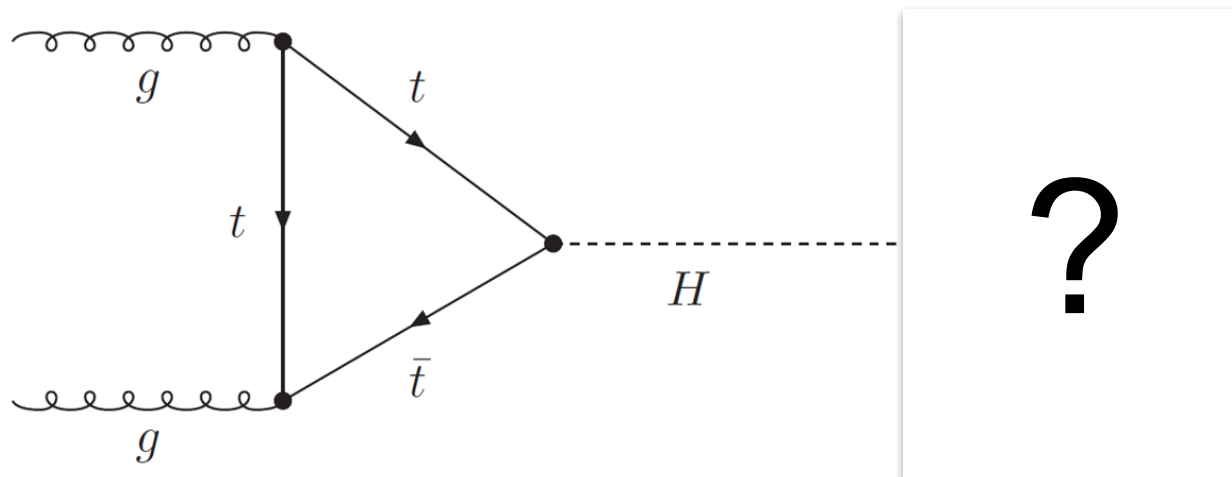


Masterclasses

Boson de Higgs au LHC



Qu'est-ce que le boson de Higgs ?



- La physique des particules est décrite par une théorie appelée « **Modèle Standard** ».
- Elle est basée sur des principes de **mécanique quantique** et de **relativité restreinte**.

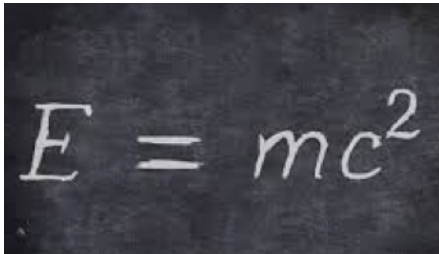
- Lors de son élaboration, **une difficulté majeure est apparue** : les particules ne peuvent avoir de masse sans que la théorie se casse la figure...

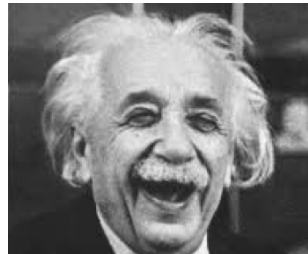


- **Solution théorique de Brout, Englert et Higgs** : le mécanisme de Higgs qui conduit à la prédiction d'un boson (scalaire) **le boson de Higgs**. 🤔
- Le Modèle Standard a été **confirmé expérimentalement avec une extrême précision**, mais le boson de Higgs est resté inobservé pendant un demi-siècle. Pourquoi ???

Pourquoi est-il difficile d'observer le boson de Higgs ?

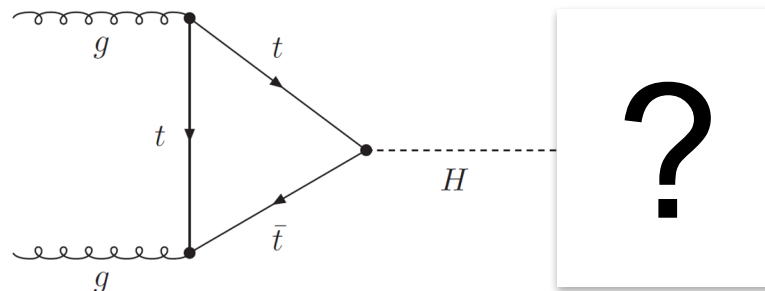
- Production aux collisionneurs de particule :


$$E = mc^2$$



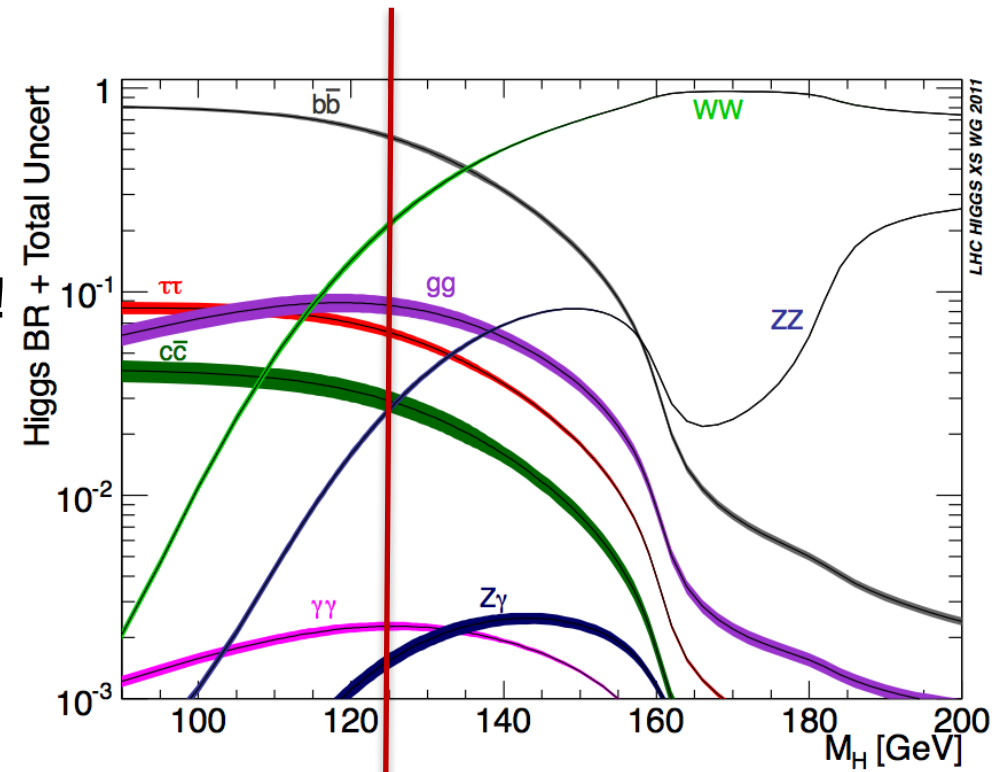
Grande masse
==
Grande énergie

- Il faut suffisamment d'énergie ! **La masse du Higgs n'est pas prédite,**
- Autre difficulté : comment observer le Higgs (une fois produit), **particule instable qui se désintègre ?**

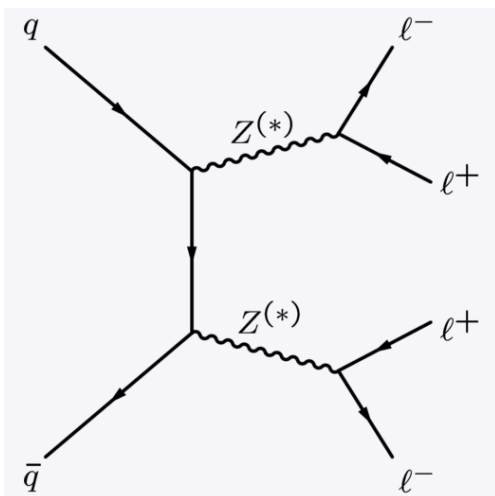
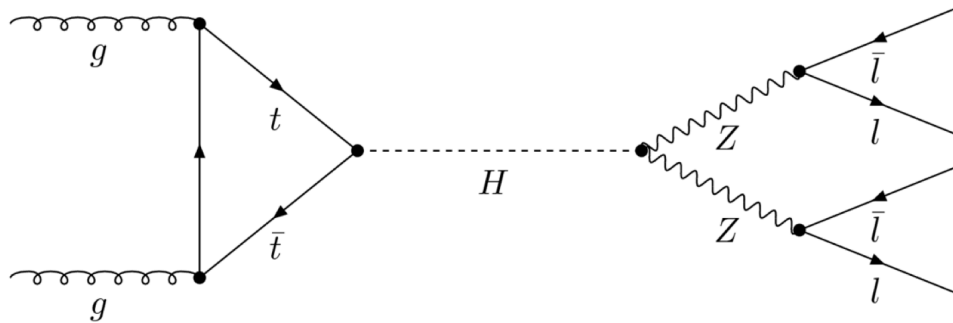


Modes de désintégration

- Le boson de Higgs peut se désintégrer de beaucoup de façon différente (**mode de désintégration**) = beaucoup de signature expérimentale différente !
- Mécanique quantique : probabilité de se désintégrer d'une certaine façon. **Difficulté** : on ne sait pas, a priori, ce que l'on va observer... => **accumulation d'événement**.
- **Difficulté** : les modes de désintégrations principaux **dépendent de la masse du Higgs** (a priori inconnue)



Modes de désintégration

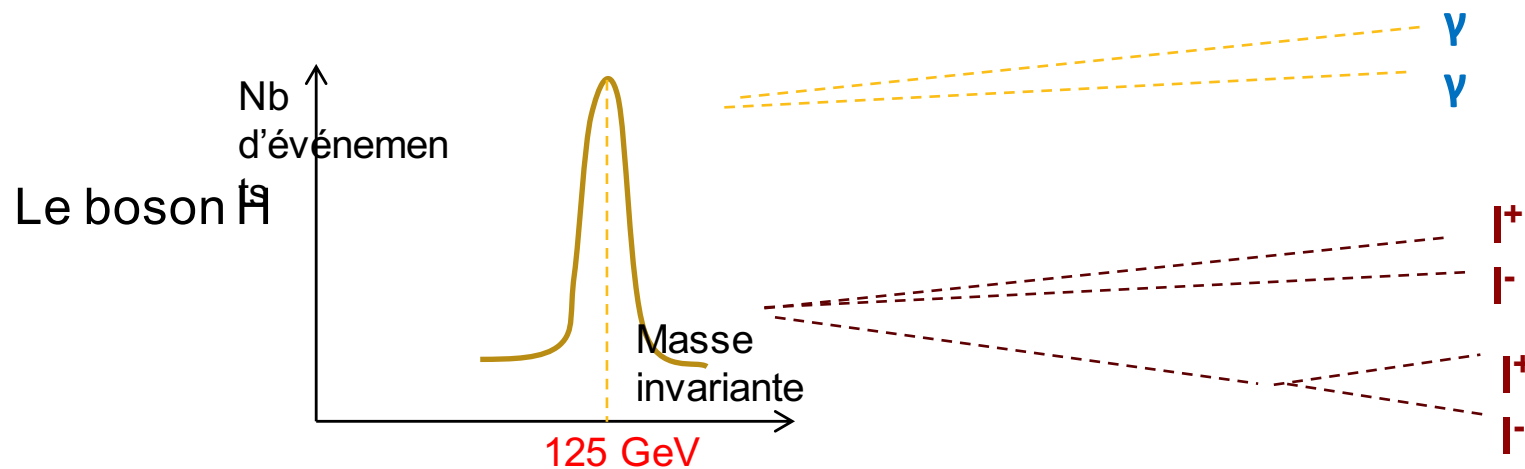


- Exemple de désintégration du Higgs :
– $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$
- Signature claire dans le détecteur 😊
- Mais ! D'autres processus ont la même signature... 😞
- Comment faire la différence entre les deux ?

