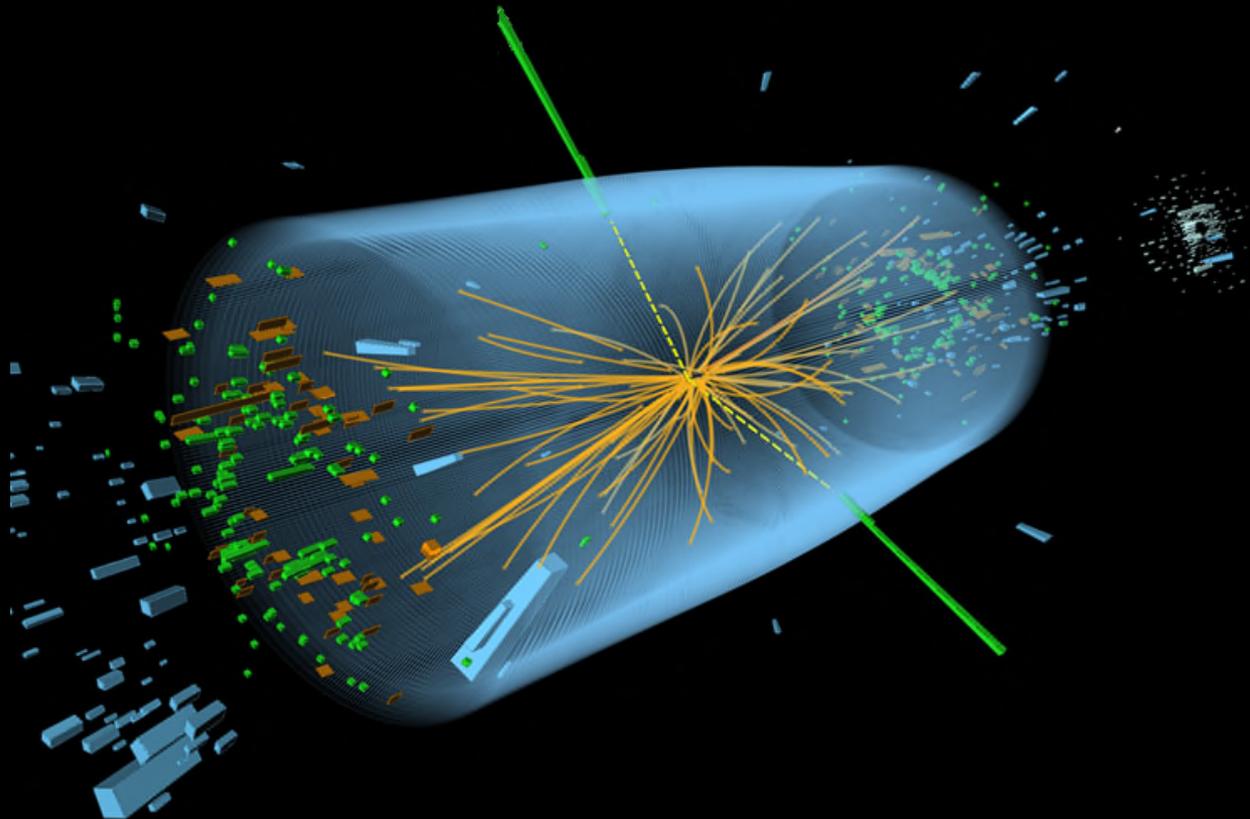
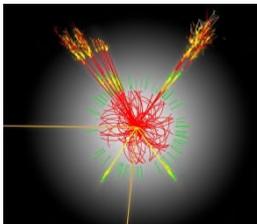


# L'AVENTURE DU COLLISIONNEUR LHC ET LA RECHERCHE DU BOSON DE HIGGS



Claude Guyot, CEA/IRFU/ Saclay, le 14 septembre 2013



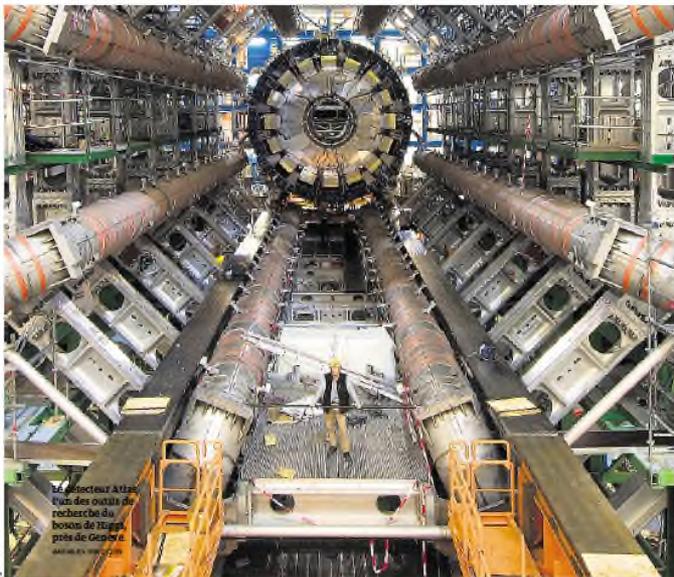


# Plan de l'exposé

- Particules et forces
- Le Modèle Standard de la physique des particules
- Le mécanisme de BEH et le boson de Higgs
- Les insuffisances du Modèle Standard et la nécessité d'une nouvelle physique
- Les accélérateurs et les expériences en physique des particules
- Comment produire et détecter le boson de Higgs
- Le projet LHC
- Les expériences ATLAS et CMS
- Les prises de données en 2011 et 2012
- La découverte du boson de Higgs
- Est-ce bien le boson de Higgs prédit par le Modèle Standard?
- La recherche de nouvelle physique
- Le boson de Higgs et les grandes questions de la physique des particules
- Le futur

## 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 %



Le détecteur ATLAS, l'un des outils de recherche du boson de Higgs, près de Genève.

## 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

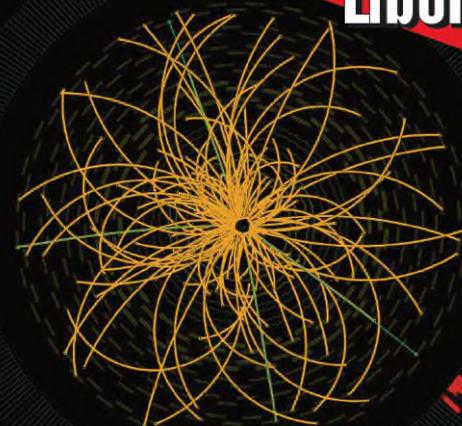
**PHYSIQUE** Au terme de deux présentations historiques effectuées hier matin au Cern<sup>1</sup>, à Genève, le directeur de l'organisation, Rolf Heuer, se tourne vers l'auditoire, un grand sourire aux lèvres : « Je pense qu'on l'a. Qu'est-ce que vous en dites ? » Dans une grande clameur et un tonnerre d'applaudissements, les dizaines de physiciens réunis dans la salle lèchent un vibrant : « Yes ! » L'explosion de joie est à la mesure de la découverte, l'une des

nécessaires 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 enregistrer 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<sup>e</sup> à droite) lors d'une présentation, mercredi, à des dizaines de physiciens au Cern, à Genève. DENIS BALBOUSE/REUTERS

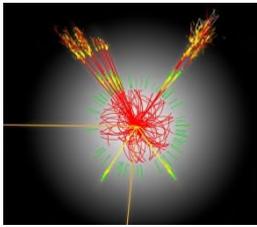


Physique des particules

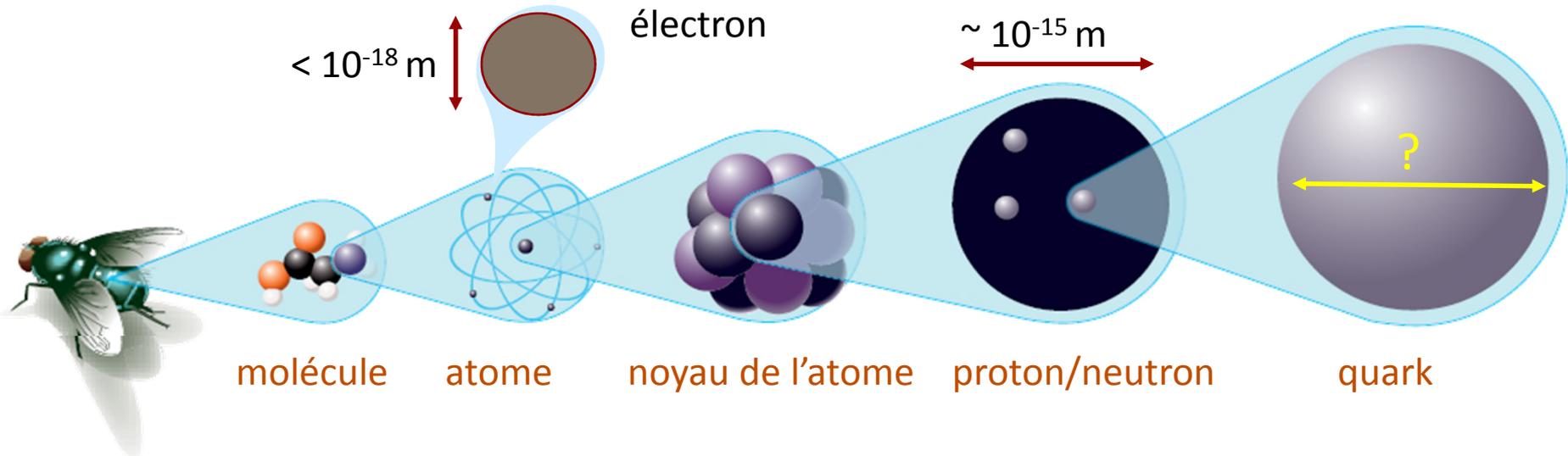
## La masse est dite

Le Cern a réussi à mettre en évidence le boson de Higgs qui résout une énigme fondamentale et ouvre une nouvelle étape scientifique. PAGES 2-5

En raison d'un mouvement de gel dans les imprimeries, ce numéro de Libération n'est disponible que sous forme électronique. Toutes nos excuses à nos lecteurs.

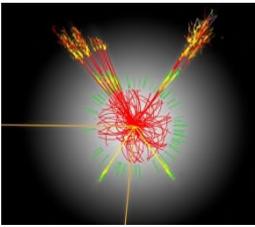


# Particules et forces

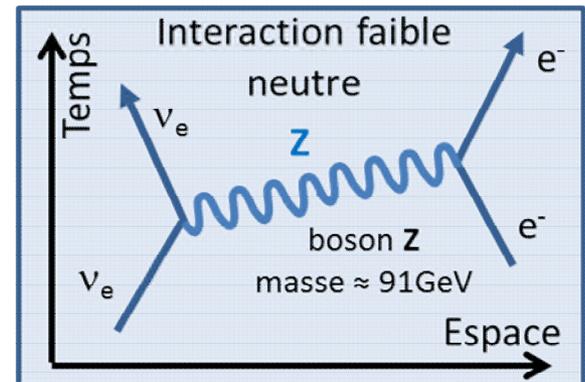
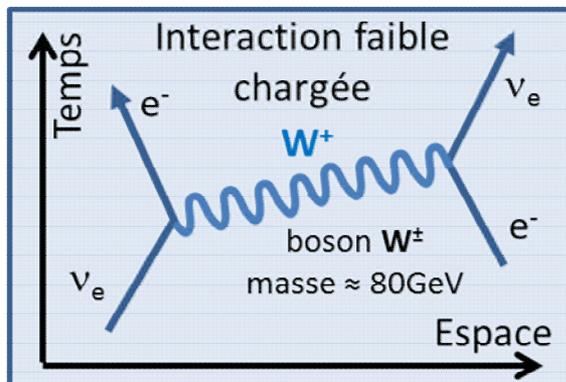
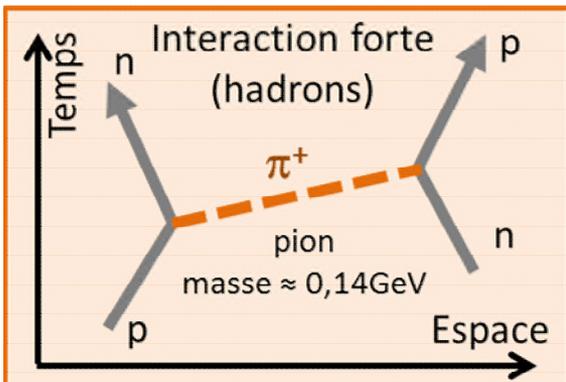
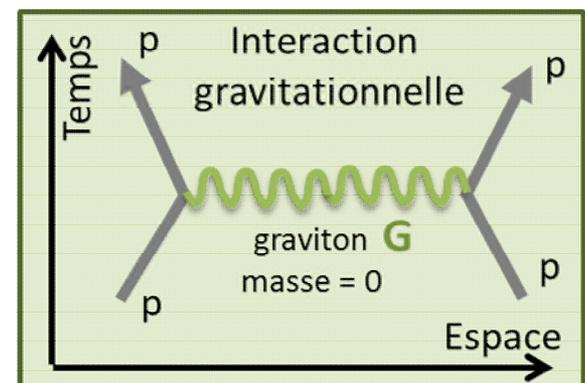
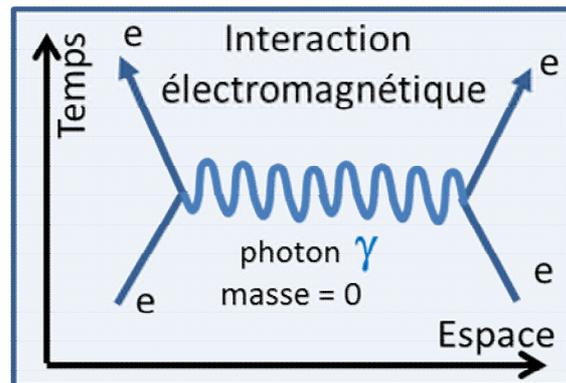
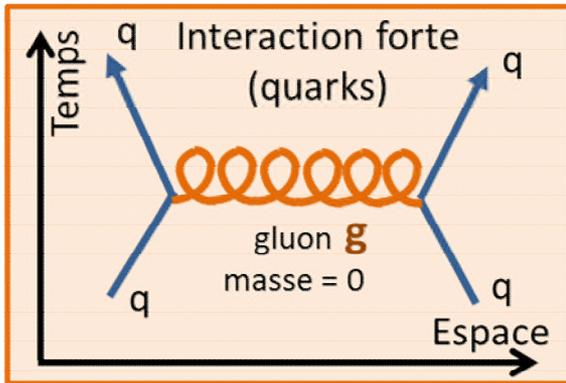


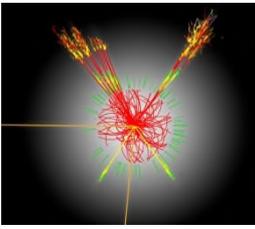
Les électrons et les quarks sont les constituants élémentaires de la matière.

Les particules de matière interagissent entre elles par des forces engendrées par l'échange de bosons:



# Particules et forces





# Le Modèle Standard (MS)

Le MS comporte 12 particules de matière (+12 d'antimatière) et 3 forces.  
Il décrit tous les phénomènes observés en physique des particules (avec 29 paramètres libres).

## Fermions

Particules de matière

Organisées en 3 familles

$$\begin{pmatrix} e \\ \nu_e \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \mu \\ \nu_\mu \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \tau \\ \nu_\tau \end{pmatrix}$$

6 Leptons



6 Quarks



$$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}$$

## Bosons

Propagateurs de force

Distinguant 3 forces

Photon

Force électro-  
magnétique



3 Bosons faibles

Force faible



8 Gluons

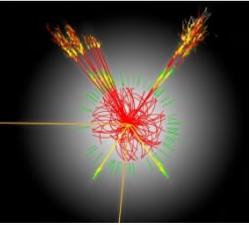
Force forte



Boson de Higgs



Brise la symétrie électrofaible  
Génère les masses des particules



# Le Modèle Standard : Les masses

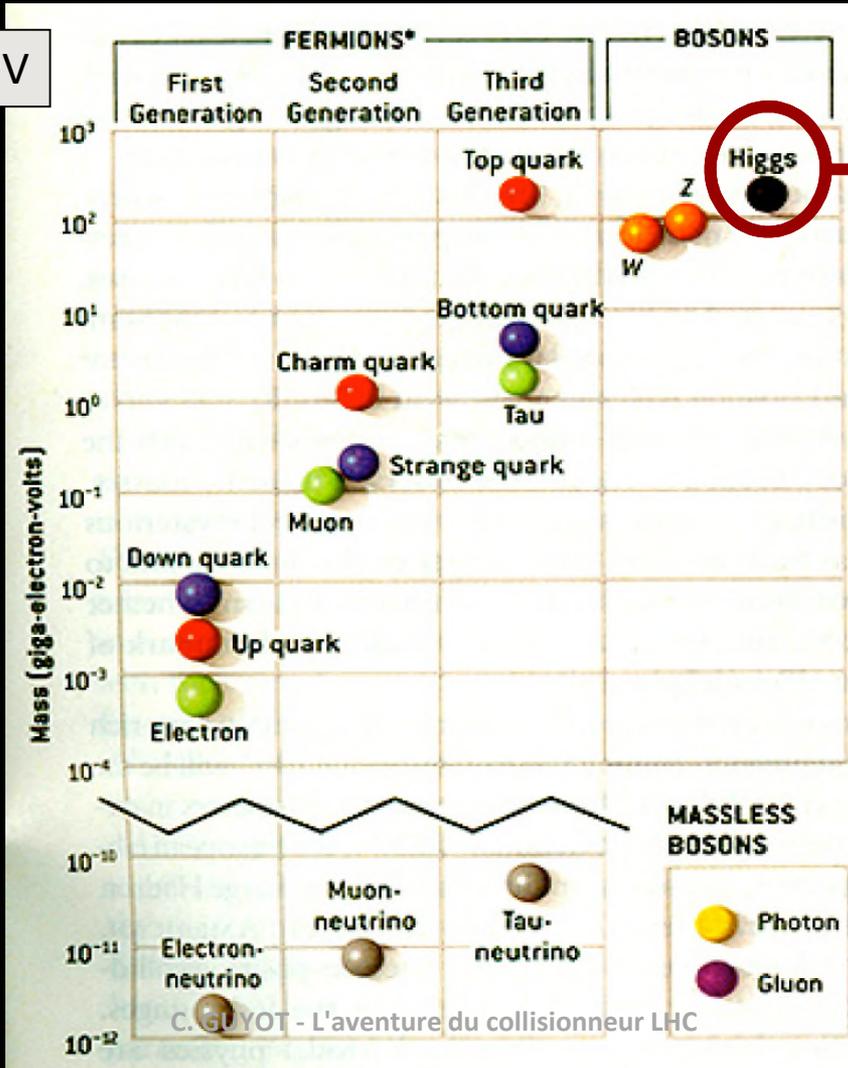
GeV

100

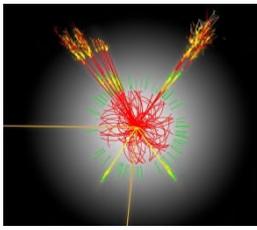
1

0,001

$10^{-11}$



C. GUYOT - L'aventure du collisionneur LHC

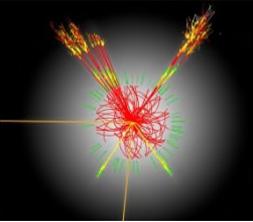


# Pourquoi le Boson de Higgs

## Question centrale du (pré)Modèle Standard:

La théorie mathématique (théorie de jauge) qui décrit les interactions prévoit a priori une masse nulle pour les bosons vecteurs (avec une portée infinie de la force associée).

Les expériences montrent que la force faible ( $W^{+-}, Z^0$ ) est de très courte portée, compatible avec des masses de boson d'environ 100GeV ( $\sim 100$  fois la masse du proton).

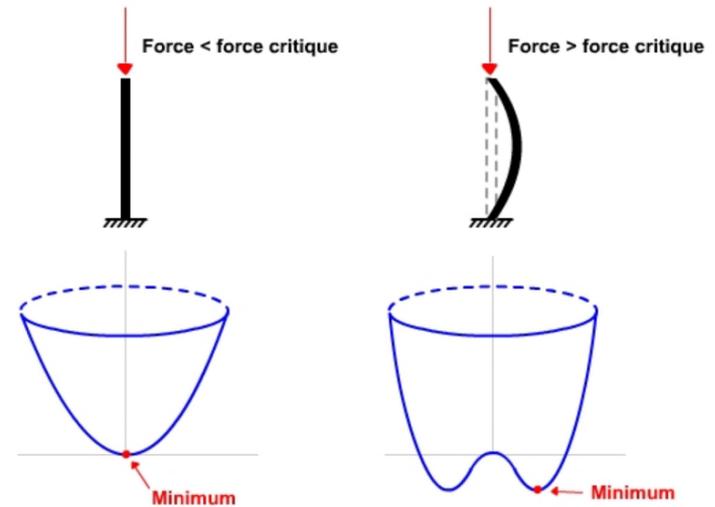
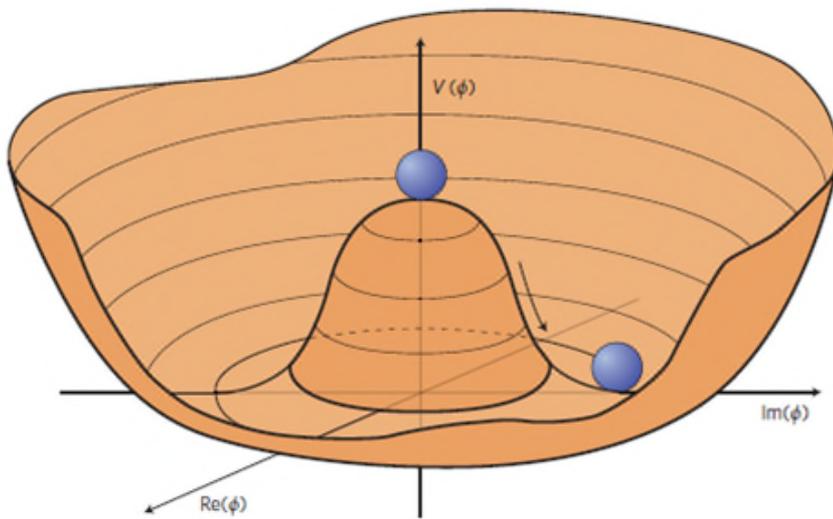


# Le Mécanisme de Brout-Englert-Higgs

**La solution a cette énigme a été apportée en 1964 par le mécanisme de Brout-Englert-Higgs (P. Higgs; F. Englert - R. Brout):**

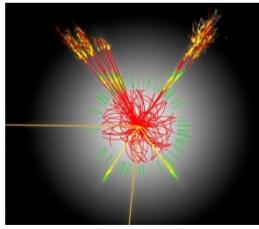
- Un nouveau champ de particules (appelé champ de Higgs) remplit tout le vide de l'espace-temps.
- Ses propriétés sont telles que le vide (minimum d'énergie) correspond a une valeur non nulle de ce champ.
- Les particules interagissent avec ce champ, ce qui ralenti leur mouvement (vitesse  $< c$ , donc effet équivalent a celui d'une masse).
- L'action du champ de Higgs est l'équivalent d'une sorte de viscosité du vide (mais sans l'effet dissipatif).

# Le Mécanisme de Brout-Englert-Higgs

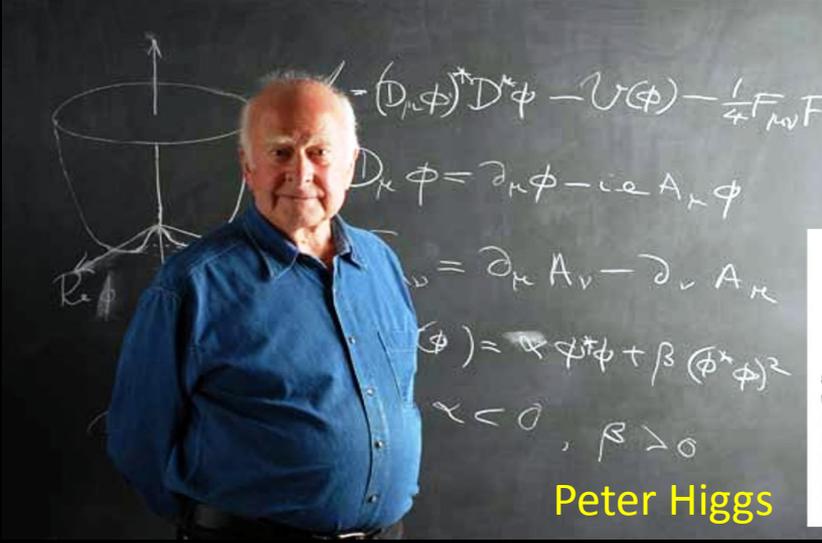


Brisure spontanée de symétrie

Le potentiel de Higgs peut s'écrire simplement en fonction des deux composantes du champ de Higgs décrit par un nombre complexe  $\phi$  :  $V(\phi) = \mu^2 |\phi|^2 + \lambda |\phi|^4$  où  $\mu^2$  et  $\lambda$  sont les paramètres de masse et de couplage quartique du champ de Higgs. Lorsque la température de l'Univers descend en dessous d'une certaine valeur,  $\mu^2$  devient négatif et le potentiel prend la forme du chapeau mexicain représenté sur cette figure. À l'état fondamental, c'est-à-dire à l'énergie la plus basse de l'Univers, correspond alors une valeur non nulle du champ de Higgs  $v = 246$  GeV



# Le Mécanisme de Brout-Englert-Higgs



Peter Higgs

## 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)

It is of interest to inquire whether gauge vector mesons acquire mass through interaction<sup>1</sup>: by a gauge vector meson we mean a

those vector mesons which are coupled to currents that "rotate" the original vacuum are the ones which acquire mass [see Eq. (6)].

## 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)

In a recent note<sup>1</sup> it was shown that the Goldstone theorem,<sup>2</sup> that Lorentz-covariant field theories in which spontaneous breakdown of symmetry under an internal Lie group occurs contain zero-mass particles, fails if and only if the conserved currents associated with the internal group are coupled to gauge fields. The purpose of the present note is to report that,

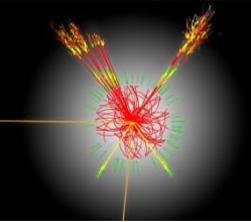
about the "vacuum" solution  $\varphi_1(x) = 0$ ,  $\varphi_2(x) = \varphi_0$ :

$$\partial^\mu \{ \partial_\mu (\Delta \varphi_1) - e \varphi_0 A_\mu \} = 0, \quad (2a)$$

$$\{ \partial^2 - 4\varphi_0^2 V''(\varphi_0^2) \} (\Delta \varphi_2) = 0, \quad (2b)$$

$$\partial_\nu F^{\mu\nu} = e \varphi_0 \{ \partial^\mu (\Delta \varphi_1) - e \varphi_0 A_\mu \}. \quad (2c)$$





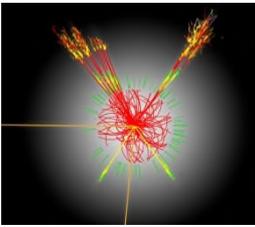
# Le Mécanisme de Brout-Englert-Higgs

Le mécanisme de Brout-Englert-Higgs est la clef de l'unification électrofaible en expliquant la différence de masse entre les bosons  $W/Z$  et photon  $\gamma$  tout en fournissant un moyen de donner une masse aux fermions.

Ce mécanisme dérive des concepts développés en physique de l'état condensé:

- brisure spontanée des symétries
- rôle du vide en tant qu'état fondamental de la matière où des champs peuvent se condenser.

Le rôle du champ de Higgs est analogue sur le plan théorique à celui des paires de Cooper de la supraconductivité.



