs

chronique d'une
découverte annoncée

Gautier HAMEL de MONCHENAULT
CEA-Saclay Irfu/SPP

Le boson de Higgs, la France et le LHC : 25 ans de collaboration et de partenariat
24 avril 2013 - Campus CNRS Gérard Mégie, Paris

Qu'est-ce que le boson de Higgs ?

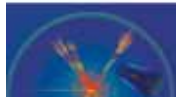


Spin	0	1/2	1	3/2	2
	Boson de Higgs	quarks et leptons	bosons de jauge	?	graviton (?)
		matière	forces		

Le boson de Higgs

- n'est pas une *particule de matière*
- n'est pas une *particule de force*
- c'est le *quantum* d'un *champ scalaire*

La découverte du boson de Higgs
lève le voile sur
l'origine de la **masse**
des **particules élémentaires**

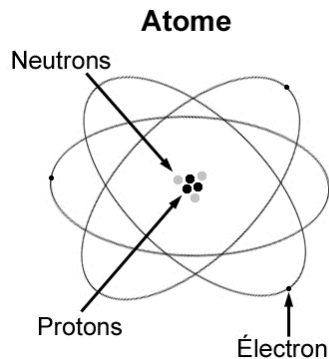


La masse des particules élémentaires

Le Modèle Standard :

Trois « familles » de
quarks et leptons

	1
mass →	2.4 MeV
charge →	$\frac{2}{3}$
spin →	$\frac{1}{2}$
name →	u up
Quarks	4.8 MeV
	$-\frac{1}{3}$
	$\frac{1}{2}$
	d down
Leptons	<2.2 eV
	0
	$\frac{1}{2}$
	ν_e electron neutrino
	0.511 MeV
	-1
	$\frac{1}{2}$
	e electron



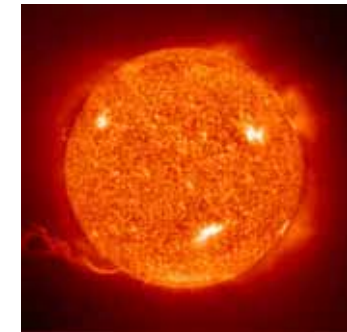
proton = (u u d)
neutron = (u d d)

masse du proton
≈ 1 GeV ⁽¹⁾



Masse de l'électron :
rayon de l'atome

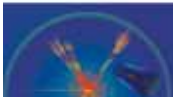
Masse des quarks u et d :
stabilité du proton
temps de vie du neutron



Masse des bosons W :

très courte portée des
interactions nucléaires faibles
($< 1/100^{\text{ème}}$ de la taille du proton)

(1) GeV : unité de masse et d'énergie



La masse des particules élémentaires

Le Modèle Standard :

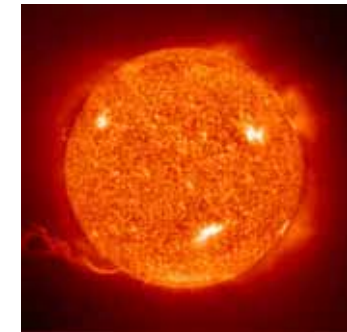
Trois « familles » de
quarks et leptons

	I	II	III	
mass→	2.4 MeV	1.27 GeV	171.2 GeV	0
charge→	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
spin→	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
name→	u up	c charm	t top	γ photon
Quarks	4.8 MeV	104 MeV	4.2 GeV	0
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	d down	s strange	b bottom	g gluon
Leptons	<2.2 eV	<0.17 MeV	<15.5 MeV	91.2 GeV
	0	0	0	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	Z weak force
	0.511 MeV	105.7 MeV	1.777 GeV	80.4 GeV
	-1	-1	-1	± 1
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	e electron	μ muon	τ tau	W[±] weak force



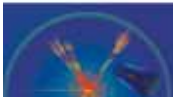
Masse de l'électron :
rayon de l'atome

Masse des quarks u et d :
stabilité du proton
temps de vie du neutron



Masse des bosons W :

très courte portée des
interactions nucléaires faibles
($< 1/100^{\text{ème}}$ de la taille du proton)



Symétries et unification

Cadre théorique : relativité + mécanique quantique

Principe de **symétrie de jauge**

- origine « **géométrique** » des interactions fondamentales
- bosons de jauge \leftrightarrow symétries fondamentales



Les **bosons de jauge** sont de **masse nulle**

$$(i\gamma^\mu \partial_\mu - m)\psi = 0$$

équation de Dirac (1928)

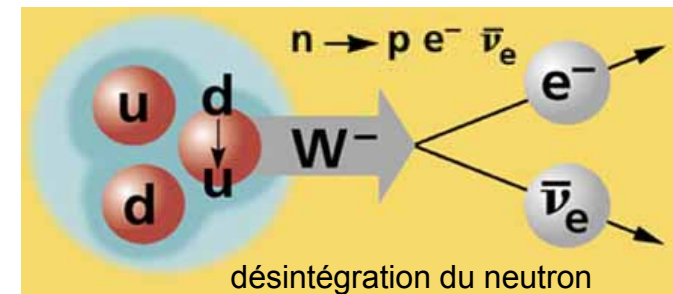
Années 40-50 : **Electrodynamique quantique (QED)**

1 **boson de jauge** = le photon

Années 60-70 : **Théorie électrofaible**

4 **bosons de jauge** = photon, W^+ , W^- et Z

Q : Comment, dans le cadre de cette **théorie unifiée**, explique-t-on la **masse des bosons W** ?



Le mécanisme de Brout-Englert-Higgs

R : Par la **brisure spontanée** de la symétrie

Comment ?

Grâce au **champ de Higgs**
(= 4 bosons de spin 0)

À $T=1000 \text{ GeV}$ ($t=10^{-10}\text{s}$) :
transition de phase cosmique

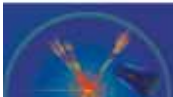
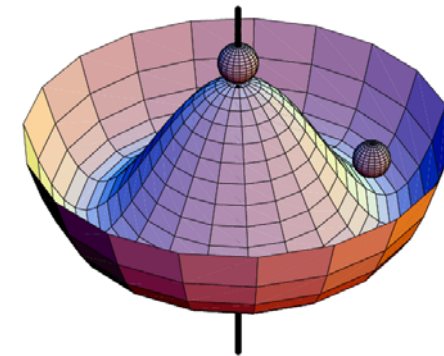
Le **champ de Higgs** prend
une valeur **non nulle** (=256 GeV)

Les **bosons W^+ et W^-** acquièrent une **masse**
ainsi que le **boson Z**

Quarks et leptons
acquièrent aussi une **masse**

$T < 1000 \text{ GeV}$

le **champ de Higgs**
brise **spontanément**
la symétrie



Et le boson de Higgs ?

C'est une **prédiction** de la théorie

La **théorie électrofaible**
spécifie toutes les propriétés
du **boson de Higgs** ...

... sauf la **masse** !

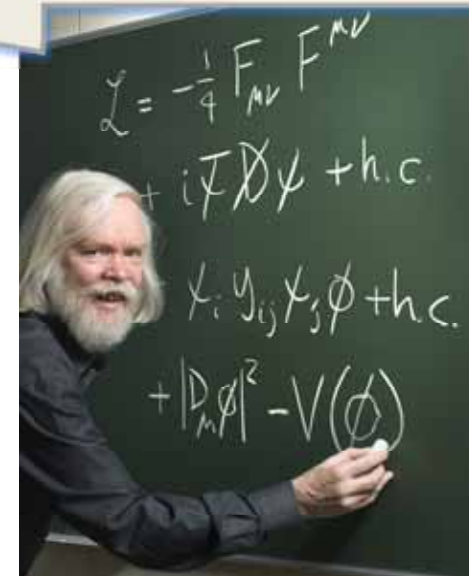
Les **couplages** du **boson de Higgs**
aux particules du Modèle Standard
sont **proportionnels** à leurs **masses**

u	c	t	g
d	s	b	γ
ν_e	ν_μ	ν_τ	W
e	μ	τ	Z

Le **boson de Higgs** se couple
principalement aux **particules**
les plus massives :

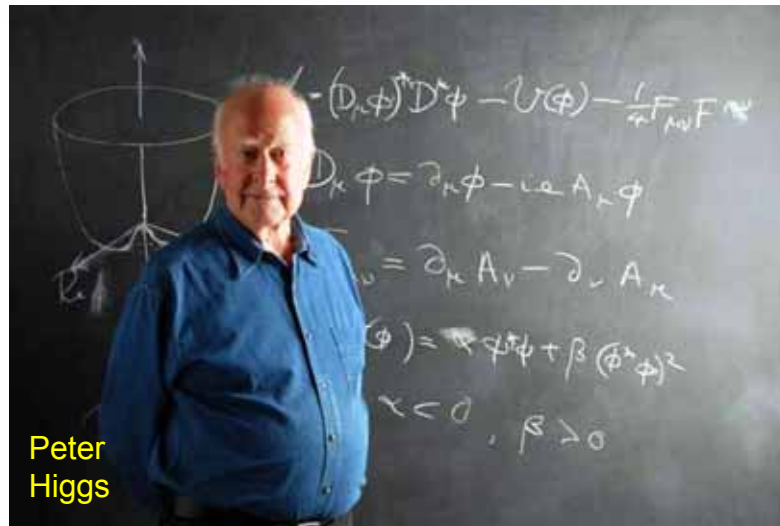
- le **quark top**
- les **bosons W et Z**

"We apologize to experimentalists for having no idea what is the mass of the Higgs boson [...] We do not encourage big experimental searches for the Higgs boson"
J. Ellis et al (1976)



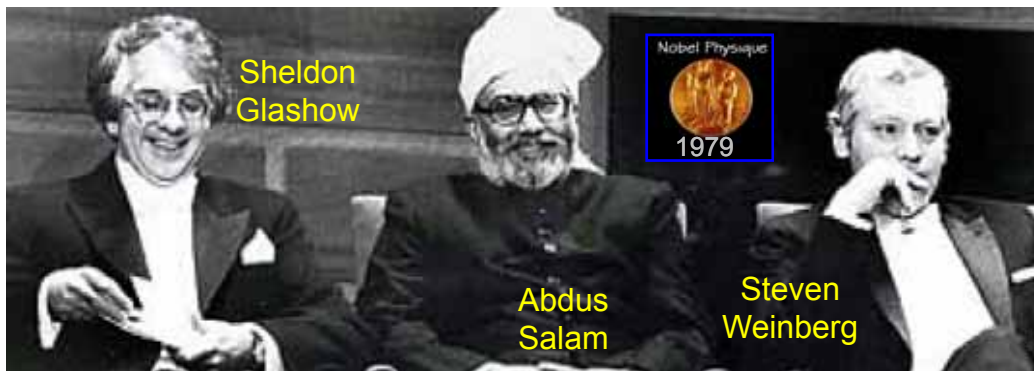
Une fabuleuse épopée théorique...