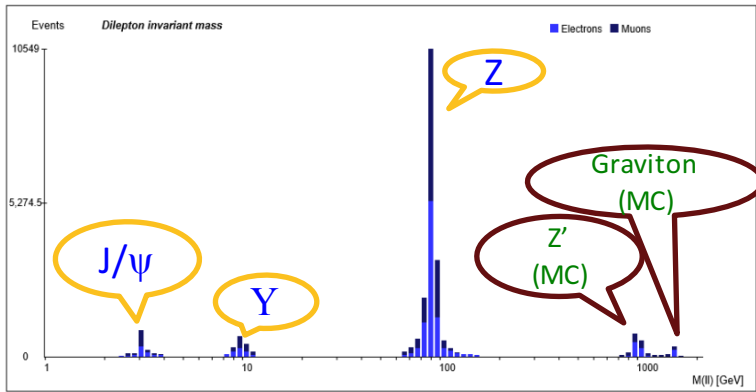
Comment rechercher les bosons Higgs ?

→ On reconstruit la masse invariante

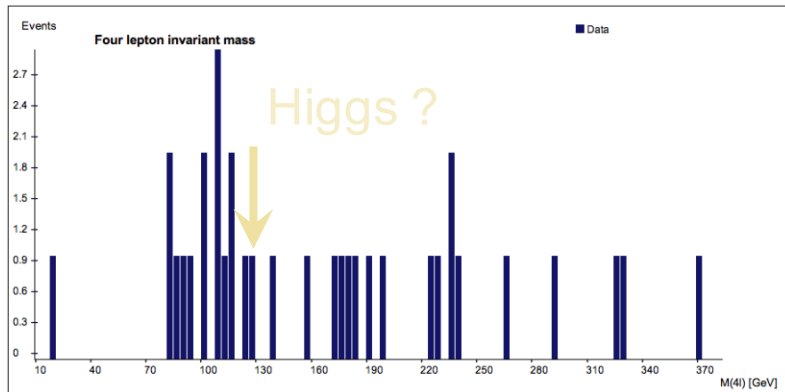
$$m_0^2 = \left(\frac{E_1 + E_2}{c^2} \right)^2 - \left(\frac{\vec{p}_1 + \vec{p}_2}{c} \right)^2$$



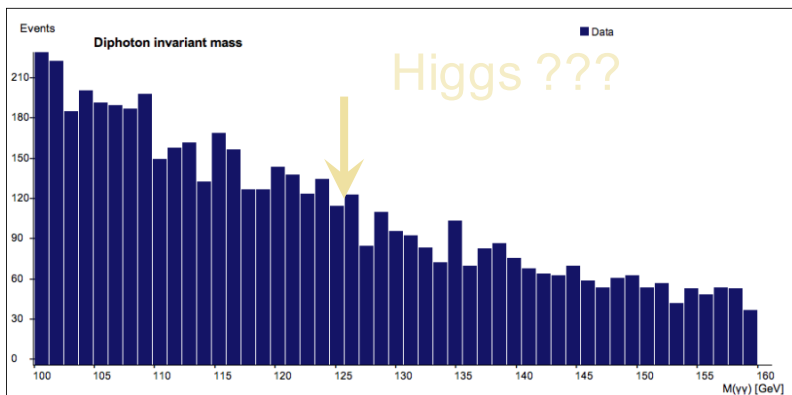
Mais alors, il est ou le boson de Higgs ????



e^+e^- ou $\mu^+\mu^-$

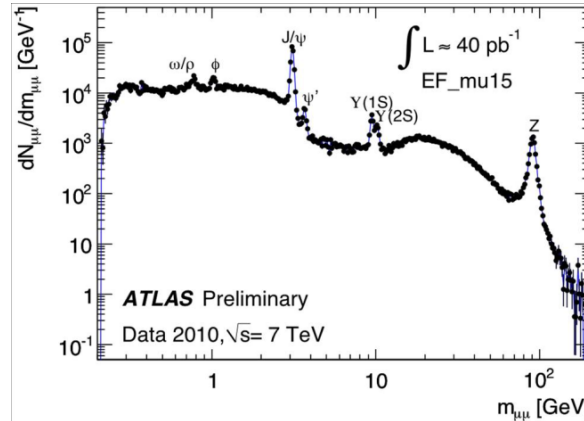
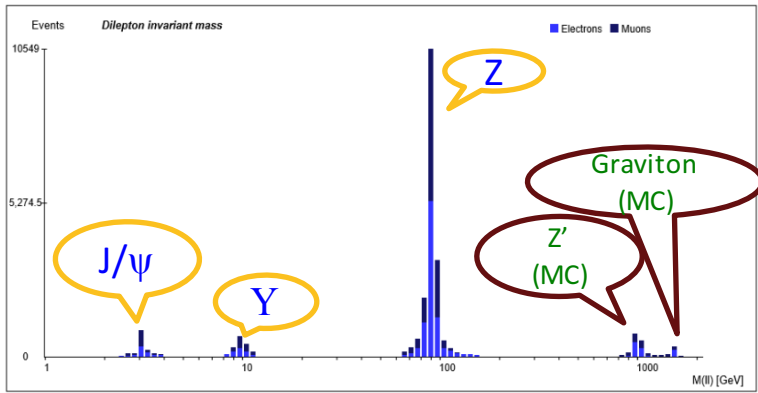


$e^+e^- e^+e^-$
ou
 $e^+e^- \mu^+\mu^-$
ou
 $\mu^+\mu^- \mu^+\mu^-$

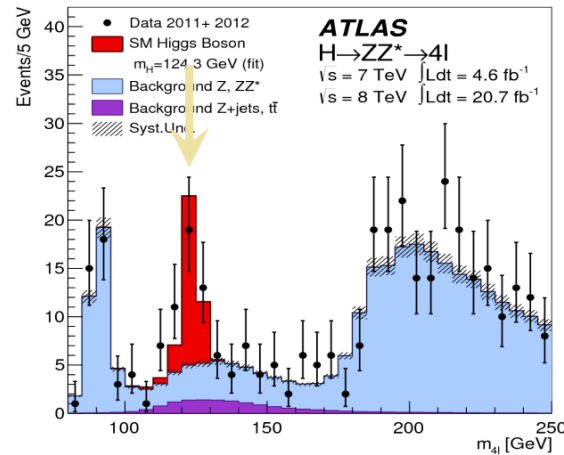
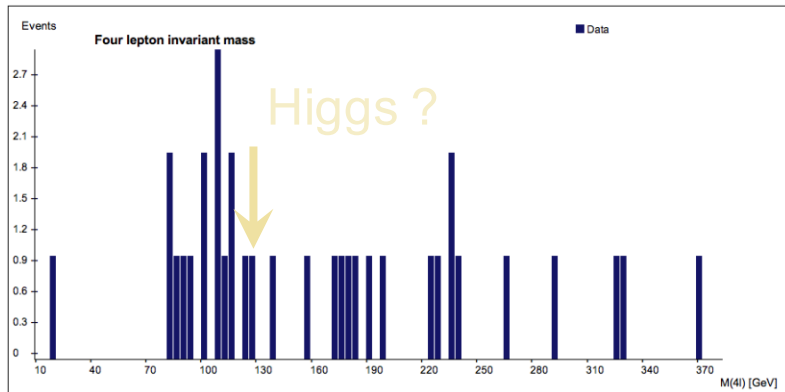


$\gamma\gamma$

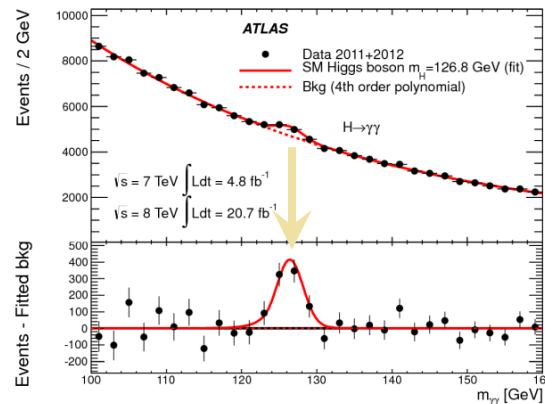
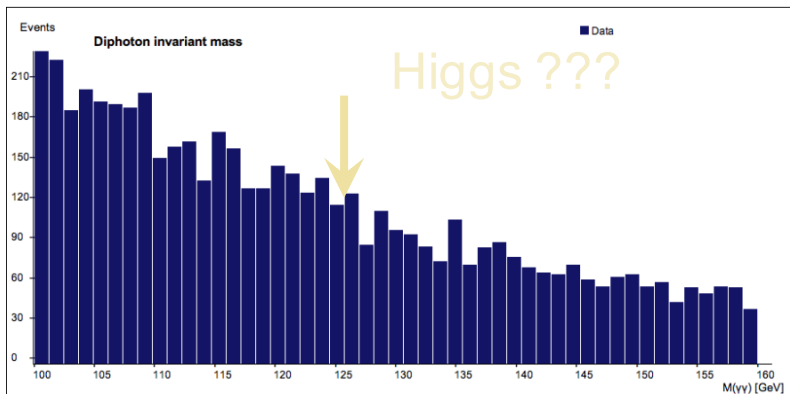
Il est là, mais il faut plus d'événement !



e^+e^- ou $\mu^+\mu^-$



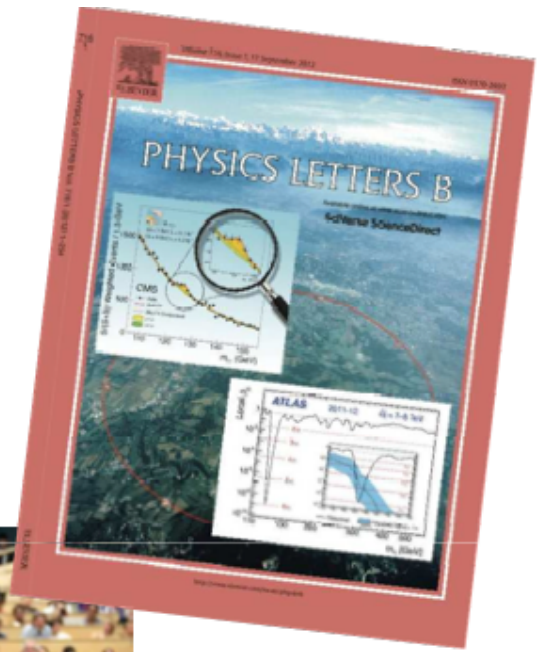
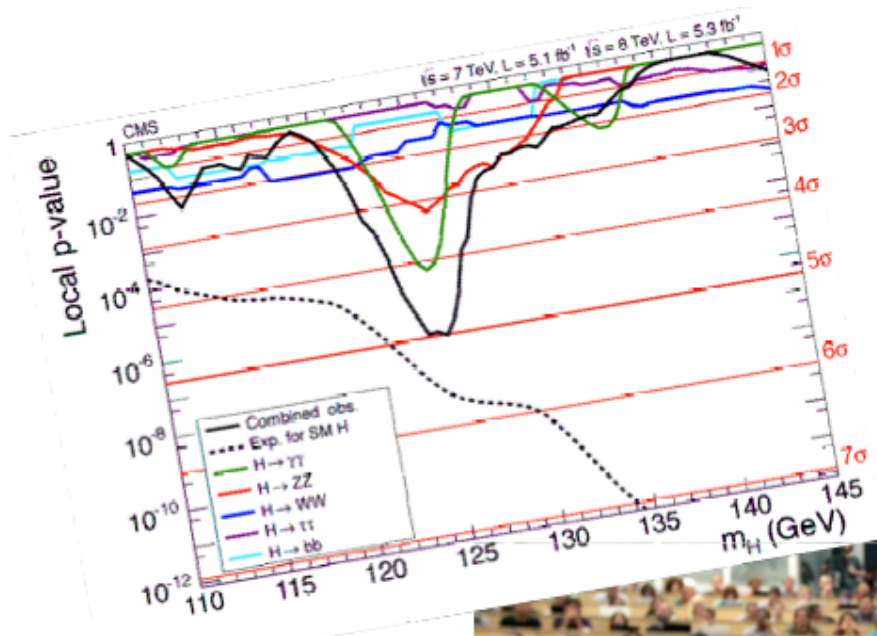
$e^+e^- e^+e^-$
ou
 $e^+e^- \mu^+\mu^-$
ou
 $\mu^+\mu^- \mu^+\mu^-$



$\gamma\gamma$

On ne sait pas a priori ce que l'on va observer...