# Le Boson de Higgs

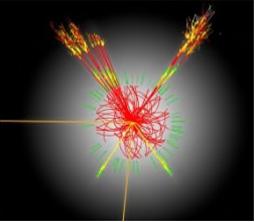


Une rumeur est lancée dans la pièce



Un amas se forme, c'est une nouvelle particule

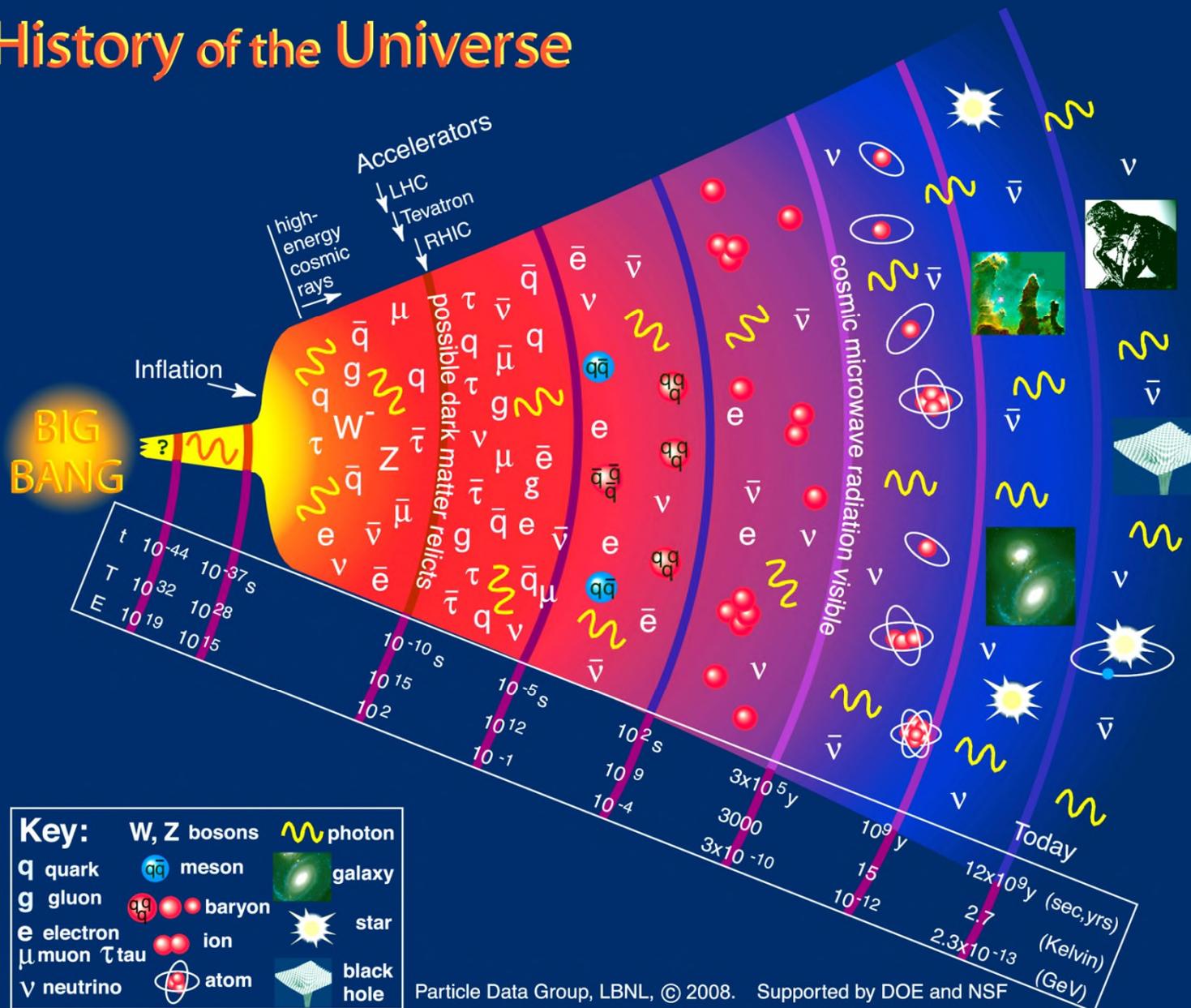
Le vide (quantique) peut « s'auto-condenser » (si on injecte de l'énergie),  
c'est le boson de Higgs  
C'est ce qu'on fait au LHC dans les collisions proton-proton



# Le boson de Higgs et l'évolution de l'Univers

- **t = 0 : le Big-Bang (il y a 13,7 milliards d'années...)**
  - Une période inconnue et mystérieuse... Température de ? ( $> 10^{30}$  K) à  $10^{16}$  K
- **t un peu avant  $10^{-12}$  secondes (un millième de nanoseconde):**
  - Univers encore très chaud ( $10^{16}$  K), en refroidissement
  - particules élémentaires actuelles (quarks, électrons, neutrinos...), sans masse.
- **t  $\sim 10^{-12}$  secondes : entrée en action du mécanisme de Higgs**
  - processus similaire à la condensation: 'vapeur d'eau => eau' quand T descend
  - le vide acquiert une certaine « tension interne ».
- **t après  $10^{-12}$  secondes , après le mécanisme de Higgs**
  - Le vide se condense autour des particules: elles ont une masse, et ne vont plus à la vitesse de la lumière (sauf la lumière elle-même!)
- **t = 2012 après JC:**
  - Des physiciens réalisent des collisions p-p assez énergétiques pour injecter de l'énergie dans le vide et en faire surgir son « auto-condensation »: des bosons de Higgs

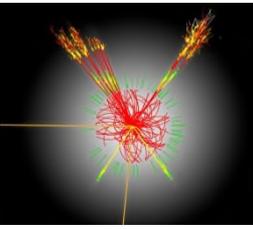
# History of the Universe



Particle Data Group, LBNL, © 2008. Supported by DOE and NSF

rs

- t
- t
- t
- t
- t



# Le lagrangien du Modèle Standard

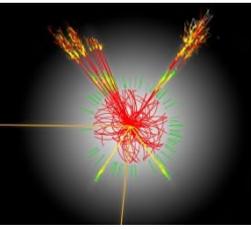
$$\begin{aligned} \mathcal{L} = & -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} \\ & + i \bar{\psi} \not{D} \psi + \text{h.c.} \\ & + \bar{\psi}_i y_{ij} \psi_j \phi + \text{h.c.} \\ & + |D_\mu \phi|^2 - V(\phi) \end{aligned}$$

Dynamique des champs de boson de jauge

Dynamique des champs de fermions

Interaction des champs de fermion  
avec le champ de Higgs -> masse des  
fermions

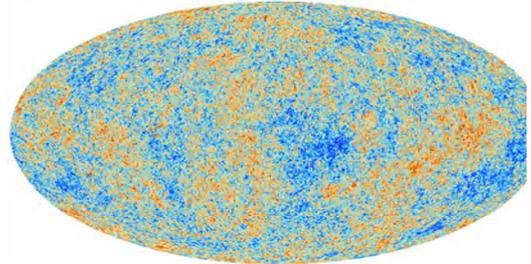
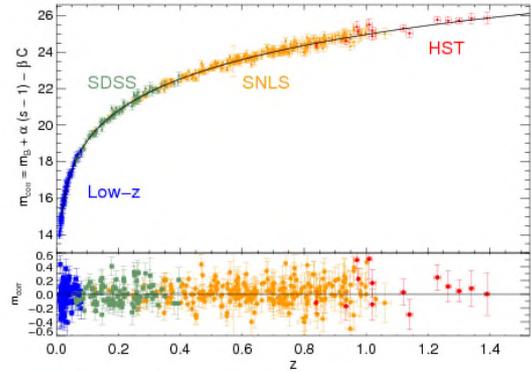
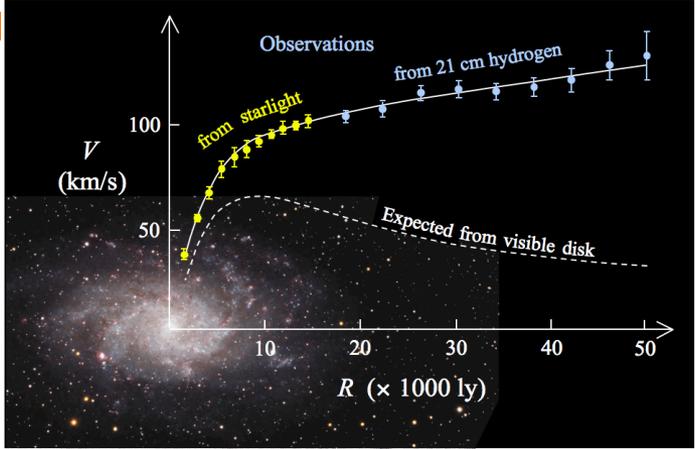
Propagation du champ de Higgs  
(-> masse des bosons de jauge) et potentiel de  
Higgs (-> brisure spontanée de symétrie)



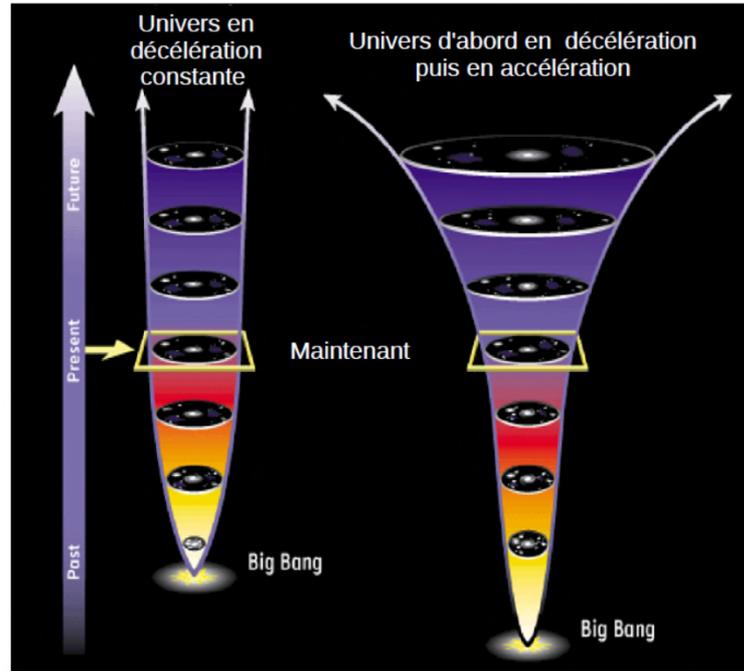
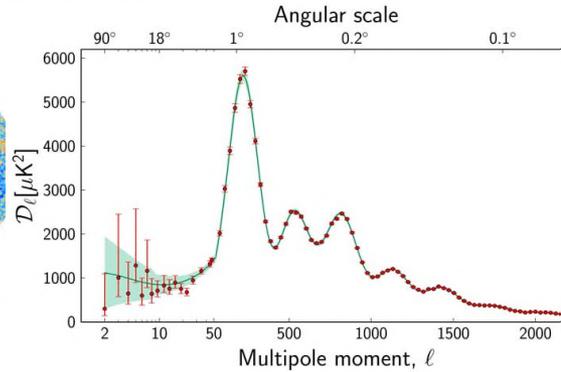
# Ce que le Modèle Standard n'explique pas(1)

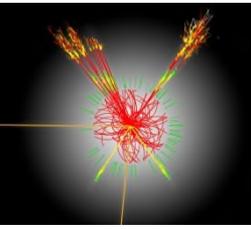
☐ La matière noire

☐ L'énergie noire

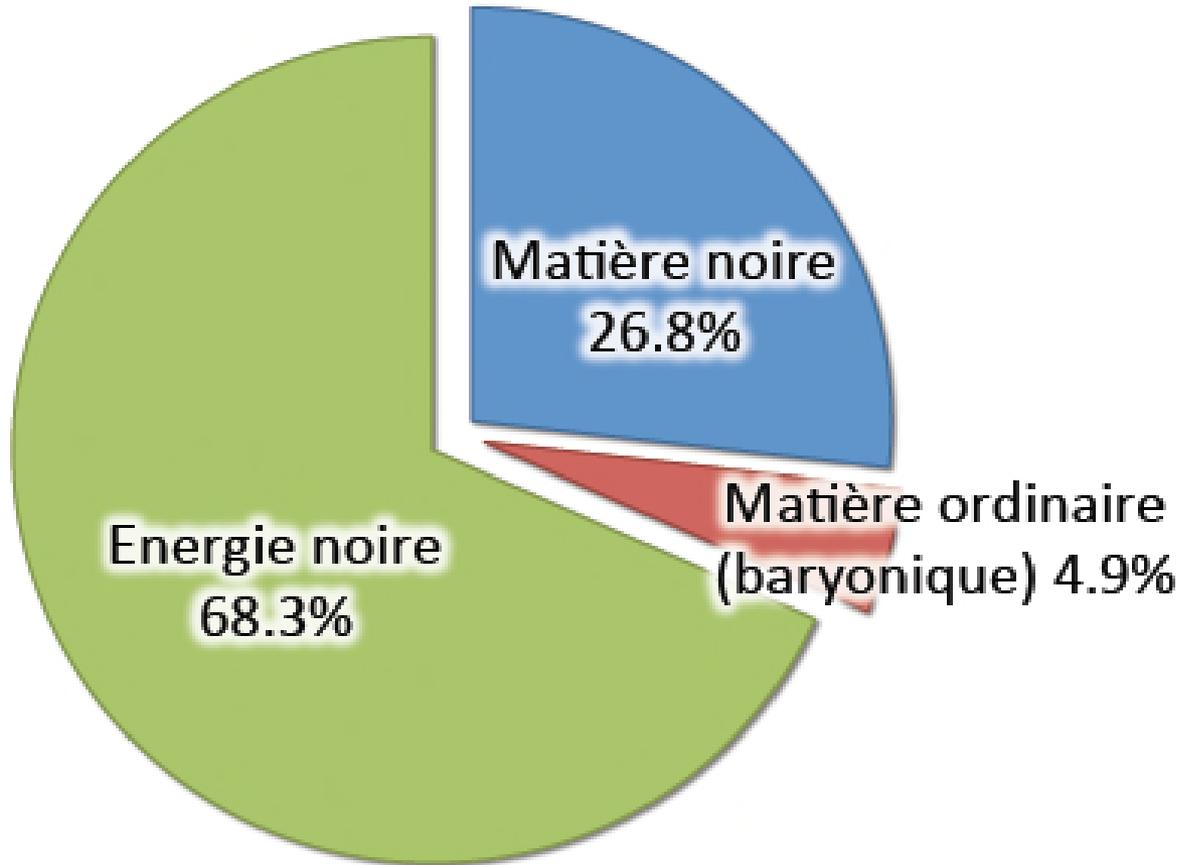
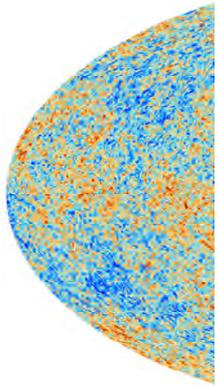


14/09/2013

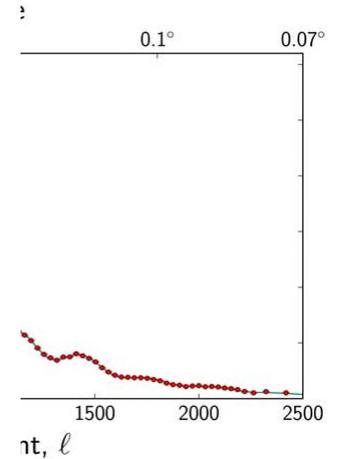




# Ce que le modèle standard n'explique pas(2)



ire



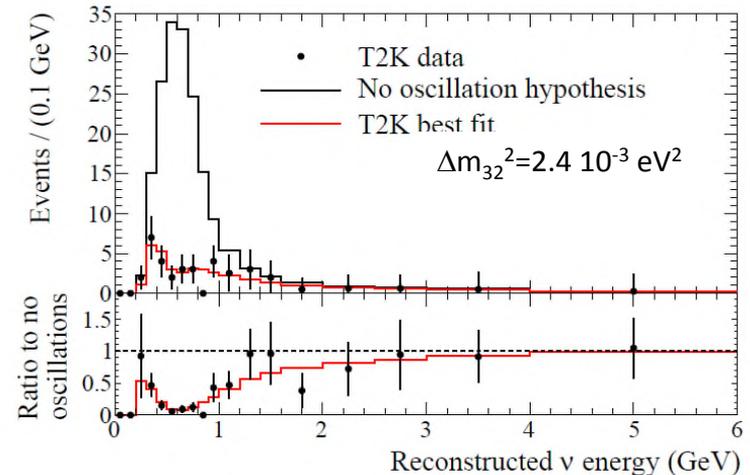
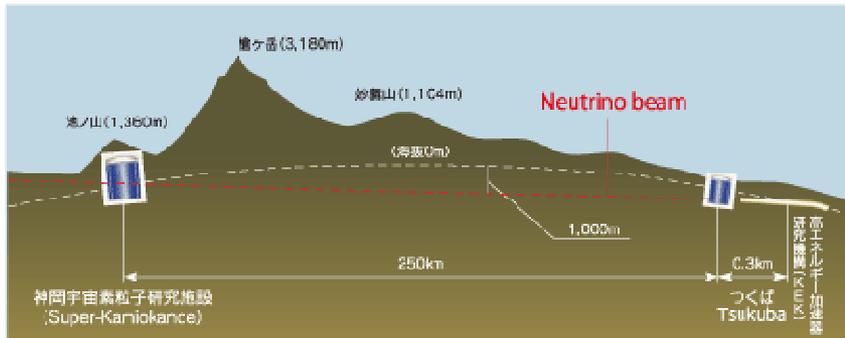
# Ce que le modèle standard n'explique pas (3)

## ❑ La gravitation

- Pas encore de théorie satisfaisante de la gravité quantique

## ❑ La masse des neutrinos

- Experience SuperKamiokande :



## ❑ L'asymétrie entre matière et antimatière dans l'Univers

- La violation de CP observée dans les désintégrations des mésons  $K^0$  et  $B^0$  est insuffisante

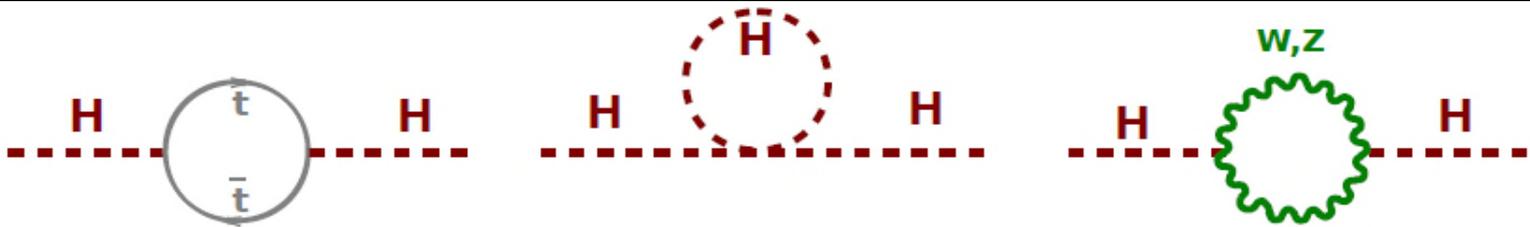
## ❑ L'absence de violation de CP dans les interactions fortes

# Ce que le modèle standard n'explique pas (3)

## ❑ La masse du boson de Higgs

- Pourquoi cette masse n'est-elle pas de l'ordre de  $\Lambda \sim 10^{15}$  GeV

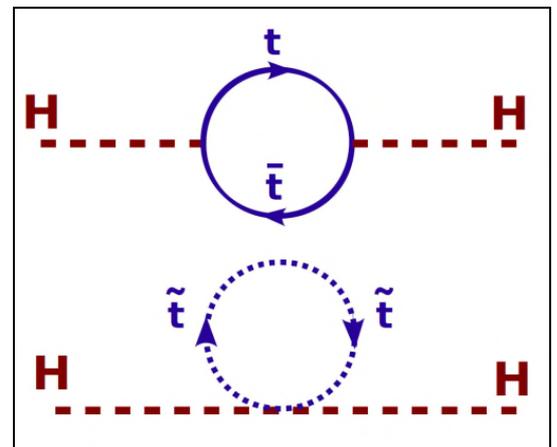
Diagrammes à une boucle virtuelle contribuant aux corrections radiatives à la masse du boson de Higgs.



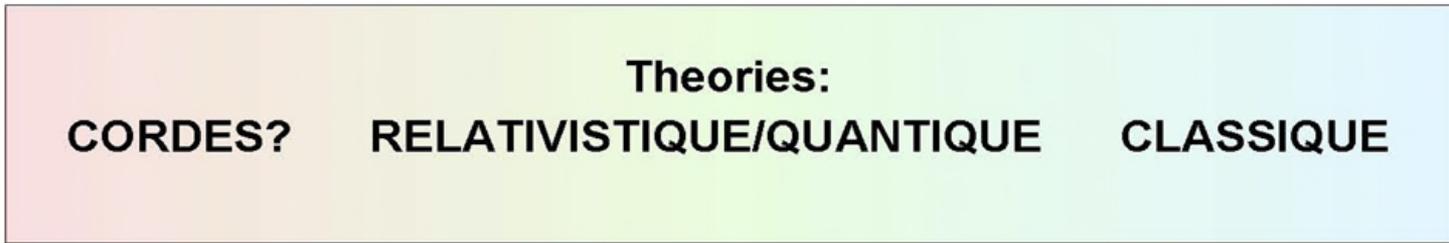
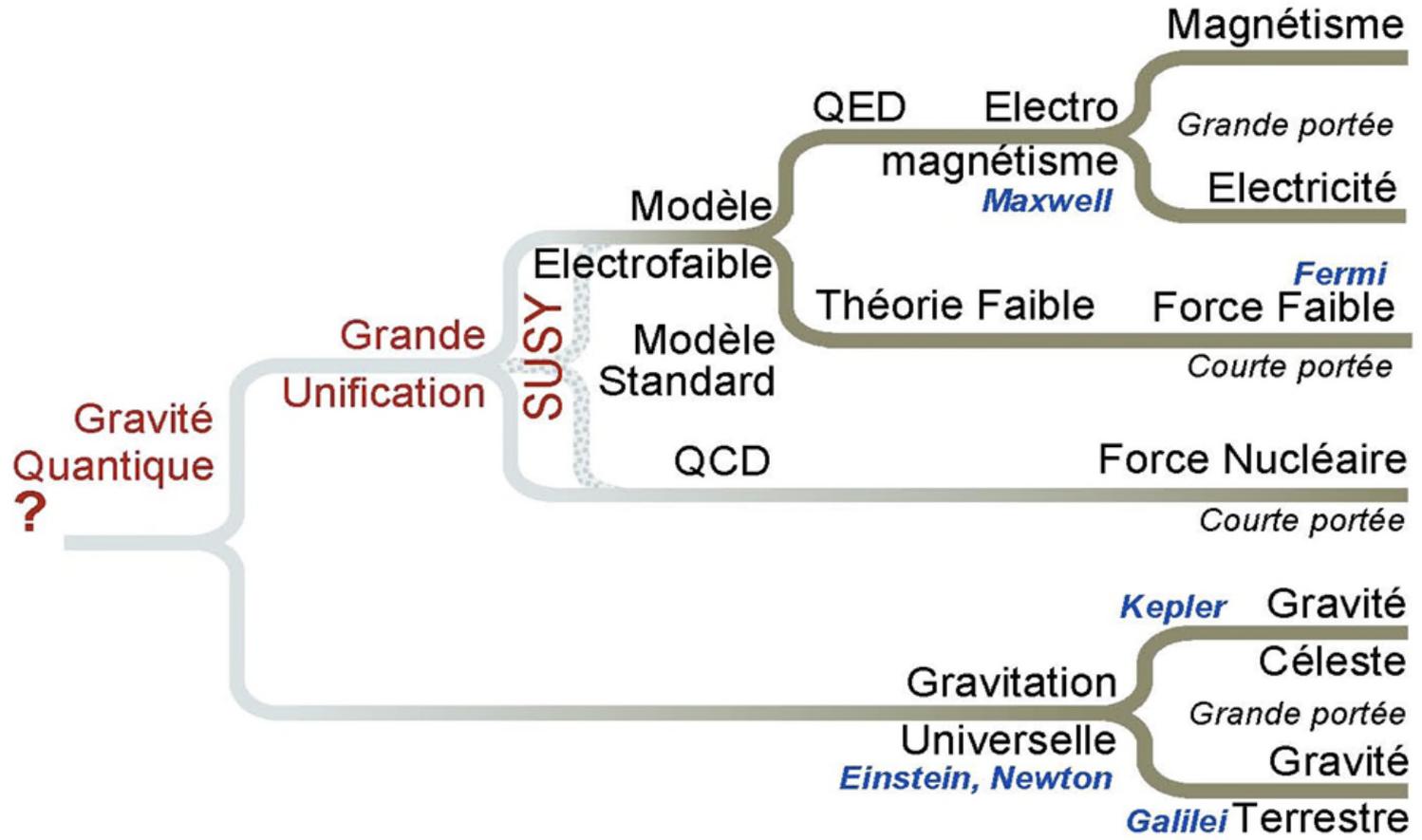
## ❑ => Théorie au-delà du Modèle Standard:

- Supersymétrie?

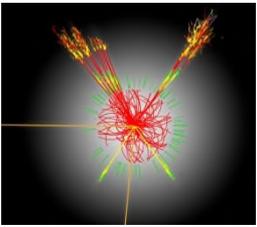
Diagrammes à une boucle contenant le quark top (haut) et son partenaire supersymétrique, le stop (bas), contribuant aux corrections radiatives à la masse du boson de Higgs.



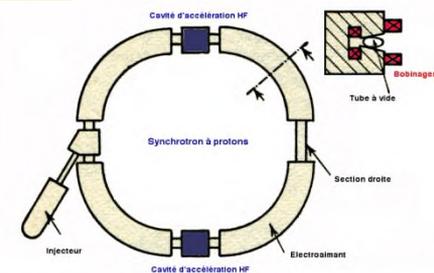
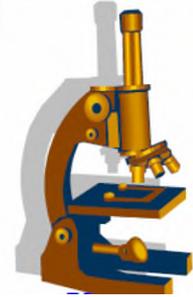
# La nouvelle physique?



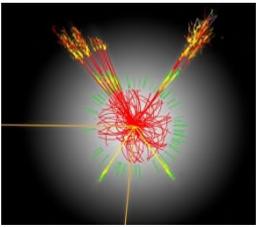
# Les expériences en physiques des particules



- ❑ Comment « sonder » la matière à toute petite échelle?
  - Avec des particules connues de grande énergie.
- ❑ Microscope optique
  - photons de 0,5 eV => résolution ~ 1 micron: cellule
- ❑ Microscope électronique
  - électrons de ~10 keV => 0,02 nanomètre: atome
- ❑ Au-delà (noyau atomique, quarks): *rayons cosmiques*, accélérateurs
  - 1 GeV =>  $10^{-16}$ m < taille du proton
- ❑ 2<sup>e</sup> moitié du 20<sup>e</sup> siècle: succession d'accélérateurs de plus en plus grands (puissants)



# Quelques accélérateurs du CERN



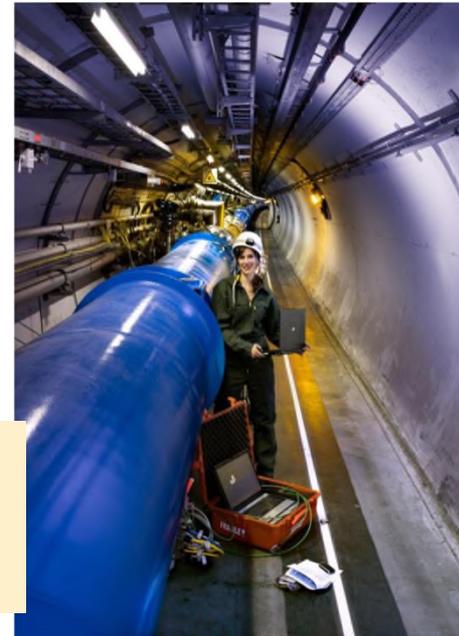
PS Cern (1959):  
protons 28 GeV  
Cibles fixes  
Diamètre 72 m

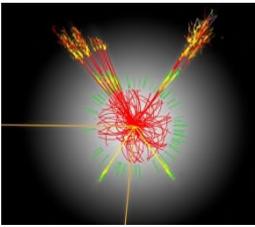
SPS(1976-...):  
Protons 400 GeV  
Cibles fixes.  
Collisions  
protons-antiprotons  
270+270GeV (1981-84).  
Diamètre 2,3 km



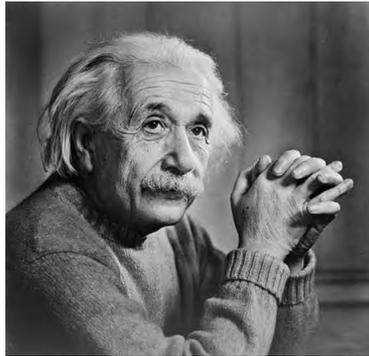
LEP : collisions  $e^+ e^-$   
100 + 100 GeV  
Diamètre 9 km  
Tunnel à 100m sous terre  
1989- 2000

LHC: collisions  
 $p + p$  , 7 + 7 TeV Tunnel du LEP  
2008 .....