1964 :
Mécanisme
BEH

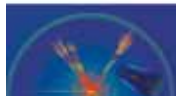


1967 :
Théorie
électrofaible

1974 :
Modèle
Standard

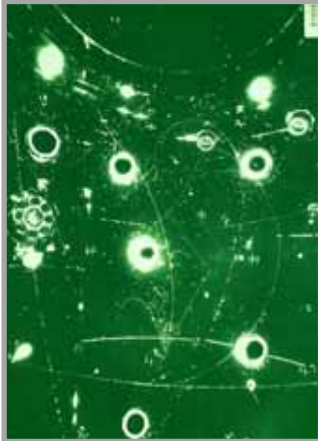


CERN, 4 juillet 2012
découverte du boson de Higgs

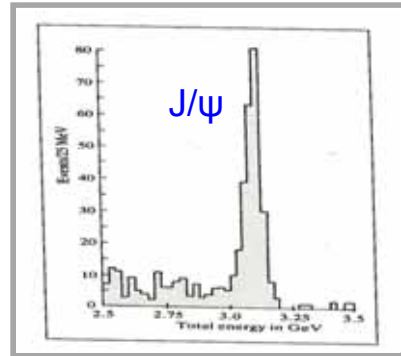


... et expérimentale

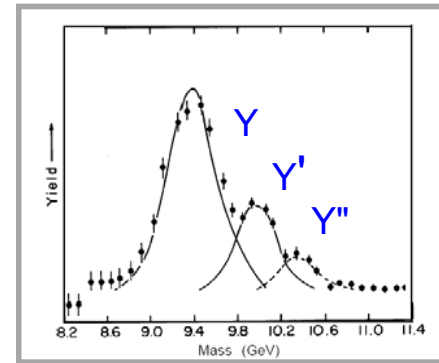
1972 - CERN
Courants neutres



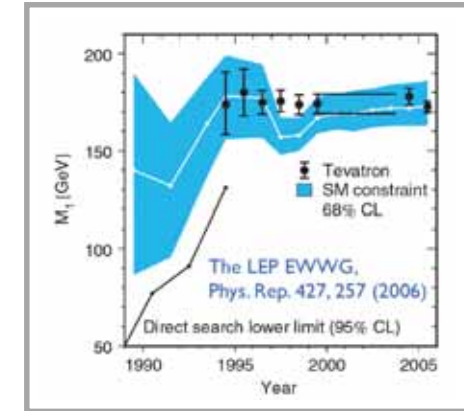
1974 - SLAC, Brookhaven
Charme



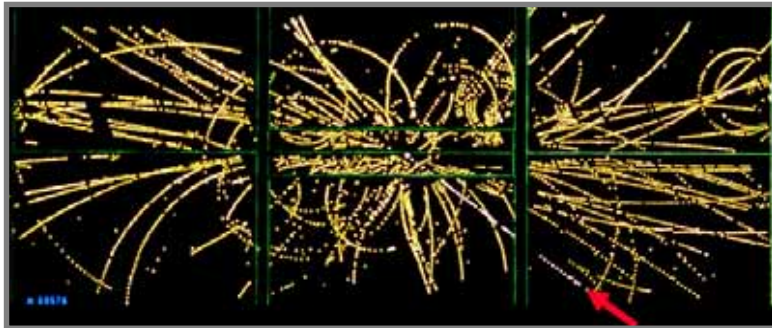
1977 - Fermilab
Beauté



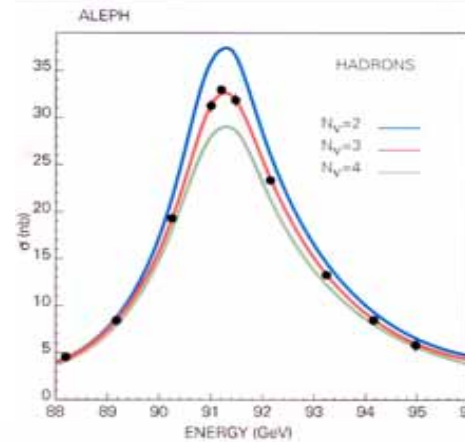
1994 - Fermilab
Quark top



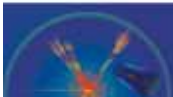
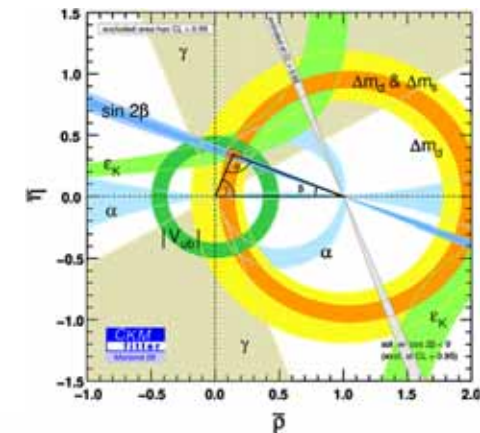
1983 - CERN/SppS
Bosons W^+ , W^- et Z^0



1990 - CERN/LEP
3 familles de neutrinos



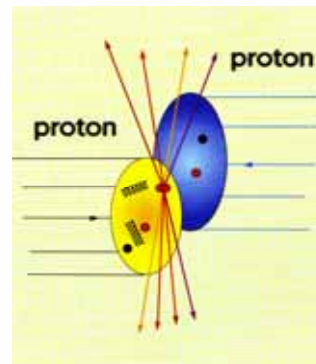
2001 - SLAC/PEP2, KEK/KEKB
CKM, mélange des quarks



LHC, Grand Collisionneur de Hadrons
2010-2012 : collisions proton-proton à 7000 GeV et 8000 GeV

Anneau de 27 km de circonférence
(à environ 100 m de profondeur)

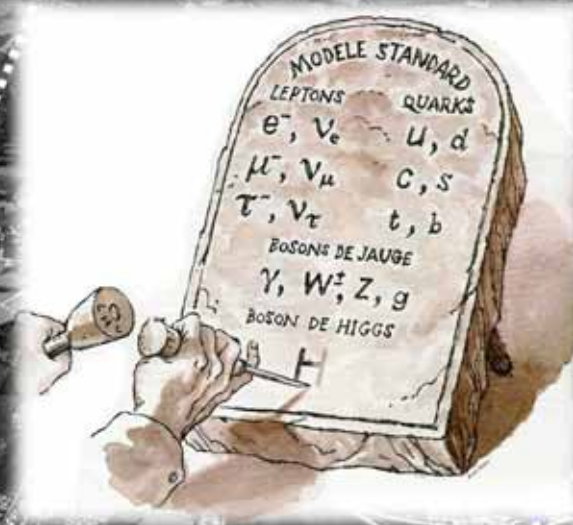
LHC



au LHC on étudie
des « collisions »

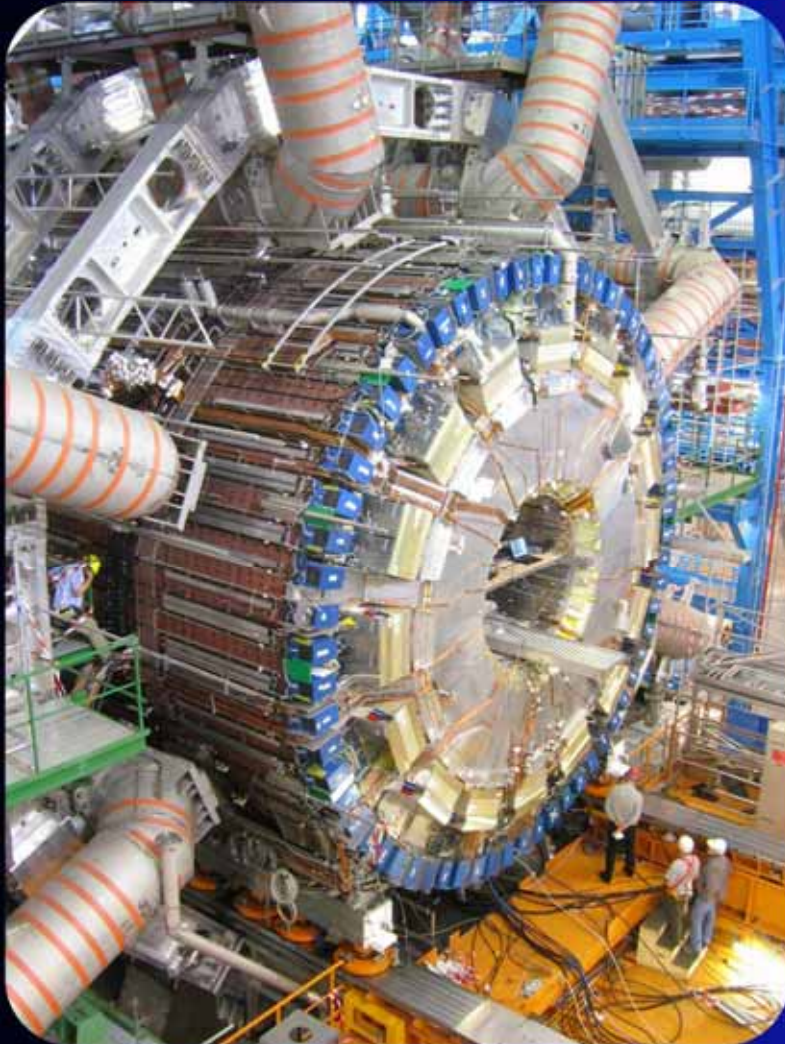
- gluon et gluon
- quark et antiquark
- quark et gluon
- etc.

