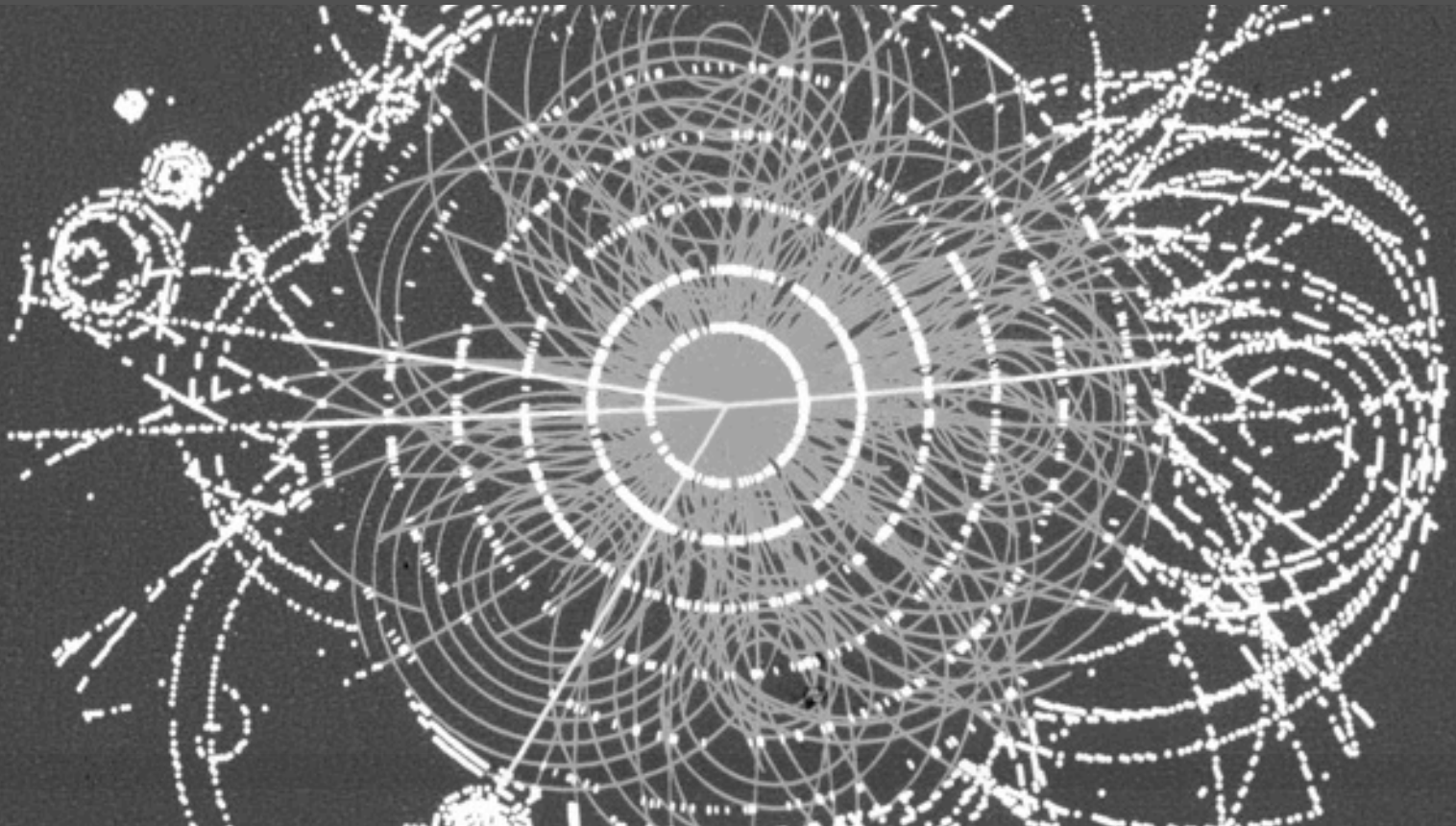


Derniers résultats des recherches du boson de Higgs au LHC



Claude Guyot et Julie Malclès pour ATLAS et CMS, SPP, Saclay, le 6 Juillet 2012



➤ **Le boson de Higgs**

- Le modèle standard de la physique des particules et le boson de Higgs
- État des lieux de nos connaissances sur le boson de Higgs avant le LHC

➤ **Les moyens expérimentaux**

- Comment produire le boson de Higgs, s'il existe? Le LHC
- Comment le détecter? Les détecteurs généralistes ATLAS et CMS
- Les contributions du CEA-Saclay aux détecteurs

➤ **Les derniers résultats d'ATLAS et de CMS**

- Recherche du Higgs se désintégrant en deux photons
- Recherche du Higgs se désintégrant en deux bosons Z
- Combinaison des résultats

➤ **Conclusions et perspectives**

Le boson de Higgs dans modèle standard:

- Le modèle ne prédit pas la **masse du boson de Higgs** qui est un **paramètre libre**
- En revanche, **pour une masse donnée, le modèle prédit les probabilités de désintégration** du boson Higgs en différents états finaux
- De plus, **la masse du boson de Higgs est reliée aux autres paramètres du modèle**, comme la masse du quark top ou celle du boson W

Méthode de recherche:

- On cherche donc le boson de Higgs à toutes les masses possibles
- On peut exclure des régions de masse si on ne l'observe pas alors qu'on le devrait
- On peut aussi contraindre sa masse à partir des mesures des autres paramètres (m_W , m_t) pour savoir dans quelle gamme de masse le chercher et tester la cohérence du modèle

Connaissances avant le LHC

➔ **Limite théorique: $m_H < 900$ GeV**

➔ **Le LEP au CERN (Genève, 1989-2000)**
collisions électron-positon jusqu'à 209 GeV

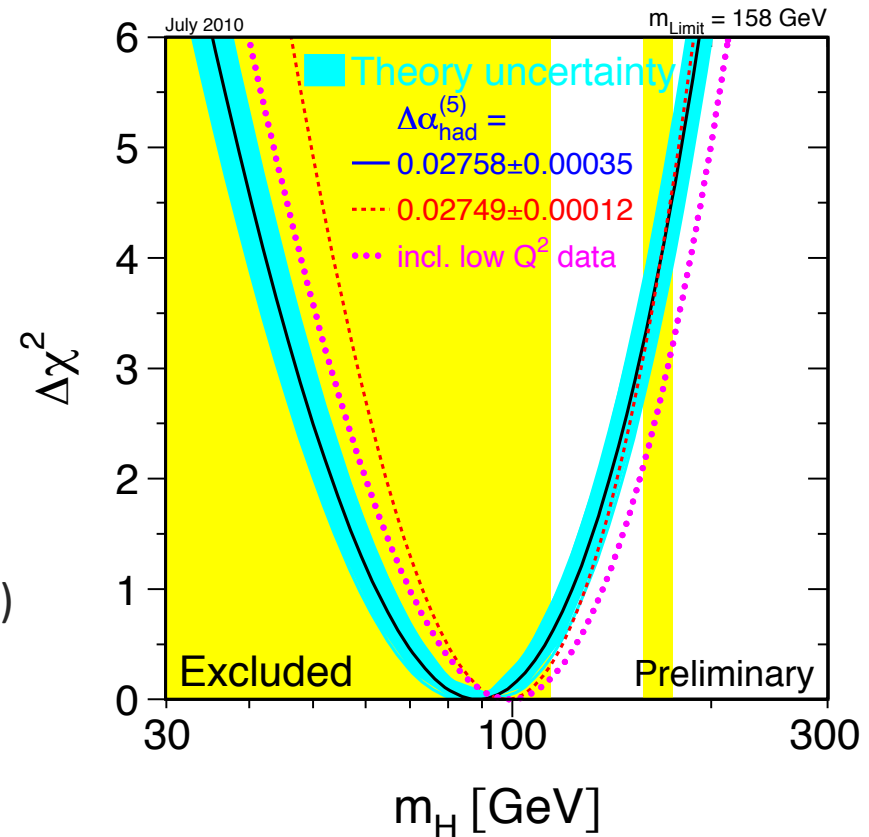
Mesures précises de la masse du W et des paramètres du Z

Recherches directes: $m_H > 115$ GeV à 95% de niveau de confiance

➔ **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 à 95% de niveau de confiance



La gamme de masse la plus probable d'après ces mesures
 115 GeV $< m_H < 160$ GeV à 95% de niveau de confiance

