

# La quête du boson de Higgs

Yann Coadou

Centre de physique des particules de Marseille



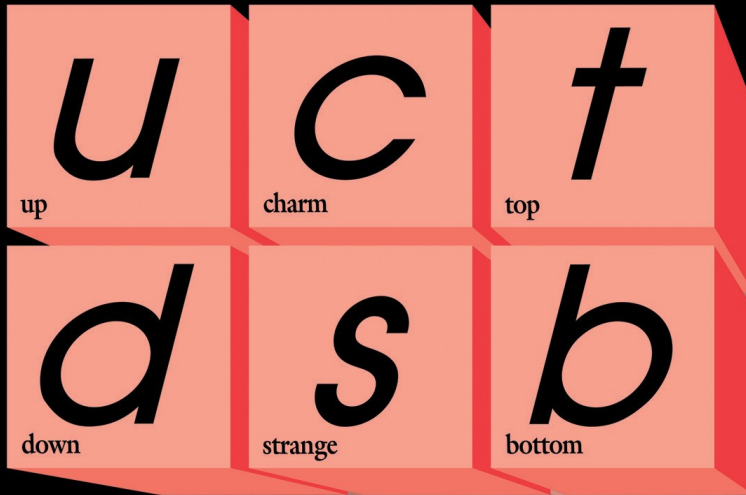
hands on particle physics

CPPM  
Mars 2013

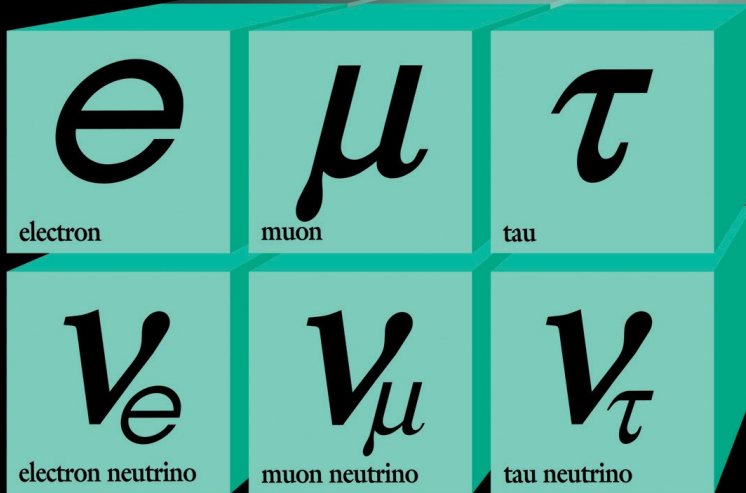
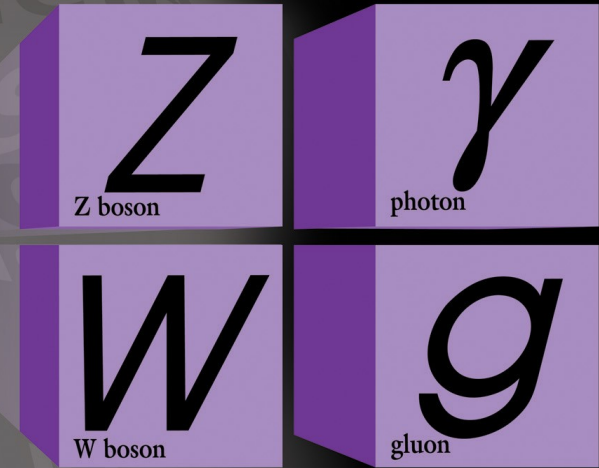


# Quarks

# Le modèle standard



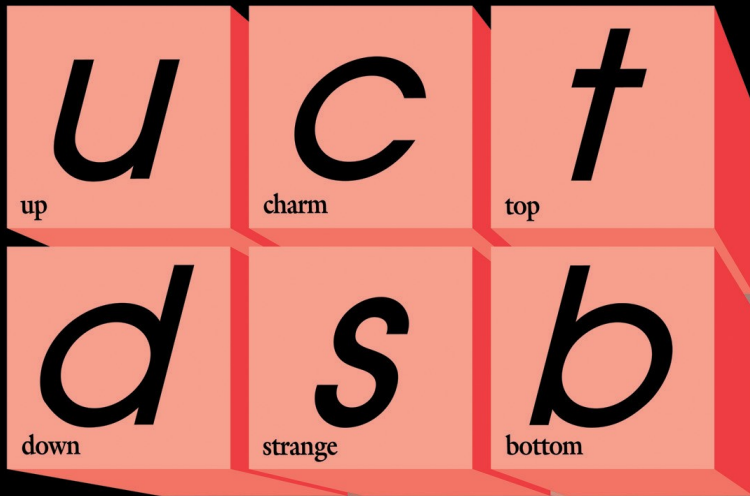
# Forces



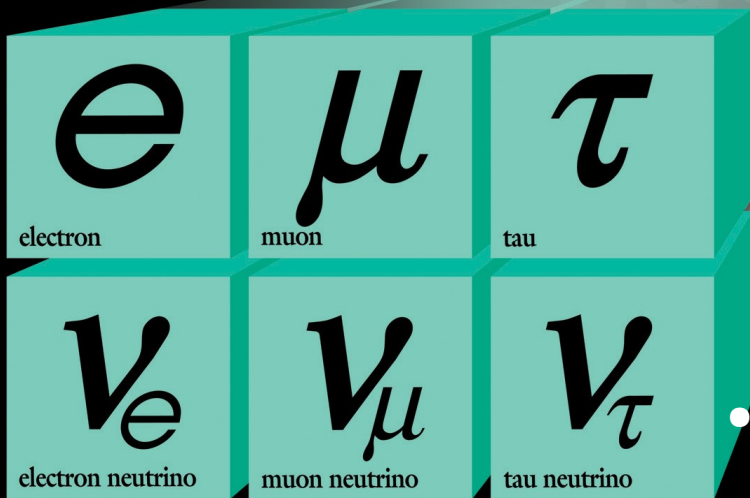
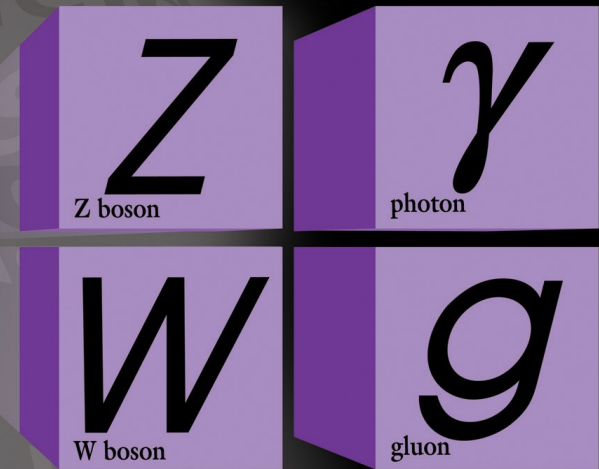
# Leptons

# Quarks

# Le modèle standard



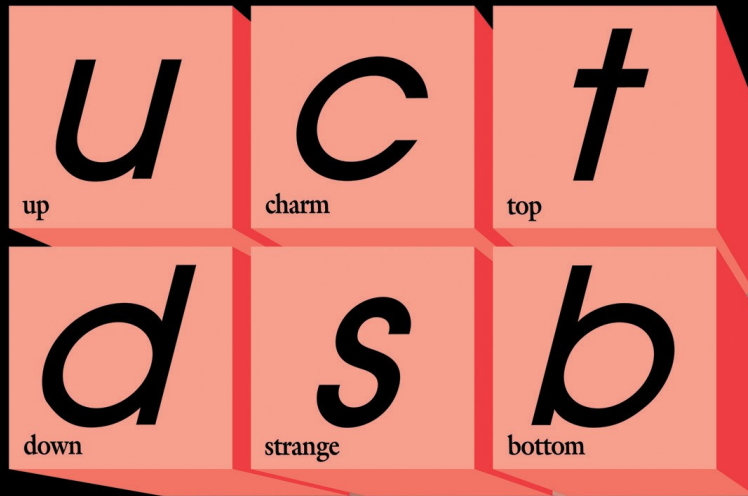
# Forces



- Sans le boson de Higgs, toutes ces particules ont une masse nulle

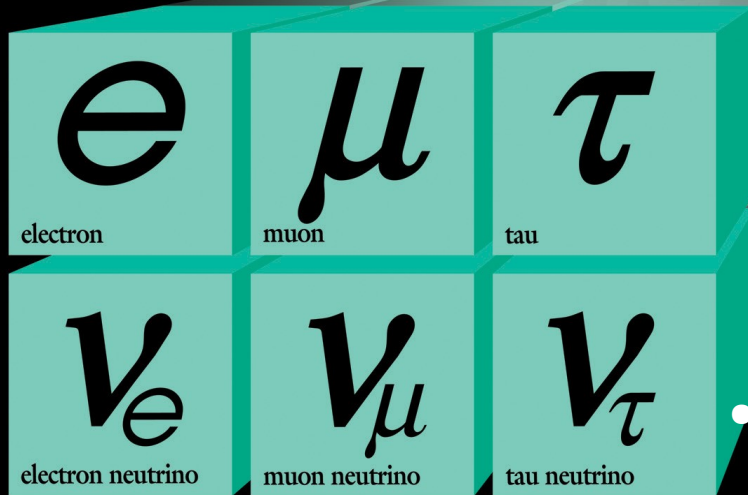
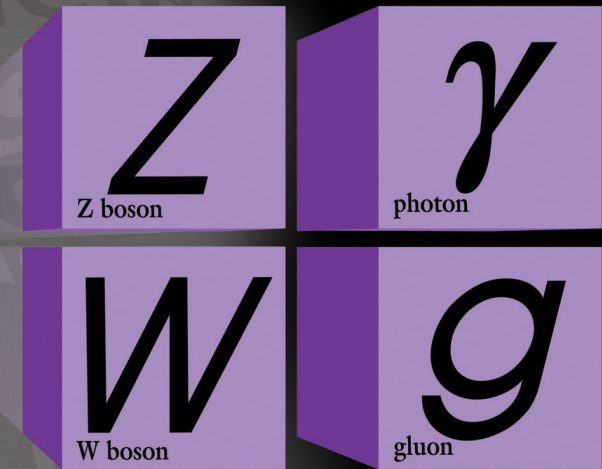
# Leptons

# Quarks



# Le modèle standard

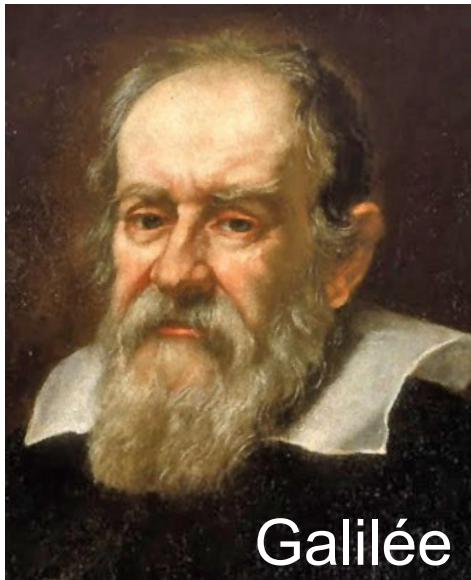
# Forces



# Leptons

- Sans le boson de Higgs, toutes ces particules ont une masse nulle
- C'est contraire à l'expérience...

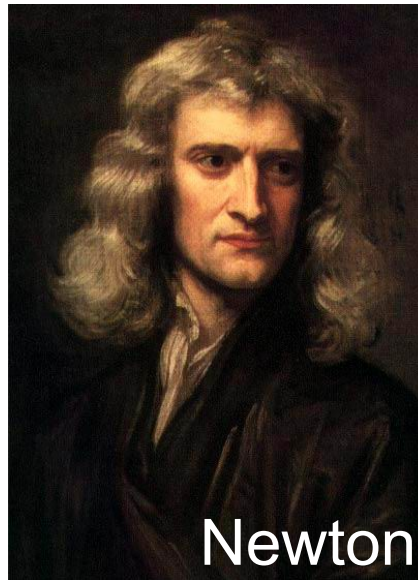
# La masse



Galilée

- Masse gravitationnelle

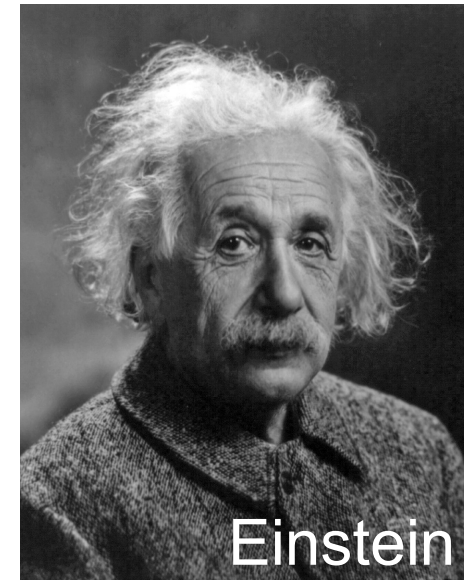
$$P = mg$$



Newton

- Masse inertielle

$$\Sigma F = ma$$



Einstein

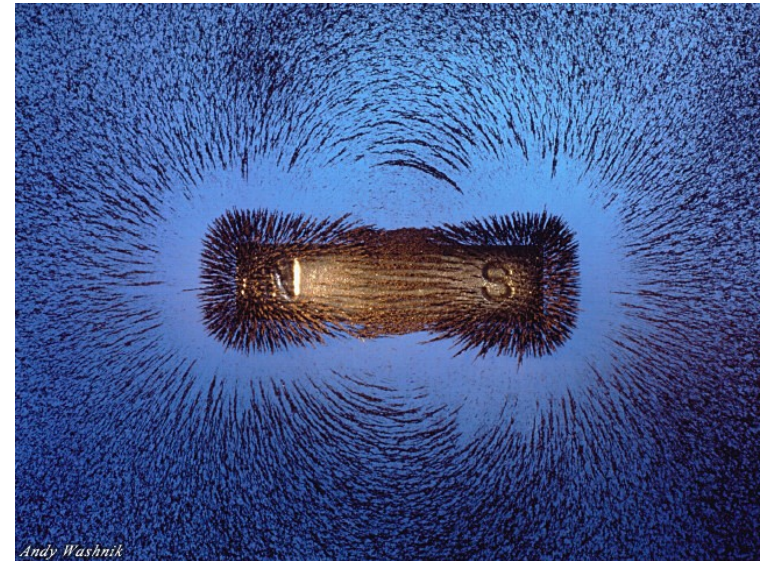
- Équivalence masse/énergie

$$E = mc^2$$

- Diverses interprétations de la notion de masse, toutes équivalentes
- D'après la théorie les particules élémentaires ont une masse nulle
  - L'Univers tel que nous le connaissons n'existe pas...
  - Contraire à l'expérience, introduction d'un mécanisme pour générer la masse

