

# Un géant pour sonder l'infiniment petit

La traque du boson de Higgs au LHC

Yann Coadou

Centre de physique des particules de Marseille

12/8/15

Festival  
d'astronomie  
de Fleurance

Ferme des étoiles

FIL ROUGE

Se perfectionner



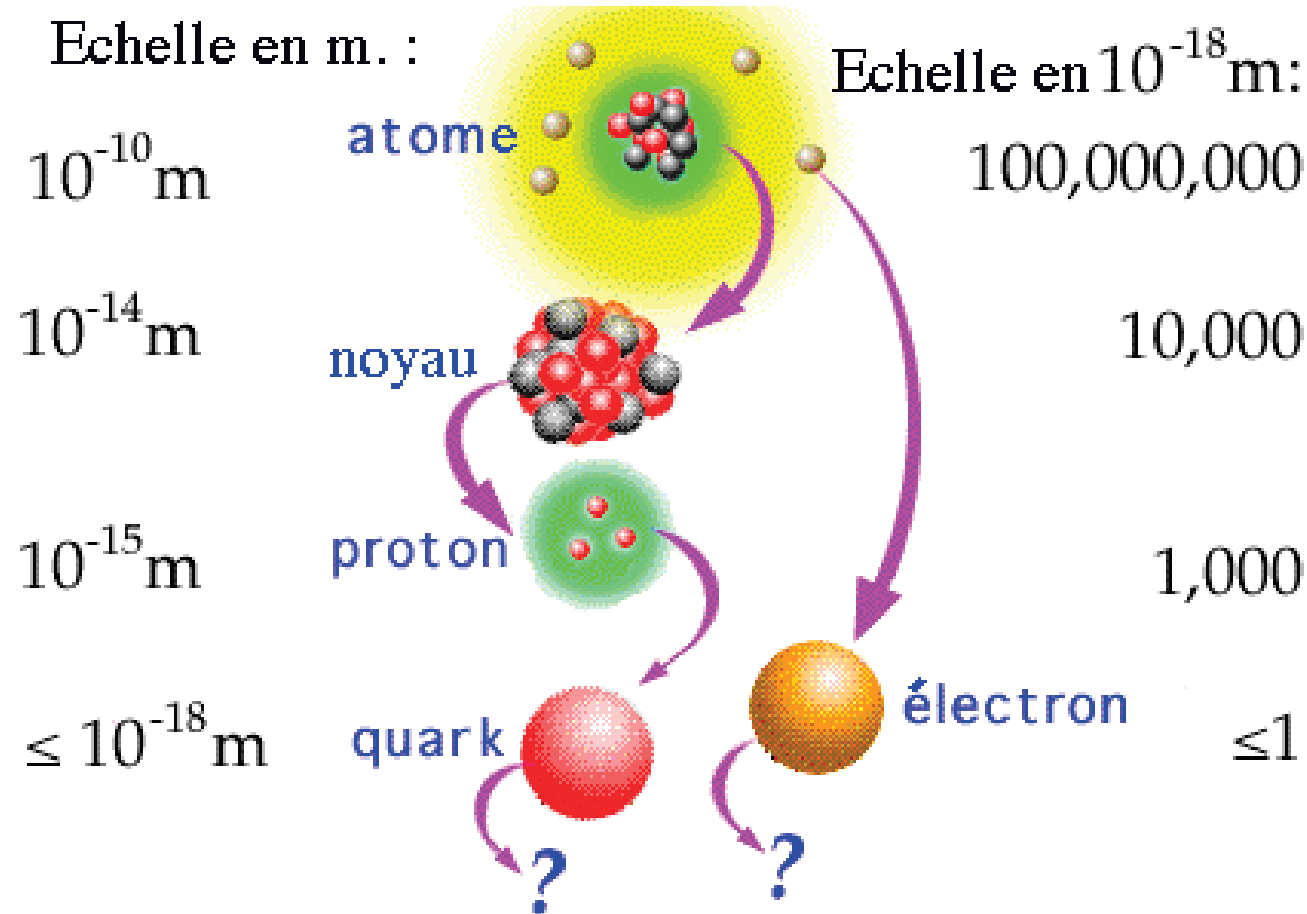
Aix \* Marseille  
université



# De l'infiniment grand vers l'infiniment petit



# Échelle des distances en physique des particules



Si protons et neutrons étaient à **10 cm** l'un de l'autre, un quark ou un électron mesurerait **moins de 0,1 mm** et un atome environ **10 km**

