

Le détecteur ATLAS et la découverte du boson de Higgs

Yann Coadou



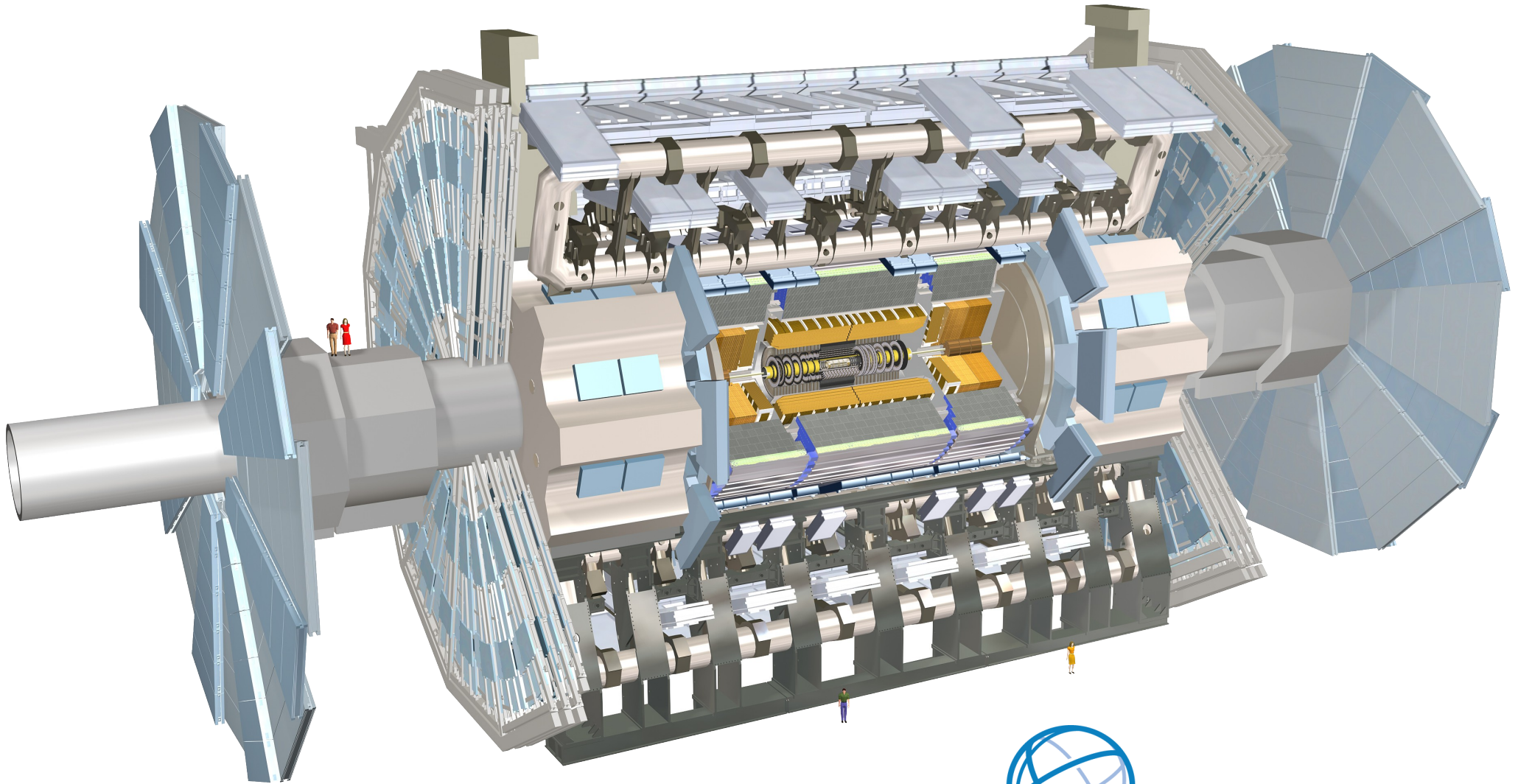
Summer Camp

16 juin 2016

Centre de physique des particules de Marseille

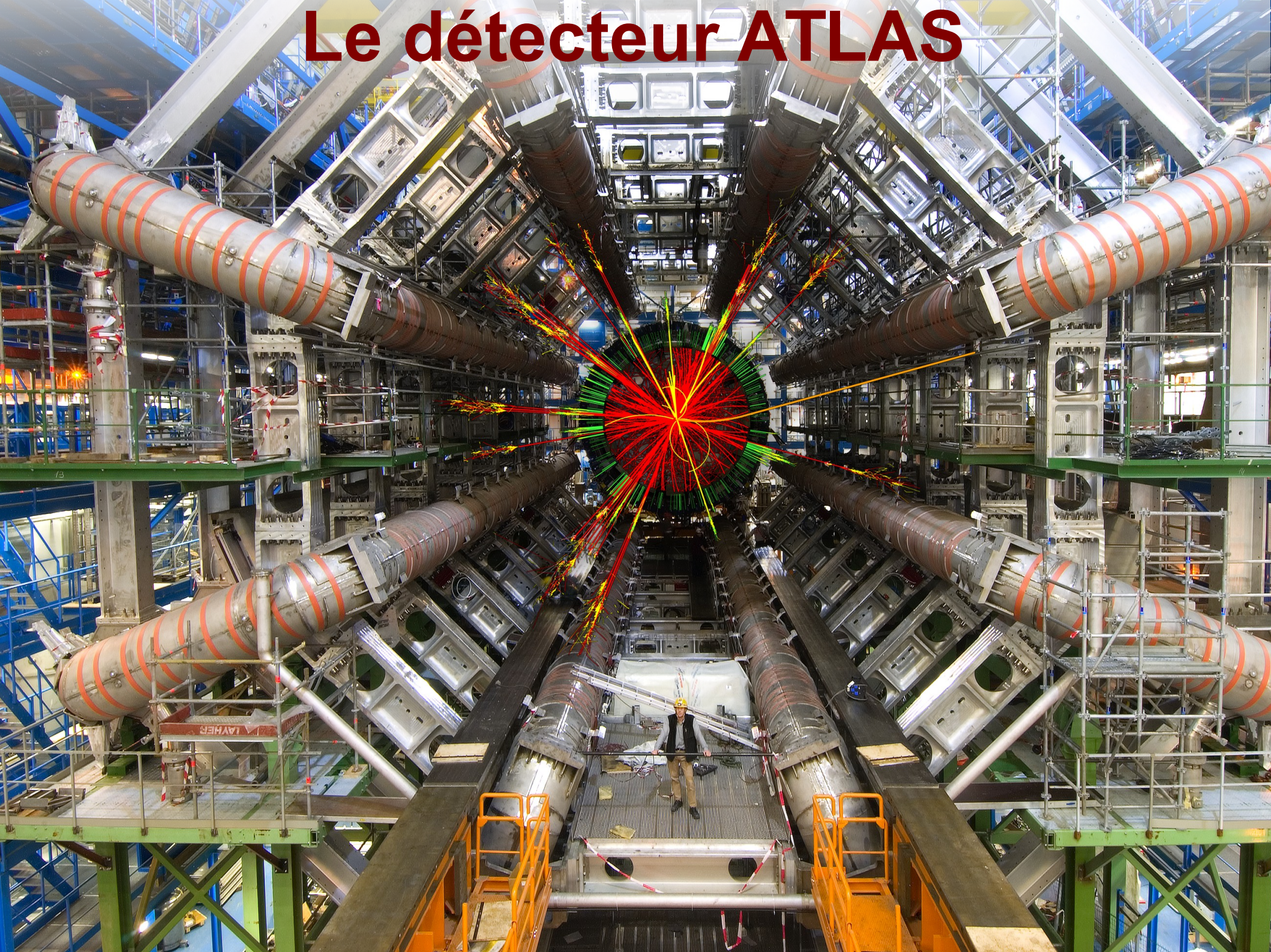


Le détecteur ATLAS



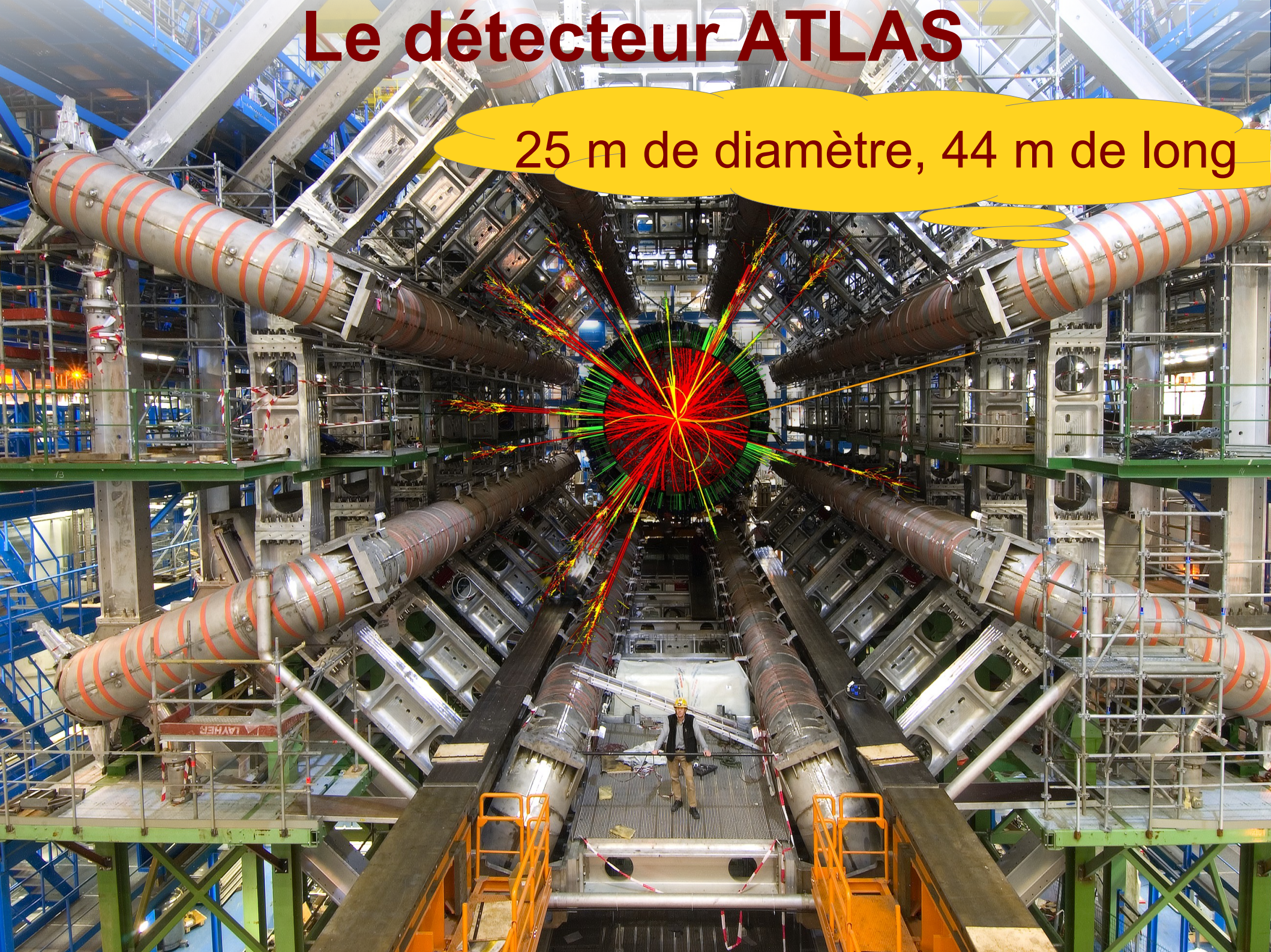
ATLAS
EXPERIMENT

Le détecteur ATLAS



Le détecteur ATLAS

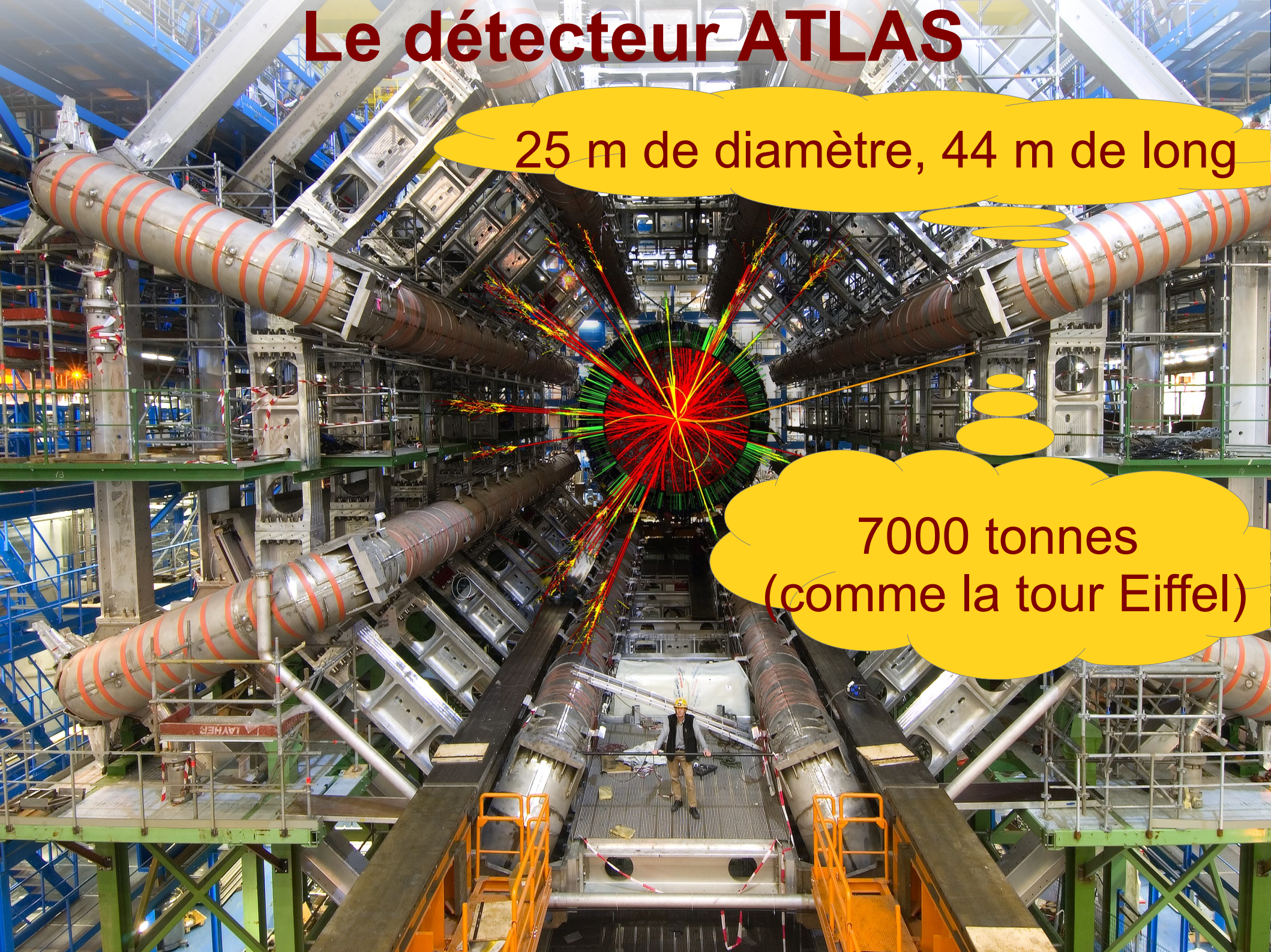
25 m de diamètre, 44 m de long



Le détecteur ATLAS

25 m de diamètre, 44 m de long

7000 tonnes
(comme la tour Eiffel)

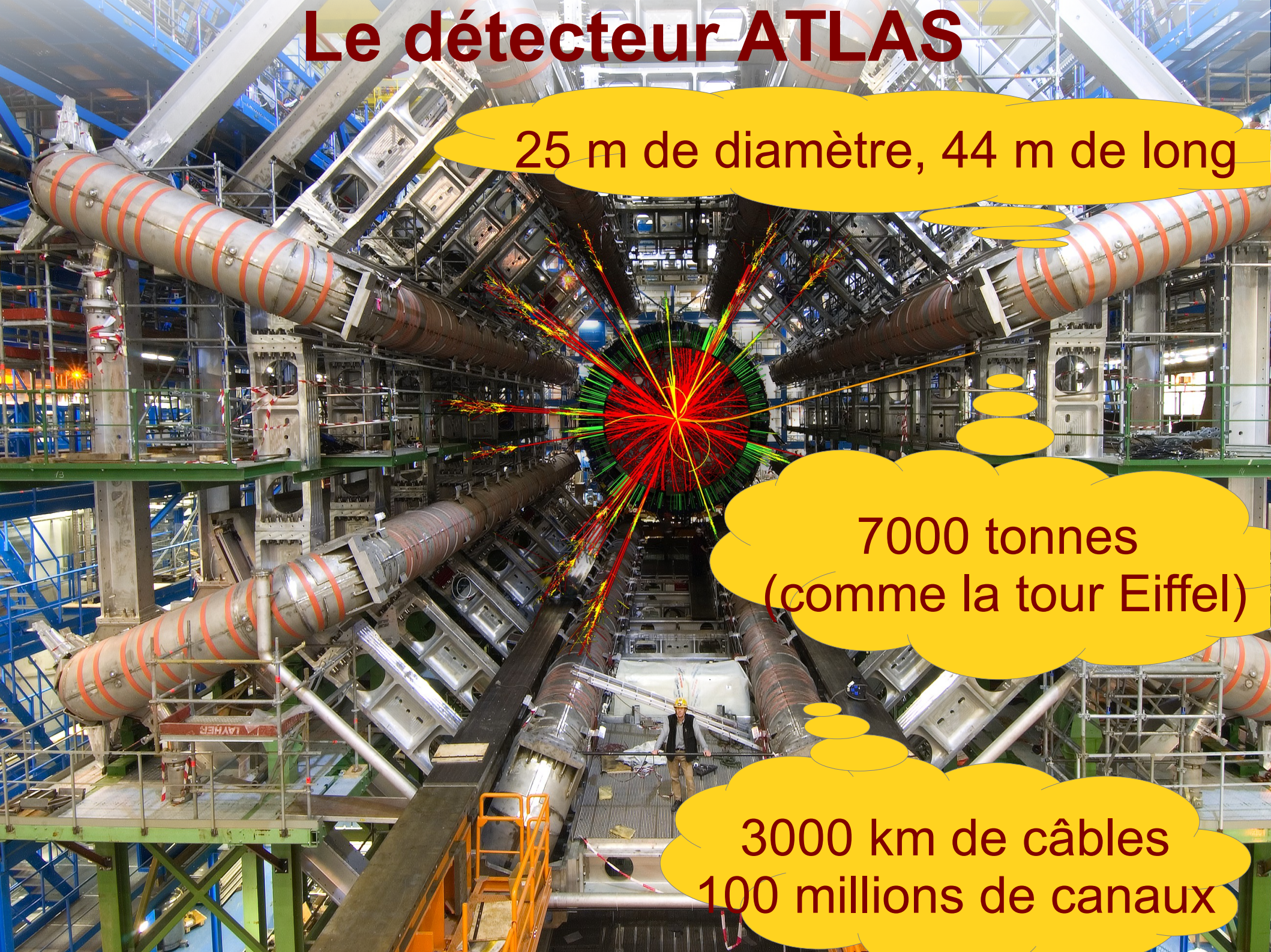


Le détecteur ATLAS

25 m de diamètre, 44 m de long

7000 tonnes
(comme la tour Eiffel)

3000 km de câbles
100 millions de canaux



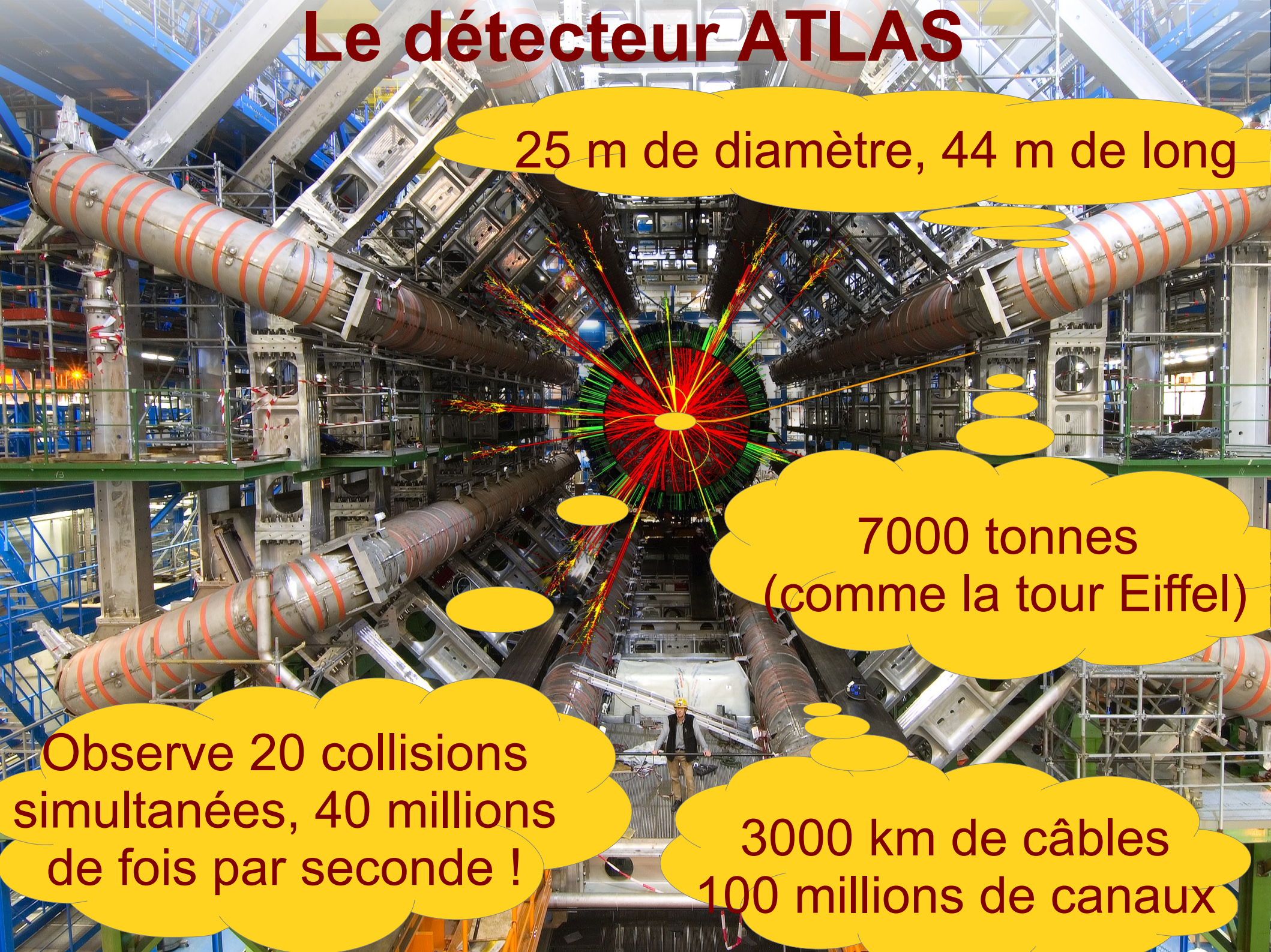
Le détecteur ATLAS

25 m de diamètre, 44 m de long

7000 tonnes
(comme la tour Eiffel)

Observe 20 collisions
simultanées, 40 millions
de fois par seconde !

3000 km de câbles
100 millions de canaux



Le détecteur ATLAS

25 m de diamètre, 44 m de long

En France :
6 laboratoires CNRS,
1 CEA, 400 personnes
(physiciens, ingénieurs,
étudiants)

7000 tonnes
(comme la tour Eiffel)

Observe 20 collisions
simultanées, 40 millions
de fois par seconde !