# Notion de champ

- Ensemble des valeurs prises par une grandeur physique en tout point de l'espace
  - Champ orienté : vecteur
    - Champ magnétique



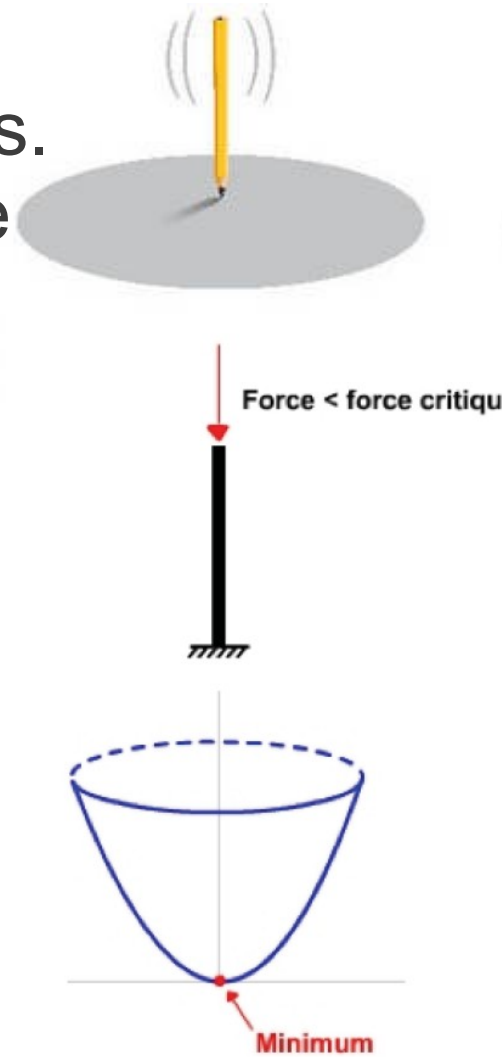
- Champ non-orienté : scalaire
  - Carte des températures
  - Champ de Higgs !

Bonus en théorie quantique des champs :  
particule associée (excitation du champ)

# Brisure spontanée de symétrie

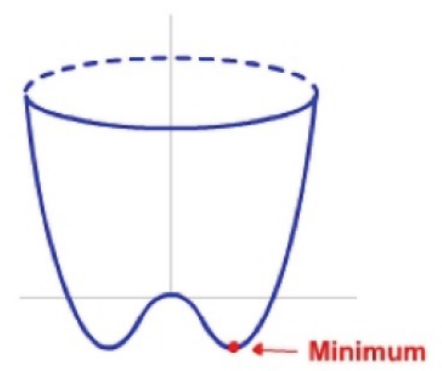
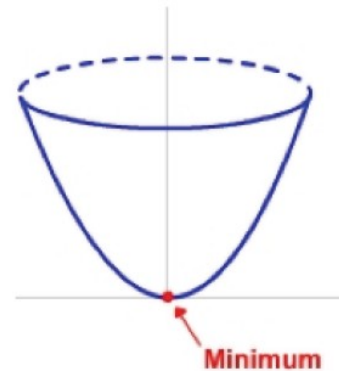
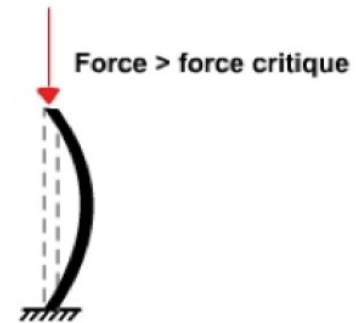
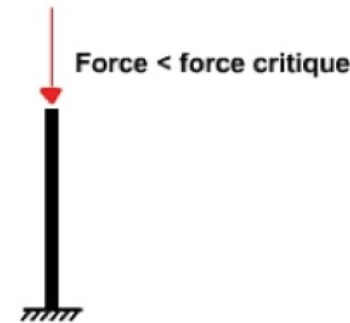
- Certains phénomènes physiques sont symétriques. Par exemple la symétrie de rotation :

- du crayon qui tourne sur lui-même
- d'une barre en compression



# Brisure spontanée de symétrie

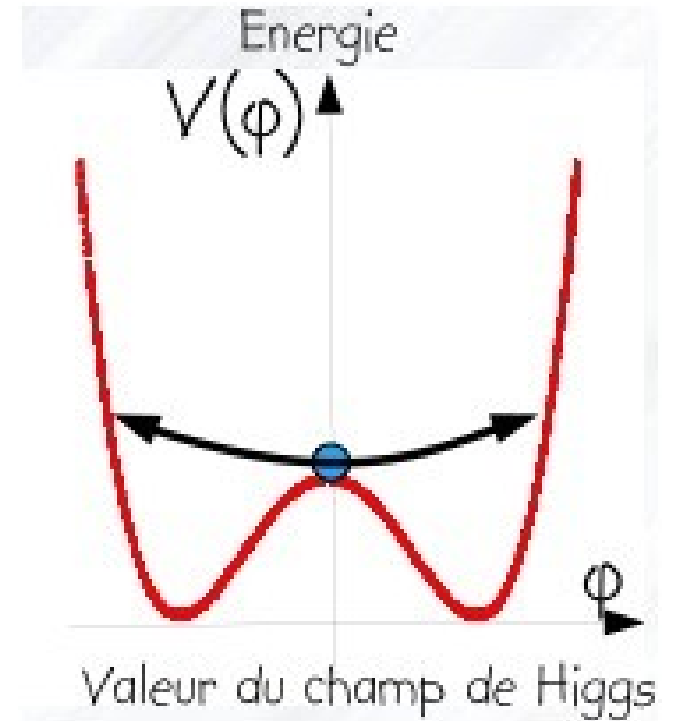
- Certains phénomènes physiques sont symétriques. Par exemple la symétrie de rotation :
  - du crayon qui tourne sur lui-même
  - d'une barre en compression
- Les solutions ne respectent pas forcément les mêmes symétries :
  - chute du crayon
  - flambage de la barre dans une direction donnée





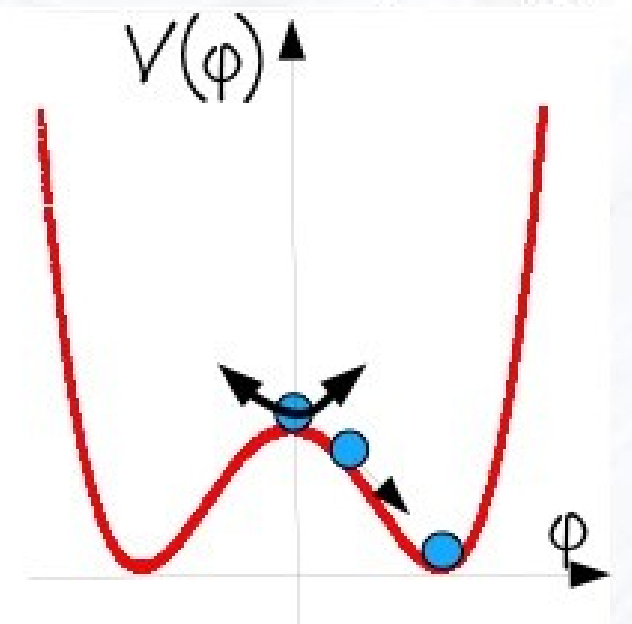
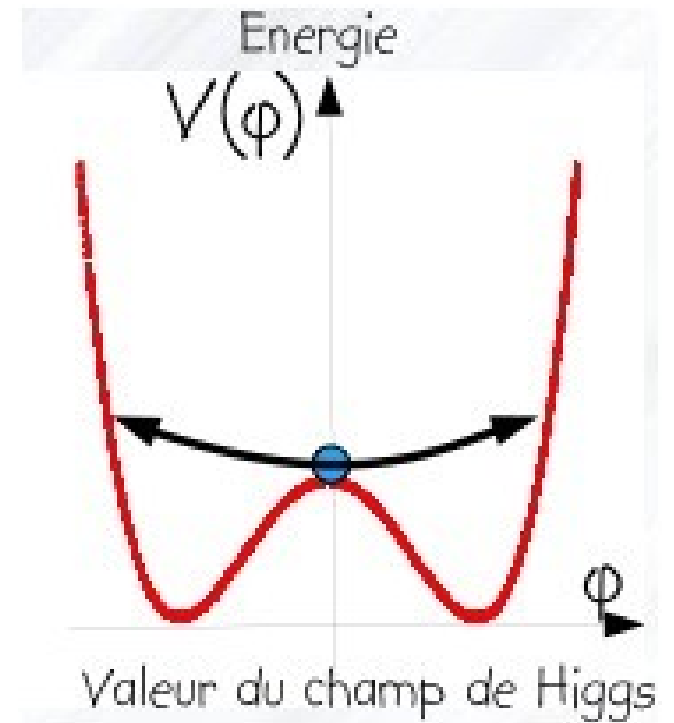
# Brisure de la symétrie électrofaible

- A haute température, juste après le Big Bang :
  - champ de Higgs nul dans l'état fondamental
  - les particules restent sans masse

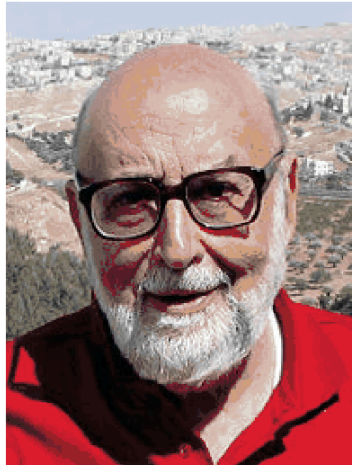


# Brisure de la symétrie électrofaible

- A haute température, juste après le Big Bang :
  - champ de Higgs nul dans l'état fondamental
  - les particules restent sans masse
- Réduction de la température ( $10^{-12}$  s après le Big Bang) :
  - brisure de symétrie
  - champ non nul
  - les particules élémentaires acquièrent une masse non nulle en **interagissant avec le champ de Higgs**



# 1964 : Le mécanisme de 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)

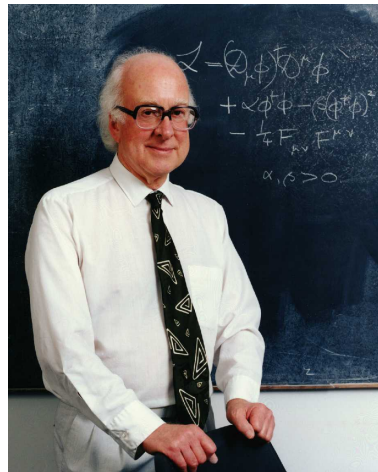
It is of interest to inquire whether gauge vector mesons acquire mass through interaction<sup>1</sup>; by a gauge vector meson we mean a Yang-Mills field<sup>2</sup> associated with the extension of a Lie group from global to local symmetry. The importance of this problem resides in the possibility that strong-interaction physics originates from massive gauge fields related to a system of conserved currents.<sup>3</sup> In this note, we shall show that in certain cases vector mesons do indeed acquire mass when the vacuum is degenerate with respect to a compact Lie group.

Theories with degenerate vacuum (broken symmetry) have been the subject of intensive study since their inception by Nambu.<sup>4-6</sup> A

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

We shall then examine a particular model based on chirality invariance which may have a more fundamental significance. Here we begin with a chirality-invariant Lagrangian and introduce both vector and pseudovector gauge fields, thereby guaranteeing invariance under both local phase and local  $\gamma_5$ -phase transformations. In this model the gauge fields themselves may break the  $\gamma_5$  invariance leading to a mass for the original Fermi field. We shall show in this case that the pseudovector field acquires mass.