LHC, Grand Collisionneur ... de Quarks et de Gluons !



ATLAS

Toroïdes & Calorimètres bouchon



Calorimètre à argon liquide



Détecteur central

Détecteur pixels



CMS

Systeme à muons



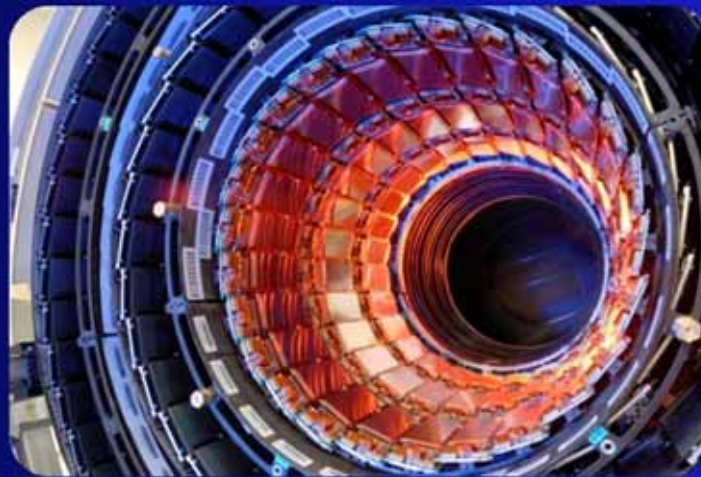
Solénoïde 3,8 Tesla



Calorimètre électromagnétique

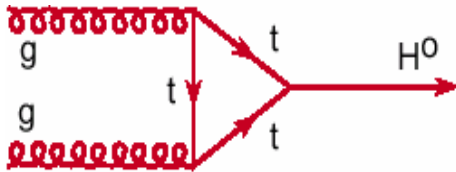


Trajectographe silicium



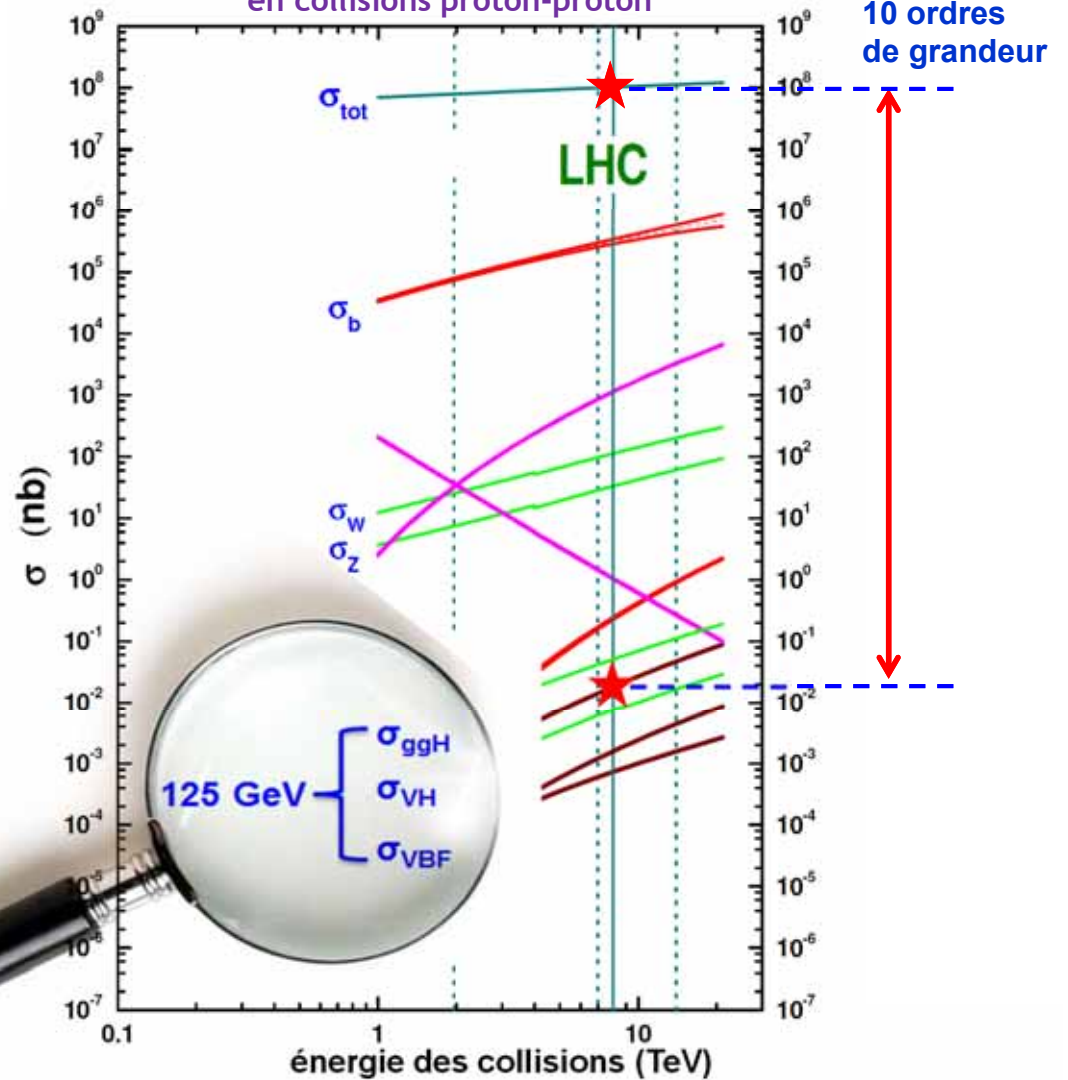
Produire le boson de Higgs

Fusion de gluons : $g + g \rightarrow H$

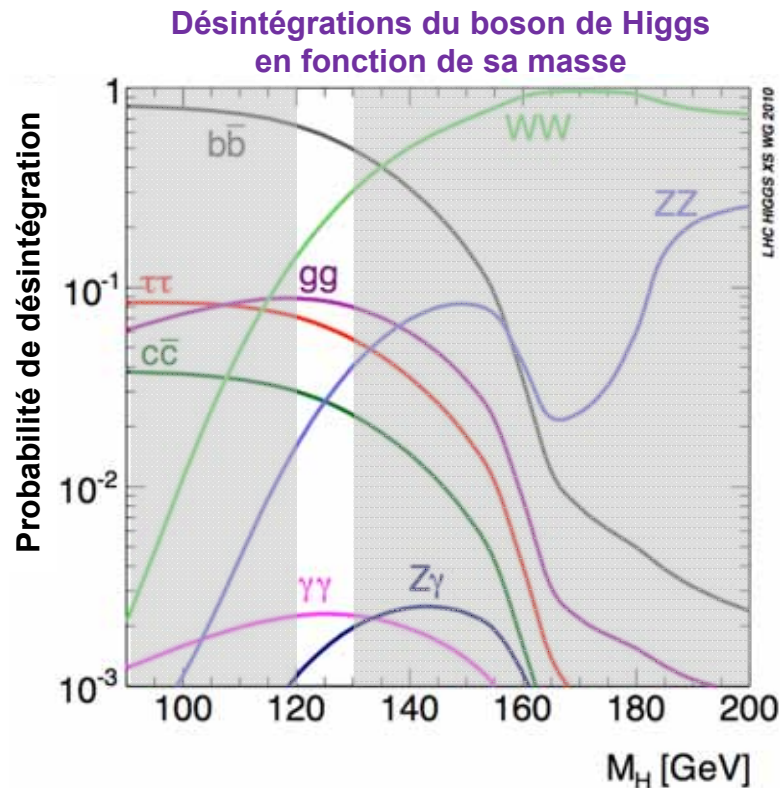


Parmi des millions de milliards de collisions proton-proton, quelques centaines de milliers de bosons de Higgs seraient produits