3000 km de câbles
100 millions de canaux



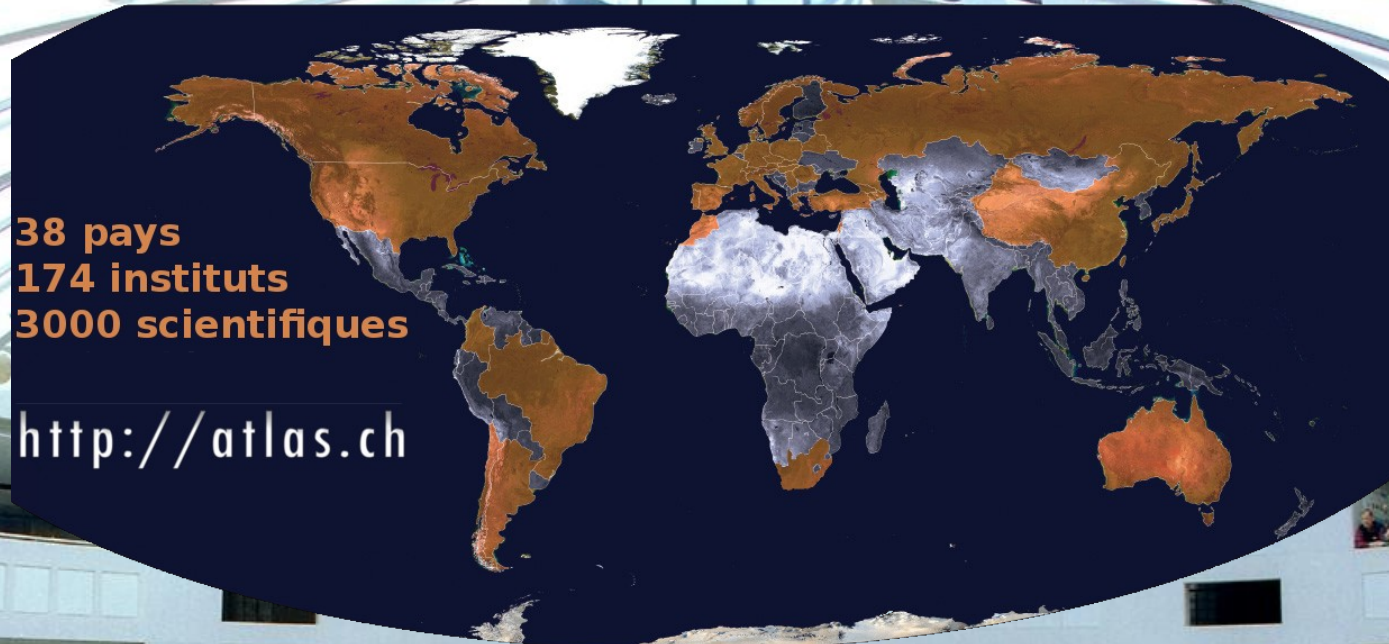
La collaboration ATLAS



La collaboration ATLAS

38 pays
174 instituts
3000 scientifiques

<http://atlas.ch>

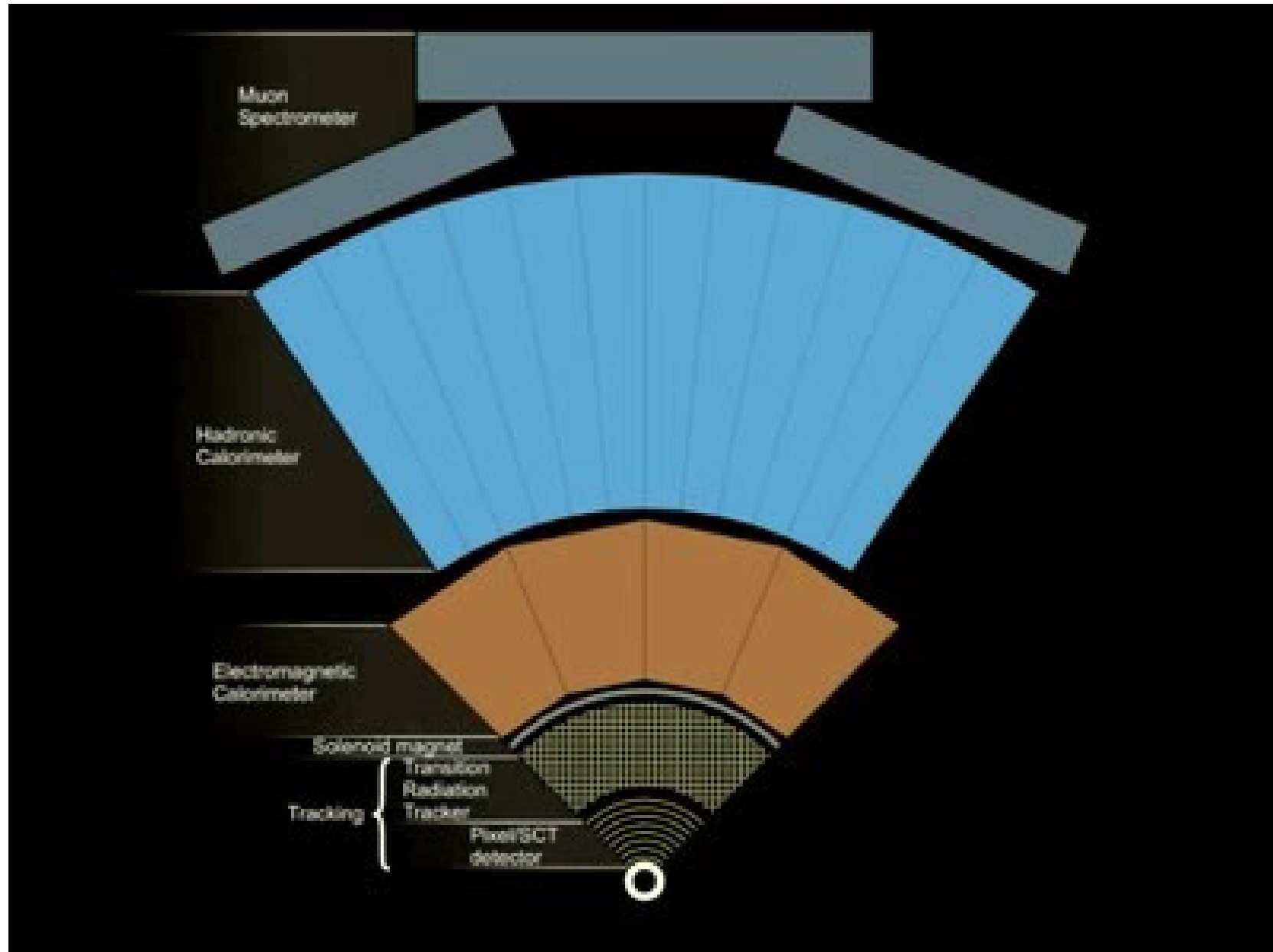


ATLAS
EXPERIMENT

Le détecteur ATLAS avec des explications



Interaction des particules avec le détecteur

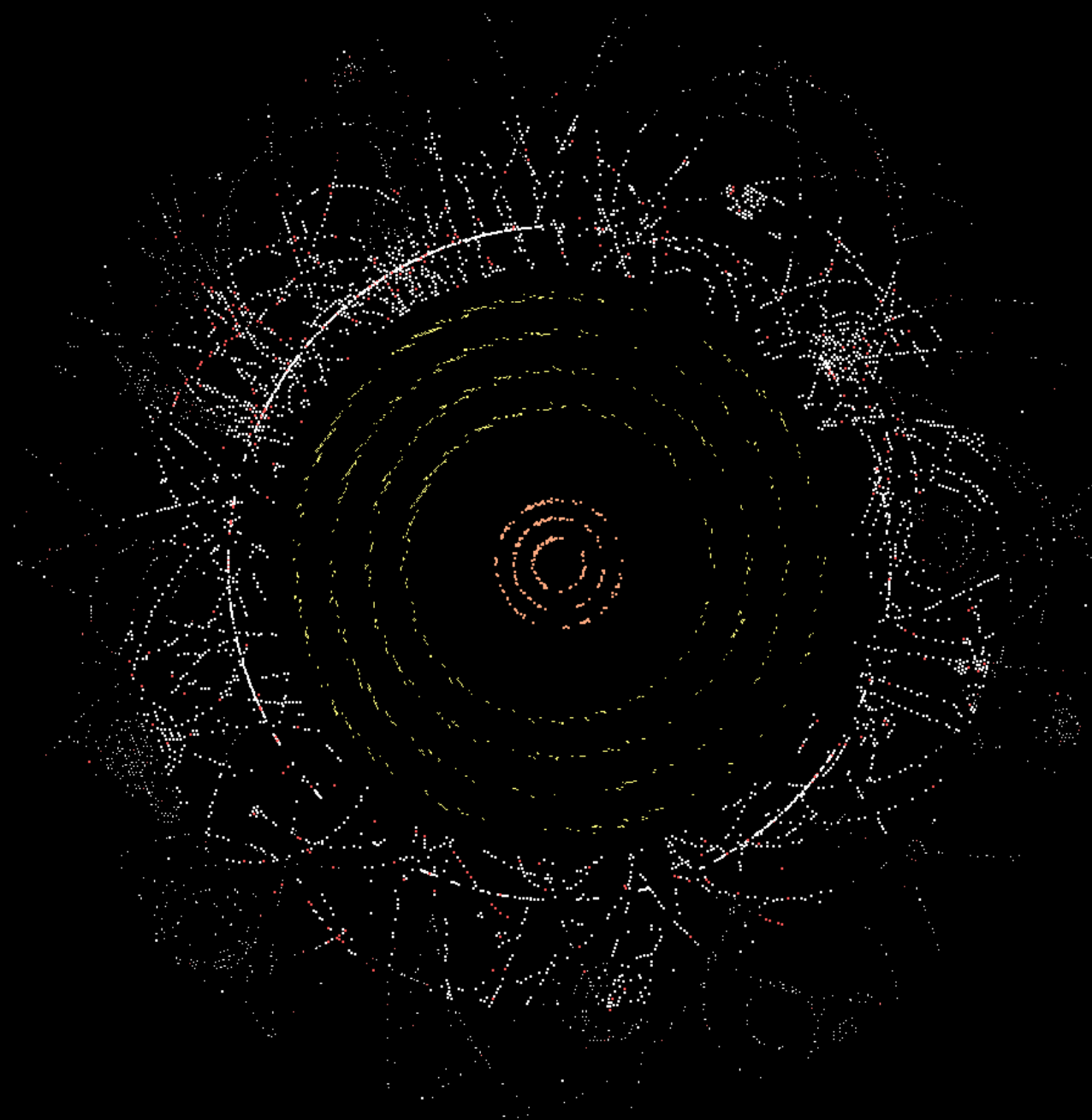


Mesurer le passage des particules dans le détecteur à pixels



- 80 Mégapixels
- 40 millions d'images par seconde
- 1,7 m² de silicium

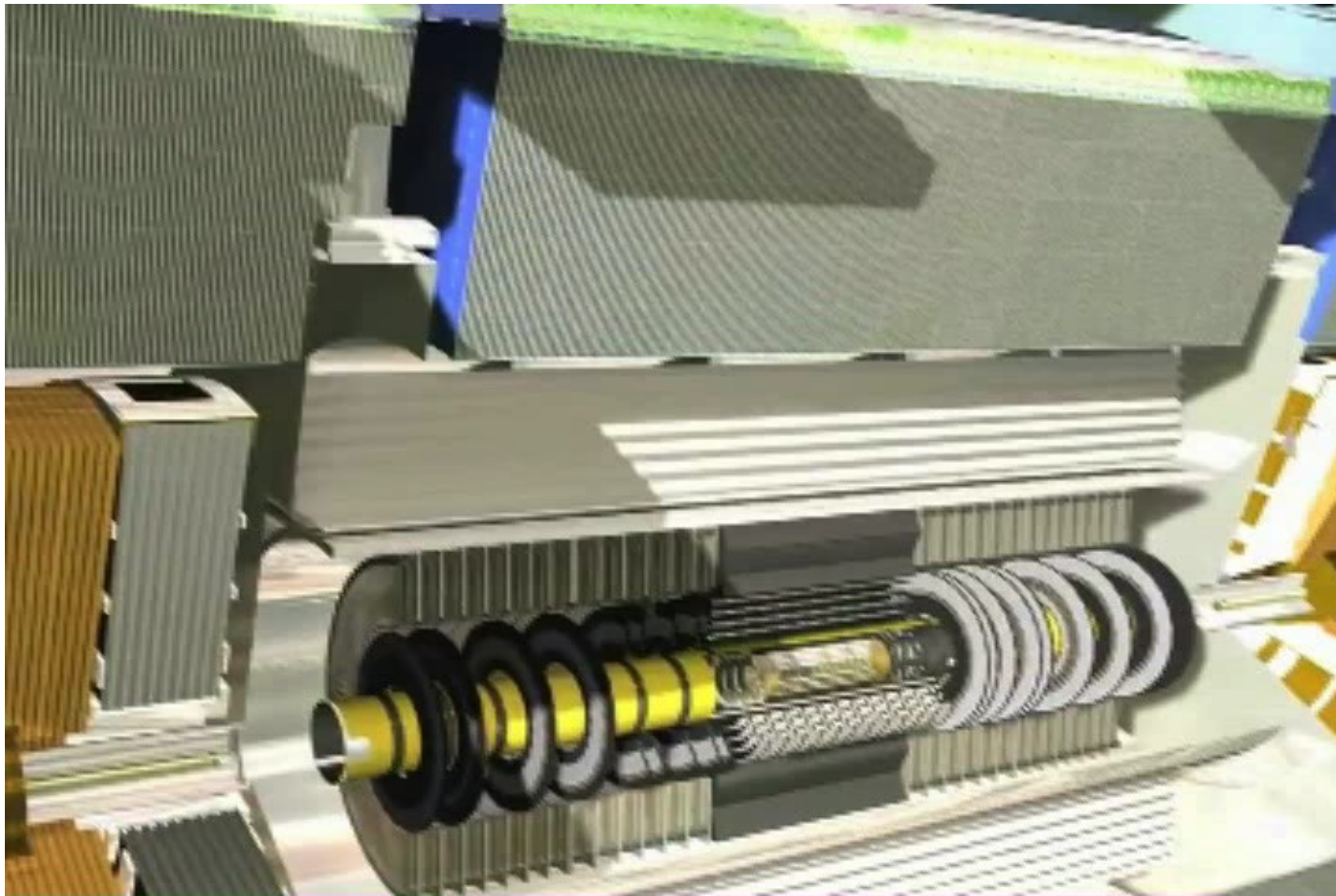
Passage des particules



Reconstruction des trajectoires



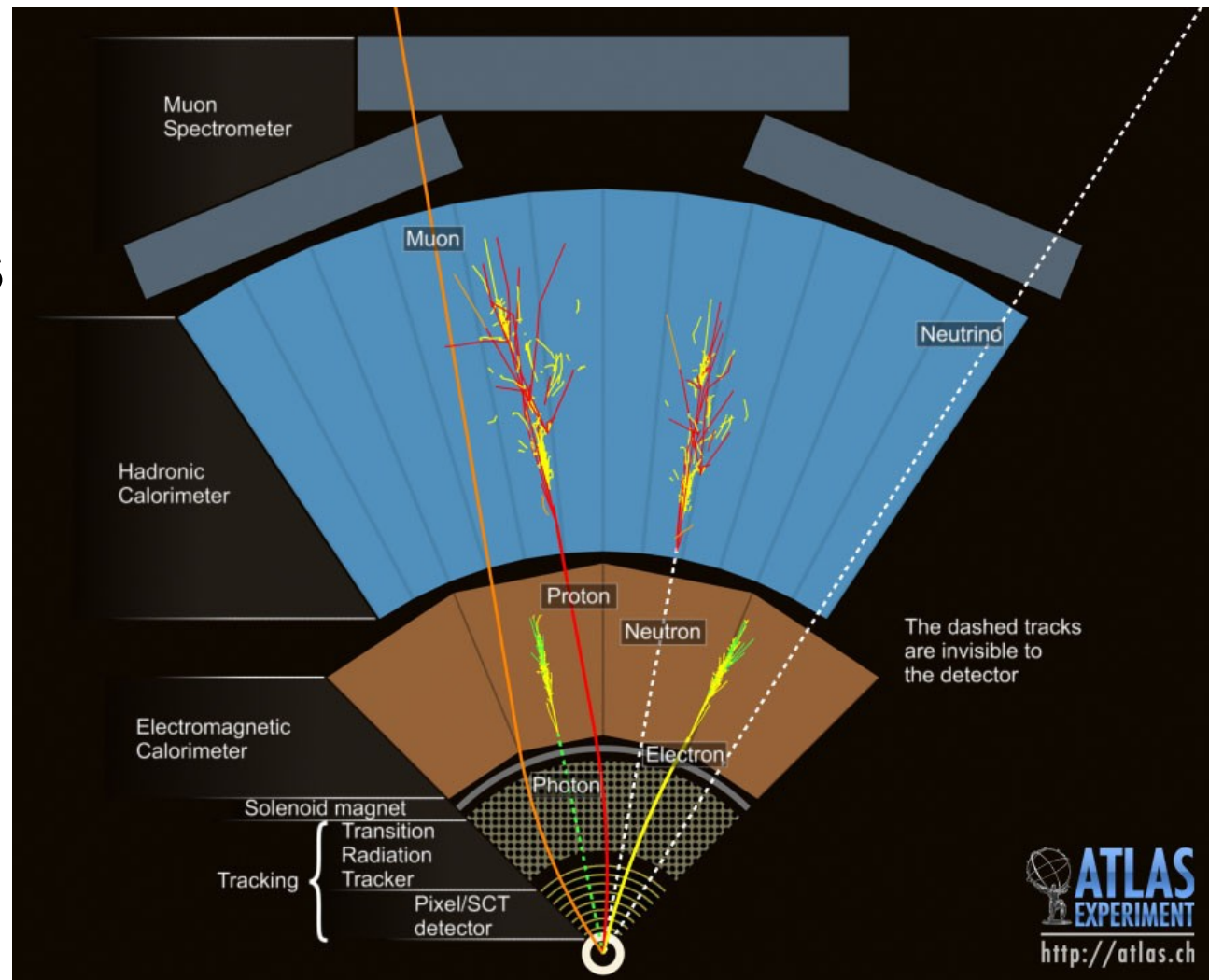
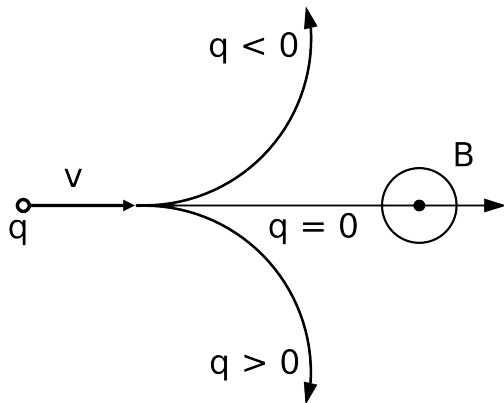
Mesurer l'énergie des particules dans le calorimètre électromagnétique



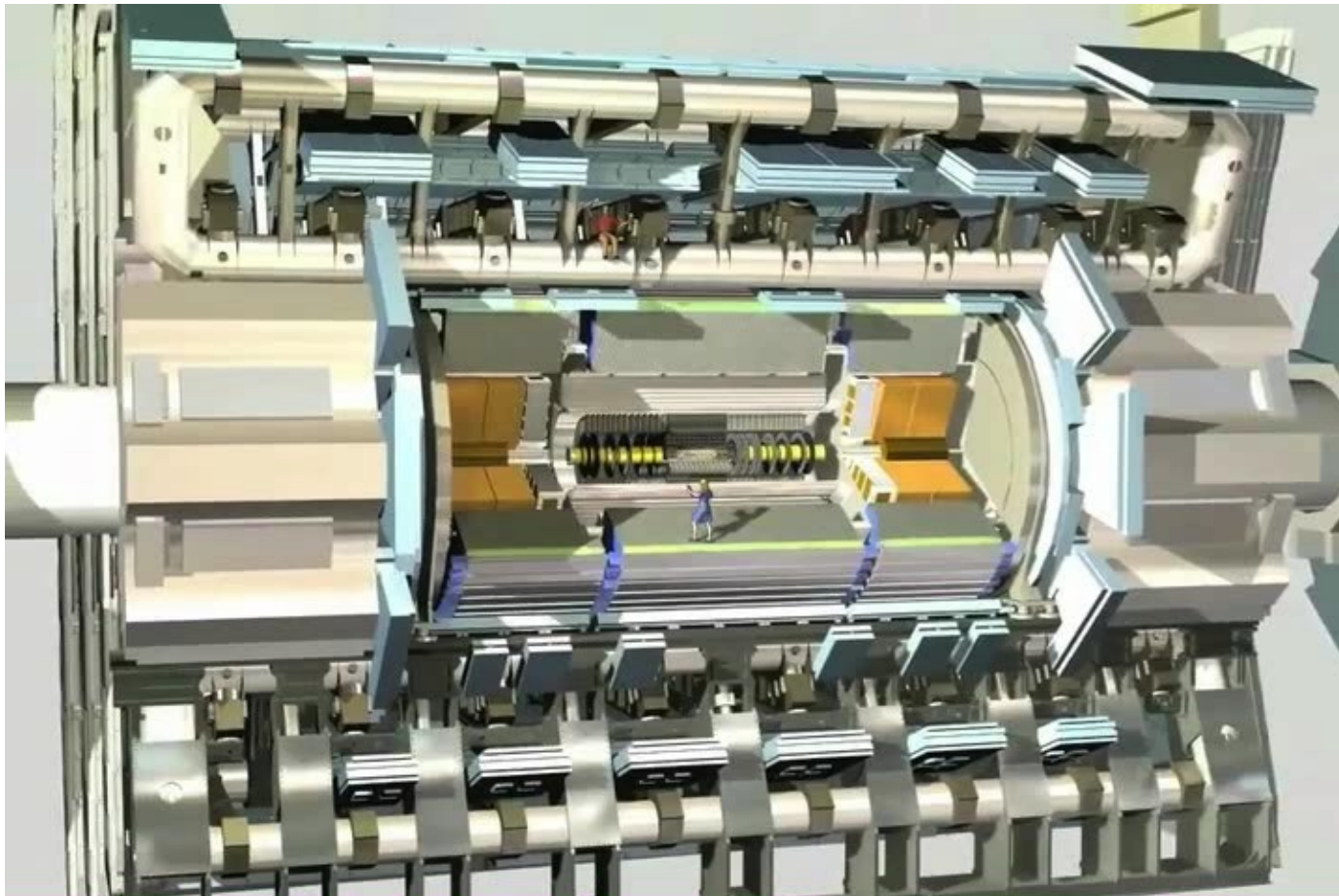
- Argon liquide à -183°C

Identifier les électrons/positrons et photons

- Gerbe dans le calorimètre EM
- e^+/e^- : particule chargée, trace dans le trajectographe
- Courbure de la trace $\rightarrow$ signe de la charge électrique



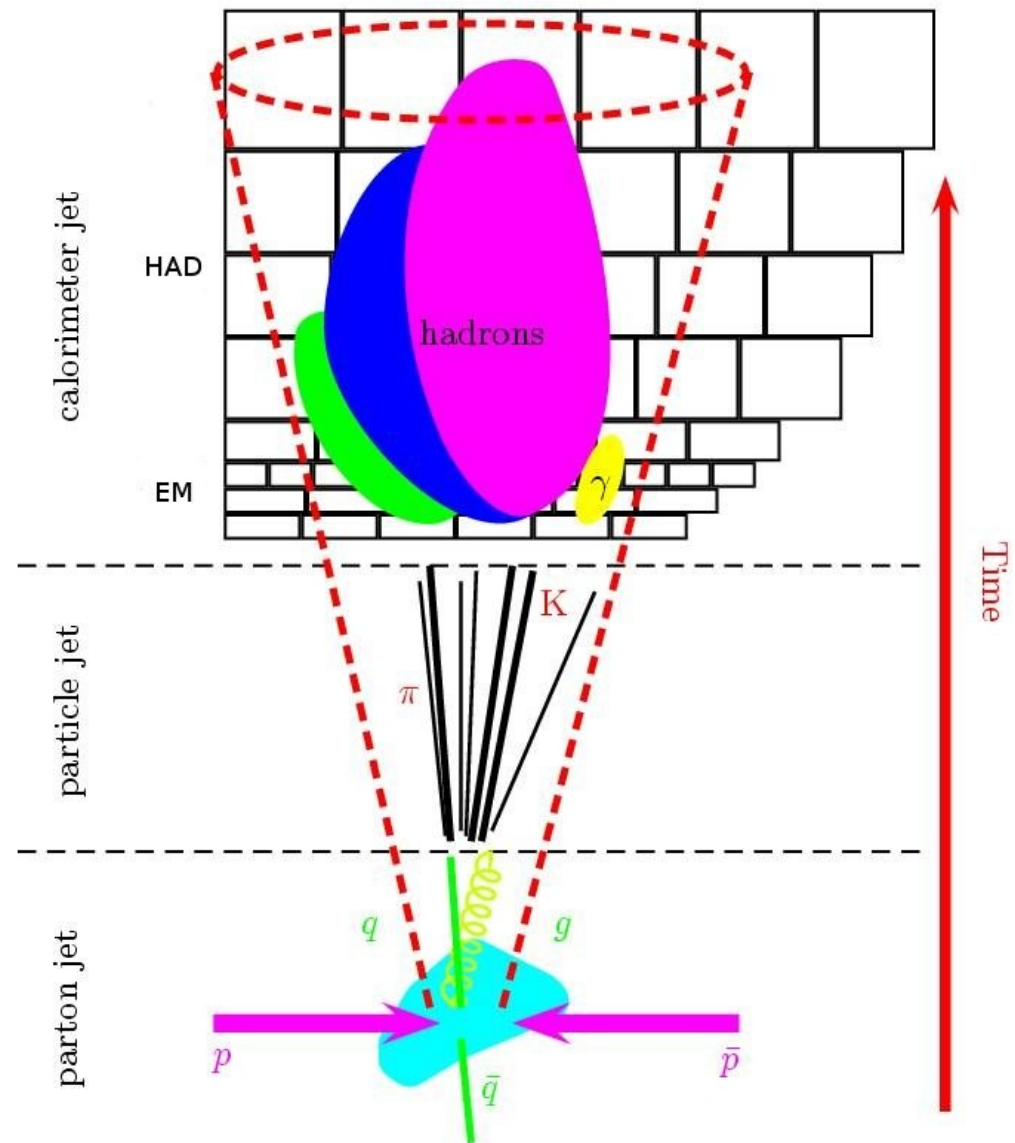
Mesurer l'énergie des particules dans le calorimètre hadronique



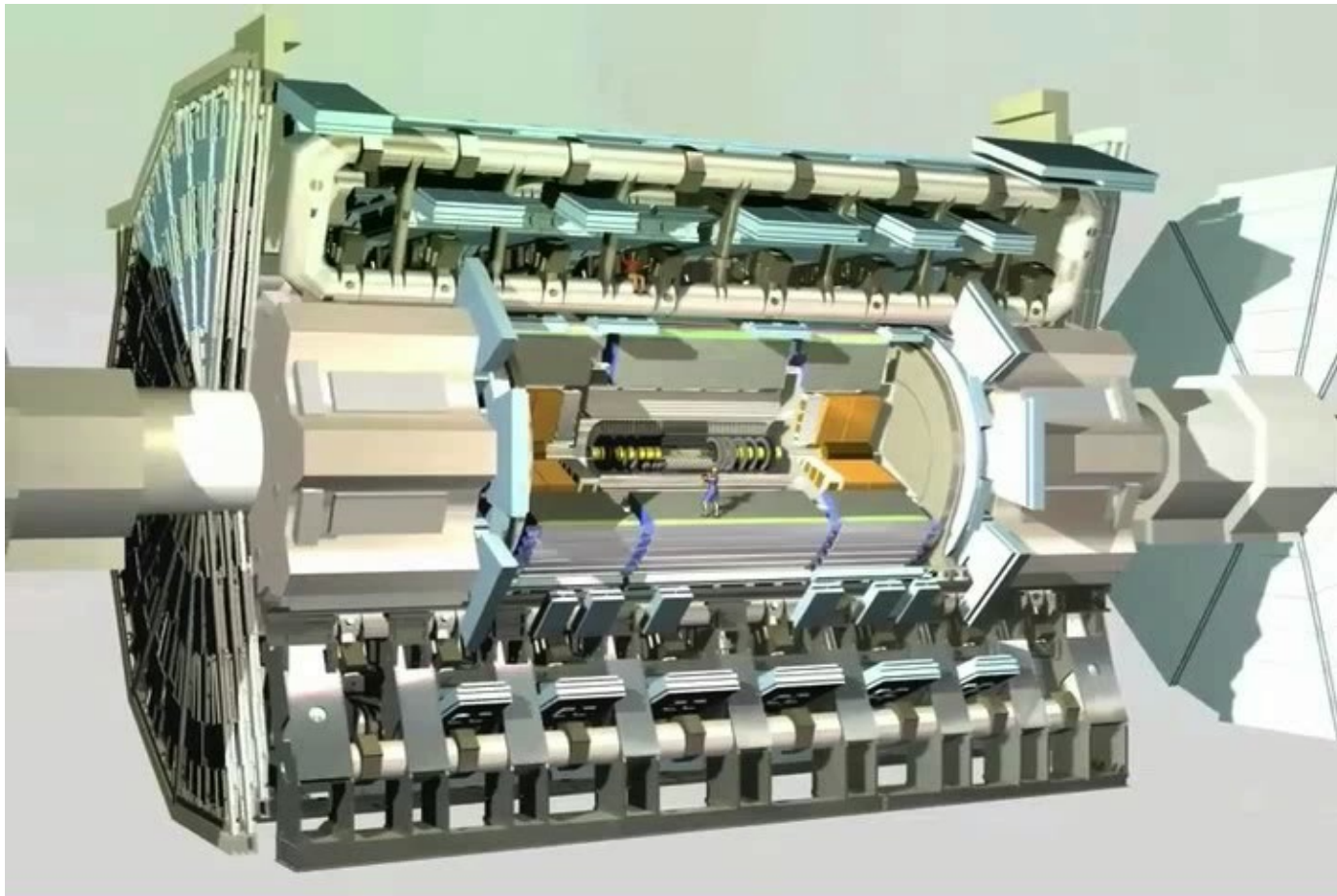
- 500 000 tuiles de plastique scintillant

Identifier les quarks/antiquarks et gluons

- Jamais seuls, forment des hadrons
- Gerbes dans le calorimètre EM et surtout hadronique
- Particules chargées, traces dans le trajectographe