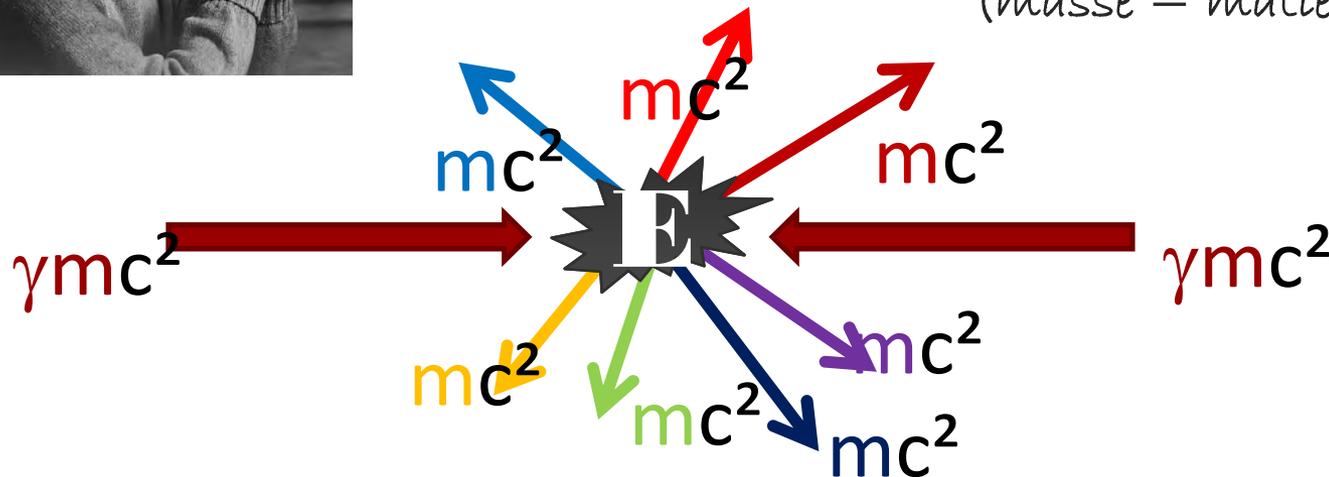
# Comment produire le boson de Higgs



$$E = mc^2$$

Energie  $\leftrightarrow$  Masse

(masse = matière)

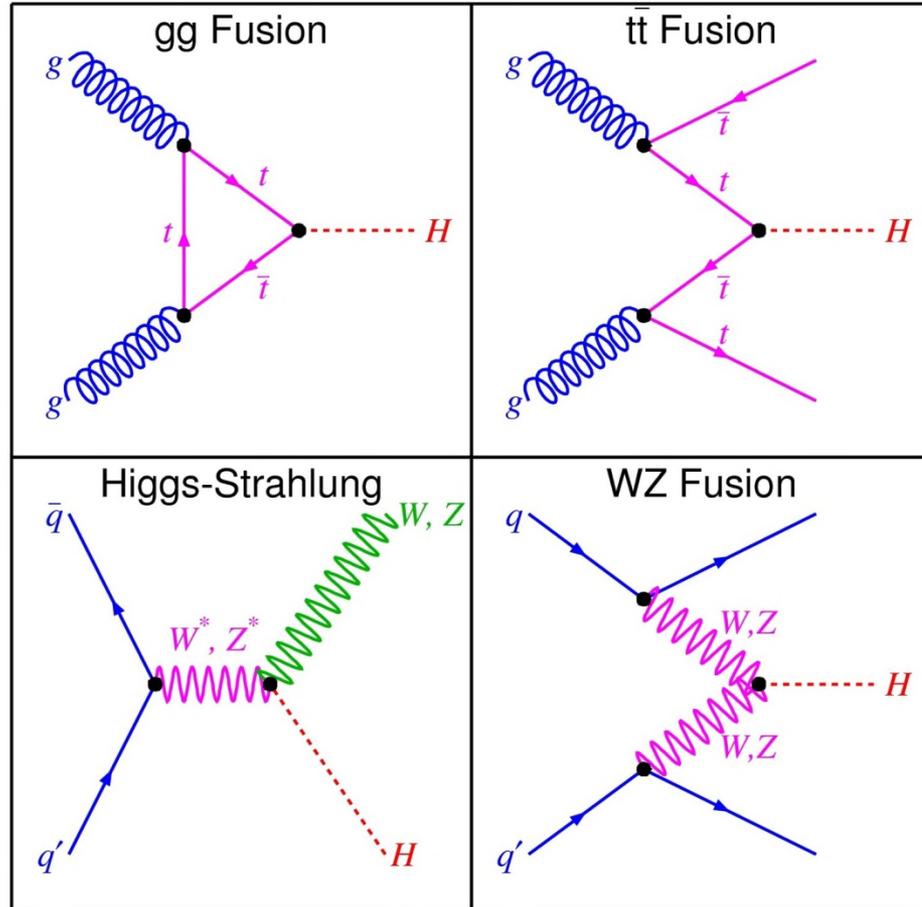


**Au LHC: production du boson de Higgs principalement par collision de 2 gluons**

**NB: eV = unité de mesure des énergies et masses dans cette présentation**

- **1 GeV  $\approx$  masse du proton**
- **1 TeV = 1000 GeV**

# Comment produire le boson de Higgs



proton

gluons

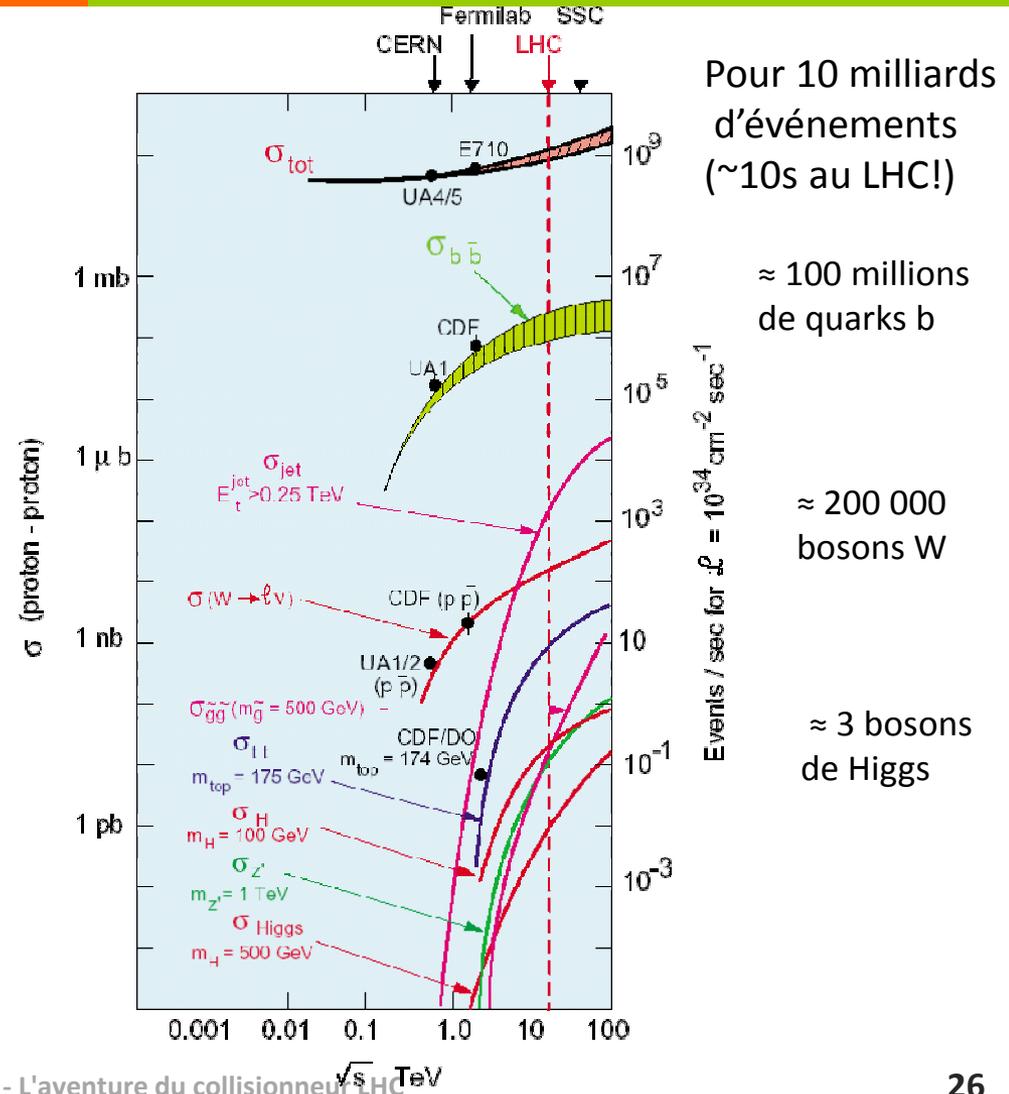
proton

# Comment produire le boson de Higgs

## Le boson de Higgs

- ❑ Pas vu au LEP, car l'énergie du LEP est trop faible pour produire une si grande masse ( $E=mc^2$ )
- ❑ Pas vu au Tevatron, car s'il est produit, il ne l'est pas en quantité suffisante pour conclure

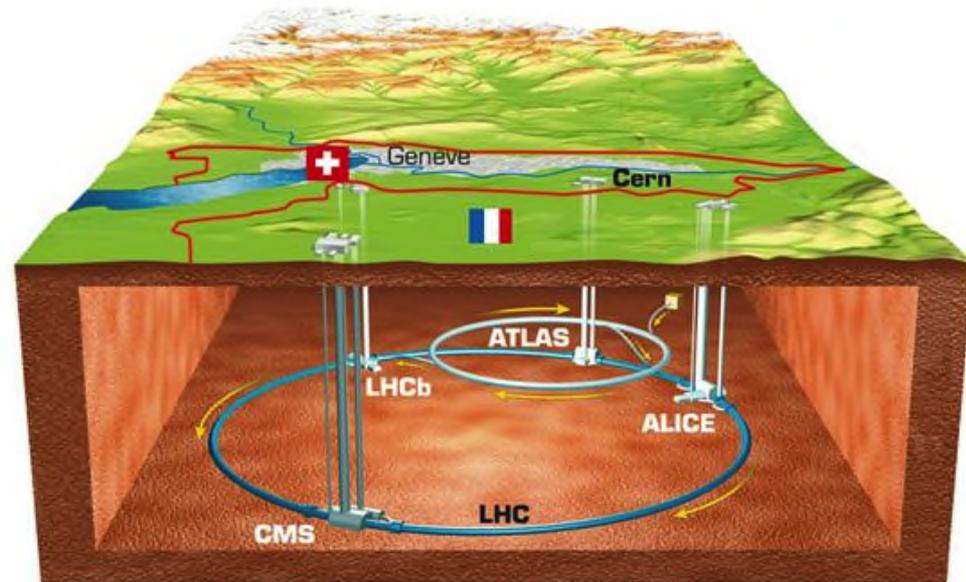
**Il faut donc un collisionneur avec une énergie plus grande, et un très grand nombre de collisions: le LHC!**



# Comment produire le boson de Higgs

## Le LHC:

- ❑ Collisionneur proton-proton au CERN à Genève dans l'anneau du LEP (27 km)
- ❑ Énergie:
  - Nominale: 7 TeV par faisceau soit 14 TeV dans le centre de masse, près de 7 fois l'énergie du Tevatron!
  - Actuelle: la première phase de prise de donnée a eu lieu à 7 TeV en 2011 et 8 TeV en 2012

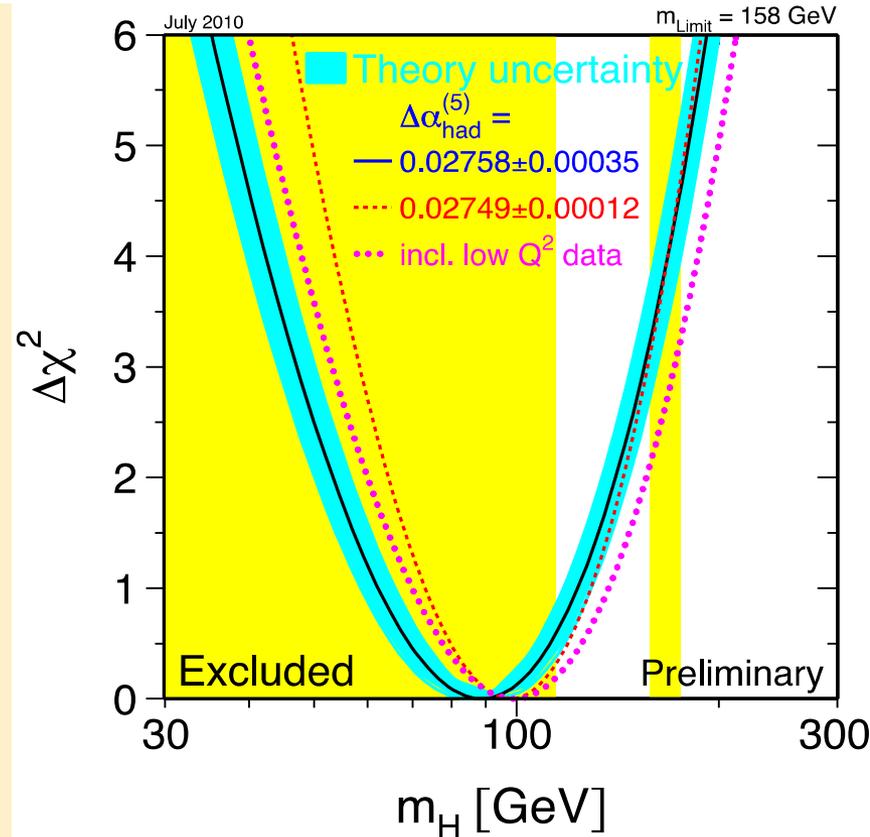


- ❑ Luminosité (proportionnelle au nombre d'interactions par seconde):
  - Nominale:  $10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  (= 25 x Tevatron)
  - Actuelle:  $7 \cdot 10^{33} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$

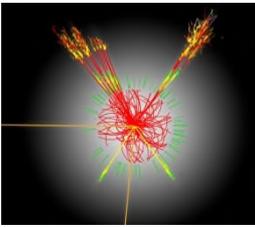
# Connaissances avant le LHC

Le Modèle Standard ne prédit pas la **masse du boson de Higgs**.

- ❑ En revanche, **pour une masse donnée, le modèle prédit ses propriétés**
- ❑ **Le LEP au CERN** (Genève, 1989-2000) collisions électron-positon jusqu'à 209 GeV
  - Mesures de la masse du W et des paramètres du Z
  - Recherches directes:  $m_H > 115$  GeV
- ❑ **Le Tevatron au Fermilab** (Chicago, 1992-2011) collisions proton-antiproton à 1.96 TeV
  - Découverte du quark top et mesure de sa masse
  - Recherches directes:  $m_H \notin [158-173]$  GeV

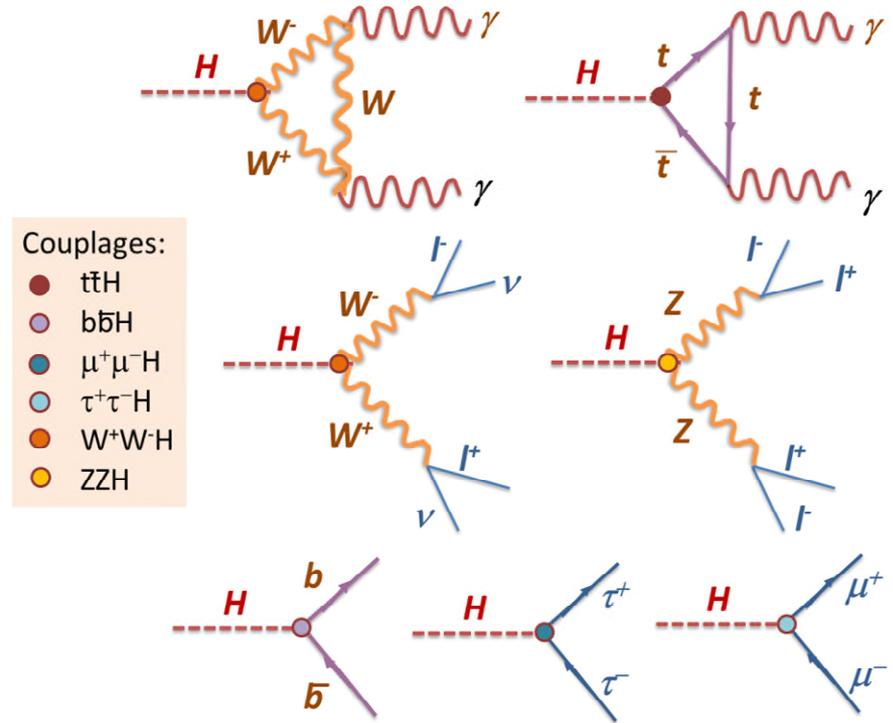


La gamme de masse la plus probable d'après ces mesures:  
 **$115 \text{ GeV} < m_H < 160 \text{ GeV}$**

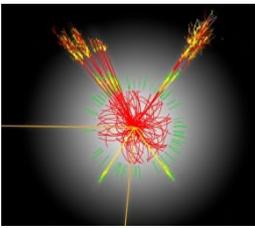


# Comment le détecter?

- ❑ Le boson de Higgs se désintègre instantanément en d'autres particules
- ❑ On l'observe en détectant ses produits de désintégration
- ❑ Le modèle ne prédit pas la masse du boson de Higgs
- ❑ Pour une masse donnée, le modèle prédit ses probabilités de désintégration en différentes particules



**Il faut donc être capable de voir ces particules finales dans nos détecteurs et de mesurer leurs énergies et positions**



# Comment le détecter?

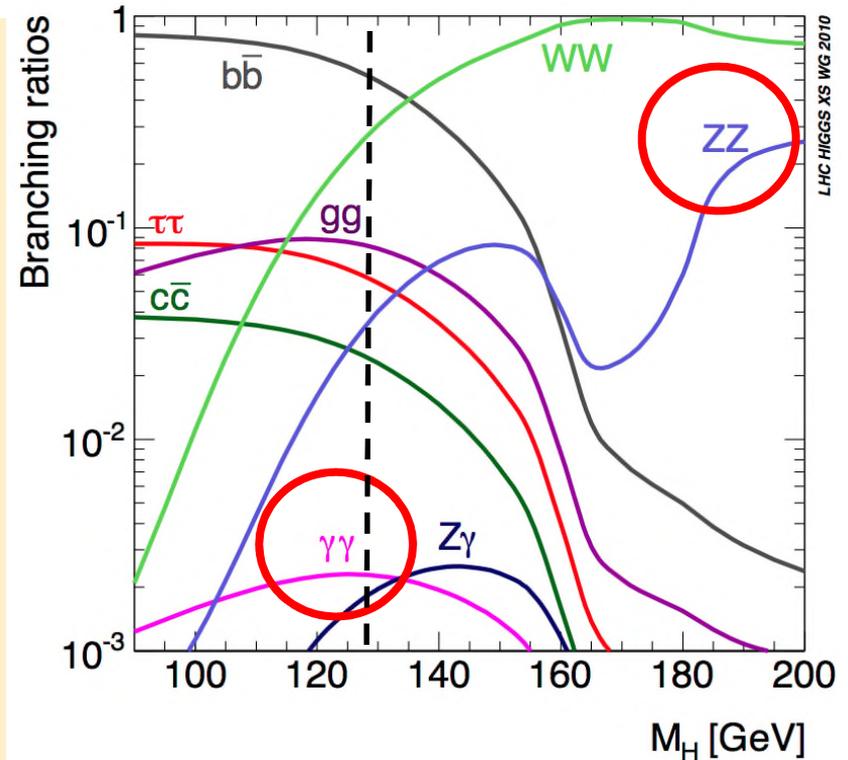
Les « modes » d'observation privilégiés sont:

□  $H \rightarrow \gamma\gamma$  (deux photons)

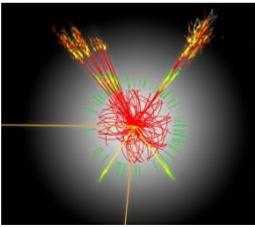
□  $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4e$  ou  $4\mu$  ou  $2e2\mu$  (électrons et muons)

Les bruits de fond sont limités (au contraire pour  $b\bar{b}$ , le bruit de fond est 10 millions de fois plus important!)

Nous savons détecter tous les produits de désintégrations (électrons, muons et photons) et mesurer leur énergie avec une grande précision pour calculer la masse du boson de Higgs



**Il faut donc être capable de voir ces particules finales dans nos détecteurs et de mesurer leurs énergies et positions**

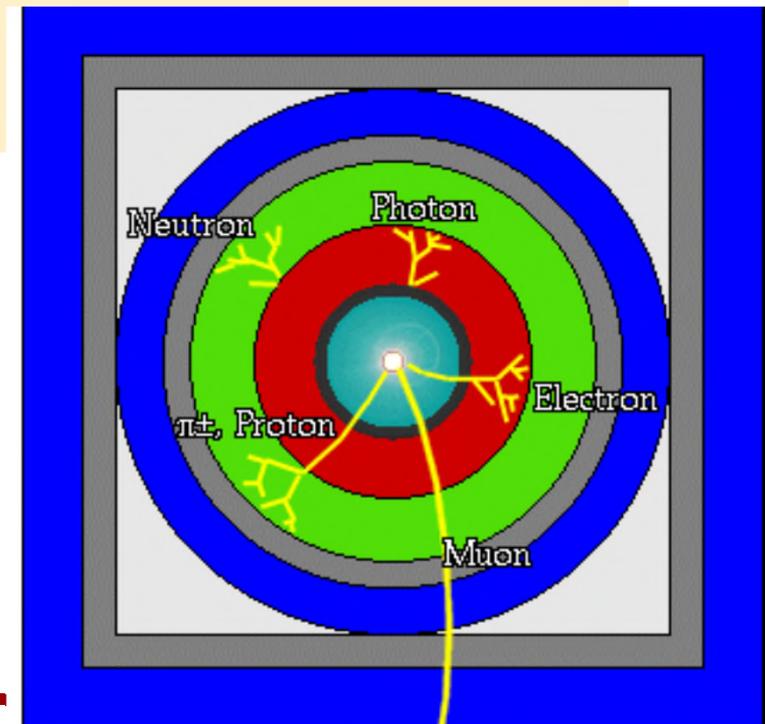
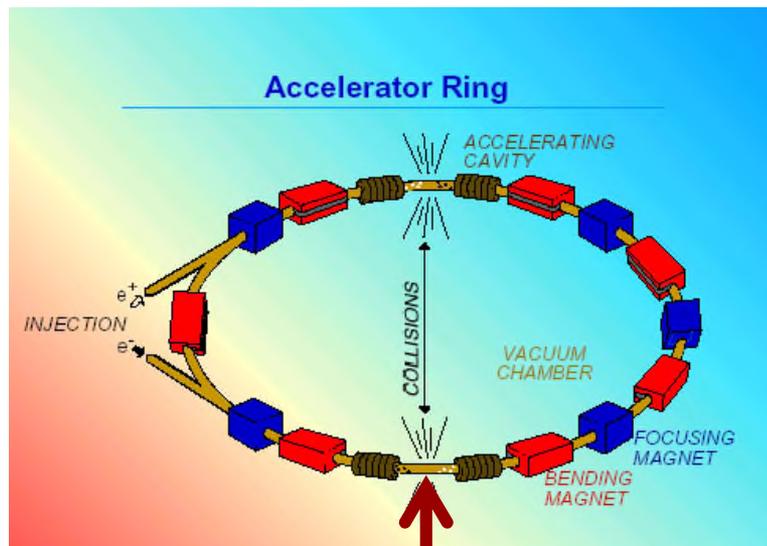


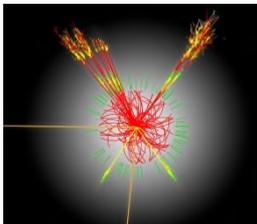
# Comment le détecter?

## ❑ Expérience sur collisionneur: principe

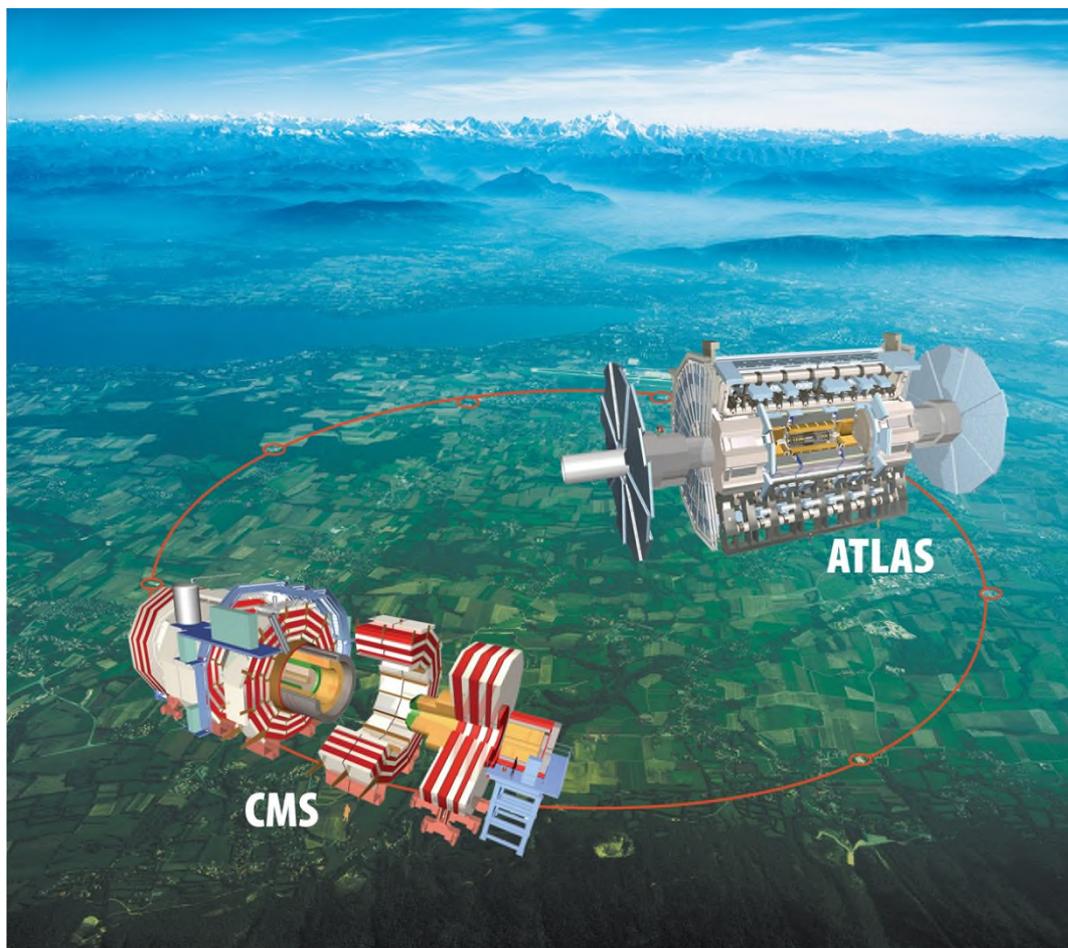
Expérience autour du point de collision: détection des particules “stables”  
Chaque détecteur élémentaire (spectromètres, calorimètres...):  
si une particule le touche, on mesure:

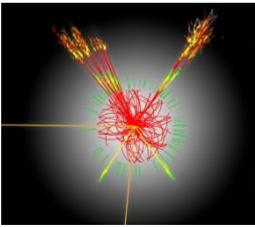
- Position
- Energie (ou /et) impulsion de la particule
- Type (electron, muon, pion...)





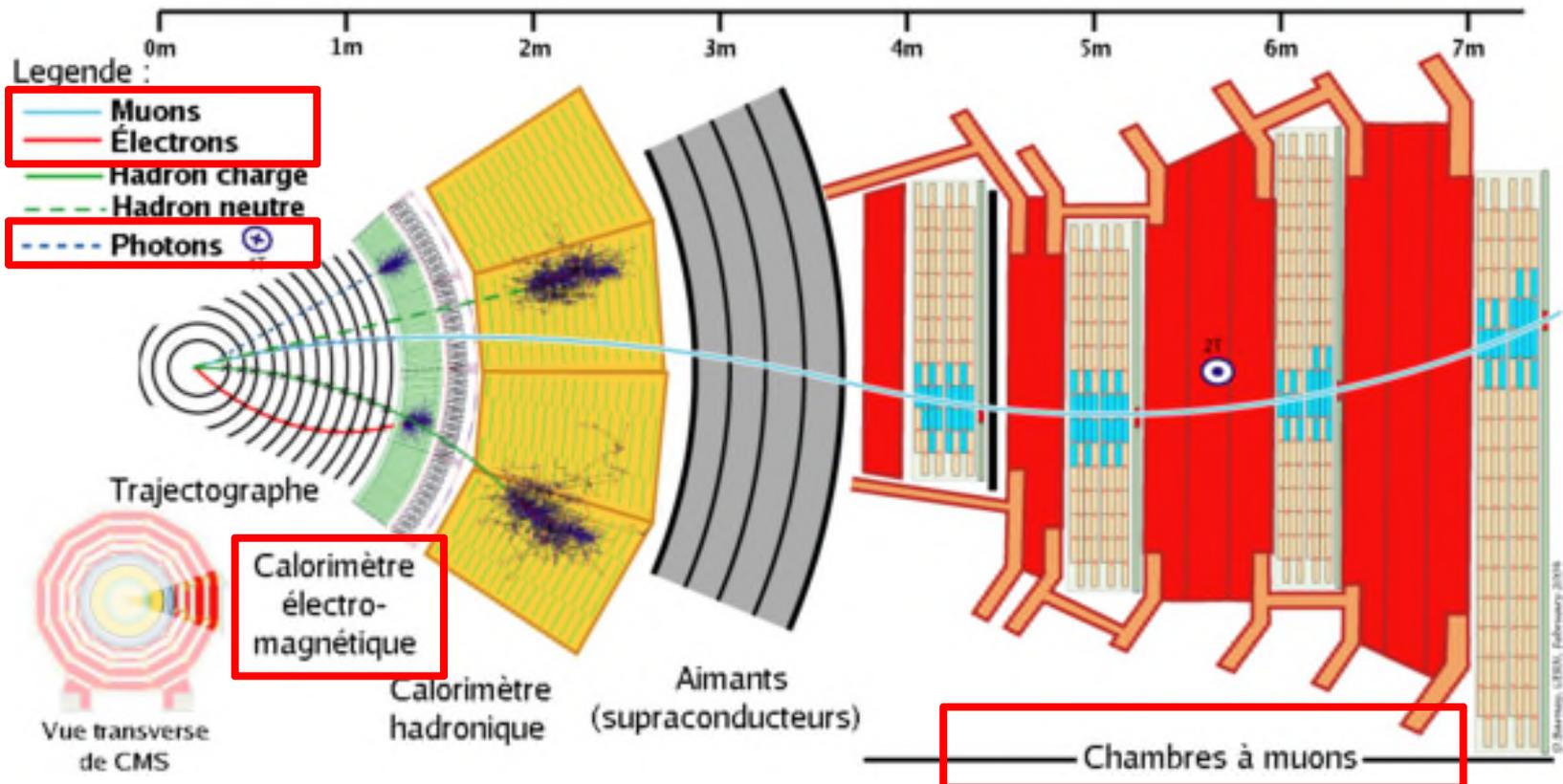
# Comment le détecter?