Taux de production en collisions proton-proton



Détecter le boson de Higgs



Probabilités de désintégration prédites pour une masse de 125 GeV

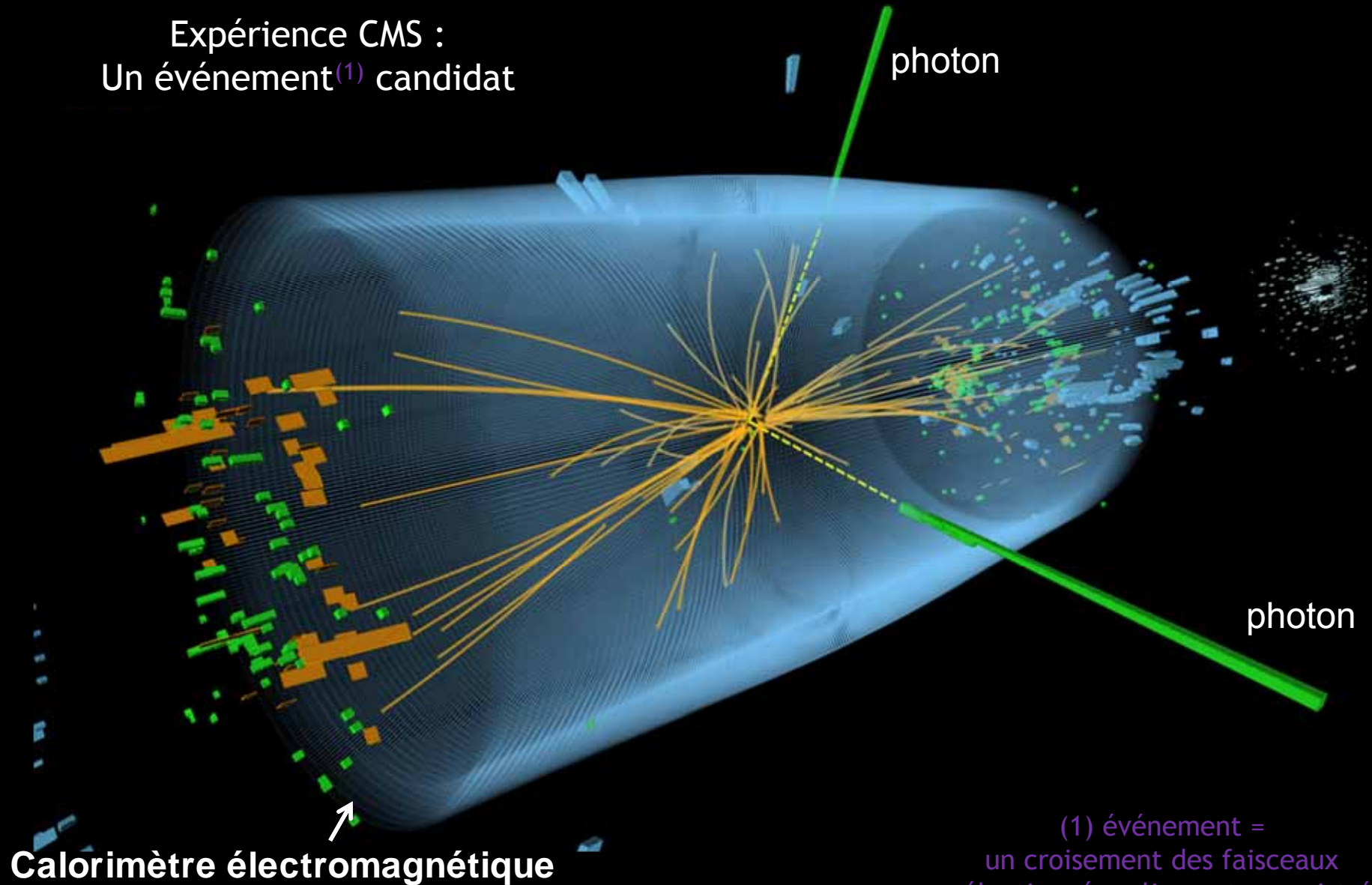
$H \rightarrow b\bar{b}$	58%
$H \rightarrow WW^*$	21%
$H \rightarrow \tau^+\tau^-$	6.4%
$H \rightarrow ZZ^*$	2.7%
$H \rightarrow \gamma\gamma$	0.2%

On peut espérer détecter :

- quelques centaines de désintégrations en deux photons
- une trentaine de désintégrations ZZ^* dans l'état final en quatre leptons

Etat final deux-photons

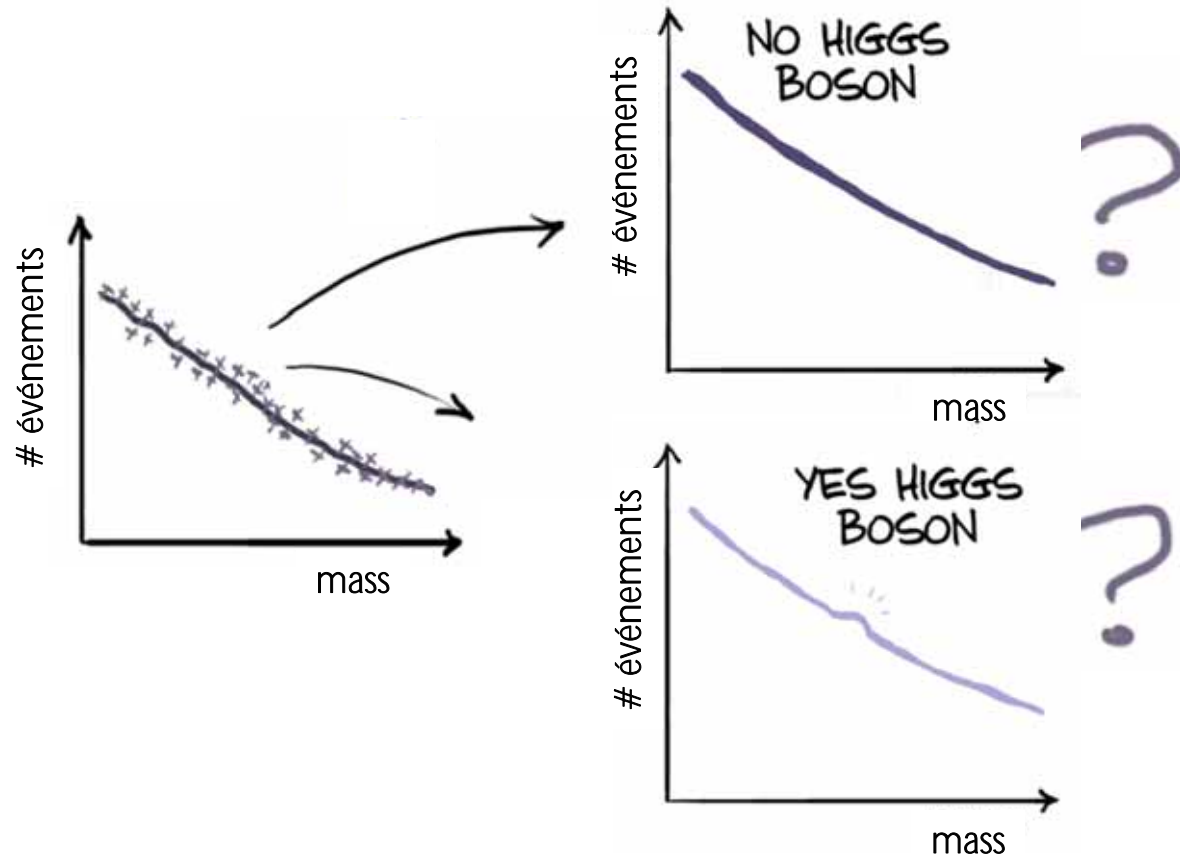
Expérience CMS :
Un événement⁽¹⁾ candidat



(1) événement =
un croisement des faisceaux
sélectionné en ligne et enregistré

Signal dans l'état final deux-photons

Excellente **résolution**
en **masse** ($< 1.5\%$)



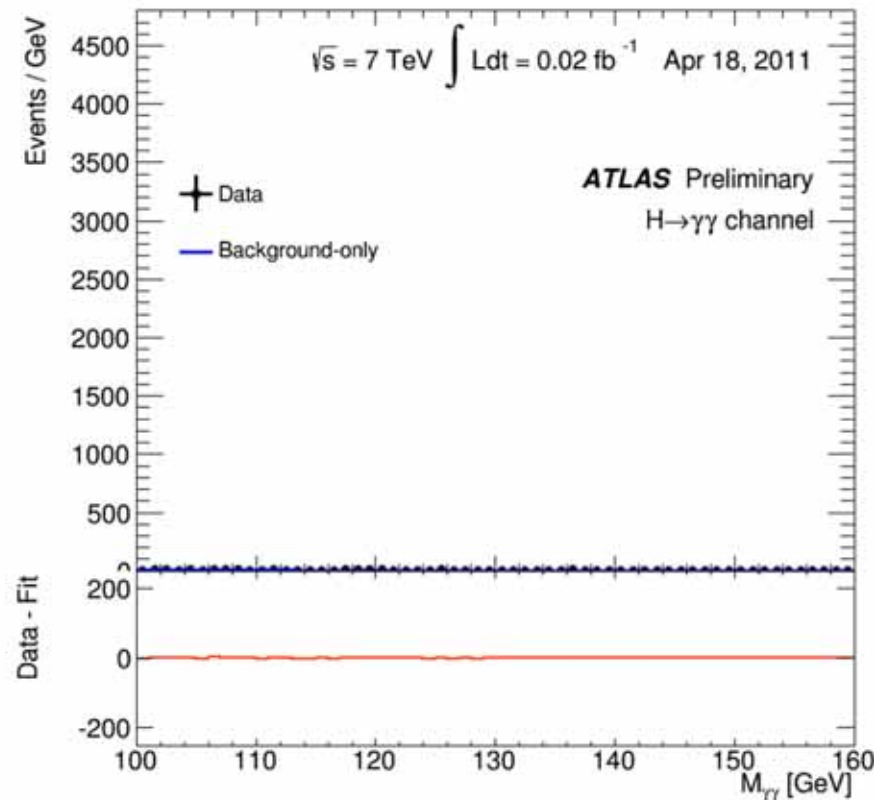
A suivre : [Animation ATLAS](#)

