

# COMPRENDRE L'INFINIMENT PETIT



Anne-Isabelle Etievre  
([anne-isabelle.etievre@cea.fr](mailto:anne-isabelle.etievre@cea.fr))



- Les particules, leurs interactions
  
- Mise en évidence expérimentale
  - ▣ *Les détecteurs de physique des particules*
  - ▣ *L'accélérateur LHC*
  
- Le boson de Higgs

3

# Episode 3

Le boson de Higgs



# Le Modèle Standard de la physique des particules

- **Succès:**

- ✓ *Observations confirmant la théorie*

- 12 constituants élémentaires observés
    - Bosons vecteurs (W,Z) observés à la masse prédite
    - Modèle des quarks

- **Mais incomplet:**

- ✓ *Pourquoi 3 familles?*

- ✓ *Mécanisme à l'origine de la masse des particules connues?*

- une possibilité : interaction avec le boson de Higgs

- ✓ *Extrapolation délicate à plus haute énergie*

- → physique nouvelle à l'échelle du TeV: supersymétrie,...

- ✓ *Incomplet : n'incorpore pas la gravité*



# Le Modèle Standard de la physique des particules

## • Origine de la masse des particules

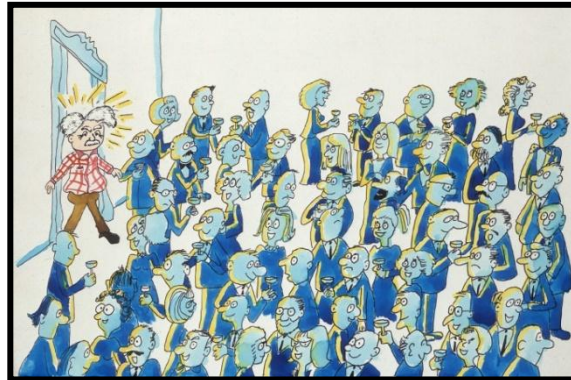
- ✓ *Symétrie* → *particules de masse nulle*
- ✓ *Or particules massives (de 0 à 100 GeV/c<sup>2</sup>)*
- ✓ *Symétrie électrofaible* : *la symétrie est brisée à basse énergie*
- ✓ *Mécanisme possible* : *interaction entre les particules et le boson de Higgs*

En 1993, le défi du ministre britannique des sciences aux chercheurs: expliquez le mécanisme de Higgs simplement!

Réponse de David Miller, mise en BD : Cern.



Une assemblée de physiciens:  
le « vide quantique »  
(avec un champ de Higgs)



Arrive une personnalité  
libre de ses mouvements  
(«particule sans masse »)



Un amas s'accumule  
autour: la personnalité a  
« acquis » une masse !



# Le Modèle Standard de la physique des particules

## □ Mécanisme de Brout-Englert-Higgs (1964)

- Prédit l'existence d'un boson, de spin 0, dont la masse est peu contrainte
- Interactions avec les particules



⇒ **génération des masses** des particules:

$M_\gamma = 0$  ( $\Leftrightarrow$  portée infinie de l'interaction électromagnétique)

$M_Z \sim 91 \text{ GeV}$ ,  $M_W \sim 80 \text{ GeV}$  ( $\Leftrightarrow$  portée finie de l'interaction faible)

valeurs confirmées  
expérimentalement lors de la découverte  
des W et Z au CERN (années 80)



# Le boson de Higgs

## □ A l'origine de la masse des particules: la brisure spontanée de la symétrie

□ Introduction d'un champ  $\Phi$  dans le lagrangien (champ de Higgs)

■ Potentiel  $V(\Phi) = -\mu^2 |\Phi|^2 + \lambda |\Phi|^4$

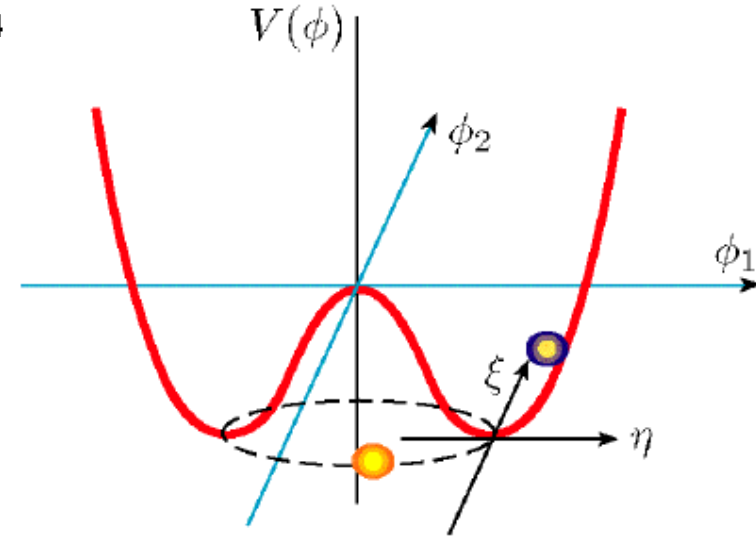
■ Minimum pour  $|\Phi| = v/\sqrt{2} = \Phi_0$

■ Fluctuations quantiques

autour du minimum :  $\Phi_0 + h$

■  $m_W^2 = g^2 v^2 / 4 \rightarrow v = 246 \text{ GeV}$

■  $m_H^2 = 2 \lambda v^2$



□ La masse du boson de Higgs est un paramètre libre du Modèle

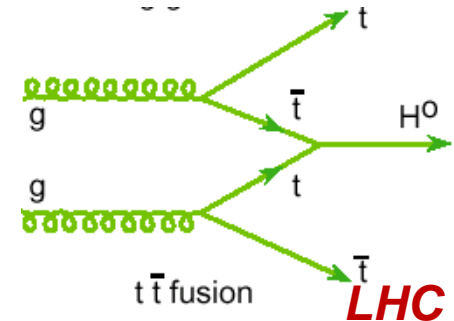
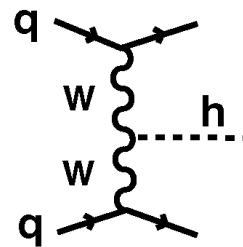
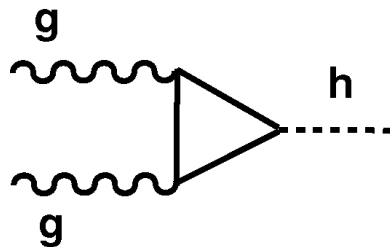