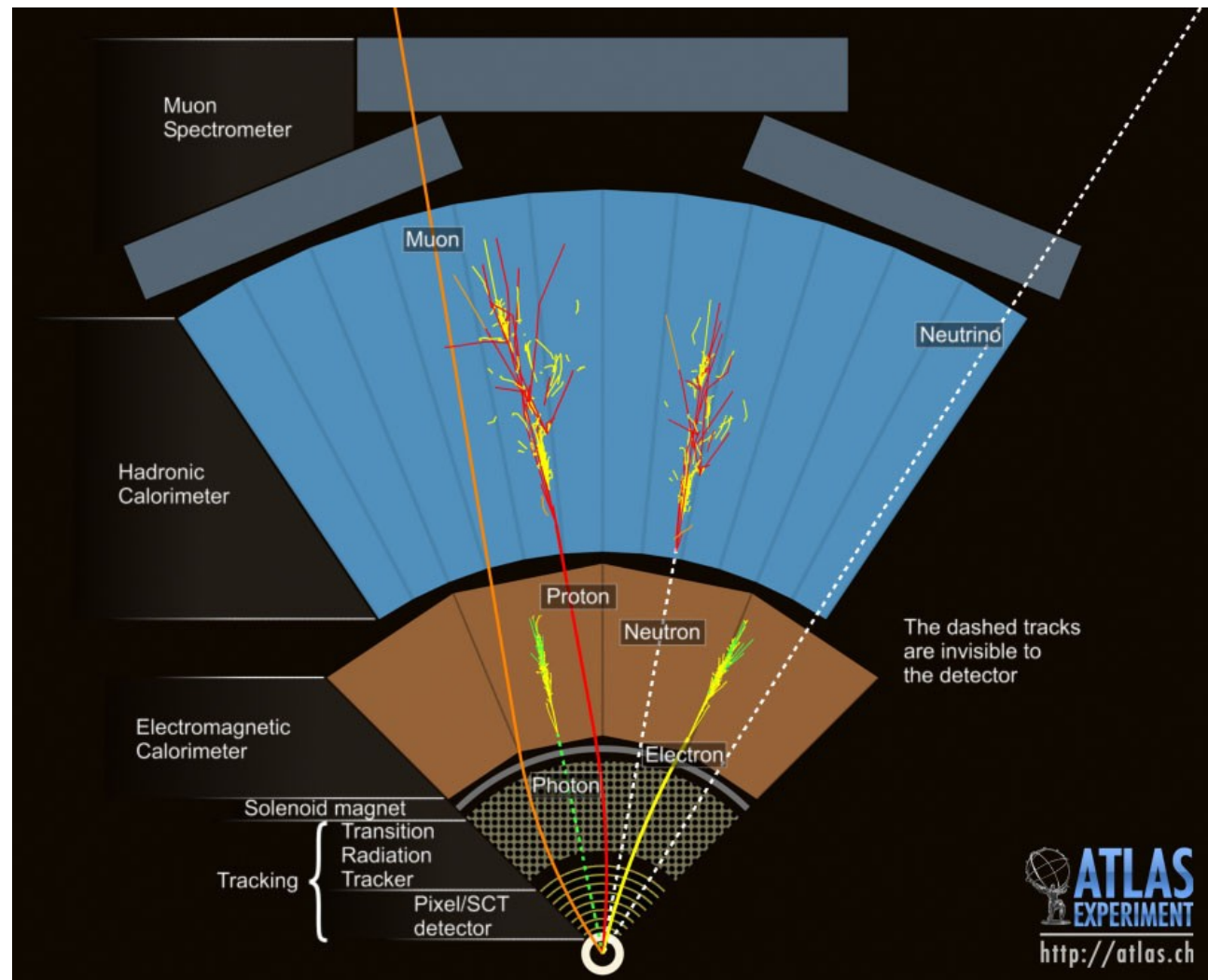
Mesurer le passage des particules dans le système à muons



- Champ électrique de 5000 V/mm
- Alignement par faisceaux laser
- Précision de l'ordre de l'épaisseur d'un cheveu sur 25 m de distance

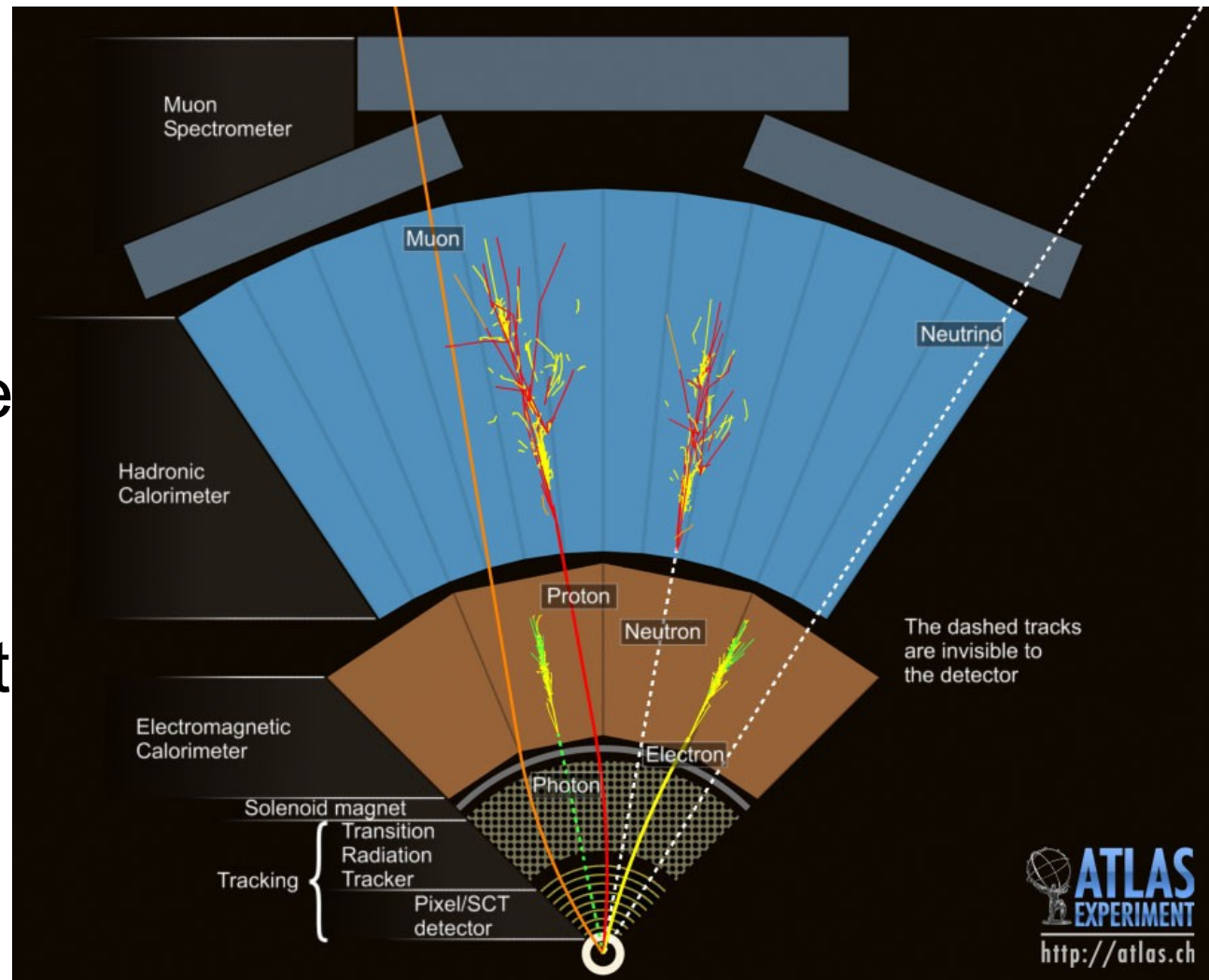
Identifier les muons et antimuons

- Particule chargée, trace dans le trajectographe
- Un peu d'énergie dans le calorimètre
- Trace dans le détecteur à muons
- Courbure de la trace → signe de la charge électrique
- Continue sa course à l'extérieur d'ATLAS



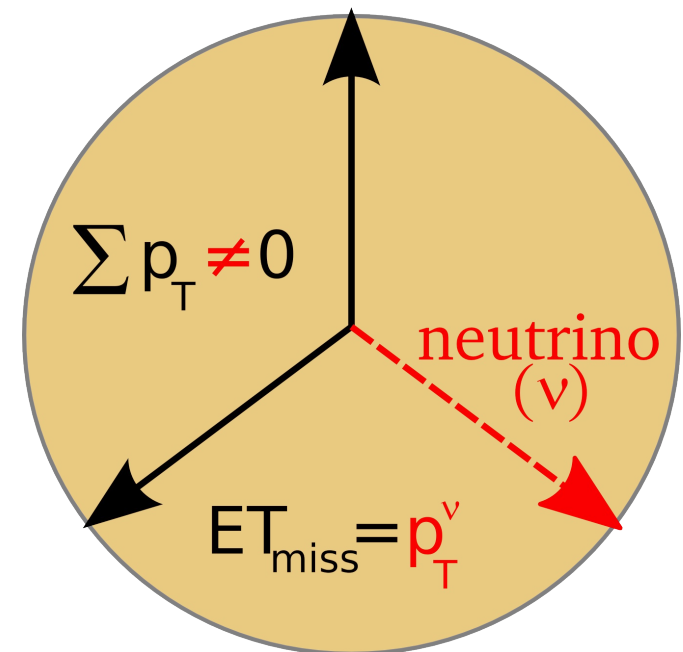
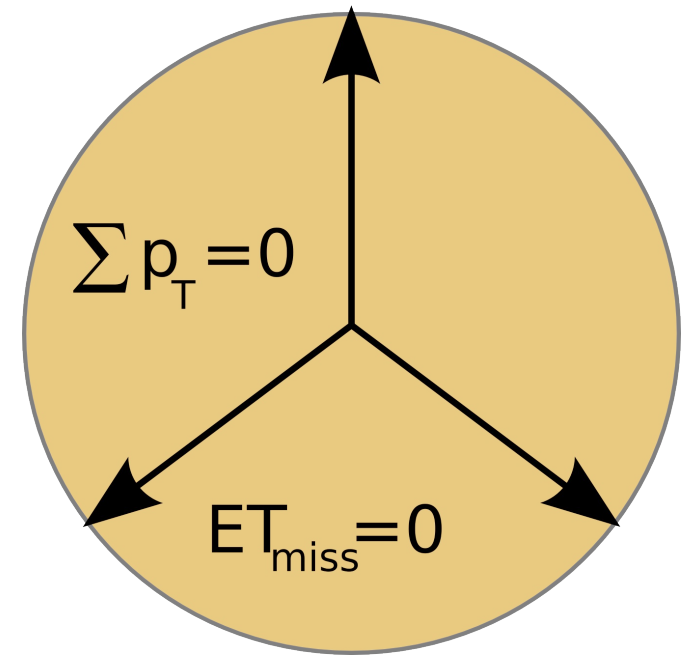
Identifier les neutrinos

- Particule neutre qui n'interagit presque pas avec la matière
- Aucune trace dans le détecteur
- Identifié par induction, en utilisant la conservation de l'impulsion



Energie transverse manquante

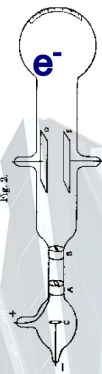
- Sans neutrino
 - ▶ 3 particules reconstruites
 - ▶ Somme des impulsions dans le plan transverse : 0
 - ▶ Donc $E_T^{\text{miss}} = 0$
- Avec un neutrino
 - ▶ On « voit » seulement une partie de l'événement
 - ▶ La somme des impulsions n'est pas nulle
 - ▶ La différence est E_T^{miss} , associée au neutrino



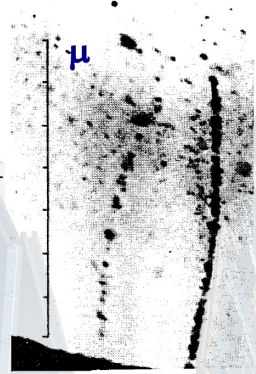
Le modèle standard redécouvert

LHC 2010 : un siècle en un an

Découverte
historique



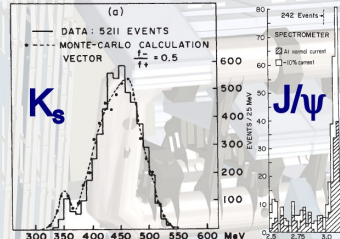
1897



1937



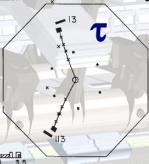
1947



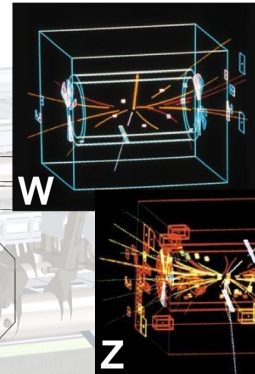
1964



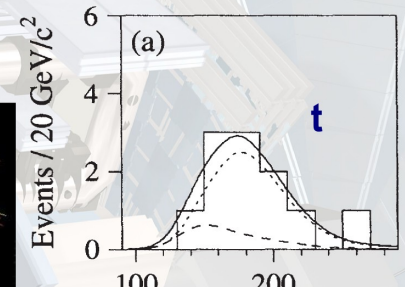
1974



1976



1983

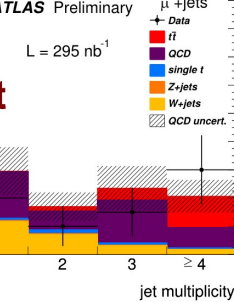
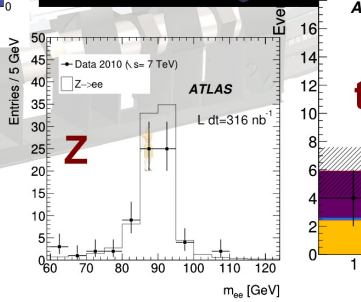
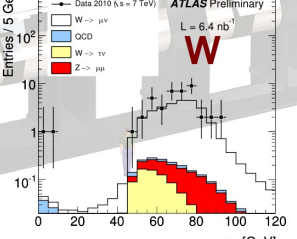
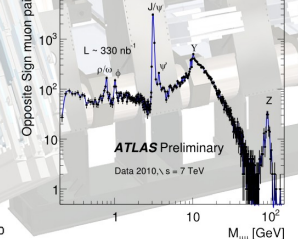
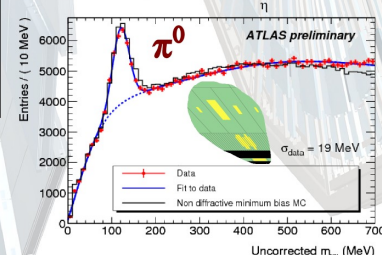
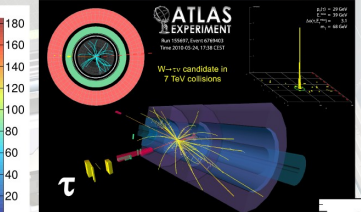
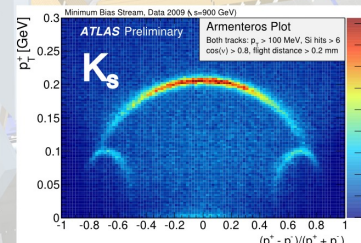
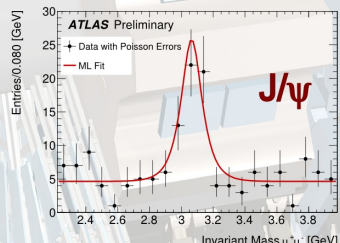
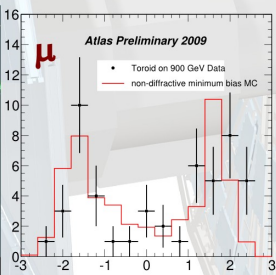
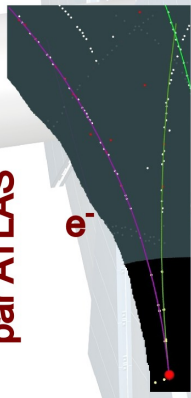


1995

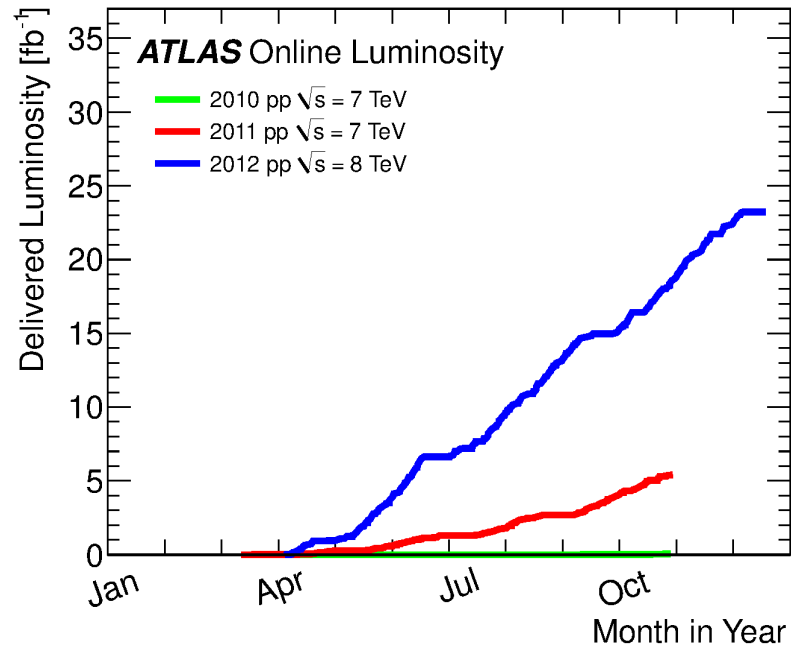
déc 2009

août 2010

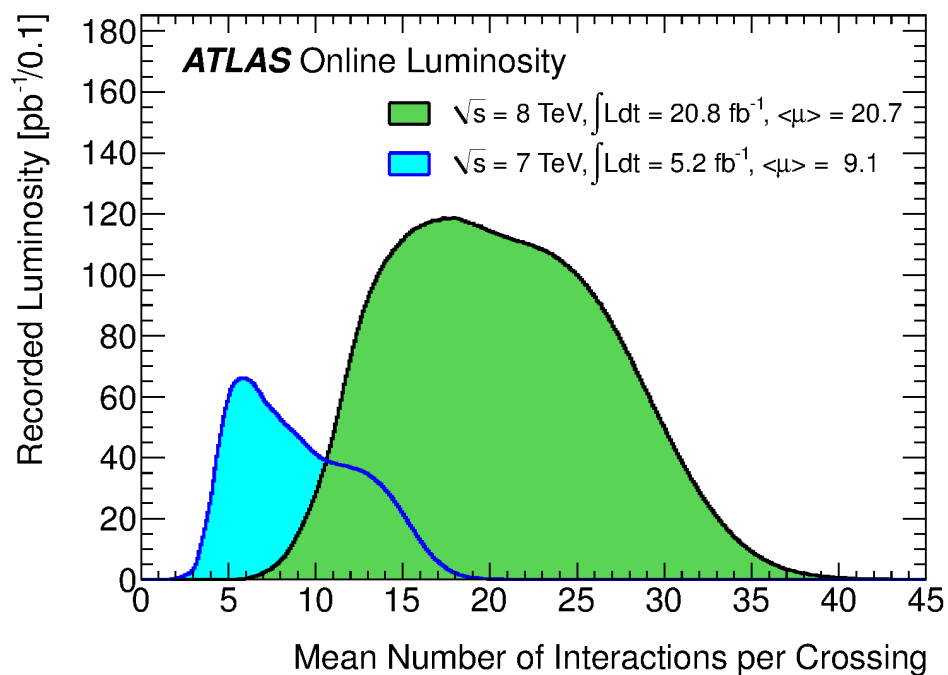
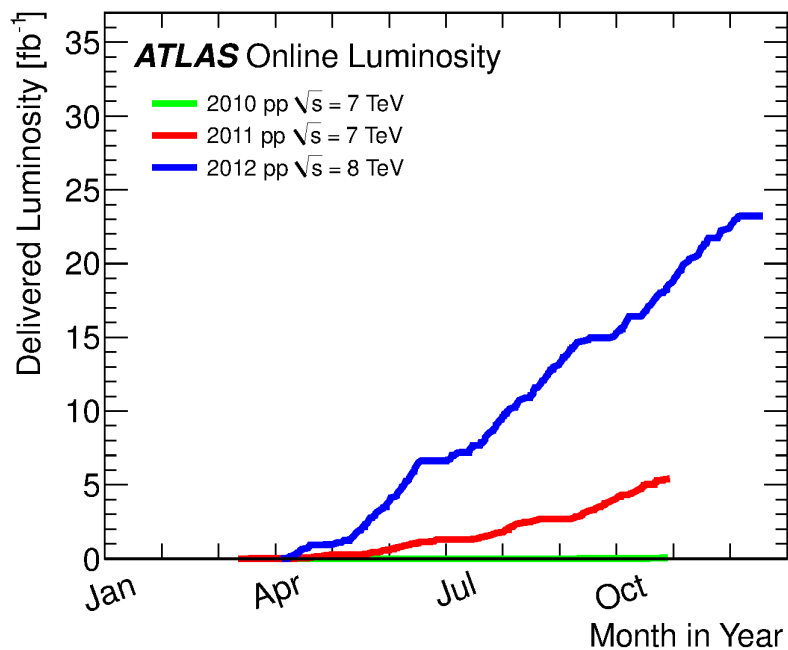
Redécouverte
par ATLAS



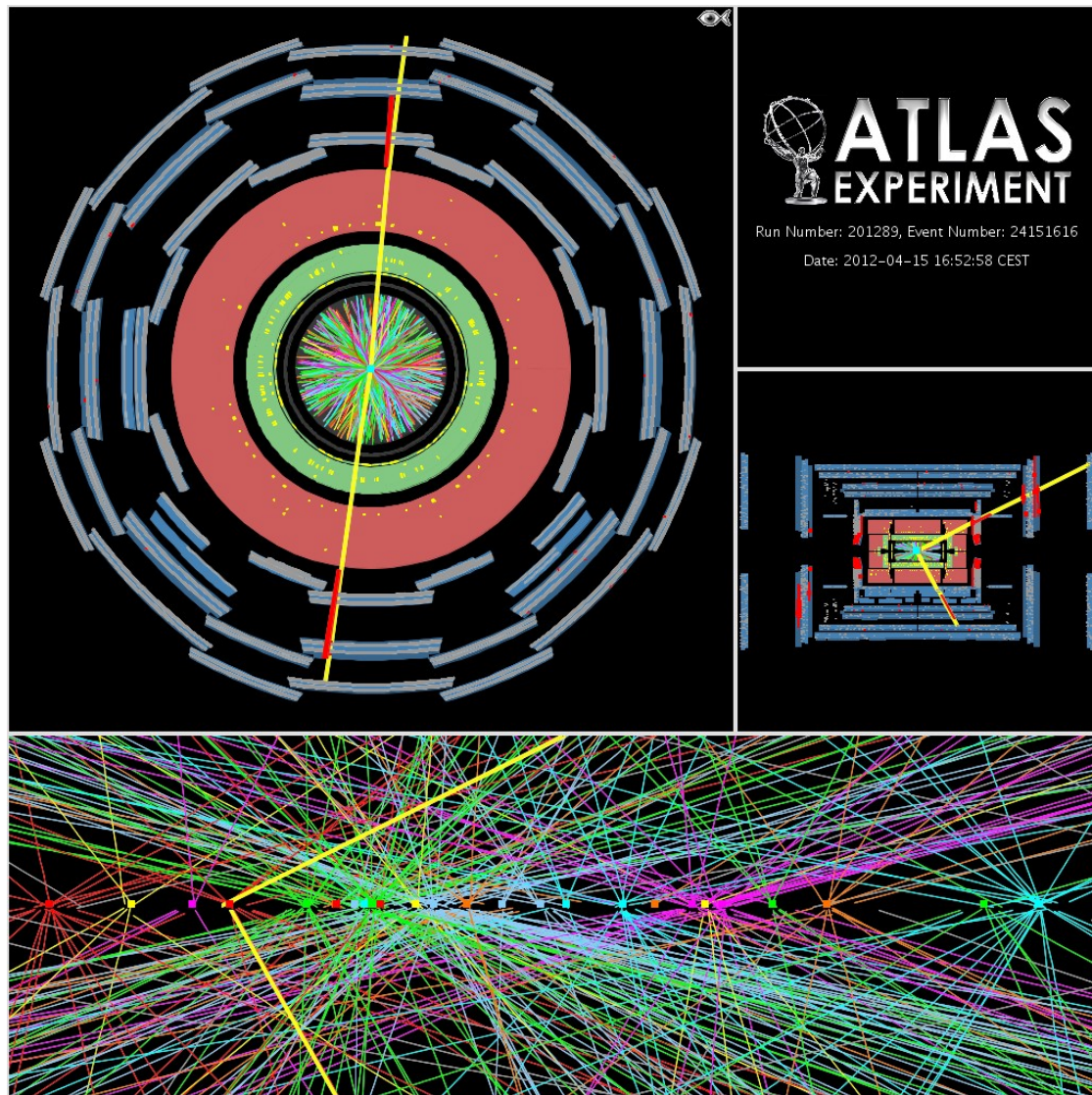
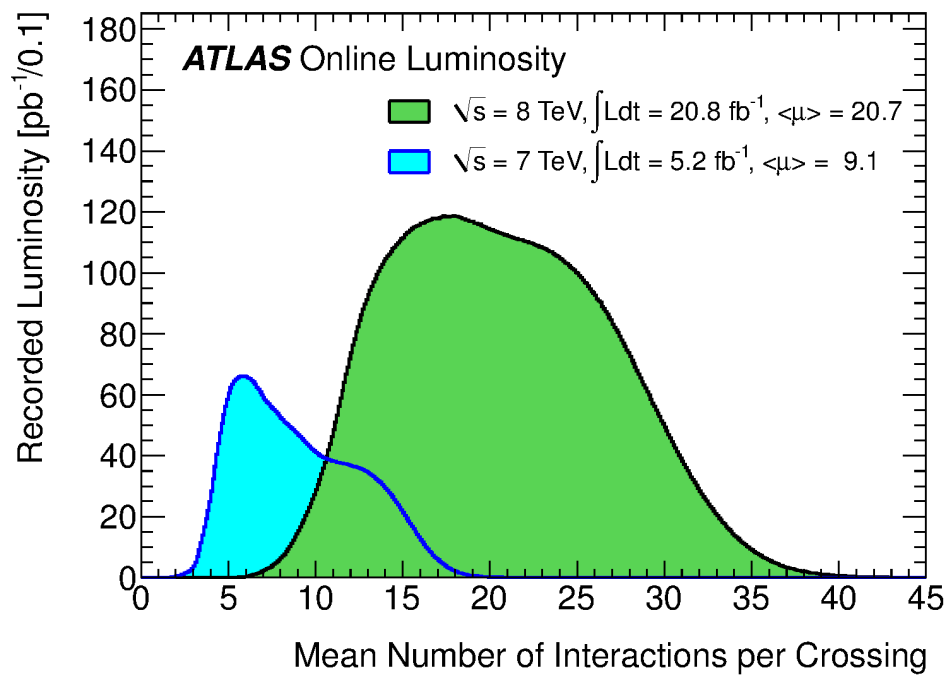
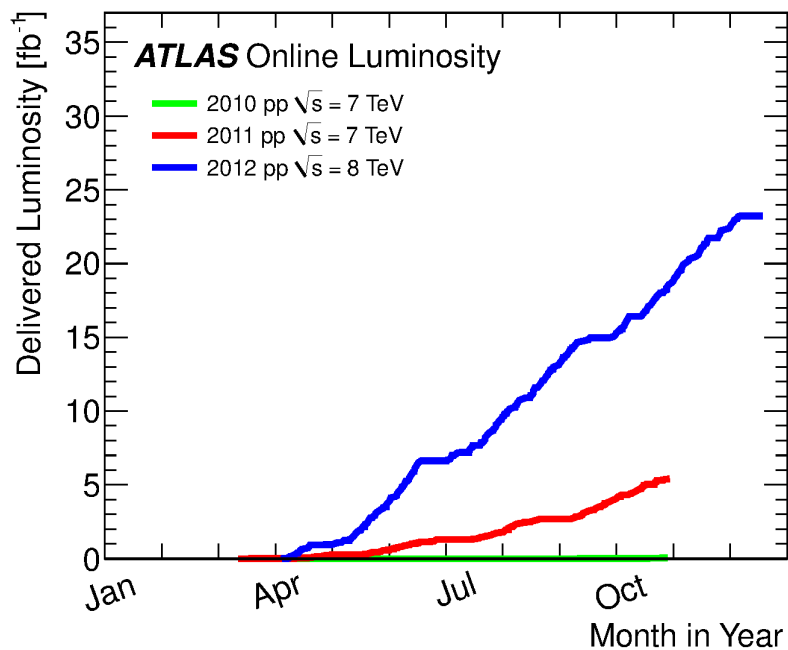
Accumulation des données