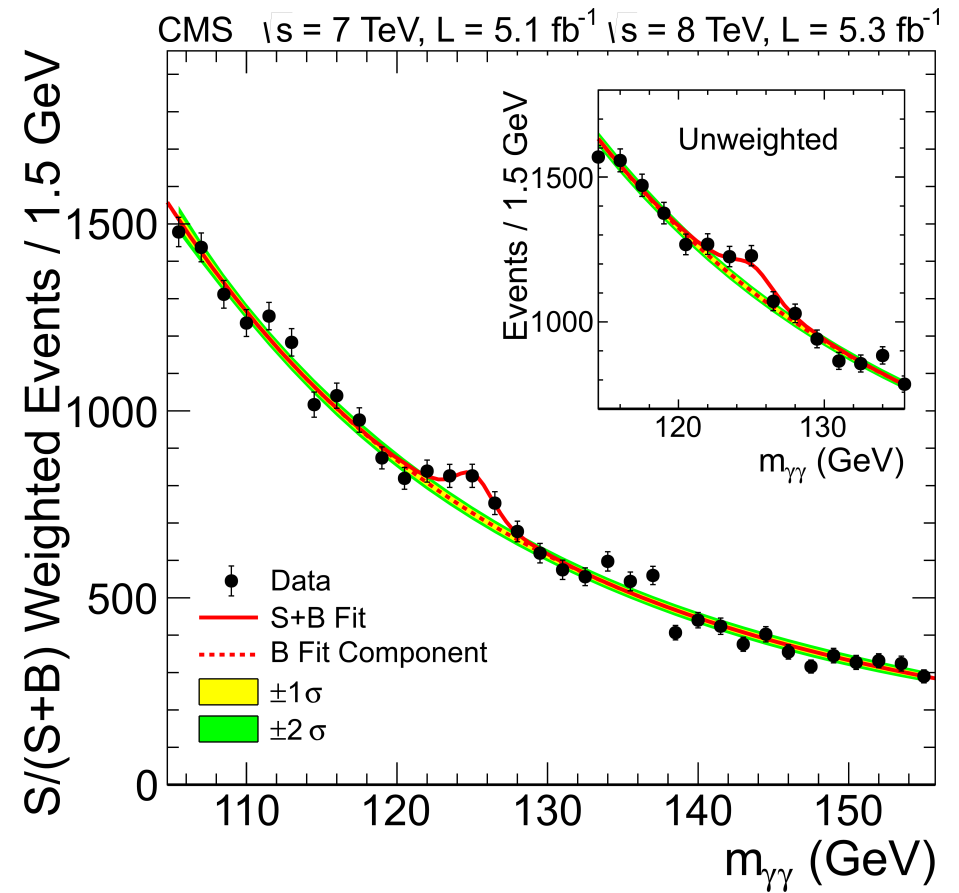
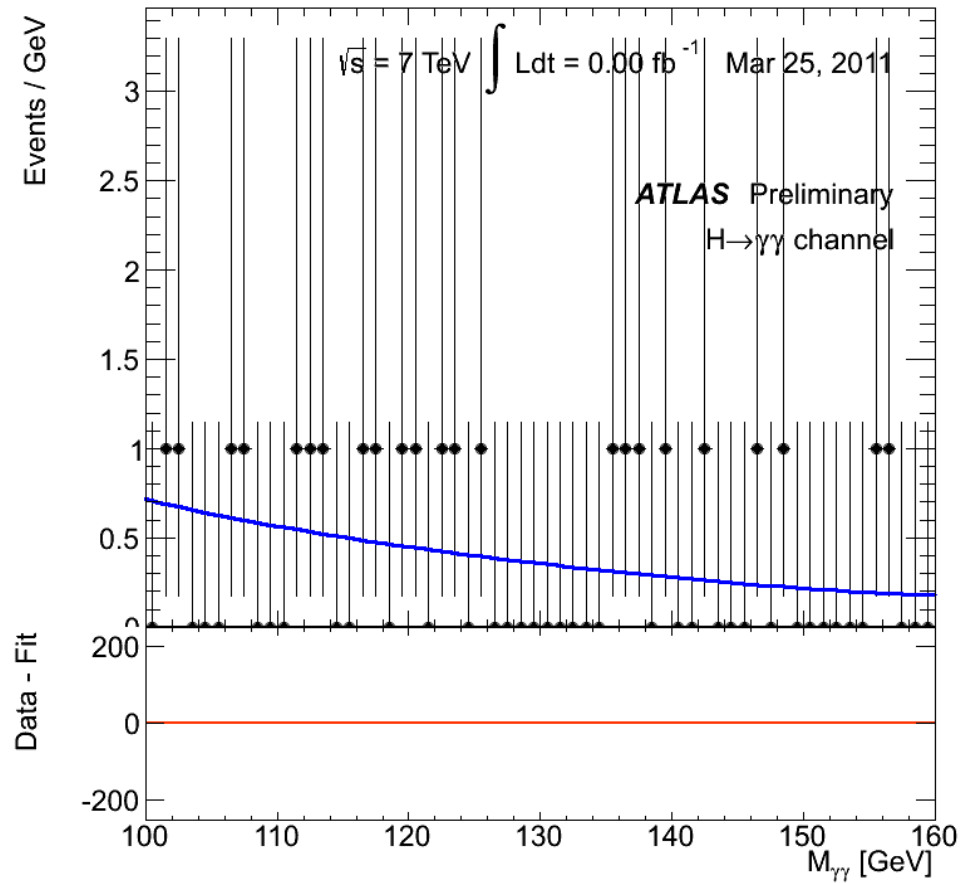
=> accumulation d'événement.



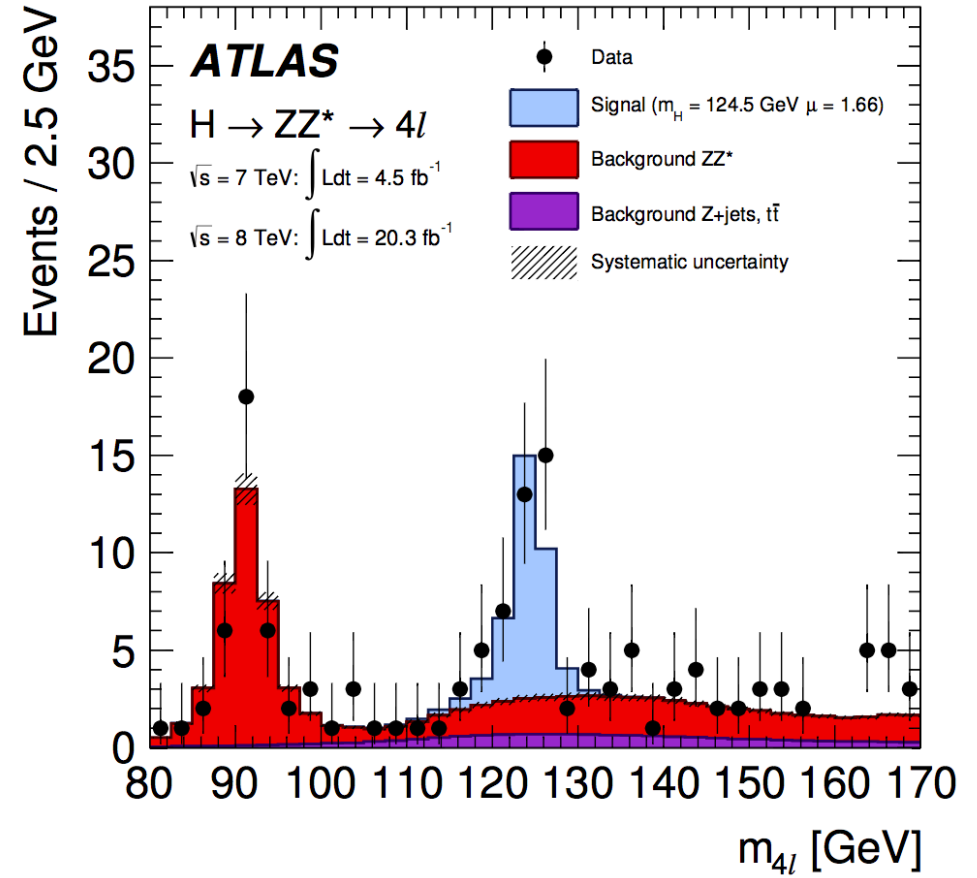
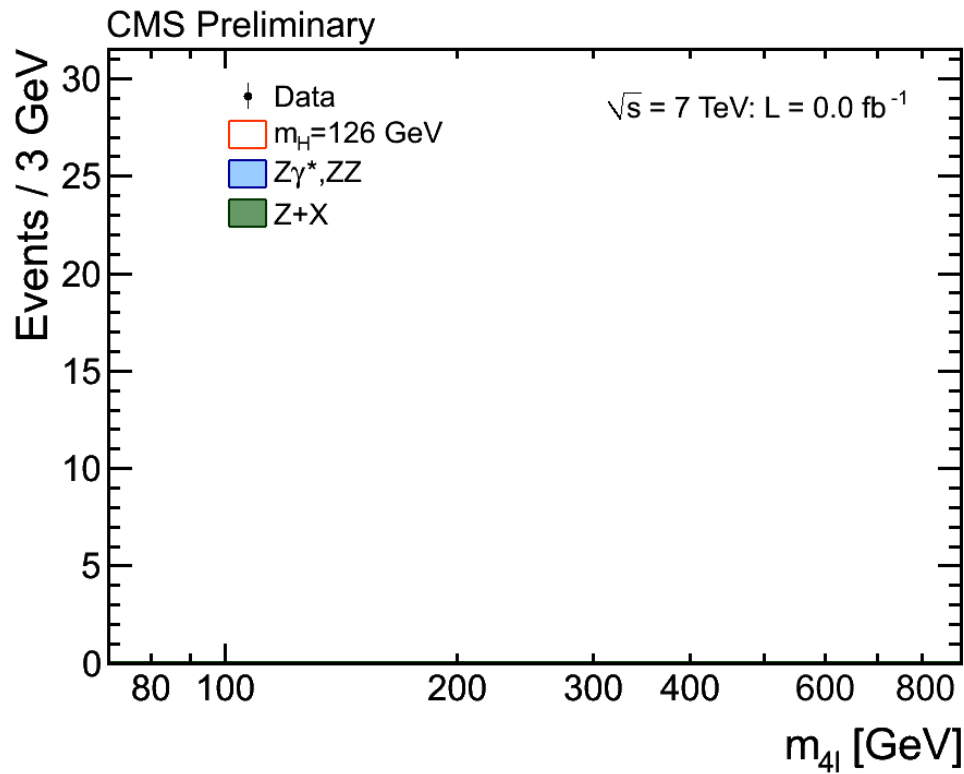
**4 juillet 2012 :
date
historique!**