In the last paragraph we sketch a simple argument which renders these results reason-



VOLUME 13, NUMBER 16

PHYSICAL REVIEW LETTERS

19 OCTOBER 1964

## 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, as a consequence of this coupling, the spin-one quanta of some of the gauge fields acquire mass; the longitudinal degrees of freedom of these particles (which would be absent if their mass were zero) go over into the Goldstone bosons when the coupling tends to zero. This phenomenon is just the relativistic analog of the plasmon phenom-

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

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

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

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

Equation (2b) describes waves whose quanta have (bare) mass  $2\varphi_0 \{ V''(\varphi_0^2) \}^{1/2}$ ; Eqs. (2a) and (2c) may be transformed, by the introduction of new variables

$$B_\mu = A_\mu - (e\varphi_0)^{-1} \partial_\mu (\Delta\varphi_1),$$

- Englert, Brout, Higgs, Guralnik, Hagen, Kibble publient à quelques mois d'intervalle
- Prédiction : existence du **champ de Higgs**, manifestation sous forme d'une nouvelle particule, le **boson de Higgs**

# Mécanisme de Higgs en images



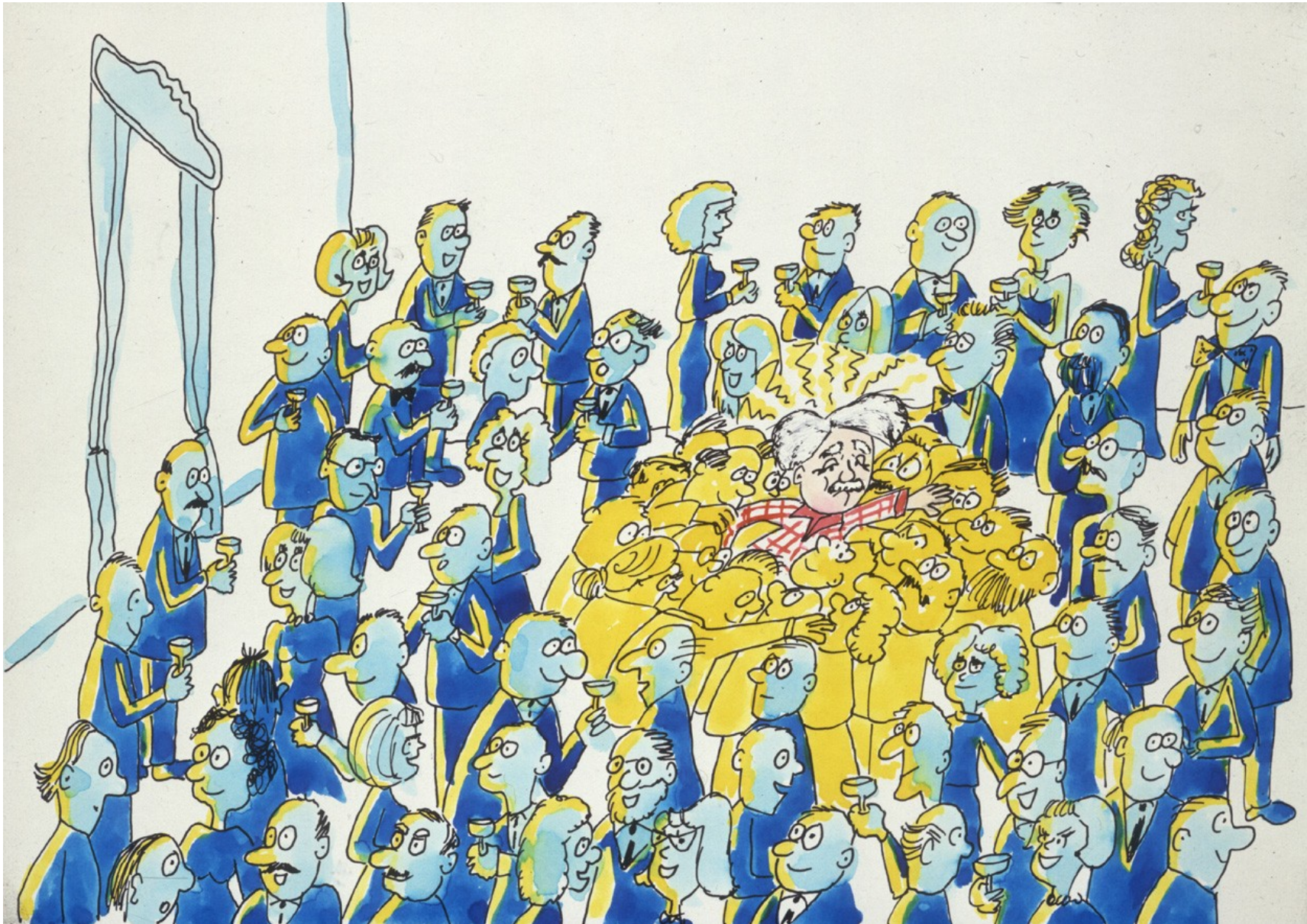
Imaginons qu'une salle pleine de physiciens conversant calmement est comme l'espace occupé seulement par le champ de Higgs...

# Mécanisme de Higgs en images



... Albert Einstein entre, créant une perturbation sur son passage et attirant un essaim d'admirateurs à chaque pas ...

# Mécanisme de Higgs en images



ce qui accroît la résistance à son déplacement : il acquiert une masse, comme une particule se déplaçant dans un champ de Higgs

# Mécanisme de Higgs en images



... si une rumeur traverse la salle ...

# Mécanisme de Higgs en images



... elle donne naissance à un essaim de même type, composé cette fois des seuls physiciens. Cet essaim représente la particule de Higgs.



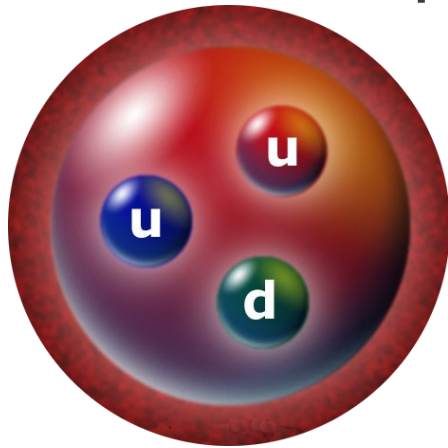
# Interactions avec le boson de Higgs

film



# La masse

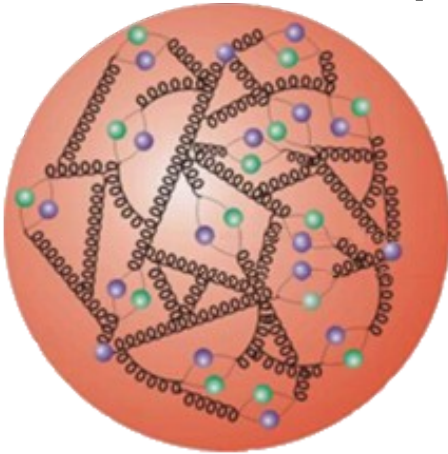
- Notre masse : celle de nos atomes
- Masse des atomes : presque uniquement celle des noyaux, faits de protons et neutrons de masse  $\sim 1$  GeV



- Proton, neutron : 3 quarks, masse  $\sim 10$  MeV

# La masse

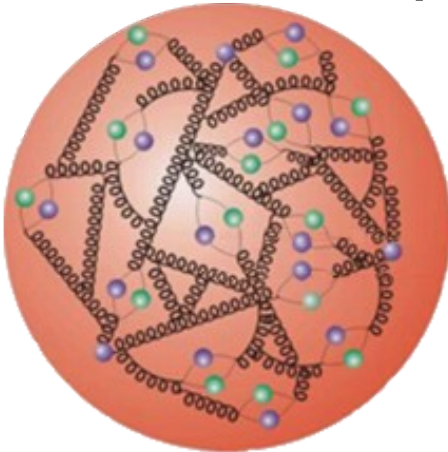
- Notre masse : celle de nos atomes
- Masse des atomes : presque uniquement celle des noyaux, faits de protons et neutrons de masse  $\sim 1$  GeV



- En réalité, plein de gluons, dont l'énergie donne 99% de leur masse au proton et au neutron ( $E=mc^2$ )

# La masse

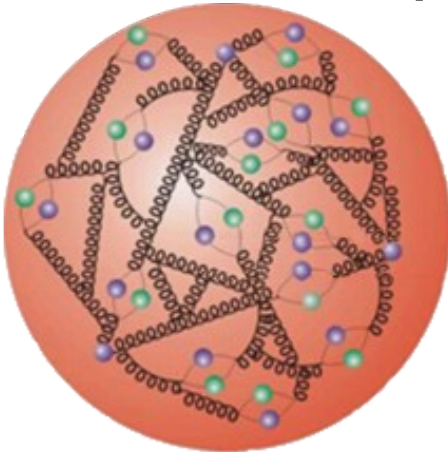
- Notre masse : celle de nos atomes
- Masse des atomes : presque uniquement celle des noyaux, faits de protons et neutrons de masse  $\sim 1$  GeV



- En réalité, plein de gluons, dont l'énergie donne 99% de leur masse au proton et au neutron ( $E=mc^2$ )
- Boson de Higgs : explique « seulement » la masse des particules élémentaires (quarks, électron [leptons], bosons Z et  $W^\pm$ ) et la sienne

# La masse

- Notre masse : celle de nos atomes
- Masse des atomes : presque uniquement celle des noyaux, faits de protons et neutrons de masse  $\sim 1$  GeV

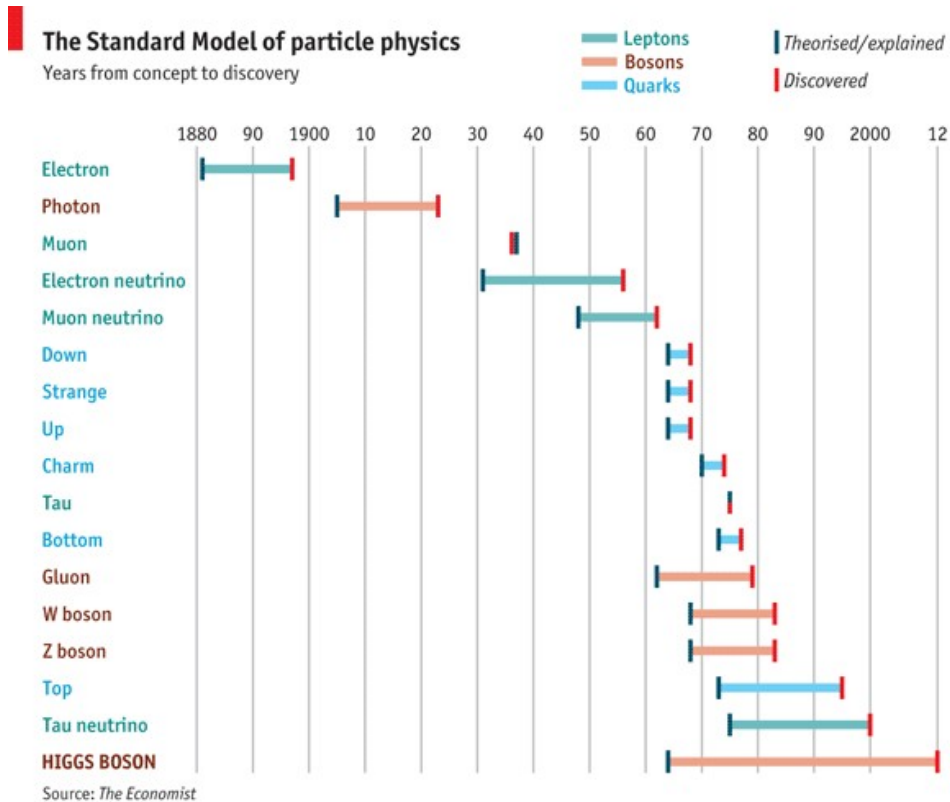


- En réalité, plein de gluons, dont l'énergie donne 99% de leur masse au proton et au neutron ( $E=mc^2$ )
- Boson de Higgs : explique « seulement » la masse des particules élémentaires (quarks, électron [leptons], bosons Z et  $W^\pm$ ) et la sienne
- Pas grand chose ? Sans lui, pas d'atomes, pas de chimie, pas de vie ou d'Univers tels que nous les connaissons...

# Pourquoi ce battage médiatique le 4 juillet 2012 ?



# Une longue quête

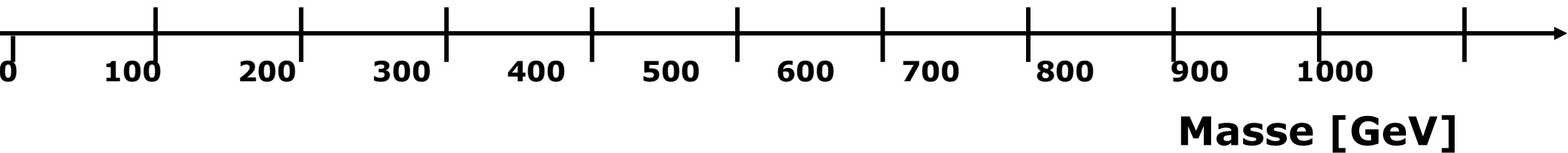


© The Economist

- 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

?

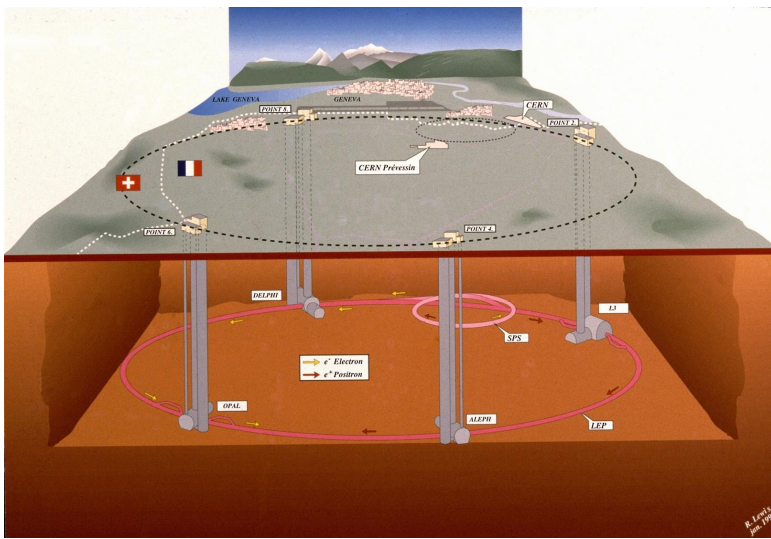
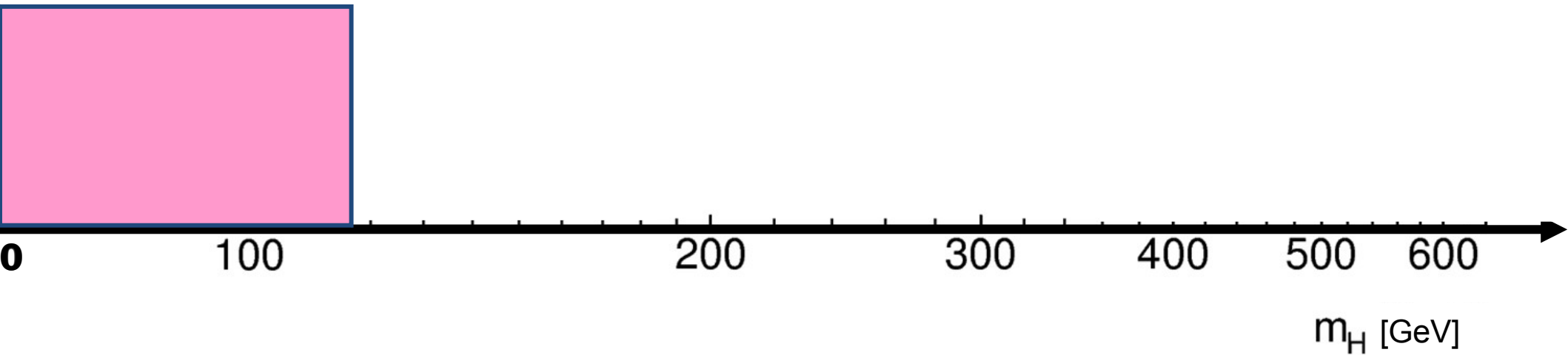