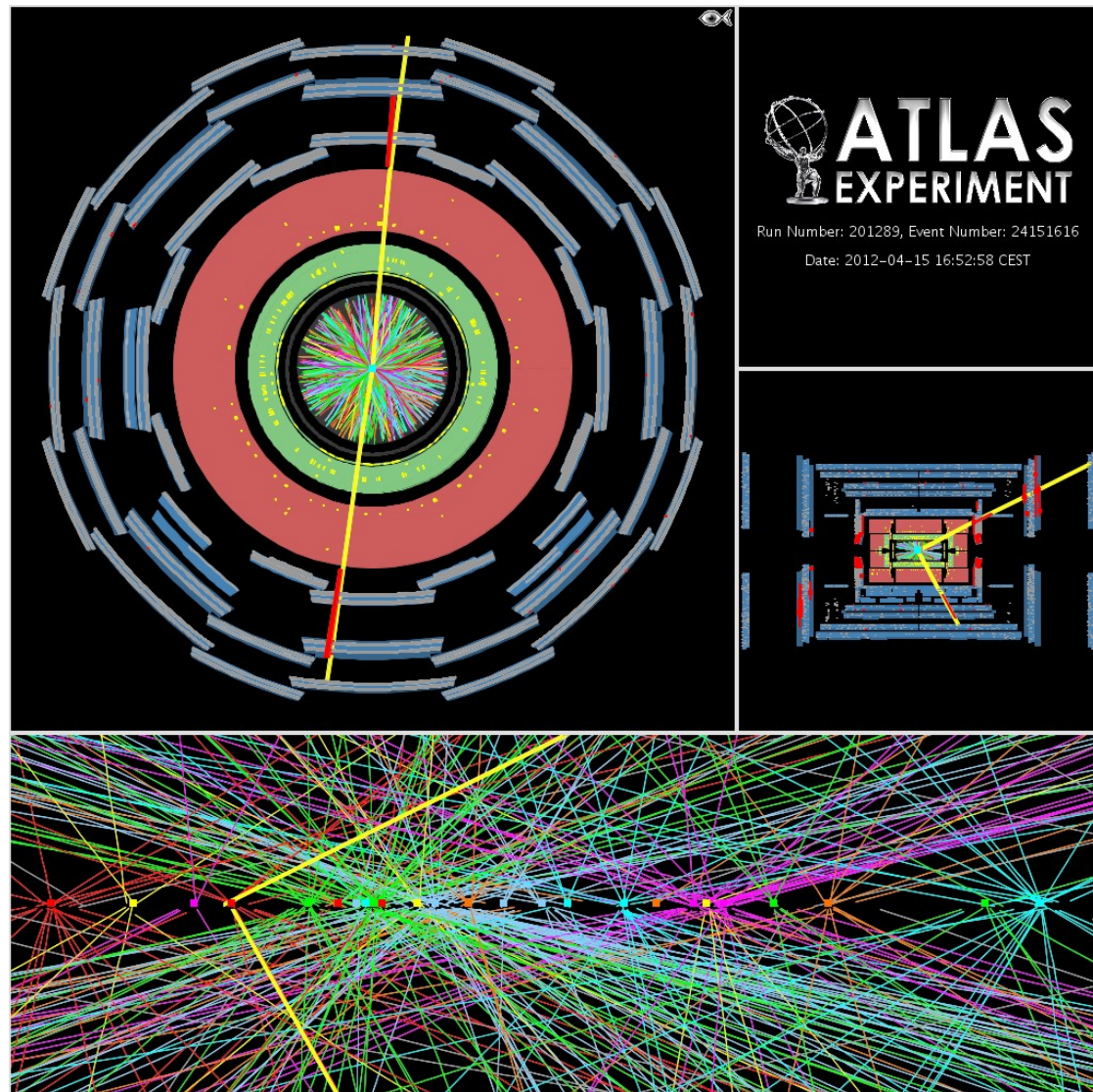
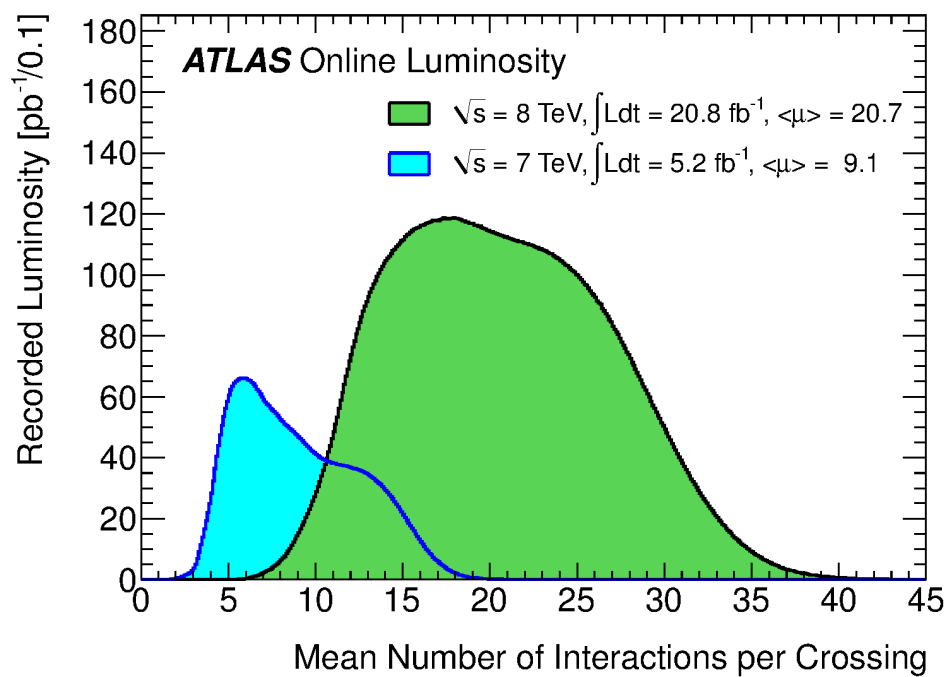
Accumulation des données



Accumulation des données



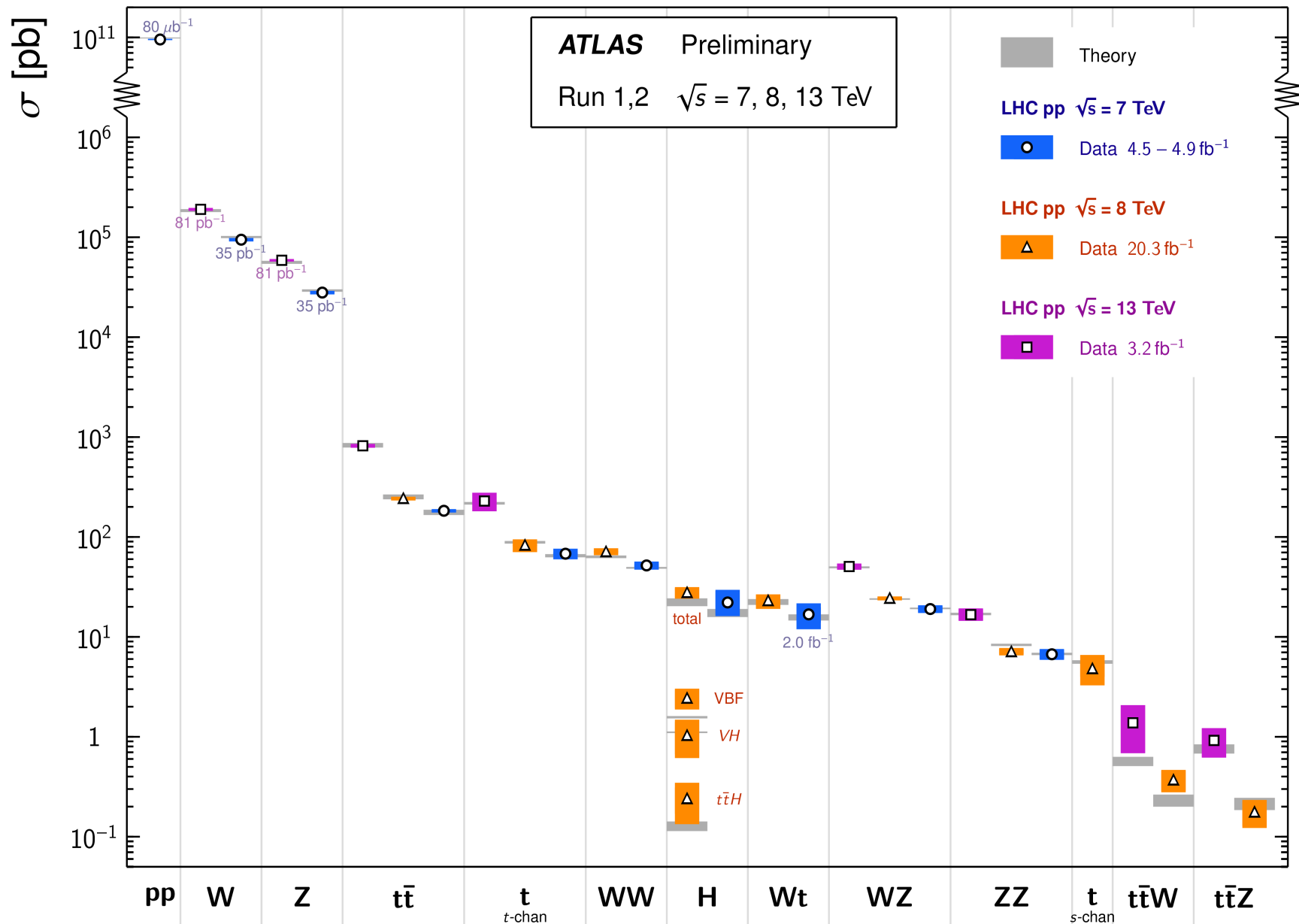
Accumulation des données



Modèle standard : état des lieux

Standard Model Total Production Cross Section Measurements

Status: June 2016



- Très bon accord avec les prédictions théoriques !

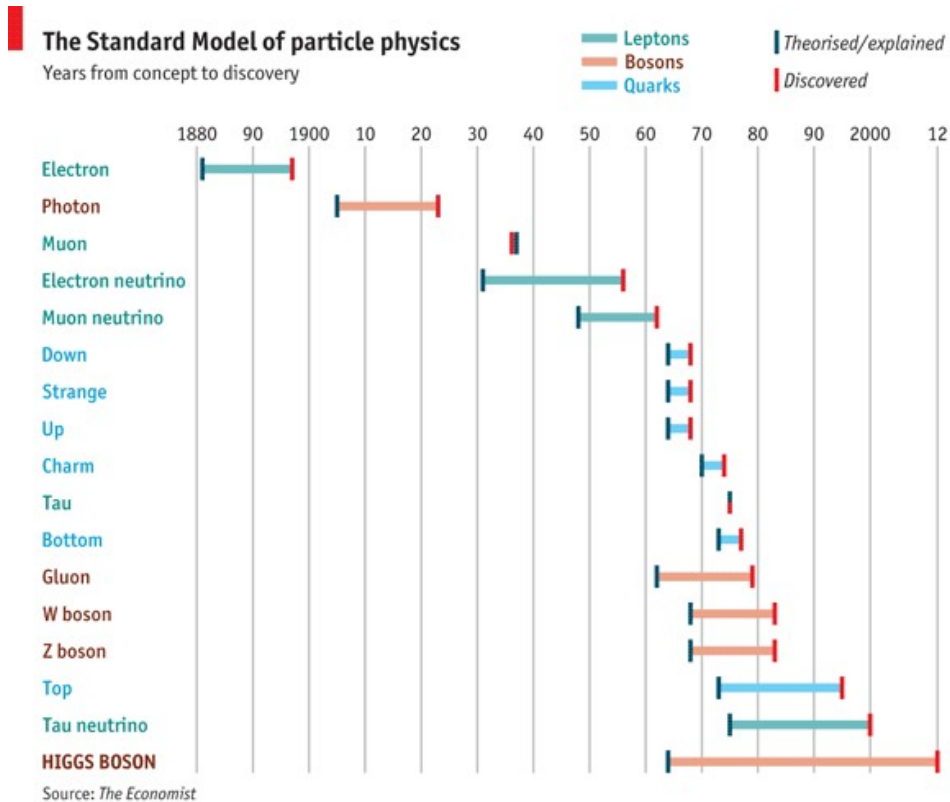
Status: June 2016



Le LHC en action



Une longue quête

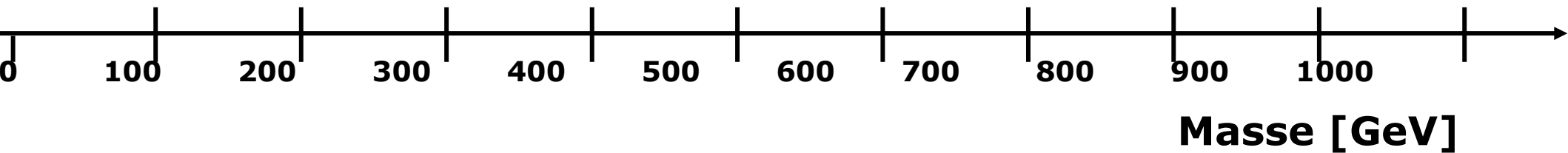


© The Economist

- Modèle standard : énorme succès, sauf que les particules n'ont pas de masse...
- Boson de Higgs : pièce essentielle pour accorder théorie et expérience
- 48 ans entre la prédiction théorique et la découverte expérimentale !
- Pourquoi ? La théorie prédit tout sur le boson de Higgs, sauf sa masse ! Il faut donc chercher partout...

La chasse au boson de Higgs

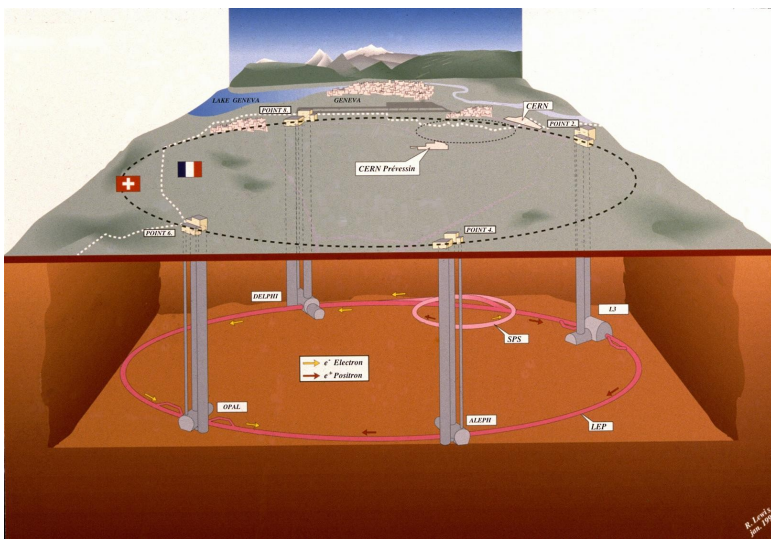
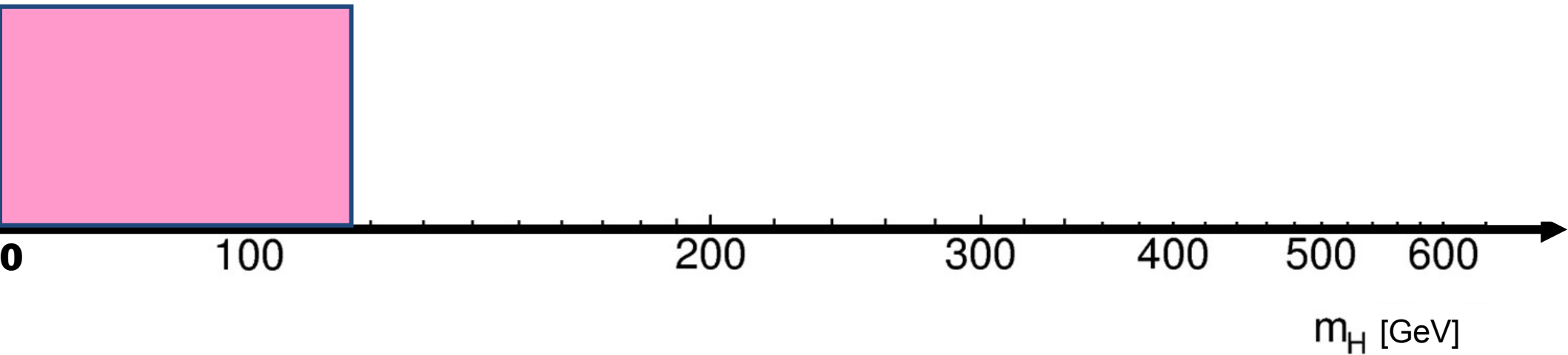
?



- Seule contrainte théorique : $\text{masse} < 1000 \text{ GeV}$

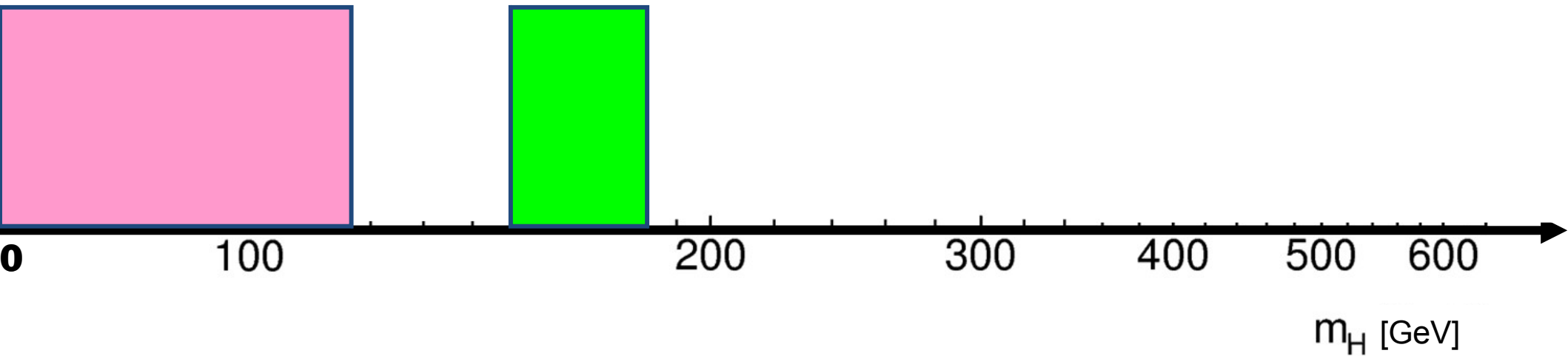
La chasse au boson de Higgs

LEP
1989-2000



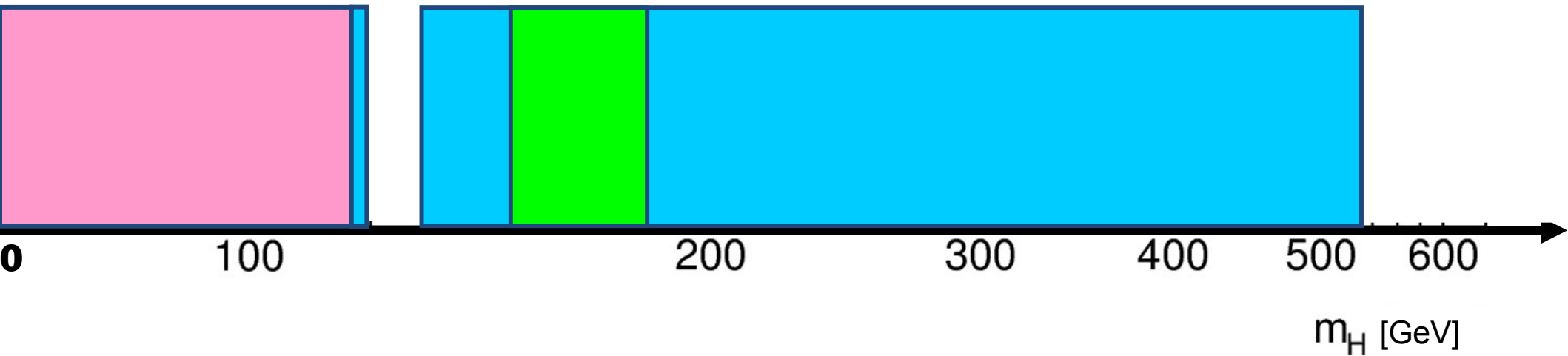
La chasse au boson de Higgs

Tevatron
1983-2011

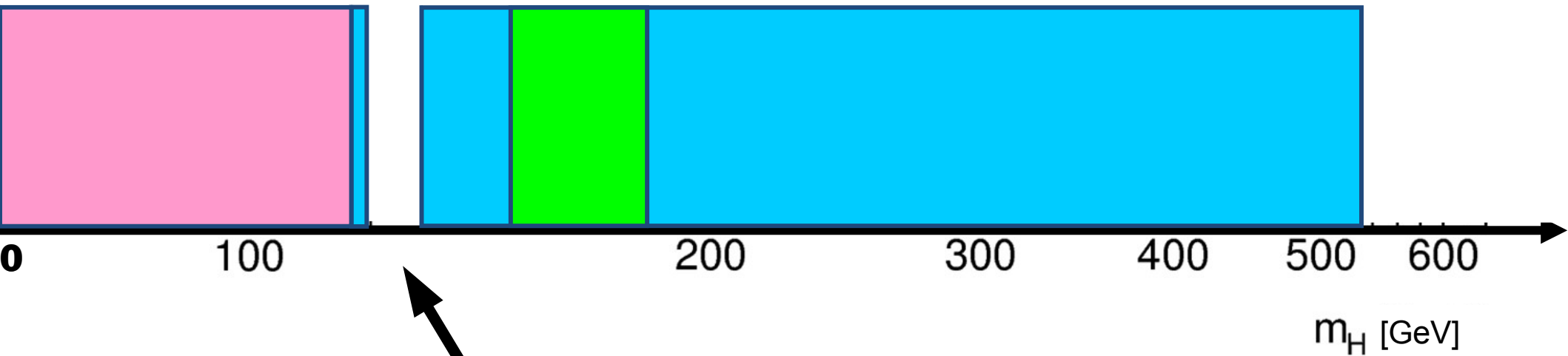


La chasse au boson de Higgs

LHC
2009-2011



La chasse au boson de Higgs

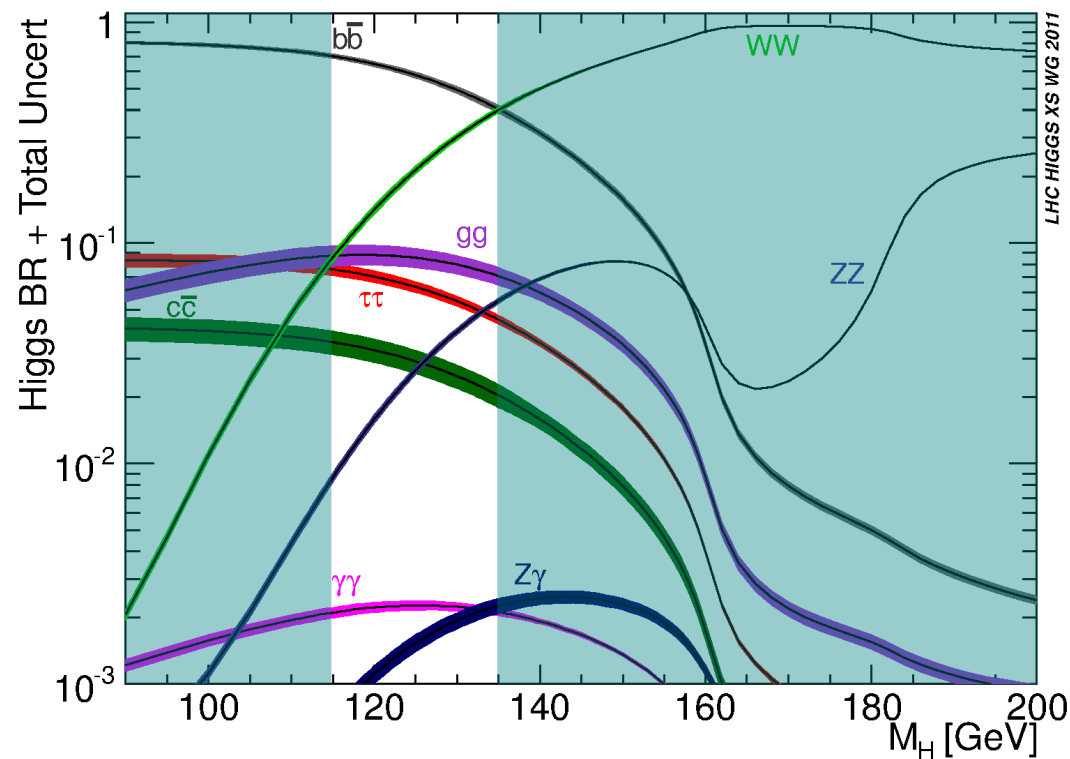


?



Comment s'y prend-on ?