H → 2 photons

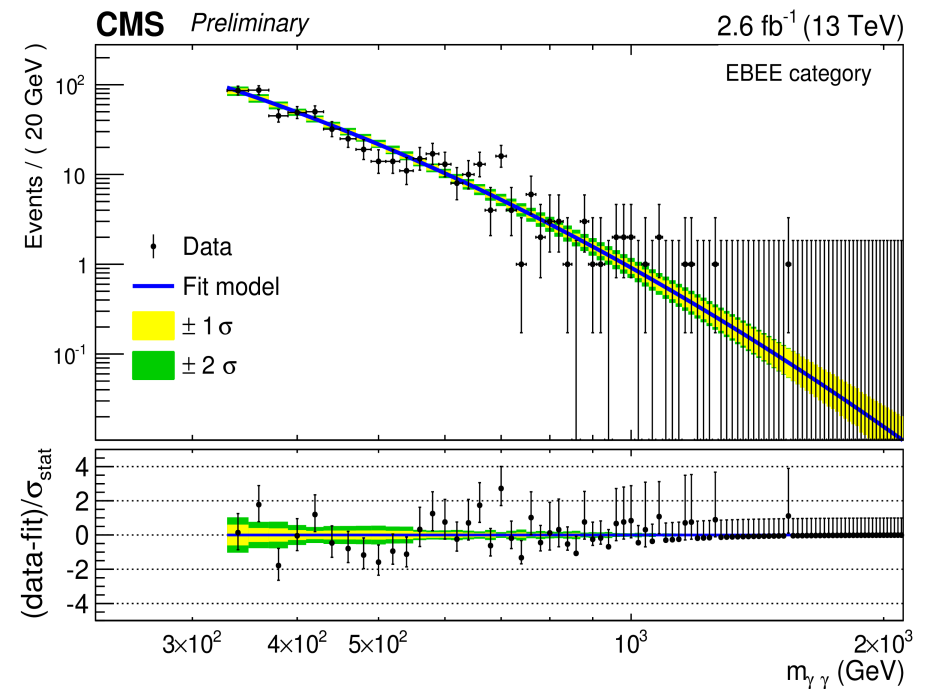


H → 2Z



Découverte du boson de Higgs : et alors ?

- Le Modèle Standard est maintenant complet !! ... vraiment ?
- Il reste à vérifier son profil : mesurer ses propriétés, observer les modes de désintégration plus rare etc... etc...
- Et s'il y en avait d'autre ? :D...



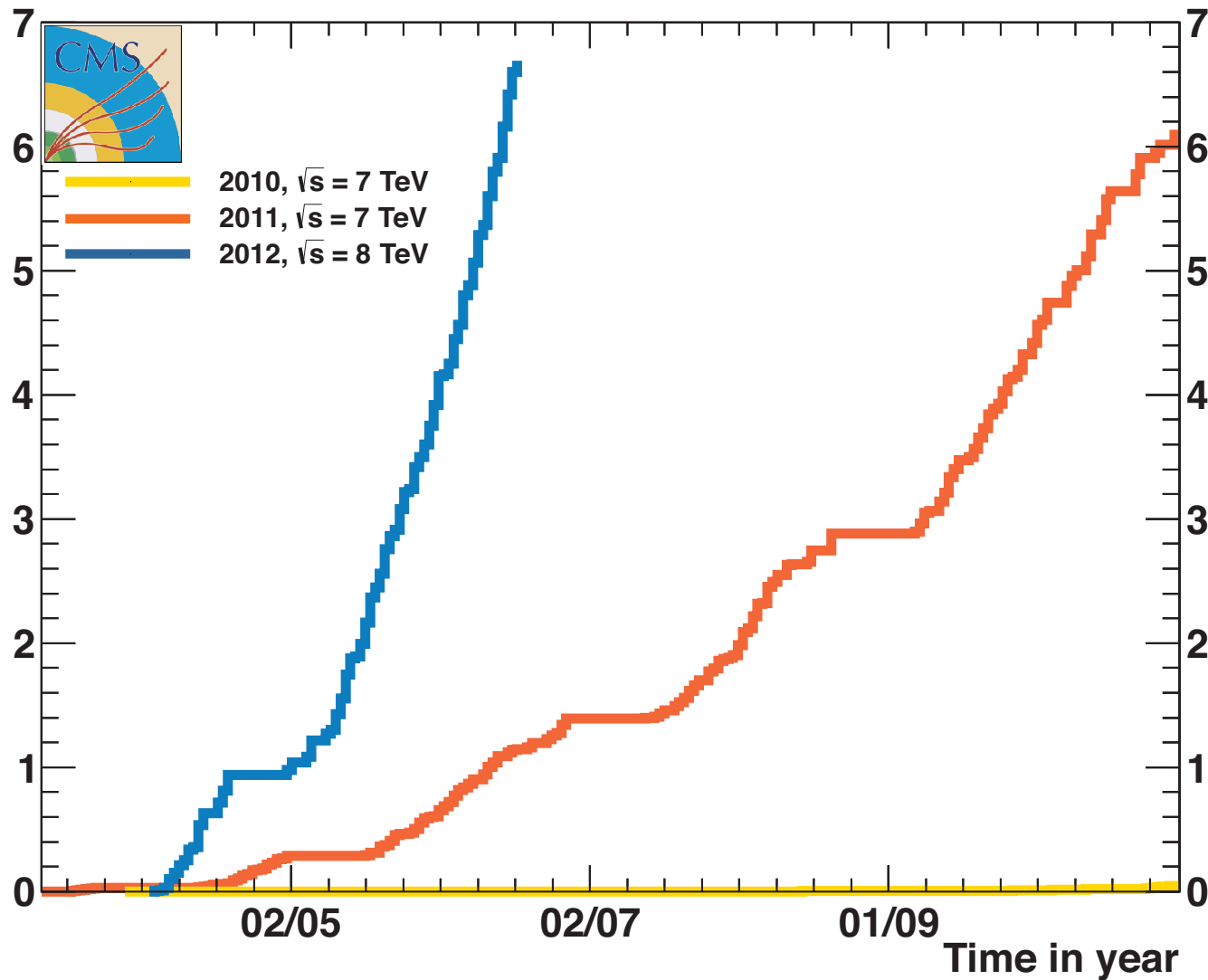
Le Boson de Higgs

Particule spéciale dans le Modèle Standard

- **Boson** : spin entier 0
(les médiateurs des interactions ont spin 1)
(les particules de matière ont des spins 1/2)
- **Higgs** : le nom d'un des 3 inventeurs
- **Son rôle** : lié à l'origine des masses des autres particules
- **Sa découverte** : le 4 juillet 2012 😊

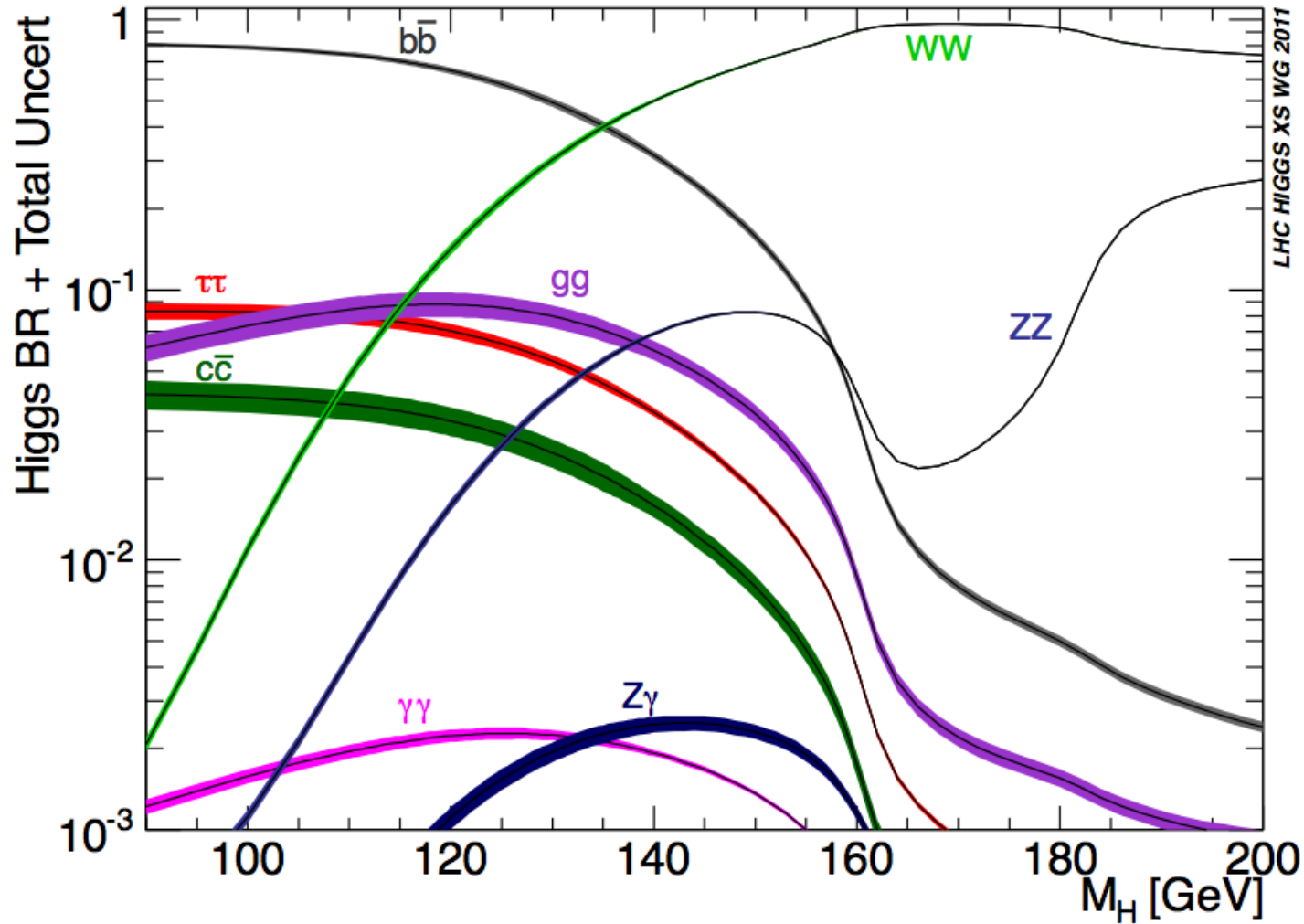
Combien de Higgs?

Nombre de collisions proton-proton
(en centaine de millier de milliards)



Nombre de Higgs potentiellement
produits (en dizaine de milliers)

Dans quel canal de désintégration?



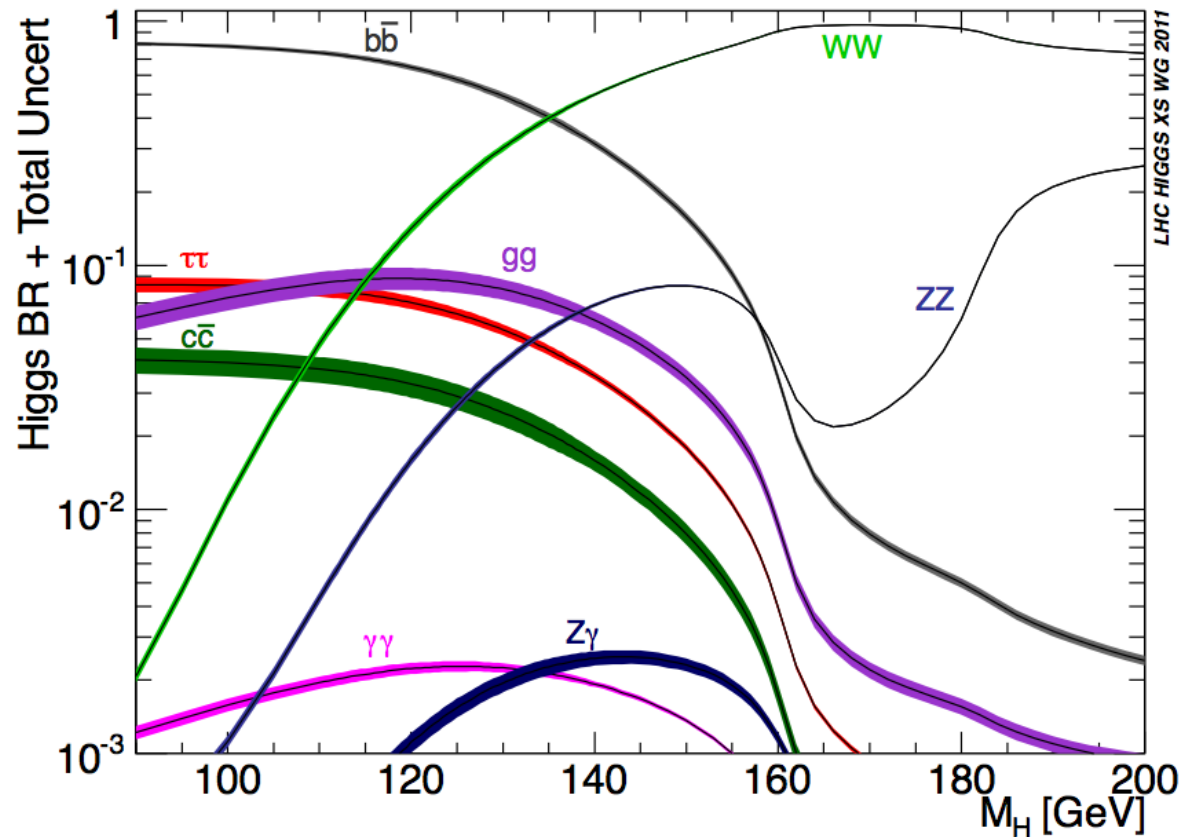
Masterclasses

Comment ça se passe au
LHC ?