- Seule contrainte théorique : masse  $< 1000$  GeV



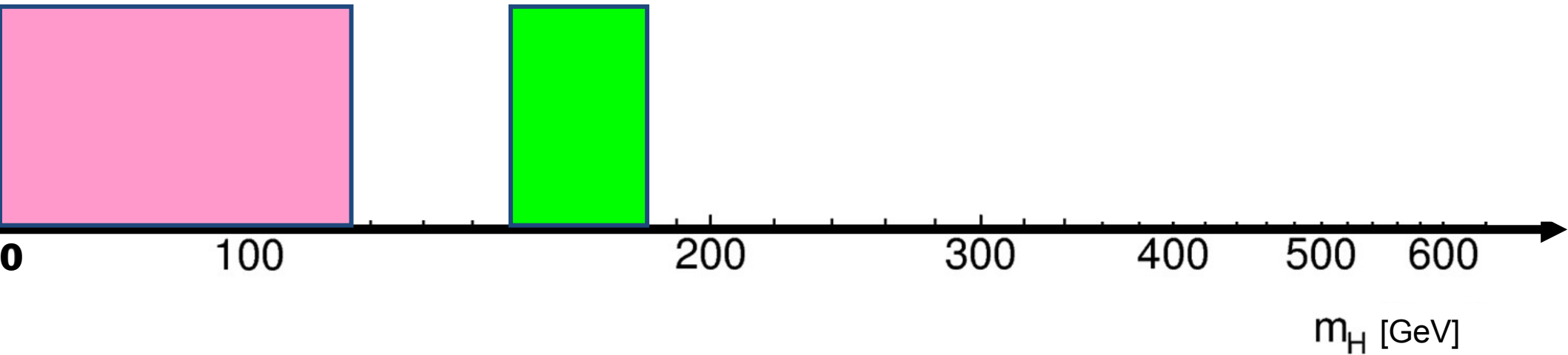
# La chasse au boson de Higgs

LEP  
1989-2000



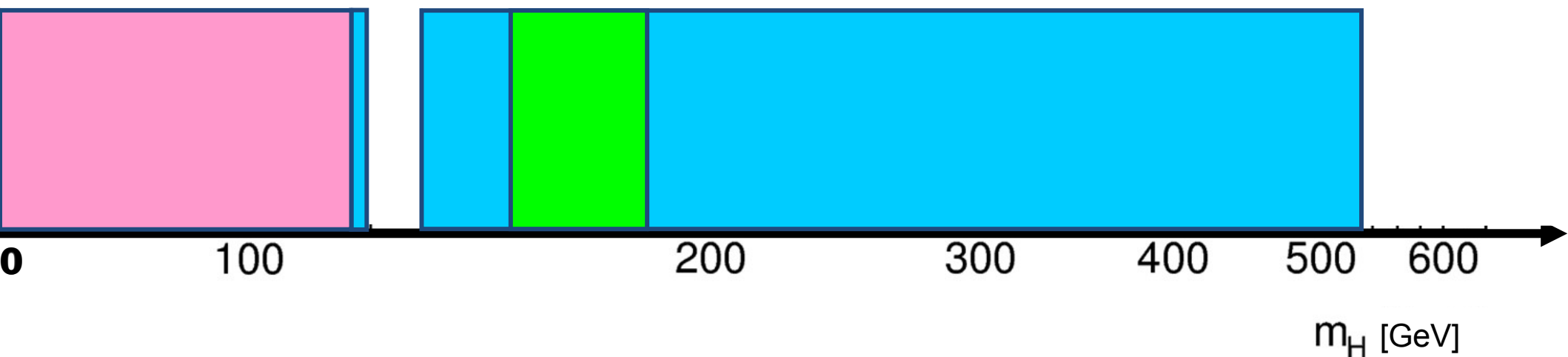
# La chasse au boson de Higgs

Tevatron  
1983-2011

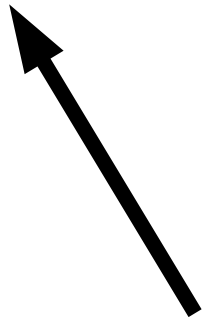
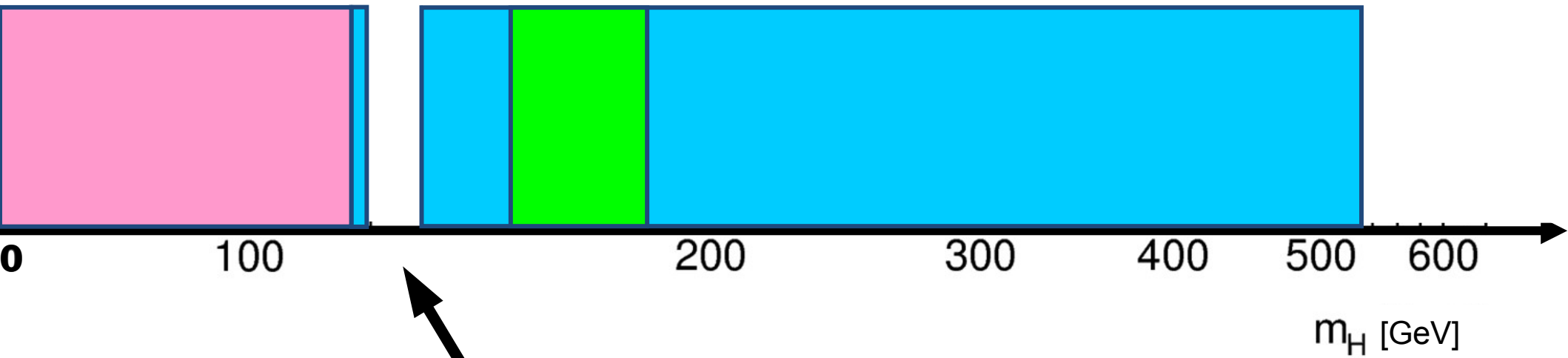


# La chasse au boson de Higgs

LHC  
2009-2011



# La chasse au boson de Higgs



?



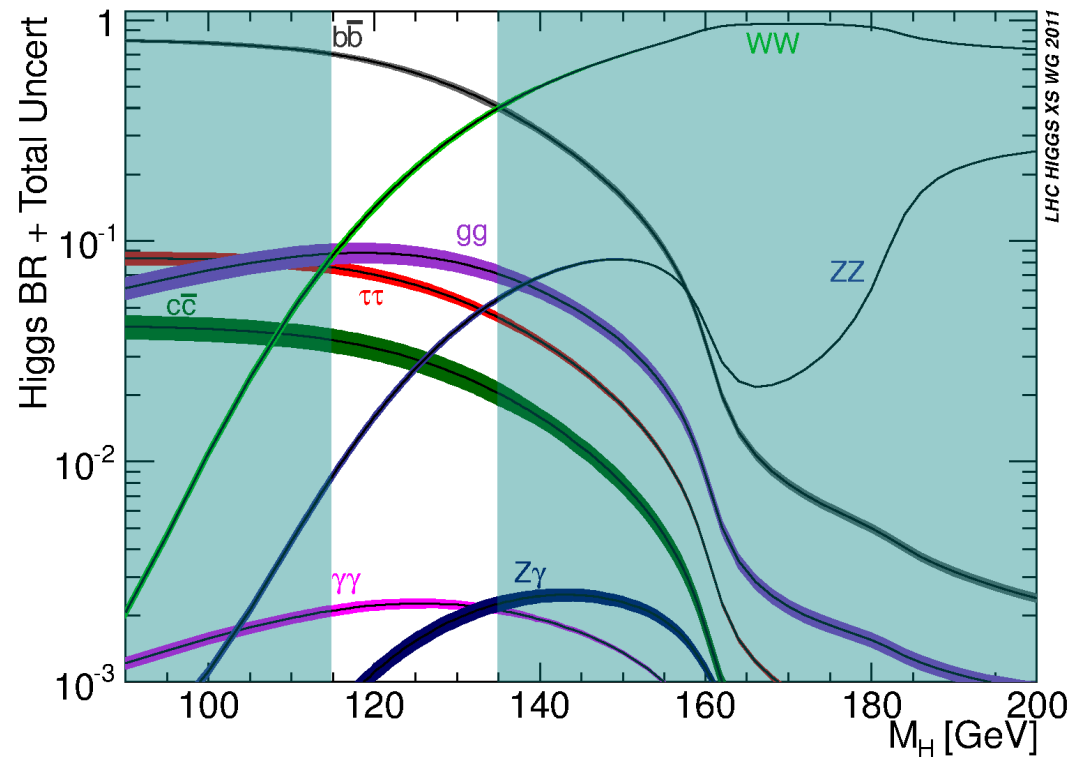
# Comment s'y prend-on ?

- 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 126 GeV :

- 56 fois sur 100 en  $b\bar{b}$
- 23 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, c'est le bruit de fond