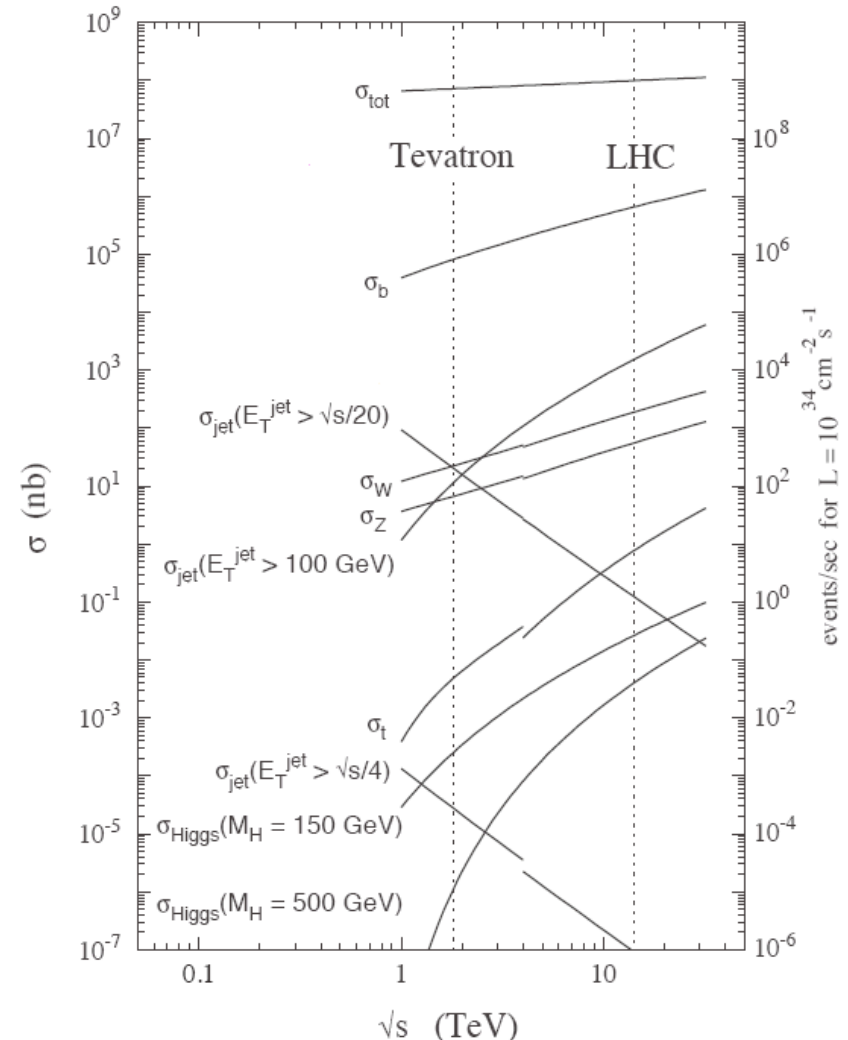
Comment le produire?

Conclusion: le boson de Higgs

- ➔ Pas vu au LEP, car sa masse est trop grande pour qu'il soit produit à une telle énergie ($E=mc^2$)
- ➔ 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!

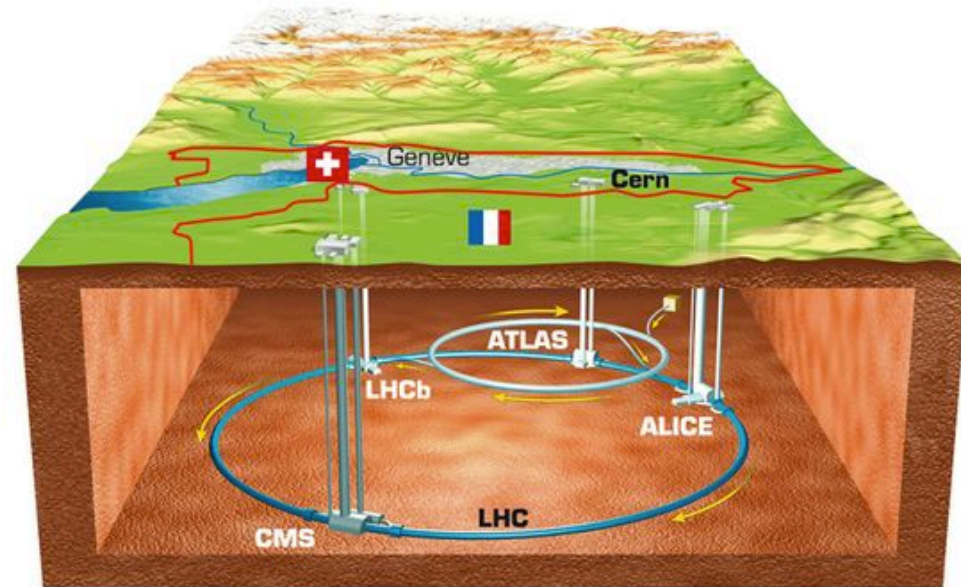
Au LHC: production principalement par collision de deux gluons donnant un boson de Higgs



Comment le produire?

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 une énergie deux fois plus petite: 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: $6 \cdot 10^{33} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$

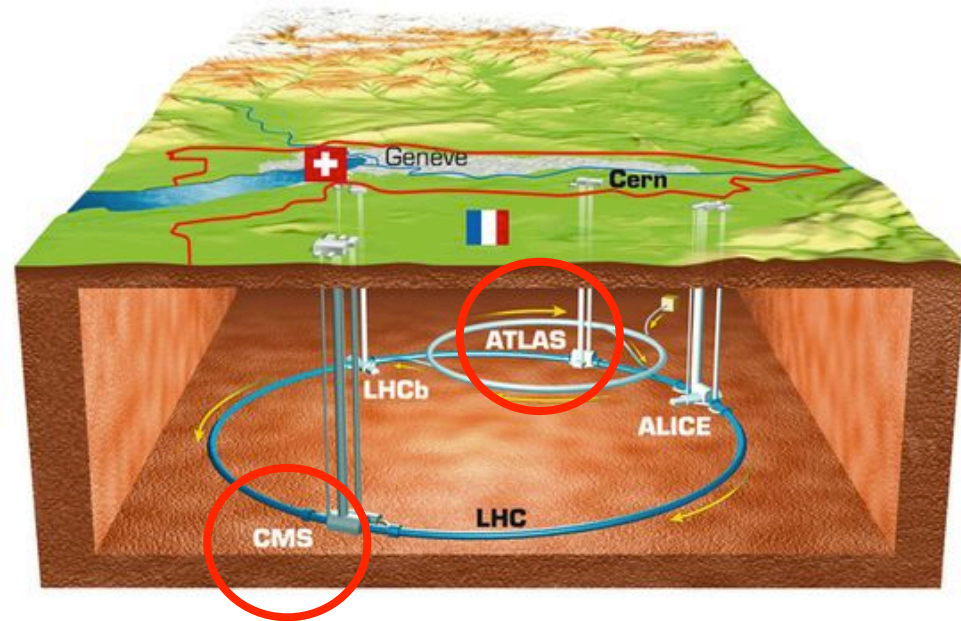


Comment le détecter?

Les expériences:

A chaque point de collision, des détecteurs enregistrent ce qui se passe:

- ➔ **ATLAS et CMS: expériences généralistes: recherche du boson de Higgs**
- ➔ LHCb: étude des désintégrations de quarks b
- ➔ ALICE: plasma de quark et gluons

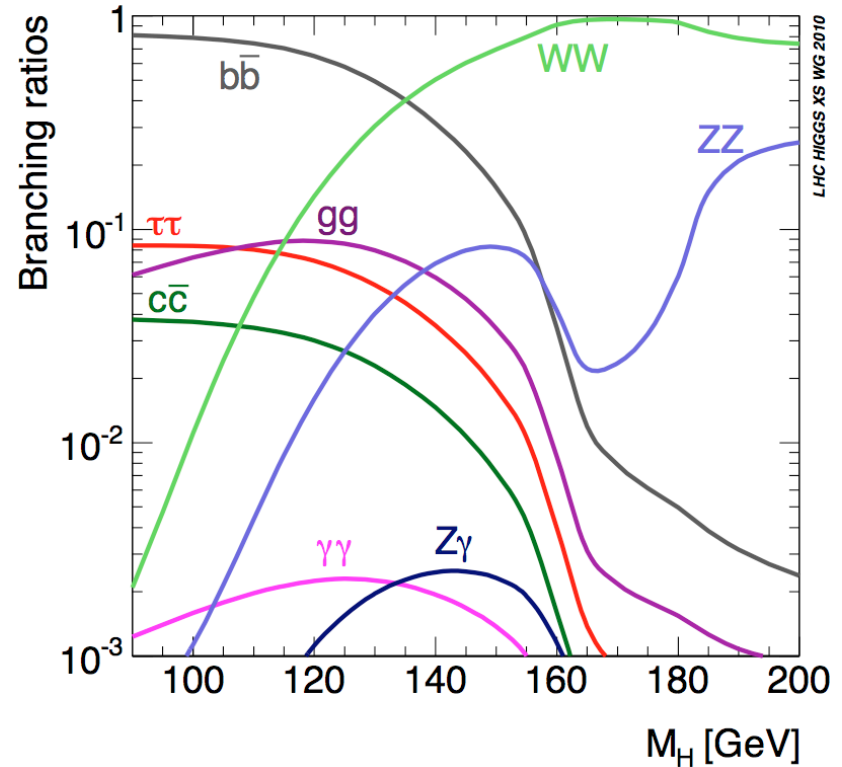


A chaque collision: des dizaines de particules sont produites et on détermine:

leur position, leur énergie, leur type, leur charge électrique pour reconnaître le processus qui a eu lieu

Comment le détecter?