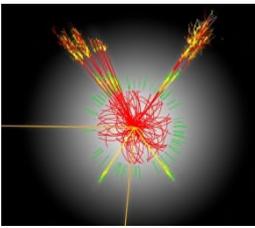




# Comment le détecter?

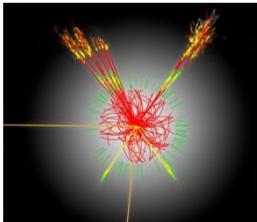
- On utilise les interactions entre les particules et la matière pour détecter les particules
- Chaque type de particule interagit différemment et a un sous-détecteur dédié



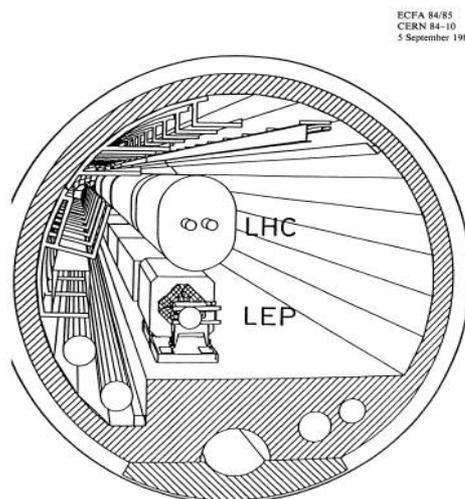


# La naissance du projet LHC

- ❑ **1981-1984:** le collisionneur proton-antiproton du CERN a fonctionné à merveille
  - Les particules W et Z ont été découvertes par les expériences UA1 et UA2 en 1983
- ❑ Le LEP n'est pas encore terminé, mais son tunnel est creusé (27 km)
  - Sous l'impulsion de Carlo Rubbia, quelques dizaines de physiciens imaginent un collisionneur à protons pour l'après-LEP avec comme objectif principal la découverte du boson de Higgs
- ❑ **Mars 1984:** Workshop de Lausanne => LHC
- ❑ Le principe du projet LHC est approuvé par le conseil du CERN en décembre **1991**
- ❑ Les (proto)-collaborations pour les détecteurs se forment (CMS, EAGLE, ASCOT...)
  - Phase de conception, de discussions, du partage des tâches au niveau mondial.
- ❑ Formation des collaborations en **1992** (workshop d'Evian): **CMS, ATLAS**, ALICE, LHCb
  - Décisions sur les participations du DAPNIA(=IRFU) à ATLAS, puis à CMS
- ❑ Le SSC, concurrent US géant, sera abandonné en **1993**.
  - Les premières collisions au LHC sont promises pour l'année 2000! Elles ne viendront qu'en 2009.



# Le LHC



ECFA 84/85  
CERN 84-10  
5 September 1984

## LARGE HADRON COLLIDER IN THE LEP TUNNEL

Vol. I

PROCEEDINGS OF THE ECFA-CERN WORKSHOP

held at Lausanne and Geneva,  
21-27 March 1984



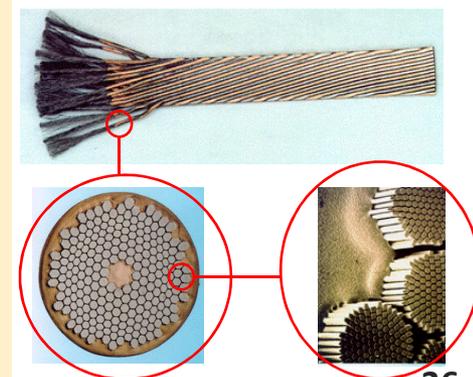
**Lausanne 1984**

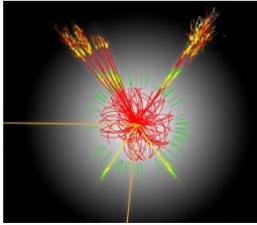
**LHC 2006  
le millième aimant est posé  
(sur 1232)**

# Le LHC en quelques chiffres

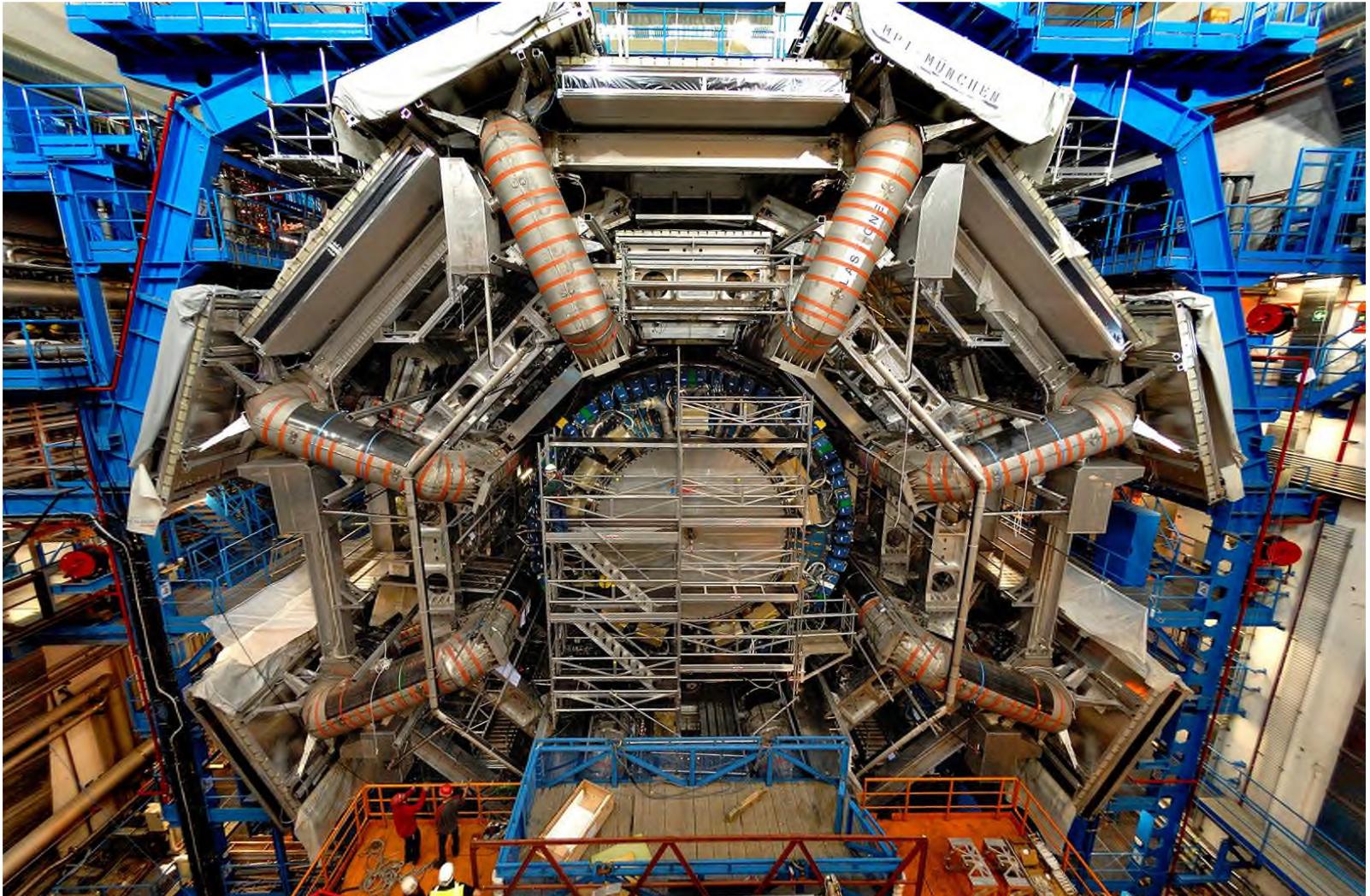
## La machine contient 9300 aimants:

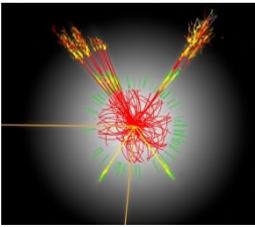
- 392 quadripôles supraconducteurs (focalisation)
- 2464 sextupôles, 1232 octupôles, plus de 1200 autres petits aimants de correction
- 1232 dipôles, le plus gros défi à relever (14.3m et 35t par dipôle = 18 km de dipôles sur les 27 km de LHC)
- **Supraconducteurs:**
  - NbTi température de transition 10K utilisé à 1.9K  $\Rightarrow$  champ de 8.33T
  - Energie stockée > 10 GJ ( $\approx$  un A380 à 700 km/h) (200 x les précédents accélérateurs)
- **Bobinage**
  - 1 câble ( $\varnothing$ 1,5cm) = 36 brins torsadés ( $\varnothing$ 1,5mm)
  - 1 brin = 6400 filaments ( $\varnothing$  7 $\mu$ m)
  - 7600km de câbles = en brins 5 AR Terre-Soleil plus un aller sur la Lune!
- **Cryogénie:**
  - Le plus gros frigo du monde: 40000t de matériel à 1.9K (120t d'He superfluide). 1,9K = -271,25°C.
  - L'endroit le plus froid de l'univers (le fond diffus est à 2.7K)
  - Avec des températures générées par les collisions plus de 100 000 fois supérieures à celles qui règnent au centre du Soleil.



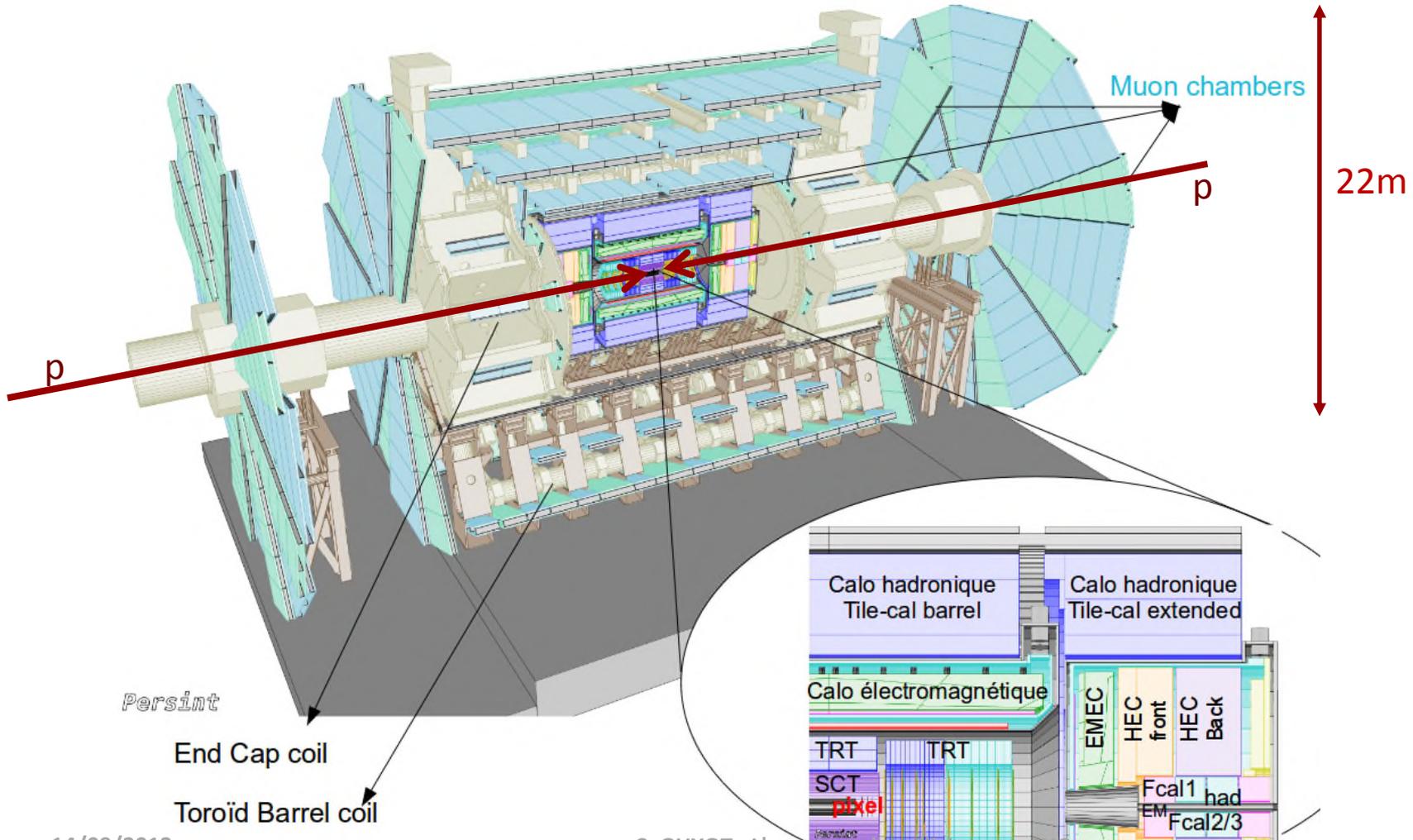


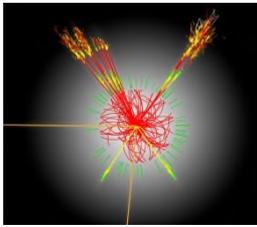
# L'expérience ATLAS



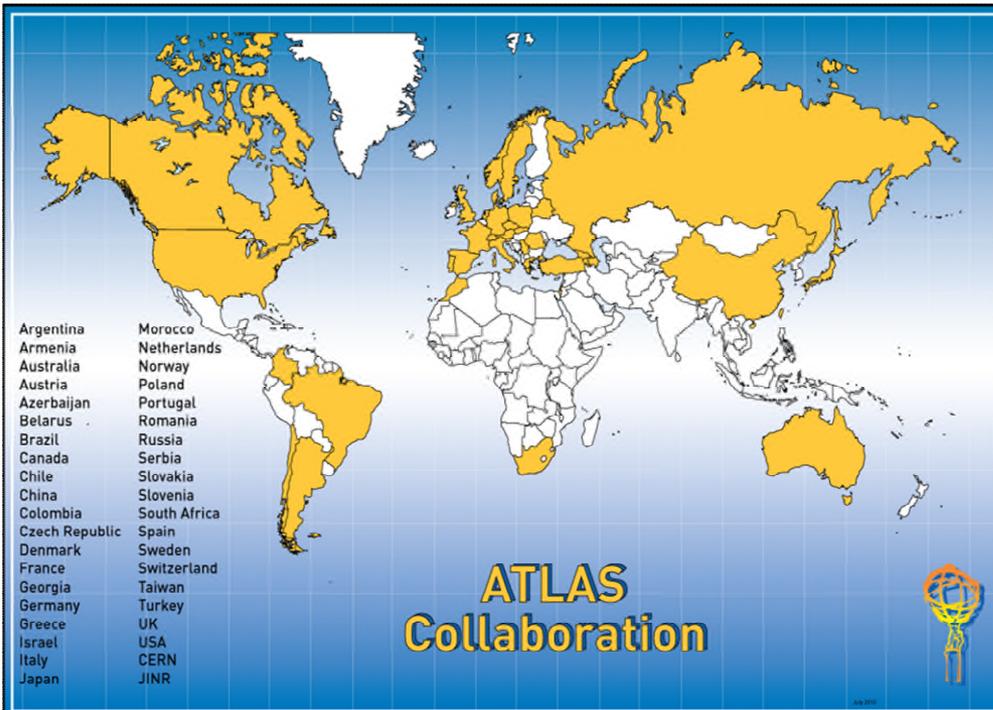


# Le détecteur ATLAS





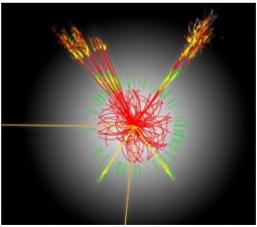
# La collaboration ATLAS



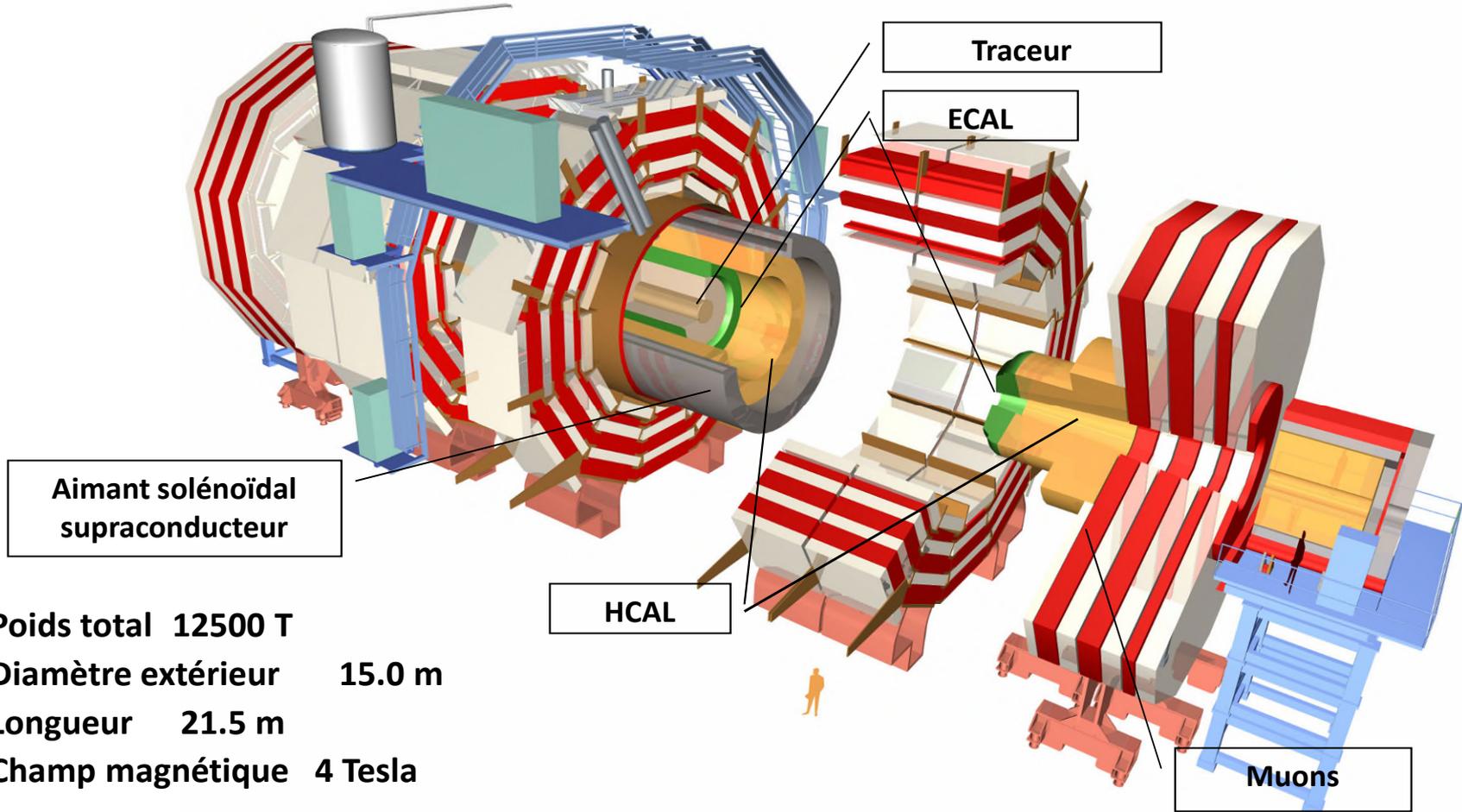
38 pays  
175 instituts  
>3000 physiciens et ingénieurs  
~2900 auteurs  
~1000 étudiants

14/09/2013

C. GUYOT - L'aventure du collisionneur LHC



# Le détecteur CMS



Aimant solénoïdal  
supraconducteur

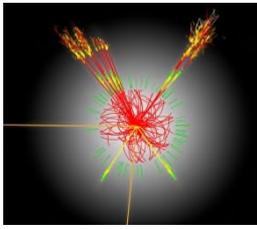
Traceur

ECAL

HCAL

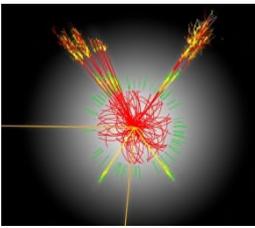
Muons

Poids total 12500 T  
Diamètre extérieur 15.0 m  
Longueur 21.5 m  
Champ magnétique 4 Tesla



# La collaboration CMS

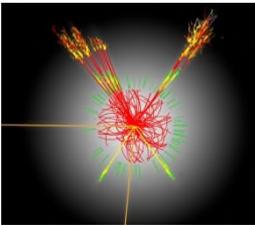




# Les prises de données en 2011 et 2012

- Incident de septembre 2008 => énergie ( $\sqrt{s}$ ) ramenée de 14 TeV a 7 TeV puis remontée a 8 TeV en 2012
  - Premières collisions proton-proton fin 2009 (a 900 GeV puis a 2.2 TeV)
  - Premières collisions a 7 TeV en mars 2010
- 
- Ce que j'ai écrit dans une présentation de novembre 2010:

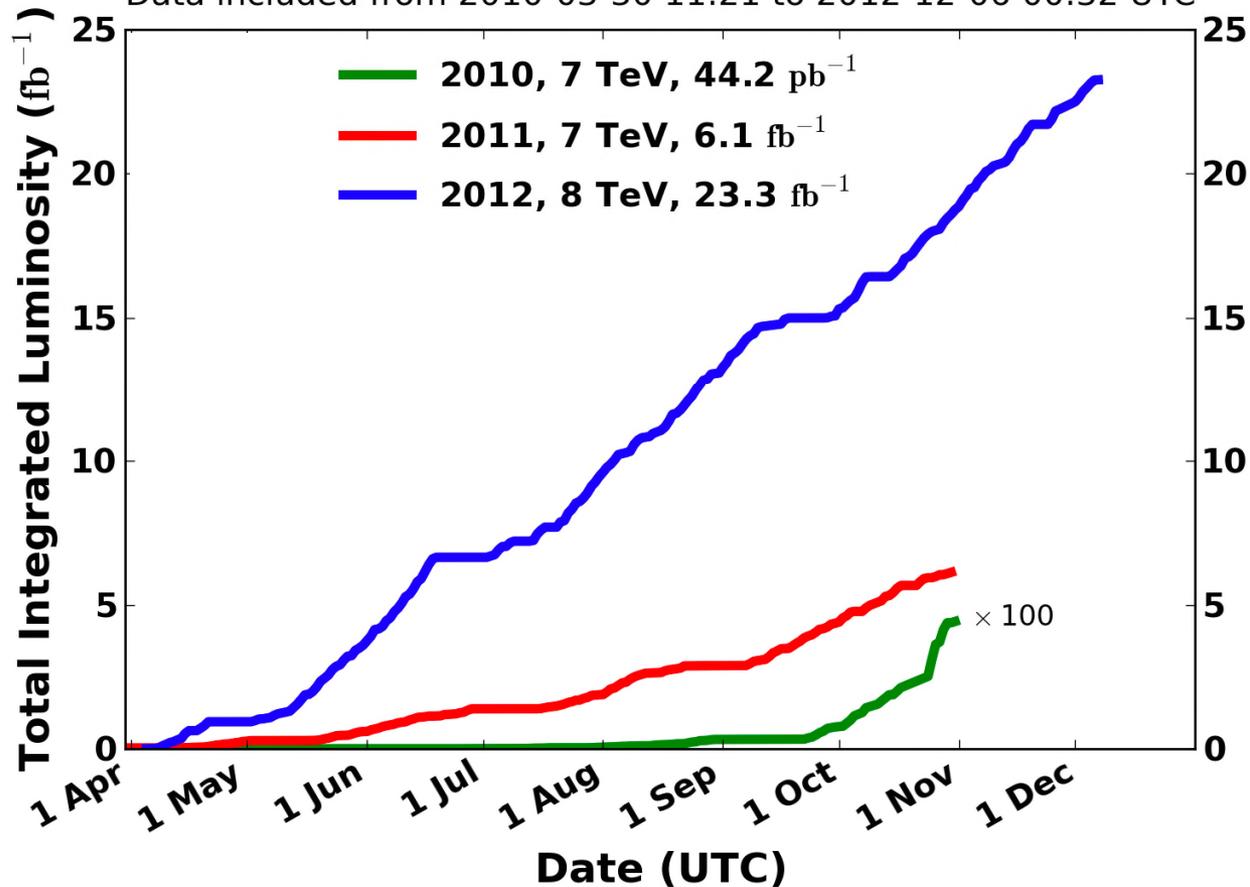
**La possibilité d'étendre le run pp à 7 ou 8 TeV en 2012 jusqu'à accumuler 4 à 5 fb<sup>-1</sup> par expérience est sérieusement envisagée.**  
*Premier élément de réponse après le meeting de Chamonix en janvier 2011*



# Les prises de données en 2011 et 2012

## Integrated Luminosity, pp

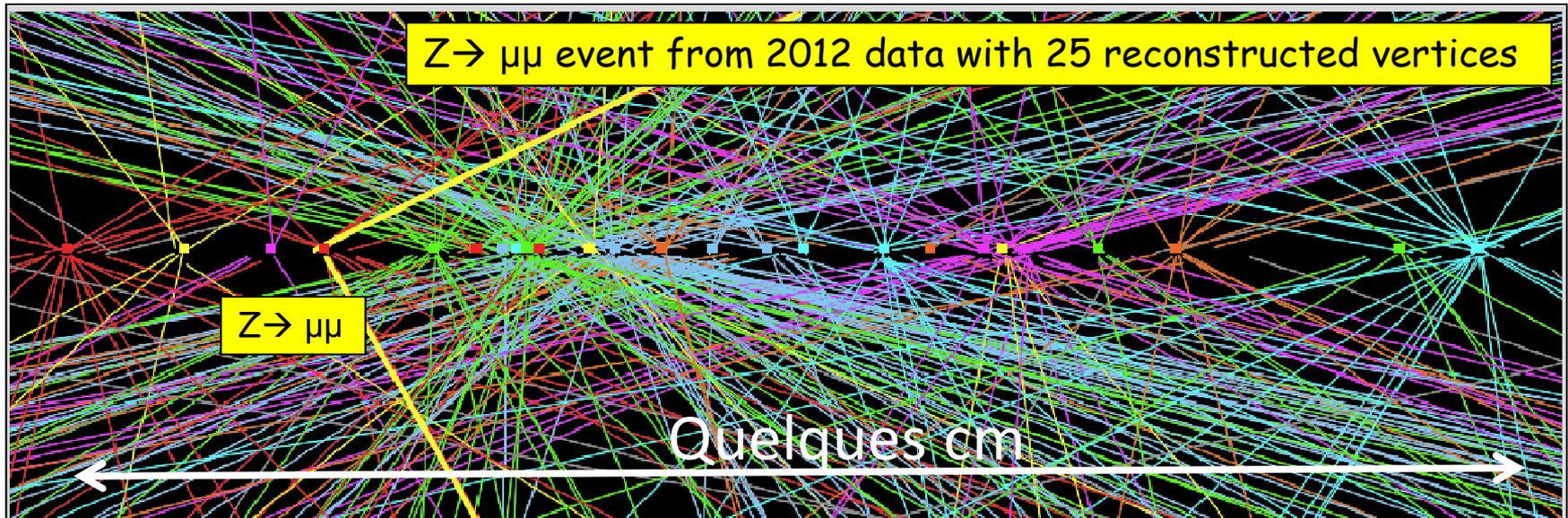
Data included from 2010-03-30 11:21 to 2012-12-06 00:32 UTC