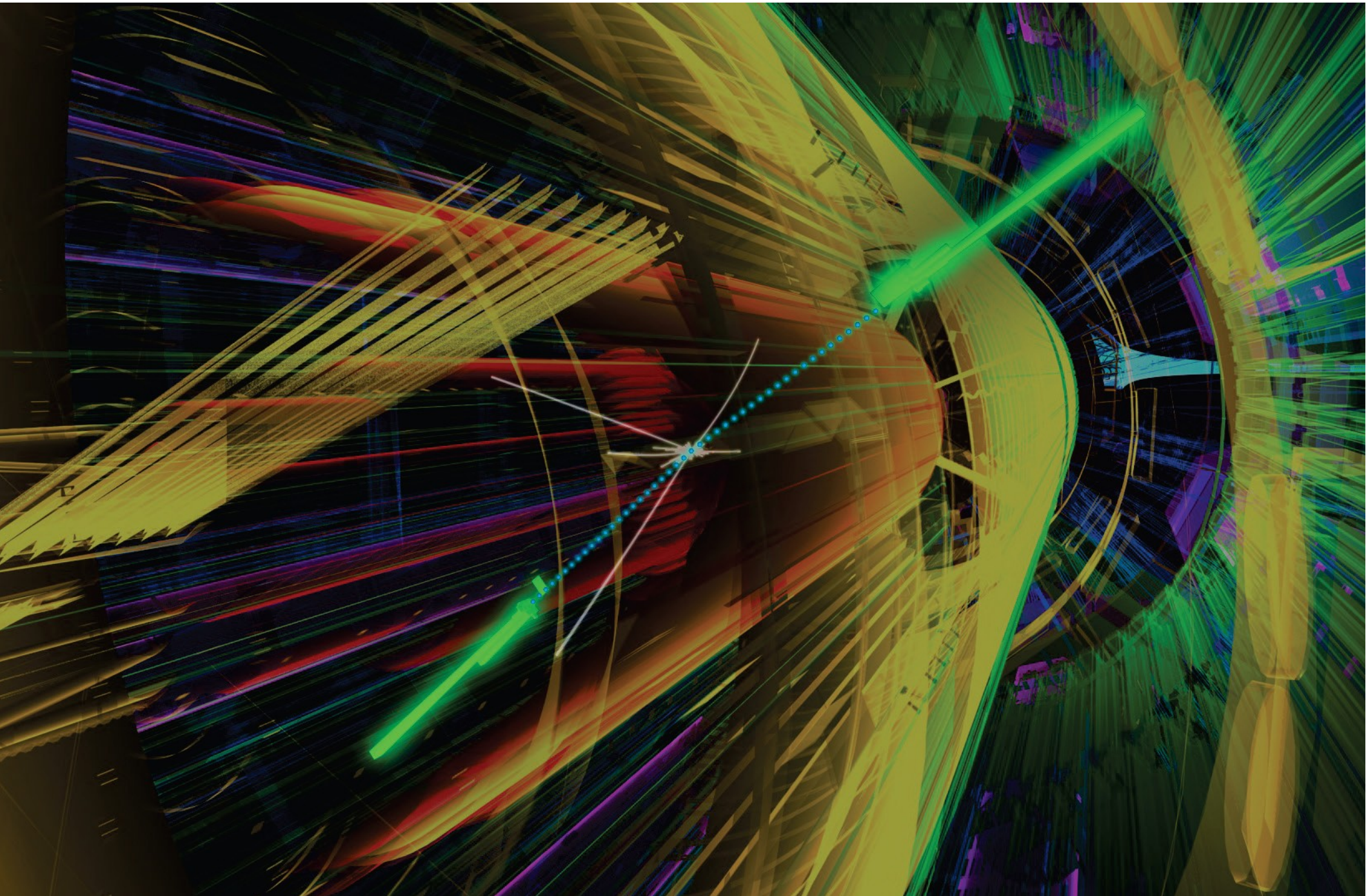


# Boson de Higgs dans ATLAS

film

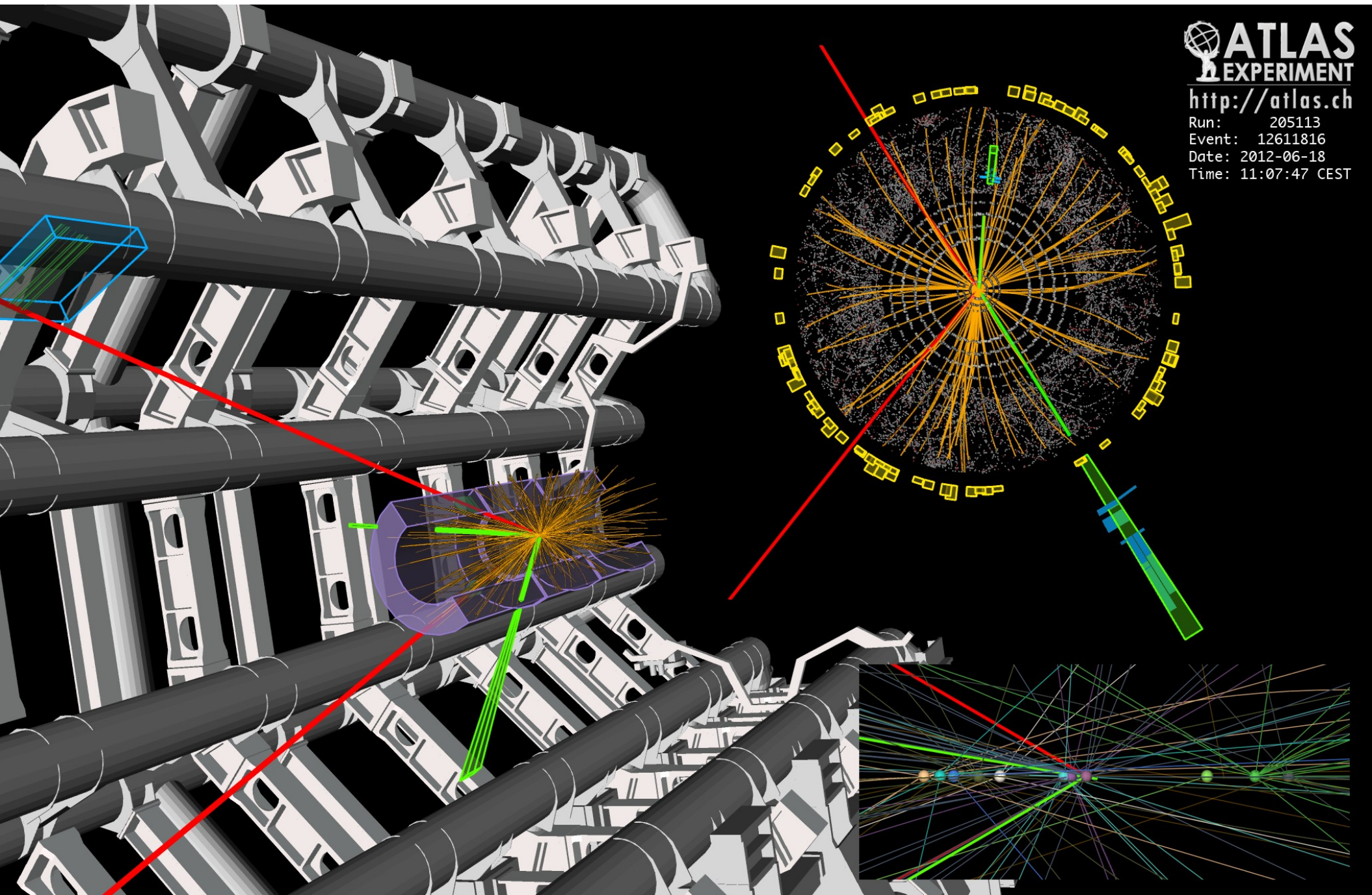


# Candidat $H \rightarrow \gamma\gamma$





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



**ATLAS**  
EXPERIMENT

<http://atlas.ch>

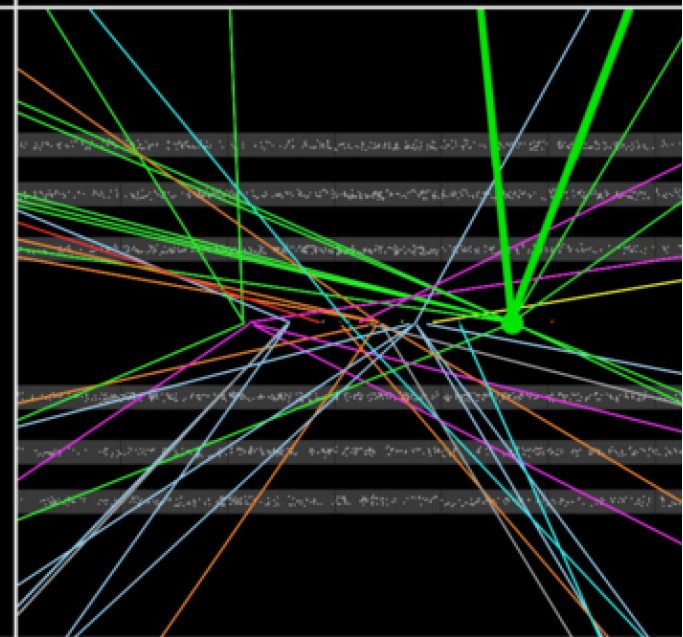
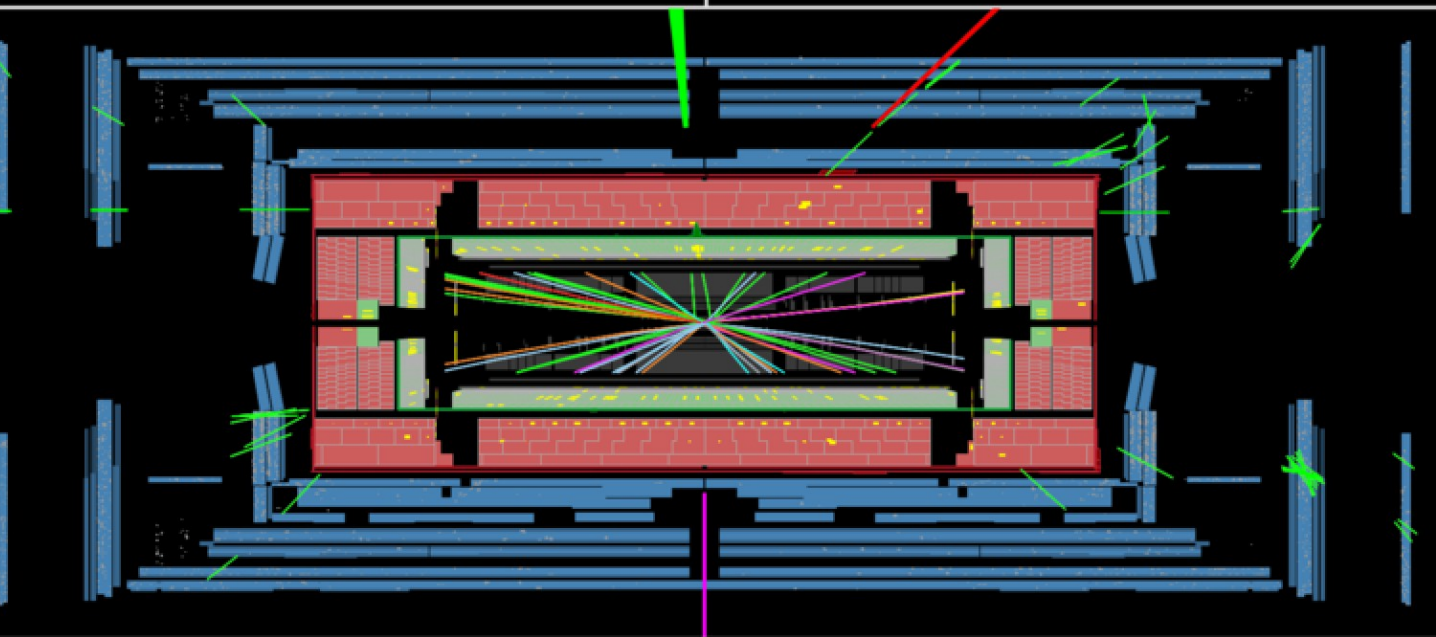
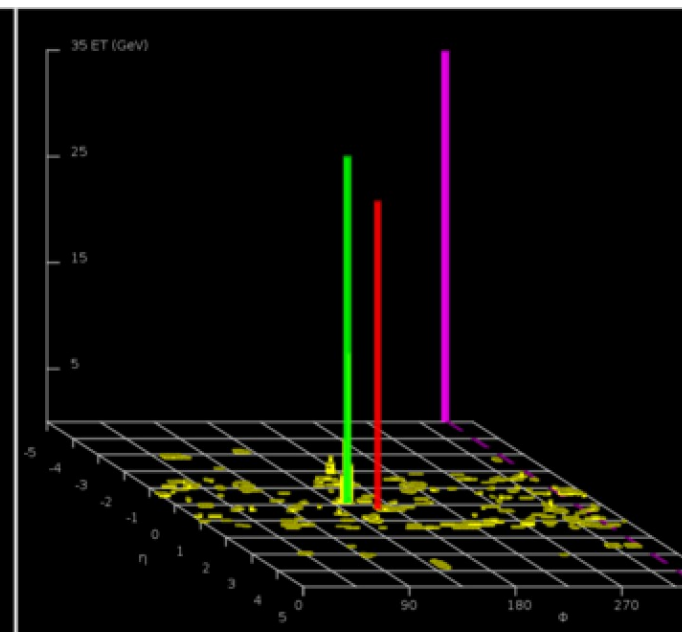
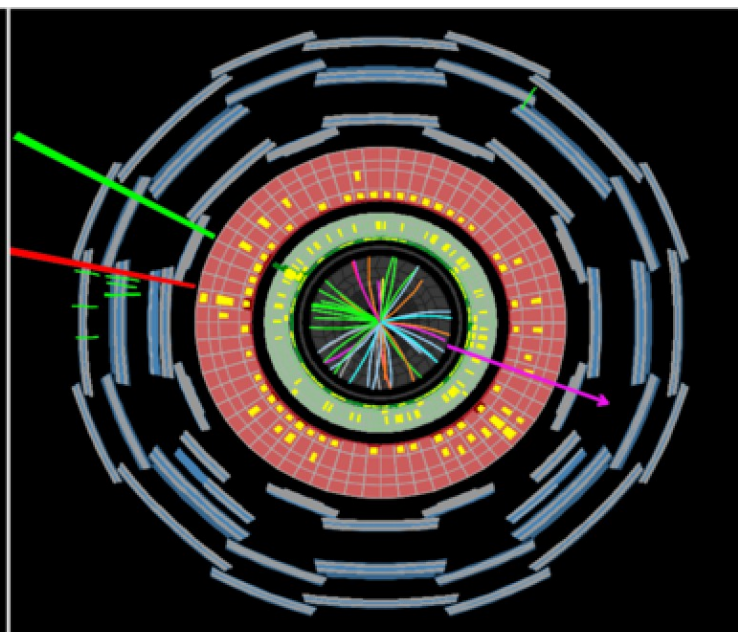
Run: 205113  
Event: 12611816  
Date: 2012-06-18  
Time: 11:07:47 CEST