Spectre de masse di-photon, par intervalles de 1 GeV entre 100 et 160 GeV
Evolution entre avril 2011 et décembre 2012



Signal dans l'état final deux-photons

Excellente résolution
en masse ($< 1.5\%$)



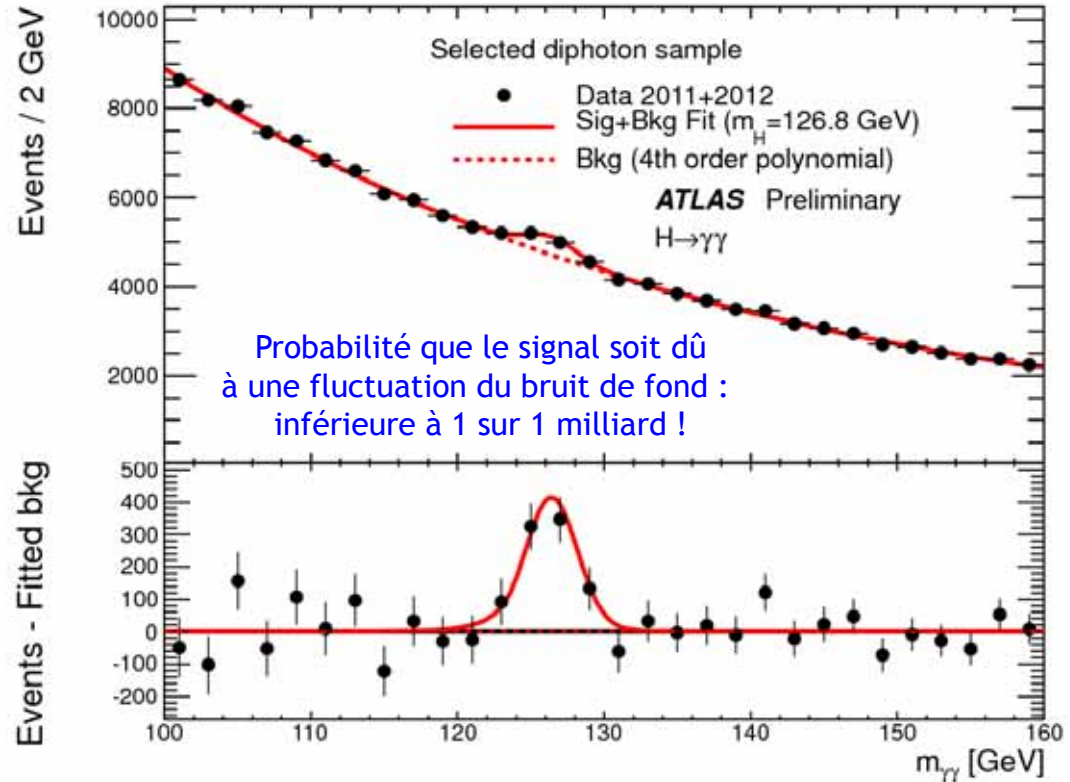
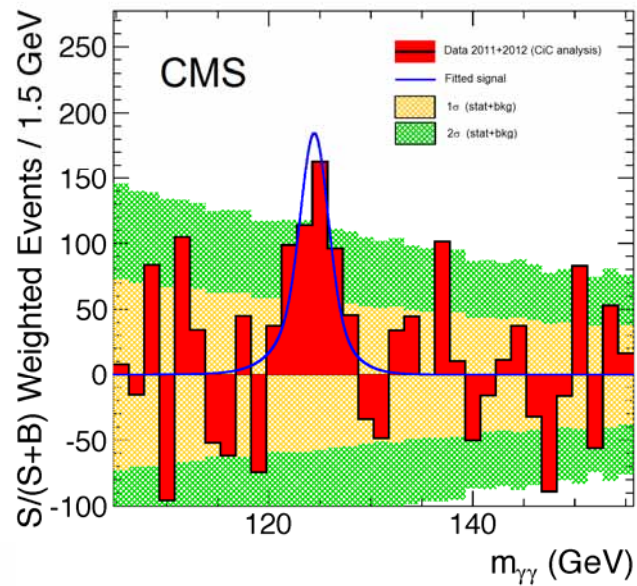
[Animation ATLAS](#)

Spectre de masse di-photon, par intervalles de 1 GeV entre 100 et 160 GeV
Evolution entre avril 2011 et décembre 2012



Signal dans l'état final deux-photons

Excellente résolution
en masse ($< 1.5\%$)



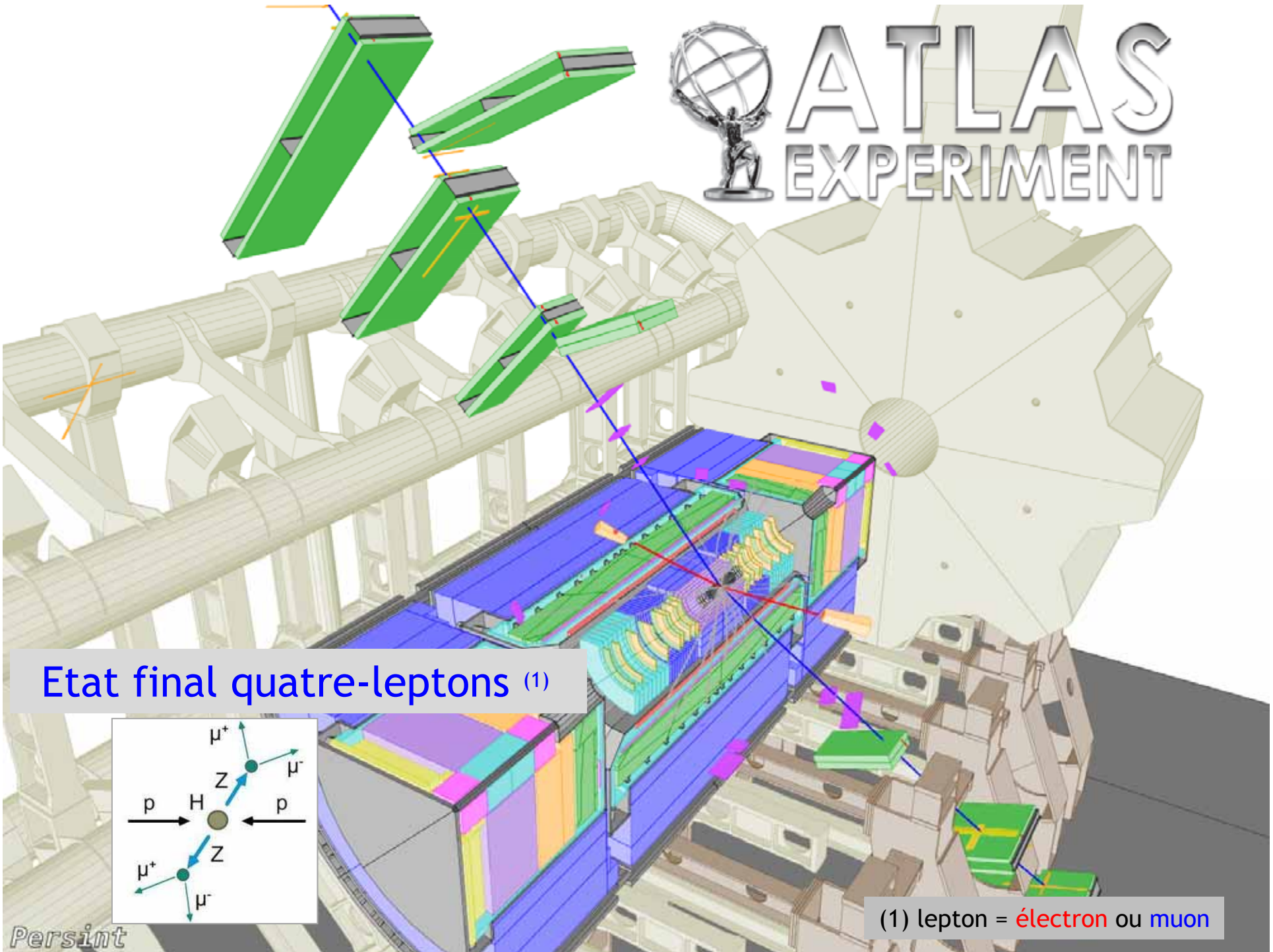
Probabilité que le signal soit dû
à une fluctuation du bruit de fond :
inférieure à 1 sur 1 milliard !