- Collision de protons $\rightarrow (E = mc^2) \rightarrow$ création d'un boson de Higgs, une fois sur 10 milliards
- Ensuite il se désintègre, différemment suivant sa masse. Exemple à 125 GeV :
 - 58 fois sur 100 en $b\bar{b}$
 - 21 fois sur 100 en WW
 - 3 fois sur 100 en ZZ
 - 2 fois sur 1000 en $\gamma\gamma$
- Note : le plus fréquent n'est pas forcément le plus facile à observer

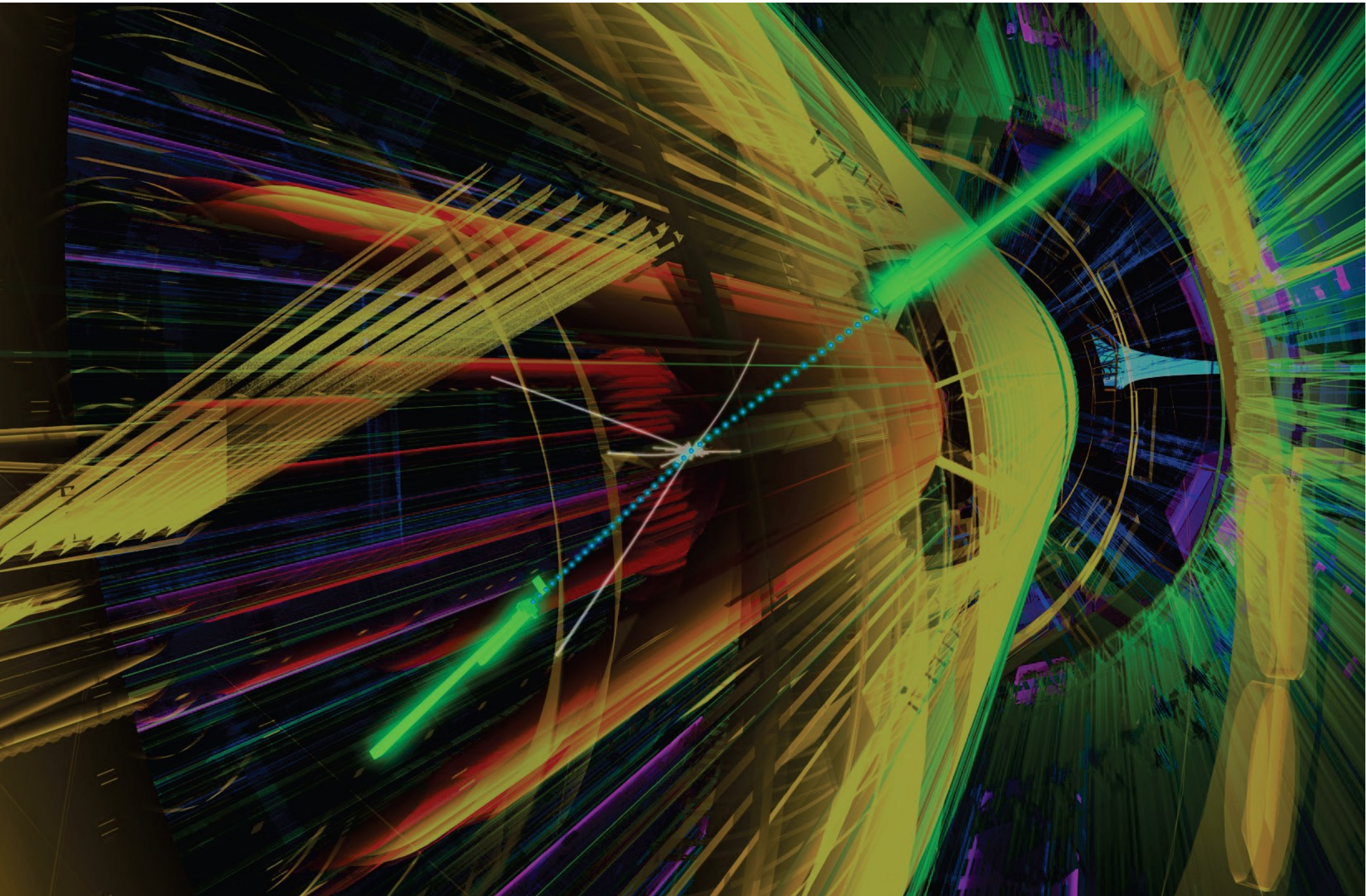


Encore plus dur qu'une aiguille dans une botte de foin

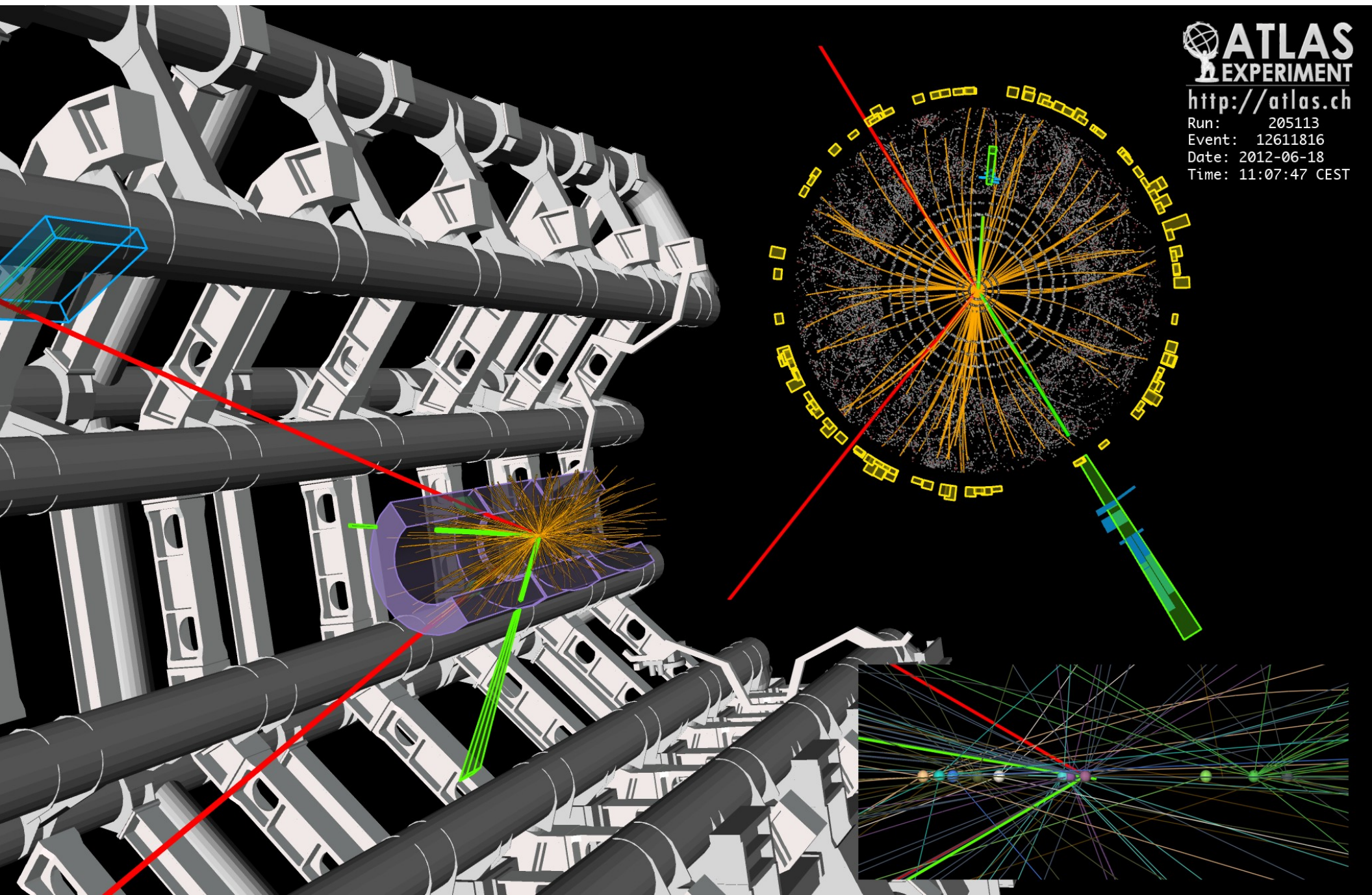
- Le boson de Higgs n'est pas produit très souvent, il faut donc analyser énormément de collisions
- La trace de sa désintégration dans le détecteur peut être imitée par d'autres processus, très difficiles à différencier de ce que l'on cherche
- Une aiguille dans une botte d'aiguilles



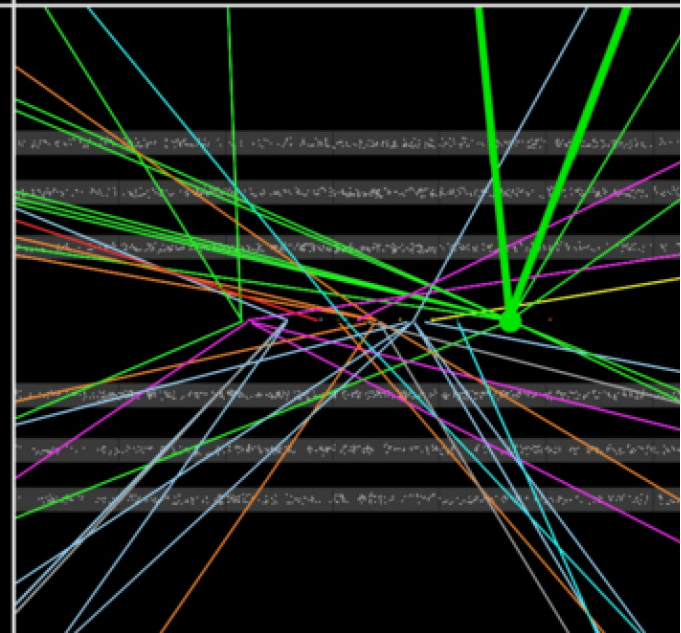
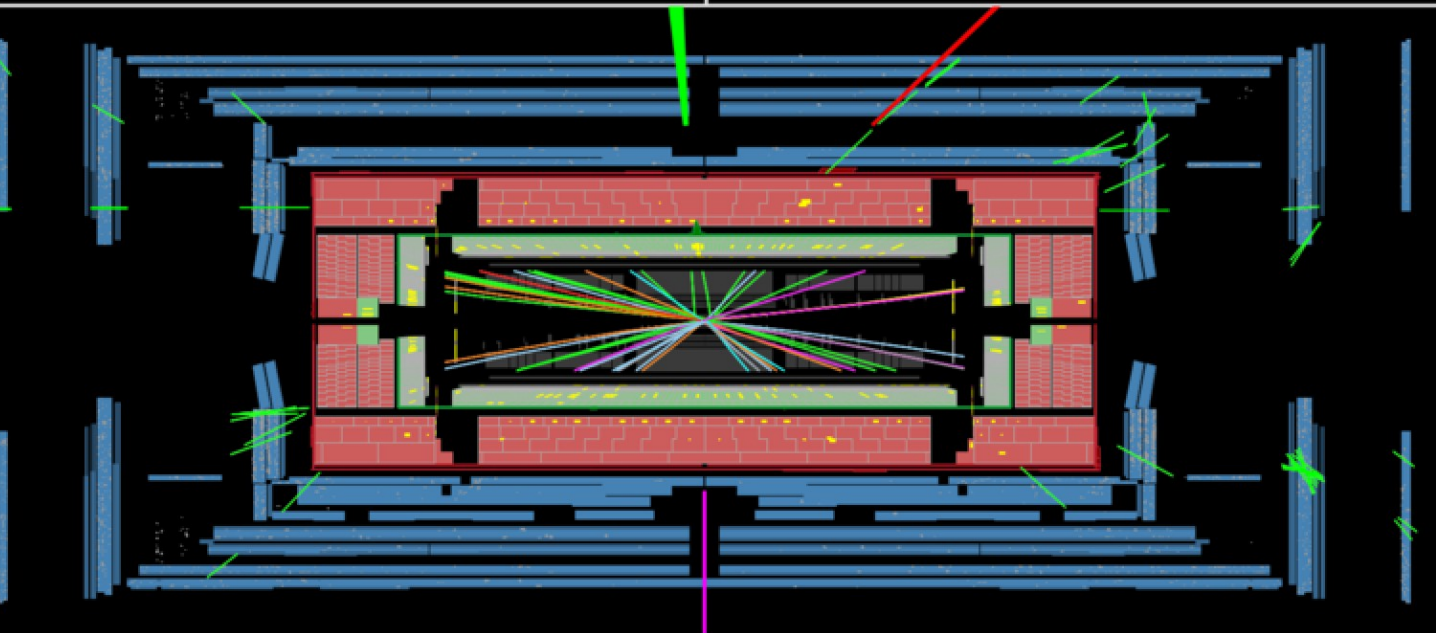
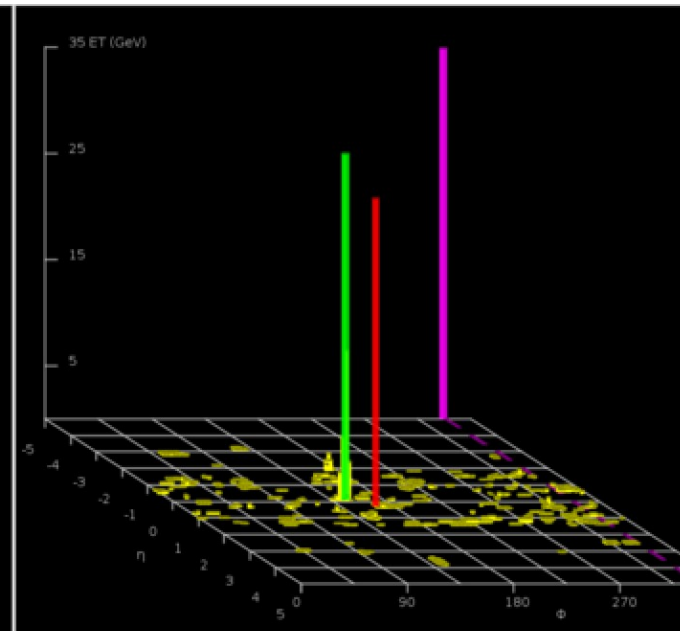
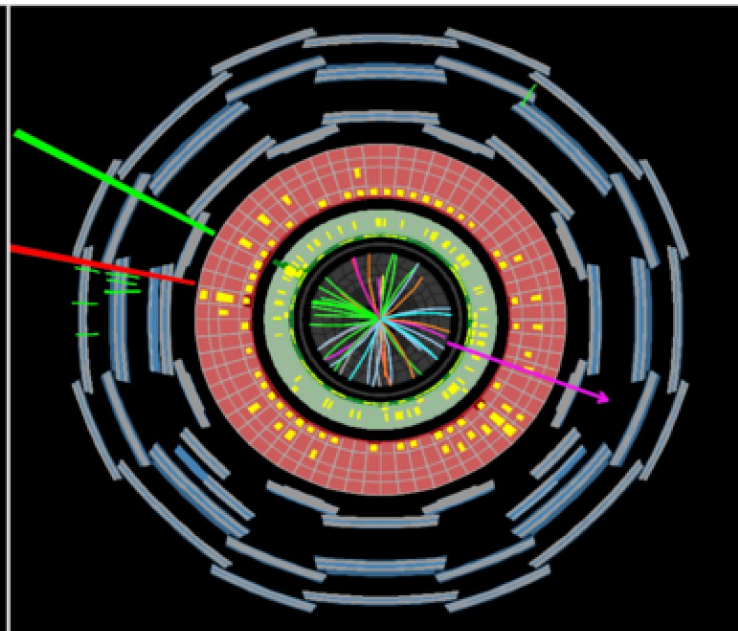
Candidat $H \rightarrow \gamma\gamma$



Candidat $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow e e \mu \mu$

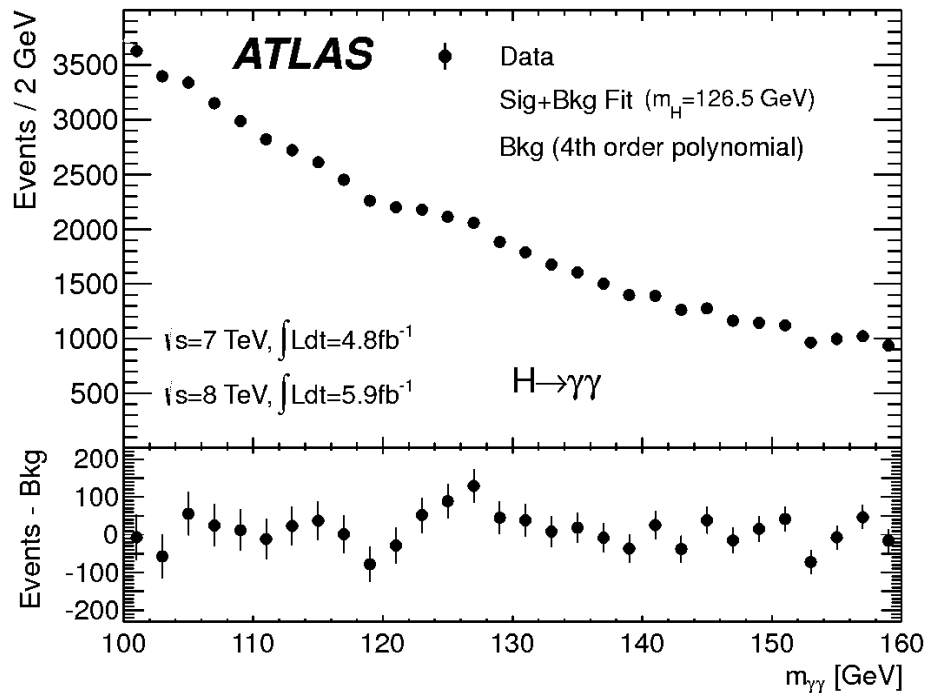


Candidat $H \rightarrow WW \rightarrow e\nu\mu\nu$



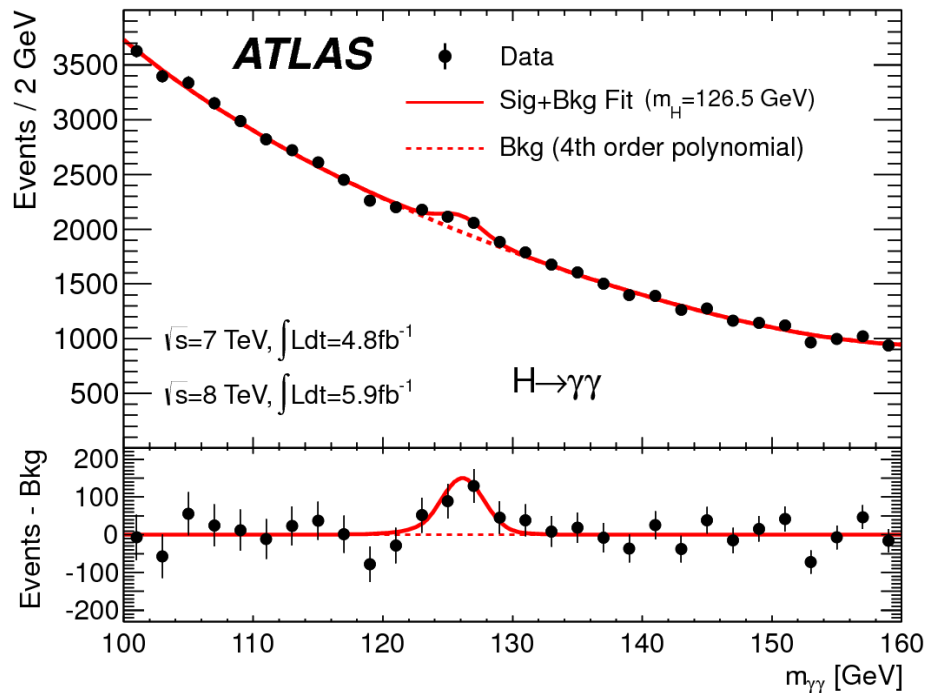
Mesure

- Higgs en 2 photons
 - Bruit de fond important
 - Petit pic avec « beaucoup » de signal



Mesure

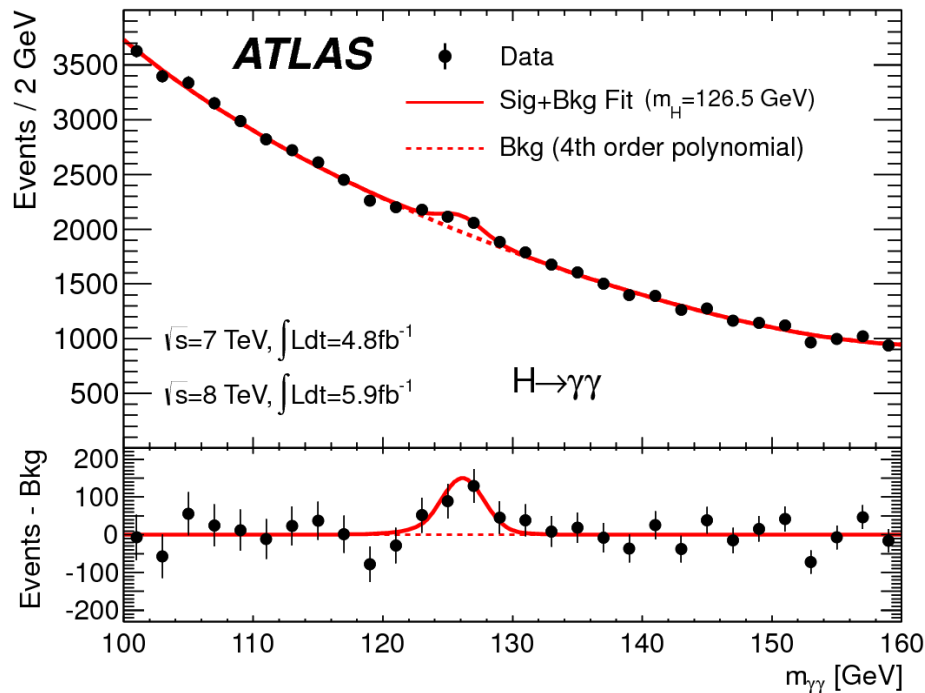
- Higgs en 2 photons
 - Bruit de fond important
 - Petit pic avec « beaucoup » de signal



Mesure

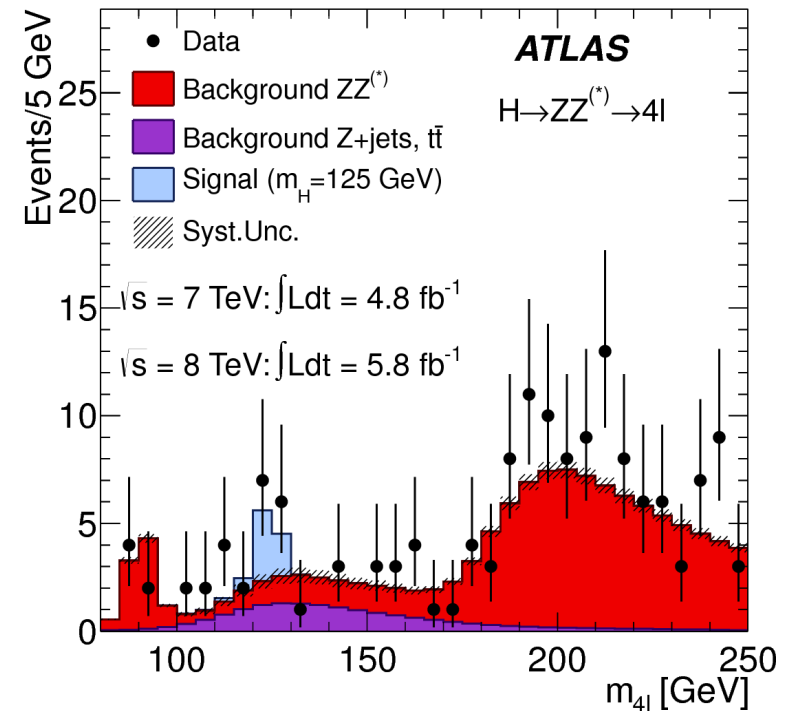
- Higgs en 2 photons

- Bruit de fond important
- Petit pic avec « beaucoup » de signal



- Higgs en ZZ

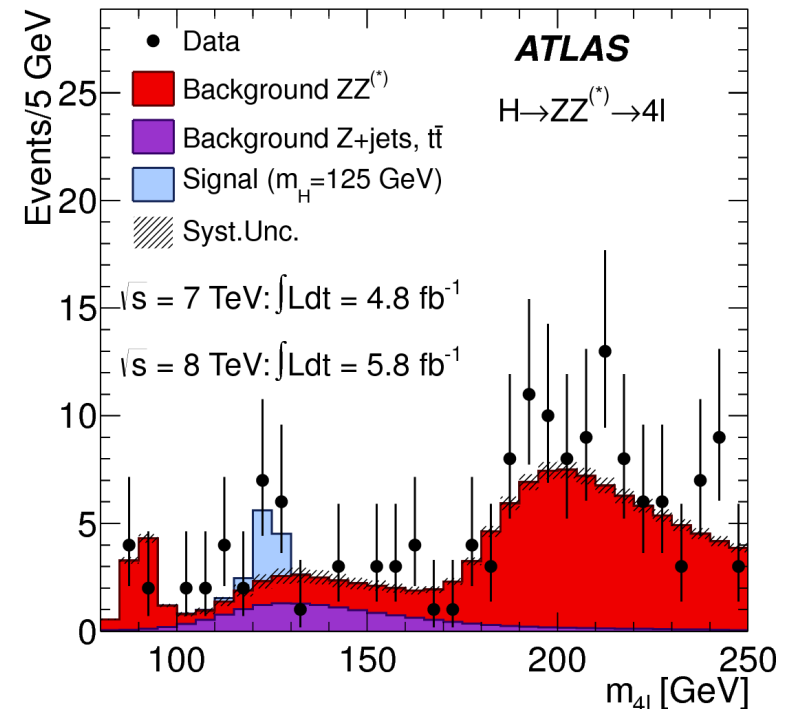
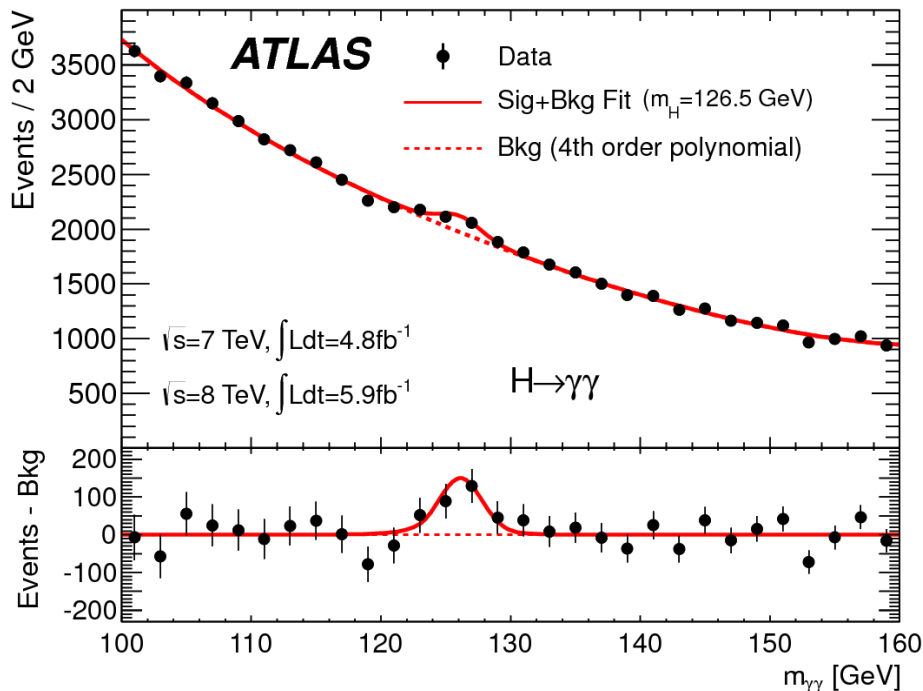
- Très peu de bruit de fond
- Très peu d'événements



Mesure

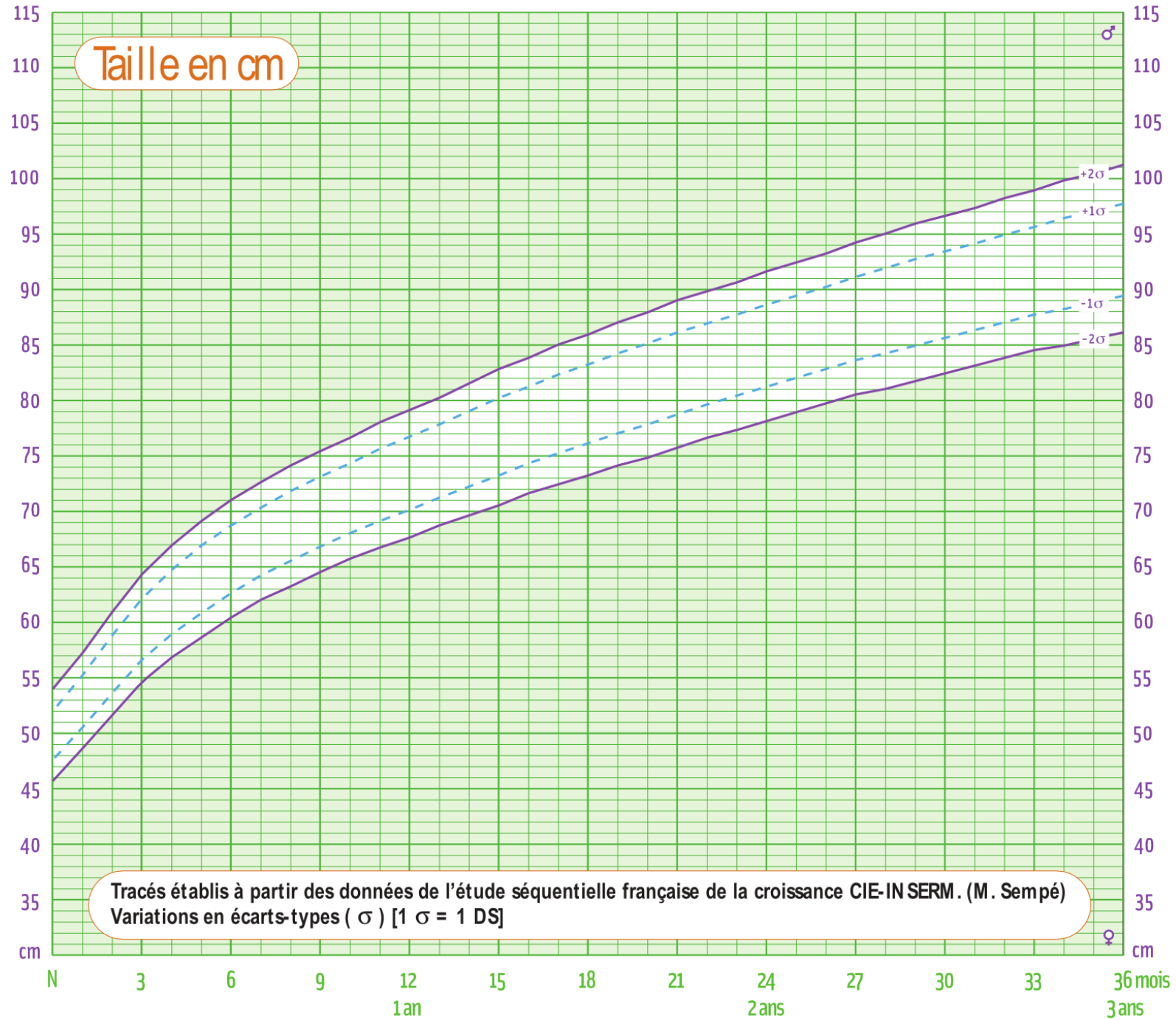
- Higgs en 2 photons
 - Bruit de fond important
 - Petit pic avec « beaucoup » de signal