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



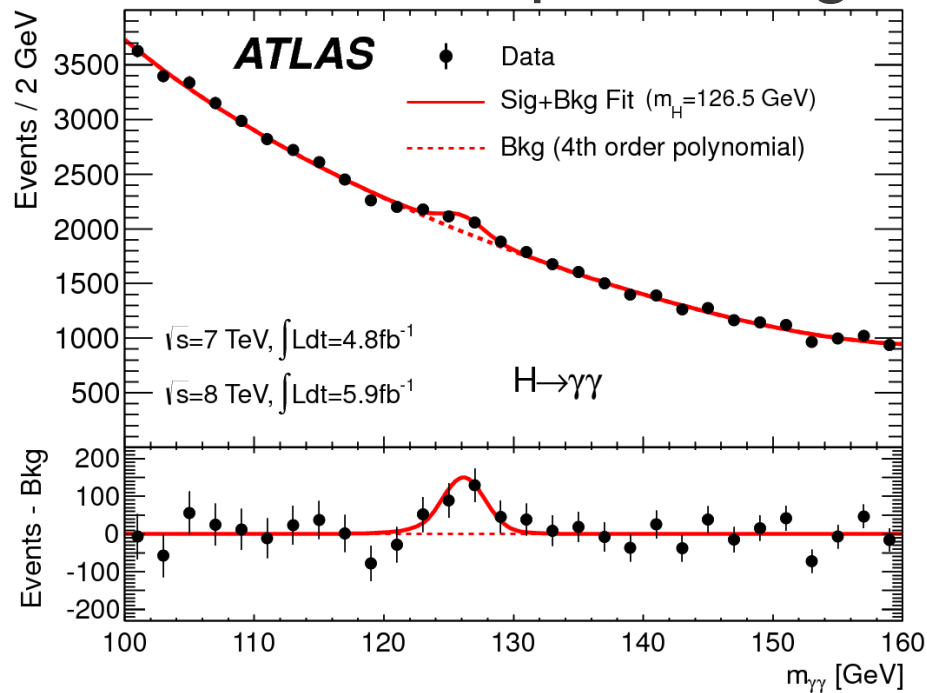
**ATLAS**  
EXPERIMENT

Run Number: 204026, Event Number: 33133446  
Date: 2012-05-28 07:23:47 CEST

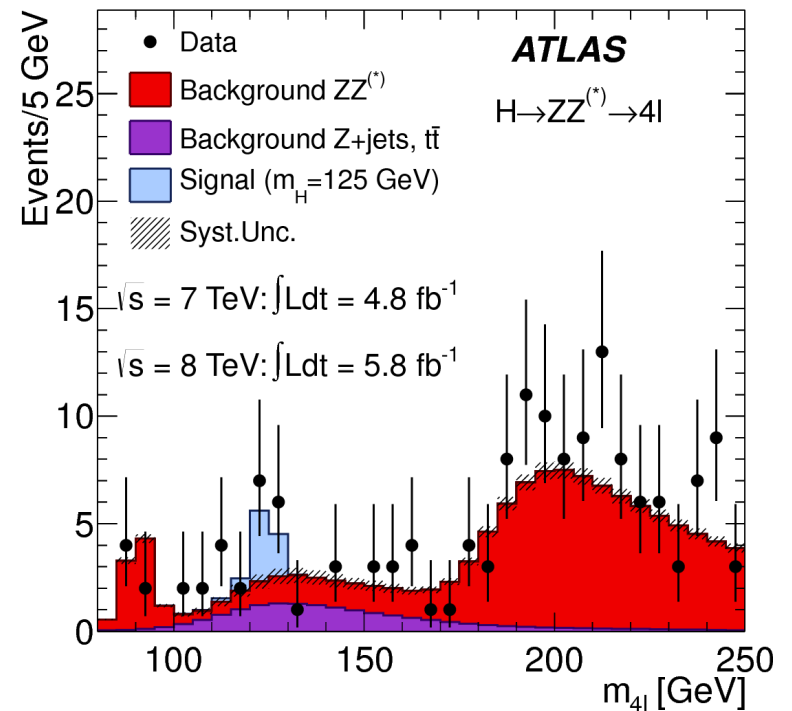


# Mesure

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

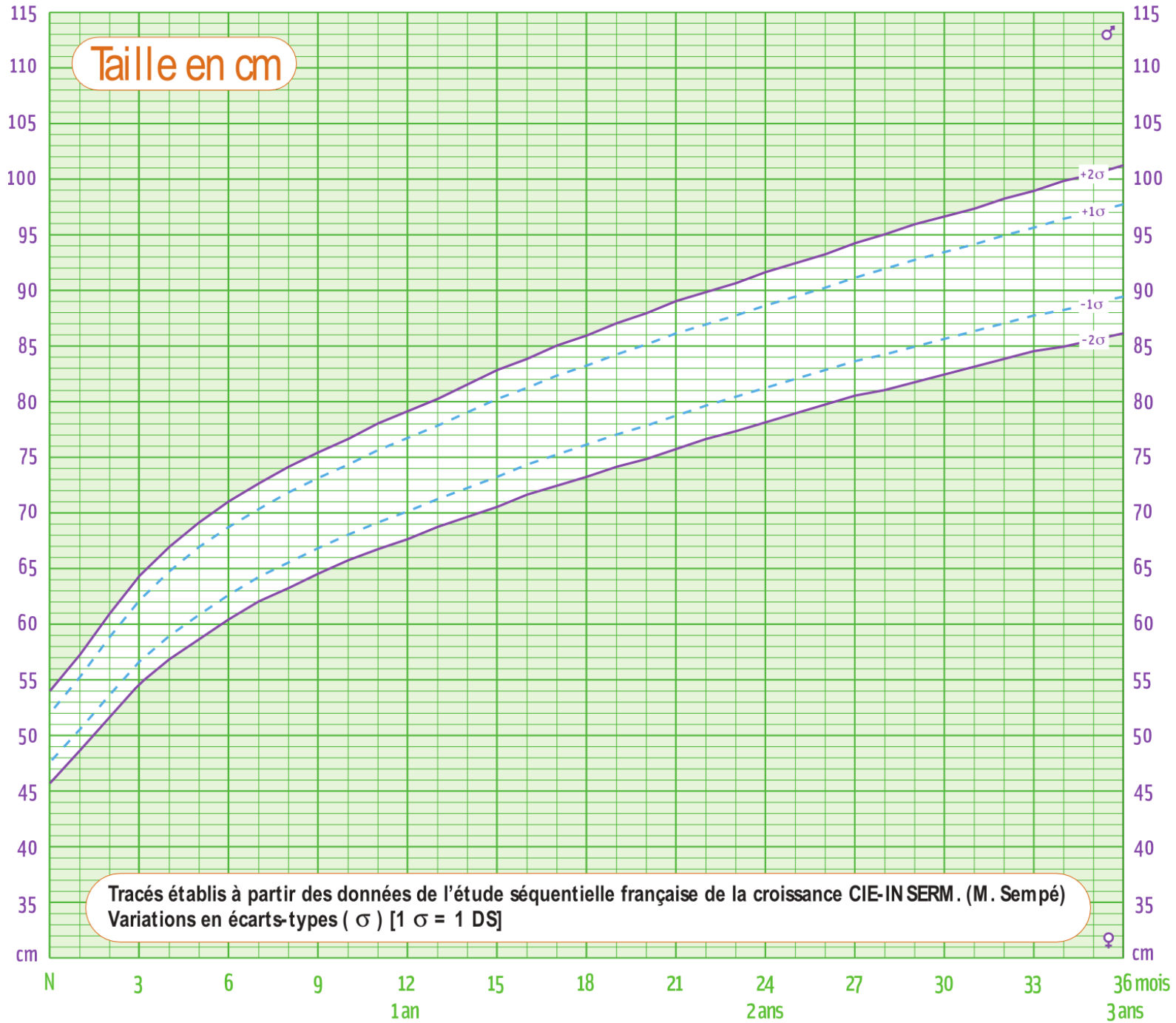


- Higgs en ZZ
  - Très peu de bruit de fond
  - Très peu d'événements

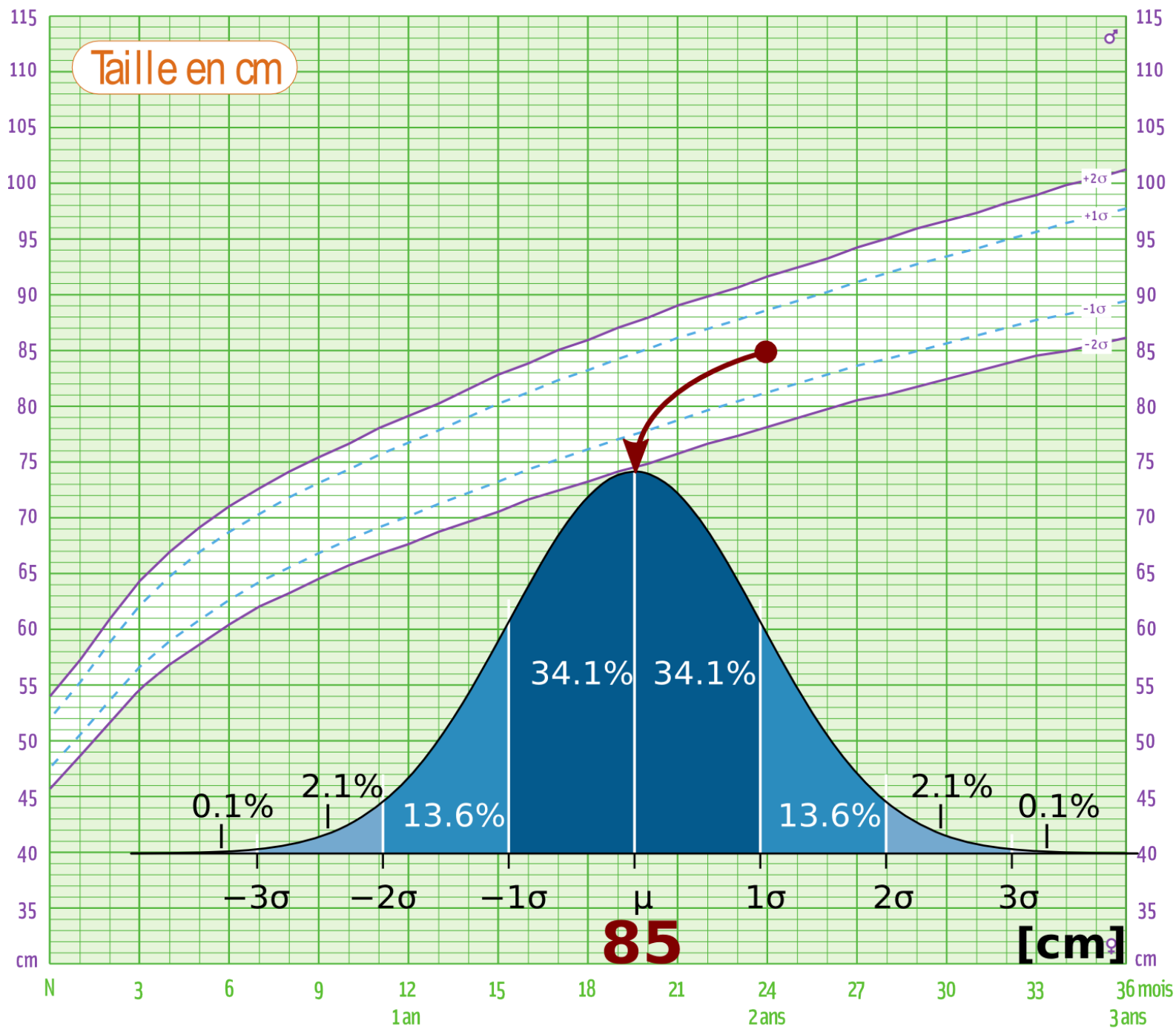


- Est-ce que cela est significatif ?
- Outils statistiques pour répondre

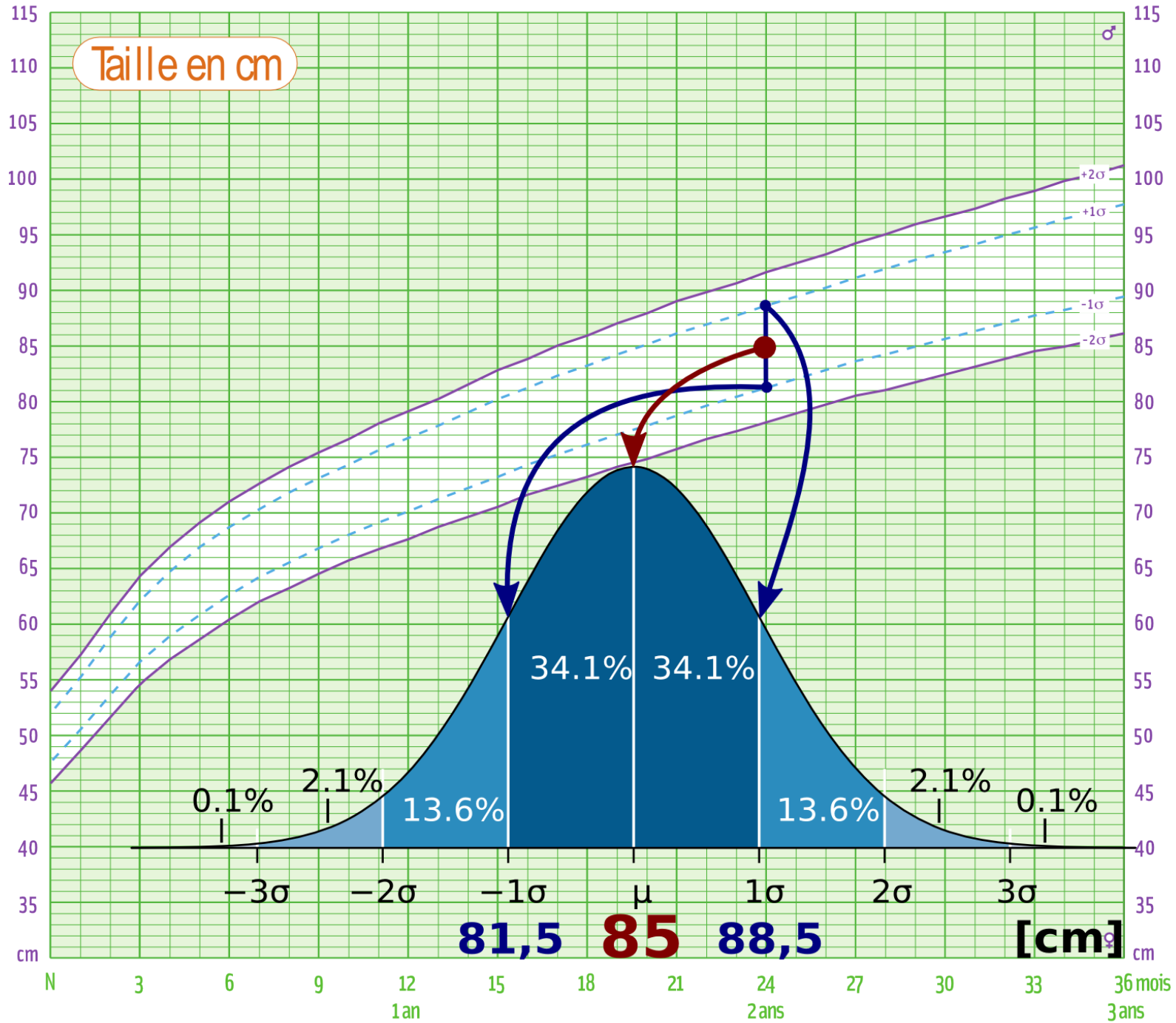
# La Gaussienne



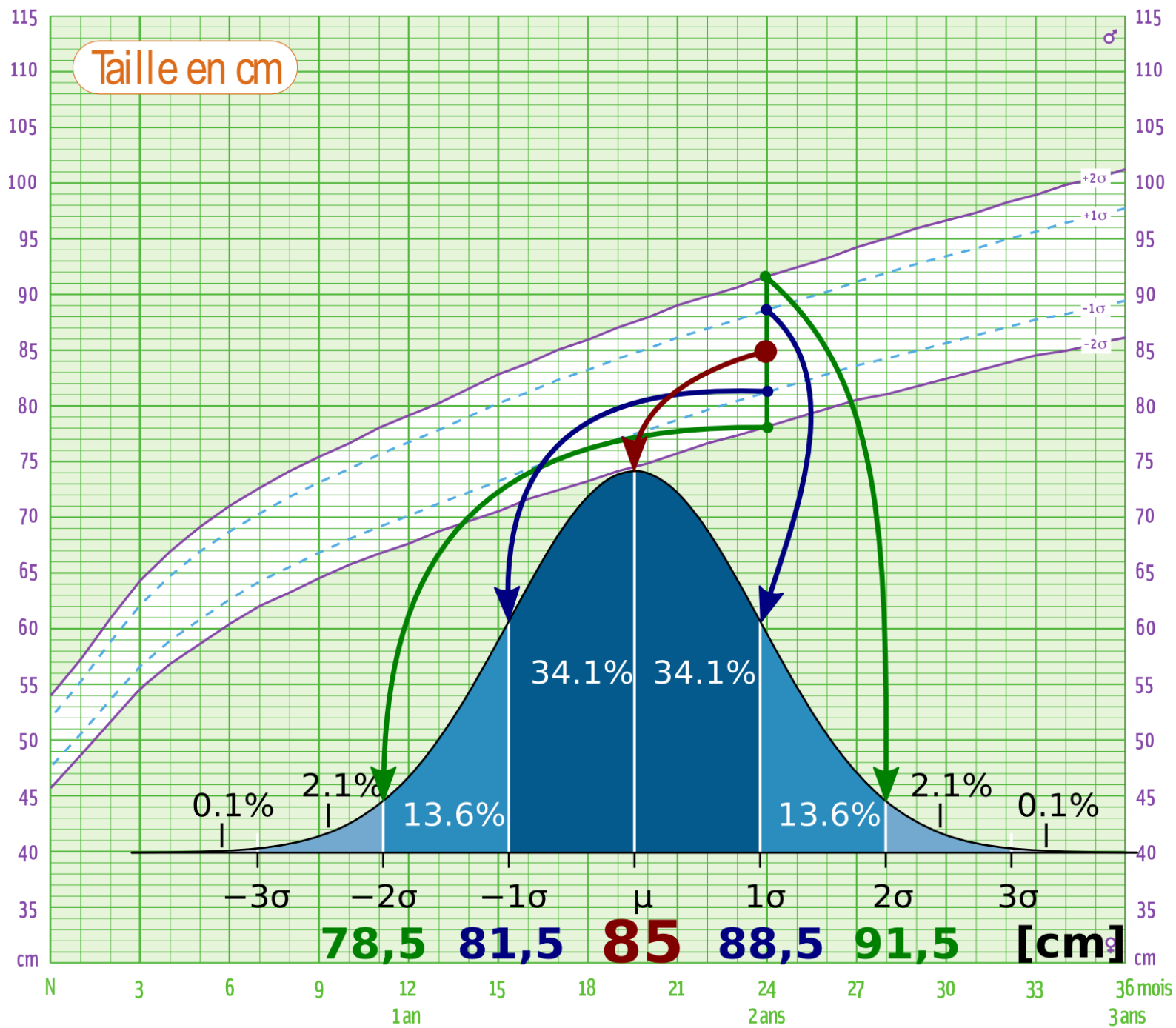