# Le boson de Higgs

## □ Ce que nous prédit la théorie

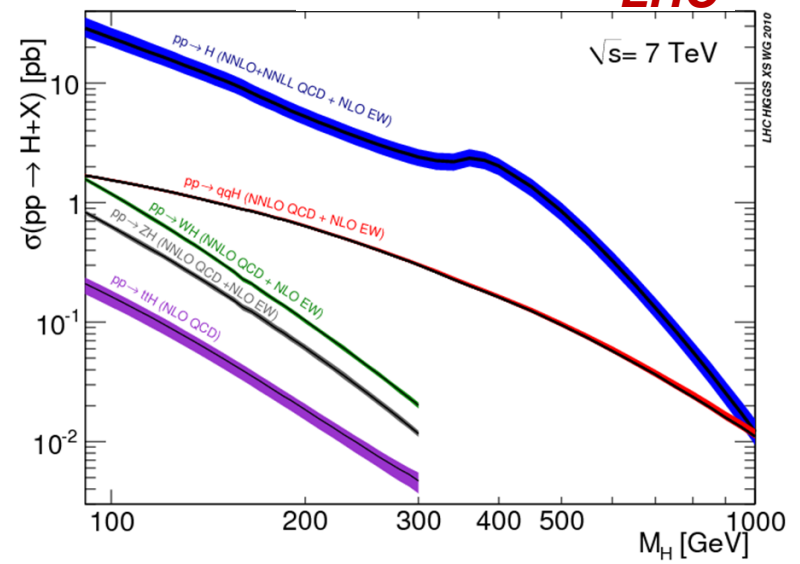
### ▣ Mécanisme de production:

- Boson de Higgs produit seul ou associé à une particule lourde



- La probabilité de ces différents modes de production:

- Est prédite
- Dépend de la masse du boson de Higgs







# Le boson de Higgs

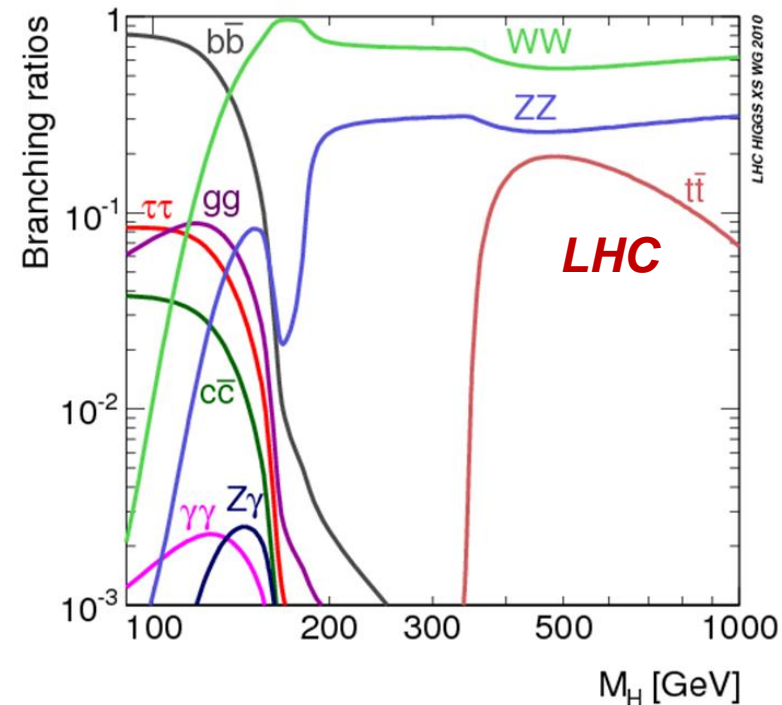
## □ Ce que nous prédit la théorie

### ▣ Mécanismes de désintégration

- Suivant sa masse, le boson de Higgs se désintègre préférentiellement en différentes paires de particules

Mode	Mass range, GeV
$H \rightarrow \gamma\gamma$	110 - 140
$H \rightarrow WW^{(*)} \rightarrow \ell\nu\ell\nu$	120 - 200
$H \rightarrow WW \rightarrow \ell\nu qq$	220 - 600
$H \rightarrow ZZ^{(*)} \rightarrow \ell\ell\ell\ell$	120 - 600
$H \rightarrow ZZ \rightarrow \ell\nu\nu$	200 - 600
$H \rightarrow ZZ \rightarrow \ell lqq$	200 - 600

- Seules les particules stables sont observables:
  - Expérimentalement, reconstruction de la masse invariante des produits de désintégration = masse du Higgs



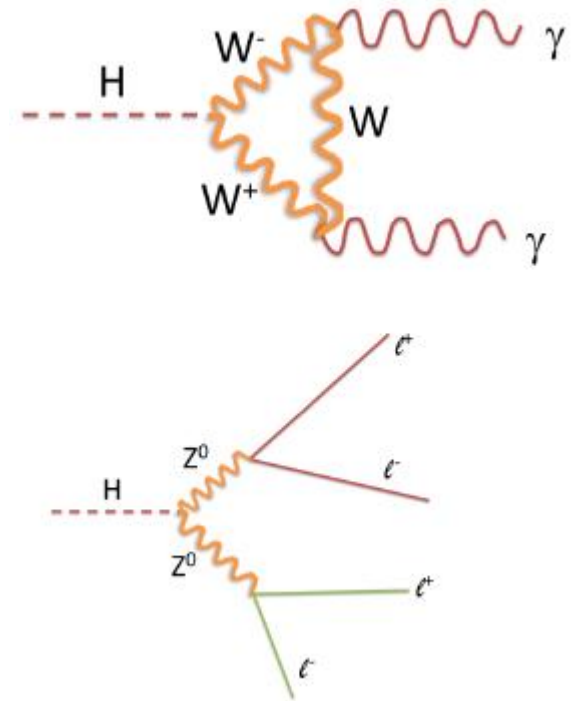


# Le boson de Higgs

- **Ce que l'on savait de lui avant le démarrage du LHC:**
  - ▣ *Contraintes expérimentales sur sa masse:*
    - Contraintes directes (recherche via ses produits de désintégration):
      - LEP ( accélérateur  $e^+e^-$ , arrêt 2000):  $m_H > 114 \text{ GeV}/c^2$
      - Tevatron ( accélérateur proton-antiproton, arrêt 2011):
        - Masses exclues:  $158 < m_H < 173 \text{ GeV}/c^2$
    - Contraintes indirectes (prédiction théorique):  $m_H < 1 \text{ TeV}/c^2$
    - Un large spectre possible de masse à explorer!