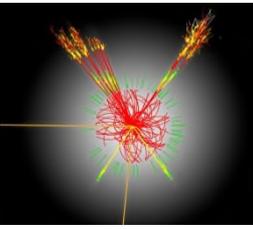


# Les prises de données en 2011 et 2012

Principale difficulté: le taux de collisions

- Croisement de paquets de protons ( $>1,5 \cdot 10^{11}p$ ) chaque 50 ns  $\Rightarrow 40 \cdot 10^6$  par seconde
- Plus de 25 interactions proton-protons en moyenne par croisement
  - ✓ Beaucoup de travail nécessaire pour maintenir les performances des détecteurs
- Seulement 400 évènements enregistrés par seconde  $\Rightarrow \sim 10^9$  évènements/an
  - ✓  $\sim 25$  bosons de Higgs ( $m_H=125$  GeV) attendus dans le canal  $H \rightarrow 4$  leptons sur 2011+2012 (avant analyse)

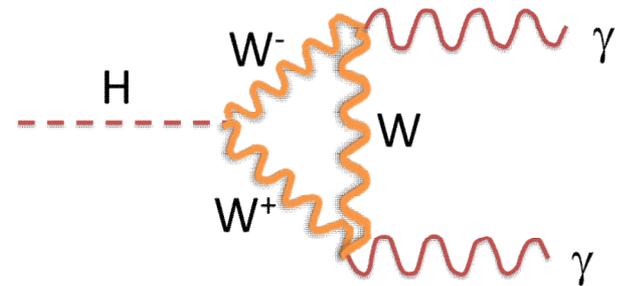




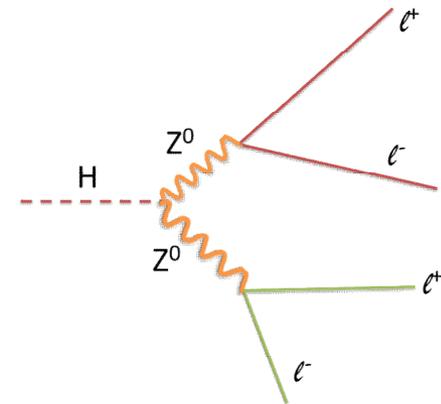
# Recherche du boson de Higgs

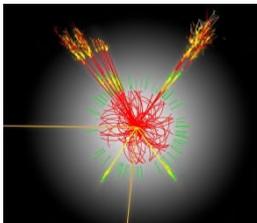
## Les derniers résultats d'ATLAS et CMS:

☐ Recherche du Higgs se désintégrant en deux photons  $\gamma$



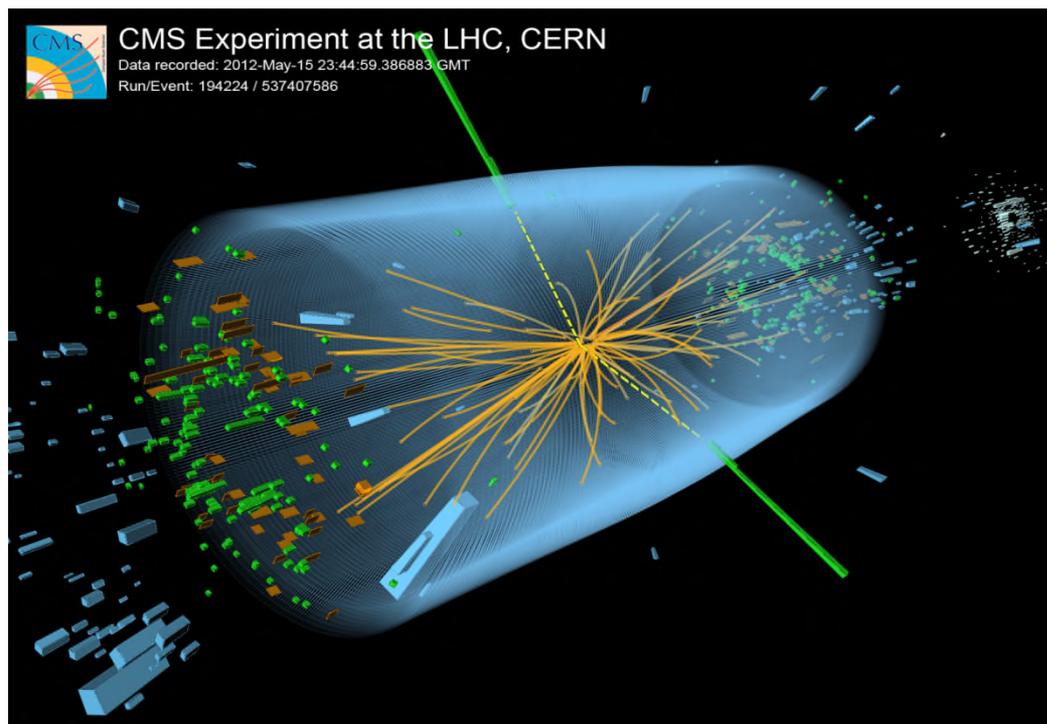
☐ Recherche du Higgs se désintégrant en deux bosons Z





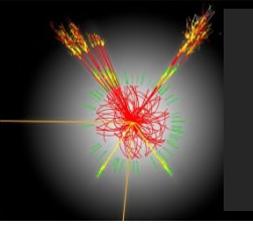
# H en $\gamma\gamma$

**On cherche tous les événements avec 2 photons dans le détecteur:**



**Après cette sélection, il reste beaucoup de bruit de fond!**

D'autres processus connus peuvent produire deux photons isolés



# H en $\gamma\gamma$

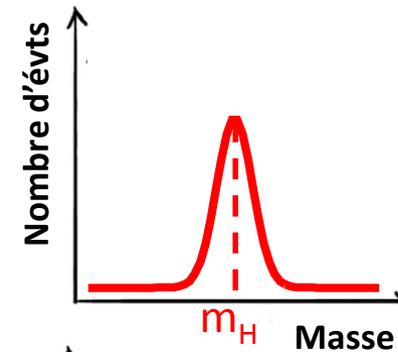
**Comment séparer les bruits de fonds restants du boson de Higgs?**

**Avec la masse diphoton:**  $m_{\gamma\gamma} = \sqrt{2 E_1 E_2 [1 - \cos(\theta)]}$

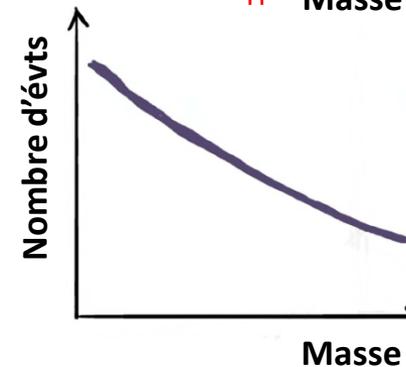
Avec  $E_1$  et  $E_2$  les énergies des photons et  $\theta$  l'angle entre les photons

➔ Si les deux photons proviennent de la désintégration d'un boson de Higgs, cette masse sera égale à la masse du Higgs

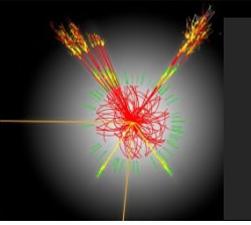
➔ Sinon, cette masse peut prendre des valeurs variées



environ 200 événements

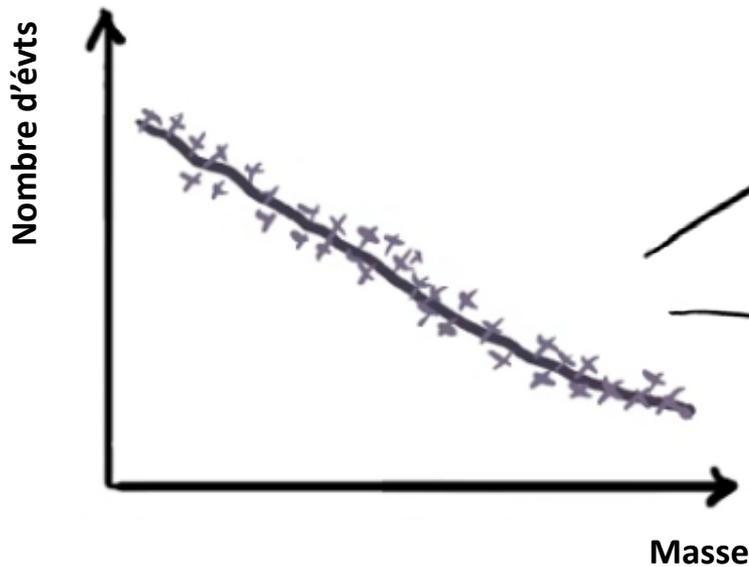


des milliers d'événements

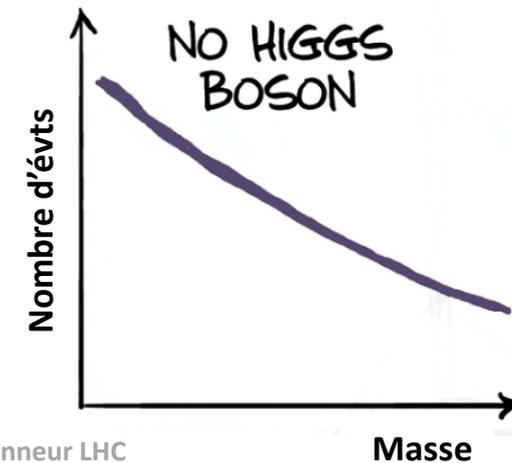
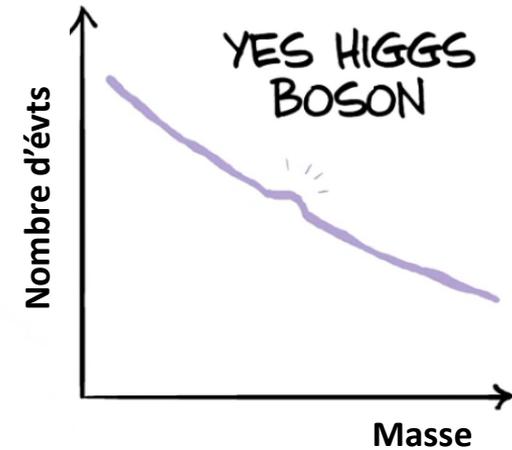


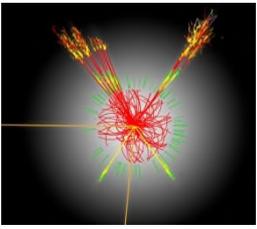
# H en $\gamma\gamma$

Les données vont ressembler à ça:



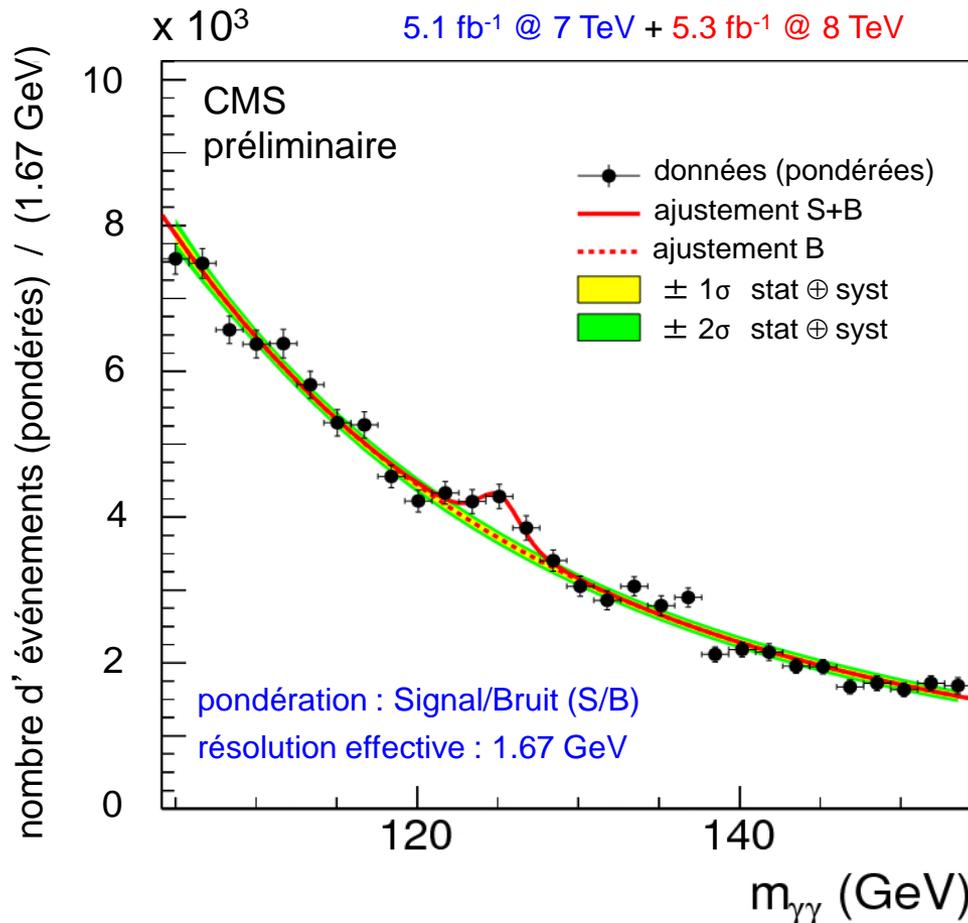
Plus on a de données, plus ce petit pic se voit clairement, car moins grandes sont les fluctuations statistiques du bruit de fond





# H en $\gamma\gamma$ : CMS

Les données en 2011 et 2012:

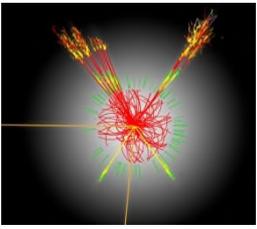


**Excès autour de 125 GeV!**

Probabilité d'une  
fluctuation du bruit de  
fond: 30 sur un million  
= 0.00003

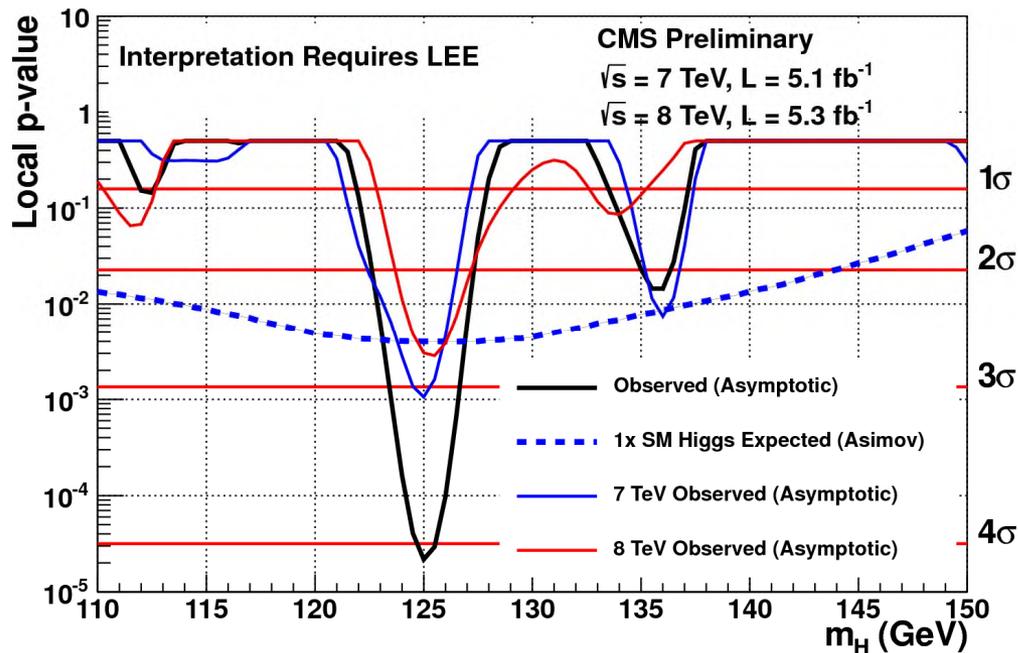
(~ 4.1 écarts standard ou  
4.1σ)

NB: par convention, on  
déclare une découverte à  
partir de 5σ soit environ  
une probabilité 0.0000003



# H en $\gamma\gamma$ : CMS

Les données en 2011 et 2012:

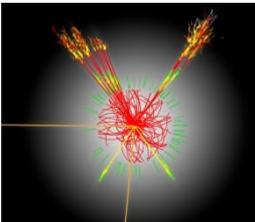


**Excès autour de 125 GeV!**

Probabilité d'une  
fluctuation du bruit de  
fond: 30 sur un million  
= 0.00003

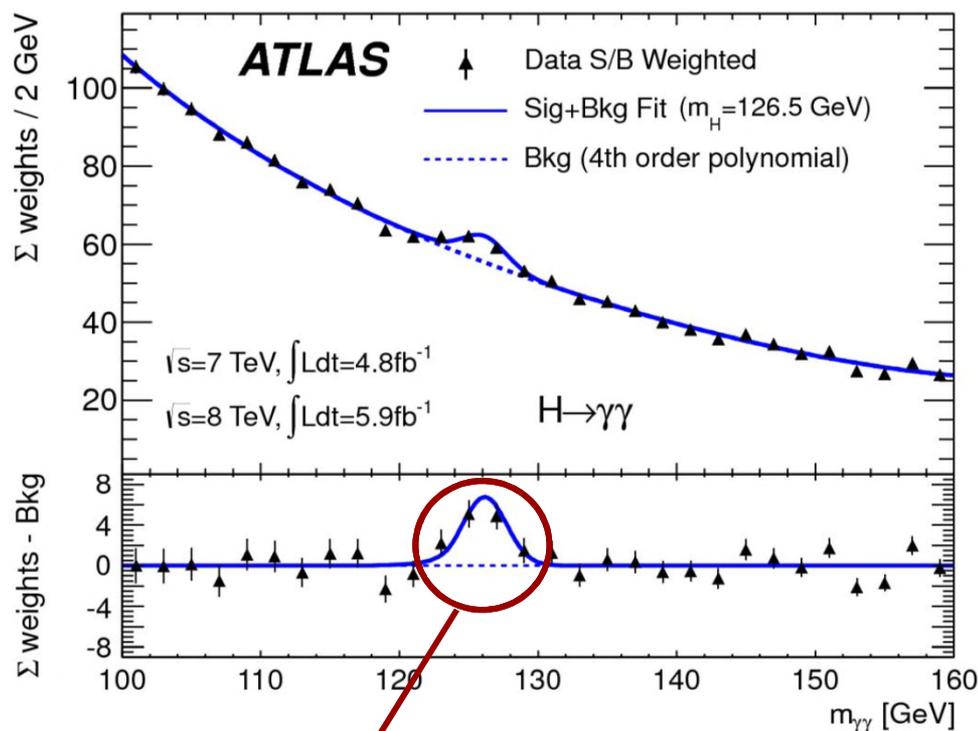
( $\sim 4.1$  écarts standard ou  
 $4.1\sigma$ )

NB: par convention, on  
déclare une découverte à  
partir de  $5\sigma$  soit environ  
une probabilité 0.0000003



# H en $\gamma\gamma$ : ATLAS

Les données en 2011 et 2012:



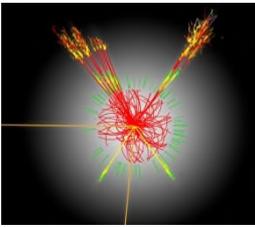
Excès d'environ 360 événements

**Excès autour de 125 GeV!**

Probabilité d'une  
fluctuation du bruit de  
fond: 2 sur un million  
= 0.000002

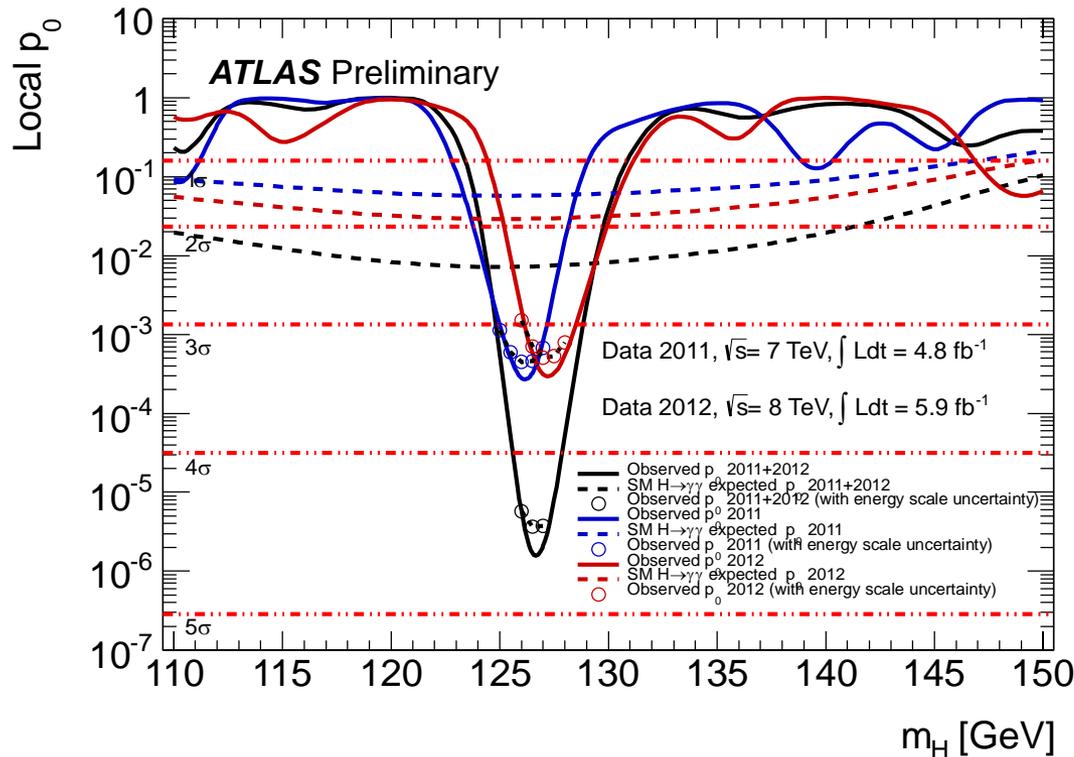
( $\sim 4.5$  écarts standard ou  
 $4.5\sigma$ )

NB: par convention, on  
déclare une découverte à  
partir de  $5\sigma$  soit environ  
une probabilité 0.0000003



# H en $\gamma\gamma$ : ATLAS

Les données en 2011 et 2012:

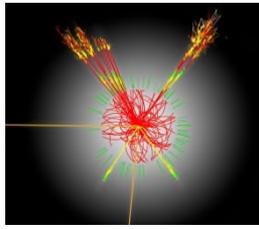


**Excès autour de 125 GeV!**

Probabilité d'une  
fluctuation du bruit de  
fond: 2 sur un million  
= 0.000002

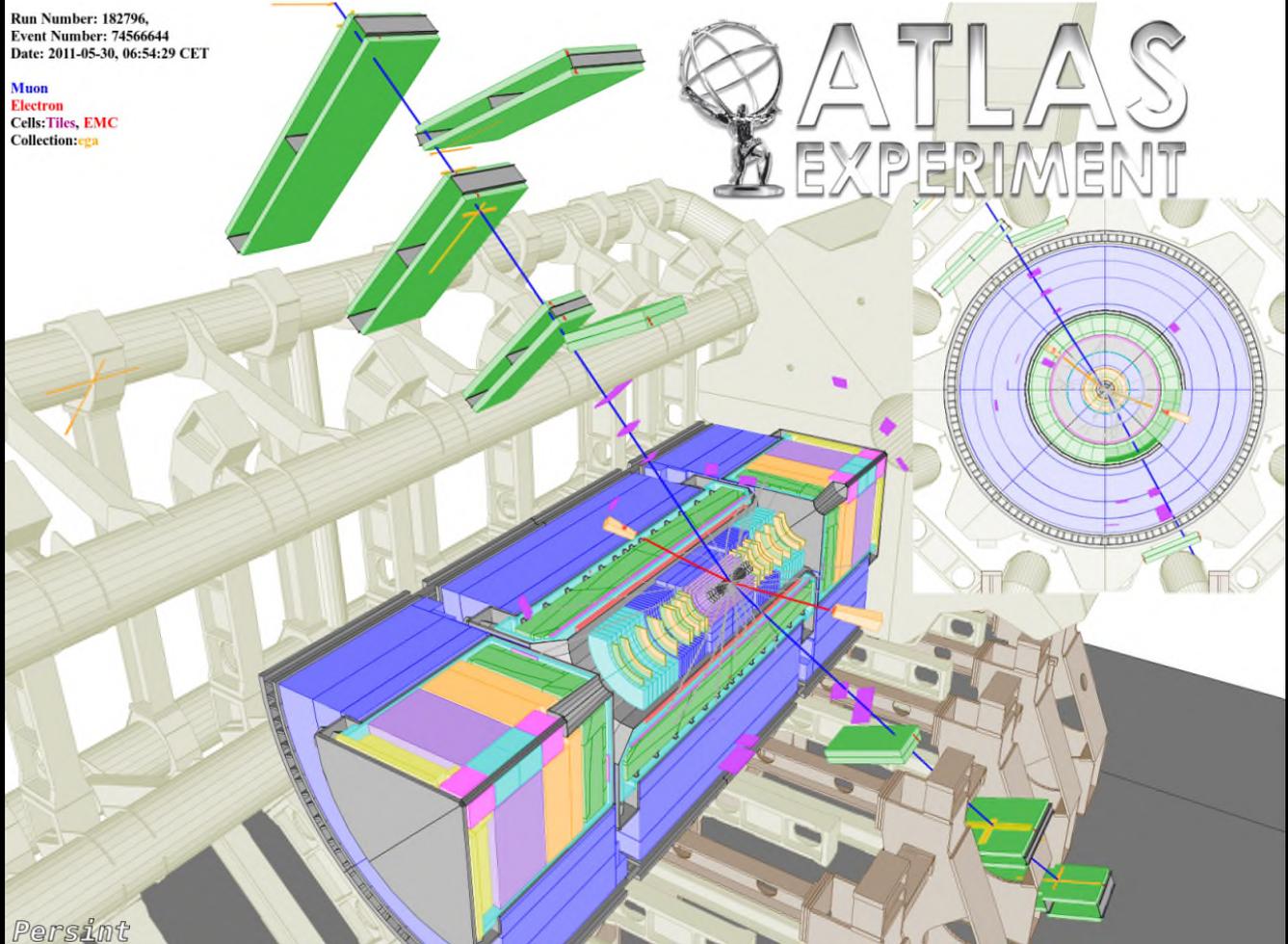
( $\sim 4.5$  écarts standard ou  
 $4.5\sigma$ )

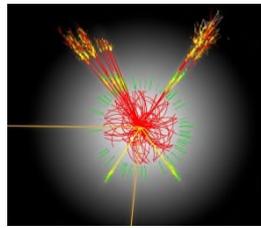
NB: par convention, on  
déclare un découverte à  
partir de  $5\sigma$  soit environ  
une probabilité 0.0000003