- Higgs en ZZ
 - Très peu de bruit de fond
 - Très peu d'événements

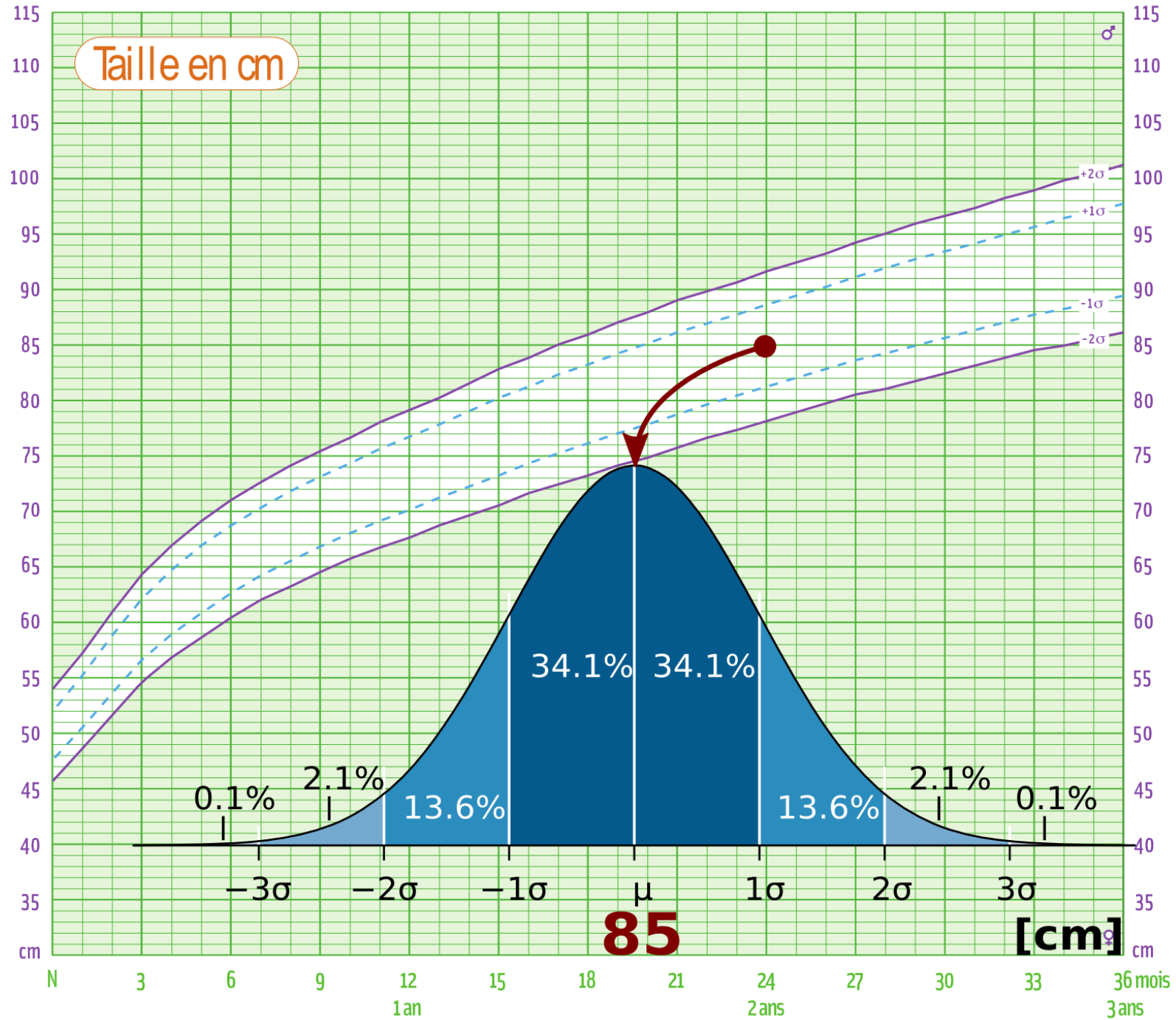


Est-ce que cela est significatif ?
Outils statistiques pour répondre

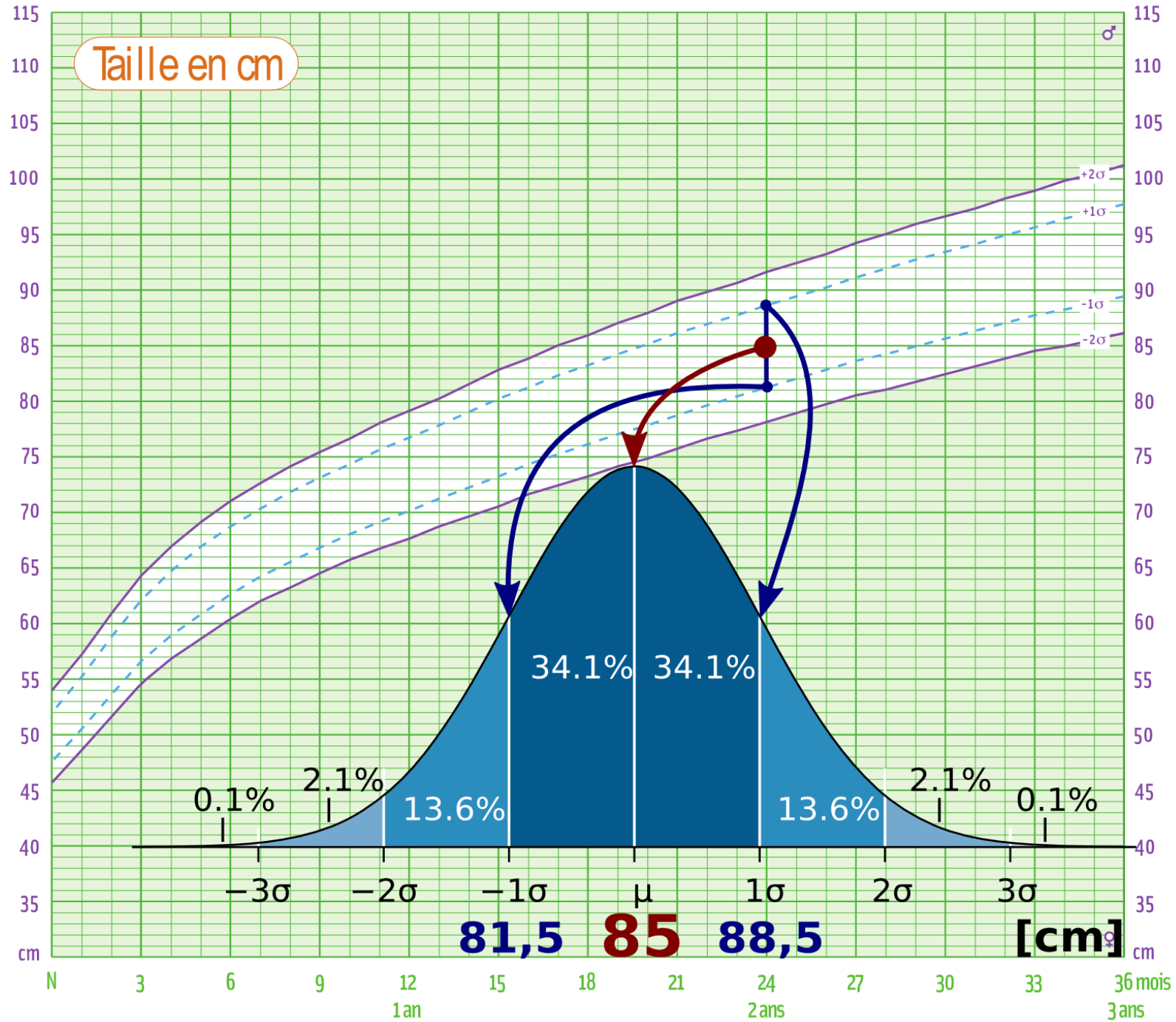
La Gaussienne



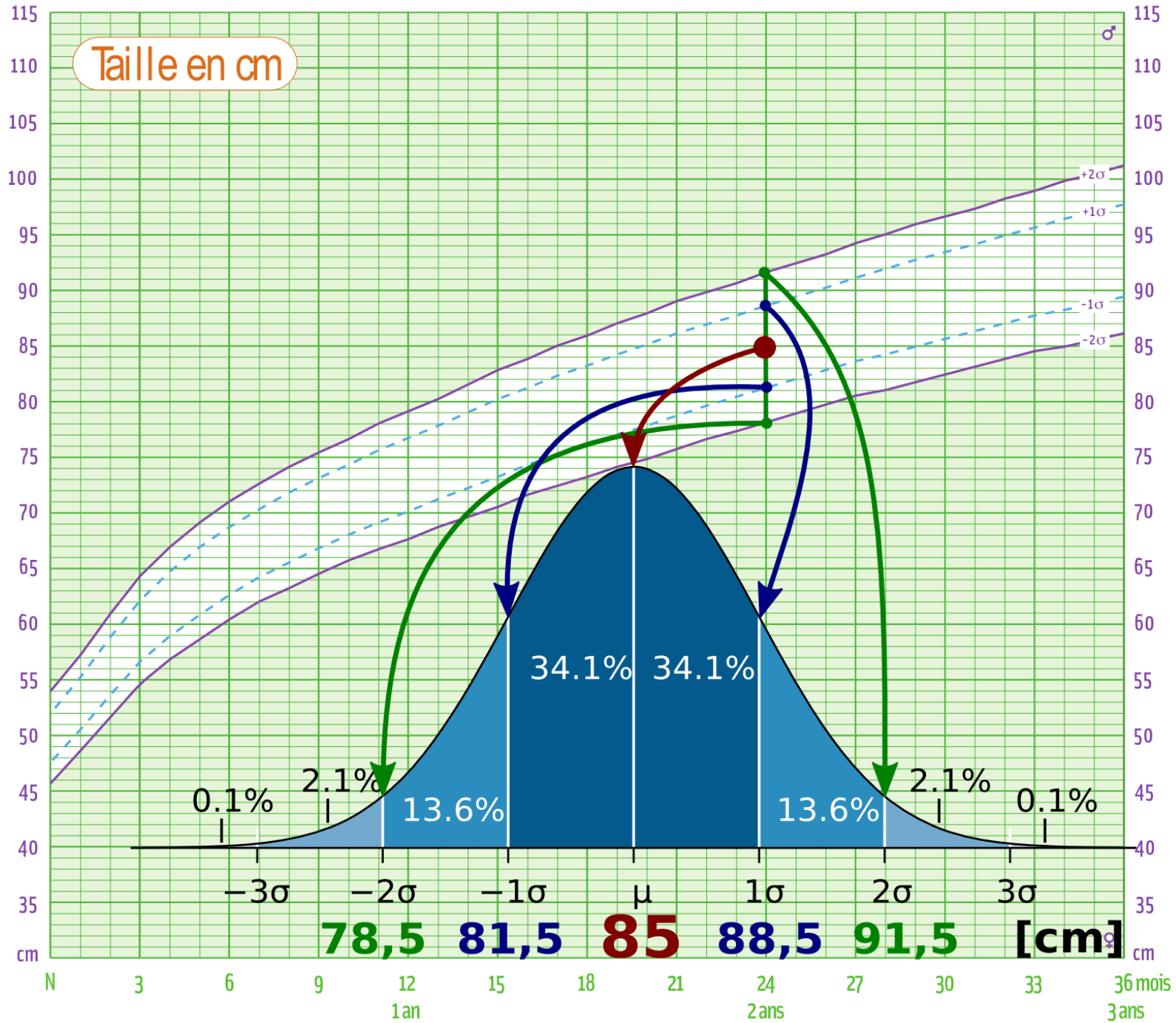
La Gaussienne



La Gaussienne

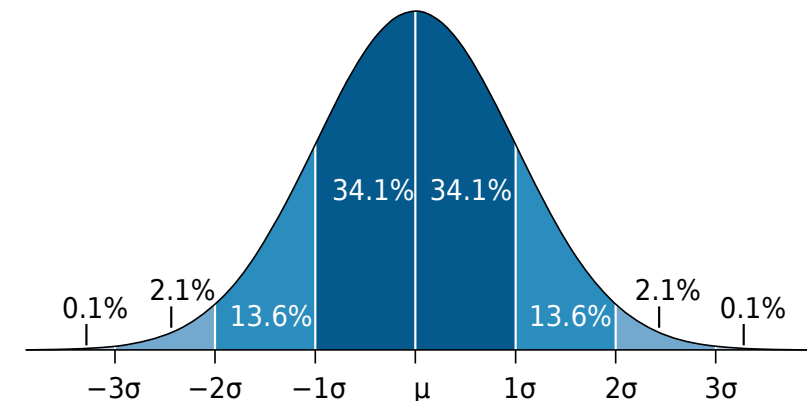
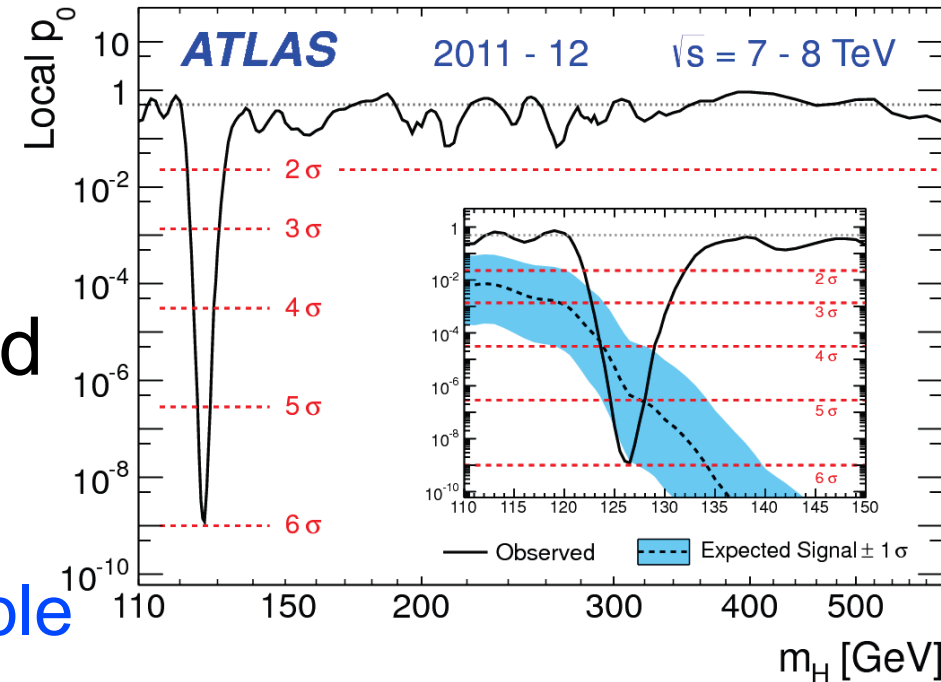


La Gaussienne

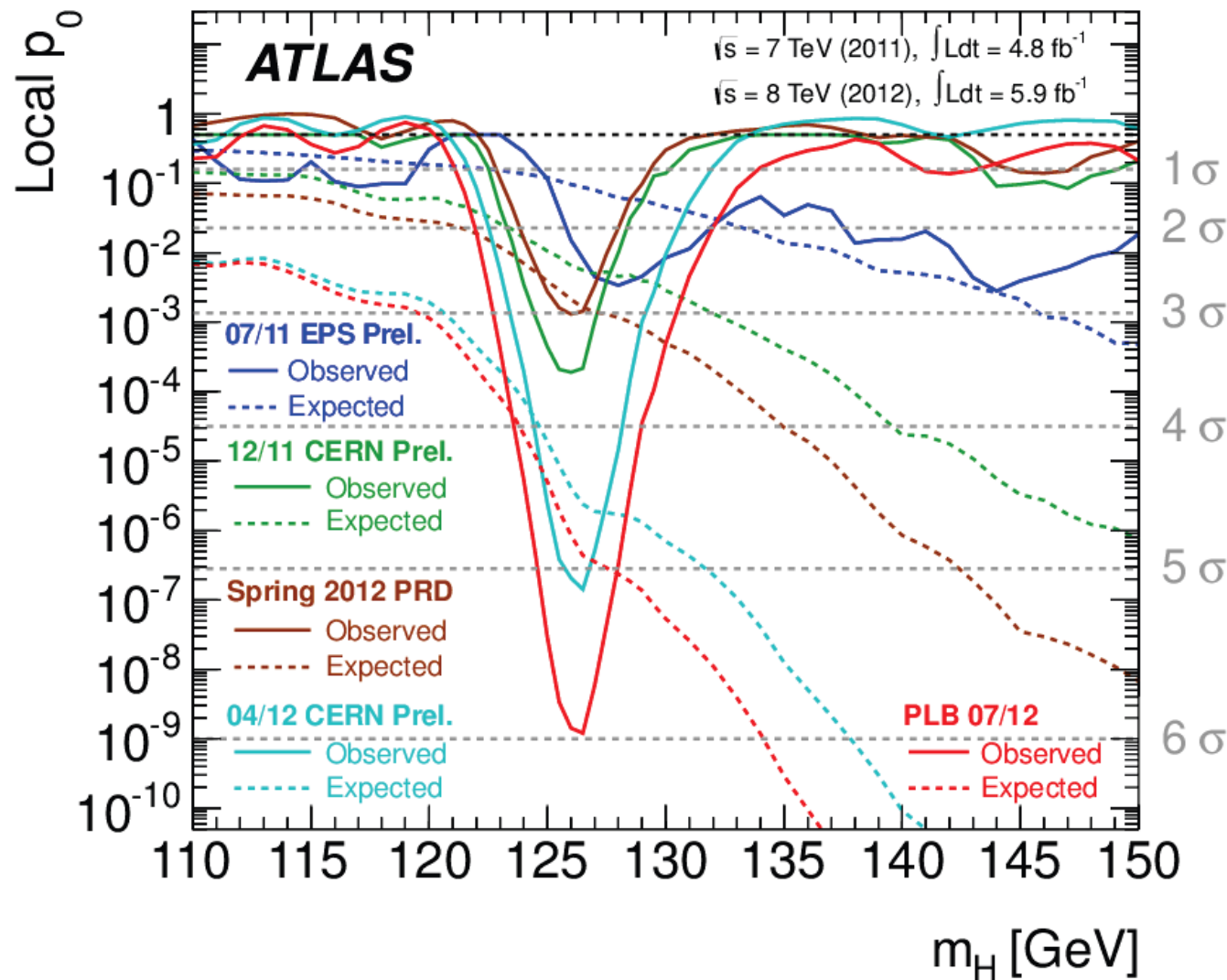


Résultat sur le Higgs : est-ce significatif statistiquement ?

- p-value p_0 : mesure la probabilité que des événements du bruit de fond produisent quelque chose qui ressemble autant au signal recherché par hasard
- Quantifié en nombre de « σ » :
 - ▶ 1σ : 1 chance sur 3 (trop probable pour conclure quoi que ce soit)
 - ▶ 3σ (évidence) : 3 chances sur 1000
 - ▶ 5σ (observation) : 1 chance sur 2 millions
 - ▶ $5,9\sigma$: 3 chances sur 1 milliard
- Donc nous sommes sûrs d'avoir trouvé quelque chose

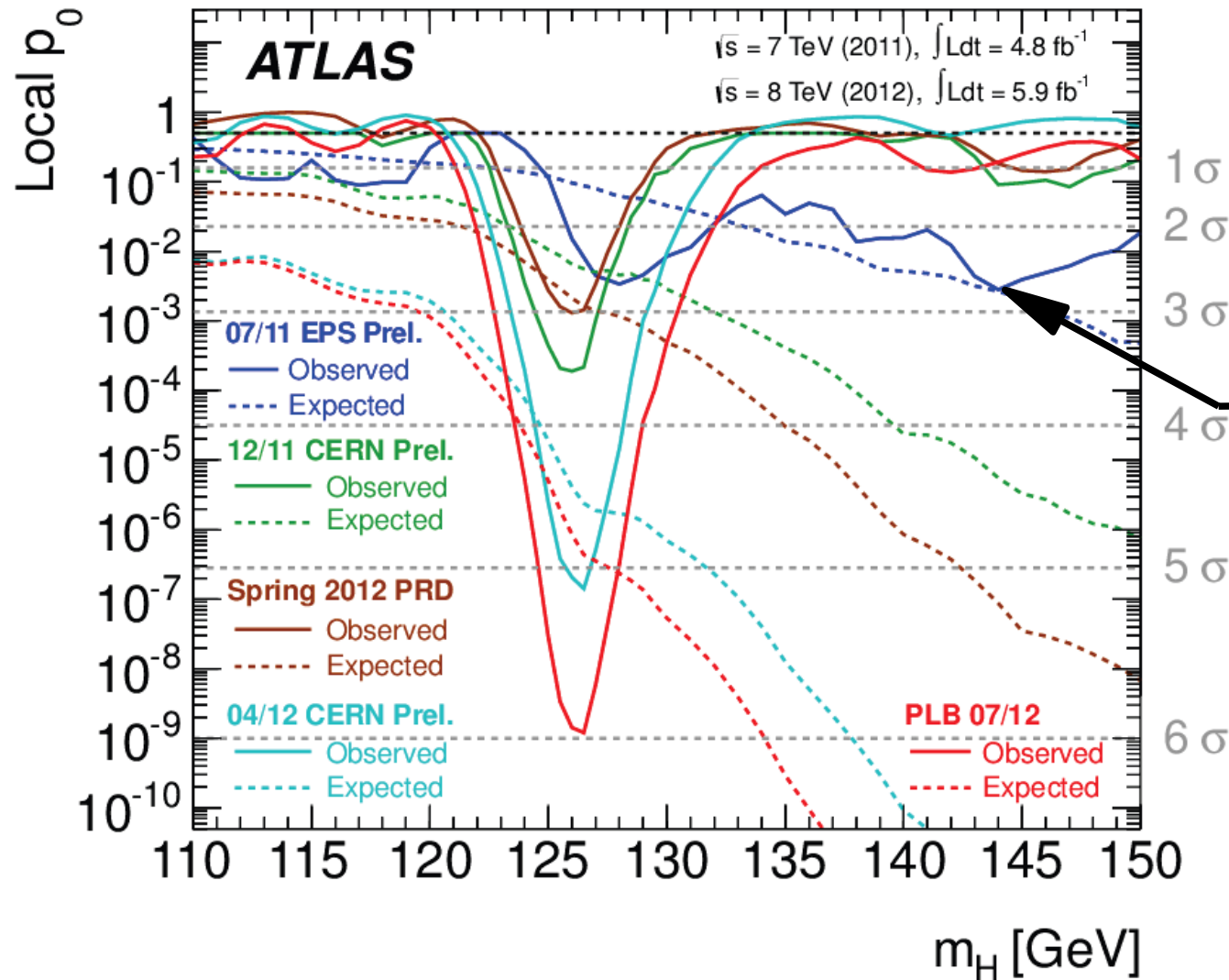


Évolution dans le temps (jusqu'à la découverte)



- D'abord des fluctuations statistiques un peu partout
- Puis les mesures se stabilisent

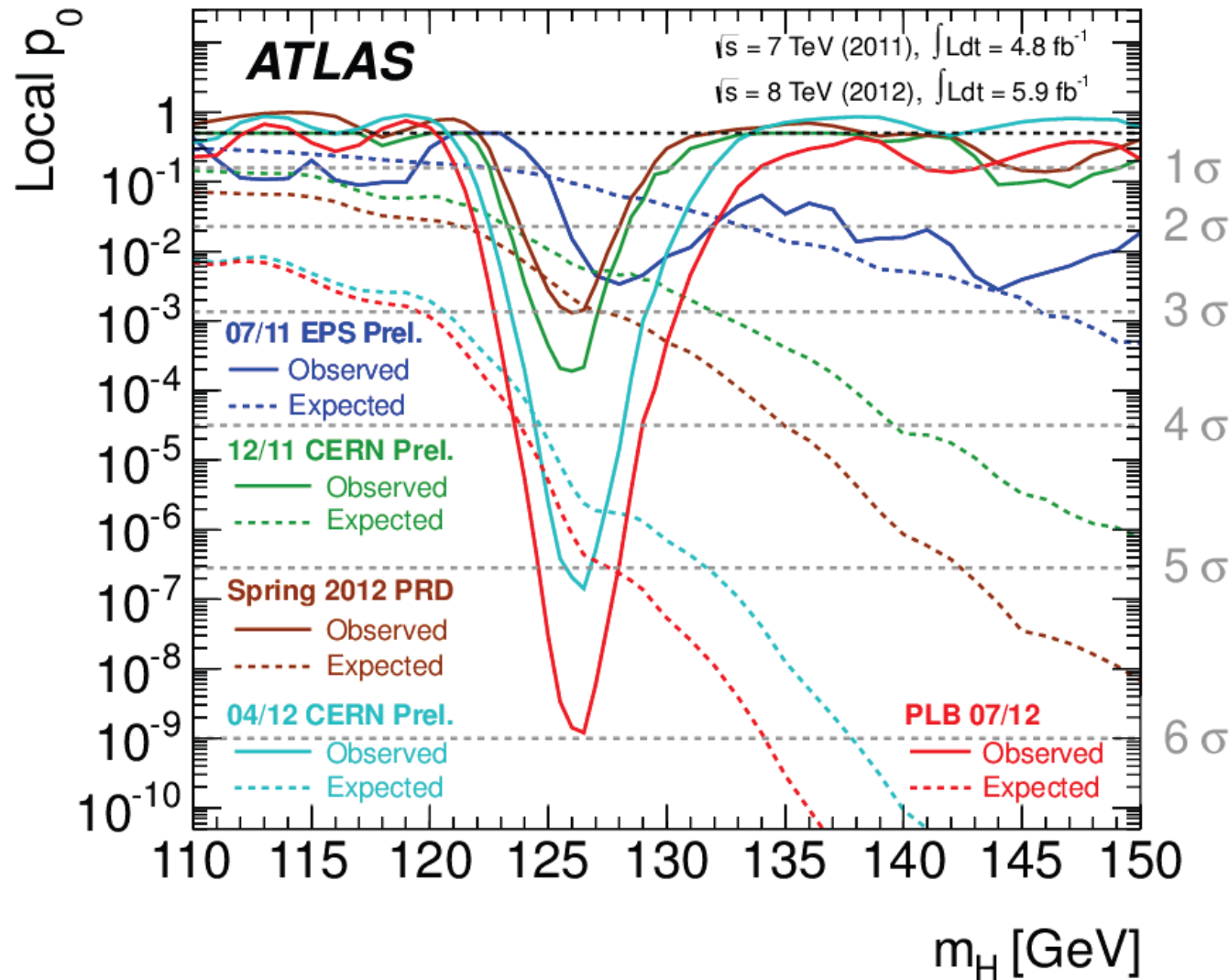
Évolution dans le temps (jusqu'à la découverte)



Généra beaucoup d'excitation chez les théoriciens !