Les deux expériences
observent un **signal significatif**
autour de 125 GeV

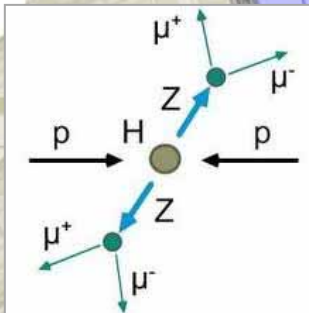




ATLAS EXPERIMENT

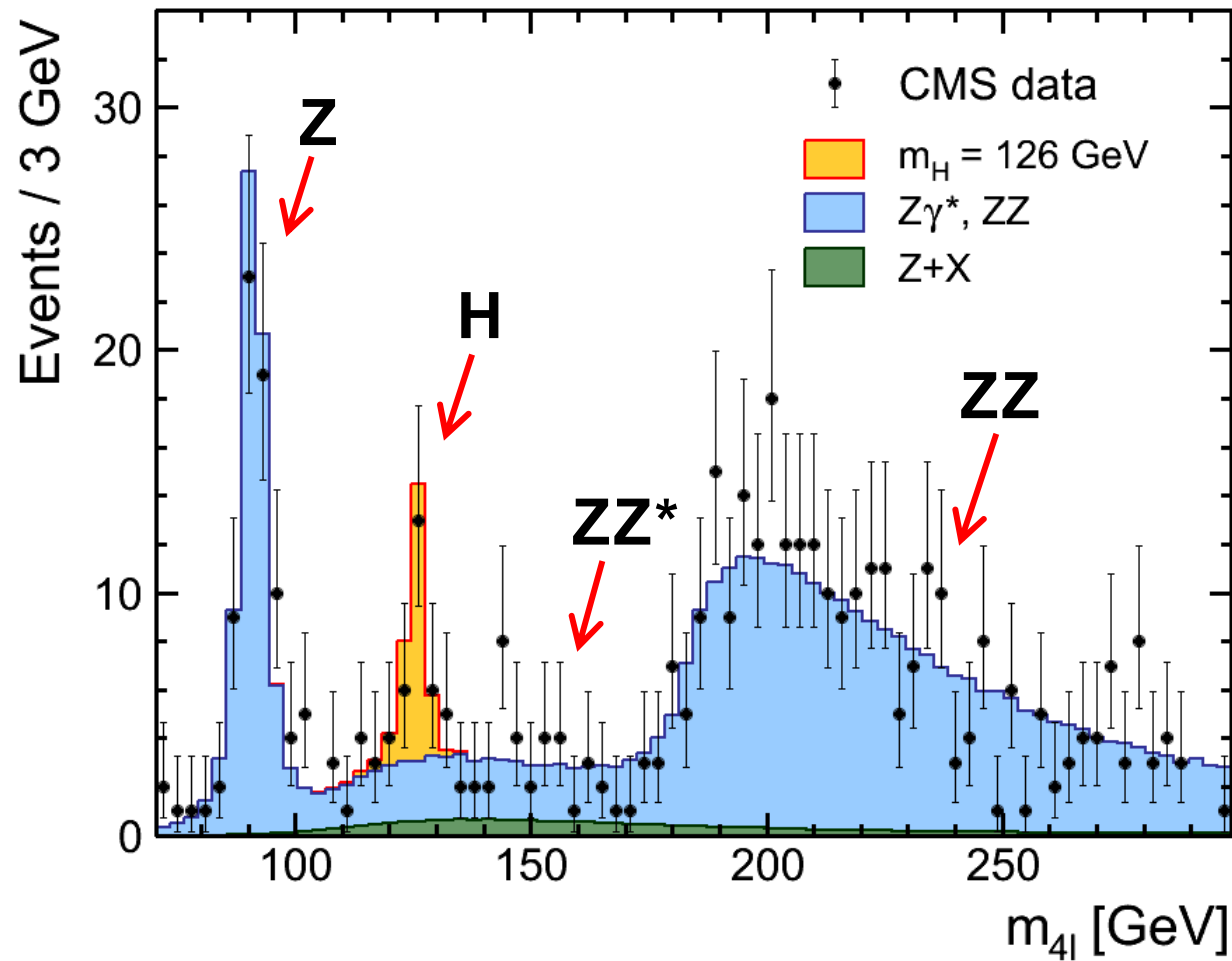


Etat final quatre-leptons (1)