# $H \rightarrow ZZ(*) \rightarrow 4 \text{ leptons} (4e, 2e2\mu, 4\mu)$

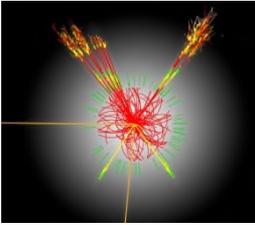
Candidat  
 $H \rightarrow 2e2\mu$





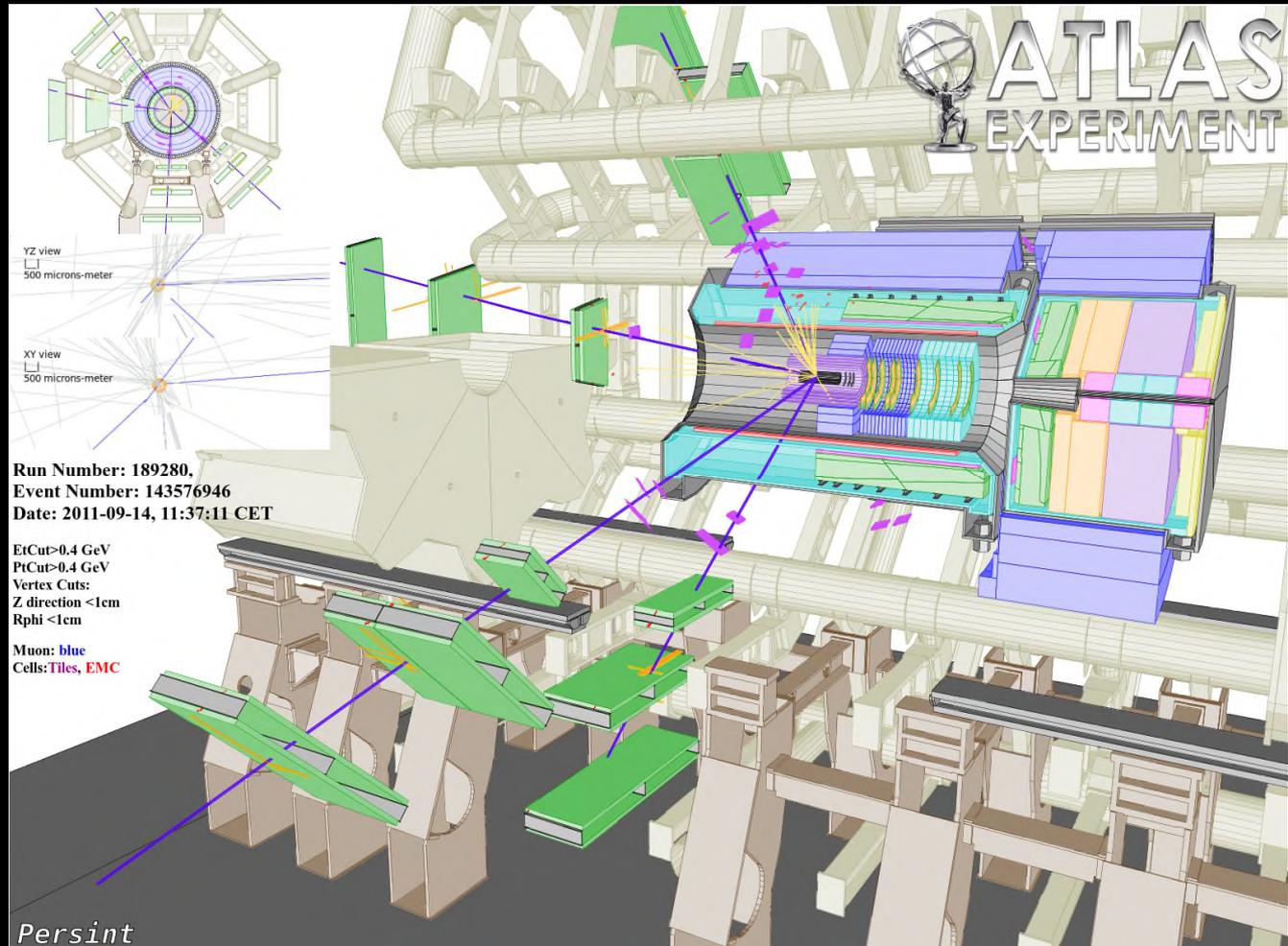
# $H \rightarrow ZZ(*) \rightarrow 4 \text{ leptons } (4e, 2e2\mu, 4\mu)$

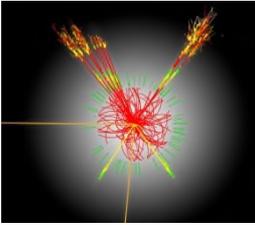
- ❑ Canal utilisable pour  $120\text{GeV} < m_H < 600 \text{ GeV}$
  - ❑ A l'opposé du canal en  $2\gamma$ , faible nombre d'évènement attendus ( $\sim 5$  evts pour  $m_H = 125 \text{ GeV}$  après coupures d'analyse dans ATLAS), mais avec un très faible bruit de fond ( $\sim 5$  evts entre 120 et 130 GeV):
    - **ZZ** (dit irréductible: état final a 4 leptons isoless)
    - **Z+b $\bar{b}$**  (désintégration semi-leptonique des hadrons B)
    - **Z+jets** (jets simulant des leptons)
    - **t $\bar{t}$**  : top-antitop  $\rightarrow 2$  leptons + b $\bar{b}$   $\rightarrow 4$  leptons +...
- } Fond dit reductible



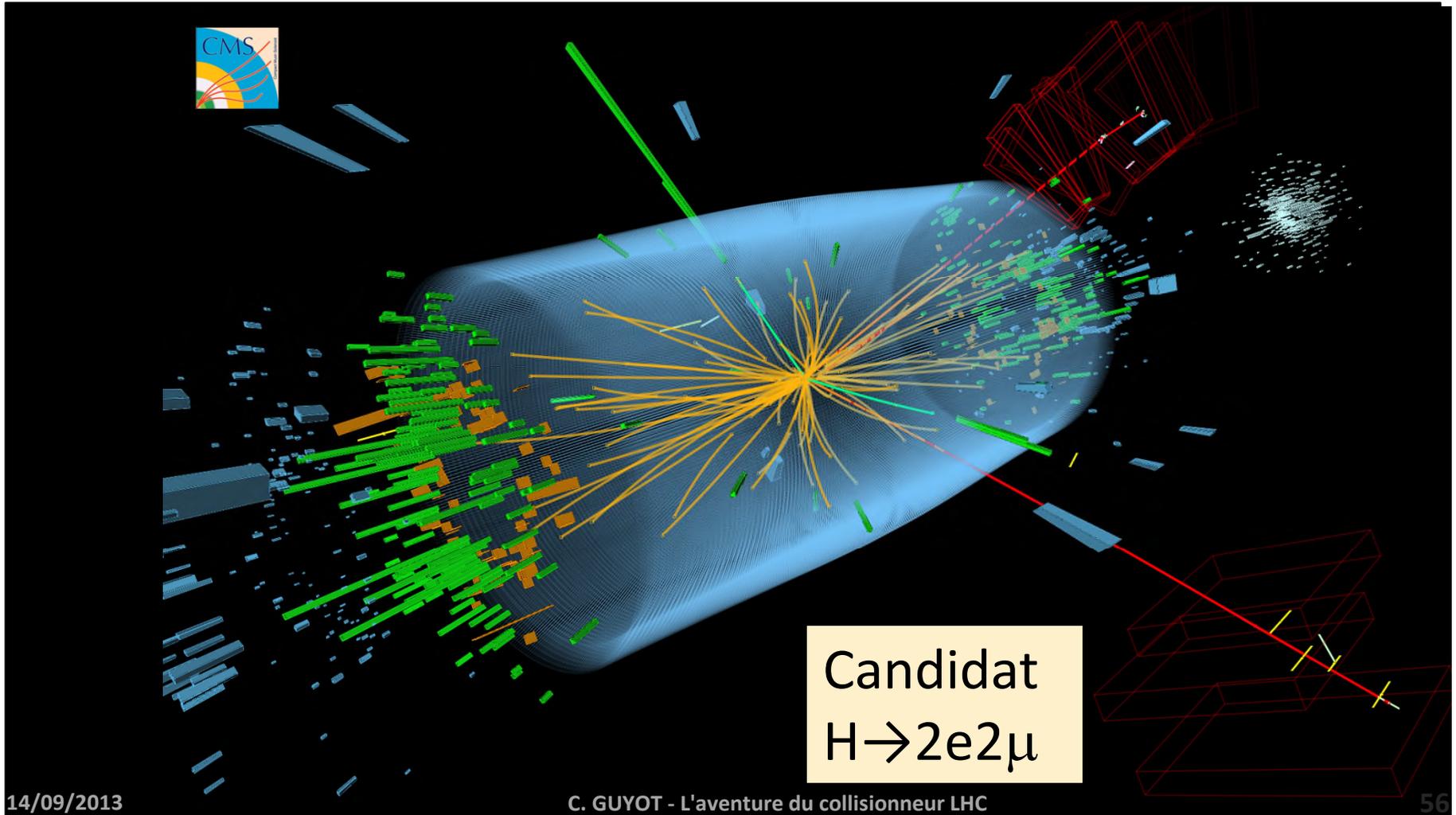
# $H \rightarrow ZZ(*) \rightarrow 4 \text{ leptons}$

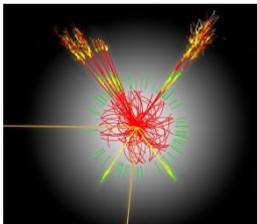
Candidat  
 $H \rightarrow 4\mu$





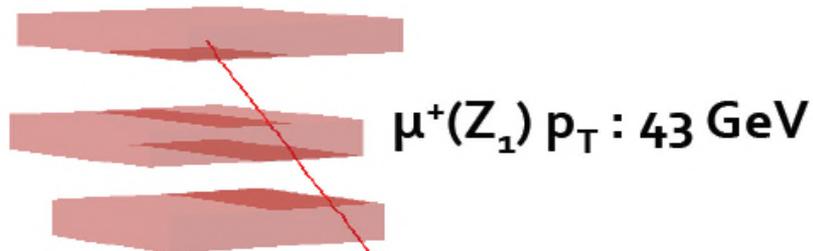
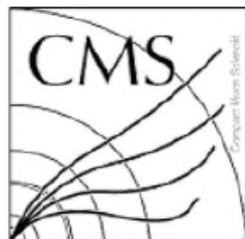
# $H \rightarrow ZZ(*) \rightarrow 4 \text{ leptons}$





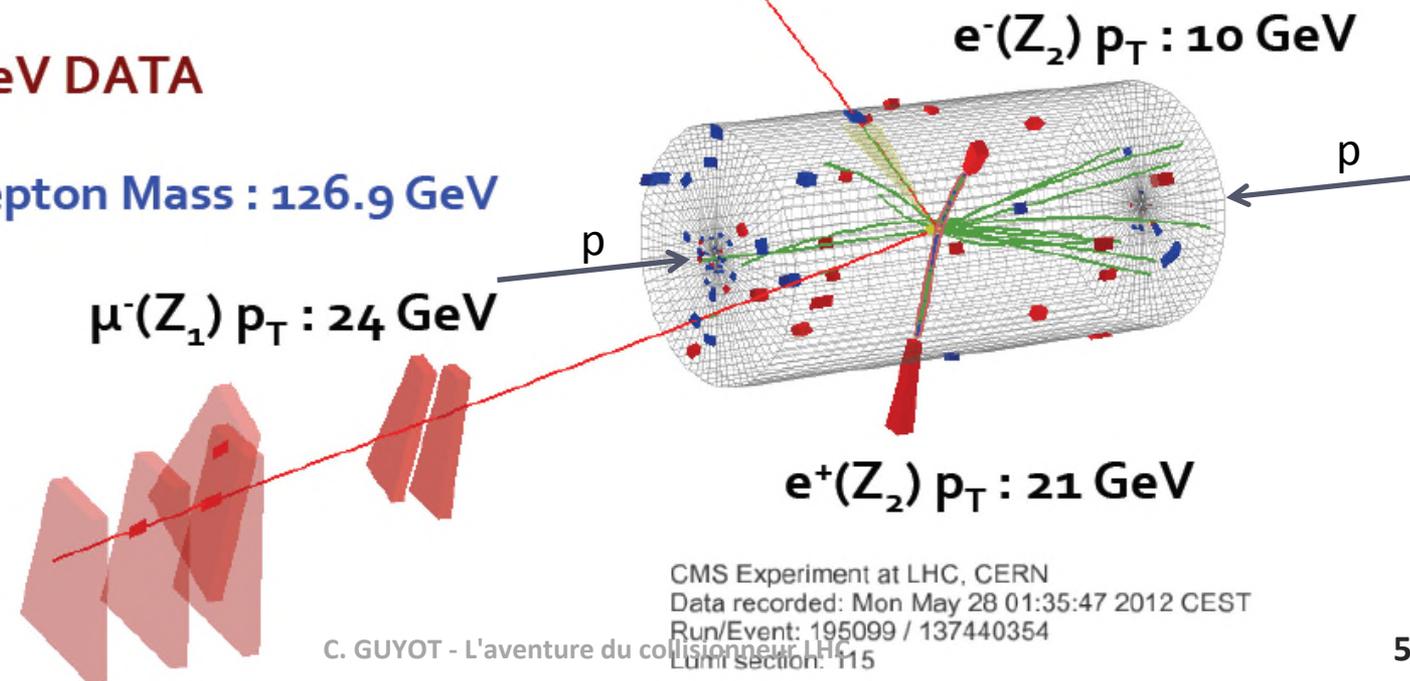
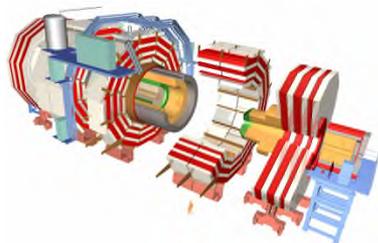
# $H \rightarrow ZZ(*) \rightarrow 4 \text{ leptons}$

Candidat  
 $H \rightarrow 2e2\mu$

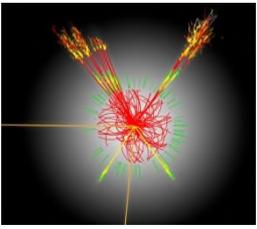


8 TeV DATA

4-lepton Mass : 126.9 GeV

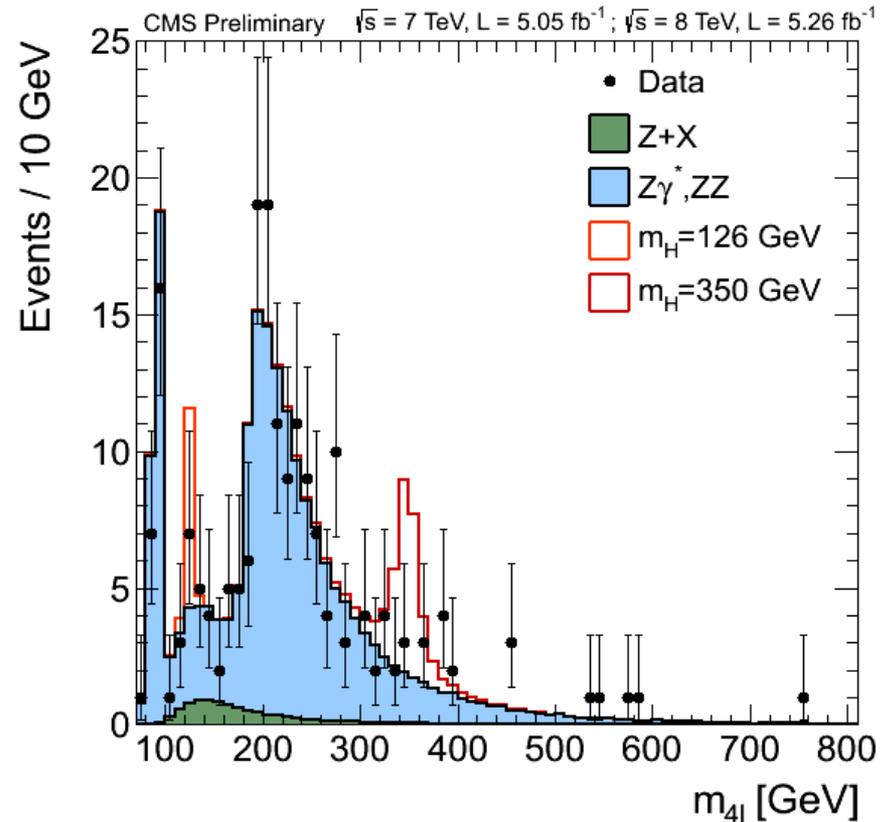
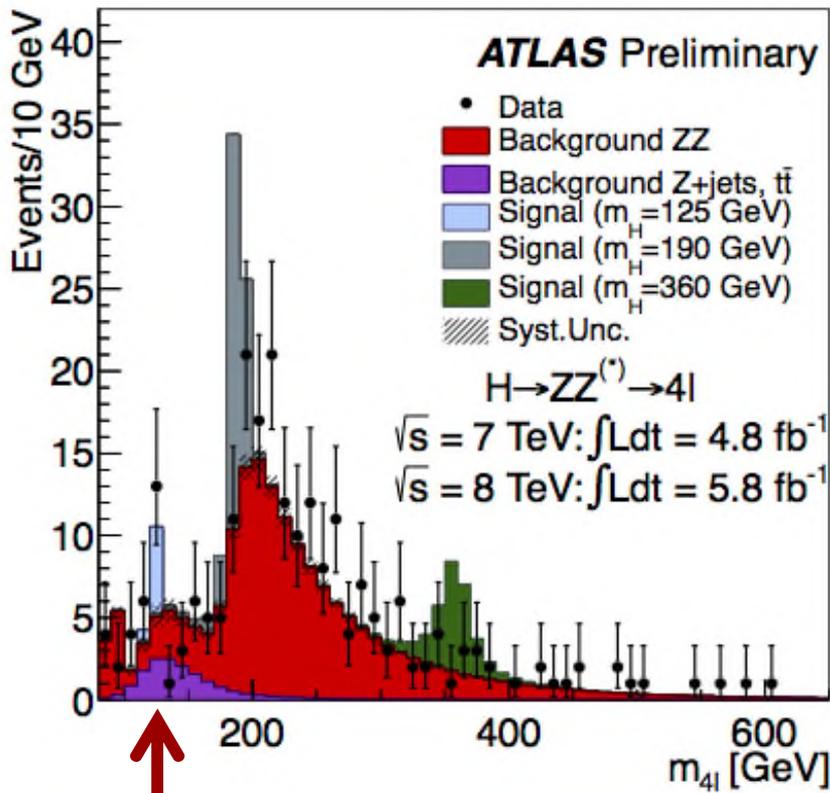


CMS Experiment at LHC, CERN  
Data recorded: Mon May 28 01:35:47 2012 CEST  
Run/Event: 195099 / 137440354  
Lumi section: 115

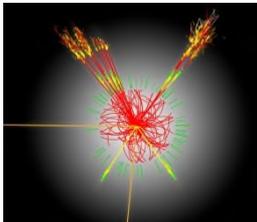


# $H \rightarrow ZZ(*) \rightarrow 4 \text{ leptons}$

## Spectre de masse invariante des 4 leptons

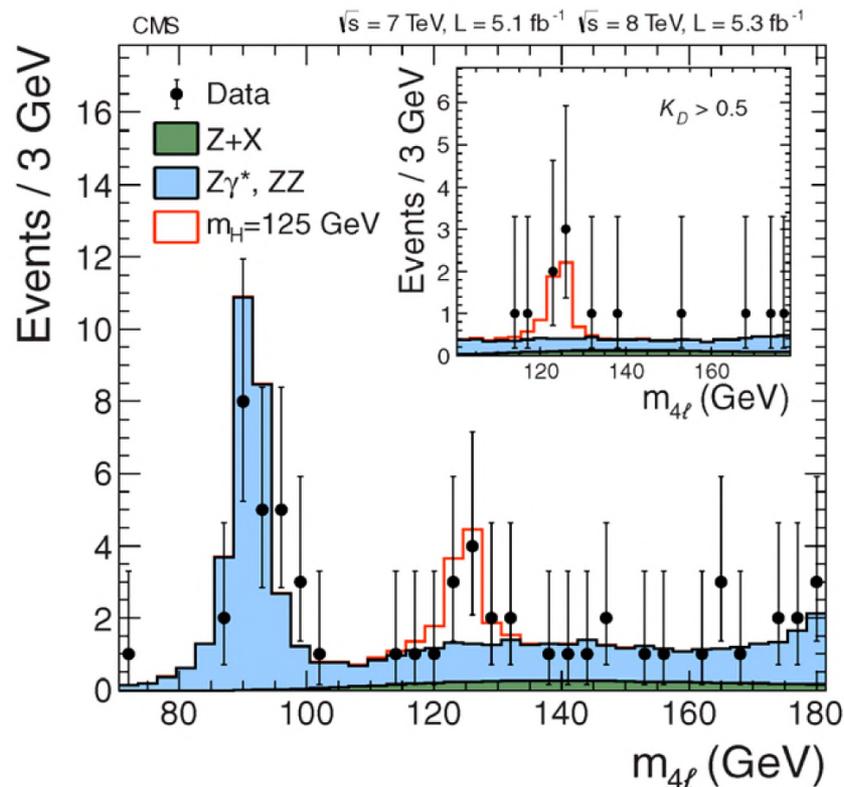
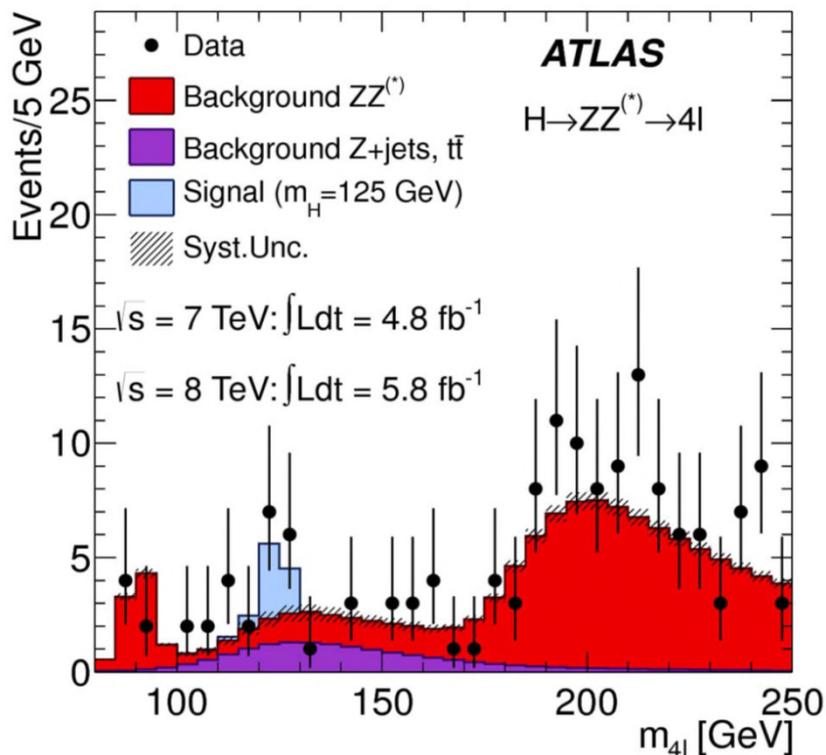


**Intervalle 120-130 GeV:** 13 événements vus pour 5 attendus (signal attendu à 125 GeV: + 5 evts). Probabilité: 0,05 %



# $H \rightarrow ZZ(*) \rightarrow 4 \text{ leptons}$

Spectre de masse invariante des 4 leptons (zone a basse masse)

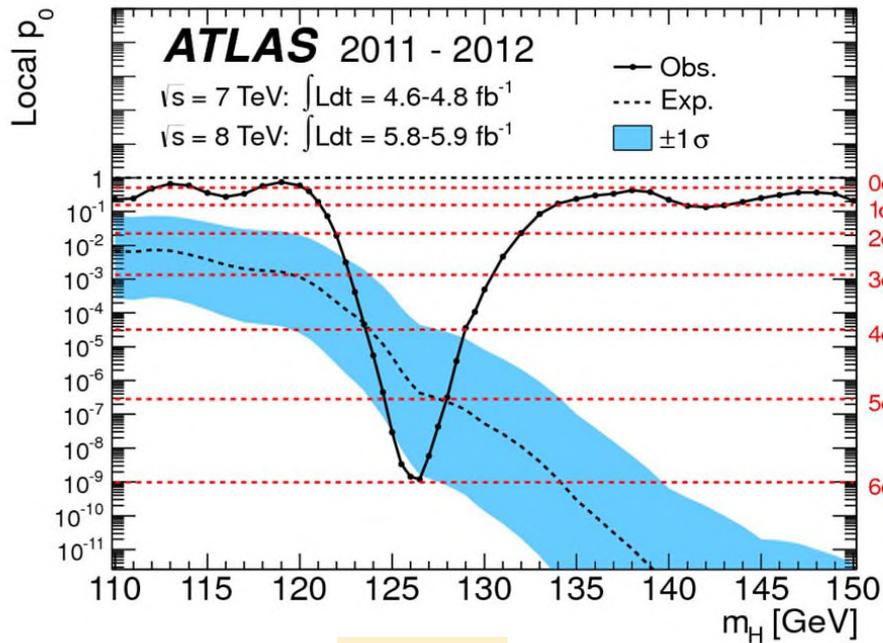


Significativité statistique:  $3,4\sigma$

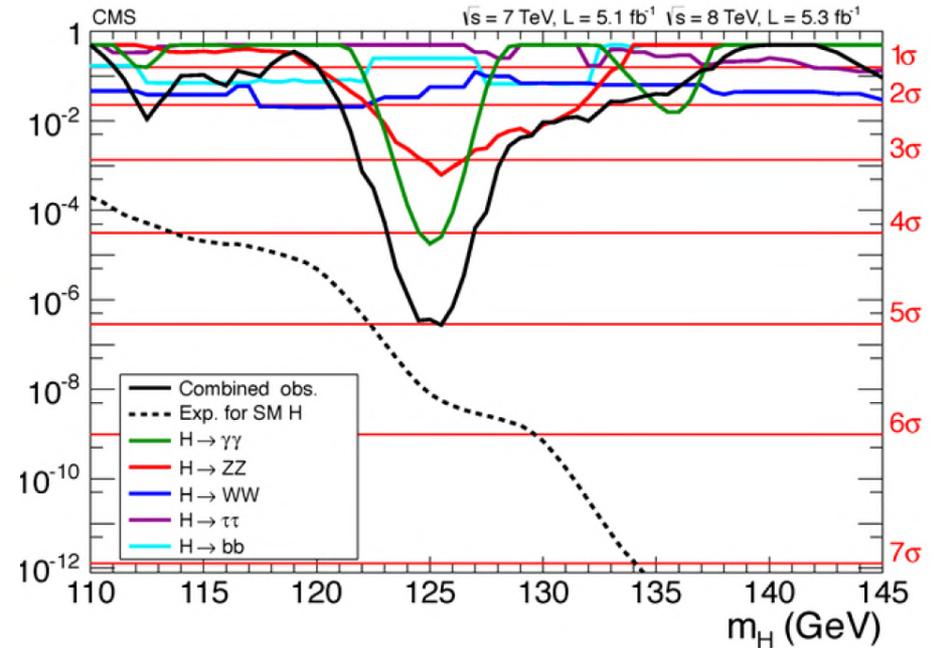
Significativité statistique:  $3,2\sigma$

# Et en combinant les canaux!

Probabilité que les données soient compatibles avec une fluctuation du bruit de fond

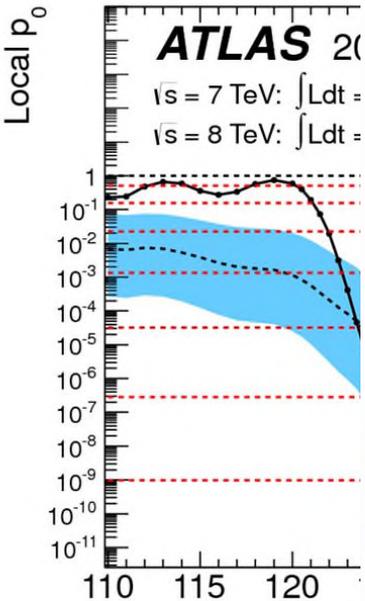
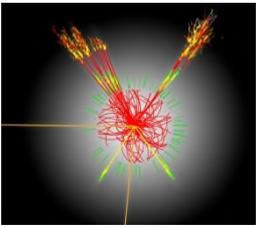


6  $\sigma$

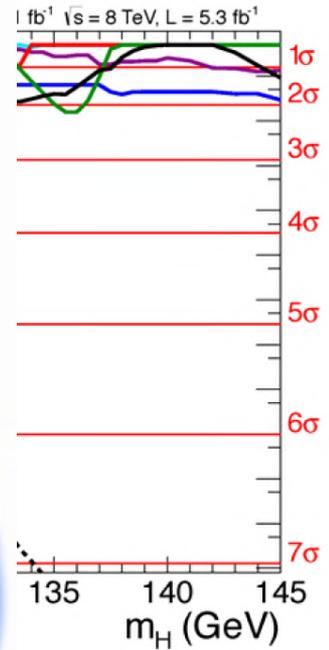


5  $\sigma$

# Et en combinant les canaux!



compatibles



# Auditorium du Cern, 4 juillet 2012, 9h

**Dans chaque expérience,  
on ignore ce que va dire  
l'autre!  
(sauf les 2 porte-parole...)**



# Auditorium du Cern, 4 juillet 2012, 9h

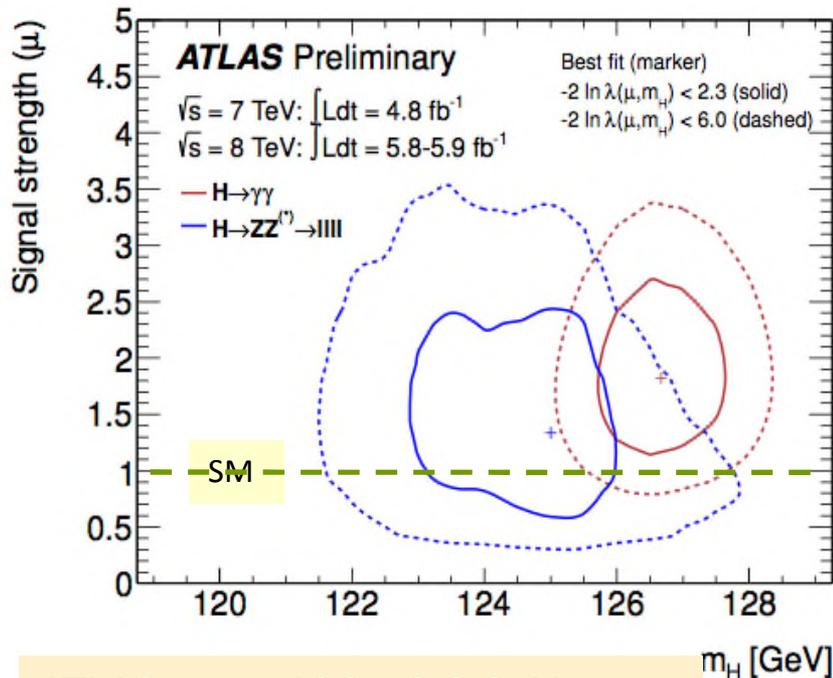
5 $\sigma$ !