La recherche du boson de Higgs

Différents modes de désintégration :

- $H \rightarrow 2$ photons
- $H \rightarrow 2 Z \rightarrow 4 l$
- $H \rightarrow 2 W \rightarrow 2 l + 2 \nu$
- ...



→ Un maximum de canaux de désintégration étudiés

La recherche du boson de Higgs

Des analyses très complexes :

- sélection d'événements,
- détermination des bruits de fond,
- technique d'analyses multi variées,
- méthodes statistiques,
- Beaucoup de vérifications

Beaucoup de monde impliqué : quelques centaines de personnes par collaboration

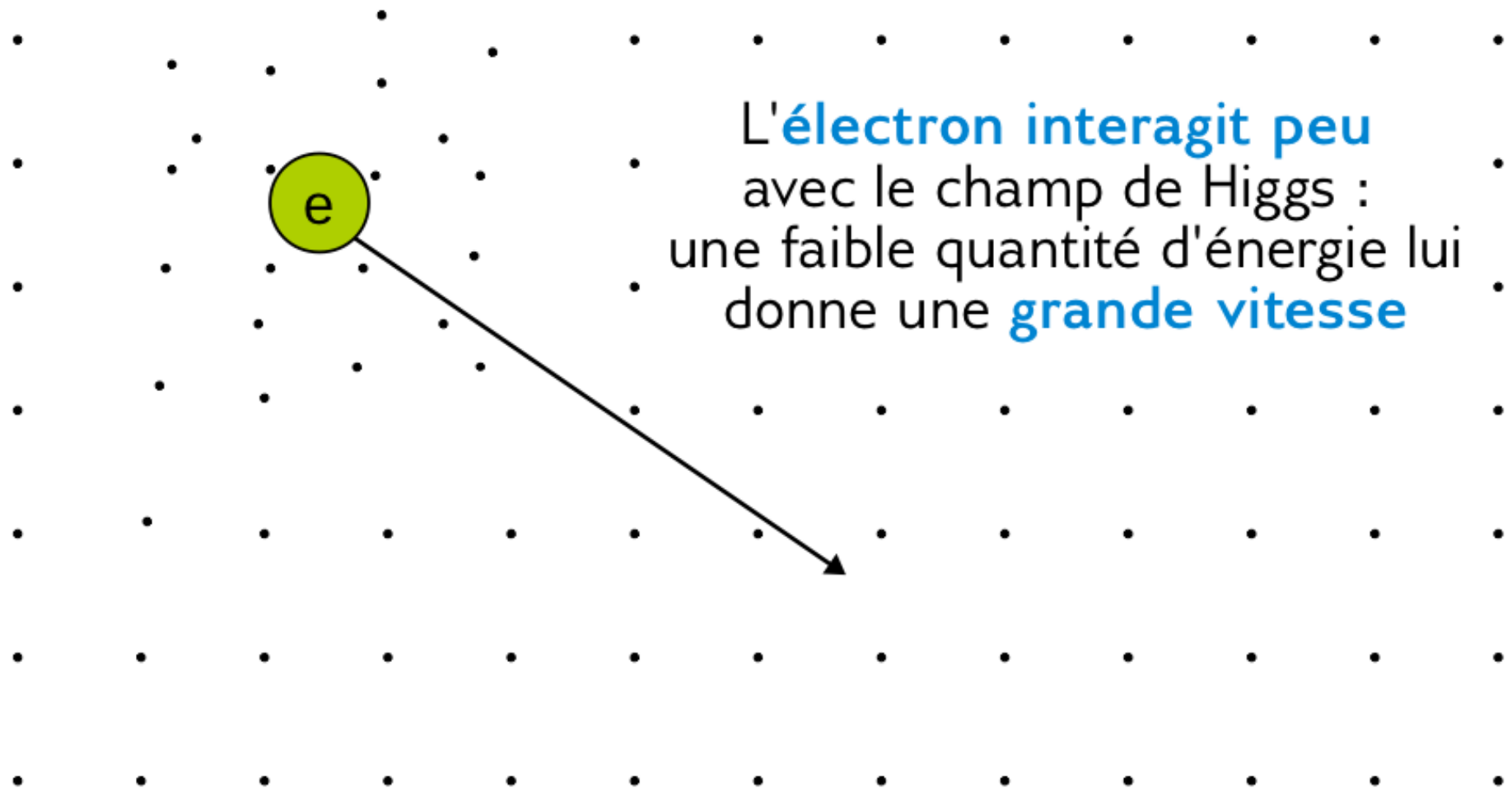
Le mécanisme de Higgs

Ou comment la masse des particules
est la manifestation de leur interaction avec
le **champ de Higgs**



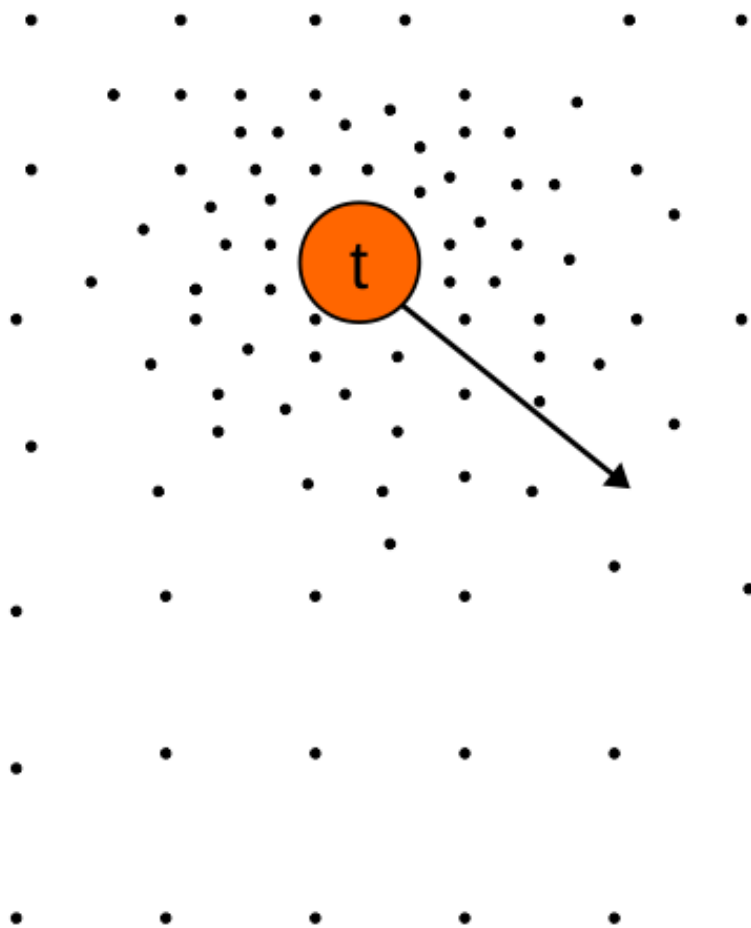
Le mécanisme de Higgs

Ou comment la masse des particules est la manifestation de leur interaction avec le **champ de Higgs**



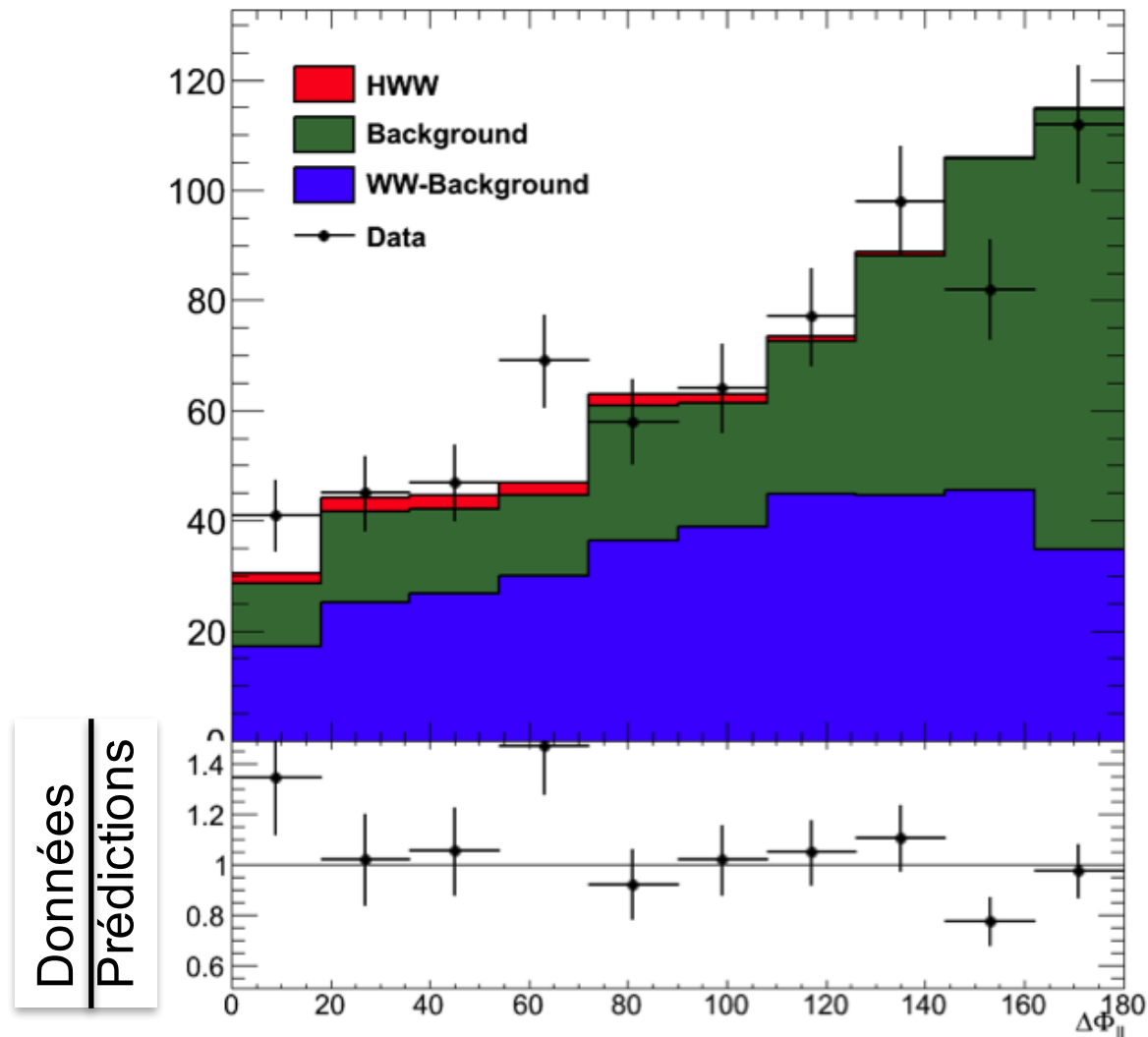
Le mécanisme de Higgs

Ou comment la masse des particules est la manifestation de leur interaction avec le **champ de Higgs**



Le **quark top interagit beaucoup** avec le champ de Higgs : il lui fait plus d'énergie pour se déplacer, il paraît **plus lourd** !