Analogie solaire : soleil=noyau, neptune 30 fois plus éloignée qu'en vrai

# La physique des particules

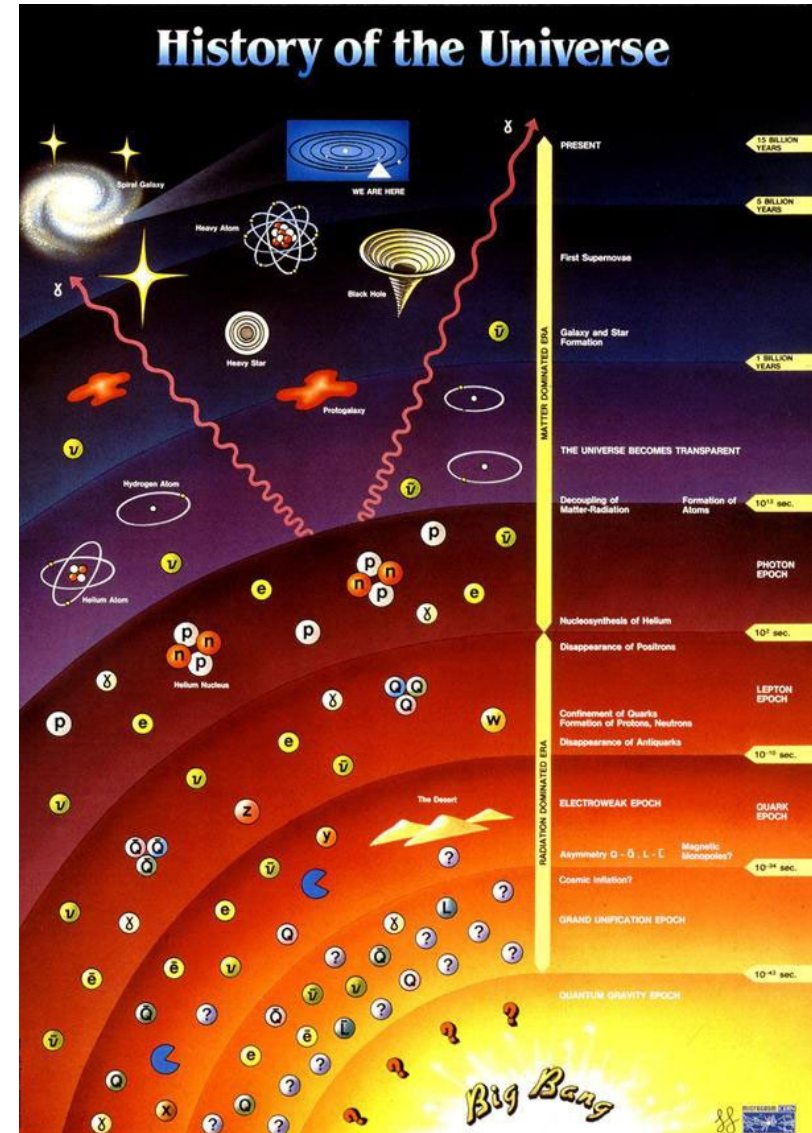
Étude des **constituants élémentaires** de la matière et de leurs **interactions**

- ▶ **constituants élémentaires** : « particules » sans structure interne (jusqu'à preuve du contraire...)
- ▶ **interactions** : les forces qui s'exercent entre ces composants élémentaires