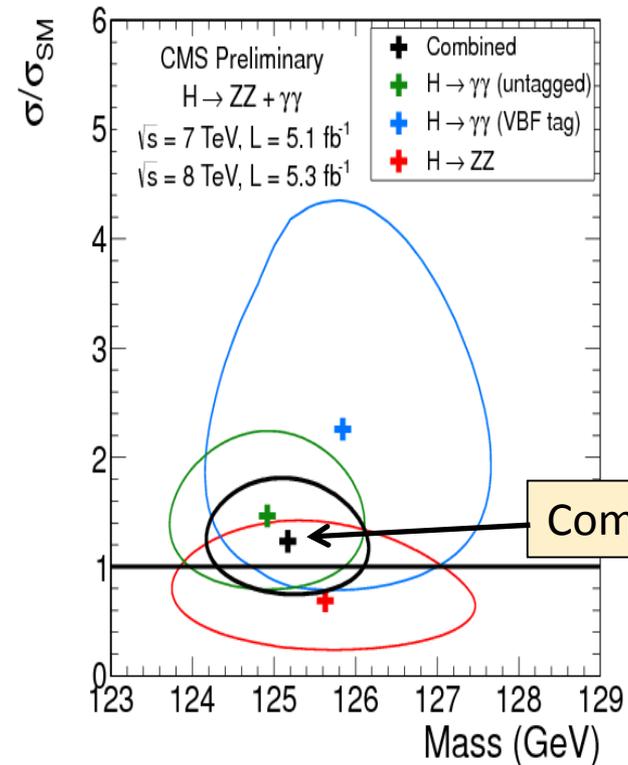
Heuer (DG Cern), Englert, Higgs

# Masse du boson

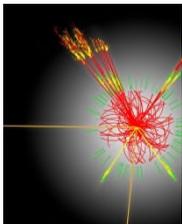
Ajustement combiné (par canal de désintégration) de la force du signal et de la masse  $m_H$



ATLAS:  $m_H = 126 \pm 0,6 \text{ GeV}$

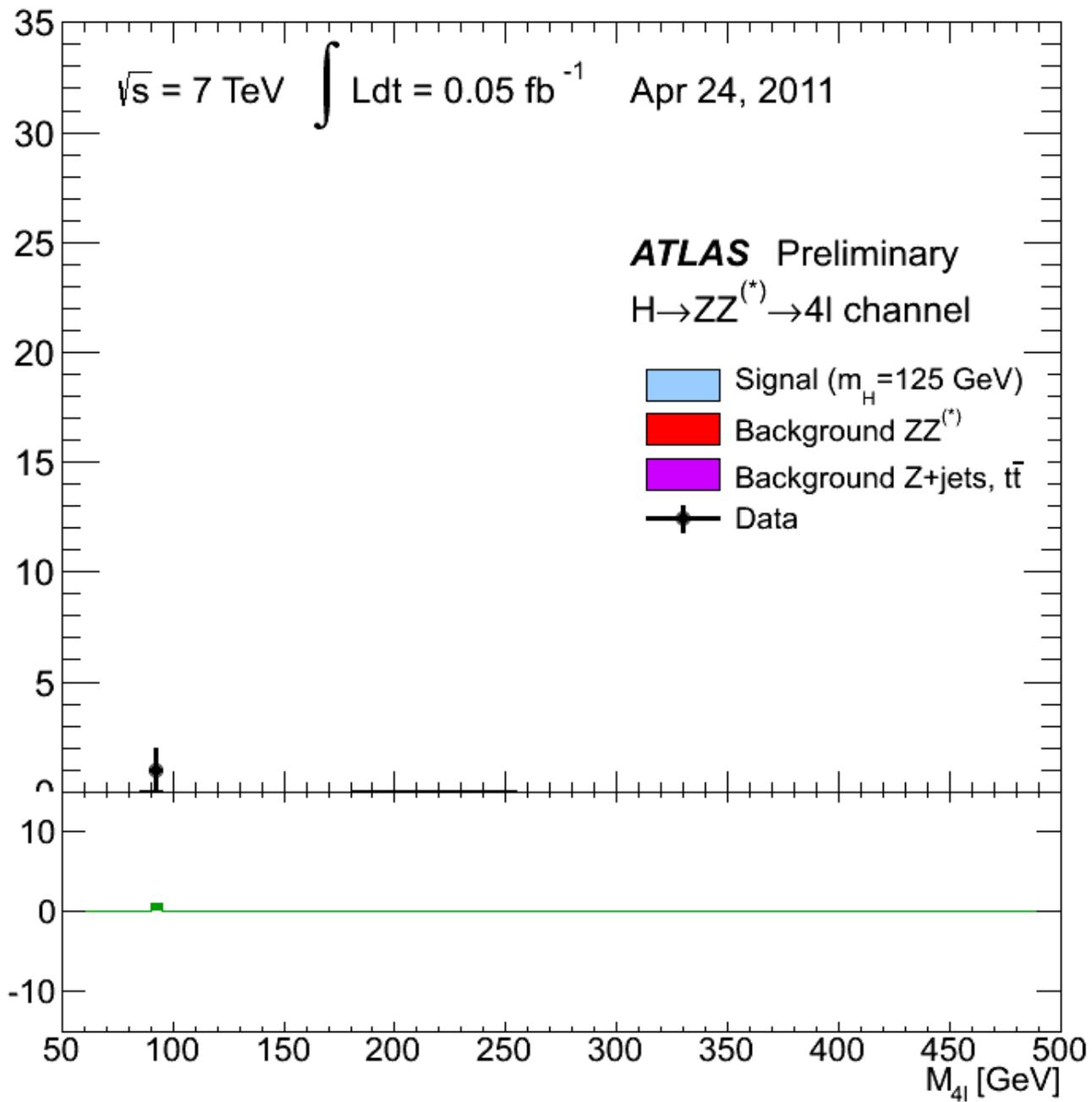


CMS:  $m_H = 125,3 \pm 0,6 \text{ GeV}$



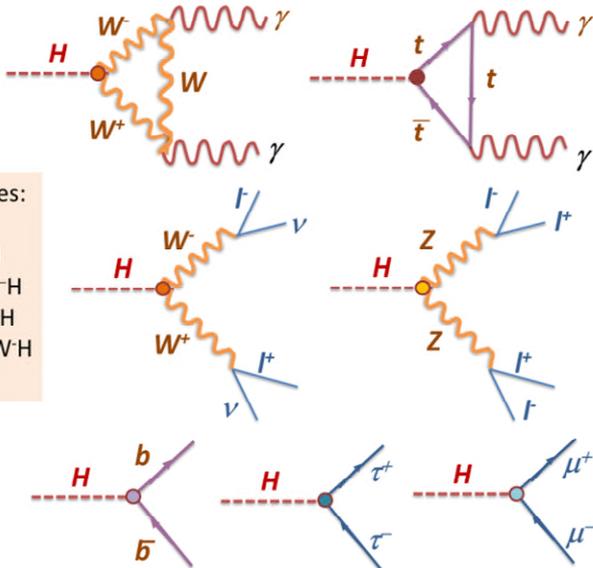
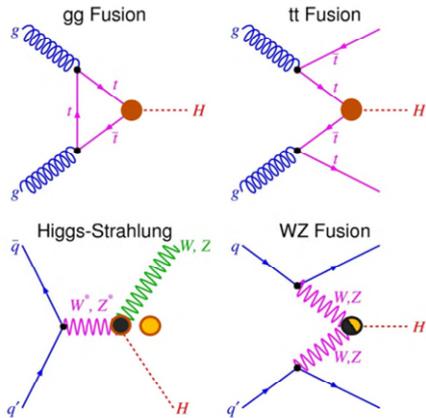
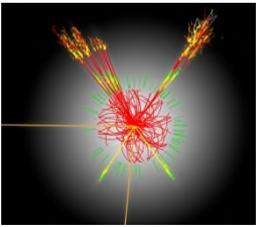
Events / 5 GeV

Data - Background



ats

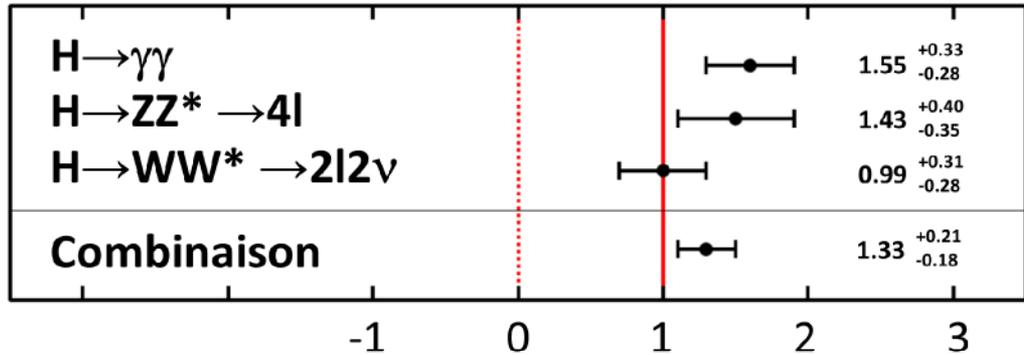
# Est-ce un boson de Higgs du MS?



- Couplages:
- $t\bar{t}H$
  - $b\bar{b}H$
  - $\mu^+\mu^-H$
  - $\tau^+\tau^-H$
  - $W^+W^-H$
  - $ZZH$

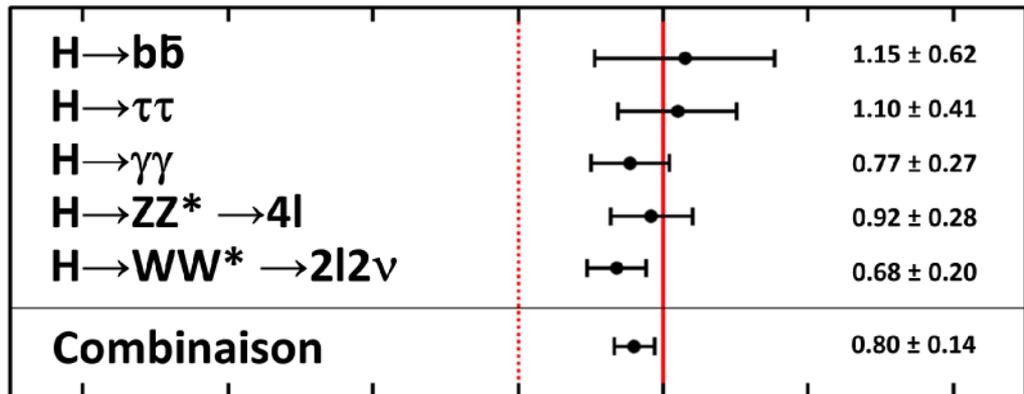
ATLAS (publié)

$m_H = 125.5 \text{ GeV}$

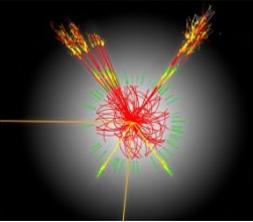


CMS (préliminaire)

$m_H = 125.7 \text{ GeV}$



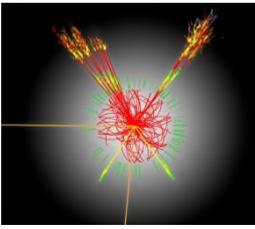
Mesure/ Prédiction du modèle standard



# Est-ce un boson de Higgs du MS?

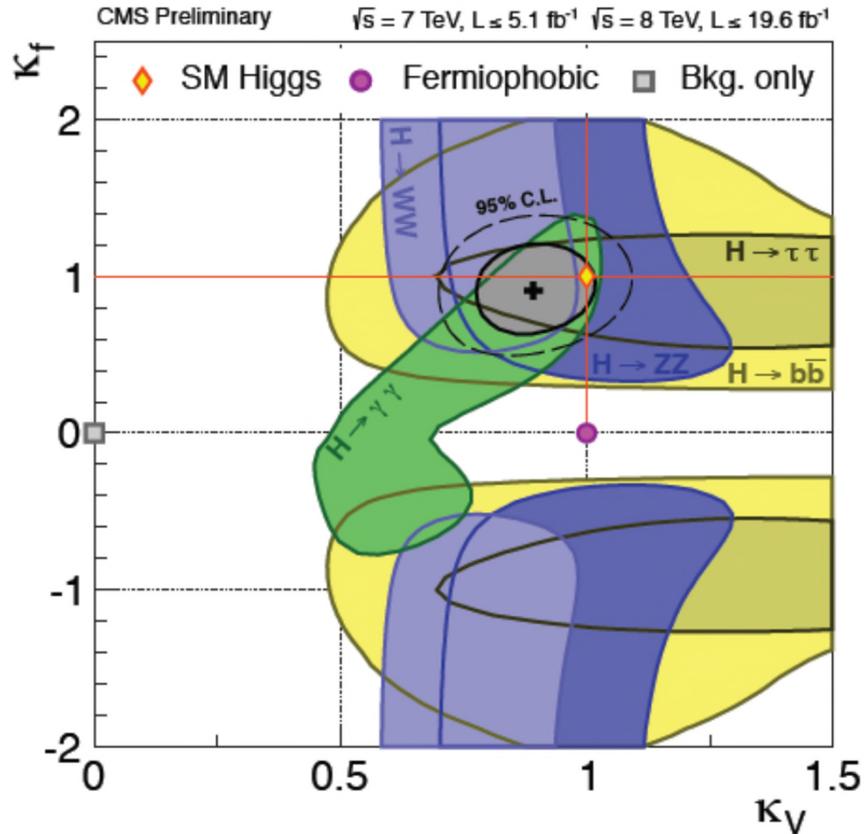
**Les questions auxquelles on souhaite (et devrait pouvoir) répondre dans années a venir avec plus de données au LHC:**

- Quelle est sa structure d'espace-temps? Spin, Parité, CP.
    - Dans le MS: spin 0, CP=++
  - Quels sont les couplages de ce nouveau boson aux particules du Modèle Standard?
    - Proportionnels a la masse comme dans le Modèle Standard?
    - Les couplages interviennent a la fois dans les processus de production et de désintégration du Higgs
  - Est-ce une particule composite? Par exemple composée de fermions issus d'un secteur fort situé a plusieurs TeV.
  - Est-ce un Higgs super-symétrique?
    - $m_H = 126$  GeV dans la zone de masse privilégiée pour un Higgs super-symétrique
    - Couplages aux particules MS légèrement différents de ceux d'un Higgs Standard
    - Y-a-t-il d'autre Higgs a plus basse ou plus haute masse? Des Higgs chargés?
    - Trouvera t-on des partenaires super-symétriques de particules du MS?
- } 0<sup>+</sup> déjà prouvé a plus  
99,5% de confiance avec  
les données 2012

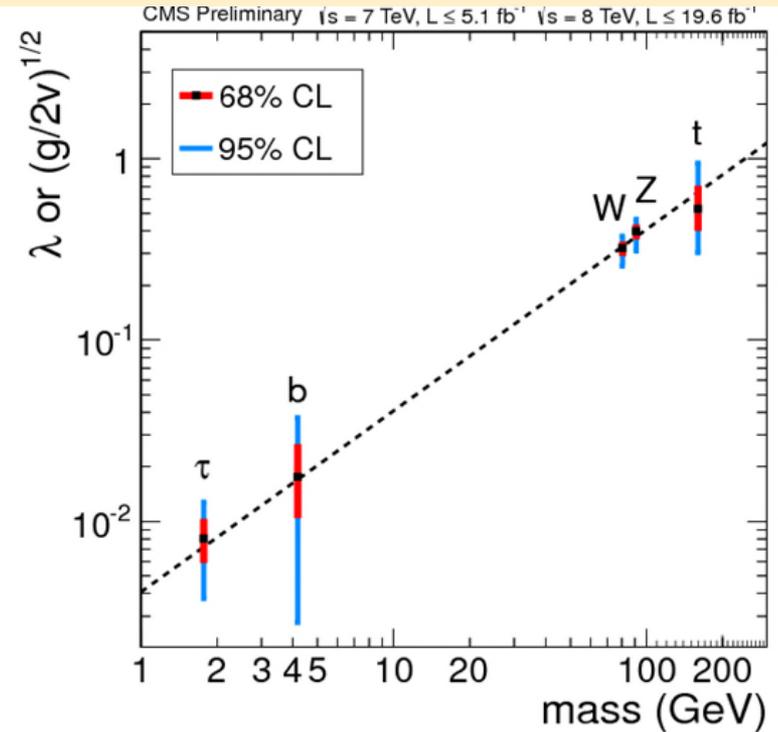


# Est-ce un Higgs « Standard »?

Couplages du boson de Higgs aux fermions ( $\kappa_f$ ) et aux bosons vecteurs ( $\kappa_V$ )

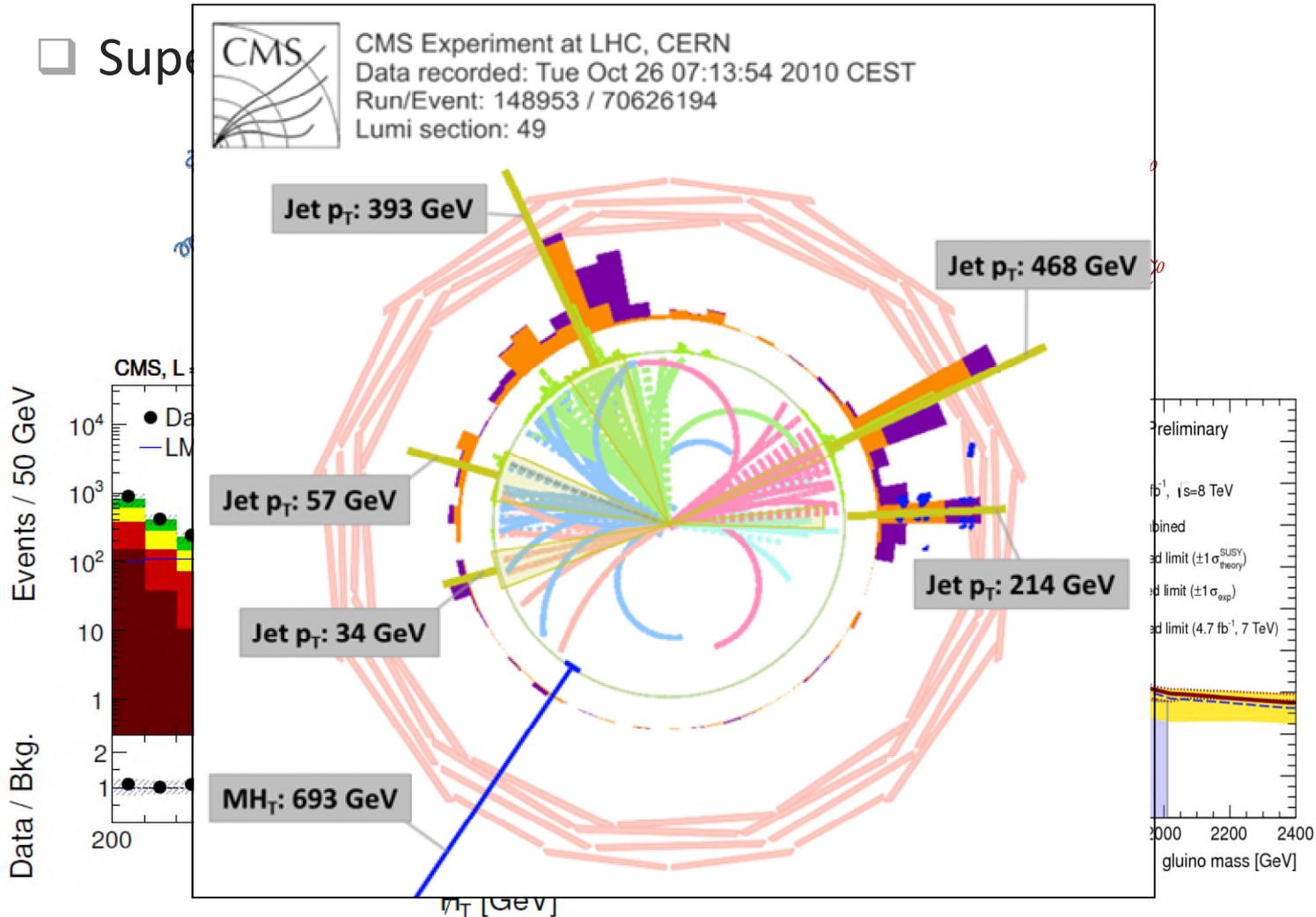


Le couplage du boson de Higgs est-il proportionnel a la masse des particules?



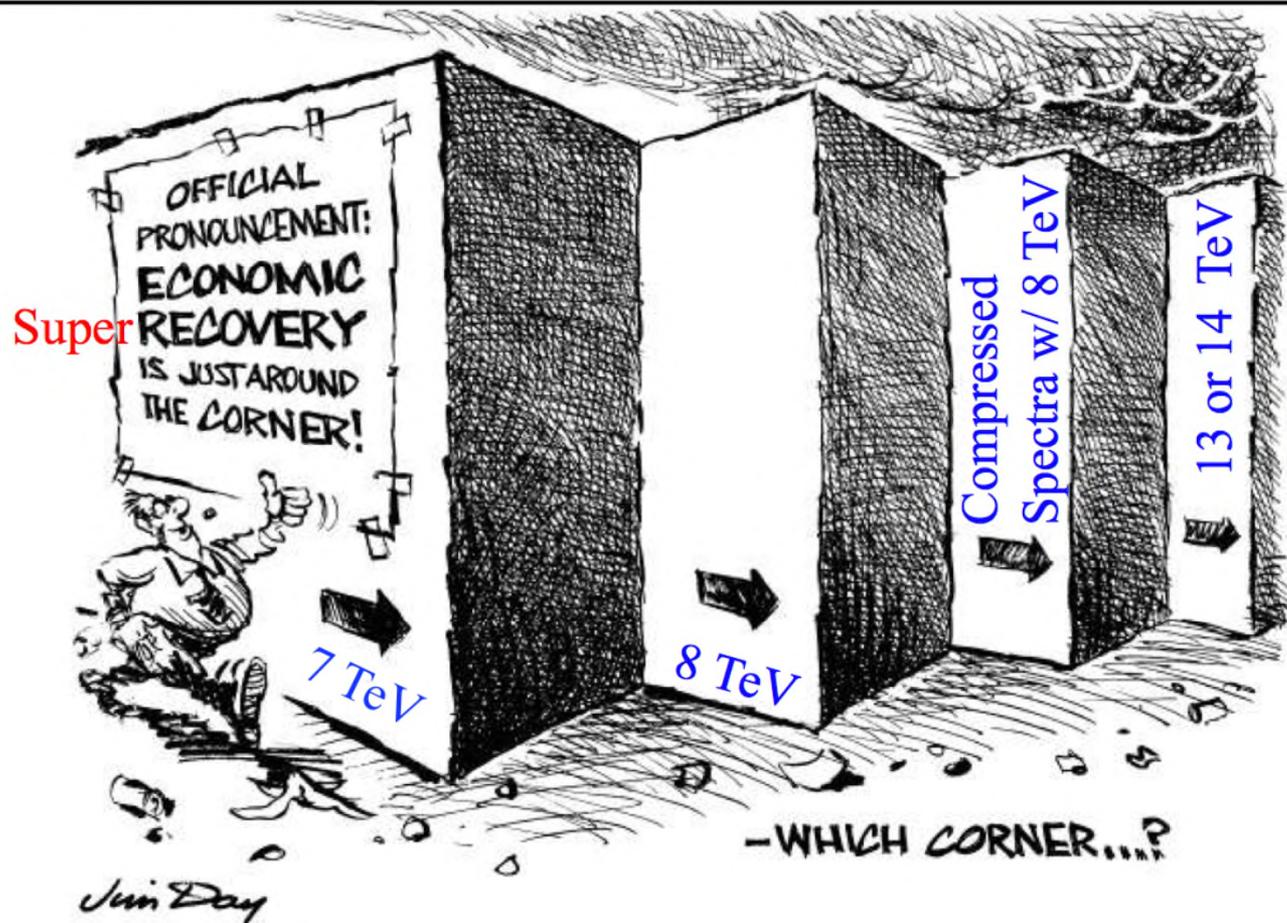
# Recherche de la nouvelle physique(1)

Sup

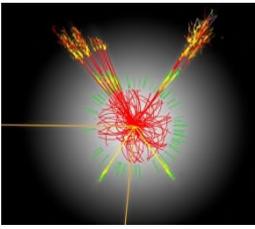


# Recherche de la nouvelle physique(2)

## SUSY around the corner or in a corner?

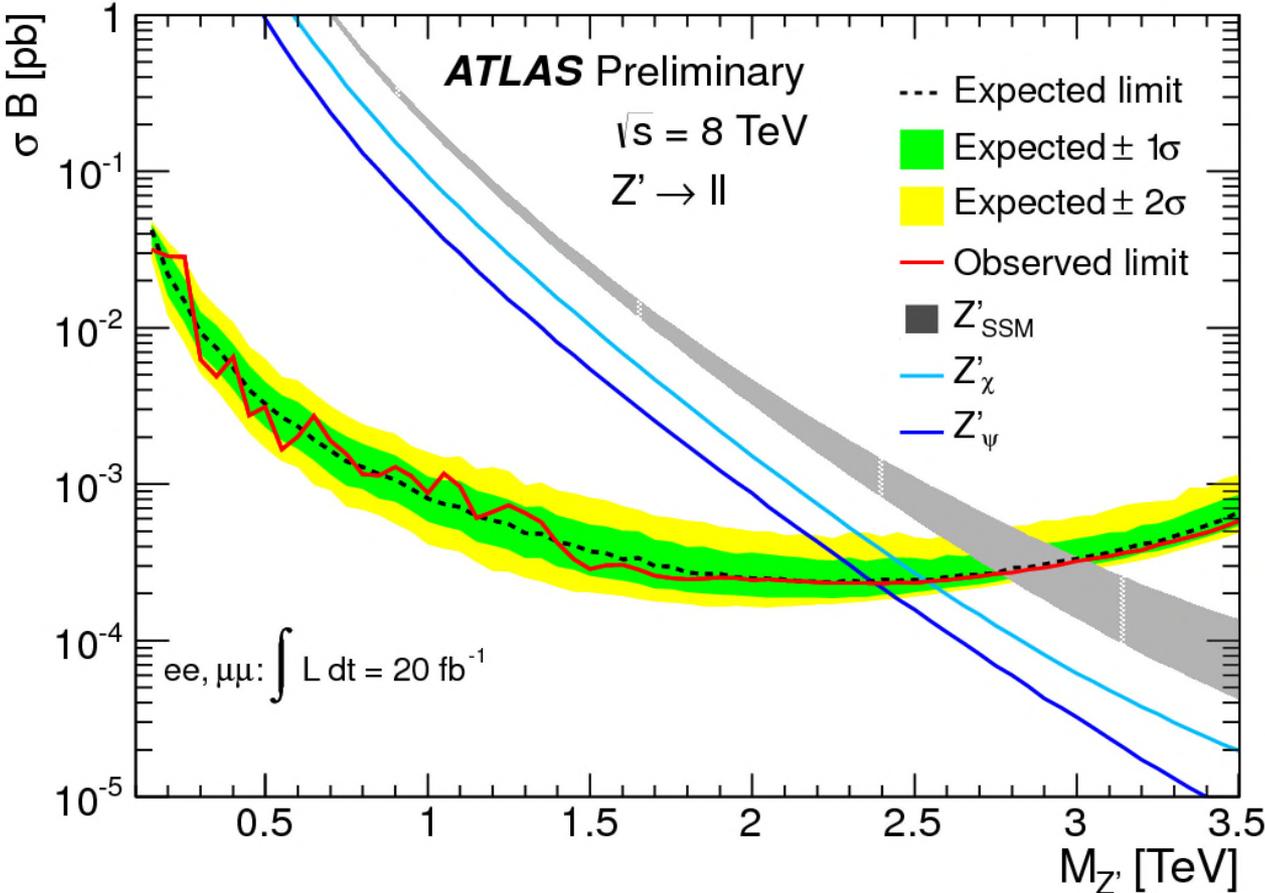
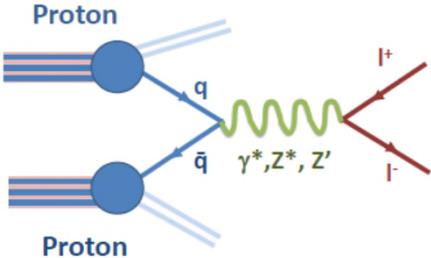


SUSY searches, David Stuart, UCSB



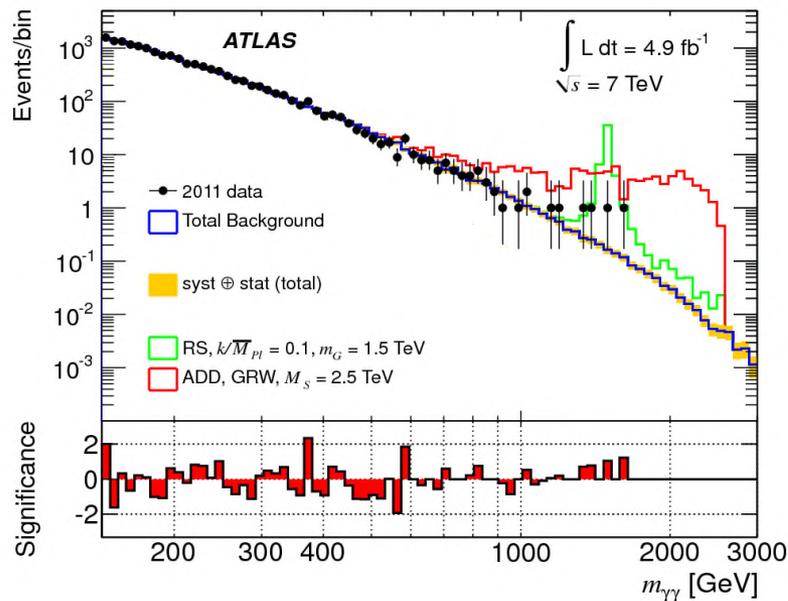
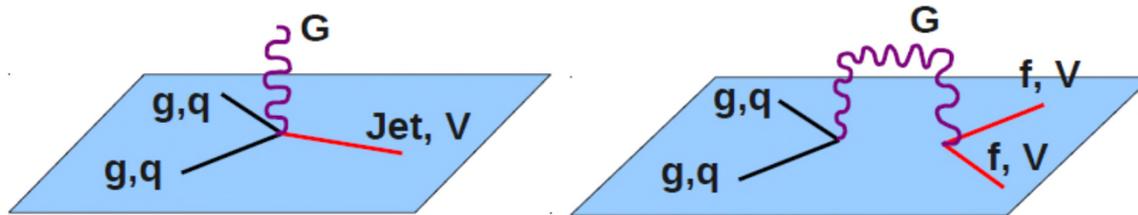
# Recherche de la nouvelle physique(3)

## □ Des signes de grande Unification?

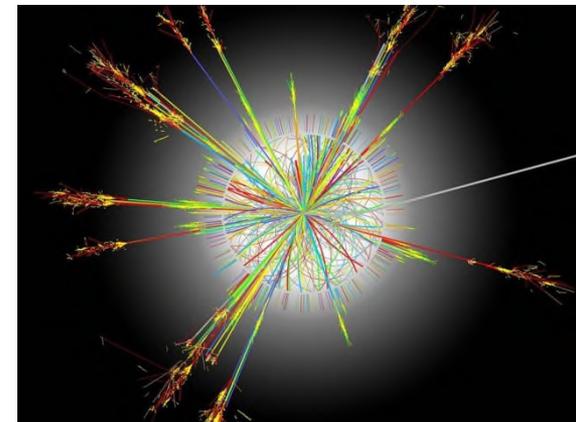


# Recherche de la nouvelle physique(4)

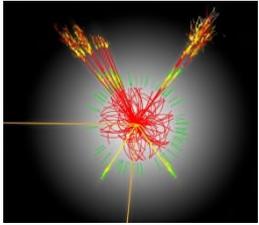
## □ Dimensions supplémentaires



## Micro trou noir (simulation)



# Recherche de la nouvelle physique(5)



Supersymmetry

illustrationsOf.com/439307



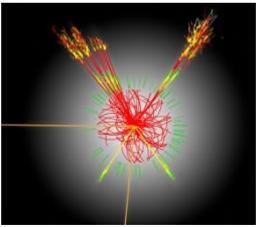
Composite Higgs

©Ron Leishman \* illustrationsOf.com/437971



Extra dimensions

Copyright © Ron Leishman \* http://Nedc.ru/734



# Le boson de Higgs et les grandes questions de la physique des particules

Réalisation de la brisure de la symétrie électrofaible

Unitarité du modèle standard à l'échelle du TeV

Stabilité de l'échelle électrofaible et naturalité ?