Si vous aviez tourné sur tous les événements des Masterclasses



ATLAS
Masterclasses
 $\sqrt{s} = 7 \text{ TeV}$
 $L = 1.154 \text{ fb}^{-1}$

Nombres d'événements attendus

ATLAS Masterclasses, $\sqrt{s} = 7$ TeV, $L = 1.154$ fb⁻¹

Drell Yan	$t\bar{t}$	WW	W + jets	single-top	total Background	Signal	S/\sqrt{B}	Data
22.63	30.43	242.51	39.37	20.74	355.67	9.86	0.52	381

Table 1: Number of events left after all cuts in the **H0** bin.

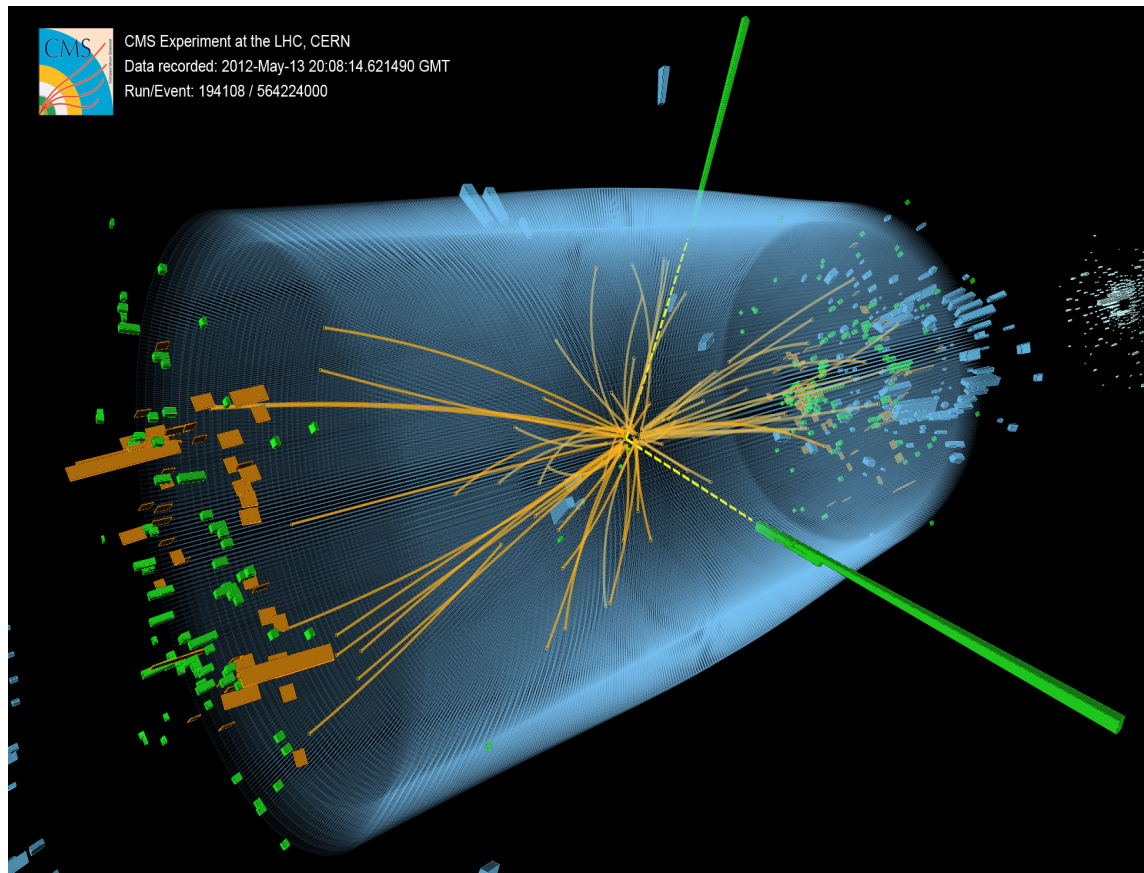
Drell Yan	$t\bar{t}$	WW	W + jets	single-top	total Background	Signal	S/\sqrt{B}	Data
94.36	64.16	101.37	12.65	31.93	304.47	4.85	0.28	312

Table 2: Number of events left after all cuts in the **H1** bin.

Hence we expect to have 14.7 Higgs events in total among 660 Background events. In Data we found 693 events in total which is in good agreement with the Monte Carlo simulation.

le canal $H \rightarrow \gamma\gamma$

Canal qui en juillet 2012 a donné la signification la plus grande!
(Il n'a pas été updaté pour HCP)



le canal $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4 \text{ leptons}$

Canal qui est sensé être le plus sensible à 125 GeV



CMS Experiment at LHC, CERN
Data recorded: Tue Oct 4 00:10:13 2011 CEST
Run/Event: 177782 / 72158025
Lumi section: 99