Présentes dans l'univers primordial, dense et chaud

Dans l'univers « froid » d'aujourd'hui, la plupart de ces particules ont maintenant disparu

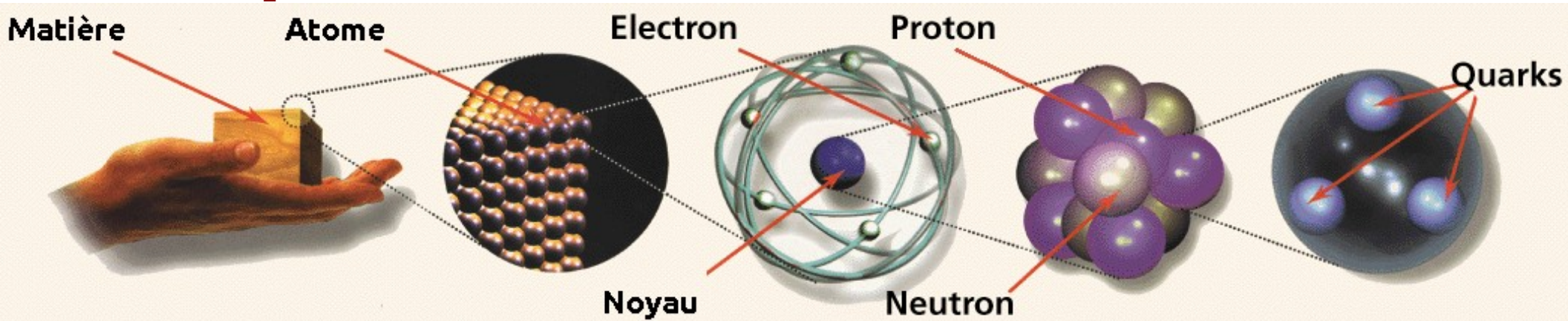
- ▶ **créées artificiellement dans des accélérateurs (collisionneurs) de particules qui reproduisent les conditions existant aux premiers instants de l'univers**
  - plus on accélère les particules, plus on met d'énergie en jeu, plus on « remonte » dans le temps



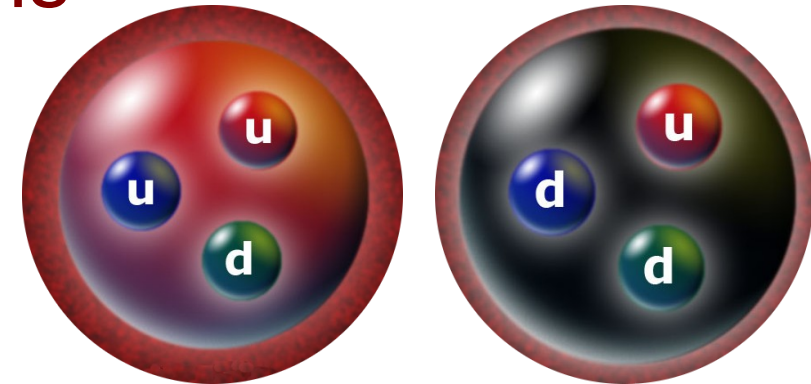
# Les unités

- Unités usuelles souvent inadaptées à la physique des particules
- On utilisera :
  - ▶ **Energie** : *eV (électron-volt)*
    - $1 \text{ eV} = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$
    - énergie acquise par un électron dans un champ électrique de 1V
- En vertu de l'équivalence masse-énergie ( $E^2 = m^2 c^4 + p^2 c^2$ ) :
  - ▶ **Impulsion** : *eV/c*
  - ▶ **Masse** : *eV/c<sup>2</sup>*
    - $1 \text{ eV}/c^2 = 1.8 \cdot 10^{-36} \text{ kg}$
  - ▶ **Souvent, utilisation des unités « naturelles »** :
    - $c = 1$
    - énergie, impulsion et masse en eV
- Multiples usuels : keV ( $10^3$ ), MeV ( $10^6$ ), GeV ( $10^9$ ), TeV ( $10^{12}$ )

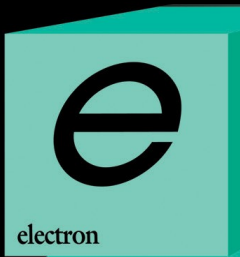
# De quoi est fait l'Univers visible ?