- $m_H=126$  GeV => indice de Supersymétrie?
- extra dimensions?

**Limites actuelles au LHC:  
Masse (gluino, squark) > 1.5 TeV**

Hiérarchie des masses des particules connues ( $m_{top}/m_e \sim 300000$ ): ???

Nature de la matière noire ?

- Supersymétrie?

Nature de l'énergie noire

- Le boson de Higgs contribue à l'énergie du vide (mais qui reste un facteur  $\sim 10^{120}$  trop grand par rapport à la constante cosmologique nécessaire pour expliquer la quantité d'énergie noire)

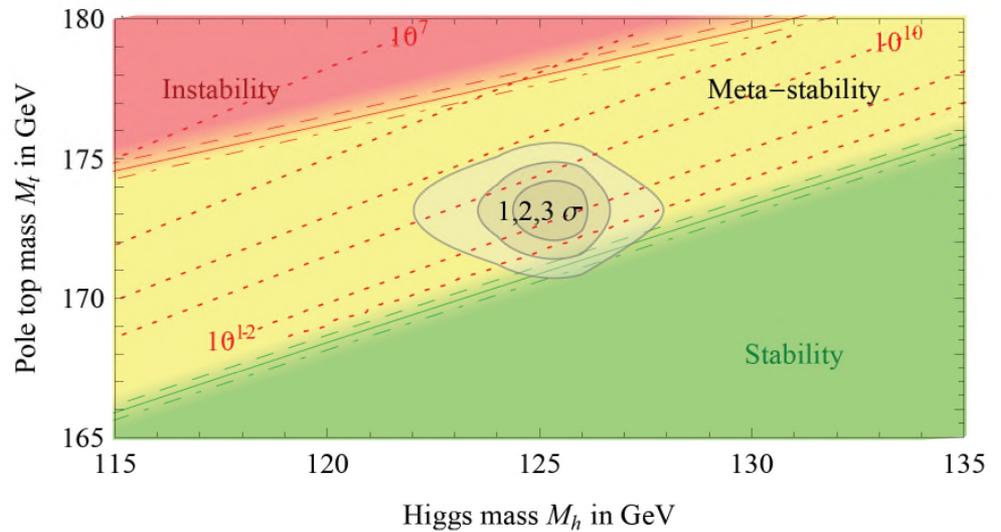
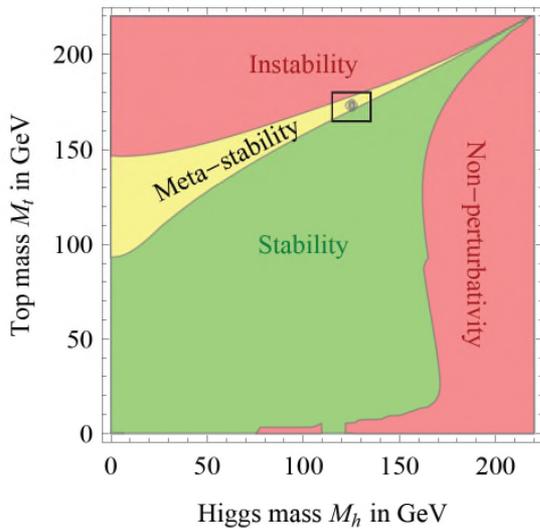
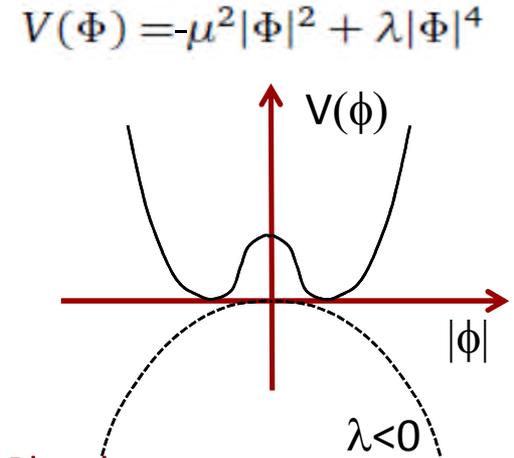
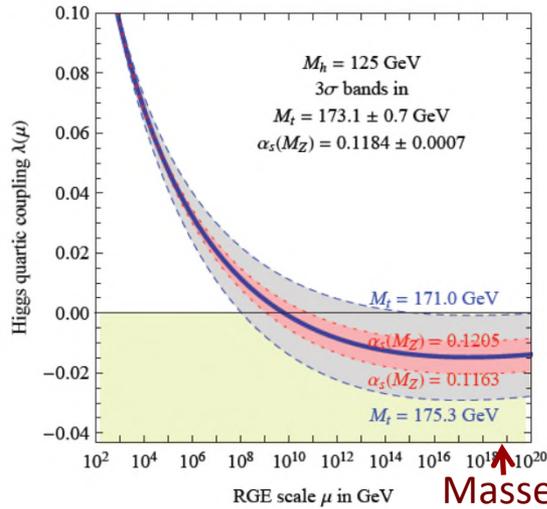
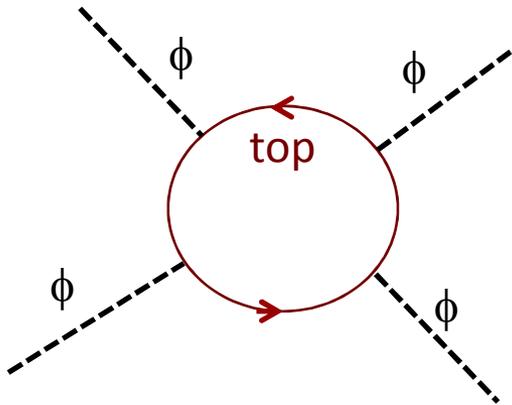
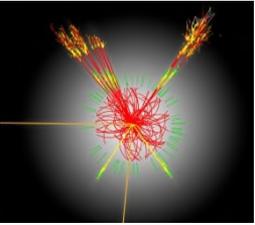
Origine de l'inflation cosmologique

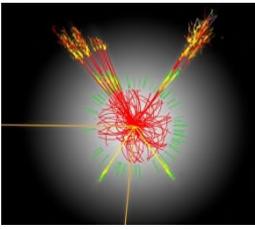
- Evolution du potentiel de Higgs-> Higgs~Inflaton?

Unification des interactions, y compris la gravitation ??

oui

# La stabilité du vide du modèle standard





## ❑ Arrêt en 2013-2014

- Modifications pour augmenter l'énergie à  $\sim 6,5$  TeV/faisceau (accident de 2008!)
- Analyse des données (plus calme?)
  - Higgs: confirmer, commencer les premières mesures détaillées (couplages)
  - Tout le reste du programme LHC!

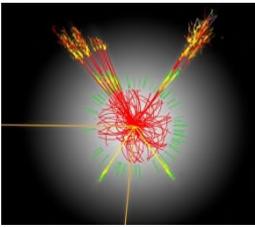
## ❑ Redémarrage en 2015 , à $6,5 + 6,5 = 13$ TeV

## ❑ Augmentation progressive du nombre de collisions

- 5 fois plus de de luminosité cumulée vers 2018 ( $\sim 150 \text{ fb}^{-1}$ )
- Arrêt en 2018 (passage a 14 TeV, augmentation de la luminosité)
- 10 a 20 fois plus de luminosité cumulée en 2022 ( $\sim 300 \text{ fb}^{-1}$ )
- Arrêt en 2022-2023 (amélioration de la machine si le programme HL-LHC est approuvé)
- 100 fois plus en 2030 si le programme HL-LHC est approuve ( $\sim 3000 \text{ fb}^{-1}$ ) ?
- Programme d'améliorations des expériences pour soutenir l'augmentation de luminosité

## ❑ Phase exploratoire: au-delà du Higgs!

- Plusieurs bosons de Higgs?
- Supersymétrie?
- Dimensions supplémentaires?



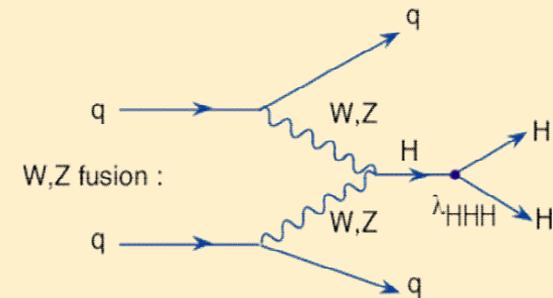
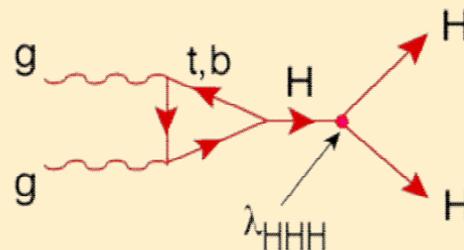
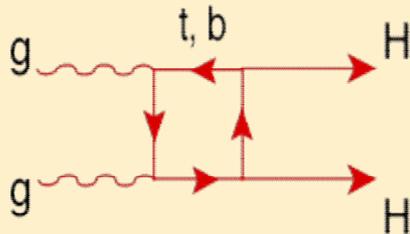
# Ce qu'il reste à faire sur le Higgs

## □ Mesures très précises des couplages aux particules du modèle standard (quelques %)

### ➤ Mise en évidence du couplage au muon (fermion de seconde génération)

- HL-LHC (>2025) avec  $\int L dt \sim 3000 \text{ fb}^{-1}$  nécessaire

## □ Auto-couplage du Higgs



- ### ➤ HL-LHC (>2025) avec $\int L dt \sim 3000 \text{ fb}^{-1}$ nécessaire $\Rightarrow \sigma_{\lambda}/\lambda \sim 30\%$

## □ Recherche d'autres bosons de Higgs à basse (< 10 GeV) ou haute masse (>800 GeV?)

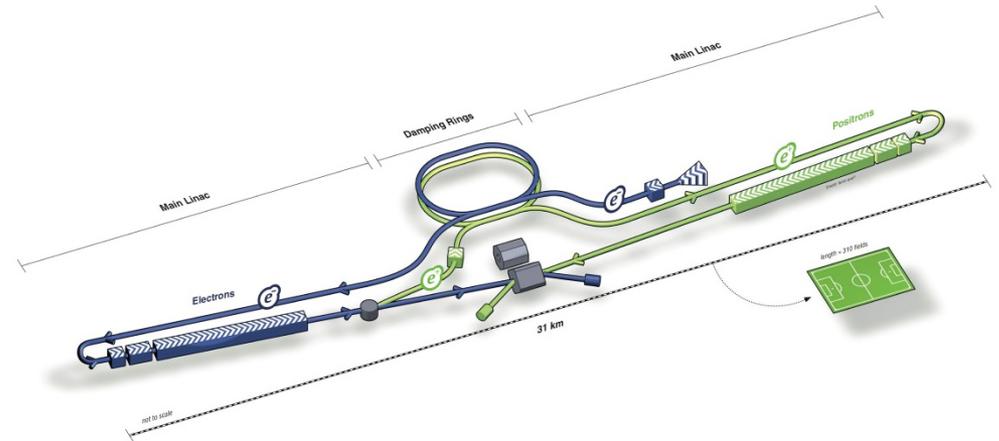
## □ Recherche d'éventuels canaux de désintégration du Higgs en particules « invisibles » hors modèle standard (de masse < $m_H/2$ )

- ### ➤ Higgs = portail vers un secteur caché qui pourrait expliquer la matière noire

# Les prochains collisionneurs

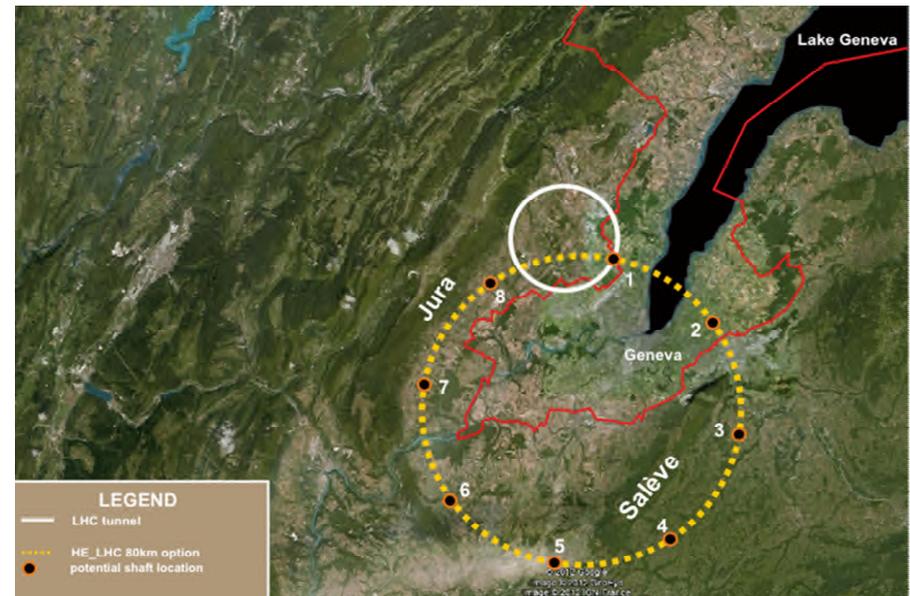
## □ ILC

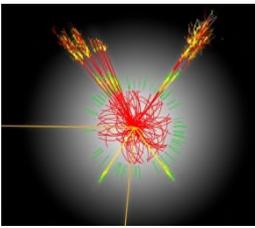
- $e^+e^-$  de 250 a 800 GeV dans le c.m.
- ~10000 a 20000 Higgs détectés
- Décision en 2014-2016?
- Démarrage vers 2025-2030?



## □ TLEP

- $e^+e^-$  de 250 a 350 GeV dans le c.m.
- Tunnel de 80 a 100 km
- ~50000 a 200000 Higgs détectés
- Démarrage possible vers 2030?
- Possibilité d'installer plus tard un collisionneur p-p de ~100 TeV (~2040)





# Conclusions et perspectives

- ❑ **Une nouvelle particule d'une masse proche de 125 GeV a été découverte**, dont les propriétés sont compatibles avec celles du boson de Higgs prédit par le Modèle Standard.
  - La précision des mesures de ses couplages avec les particules du Modèle Standard est encore insuffisante pour affirmer que c'est LE boson de Higgs du MS

Cette découverte ouvre tout un champ de physique au delà du Modèle Standard tant au niveau expérimental qu'au niveau théorique

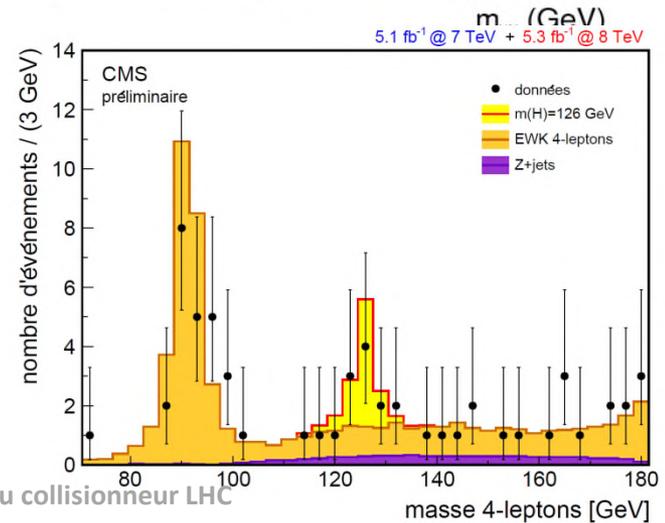
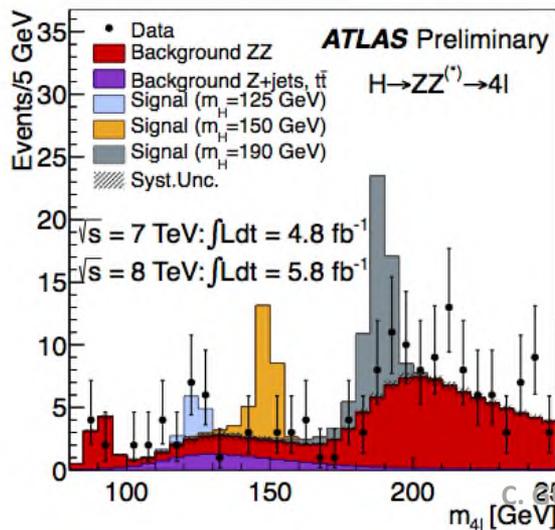
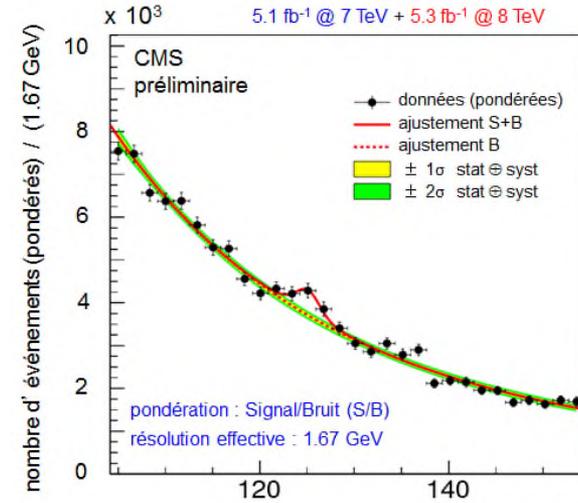
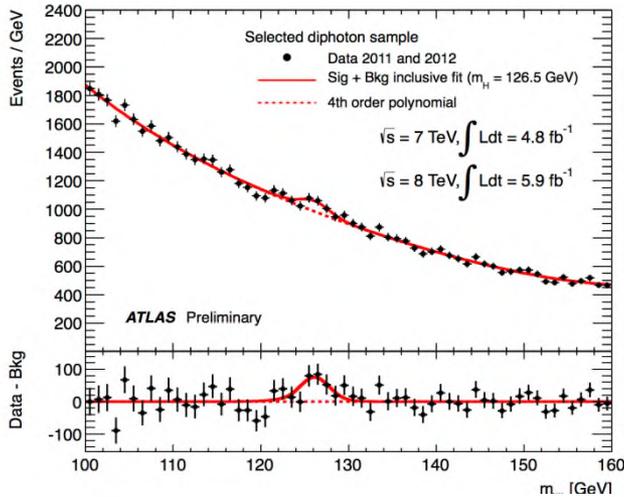
- ❑ Nouvelles pistes ouvertes vers la physique au-delà du MS s'il s'avère que ce boson n'est pas un Higgs « standard »
  - Il est possible que d'autres bosons de Higgs existent dans d'autres domaines de masse comme prédit par d'autres théories au-delà du MS (ex: la supersymétrie)



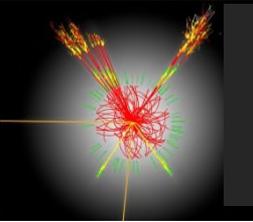
Merci pour votre attention

Merci aux organisateurs pour cette  
invitation

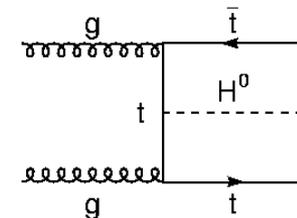
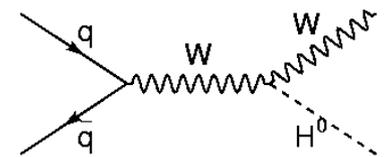
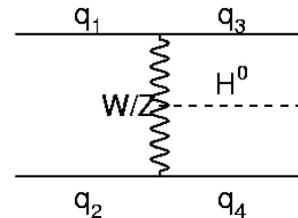
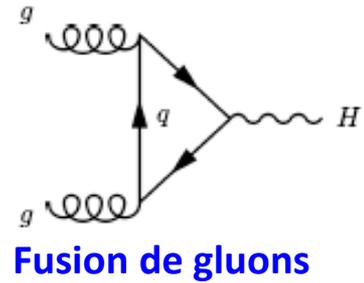
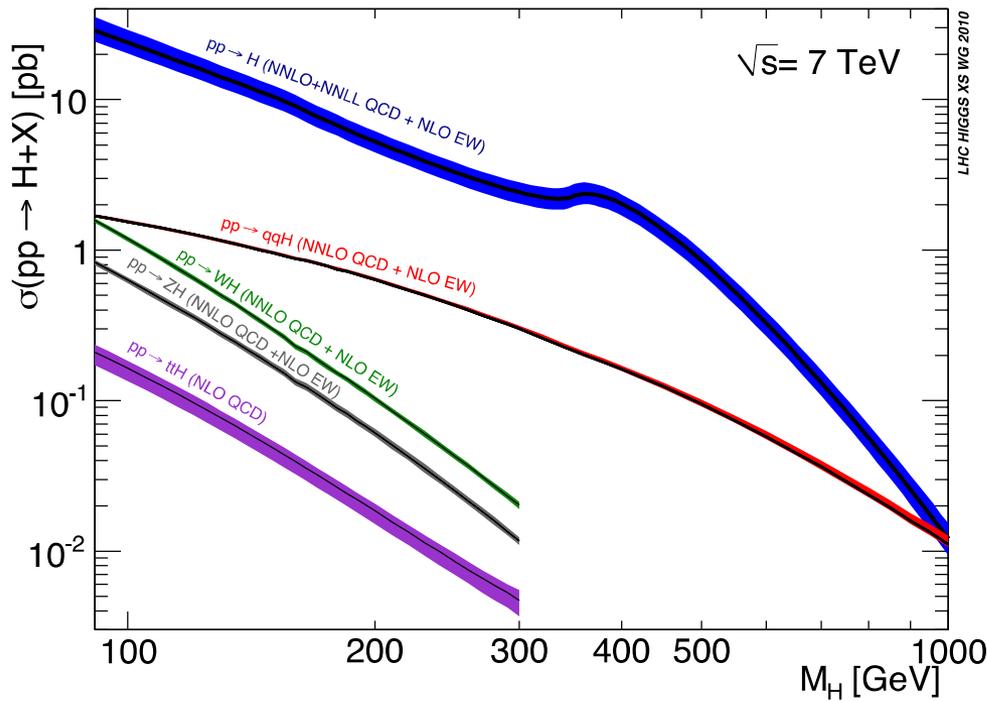
# La masse est dite!



# EXTRAS



# Production au LHC



# Connaissances avant le LHC

## Recherches directes avant le LHC:

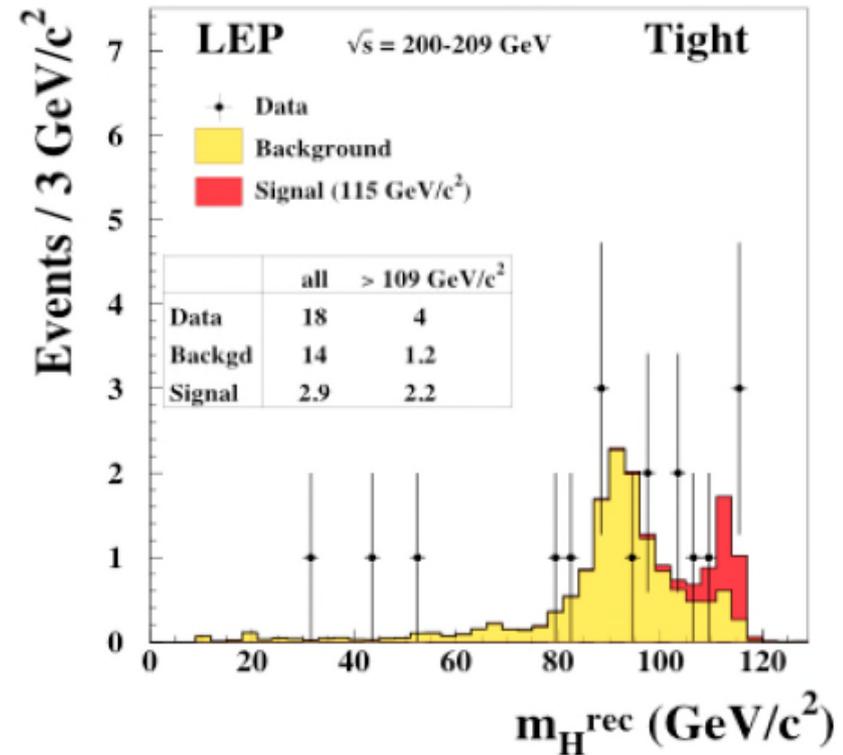
- ❑ **Le LEP au CERN** (Genève) de 1989 à 2000 (collisions électron-positon à la masse du Z, puis à 130 GeV et 209 GeV)

Gamme de masse en dessous de 115 GeV exclue à 95% de niveau de confiance

- ❑ **Le Tevatron au Fermilab** (Chicago) de 1992-2011 (collisions proton-antiproton à 1.96 TeV)

Première exclusion d'une zone autour de 160 GeV en 2010 ( $m_H \notin [158-173]$  GeV)

Gamme de masse entre 147 et 179 GeV exclue à 95% de niveau de confiance à l'hiver 2012



$m_H > 114.4$  GeV à 95% de niveau de confiance

# Le Modele Super Symétrique Minimal