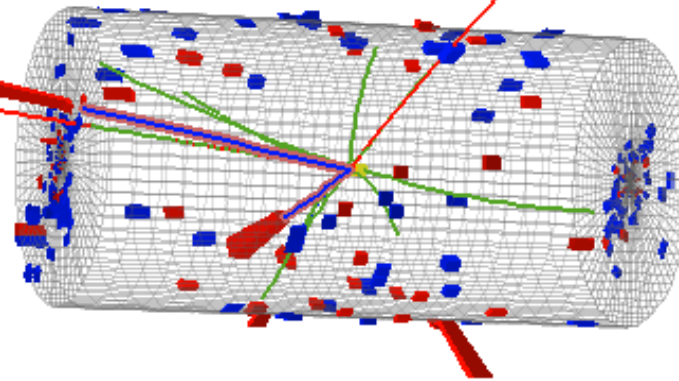
$\mu^-(Z_2) p_T : 15 \text{ GeV}$

7 TeV DATA

4-lepton Mass : 125.8 GeV

$e^+(Z_1) p_T : 28 \text{ GeV}$

$\mu^+(Z_2) p_T : 12 \text{ GeV}$

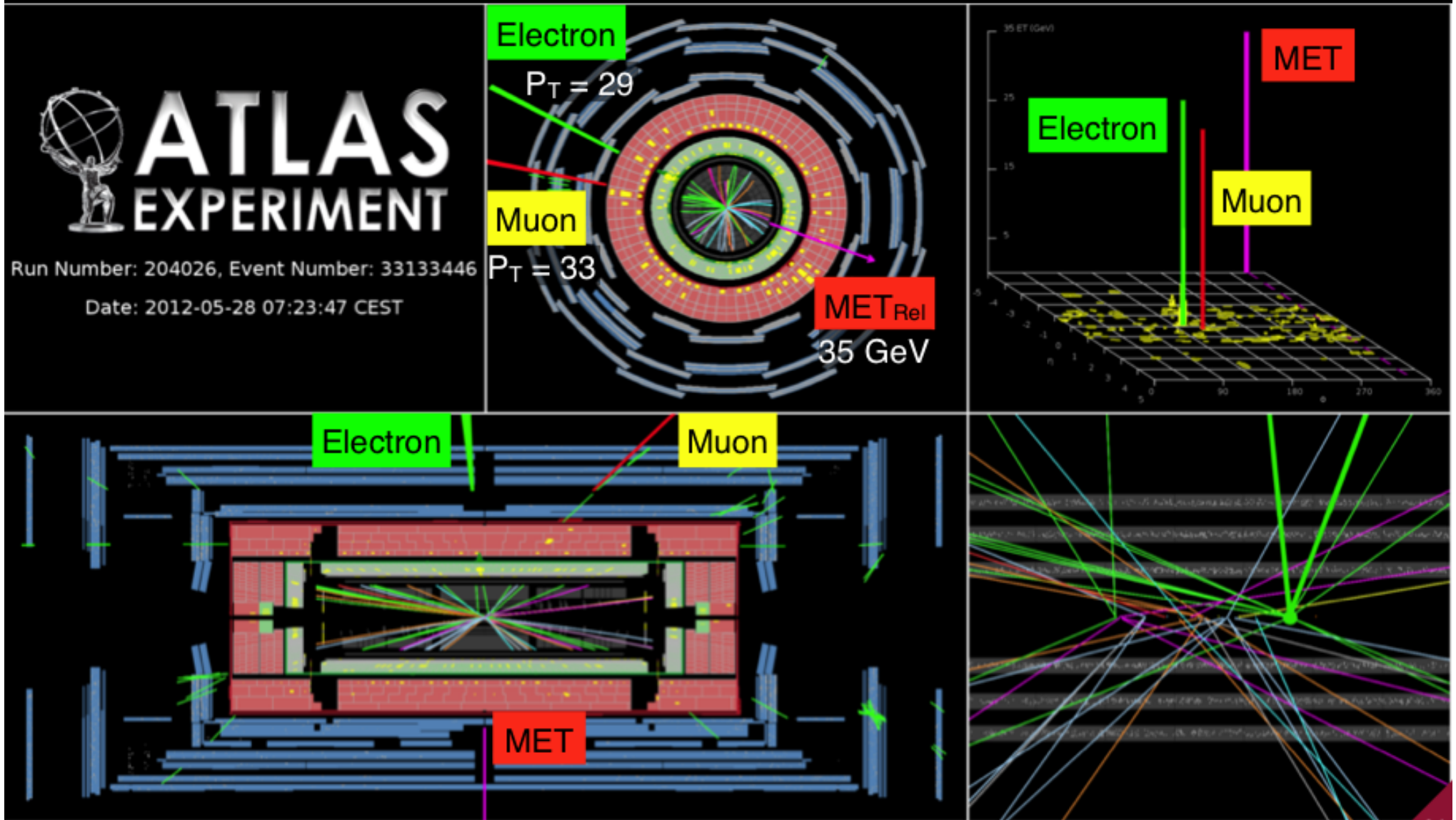


$e^-(Z_1) p_T : 14 \text{ GeV}$

le canal $H \rightarrow WW \rightarrow 2$ leptons

$M_T = 94$ GeV
 $\Delta\phi_{\ell\ell} \approx 0.29$

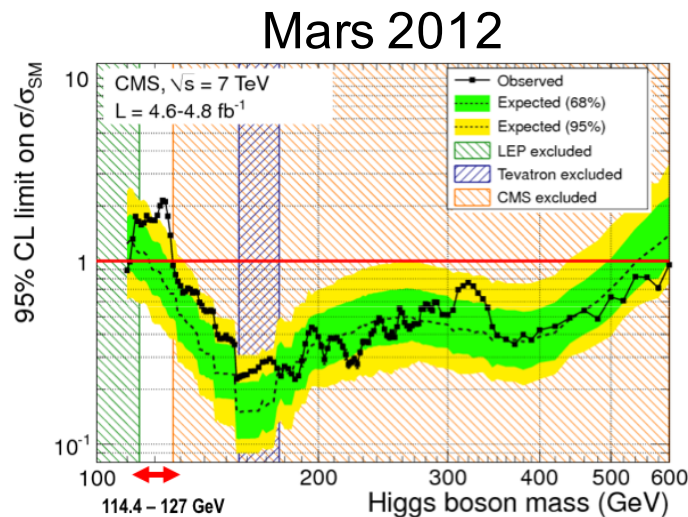
$e\mu + 0$ jet in 2012 passing all cuts



Test statistique pour l'exclusion

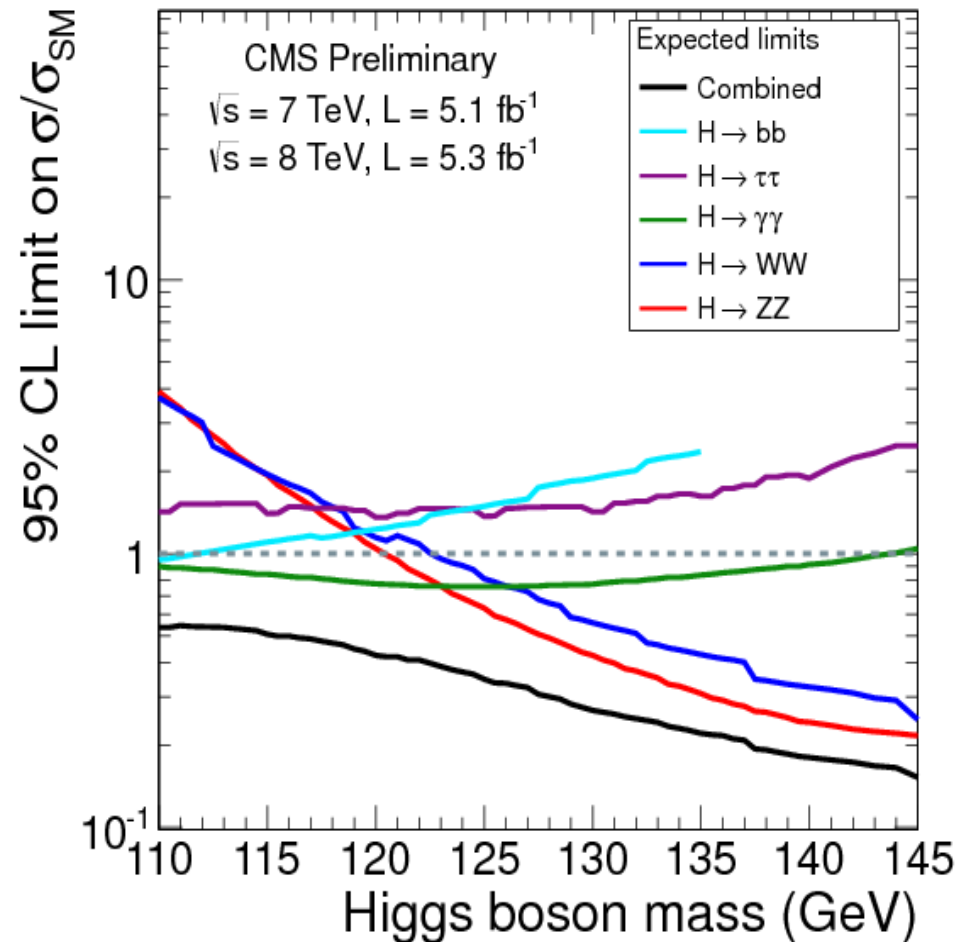
On teste la compatibilité avec l'hypothèse signal+bruit de fond. Si la limite sur le rapport σ/σ_{SM} est <1 pour une masse considérée, cette masse est exclue pour un Higgs du Modèle Standard.

Début juillet, il restait uniquement une zone non exclue : $\sim[115-130]$ GeV



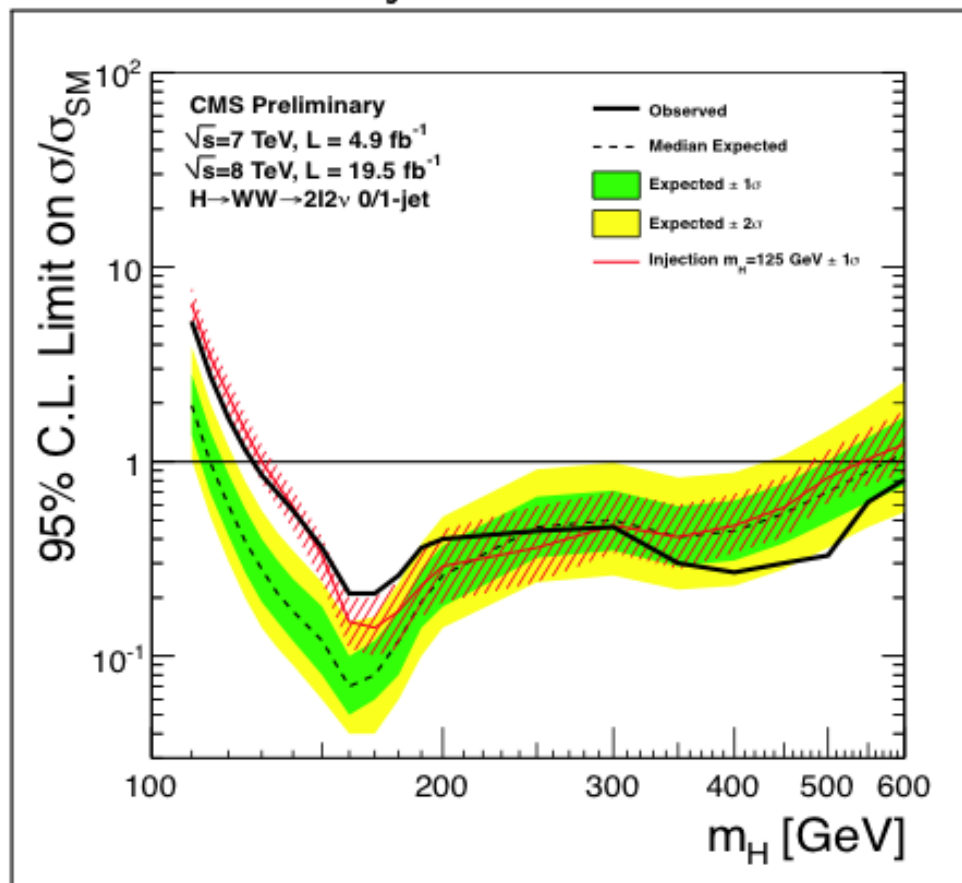
Autour de 125 GeV, ZZ, $\gamma\gamma$ et WW ont les plus grandes sensibilités, suivi par $\tau\tau$ et bb.

Juillet 2012

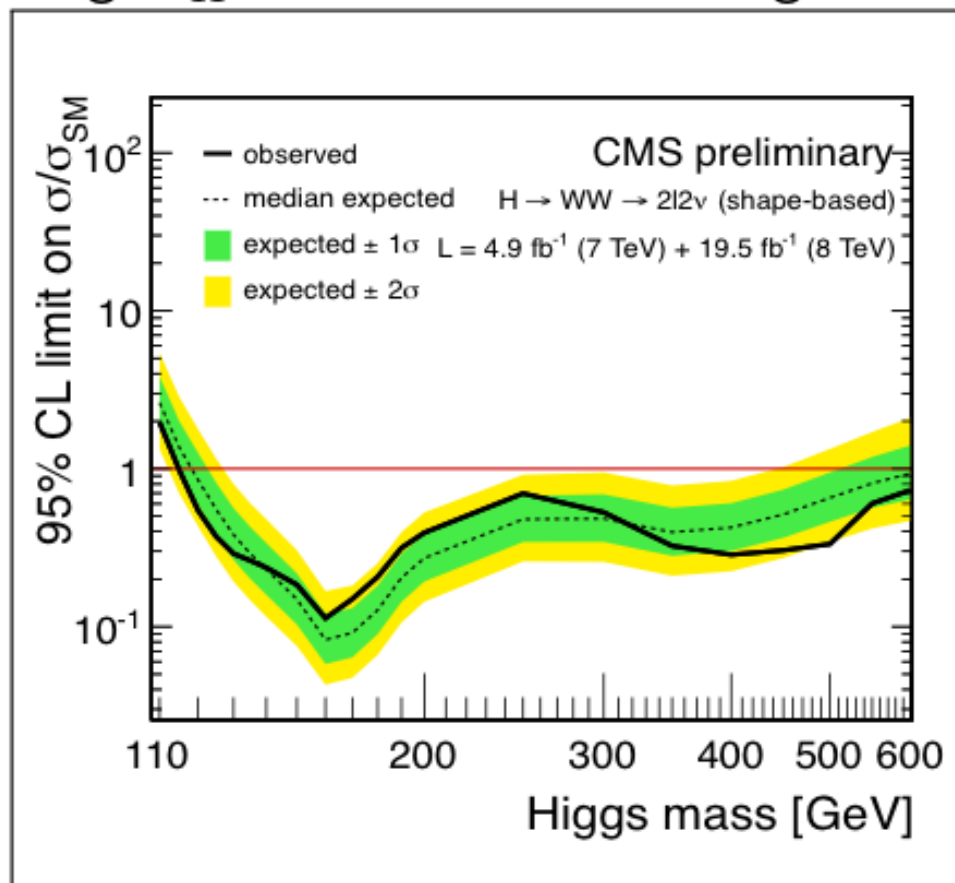


H → WW

standard analysis



using $m_H = 125$ GeV as background



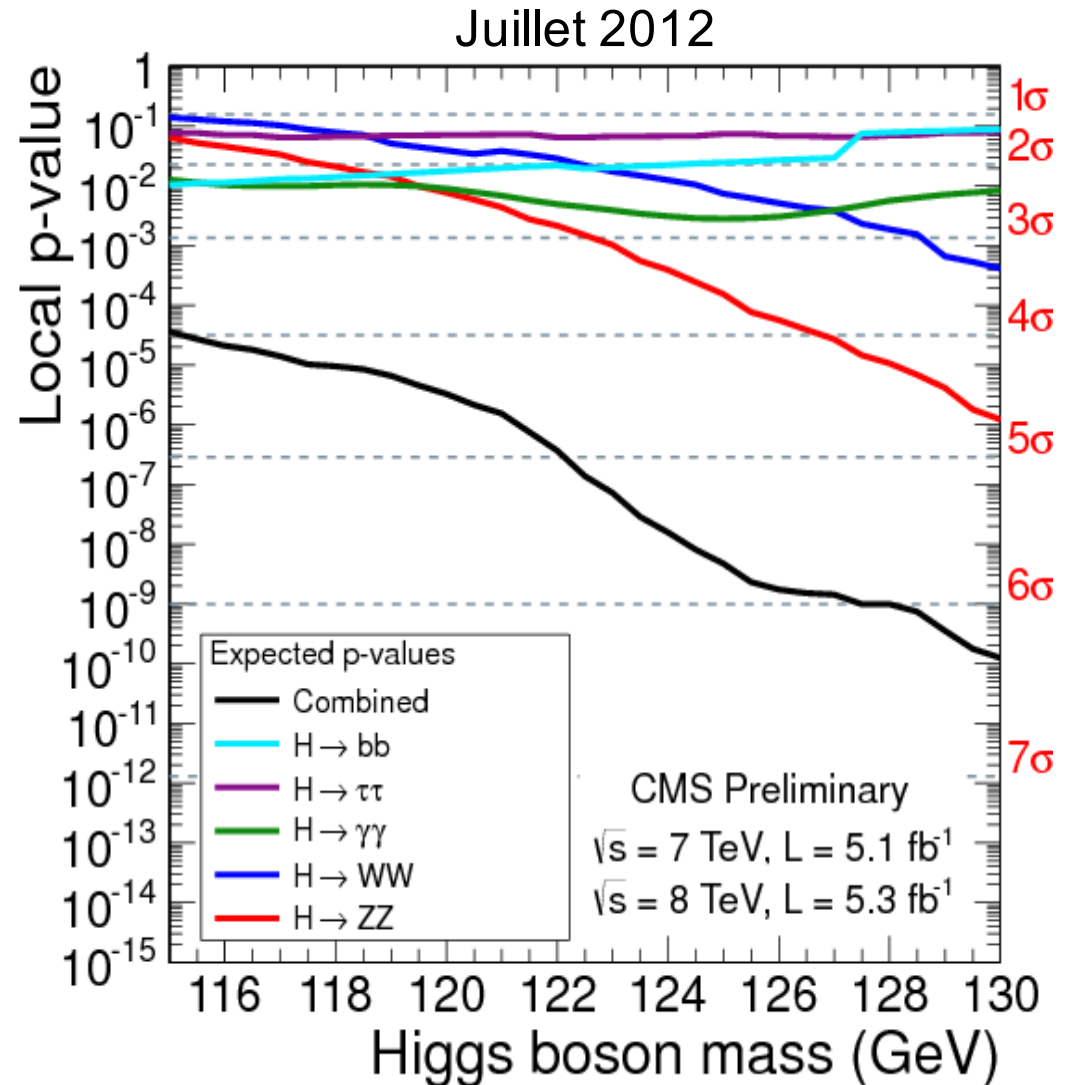
Test statistique pour la découverte

On dénomme par **p-value** la **probabilité qu'une fluctuation du bruit de fond produise un excès aussi grand** que le signal moyen attendu pour un boson de Higgs ou observé.