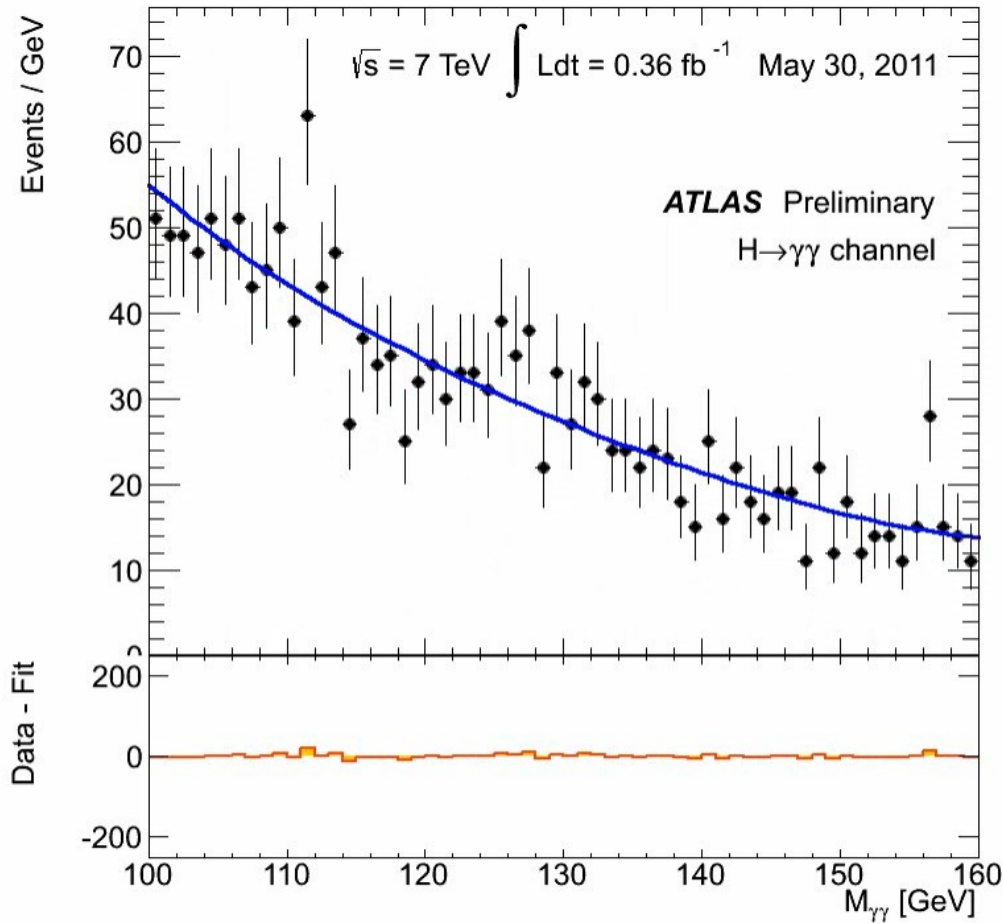
- D'abord des fluctuations statistiques un peu partout
- Puis les mesures se stabilisent

Évolution dans le temps (jusqu'à la découverte)

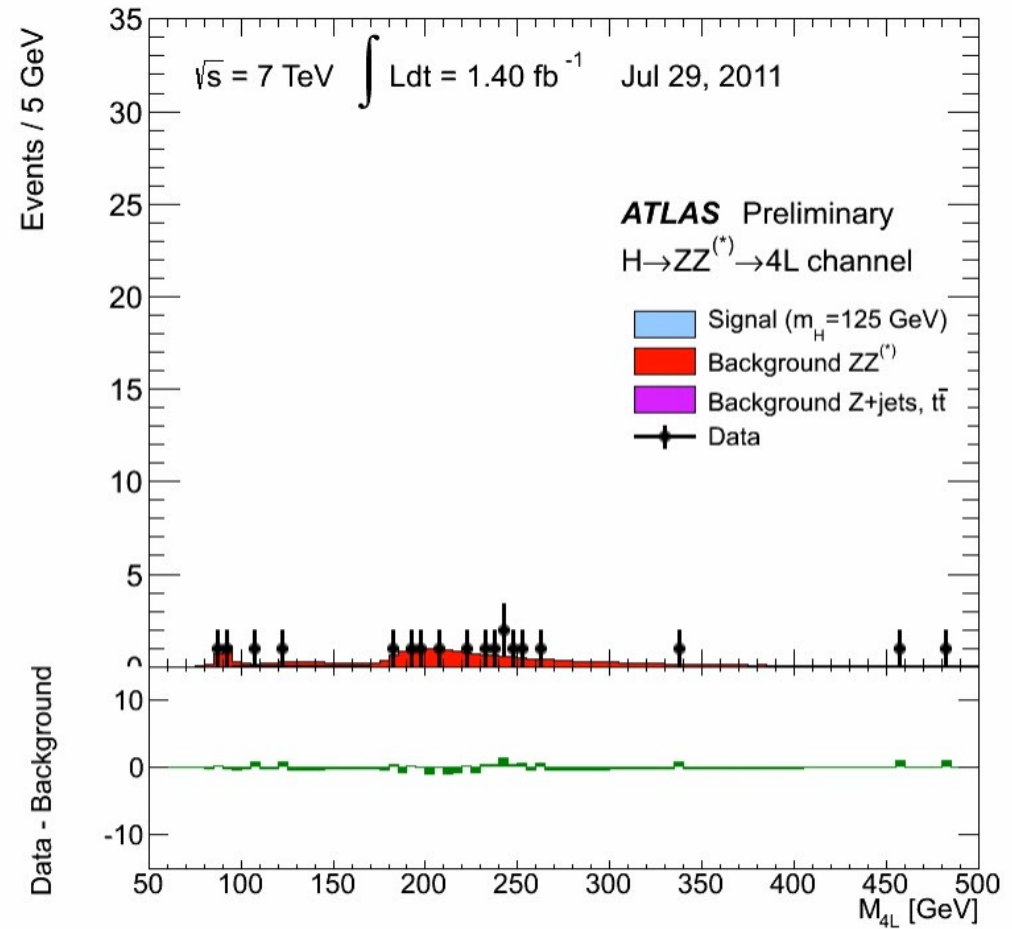


- D'abord des fluctuations statistiques un peu partout
- Puis les mesures se stabilisent

Évolution dans le temps (jusqu'à fin 2012)

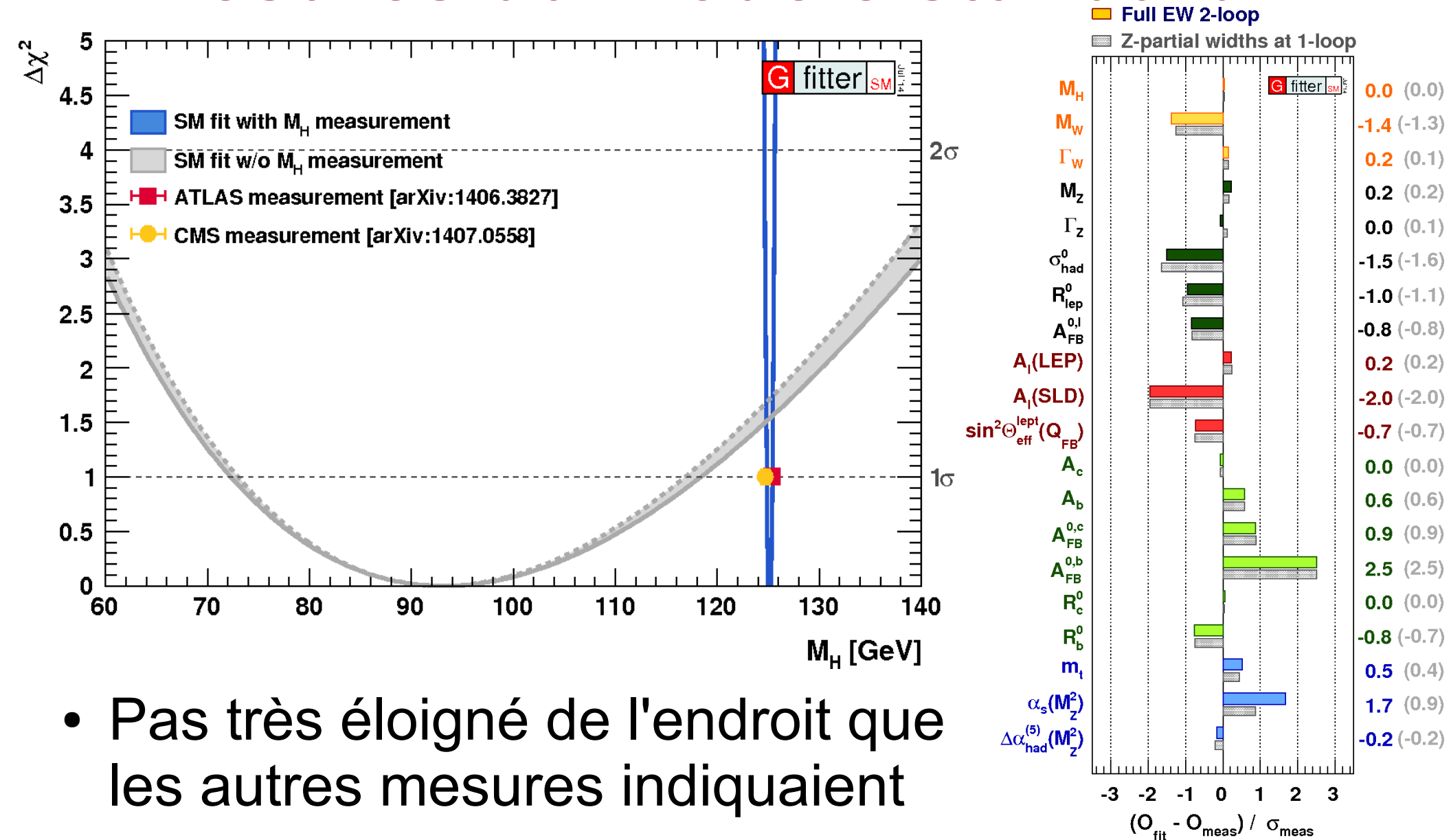


$$H \rightarrow \gamma\gamma$$



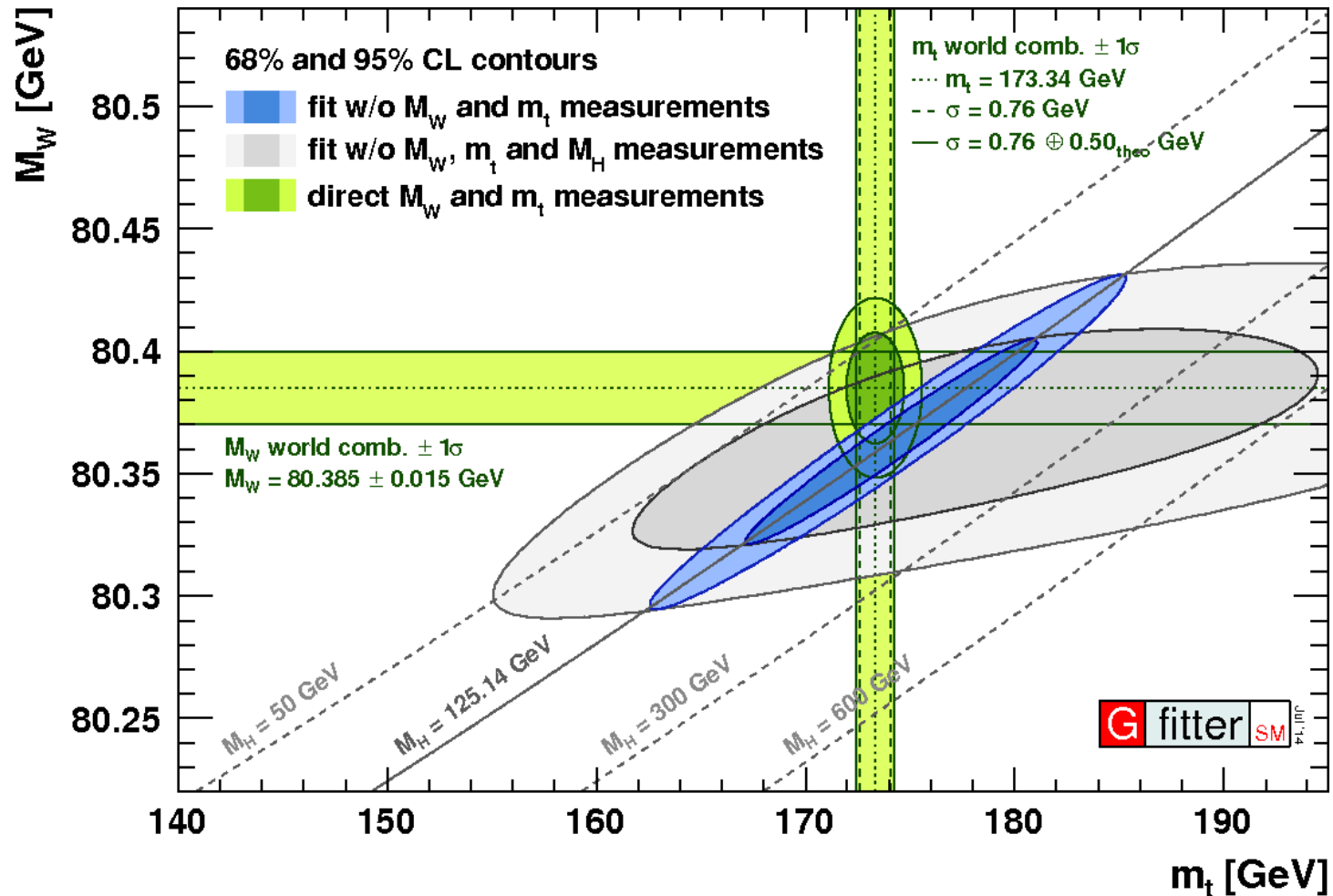
$$H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4l$$

Consistent avec les autres mesures du modèle standard ?



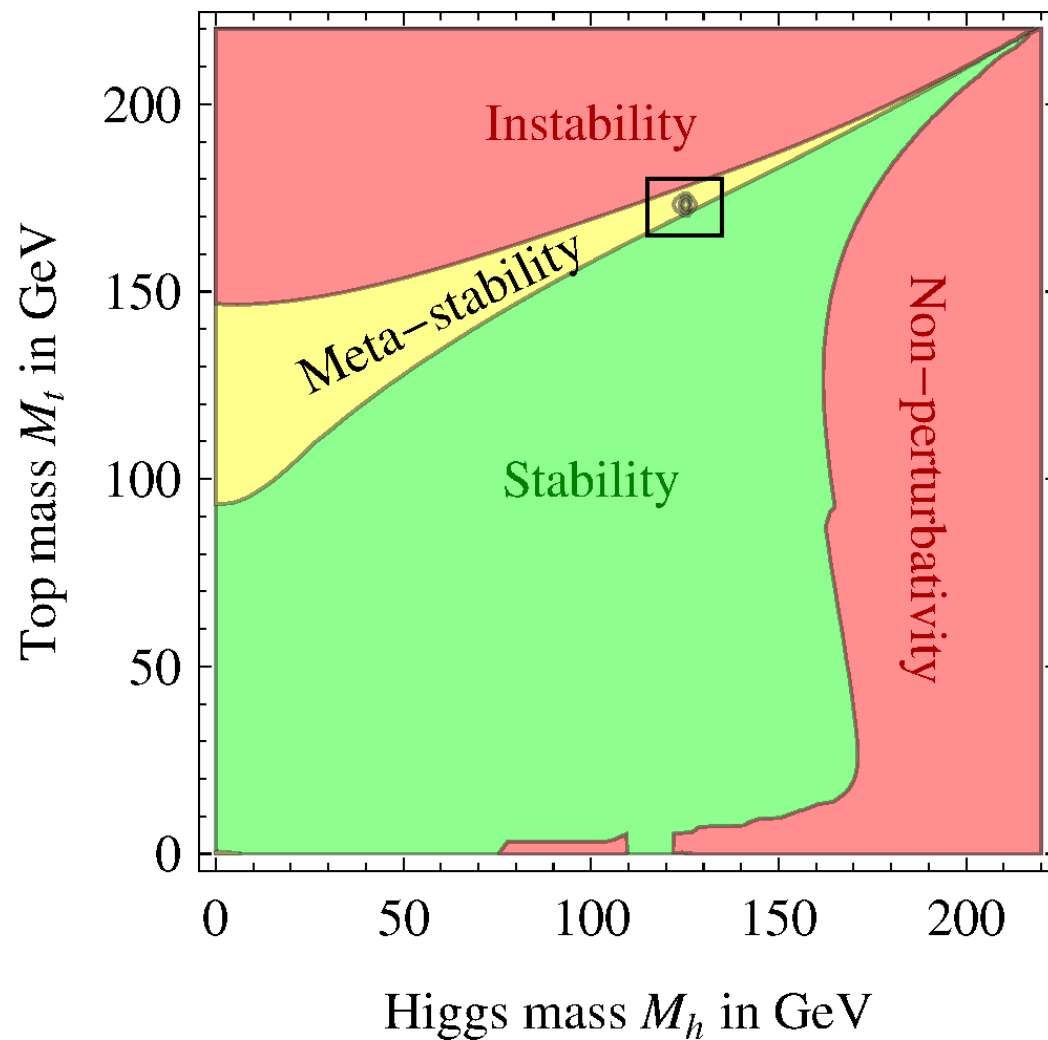
- Pas très éloigné de l'endroit que les autres mesures indiquaient
- Pas de « tension » avec le modèle standard

Consistent avec les autres mesures du modèle standard ?

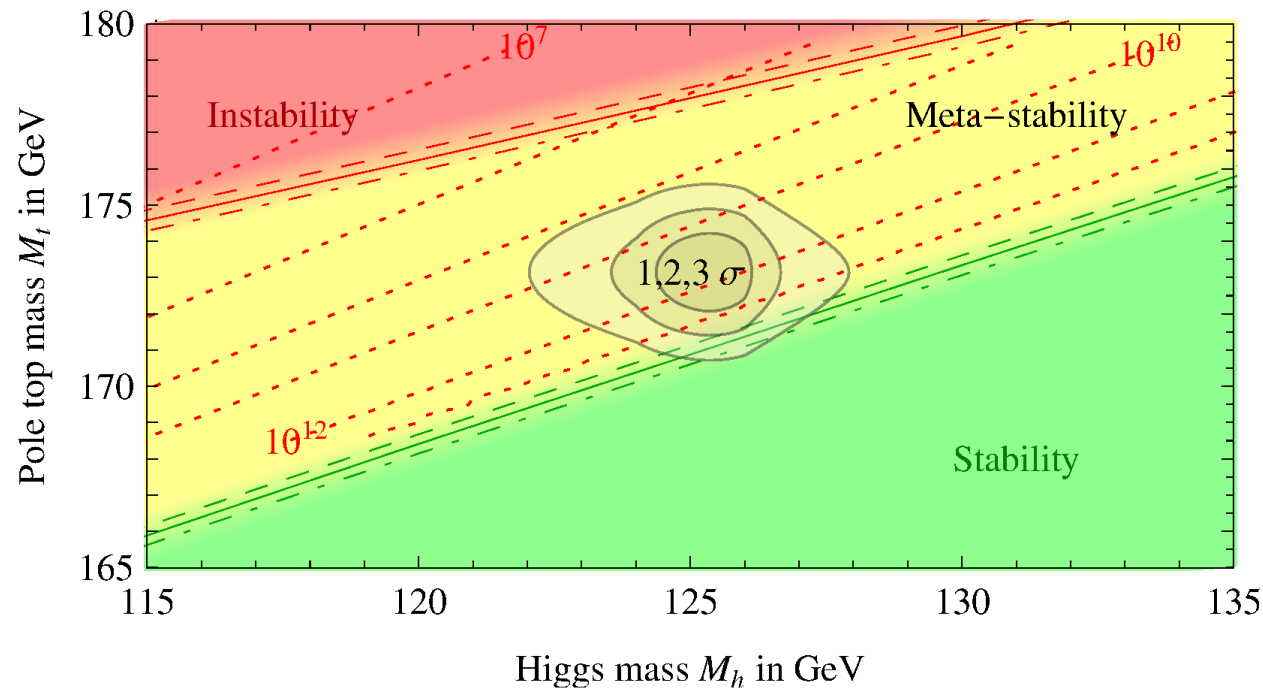


- Pas très éloigné de l'endroit que les autres mesures indiquaient
- Pas de « tension » avec le modèle standard

Un univers instable ?



Un univers instable ?

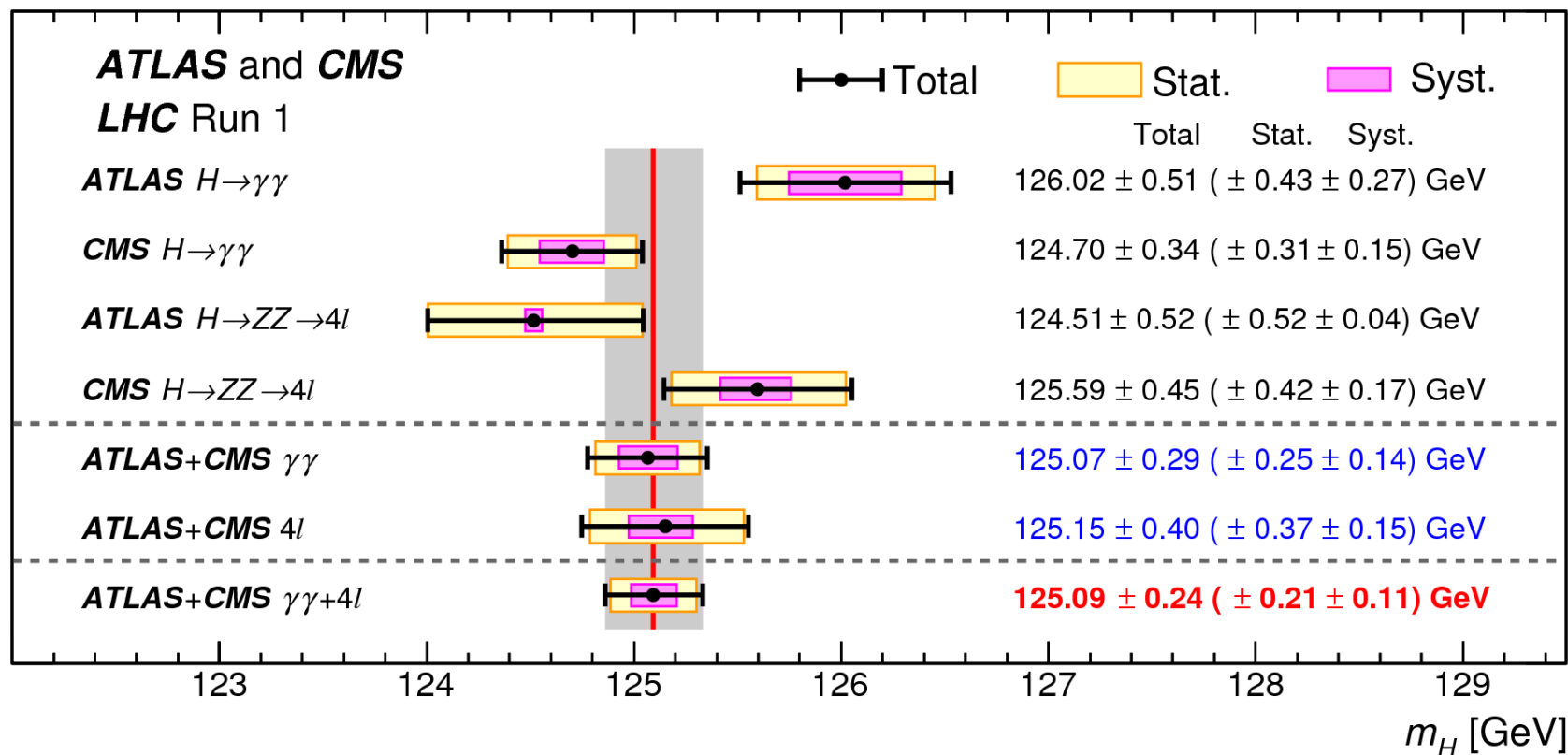


- Plutôt méta-stable, stable à l'échelle de l'âge de l'Univers.
Ouf !
- Besoin d'améliorer la précision de m_t pour en savoir plus

Est-ce le Higgs du modèle standard ?

- Masse compatible avec les autres mesures du modèle standard :

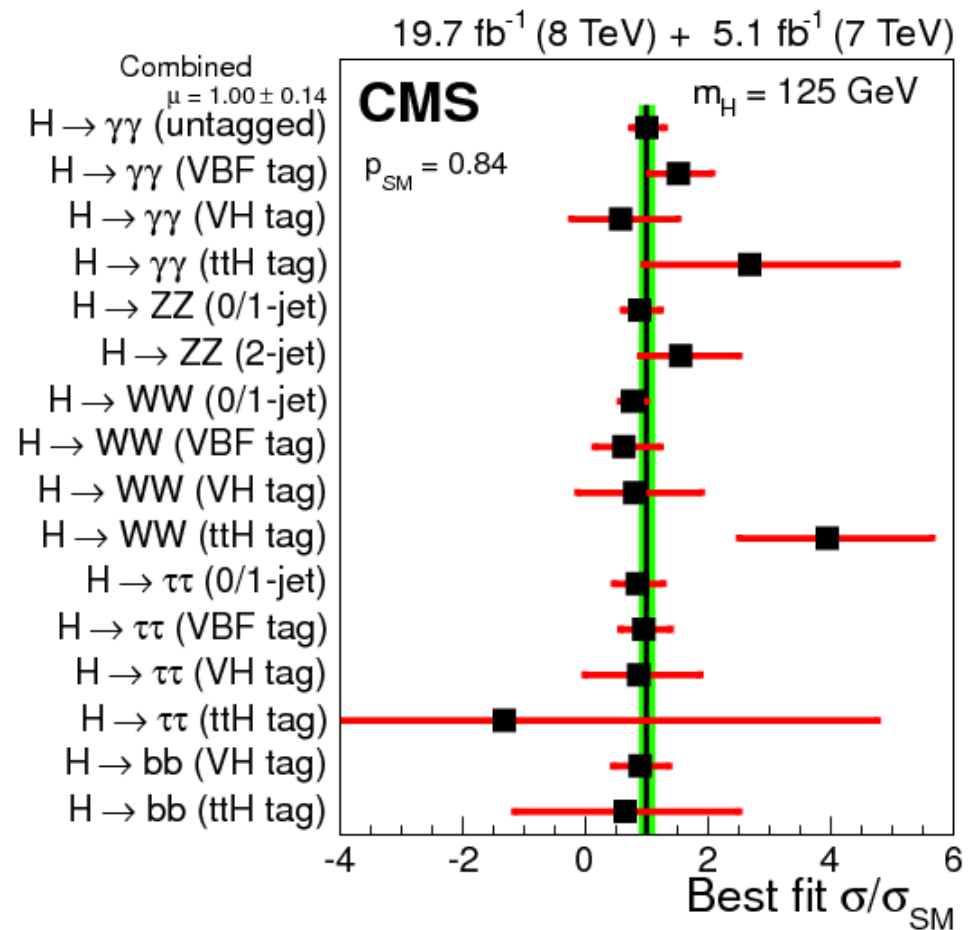
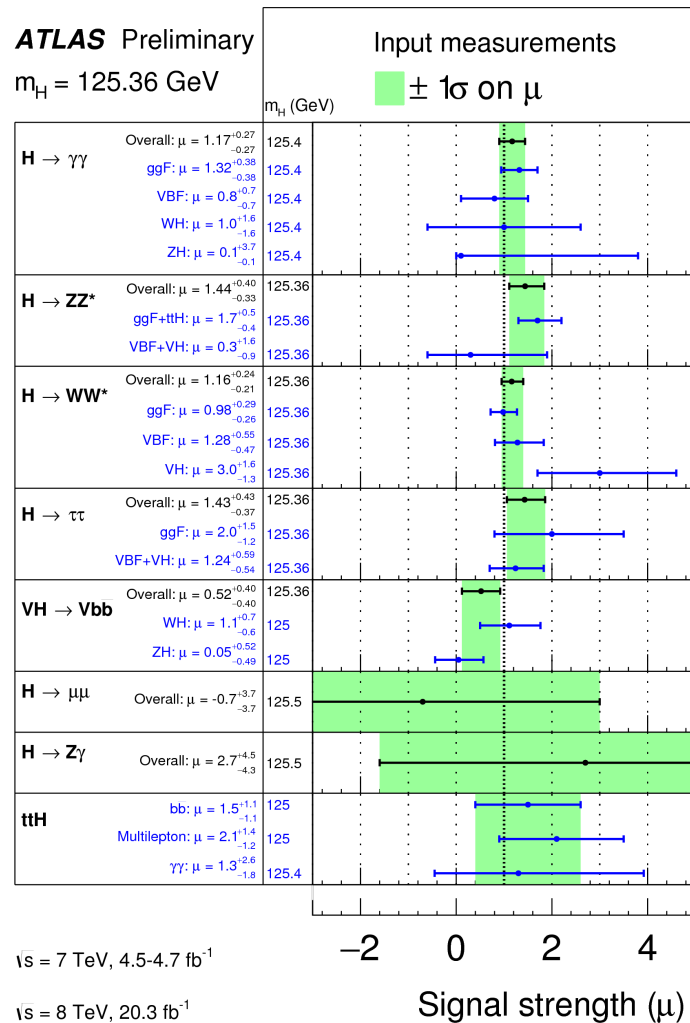
- ▶ $m_H = 125.09 \pm 0.24$ (0.21 stat. $\pm$ 0.11 syst.) GeV
[ATLAS+CMS, mars 2015, données 2011-2012]
(134 fois la masse du proton)



Est-ce le Higgs du modèle standard ?