- Le Higgs se désintègre instantanément en d'autres particules plus stables
- 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 différents états finaux



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

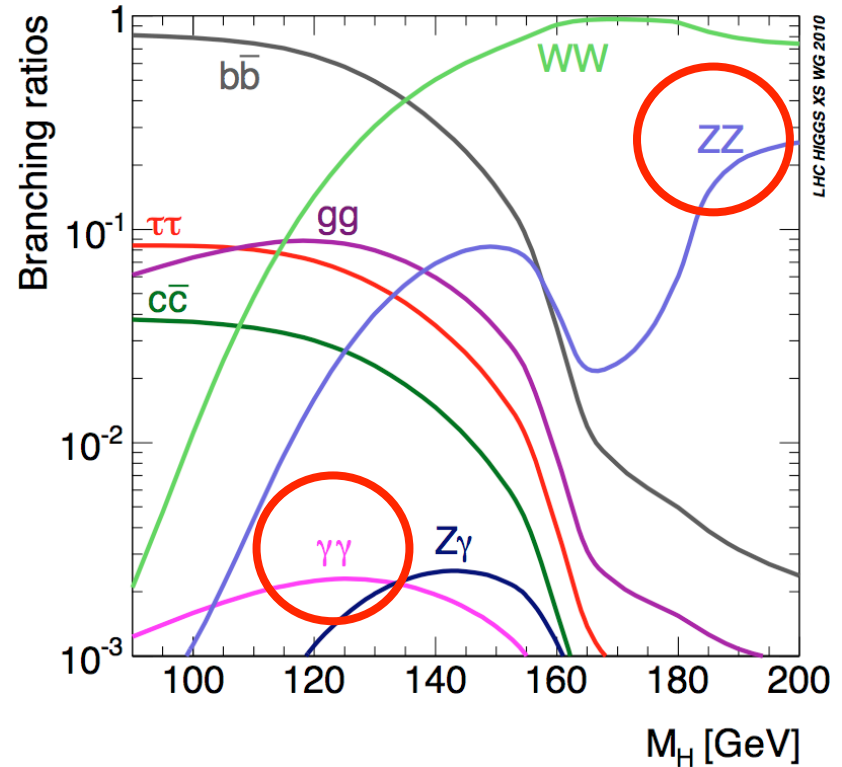
Comment le détecter?

Les “modes” d’observation privilégiés sont:

- $H \rightarrow \gamma\gamma$ (deux photons)
- $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4e$ ou 4μ ou $2e2\mu$ (electrons et muons)

Car:

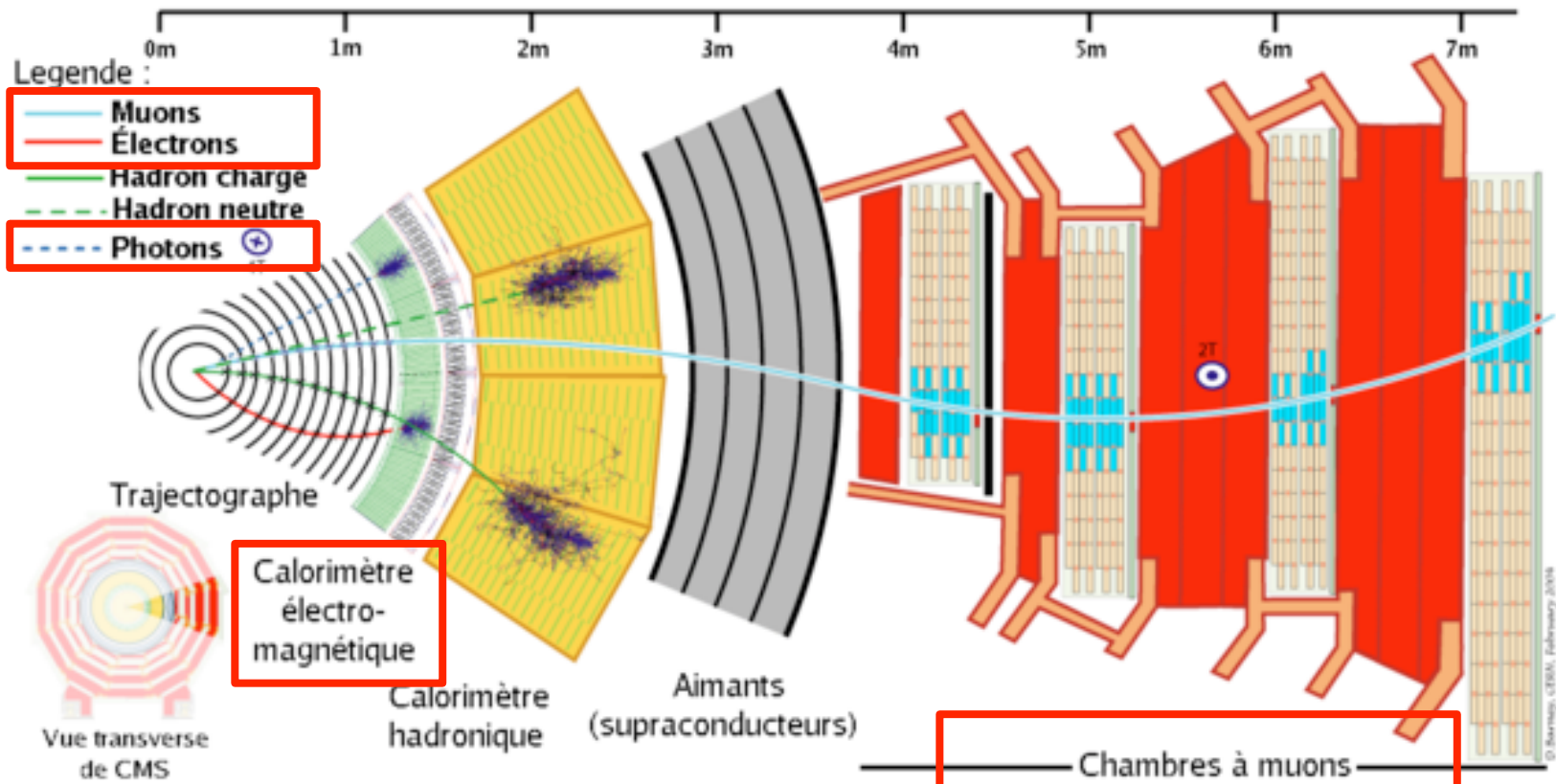
- Les bruits de fond sont limités (au contraire pour bb , le bruit de fond est 10 millions de fois plus important!)
- Nous savons détecter tous les produits de désintégrations (électrons, muons et photons) et mesurer leur énergie avec une grande précision pour calculer la masse du boson de Higgs



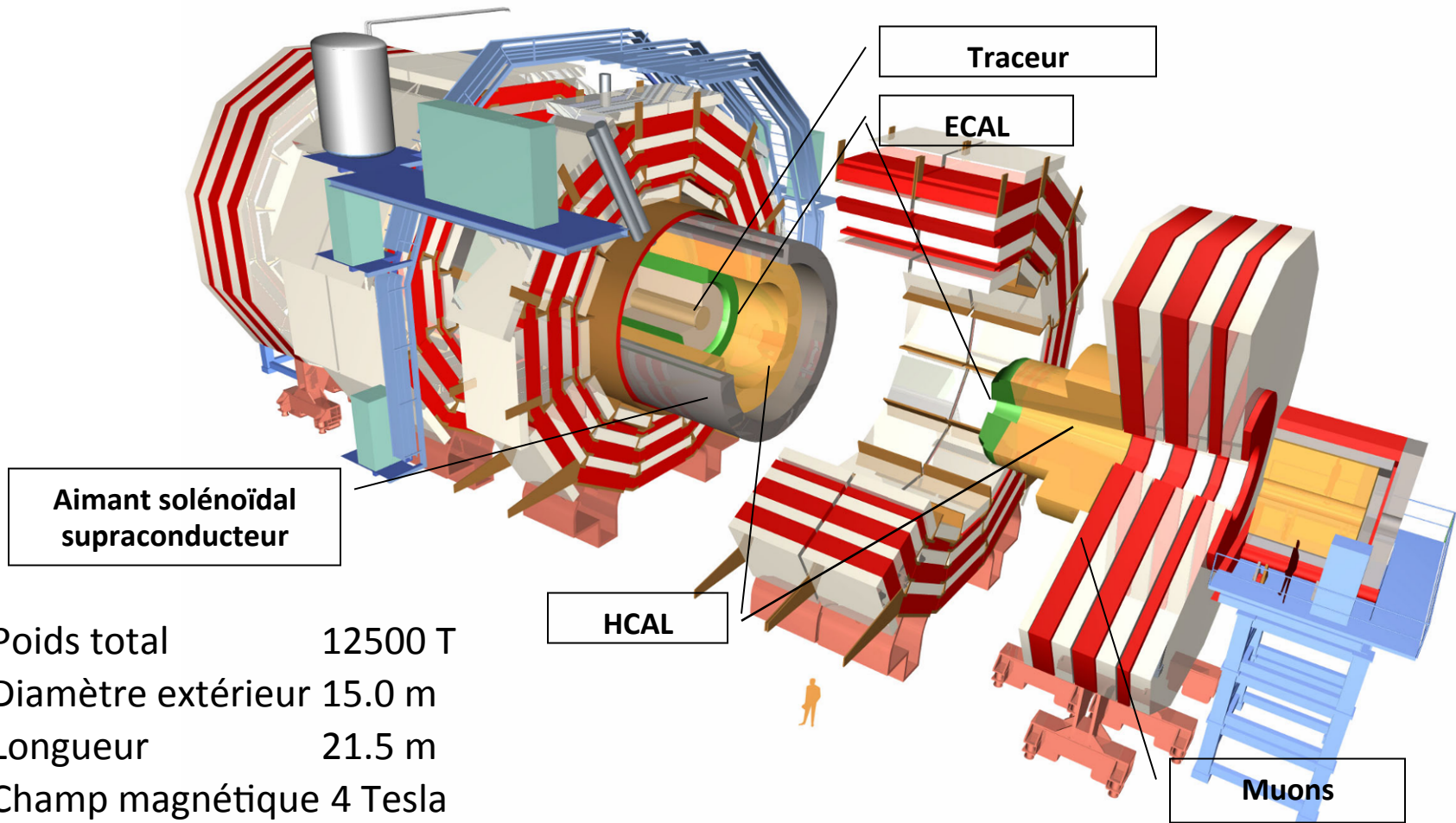
Il faut donc être capable de voir ces particules finales dans nos détecteurs et de mesurer leurs énergies et positions

Comment le détecter?