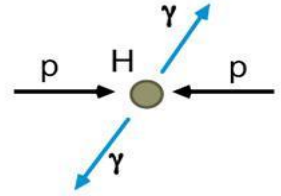
## □ Recherche

- Dans les deux expériences séparément
- Dans deux modes de désintégration privilégiés
  - Privilégiés à basse masse
  - Favorables en terme de bruit de fond
  - Aisés à reconstruire
- Combinaison statistique des deux modes





# Le boson de Higgs



## □ Recherche de la désintégration en 2 photons ( $H \rightarrow \gamma\gamma$ )

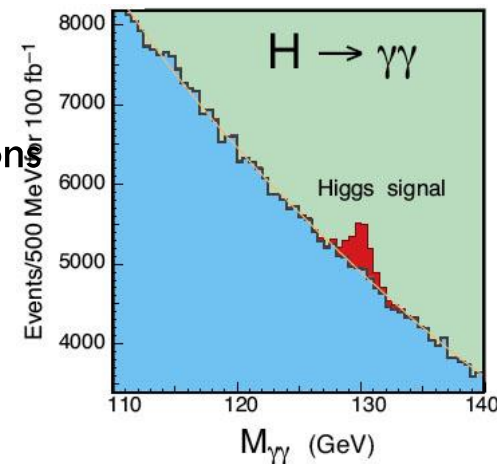
### □ Ce que la théorie nous dit:

- A basse masse, la désintégration  $H \rightarrow \gamma\gamma$  est favorisée (compromis détectabilité/production)
- C'est un processus rare (0.2% pour  $m_{\text{Higgs}} = 125 \text{ GeV}$ )
- Le bruit de fond physique (production de deux photons) est maîtrisable

### □ Ce que la simulation nous montre:

- Observable choisie : masse invariante des deux photons détectés  $\rightarrow$  recherche d'un excès
- Pour observer un pic ténu de signal (Higgs) au-dessus d'un continuum de fond très élevé, il est nécessaire d'avoir un calorimètre électromagnétique très précis
  - Cahier des charges: résolution en énergie de 1%,...

CMS : simulation





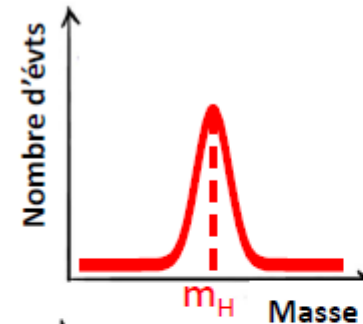
# Le boson de Higgs

13

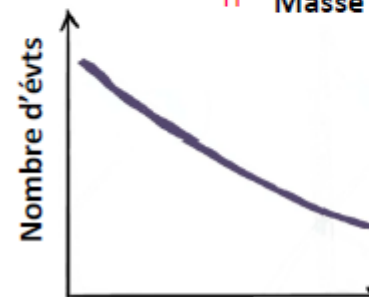
## □ Recherche de la désintégration en deux photons

▣ *Reconstruction de la masse invariante de deux photons détectés*

- Si signal, un pic à la masse du boson de Higgs
- Sinon, un continuum



environ 200 événements



des milliers d'événements



# Analyse des spectres de masse

## □ Hypothèse 1:

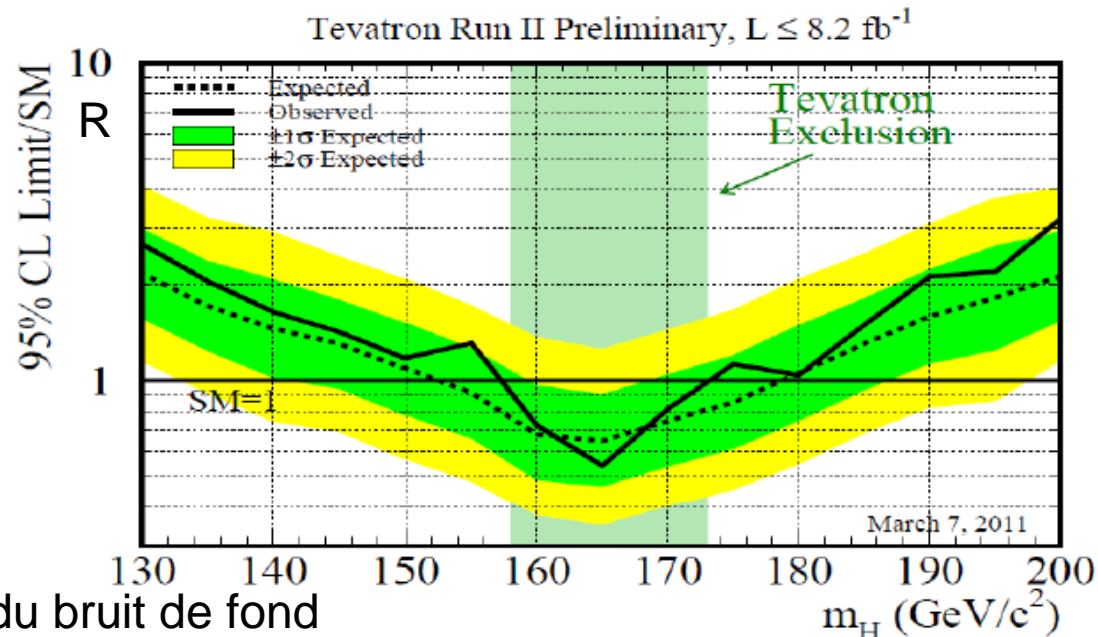
□ Pas d'excès observé  $\rightarrow$  pas de découverte:

■ Scan du spectre de masse:

■ Comparaison du nombre d'événements attendus de (fond + Higgs) au nombre d'événements observés  $\rightarrow$  observable R dont on teste la compatibilité avec l'existence d'un Higgs

$R < 1 \rightarrow$  masse exclue

$R > 1$  : on ne peut pas conclure



Bandes verte et jaune: fluctuation du bruit de fond



# Analyse des spectres de masse

## □ Hypothèse 2:

□ *Excès observé: est-ce une découverte?*

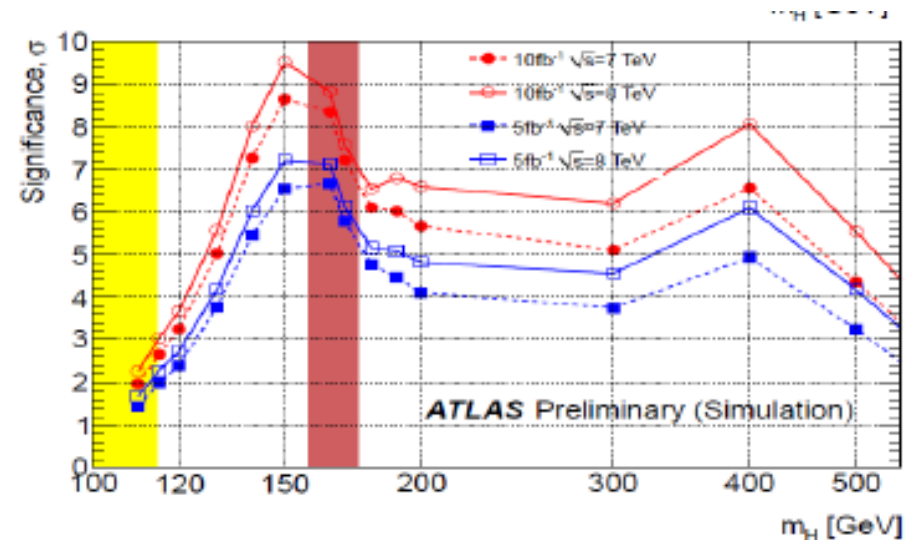
■ Outil statistique = *significance*

$$S = \frac{N_S}{\sqrt{N_B}}$$

■ Si  $S > 5 \times$  erreur sur la connaissance du bruit de fond ( $\sigma$ ):

■ **la probabilité (gaussienne) que le bruit de fond fluctue au-delà de  $5 \sigma$  est de  $10^{-7}$**

■ **DECOUVERTE!**



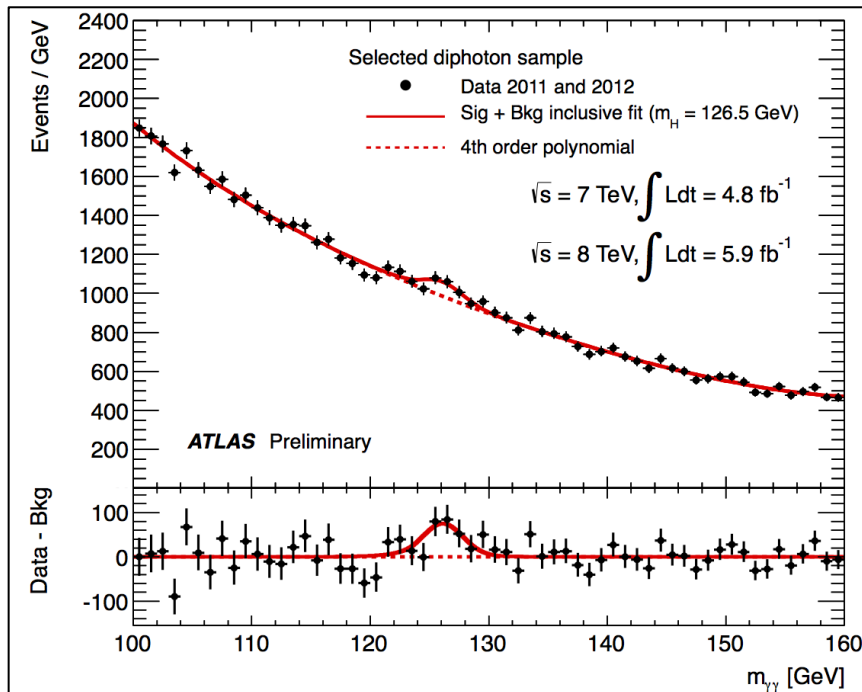


# Et donc...

16

## □ ATLAS

- Excès de  $4.5 \sigma$  à  $m_H = 126.5 \text{ GeV}$
- Probabilité que cela soit une fluctuation du fond: 2/1 million