# La Gaussienne



# La Gaussienne



# La Gaussienne



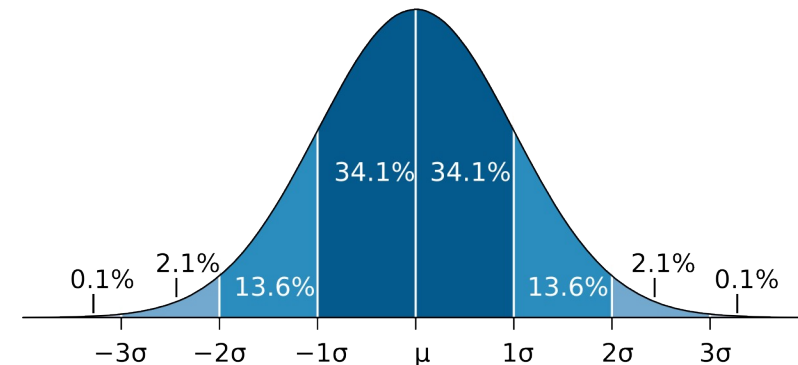
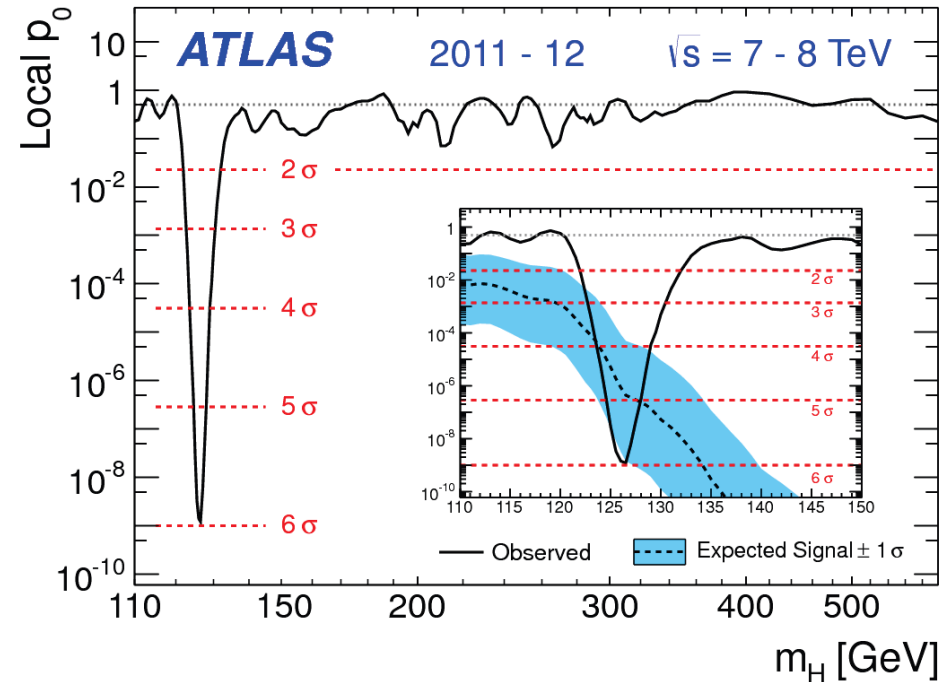
# Significance statistique

- $p_0$  : mesure la probabilité que des événements du bruit de fond produisent quelque chose qui ressemble autant au signal recherché

- Quantifié en nombre de déviations standard :

- $1\sigma$  : 1 chance sur 3
- $3\sigma$  (évidence) : 3 chances sur 1000
- $5\sigma$  (observation) : 1 chance sur 2 millions
- $5,9\sigma$  : 3 chances sur 1 milliard

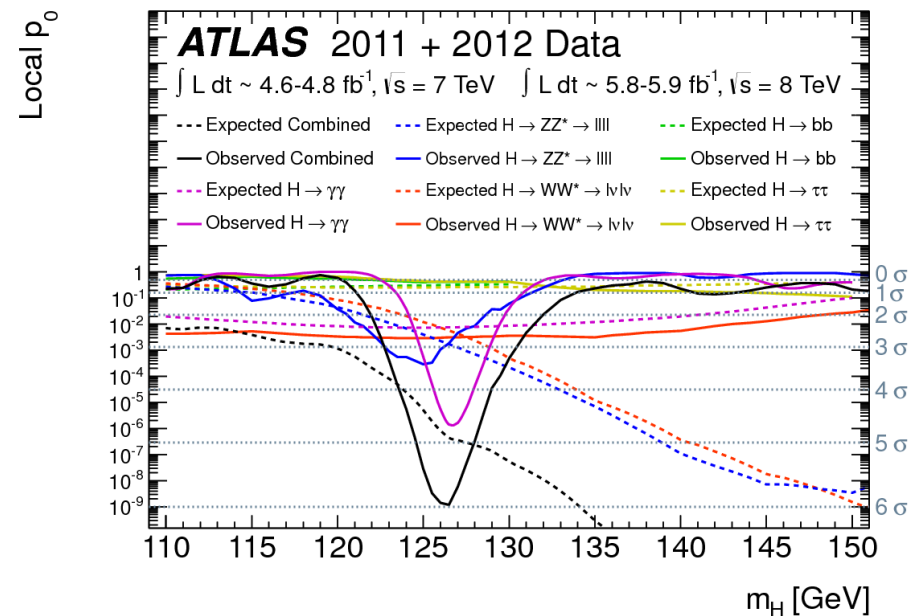
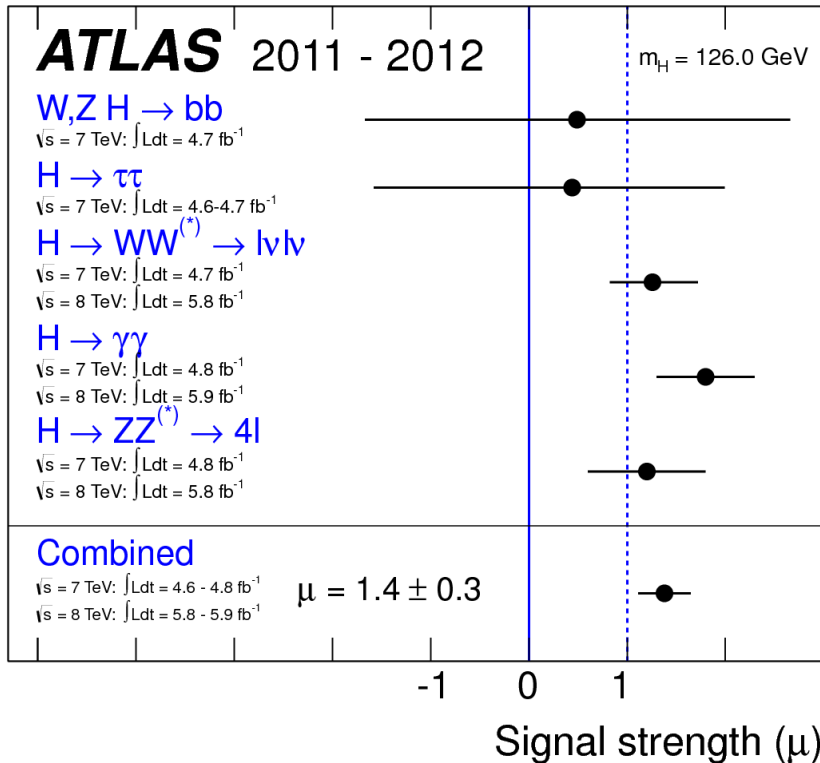
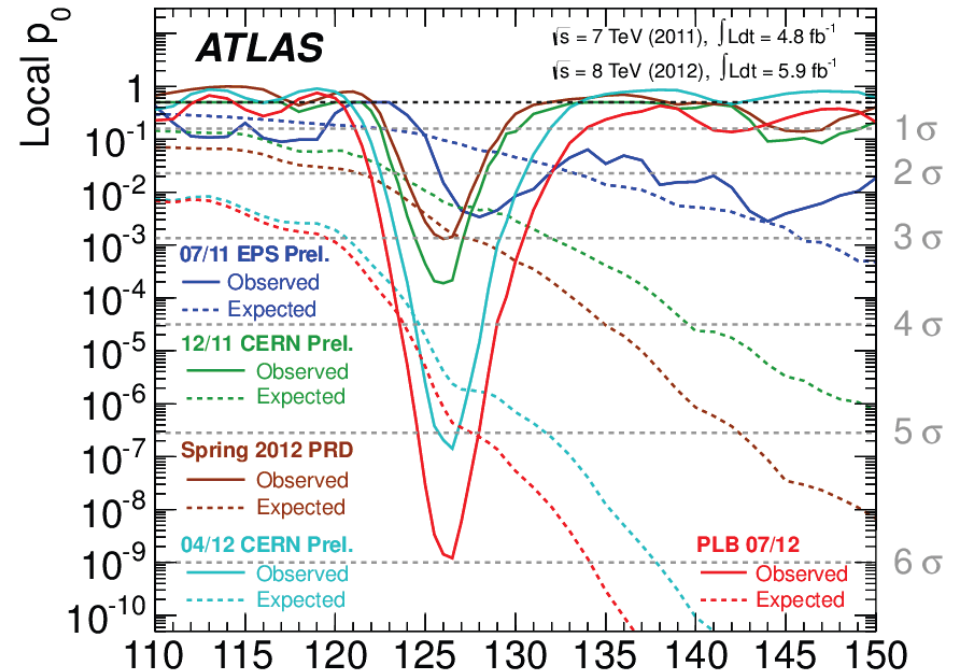
- Donc nous sommes sûrs d'avoir trouvé quelque chose