- 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



Le détecteur CMS



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

La collaboration CMS



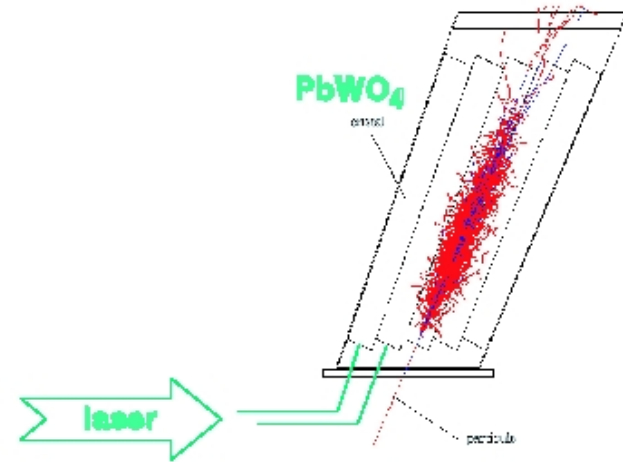
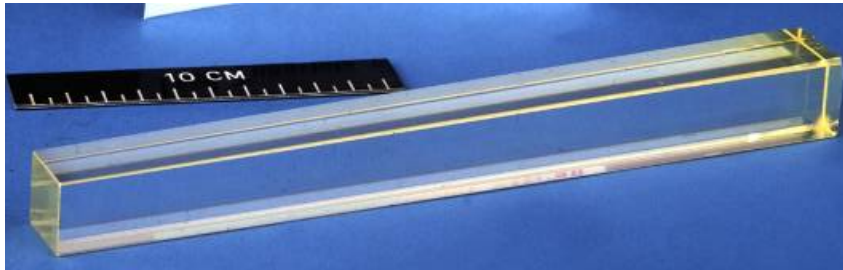
Composition actuelle:

- **16 physiciens:** *M. Besançon, F. Couderc, M. Dejardin, D. Denegri, B. Fabbro, J.L. Faure, F. Ferri, S. Ganjour, A. Givernaud, P. Gras, G. Hamel de Monchenault, P. Jarry, E. Locci, J. Malclès, A. Rosowsky, M. Titov*
- **3 doctorants:** *S. Choudhury, J. Neveu, T. Hennequin*
- **2 postdocs:** *I. Tecker, A. Nayak*
- **Forte implication du SEDI à la construction:** *M. Anfreville, J-P. Bard, M. Boyer, A. Gomes, P. Gras, C. Jeanney, I. Mandjavize, Y. Penichot, D. Pierrepont (antenne), J.M Reymond, J. Rolequin, J. Tartas, P. Venault*

Contributions majeures au détecteur:

- **Solénoïde:** IRFU à l'origine de la conception de ce solénoïde supraconducteur, le plus grand jamais réalisé
- **Calorimètre électromagnétique:**
 - Electronique de lecture selective
 - Monitoring par LASER: **crucial pour la recherche du Higgs en deux photons**

Le calorimètre de CMS: ECAL



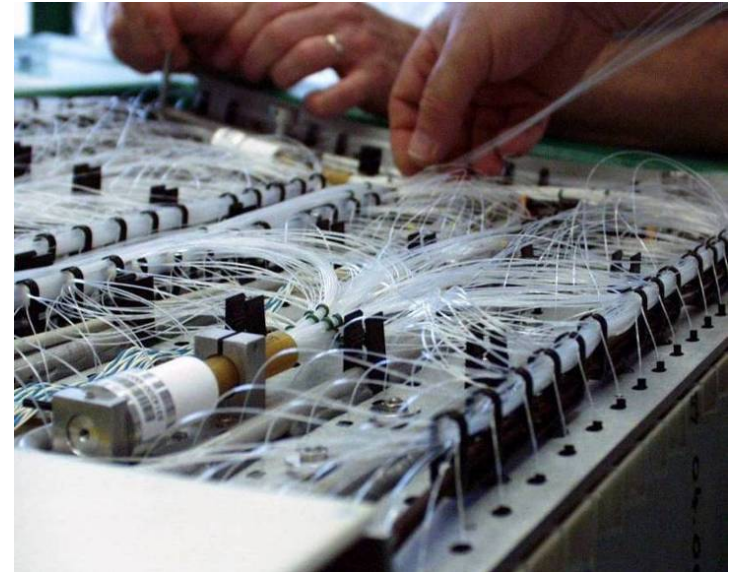
Le calorimètre (cristaux+photodetecteurs) mesure l'énergie des électrons et photons:

- Lorsqu'un photon ou un électron arrive dans un cristal, une suite d'interactions électromagnétiques transforme toute son énergie en lumière visible
- On recueille cette lumière et en déduit son énergie initiale
- **Problème:** après irradiation (quand des collisions ont lieu), les cristaux perdent de la transparence à cette lumière visible, et l'énergie est sous estimée donc mal mesurée
- **Solution:** le système de monitoring LASER conçu par saclay

Le système de monitoringage LASER

Principe simplifié:

- On envoie des impulsions lasers connues dans tous les cristaux (≈ 80000) toutes les 30 minutes via un système de fibres optiques
- On mesure la perte de réponse de chaque cristal avec la réponse mesurée à ces impulsions
- On corrige l'énergie au fur et à mesure cristal par cristal pour les événements de collision



Le système de monitoring LASER

CMS saclay a conçu et mis en place ce système et s'occupe de tous les calculs nécessaires en temps réel pour corriger l'énergie.

Cette correction est cruciale pour la recherche du Higgs en deux photons.

Données
2012

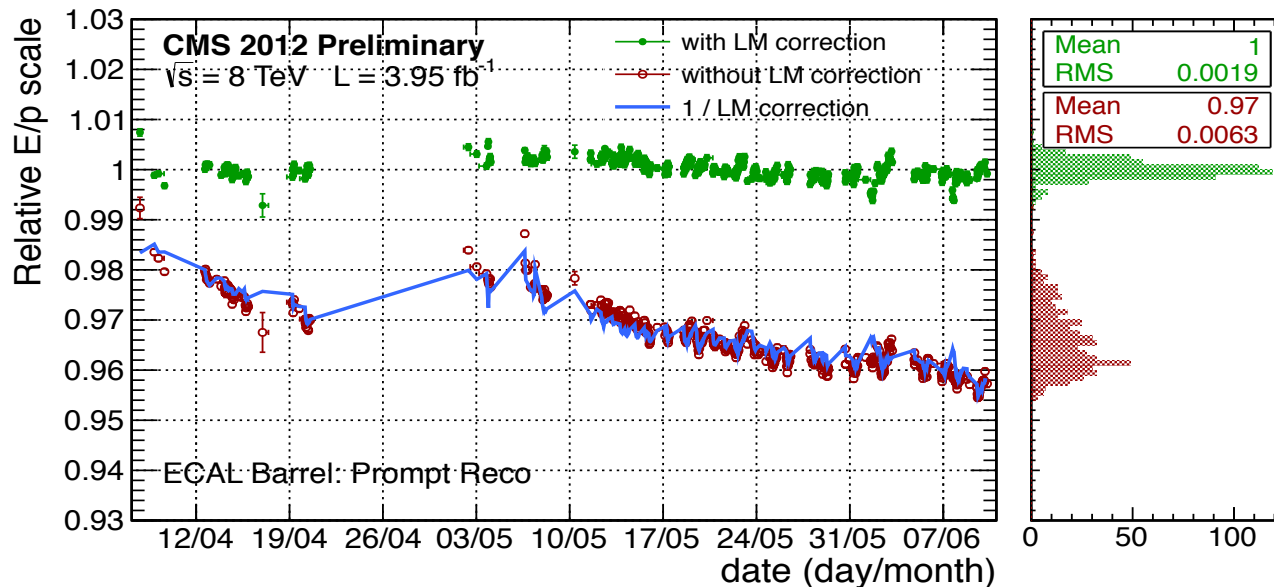


Illustration que ça fonctionne: rapport entre l'énergie mesurée dans ECAL et dans le trajectographe en fonction du temps pour des électrons avant et après correction

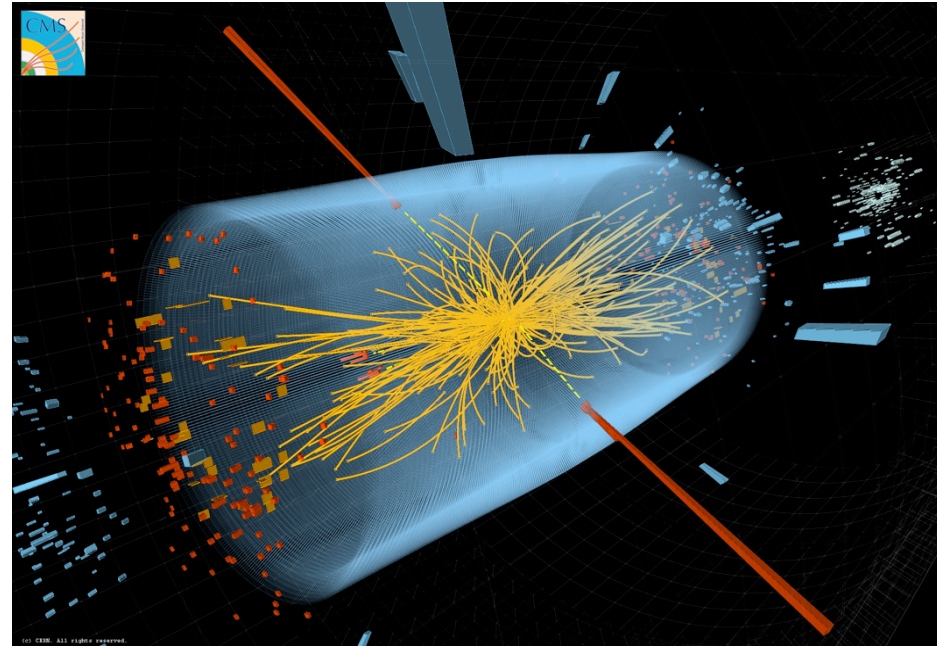
Recherche du boson de Higgs

Les derniers résultats d'ATLAS et CMS:

- Recherche du Higgs se désintégrant en deux photons
- Recherche du Higgs se désintégrant en deux bosons Z

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

- Deux dépôts d'énergie importants dans le calorimètre électromagnétique
- Pas de particule chargée correspondante dans le trajectomètre interne (élimine les électrons)
- Photons "isolés": pas d'énergie autour dans les autres détecteurs (élimine les faux photons issus de quarks qui font des jets de particules)



Exemple d'un événement avec deux photons dans le détecteur CMS

Après cette sélection, il reste beaucoup de bruit de fond:

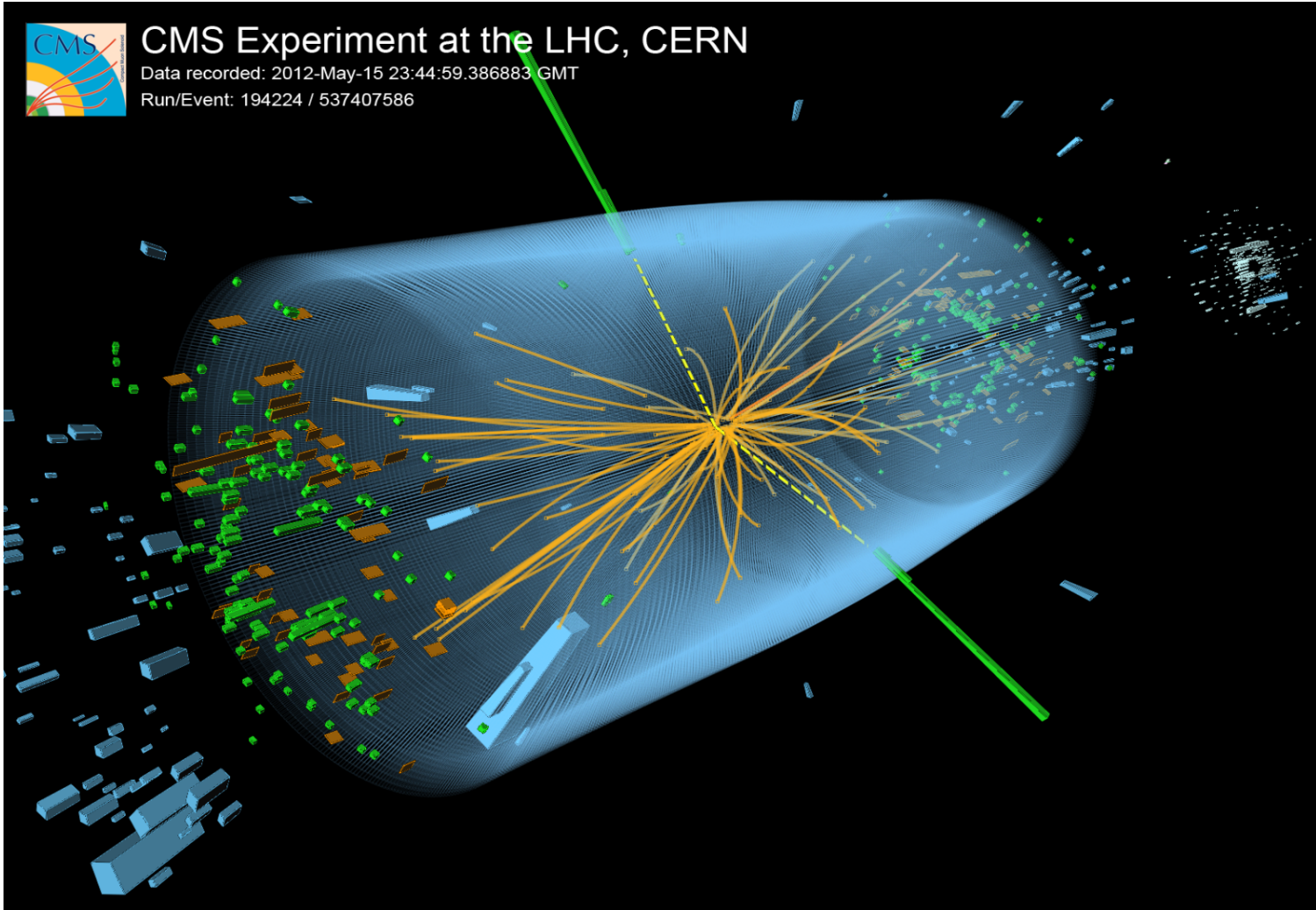
D'autres processus connus peuvent produire deux photons isolés



CMS Experiment at the LHC, CERN

Data recorded: 2012-May-15 23:44:59.386883 GMT

Run/Event: 194224 / 537407586



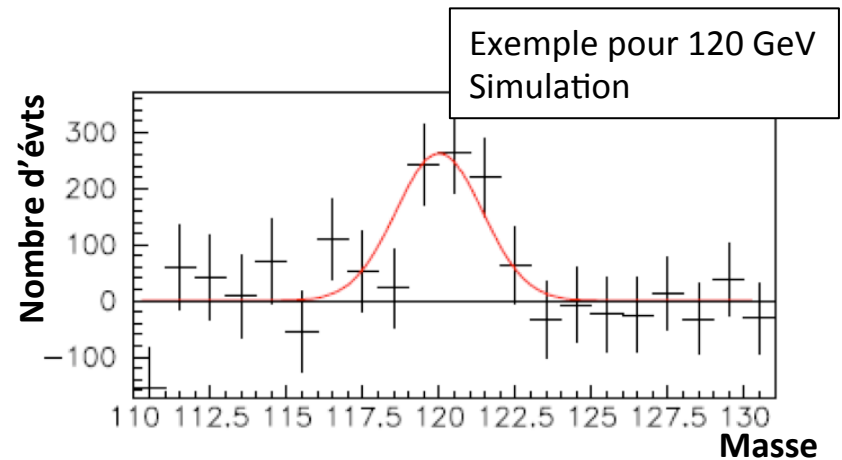
Comment séparer les bruits de fonds restants du boson de Higgs?

Avec la masse invariante diphoton

$$m_{\gamma\gamma} = \sqrt{2 E_1 E_2 [1 - \cos(\theta)]}$$

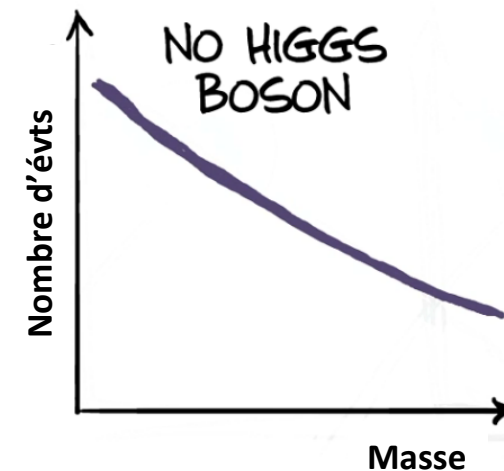
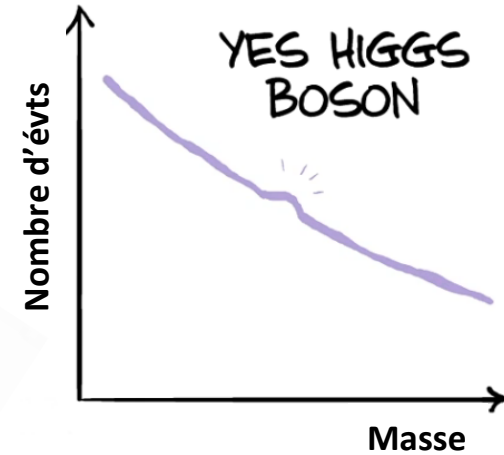
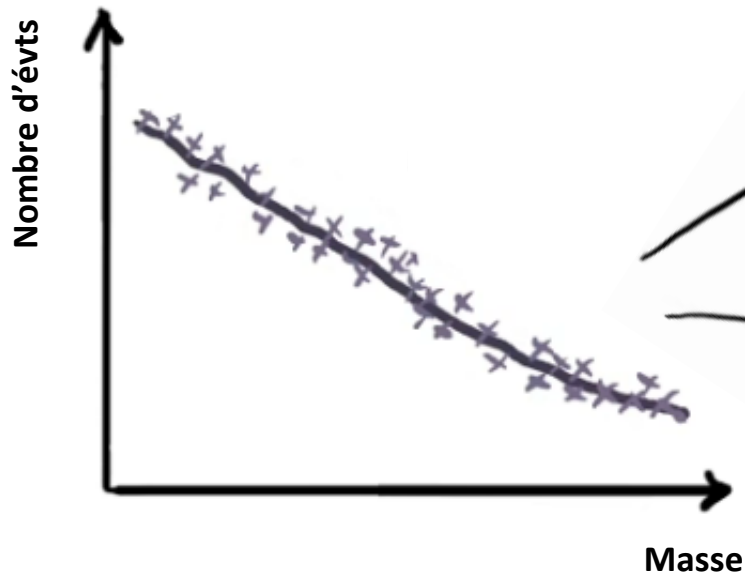
Avec E_1 et E_2 les énergies des photons
et θ l'angle entre les photons