- Masse compatible avec les autres mesures du modèle standard :
 - ▶ $m_H = 125.09 \pm 0.24$ (0.21 stat. $\pm$ 0.11 syst.) GeV
[ATLAS+CMS, mars 2015, données 2011-2012]
(134 fois la masse du proton)
- La signification statistique a continué d'augmenter
- Mesures dans d'autres canaux de désintégration
- Nouveaux résultats d'ATLAS et CMS toujours consistants (dernière combinaison : juin 2016)
- Mesure des propriétés :
 - ▶ Canaux divers, modes de production, couplages, spin...
 - ▶ Confirmation du modèle standard...

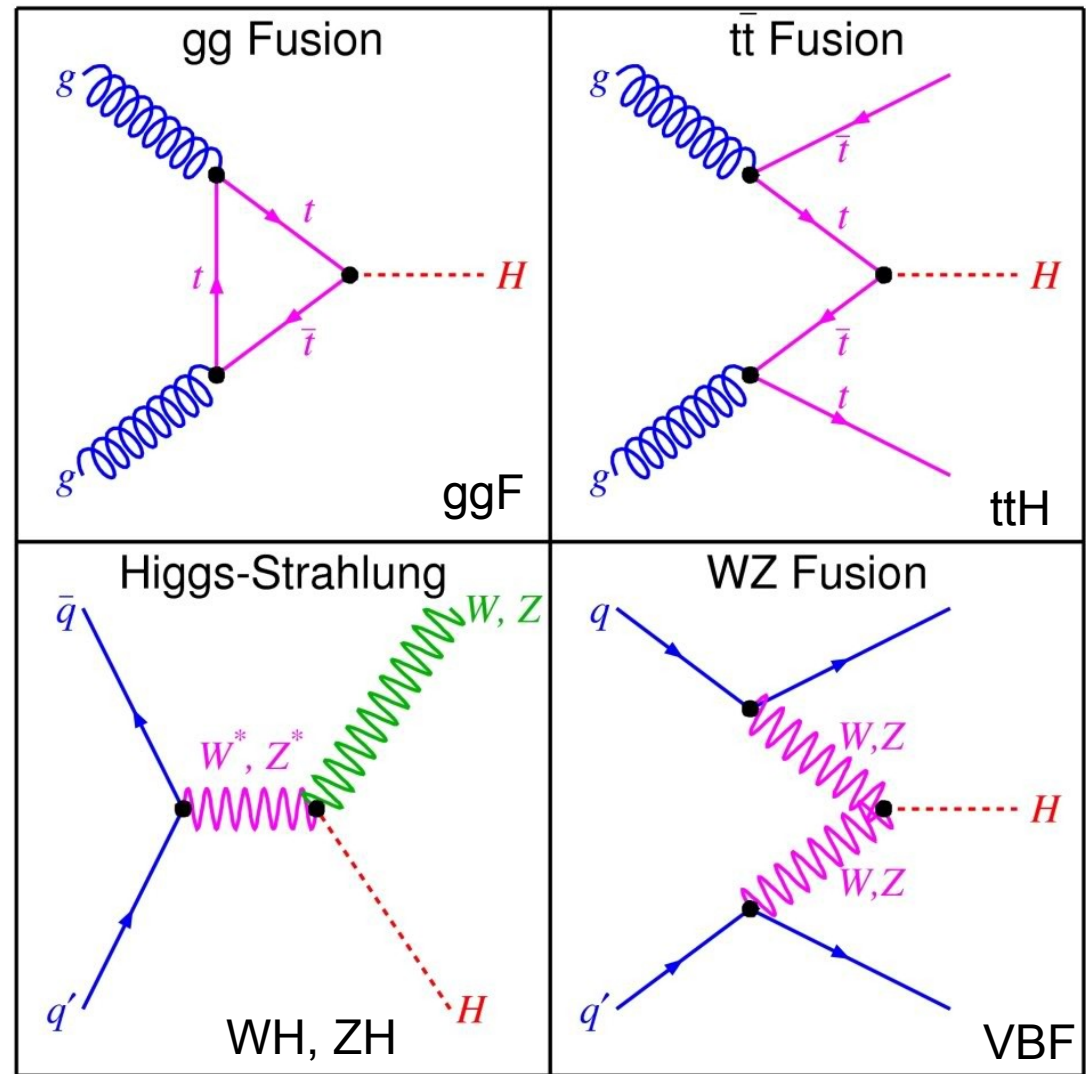
Mesures dans plusieurs canaux



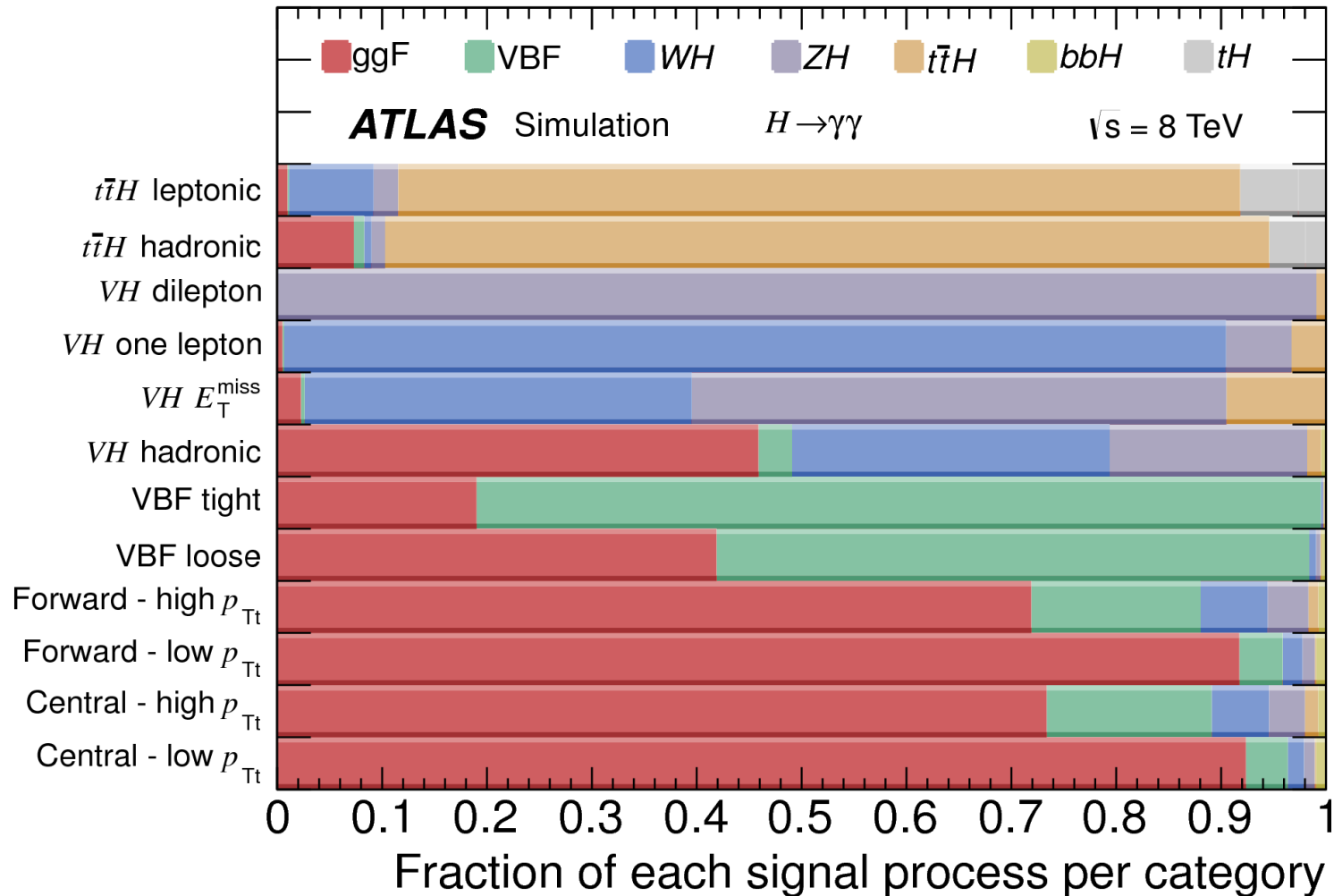
- $\mu = \sigma/\sigma_{SM} = 1$ si la particule est comme le boson de Higgs du modèle standard
- Pour le moment très proche des prédictions

Production du boson de Higgs

- Différents modes de production
- Si c'est le Higgs du modèle standard, on connaît les différentes proportions
- Il ne reste plus qu'à les séparer expérimentalement
- Plus facile à dire qu'à faire...

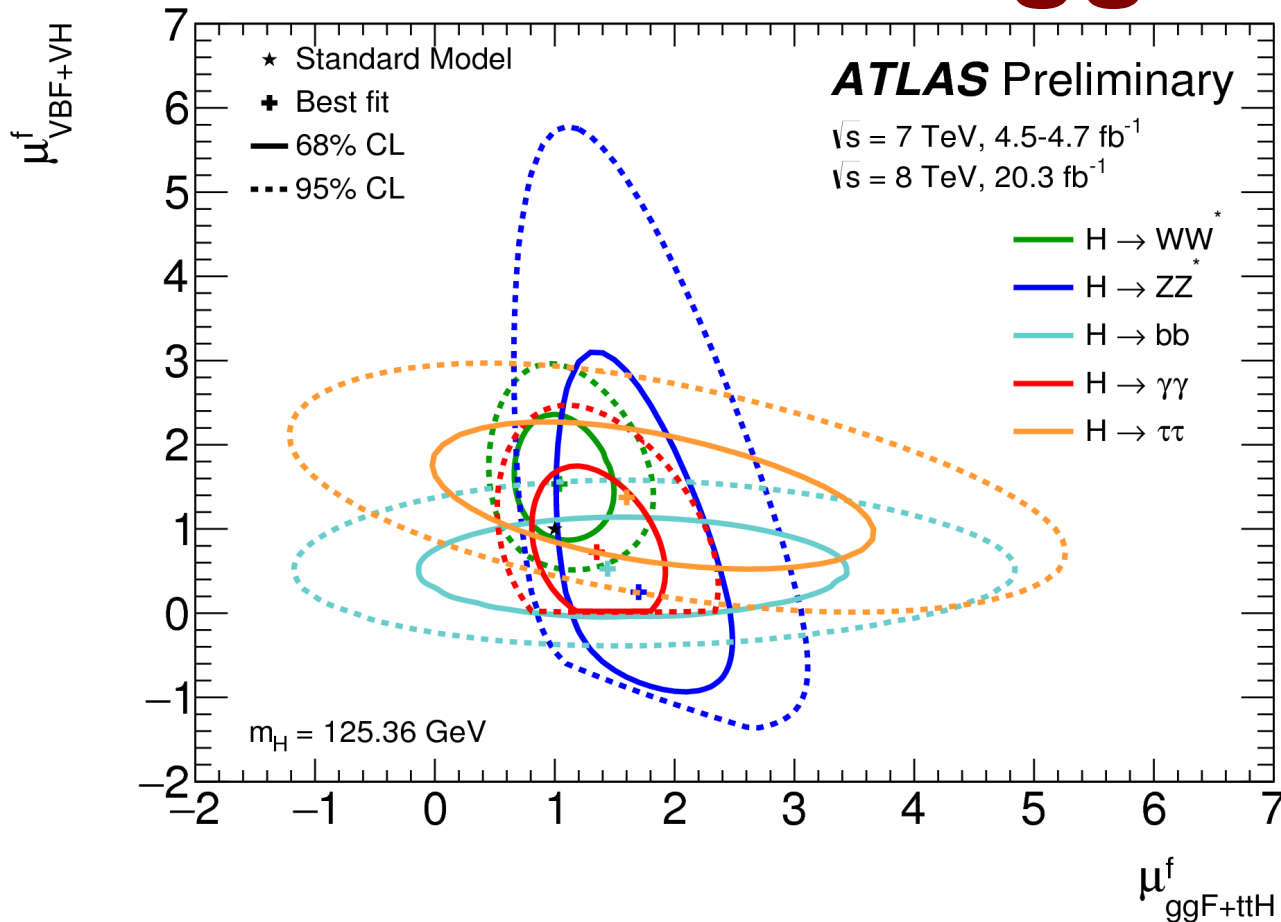


Séparation des canaux de production



- En optimisant les analyses, on peut cibler un mode de production
- Jamais 100 % pur, mais permet de faire des mesures intéressantes

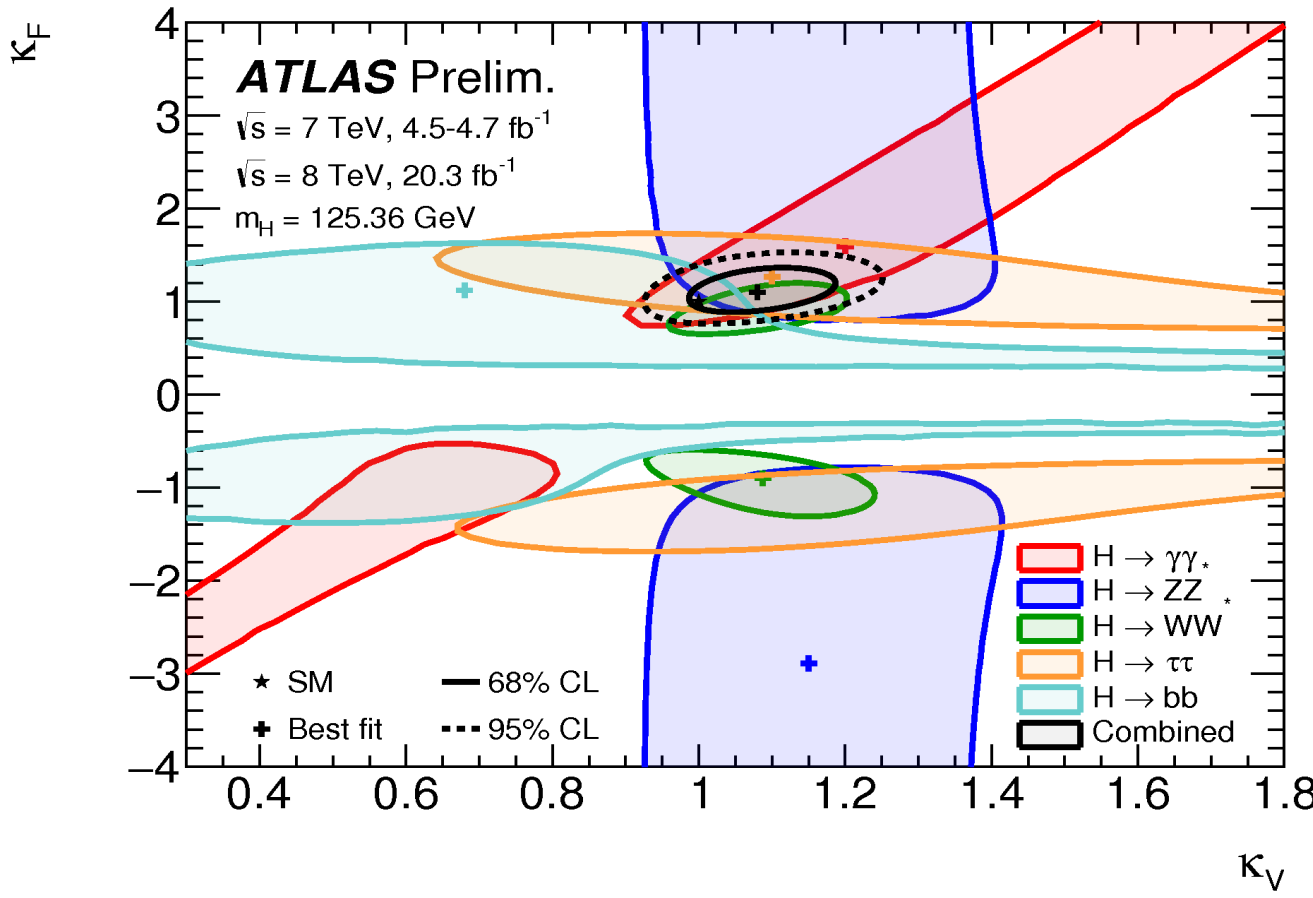
Plutôt « VBF » ou « ggF » ?



- $\mu = 1$ si la particule est comme le boson de Higgs du modèle standard
- Tous les canaux sont compatibles entre eux et avec le modèle standard
- Évidence pour $VBF \neq 0 \rightarrow$ ce boson joue un rôle dans la brisure de symétrie électrofaible

Couplage aux fermions et bosons

- Trop de paramètres à mesurer simultanément
 - Regrouper et mesurer le rapport à la prédiction du MS, κ
- Si $\kappa = 1$ la particule est comme le boson de Higgs du modèle standard

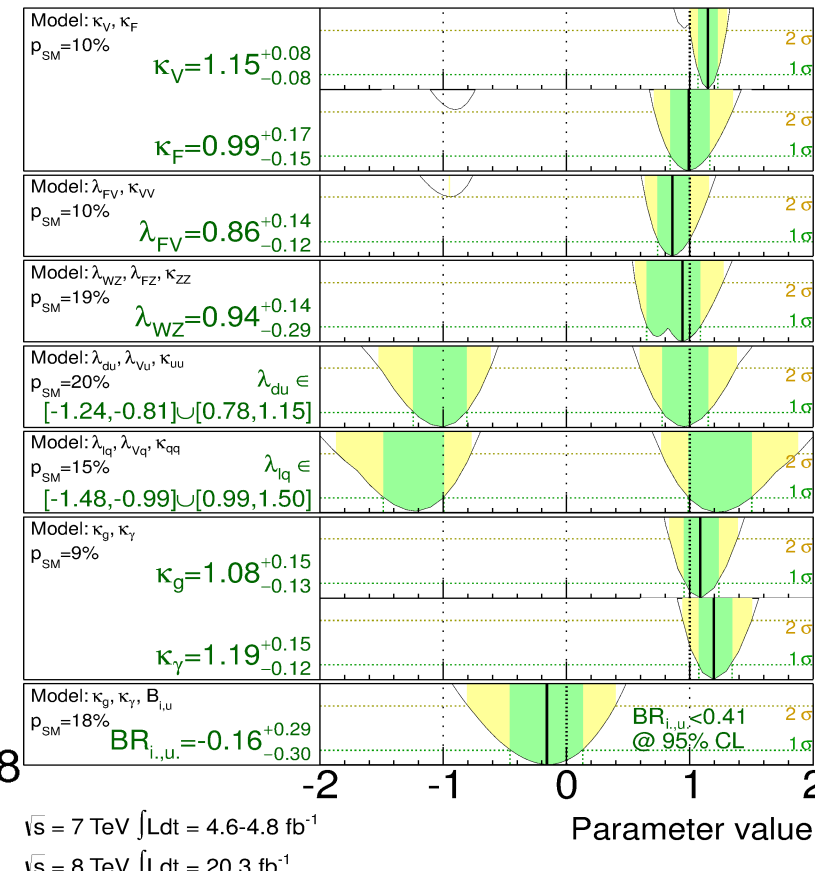


ATLAS Preliminary

$m_H = 125.5 \text{ GeV}$

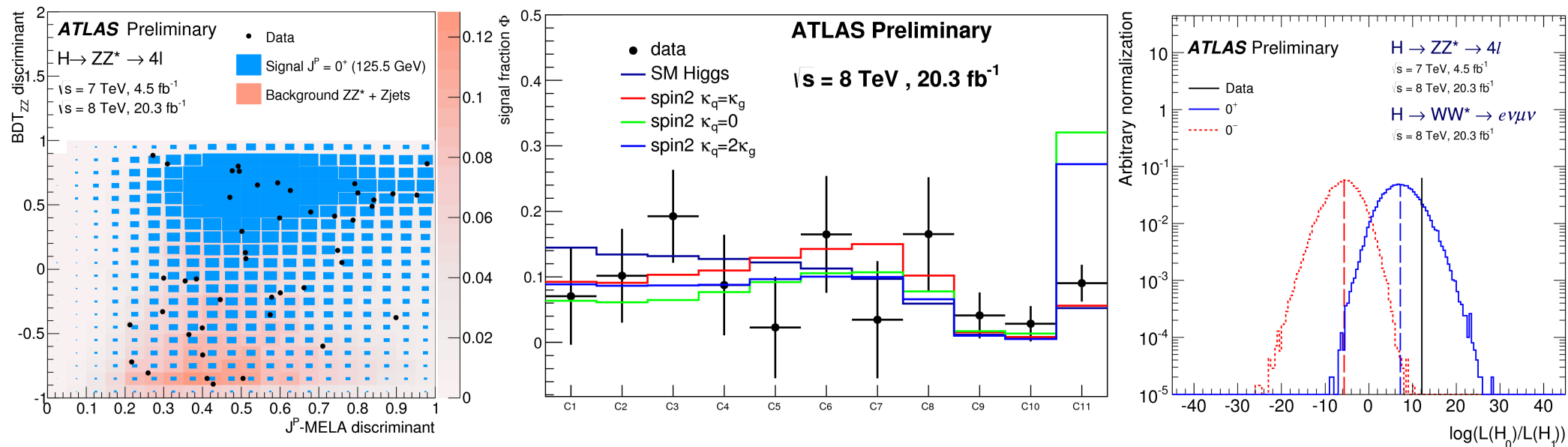
Total uncertainty

$\pm 1\sigma$ $\pm 2\sigma$

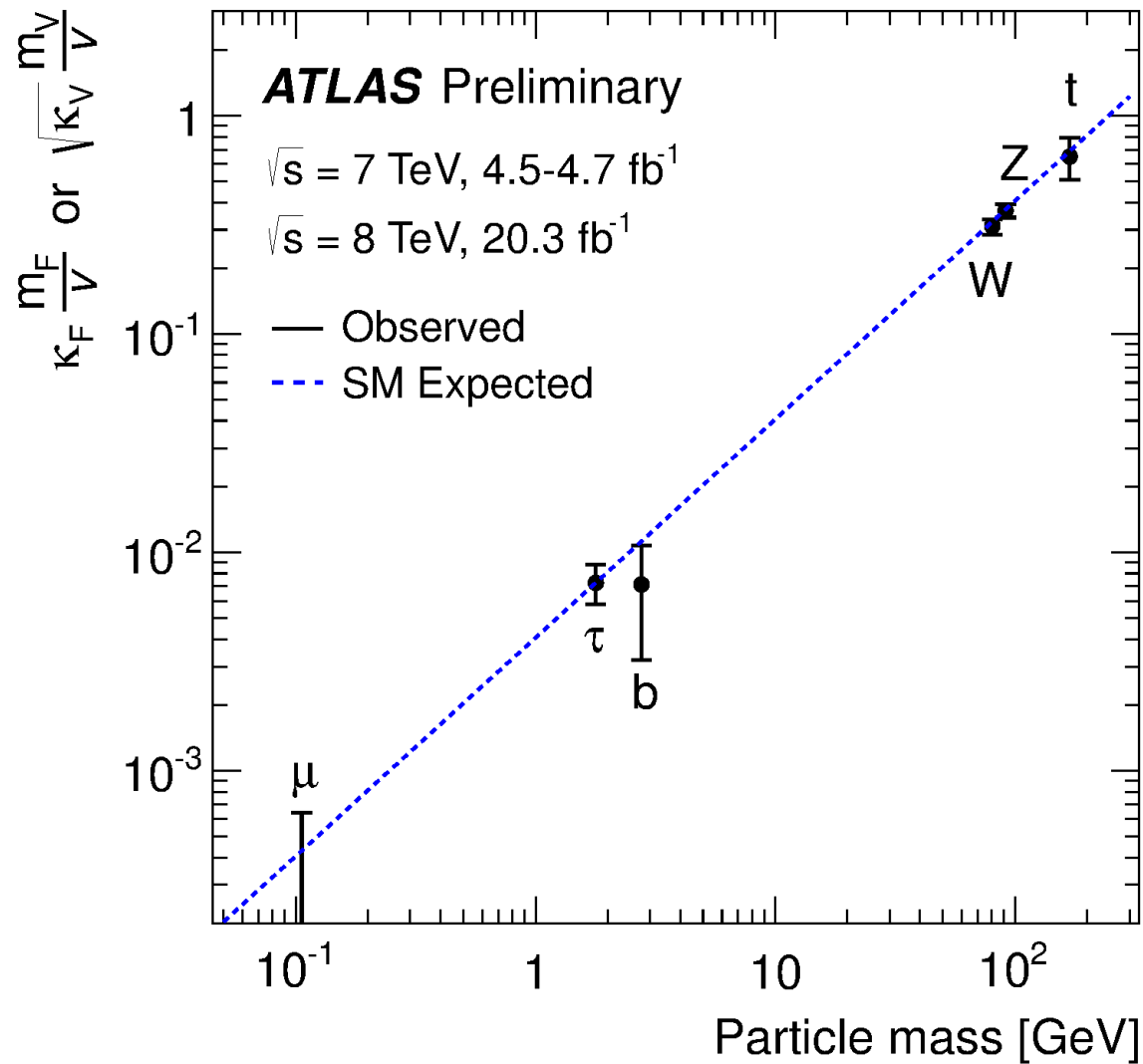


Spin et parité

- Observation de $H \rightarrow \gamma\gamma$ indique un spin entier, pas 1
- Exclusion de spin 1^+ , 1^- , 0^- , 2^+ de plus en plus claire (à plus de 99 % de confiance)
- A chaque fois consistant avec 0^+ : comme le boson de Higgs du modèle standard



Masse des particules et couplage au boson de Higgs



- Relation comme prévue par le modèle standard

Pour le moment, cette particule ressemble beaucoup au boson de Higgs du modèle standard.

Les nouvelles données depuis juin 2015 devraient permettre de tout mesurer avec une bien meilleure précision, modèle standard ou au-delà

Liens

ATLAS@home



atlasathome.cern.ch

ATLAS grand public



atlas.ch

ATLAS en direct

atlas-live.cern.ch

ATLAS sur



twitter.com/ATLASexperiment

ATLAS sur



www.facebook.com/ATLASexperiment

ATLAS sur



www.google.com/+ATLASexperiment

ATLAS sur



www.youtube.com/theATLASExperiment

Site français du



www.lhc-france.fr

Le CPPM



www.cppm.in2p3.fr

Le CERN



cern.ch

Le CERN sur



twitter.com/cern

Nouvelle affiche du SM

www.particuleselementaires.fr

Films utilisés

- Zoom de l'infiniment grand à l'infiniment petit
<http://www.science-et-vie.com/les-applications/le-grand-zoom-de-tout-lunivers>
- Chaîne d'accélération du LHC
<http://cds.cern.ch/record/2020780>
- Détection des particules dans ATLAS
<http://www.atlas.ch/multimedia/how-atlas-detects-particles.html>
- ATLAS : un nouvel espoir (épisode I)
<https://cds.cern.ch/record/1458001>
- Le détecteur à pixels
<http://atlas.web.cern.ch/Atlas/Visits/resources/smartboard/fr/inner/index.html>
- Le calorimètre électromagnétique
<http://atlas.web.cern.ch/Atlas/Visits/resources/smartboard/fr/ecal/index.html>
- Le calorimètre hadronique
<http://atlas.web.cern.ch/Atlas/Visits/resources/smartboard/fr/hcal/index.html>
- Le détecteur de muons
<http://atlas.web.cern.ch/Atlas/Visits/resources/smartboard/fr/muons/index.html>
- Désintégration d'un boson de Higgs en deux photons dans ATLAS
<http://www.atlas.ch/multimedia/2-photon-event.html>
- Evolution dans le temps du spectre de masse $H \rightarrow \gamma\gamma$
<http://twiki.cern.ch/twiki/pub/AtlasPublic/HiggsPublicResults/Hgg-FloatingScale-Short2.gif>
- Evolution dans le temps du spectre de masse $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow \ell\ell\ell$
<http://twiki.cern.ch/twiki/pub/AtlasPublic/HiggsPublicResults/4l-FixedScale-NoMuProf2.gif>
- Bille qui tourne et brisure de symétrie
<https://indico.in2p3.fr/event/10164/material/5/0.wmv>