- Toute la matière visible, des galaxies aux virus en passant par les êtres humains, est faite de **quarks up** (*u*) et **down** (*d*) et d'**électrons**
- Protons et neutrons sont faits de 3 quarks
- Ils composent les noyaux
- Les électrons gravitent autour des noyaux
- Des **neutrinos** sont émis dans les réactions nucléaires au cœur des étoiles



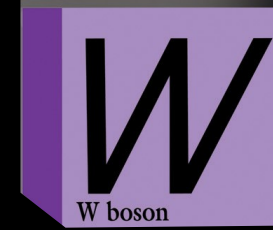
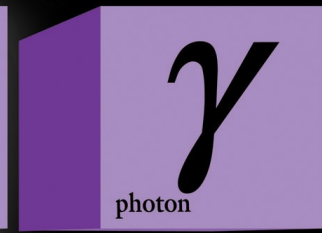
# Quarks



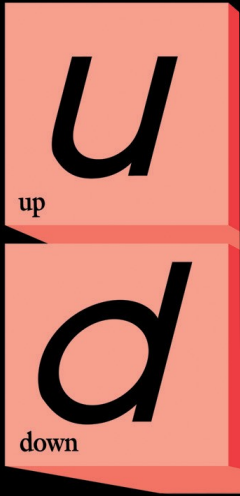