- ➔ 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



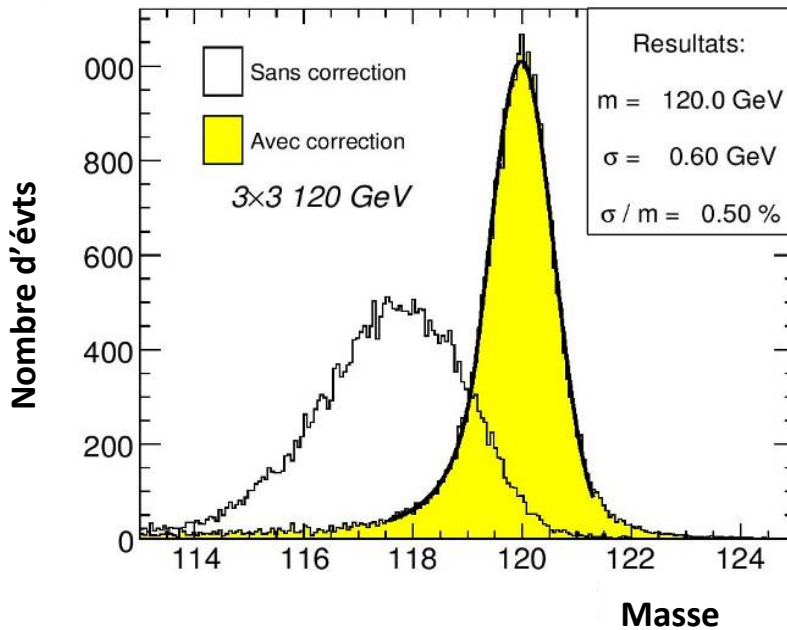
Mais il y a beaucoup plus de bruit de fond que ce qu'on attend de boson de Higgs...

Les données vont ressembler à ça:

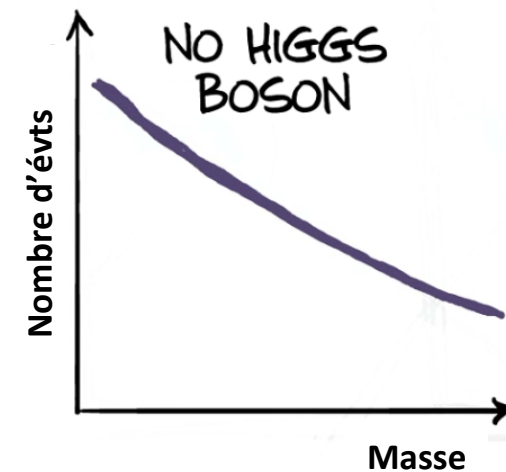
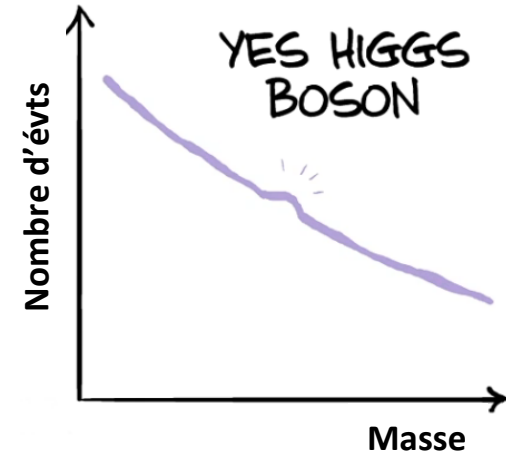


Plus on a de données, plus ce petit pic se voit clairement, car moins grandes sont les fluctuations statistiques du bruit de fond

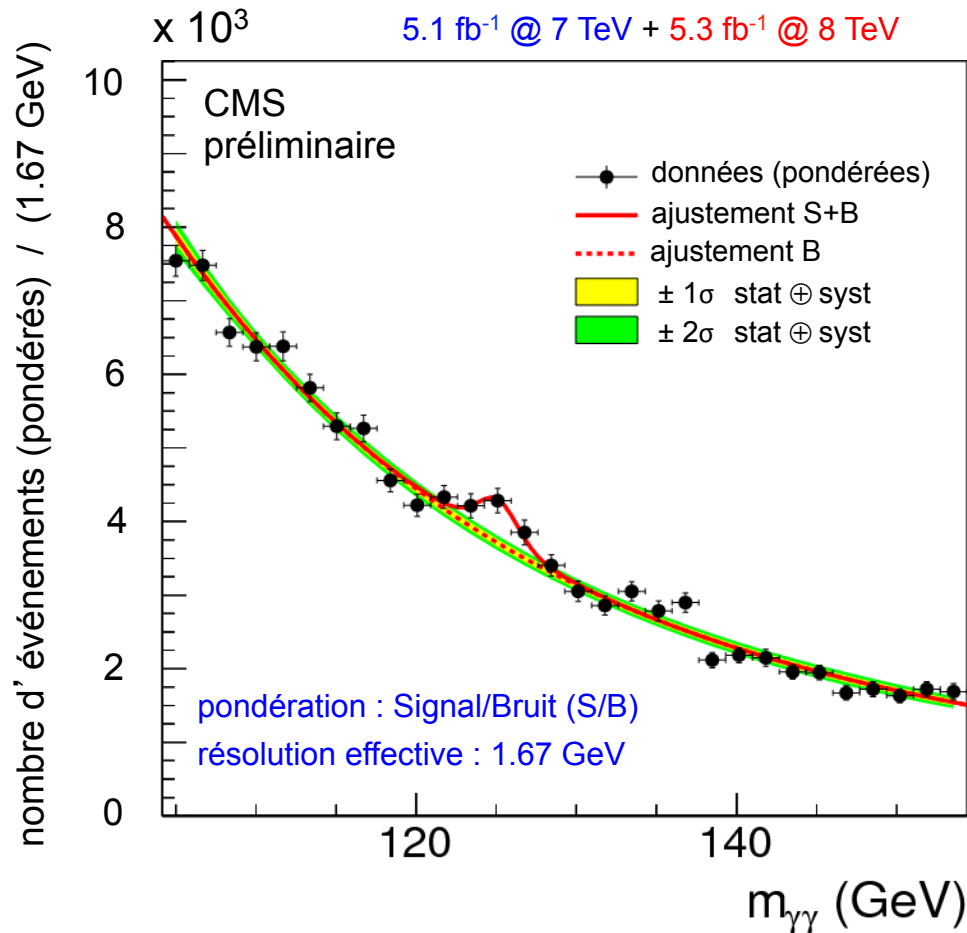
Plus ce pic est fin, plus il est facile à voir.
La résolution en énergie est cruciale.



Pic beaucoup plus étroit après la correction de l'énergie par le système de monitoring de saclay.



Les données en 2011 et 2012:



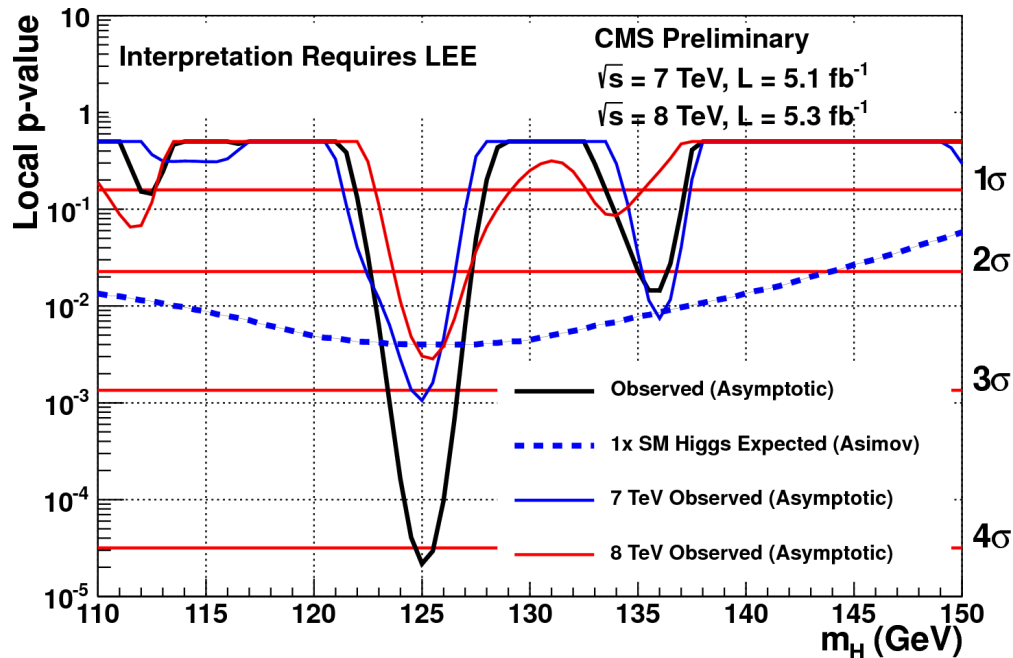
Excès autour de 125 GeV!