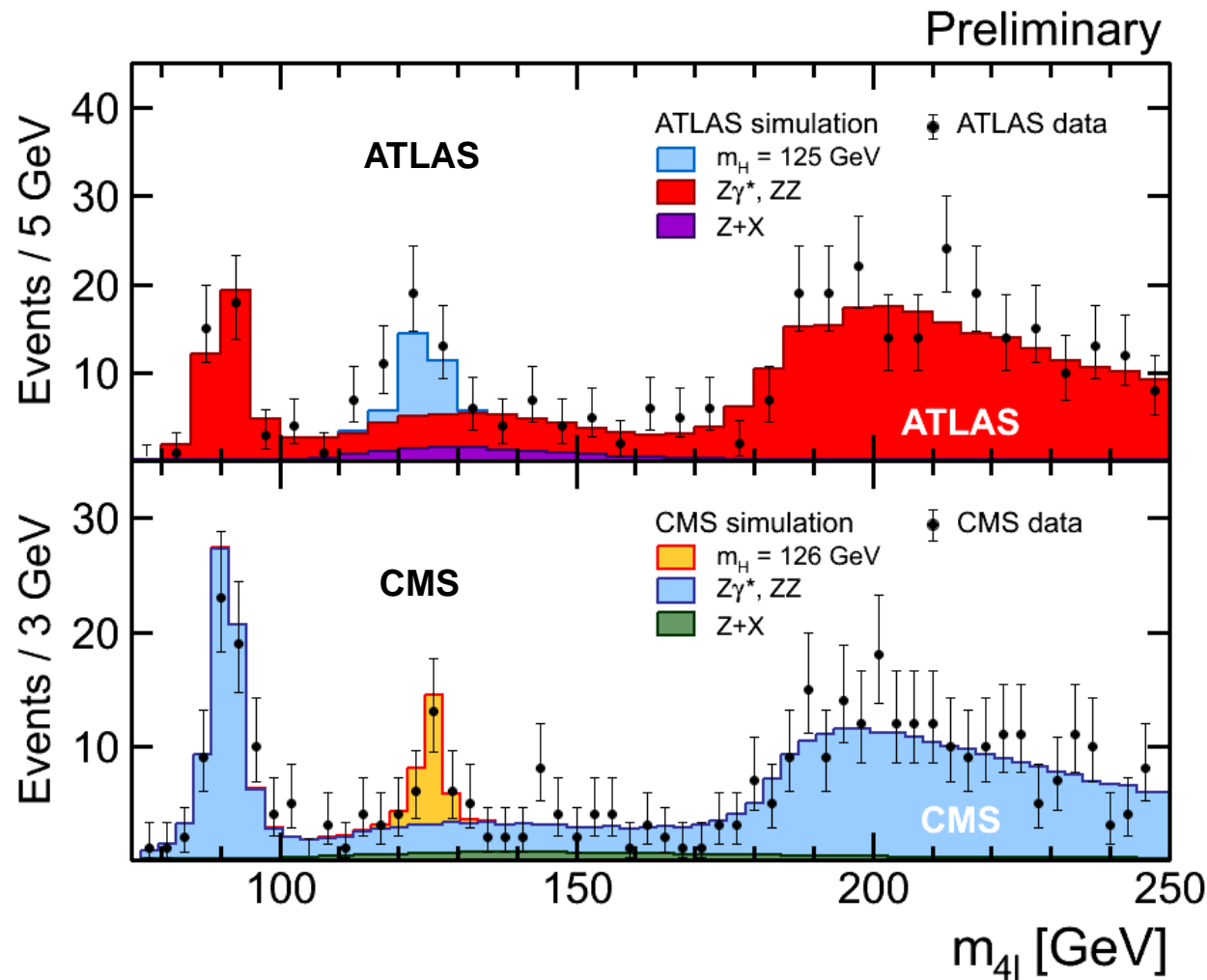


(1) lepton = électron ou muon

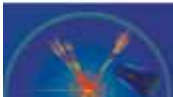
Signal dans l'état final quatre-leptons



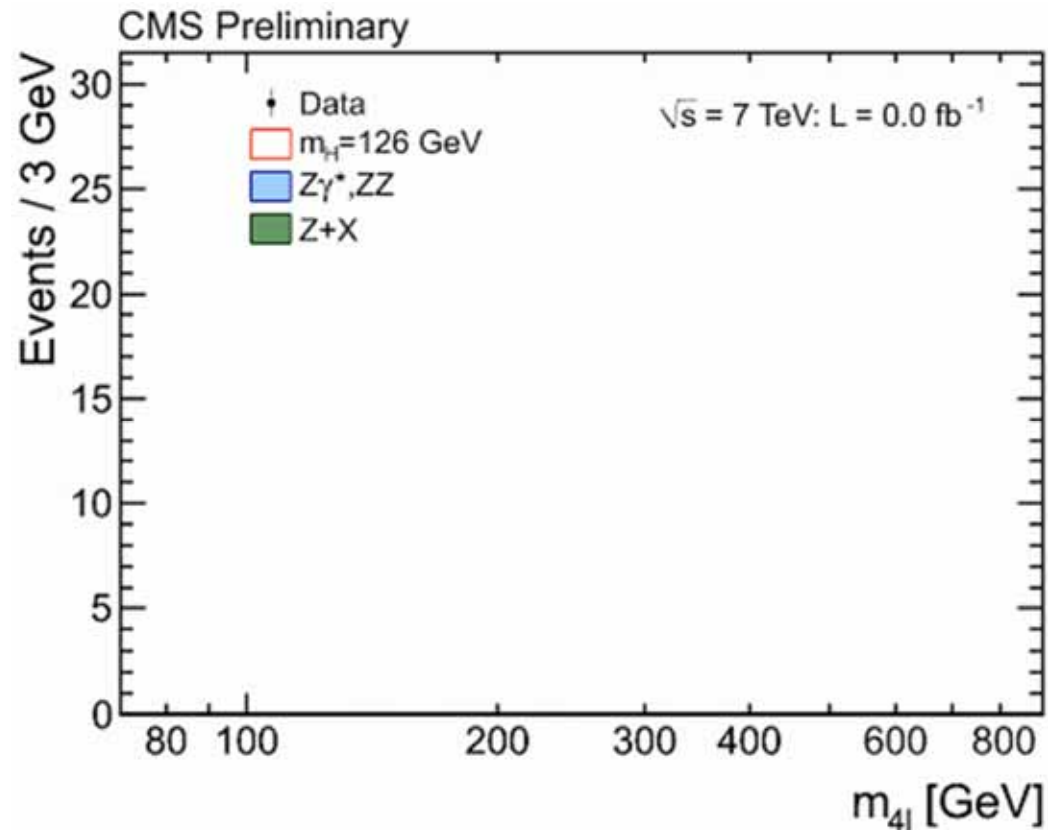
Signal dans l'état final quatre-leptons



Les deux expériences observent un **signal significatif** autour de 125 GeV



Signal dans l'état final quatre-leptons

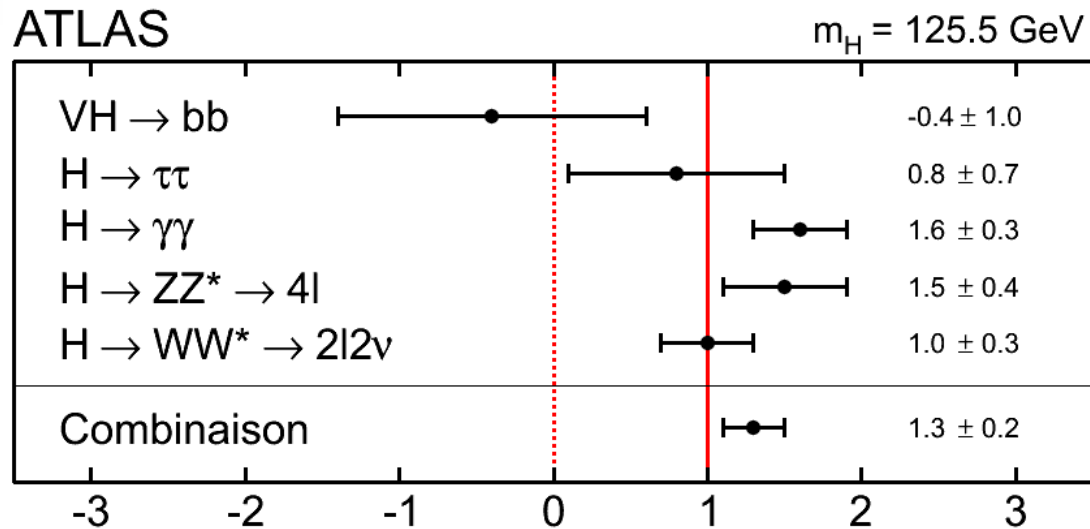


Animation CMS

Spectre de masse quatre-leptons, par intervalles de 3 GeV entre 70 et 1000 GeV
Evolution entre avril 2011 et décembre 2012

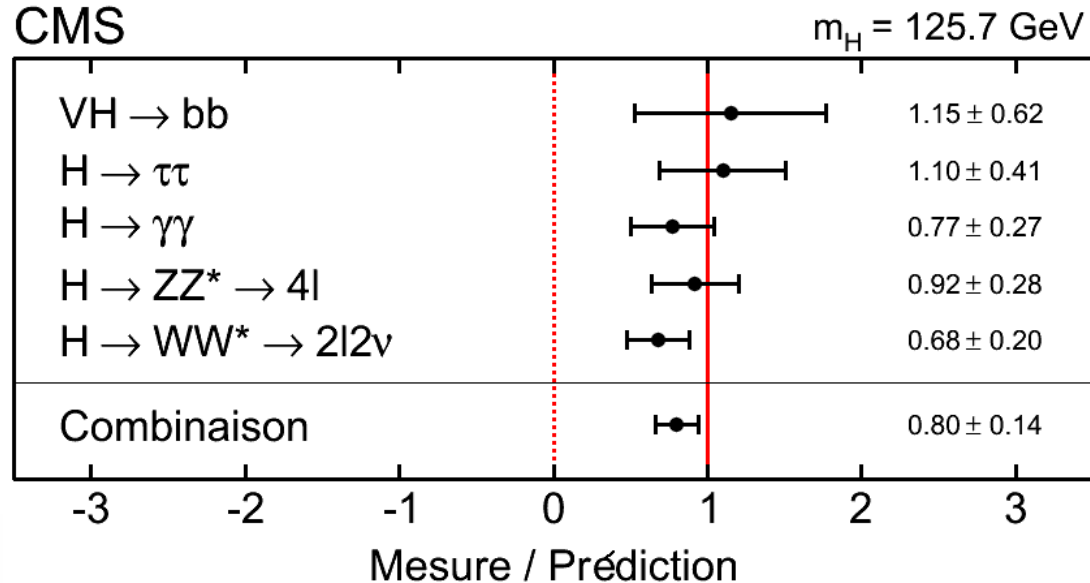


Les « couplages » du nouveau boson



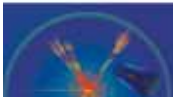
Situation
expérimentale
au printemps 2013

Rapport mesure/prédiction
=0 : MS sans boson de Higgs
=1 : MS avec boson de Higgs

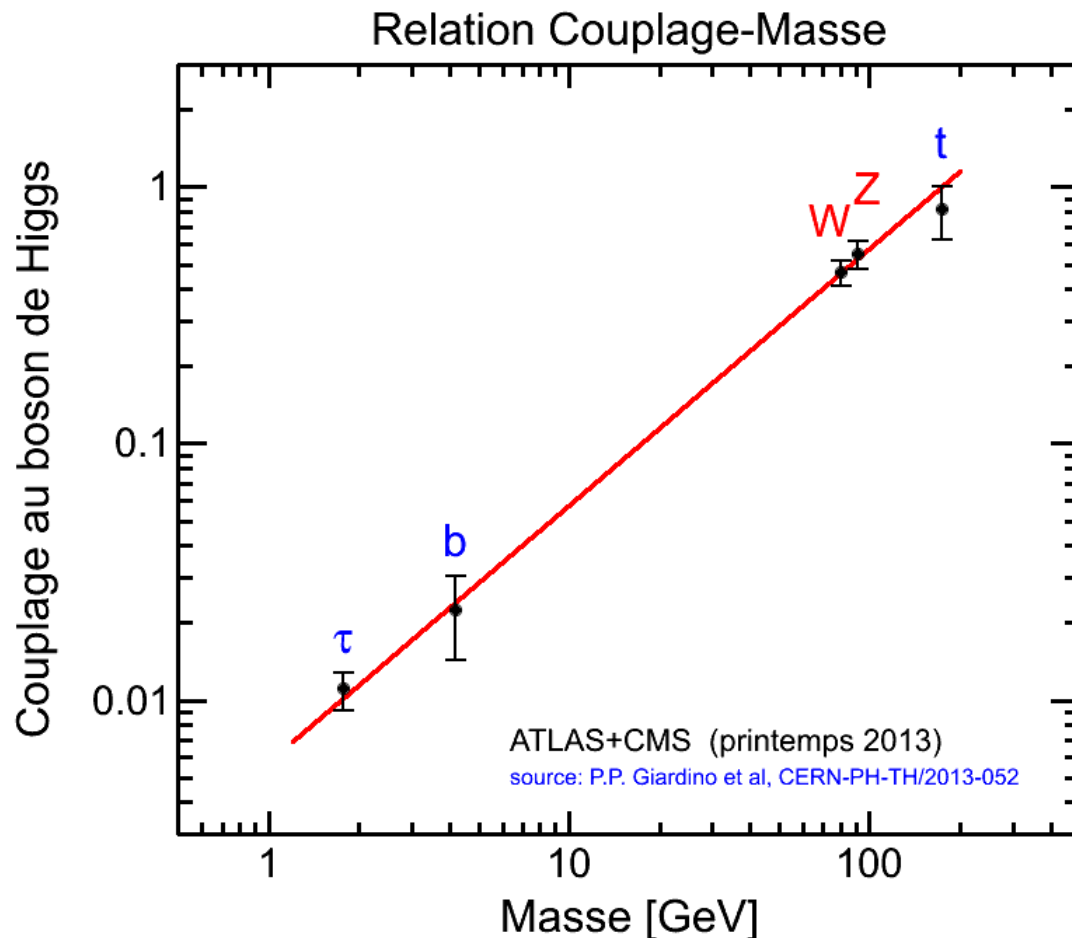


Meilleur accord
avec les prédictions
pour :

$$m_H = 125,6 \pm 0,6 \text{ GeV}$$



Relation couplage-masse



Q : Peut-on parler de découverte ?

R : Oui !

Le **signal** est observé
par les deux expériences

Q : Est-ce un boson ?

R : Oui.