Pour une masse donnée, on parlera de p-value **locale**.

On peut passer de la probabilité à la **significance** (en σ).

Lorsqu'on regarde une zone étendue en masse, il y a un risque qu'une fluctuation arrive au hasard pour n'importe quelle masse. Tenir compte de cela (« **look elsewhere effect** ») va avoir tendance à diminuer la signification du résultat.



Situation en Juillet 2012

Juillet 2012

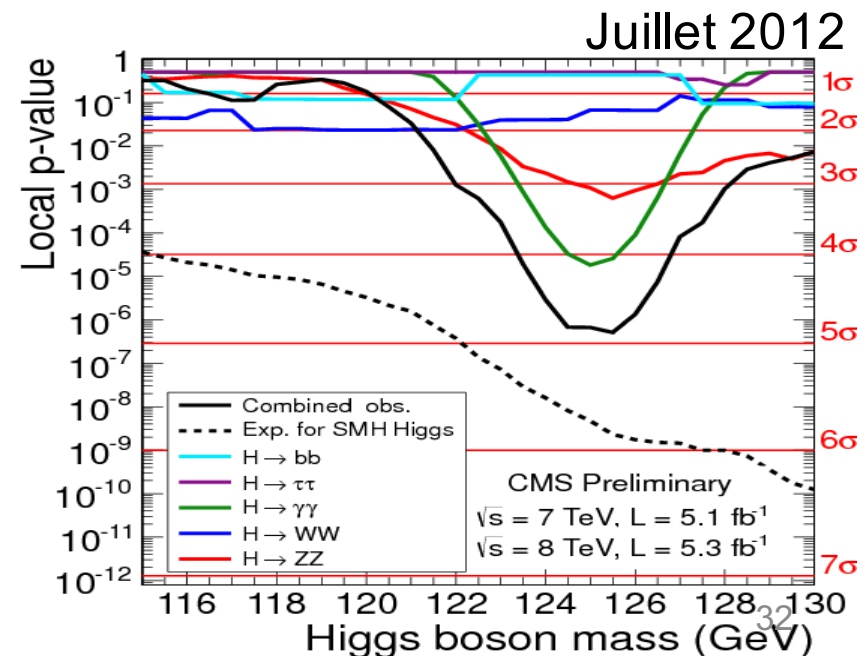
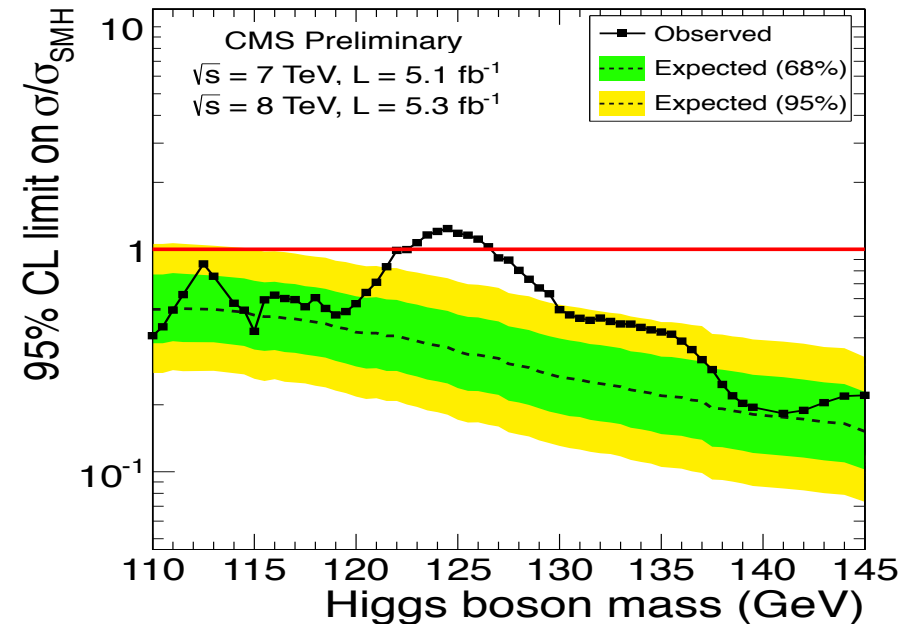
Analyses **re-optimisées** en 2012

Analyses dites « **blind** » (toutes les sélections sont déterminées avant de regarder dans la zone de signal) en 2012

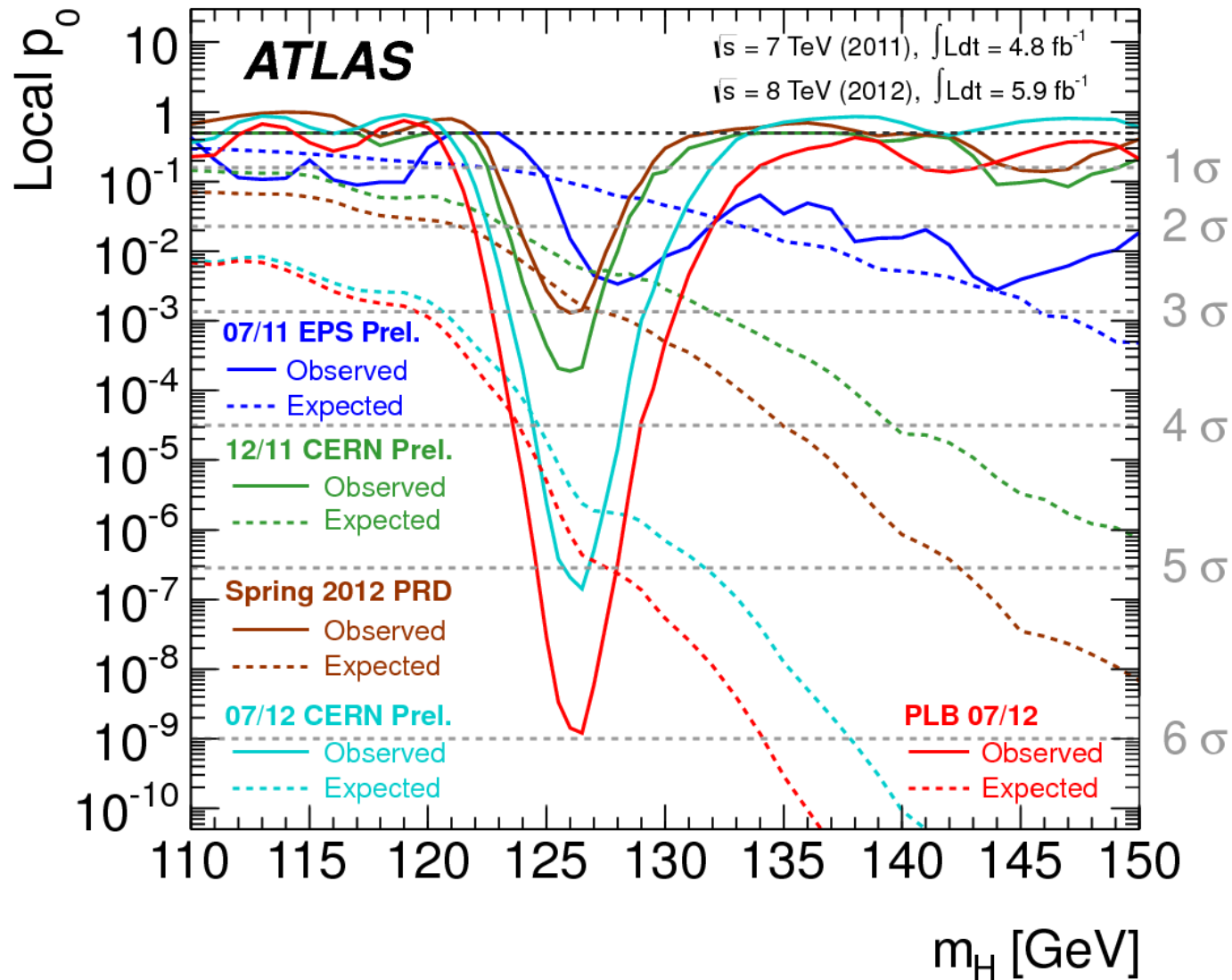
Nombreuses **vérifications** & analyses indépendantes

→ **Excès proche de 125 GeV**
significance observée pour la combinaison des canaux : **4.9 σ**
significance attendue : 5.9 σ

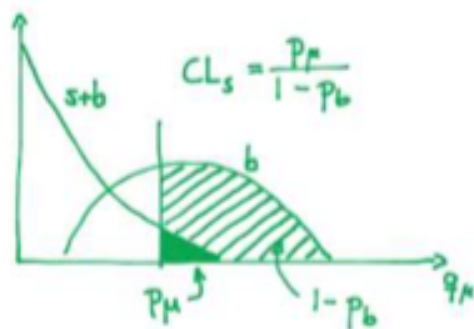
ATLAS aussi a annoncé une significance observée de 5 σ (pas exactement la même combinaison)



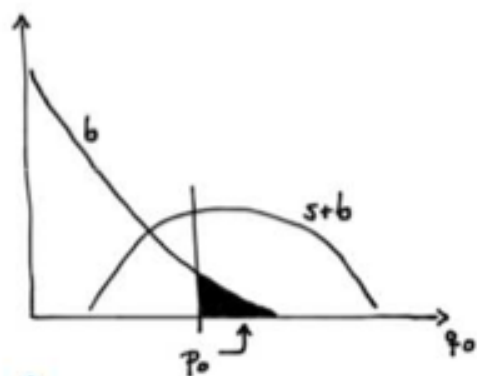
Evolution de l'excès au cours du temps dans ATLAS



Quelques définitions utiles...

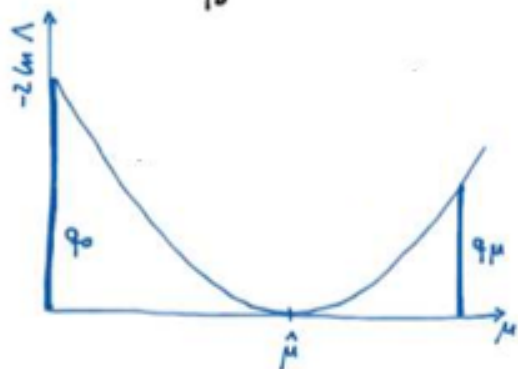


Test de compatibilité avec l'hypothèse signal+bruit de fond



Quantifie la probabilité d'un excès par rapport au bruit de fond seul

$5\sigma \sim 1/3$ millions
 $3\sigma \sim 1/700$



Evalue l'intensité du signal