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

Les données en 2011 et 2012:



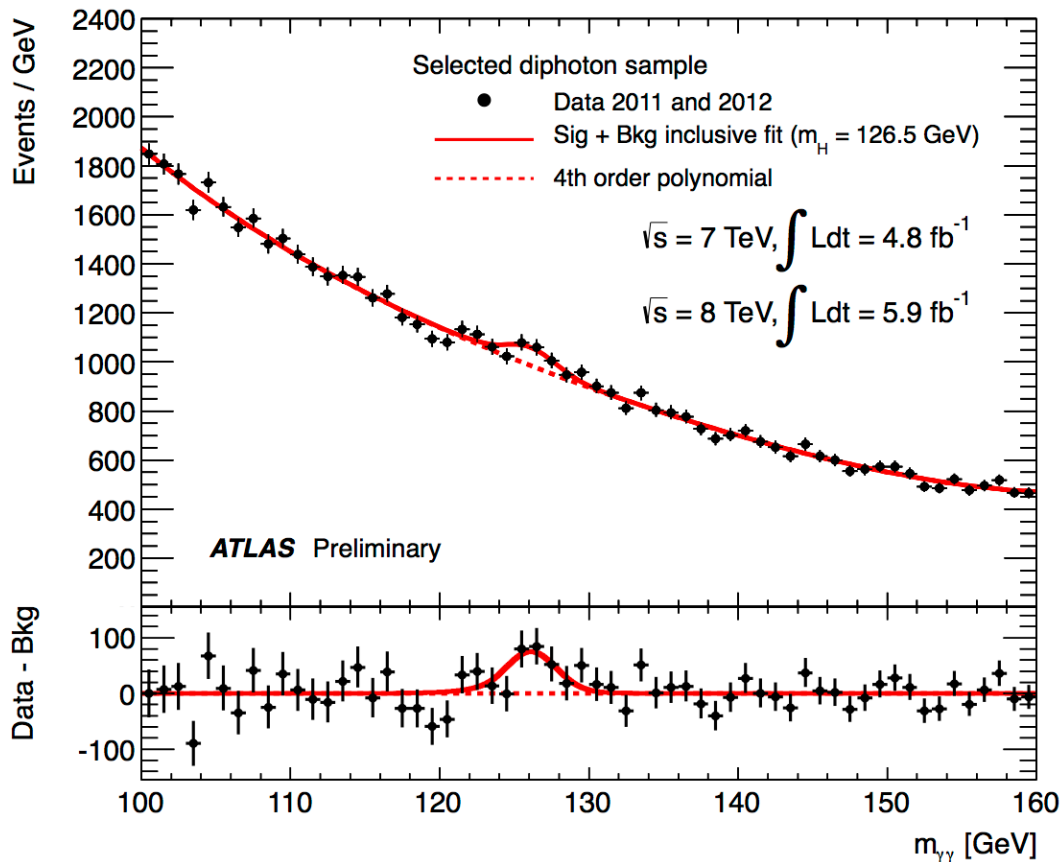
Excès autour de 125 GeV!

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

Les données en 2011 et 2012:



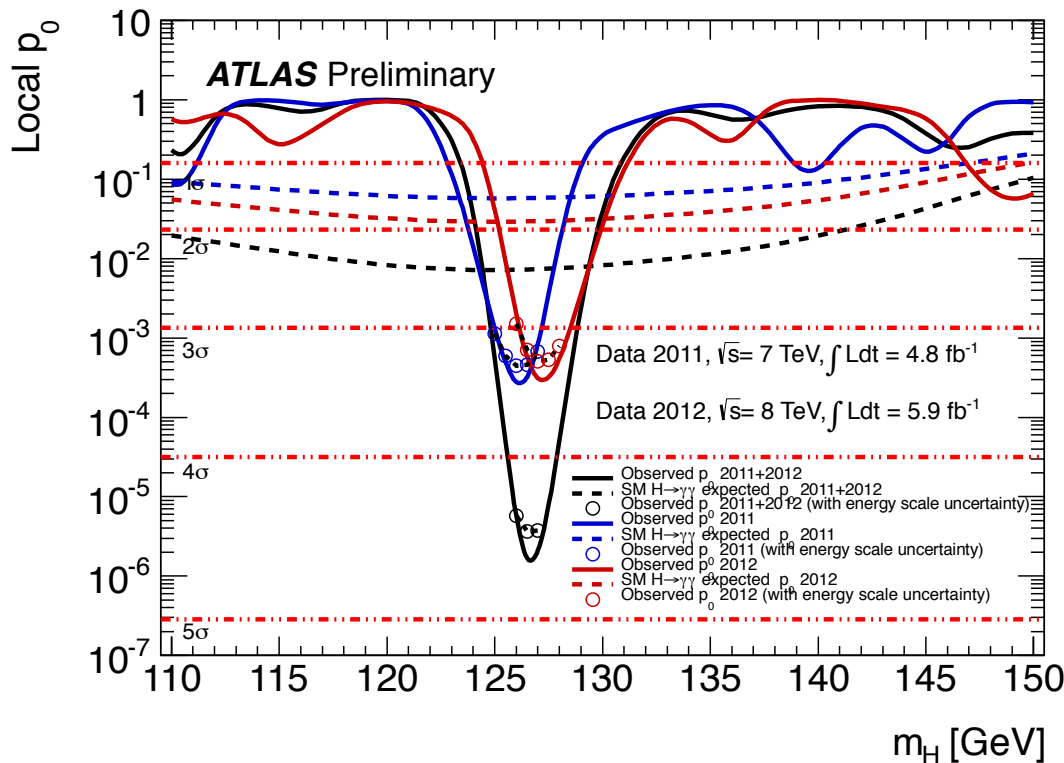
Excès autour de 125 GeV!

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

(~ 4.5 écarts standard ou
 4.5σ)

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

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

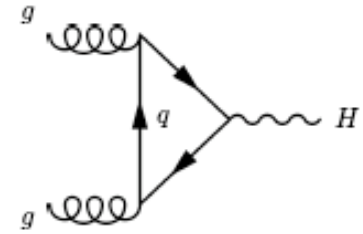
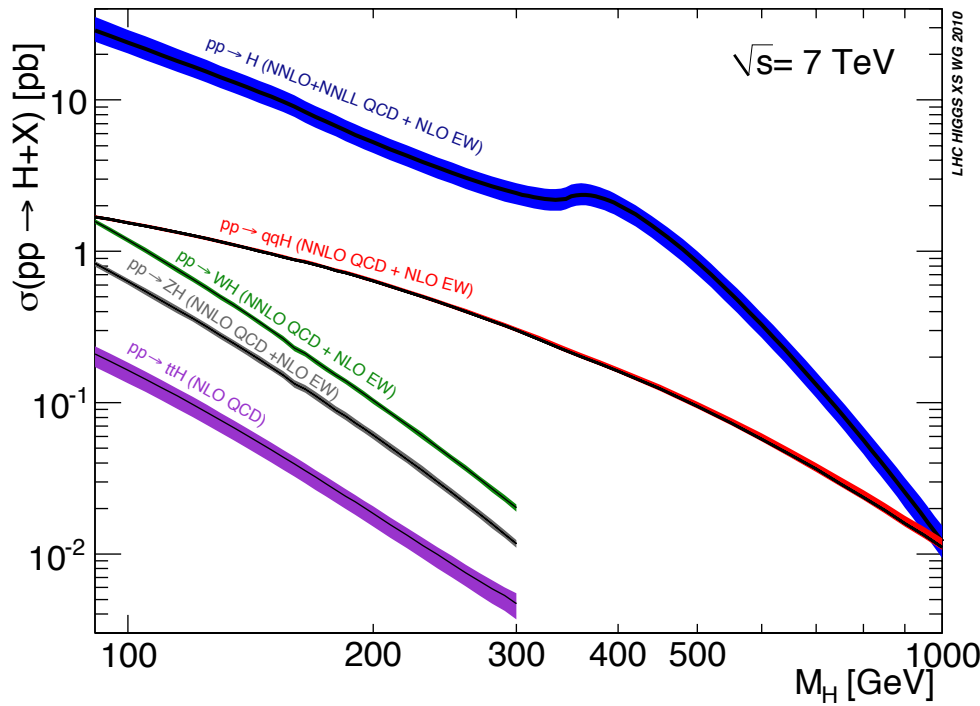
(~ 4.5 écarts standard ou 4.5σ)