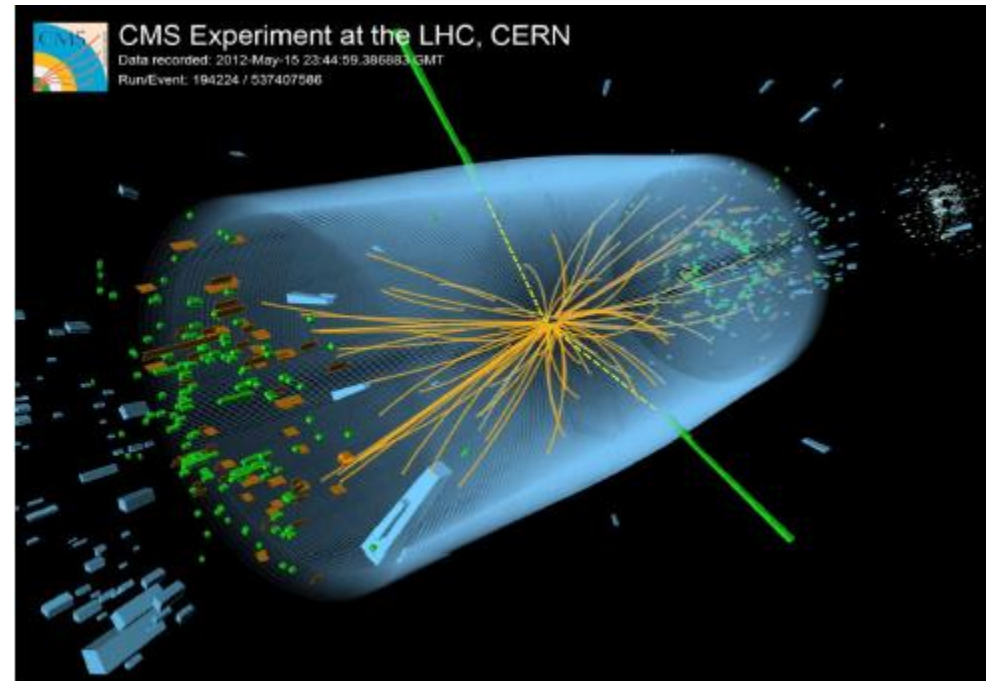
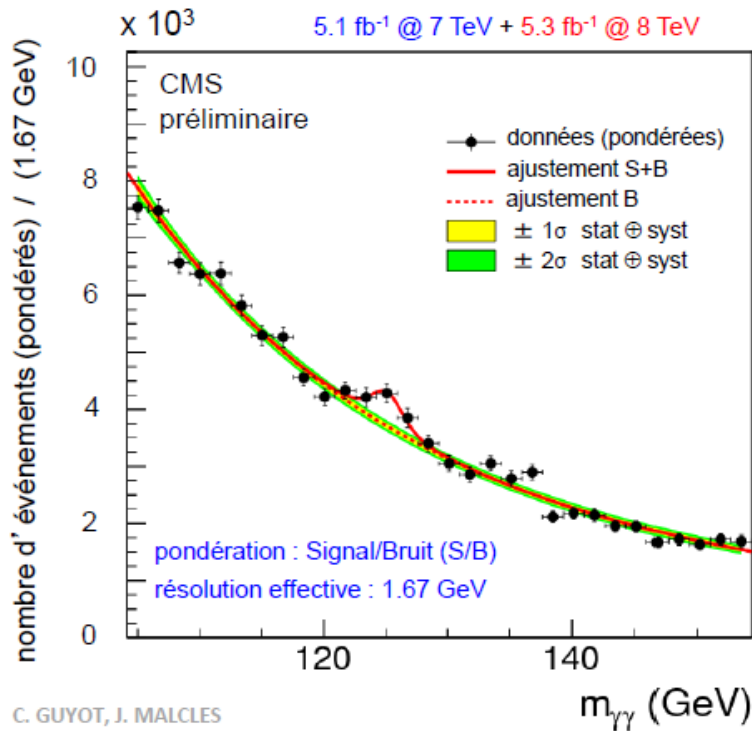


# Et donc...

17

## □ CMS

- Excès de  $4.1 \sigma$  à  $m_H = 125 \text{ GeV}$
- Probabilité que cela soit une fluctuation du fond: 30/1 million



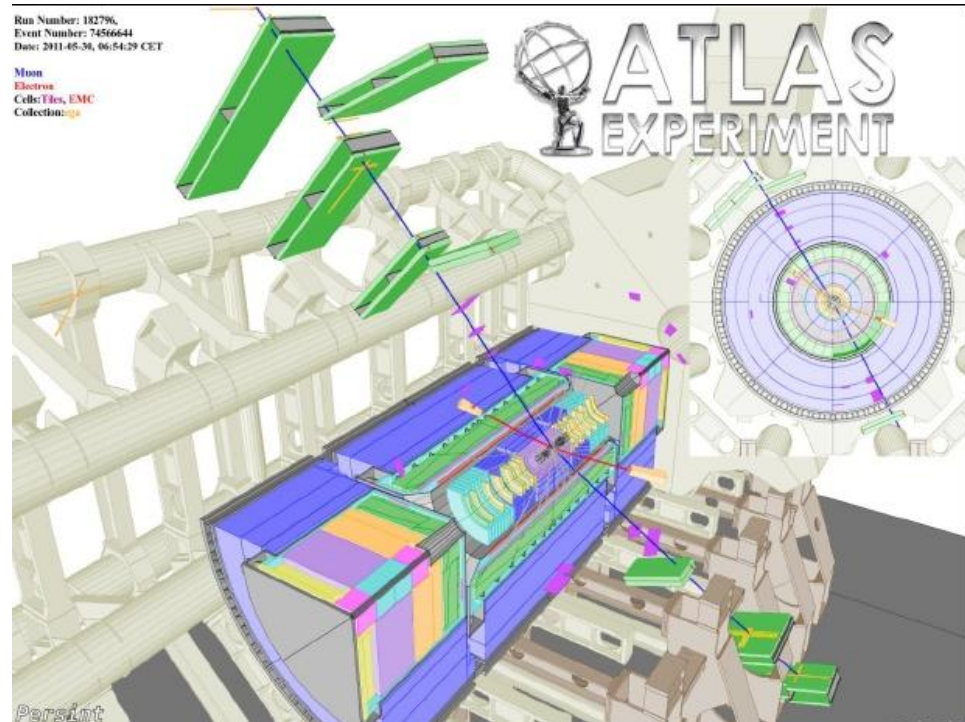
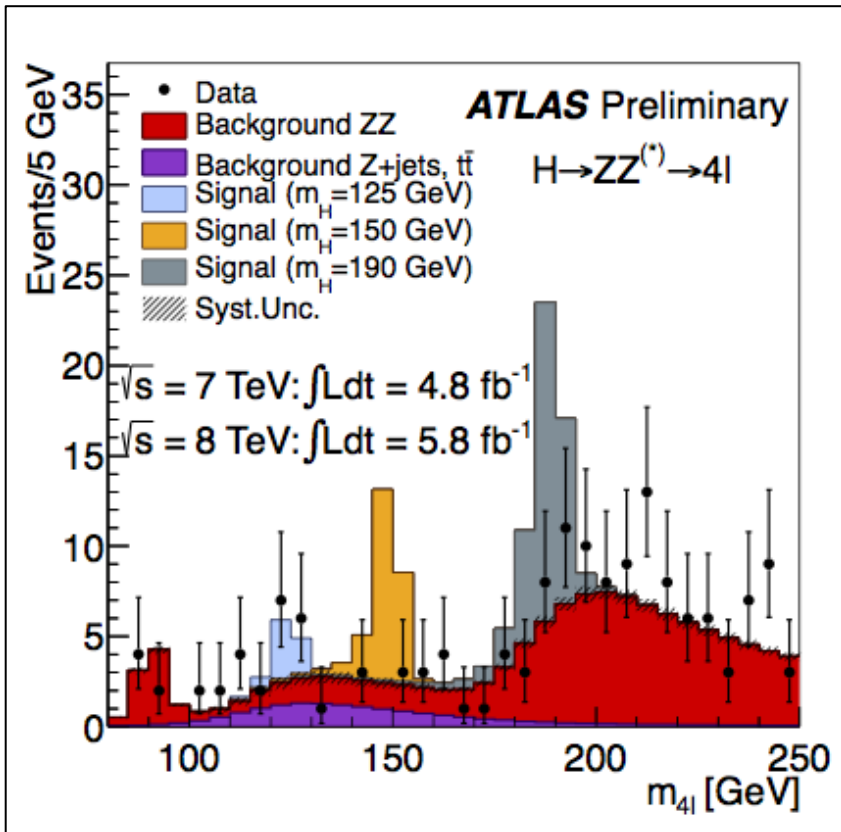