Un signal est observé dans
le canal **deux-photons**

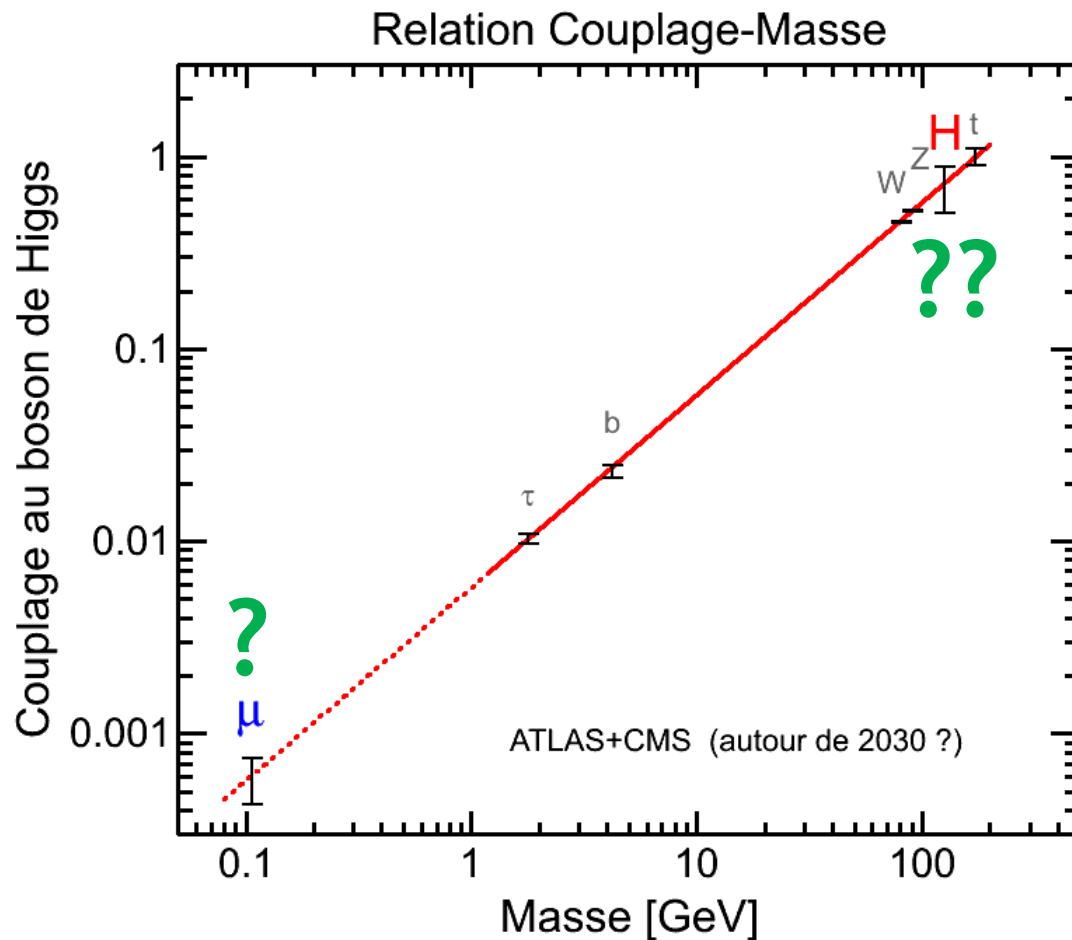
Q : Est-ce **LE** boson de Higgs ?

R : C'est **UN** boson de Higgs.

On ne peut pas affirmer
avec certitude qu'il s'agit
DU boson de Higgs du MS



Terra incognita



Les physiciens pénètrent
un nouveau territoire

celui du « secteur de Higgs »

Mesurer les
propriétés du nouveau boson
est une **priorité** du HL-LHC



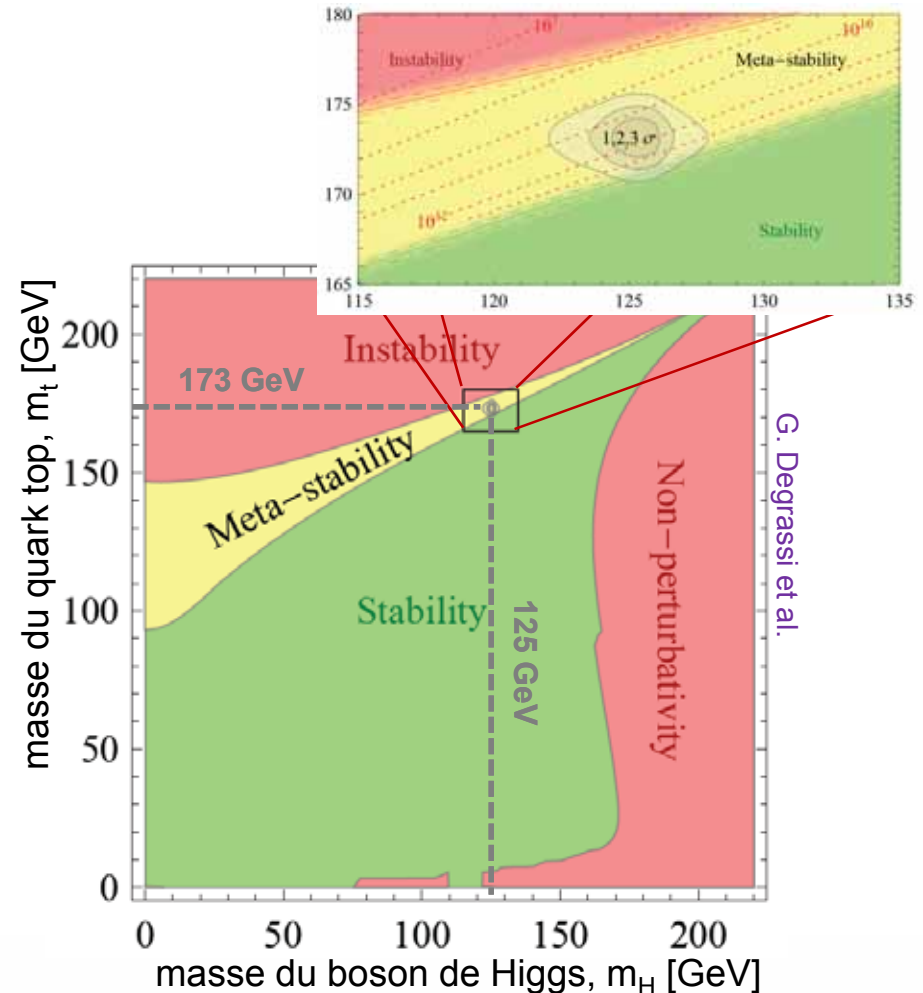
L'Univers est-il stable ?

La **stabilité** du vide dépend des **masses** du boson de Higgs et du quark top

- Quelle est la nature de la **matière noire** ?
- Comment **l'échelle électrofaible** se stabilise-t-elle ?
- La Nature est-elle **super-symétrique** ?
- Le **champ de Higgs** est-il responsable de **l'inflation primordiale** ?
- Quel est son lien avec **l'énergie sombre** ?
- Quel est rôle fondamental des **neutrinos** ?
- etc.

Ces questions fondamentales justifient la **poursuite** de la quête de **Nouvelle Physique** auprès du **LHC**, du **HL-LHC** et des **machines futures**

Notre Univers vit au bord du précipice !



Nature has been kind with us !

CERN, 4 juillet 2012

The Higgs Boson discovery
is more likely to be
the beginning of the story
than the end



Dr. Fabiola Gianotti (Cern)
porte-parole de
l'expérience ATLAS



Prof. Lisa Randall
(Harvard University)

Spécial
Festival d'Avignon
La 66^e fête du théâtre
démarre le 7 juillet
Supplément

Le Monde

Jeudi 5 juillet 2012 - 10^e année - N° 5073 - 1,90 € - France métropolitaine - www.lemonde.fr

Science : la matière dévoilée

- Le boson de Higgs, particule manquante pour expliquer l'Univers, vient d'être découvert
- Les physiciens du CERN de Genève ont prouvé son existence à 99,9999 %



Les promesses d'une nouvelle pilule tout en un contre le VIH
sante.lefigaro.fr

LE FIGARO jeudi 5 juillet 2012

sciences 11

Le Cern a mis la main sur le boson de Higgs

Les capteurs de l'Organisation européenne pour la recherche nucléaire ont détecté le nouveau Graal de la physique.

TRISTAN VEY

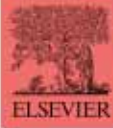
PHYSIQUE Au terme de deux présentations historiques effectuées hier matin au Cern, à Genève, le directeur de l'organisation, Rolf Heuer, se tourne vers l'auditoire, un grand sourire aux lèvres : « Je pense qu'on l'a. Qu'est-ce que vous en dites ? » Dans une grande clameur et un tonnerre d'applaudissements, les dizaines de physiciens réunis dans la salle lâchent un vibrant : « Yes ! » L'explosion de joie est à la mesure de la découverte, l'une des

cessaires à l'apparition de quelques-uns de ces bosons. Il a parfaitement rempli son office. Les deux principaux détecteurs, Atlas et CMS, aussi.

Sandrine Laplace, qui a travaillé pour le compte du CNRS sur CMS, explique la promesse expérimentale par une analogie. « Si nous avions pu emmagasiner toute la "musique" des données fournies par le LHC pendant un an, nous en aurions pour 600 millions d'années à tout écouter. Matériellement, nous n'avons pu enregistrer que 40 ans de musique en choisissant soigneusement les morceaux qui nous paraissent

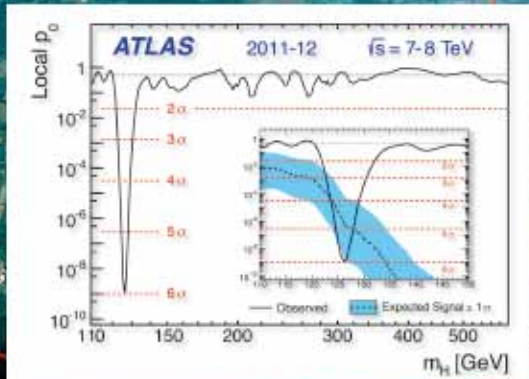
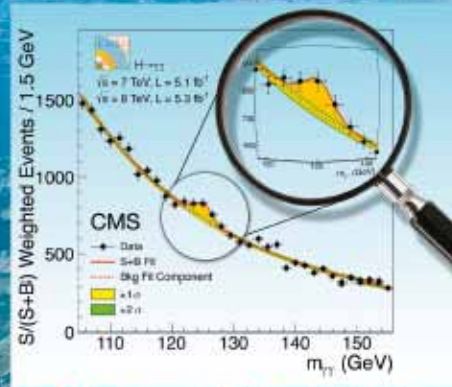


Rolf Heuer (2^e à droite) lors d'une présentation, mercredi, à des dizaines de physiciens au Cern, à Genève. DENIS BALBOUSE/REUTERS



PHYSICS LETTERS B

Available online at www.sciencedirect.com
SciVerse ScienceDirect



Merci de
votre
attention

Gautier Hamel de Monchenault