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

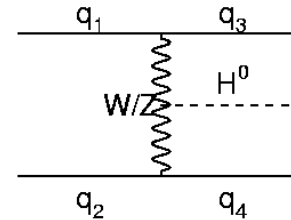


Backups

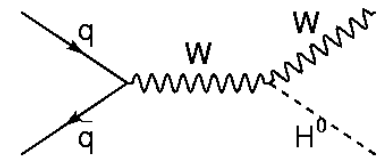
Production au LHC



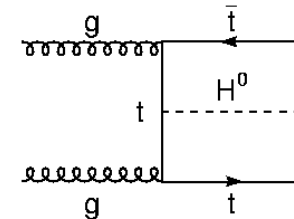
Fusion de gluons



Fusion de bosons vecteurs



Production en association avec un boson W ou Z



Production en association avec une paire tt

➔ **Contributions au détecteur ATLAS**

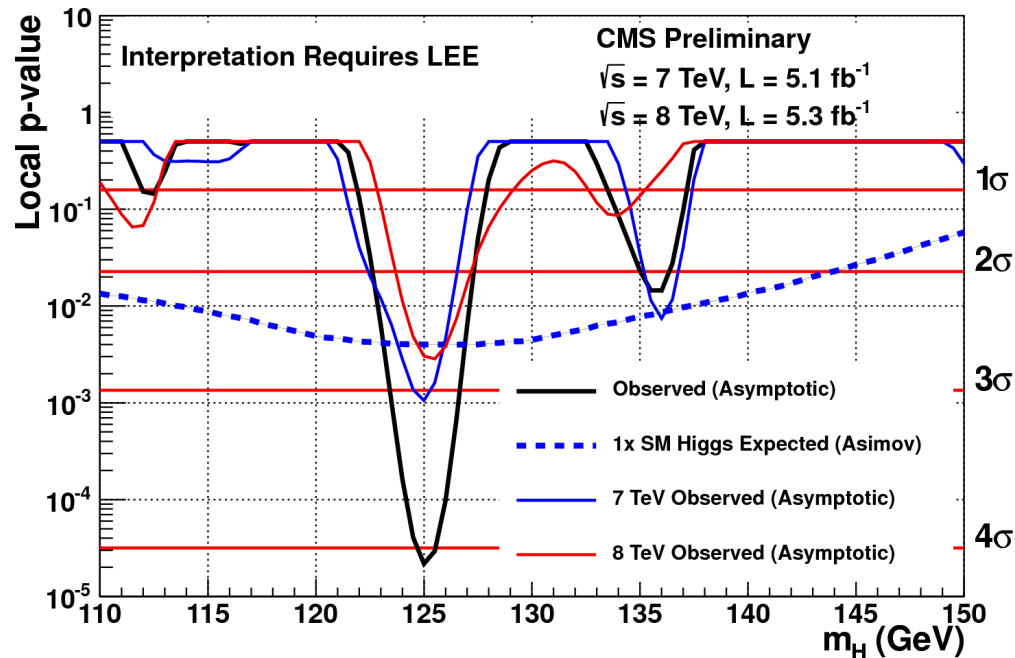
- Le calorimètre électromagnétique
- Le spectromètre à muons
- Le toroïde

➔ **Contributions au détecteur CMS: le calorimètre électromagnétique**

- Le système de monitoring LASER
- La lecture sélective du calorimètre
- Le solénoïde: bobine supra

Les implications de saclay ont été importantes dans les sous-détecteurs cruciaux pour la recherche du boson de Higgs: les calorimètres électromagnétiques (électrons et photons) et le spectromètre à muons et aussi pour la calibration et l'analyse des données!

Les données en 2011+2012:

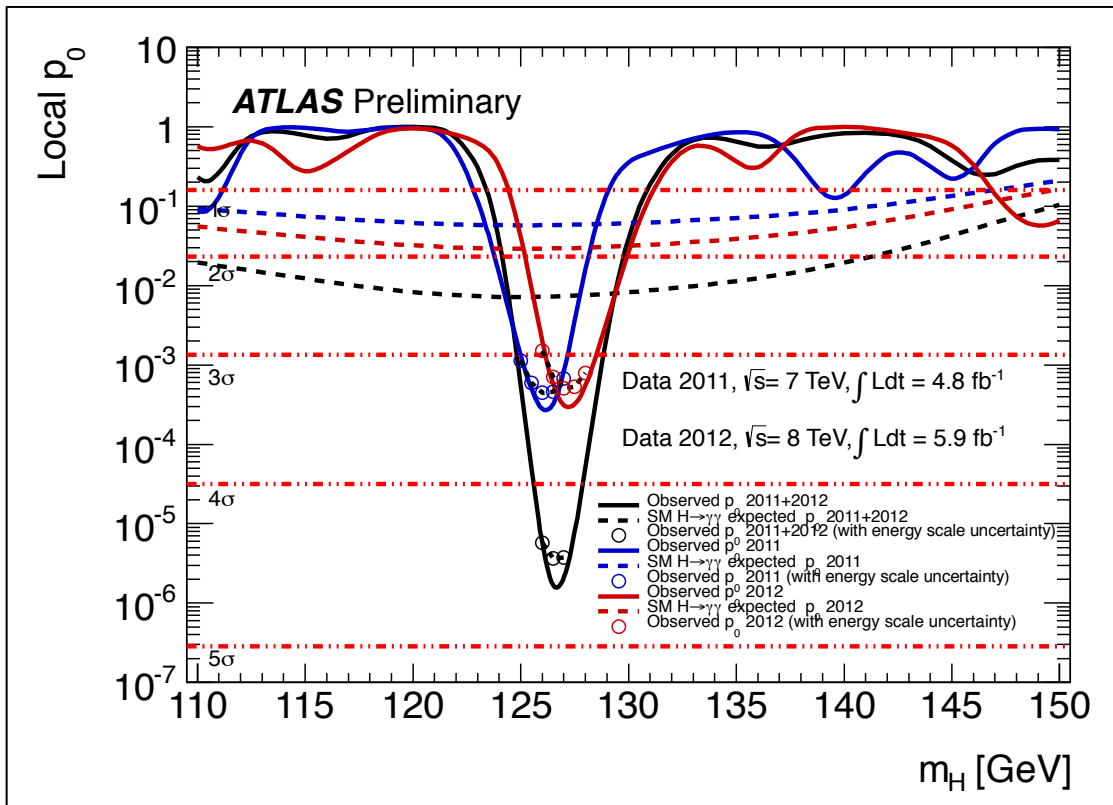


Excès autour de 125 GeV

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

(~ quatre écarts standard)

H en $\gamma\gamma$: ATLAS



Excès autour de 125 GeV

Probabilité d'une fluctuation du bruit de fond:

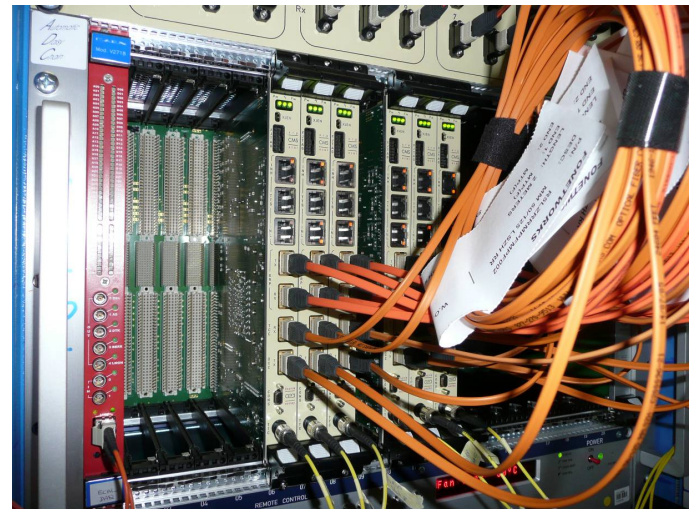
- Dans les données **2011** et **2012** séparément:
3 pour 10000 (3.5 écarts standard)
- Dans l'ensemble des données 2011+2012:
2 sur 1 million (4.5 écarts standard)

La lecture sélective du ECAL

ECAL: 75848 cristaux – canaux de lecture

- 4032 unités de déclenchement (lecture synchrone 40 MHz)
- 3072 unités de lecture (lecture asynchrone)
 - Lecture totale ECAL(1,5 Mo) > Taille événement CMS (1 Mo): **Impossible!**
 - **SRP: Réduction intelligente /20 (sans perdre d'information pour la physique)**
 - Pas de suppression de zéros massive
 - Lecture de zones d'intérêt hiérarchisées
 - Lecture de tous les dépôts d'énergie avec une grosse granularité

Cartes de SRP faites à Saclay et opérationnelles depuis le début de la prise de données



Recherches directes avant le LHC:

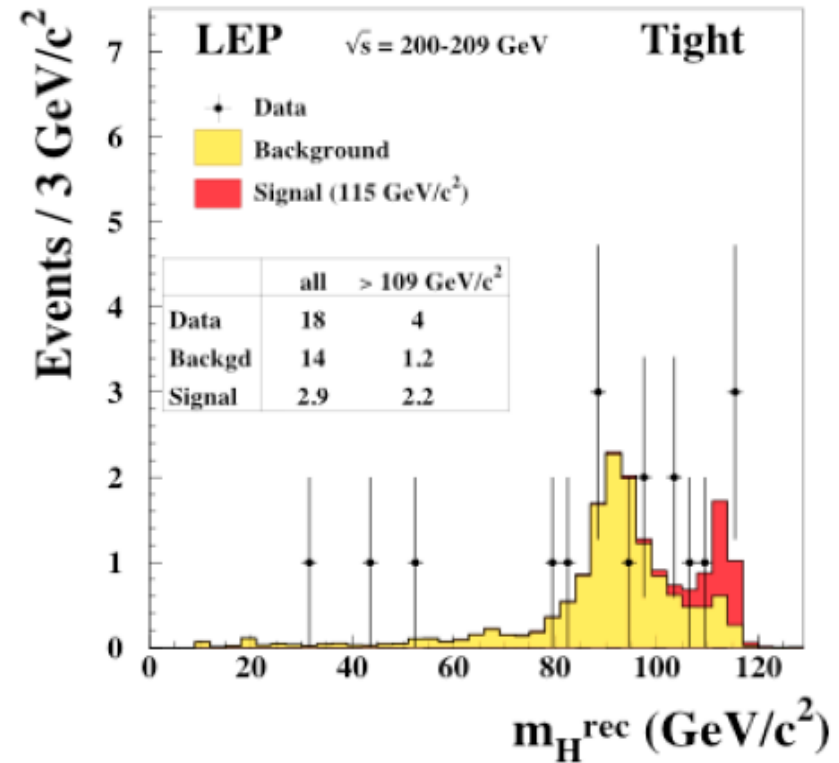
➔ **Le LEP au CERN (Genève)** de 1989 à 2000 (collisions électron-positon à la masse du Z, puis à 130 GeV et 209 GeV)

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