# Idem en $H \rightarrow 4$ leptons chargés

18

## ATLAS

Excès de  $3.4 \sigma$  autour de  $m_H = 125 \text{ GeV}$



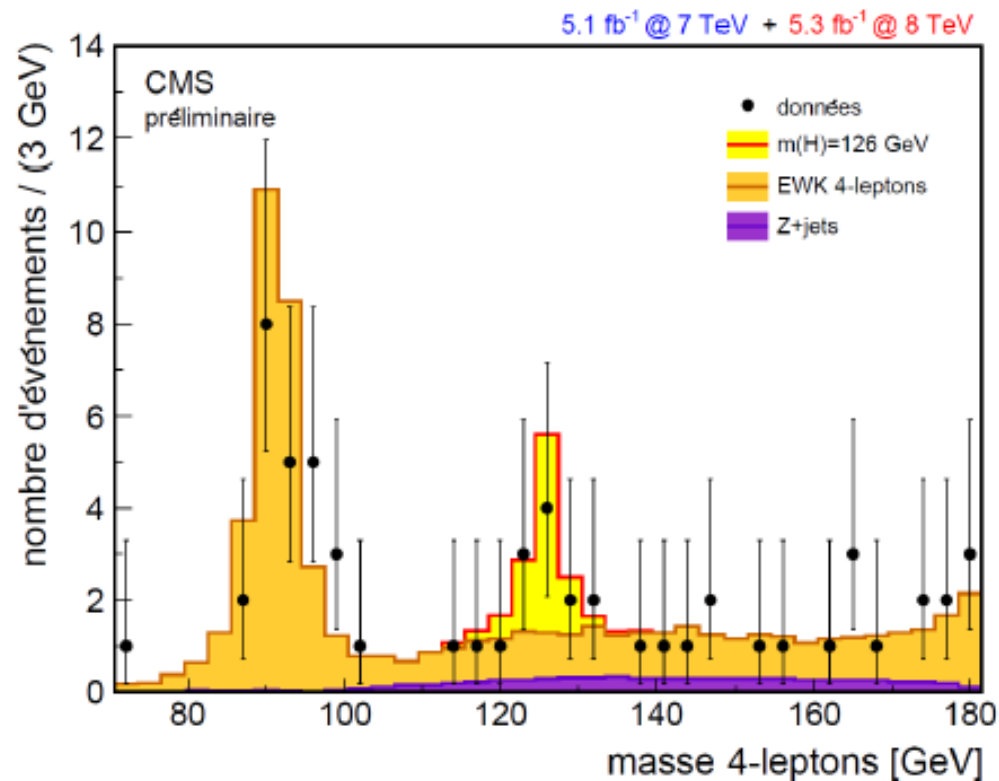


# Idem en $H \rightarrow 4$ leptons chargés

19

## □ CMS

- Excès de  $3.2 \sigma$  autour de  $m_H = 125 \text{ GeV}$

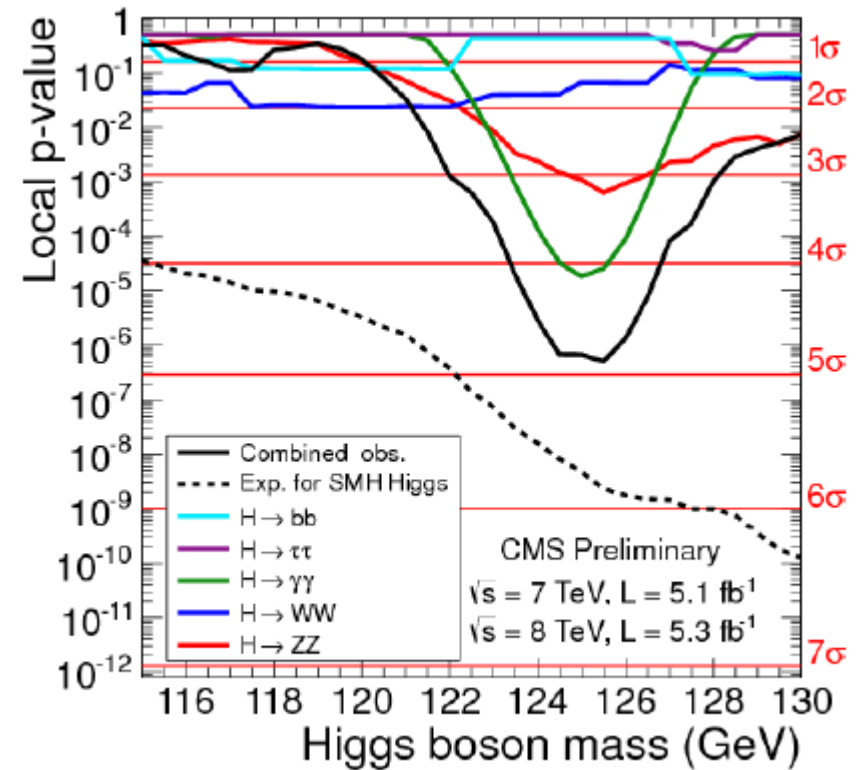
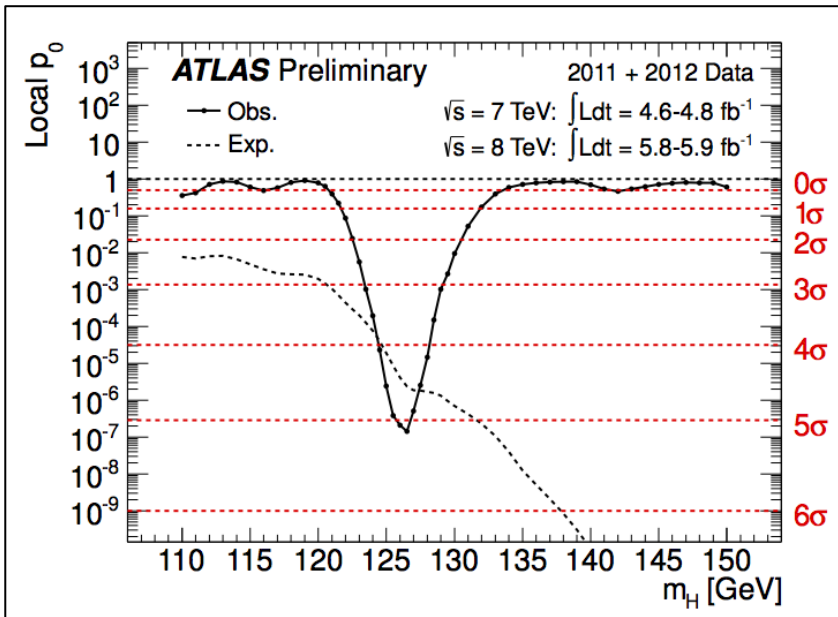




# Bilan

20

- Combinaison statistique des 2 canaux dans chaque expérience séparément



- Significance de 5 sigma  $\rightarrow$  découverte d'une nouvelle particule, qui est un boson, de  $\cong 126 \text{ GeV}$ , qui ressemble au boson de Higgs !

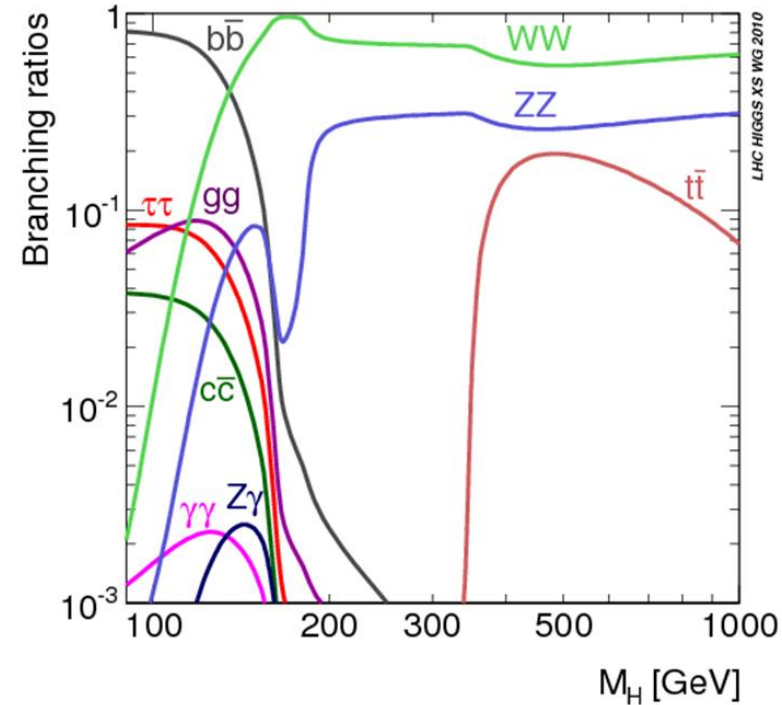


# Et après.....

21

## □ Est-ce le boson de Higgs du Modèle Standard?

- *Mesure de ses rapports d'embranchement*
  - Sont-ils cohérents avec la prédiction?
    - Pour cela, besoin de beaucoup de statistique pour accroître la précision
- *Mesurer son spin*
  - Phase ultérieure



**Encore beaucoup de travail pour caractériser cette nouvelle particule !!**





# Et si ce n'est pas le Higgs du Modèle Standard?





# Alternatives au Higgs du Modèle Standard

- **Les alternatives proposées par les théoriciens englobent le Modèle Standard dans une théorie plus vaste:**
  - *Qui comprend plus de particules*
  - *Ou plus de dimensions spatiales*
  - *Ou...*
  
- **Ces extensions:**
  - *Doivent être en accord avec ce qui a été observé depuis de nombreuses années*
  - *Et en accord avec ce que l'on observera!*
  
- **Une illustration ici : supersymétrie**



# Alternatives au Higgs du Modèle Standard

## □ La supersymétrie

### □ *Symétrie reliant bosons et fermions*

- À chaque particule du Modèle Standard est associée un partenaire supersymétrique de spin qui diffère par  $\frac{1}{2}$

### □ *Non mise en évidence expérimentalement*

- Particules plus lourdes que celles du Modèle Standard
  - Si elle existe, devrait être observée au LHC