# Est-ce consistant ?

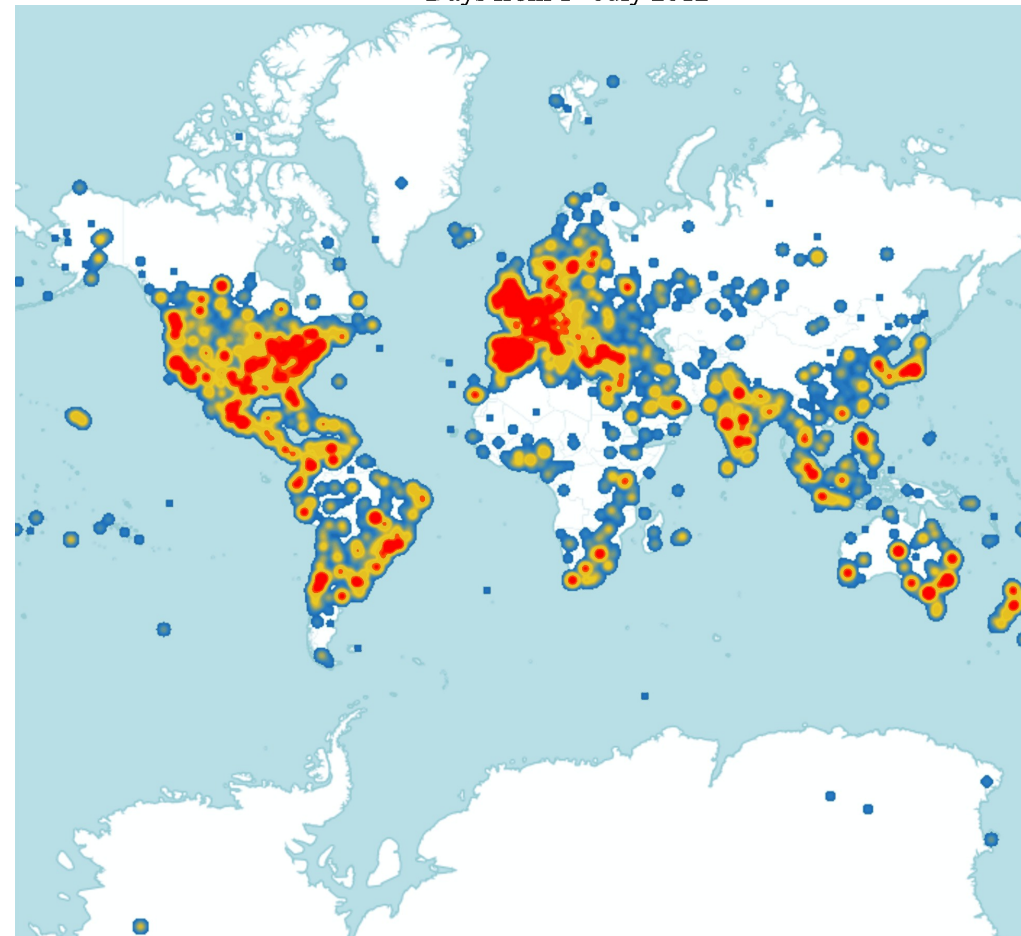
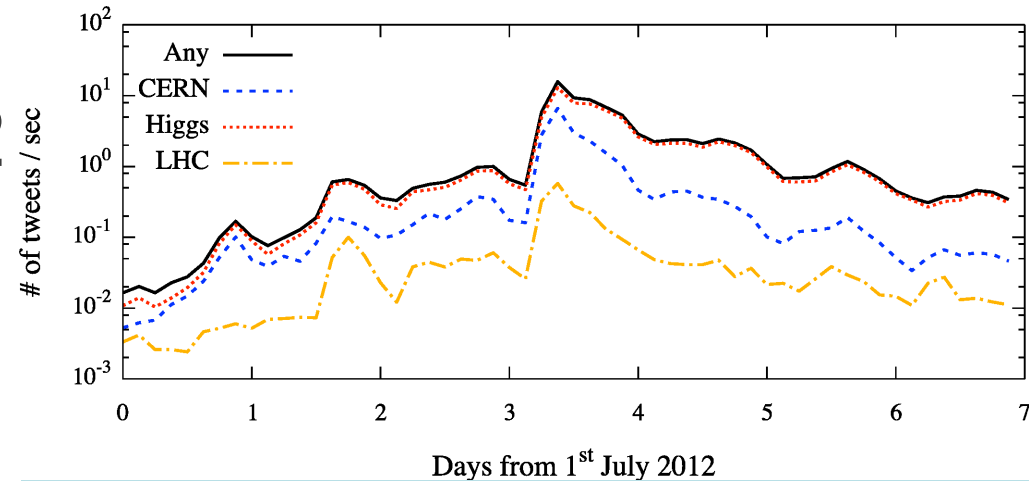
- Evolution dans le temps
- Mesure dans les différents canaux de désintégration, qui dépendent de différentes parties du détecteur
- ATLAS et CMS voient la même chose



# Résultats

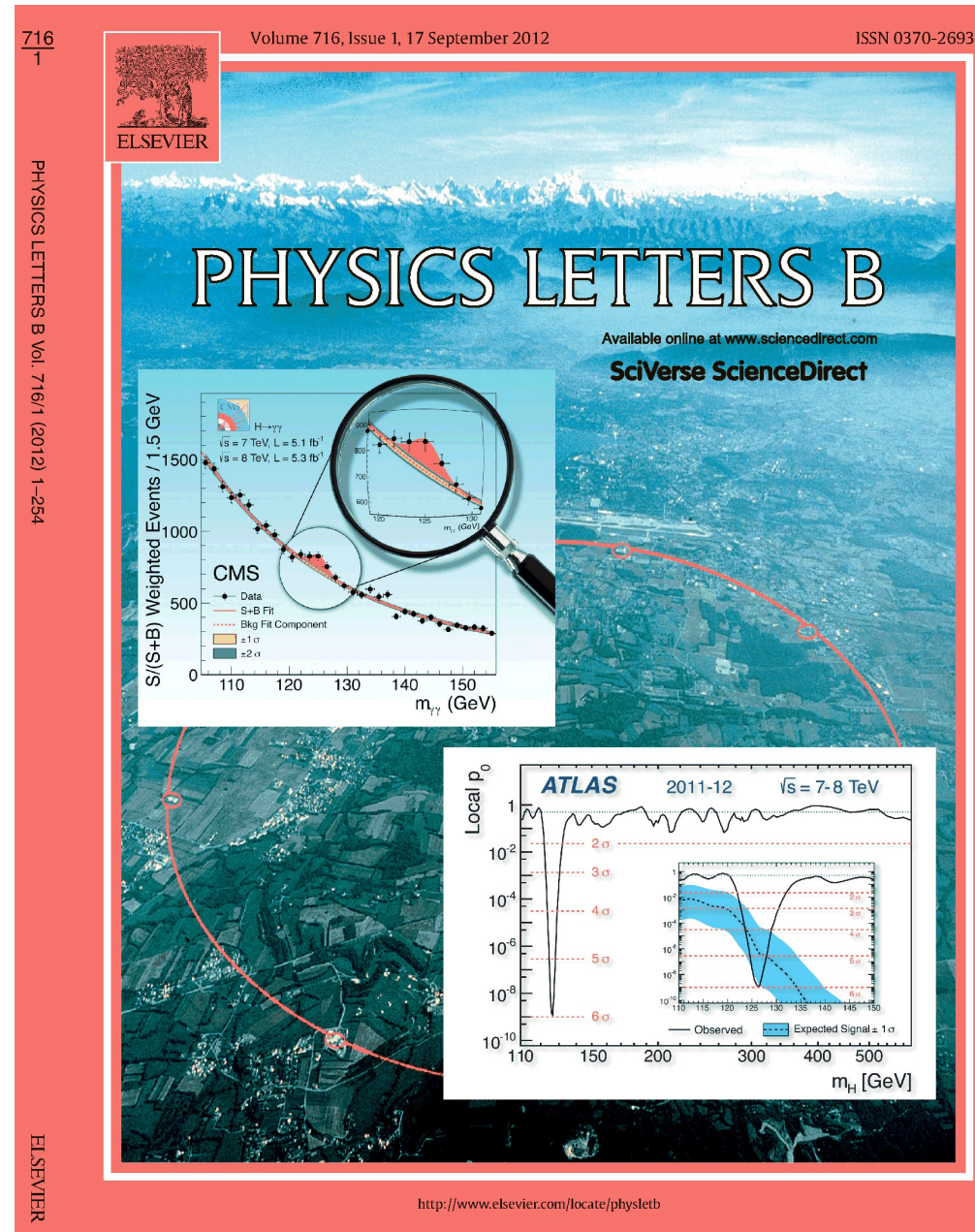
- Annoncés le 4 juillet 2012 lors d'un séminaire au CERN

- 55 médias sur place
- 500 000 connexions webcast
- Vu sur >1000 chaînes de télévision
- Plus d'un million de tweets (gazouillis)



# Résultats

- Annoncés le 4 juillet 2012 lors d'un séminaire au CERN
  - 55 médias sur place
  - 500 000 connexions webcast
  - Vu sur >1000 chaînes de télévision
  - Plus d'un million de tweets (gazouillis)
- Publiés fin juillet
- Et depuis ?



# Est-ce le Higgs du modèle standard ?

- Masse compatible avec les autres mesures du modèle standard,  **$\sim 126 \text{ GeV}$**  (134 fois la masse du proton)
- Maintenant quatre fois plus de données collectées (premiers résultats présentés le 6 mars 2013)
- La signification statistique continue d'augmenter
- Mesures dans d'autres canaux de désintégration
- Mesure de propriétés comme le spin
- Nouveaux résultats d'ATLAS et CMS toujours consistants
- Pas de signe d'autres phénomènes au-delà du modèle standard (Higgs composite, autres bosons de Higgs, autres particules, etc.)

# Évolution dans le temps



film

$$H \rightarrow \gamma\gamma$$



film

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

# Est-ce le Higgs du modèle standard ?

- Masse compatible avec les autres mesures du modèle standard,  **$\sim 126 \text{ GeV}$**  (134 fois la masse du proton)
- Maintenant quatre fois plus de données collectées (premiers résultats présentés le 6 mars 2013)
- La signification statistique continue d'augmenter
- Mesures dans d'autres canaux de désintégration
- Mesure de propriétés comme le spin
- Nouveaux résultats d'ATLAS et CMS toujours consistants
- Pas de signe d'autres phénomènes au-delà du modèle standard (Higgs composite, autres bosons de Higgs, autres particules, etc.)

# Est-ce le Higgs du modèle standard ?

- Masse compatible avec les autres mesures du modèle standard,  $\sim 126 \text{ GeV}$  (134 fois la masse du proton)
- Maintenant quatre fois plus de données collectées (premiers résultats présentés le 6 mars 2013)
- La signification statistique continue d'augmenter
- Mesures dans d'autres canaux de désintégration
- Mesure de propriétés comme le spin
- Nouveaux résultats d'ATLAS et CMS toujours consistants
- Pas de signe d'autres phénomènes au-delà du modèle standard (Higgs composite, autres bosons de Higgs, autres particules, etc.)

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

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

# C'est tout ?

Nous et l'Univers visible



**Modèle standard**





# C'est tout ?

Nous et l'Univers visible

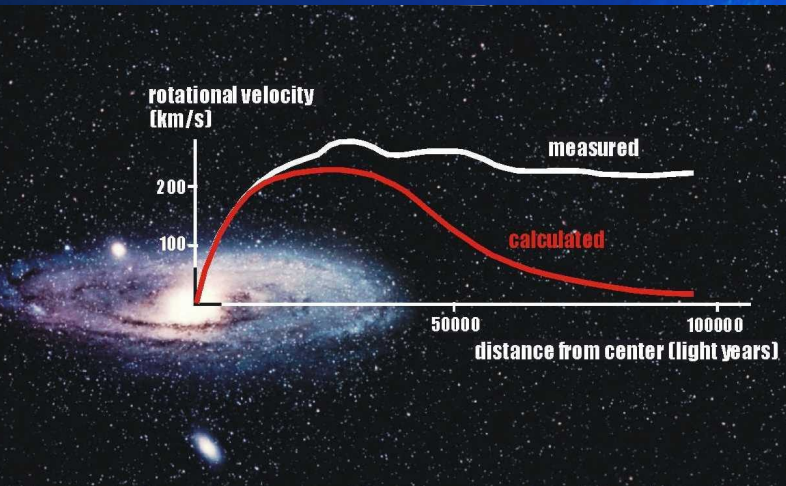


4% Modèle standard

22% Matière noire



- On ne sait pas ce que c'est mais on croit savoir que c'est là
- Candidats observables au LHC (supersymétrie, ...) ?



# C'est tout ?

Nous et l'Univers visible

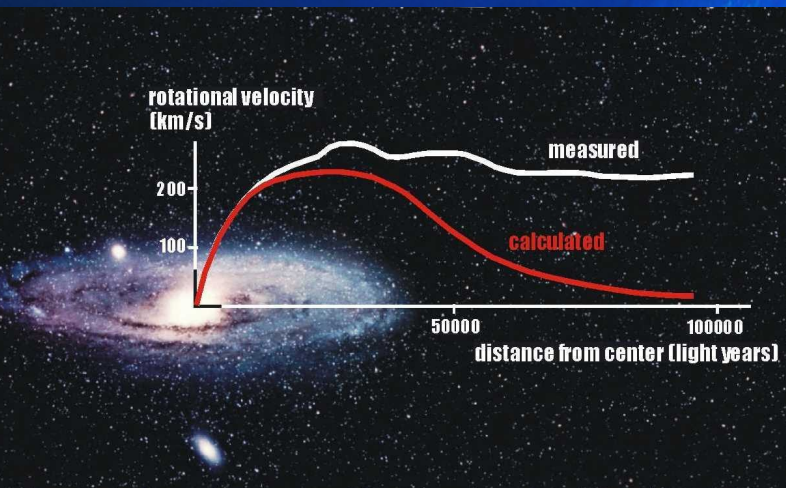


4% Modèle standard

22% Matière noire



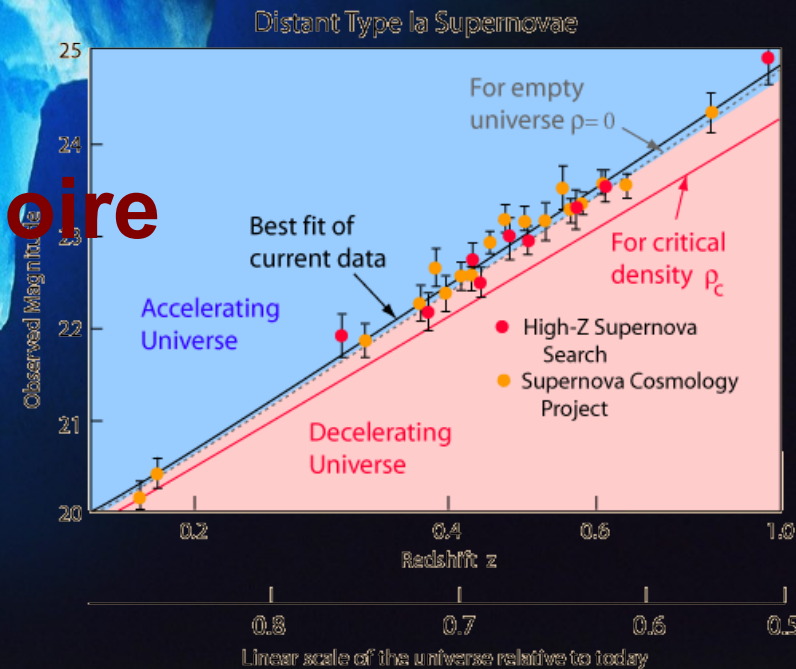
- On ne sait pas ce que c'est mais on croit savoir que c'est là
- Candidats observables au LHC (supersymétrie, ... ) ?



74% Énergie noire



Pas la moindre idée de son origine !



# Lien entre l'infiniment grand et l'infiniment petit



Au LHC :

- Recherche de candidats pour expliquer la matière noire
- Asymétrie matière-antimatière
- Des surprises ? On l'espère !