### □ *Brisée*

- Sinon, les masses des particules du Modèle Standard seraient égales à celles de leurs partenaires supersymétriques
- Un boson de Higgs Modèle Standard  $\rightarrow$  5 bosons de Higgs supersymétriques

### □ *100 paramètres supplémentaires*

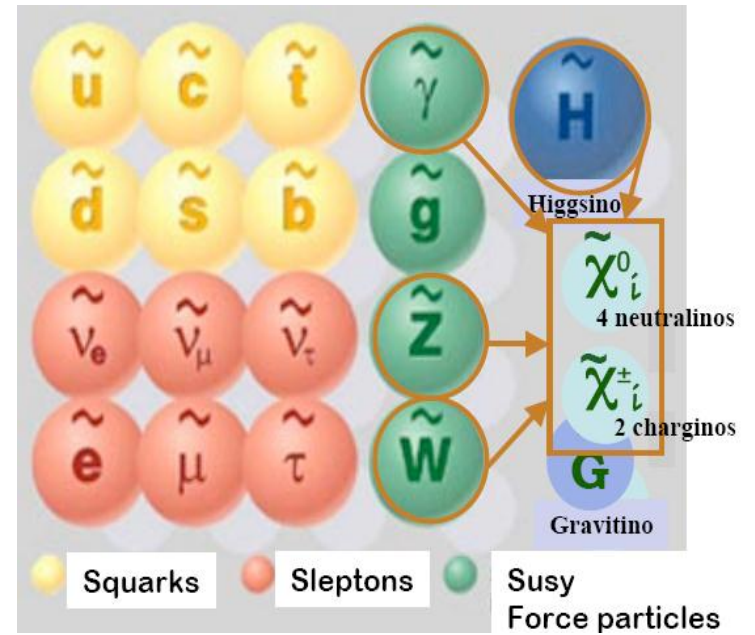
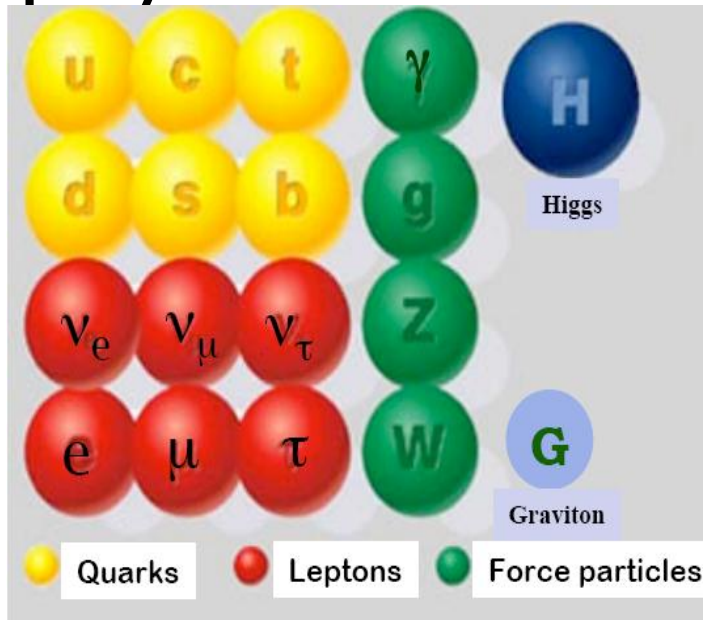
### □ *Fournit des candidats naturels à la matière noire*





# Alternatives

## □ Supersymétrie





# Supersymétrie

## □ Recherche au LHC

- *Recherche de déviation % Modèle Standard*
- *Les particules supersymétriques se désintègrent en paires jusqu'à la plus légère d'entre elles (Lightest Supersymmetric Particle)*
- *Un candidat pour la LSP = neutralino, qui échappe à la détection*
- *Signature = énergie manquante*

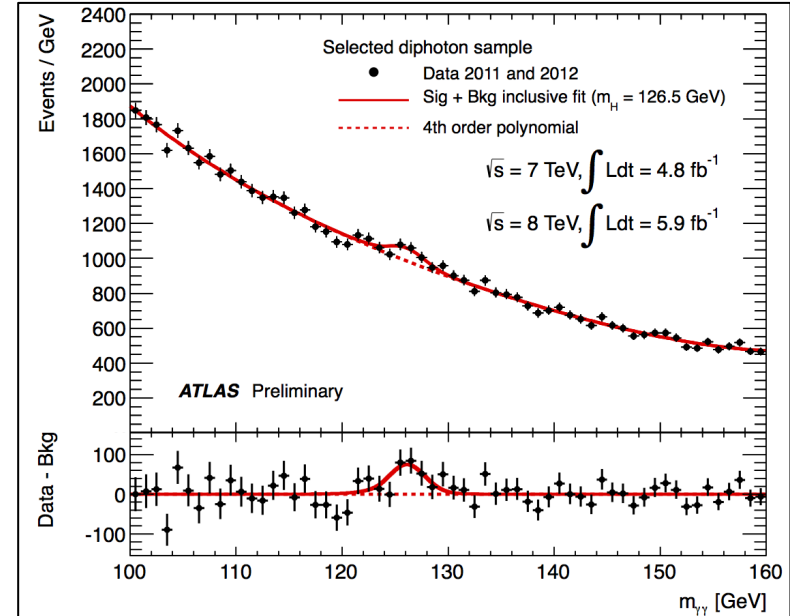
## □ **La supersymétrie, si elle existe à l'échelle du TeV, devrait être vue au LHC**



# Conclusion

- **ATLAS et CMS ont détecté une nouvelle particule:**
  - *Un boson, de 126 GeV environ,*
  - *qui ressemble au boson de Higgs du Modèle Standard*
  
- **Le LHC va nous fournir des données**
  - *À 8 TeV : cartographie de cette particule,*
    - *est-ce « LE » Higgs du Modèle Standard?*
  - *À plus haute énergie: nouvelles particules/théories?*

□ D'une bouteille de H<sub>2</sub> ...



....à une nouvelle particule ressemblant à un boson de

Des années de travail, des expertises très diverses



# Et une vraie joie le 4 juillet 2012!

29