# Leptons

# Le modèle standard

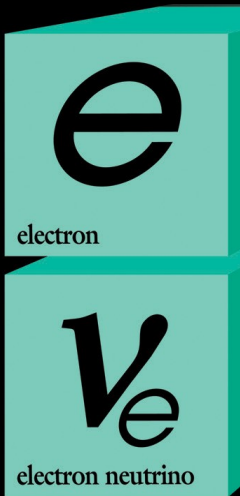
# Forces



# Quarks



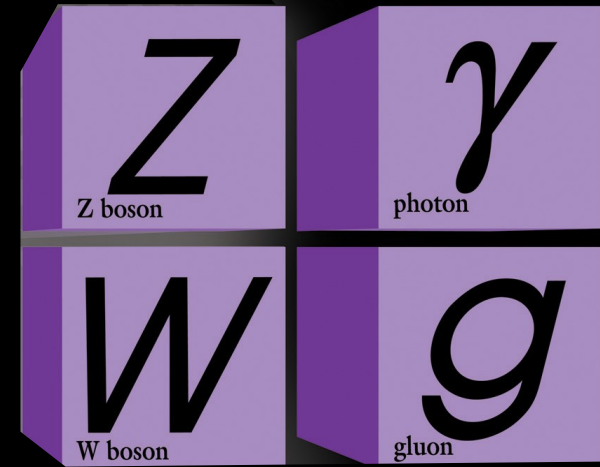
+ anti-matière



# Leptons

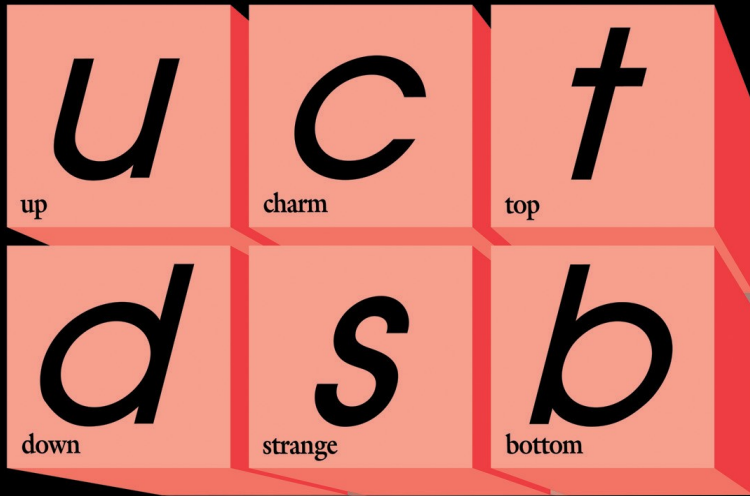
# Le modèle standard

## Forces

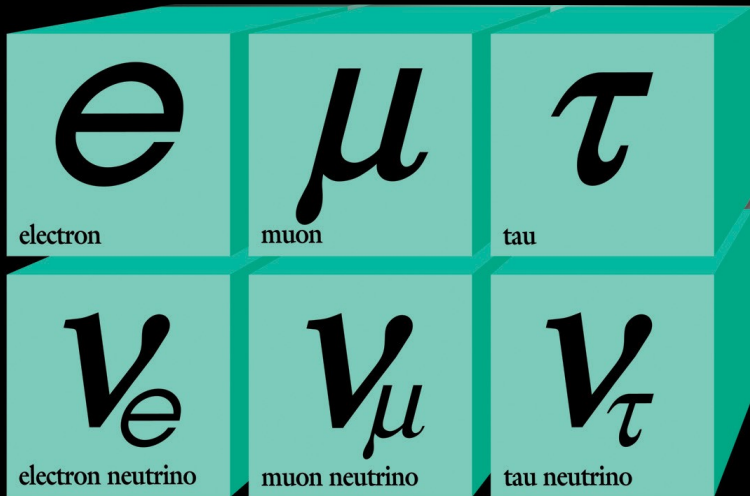




# Quarks



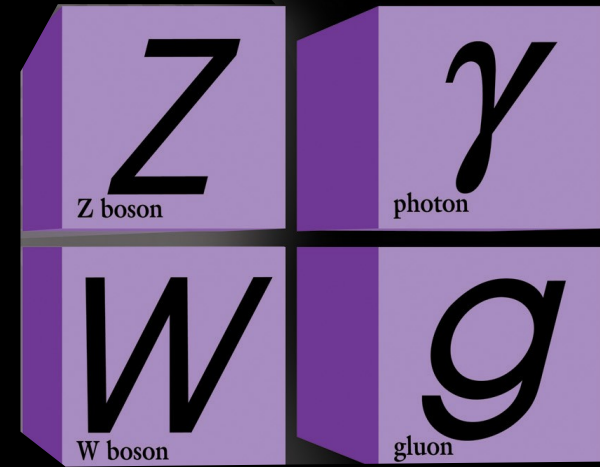
+ anti-matière



# Leptons

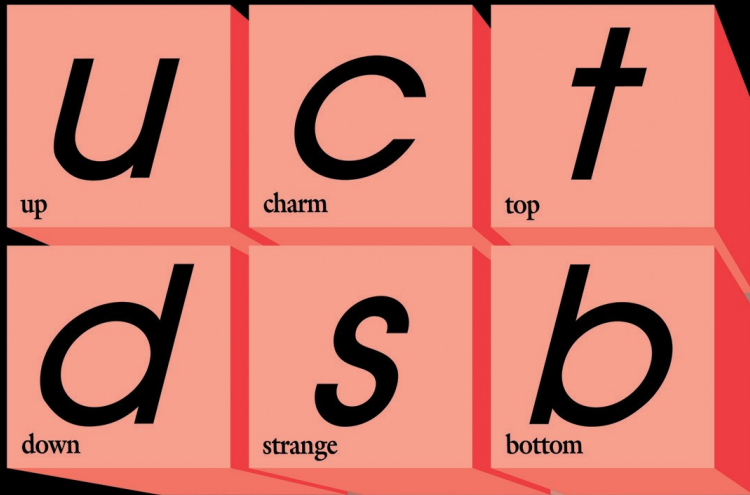
# Le modèle standard

# Forces



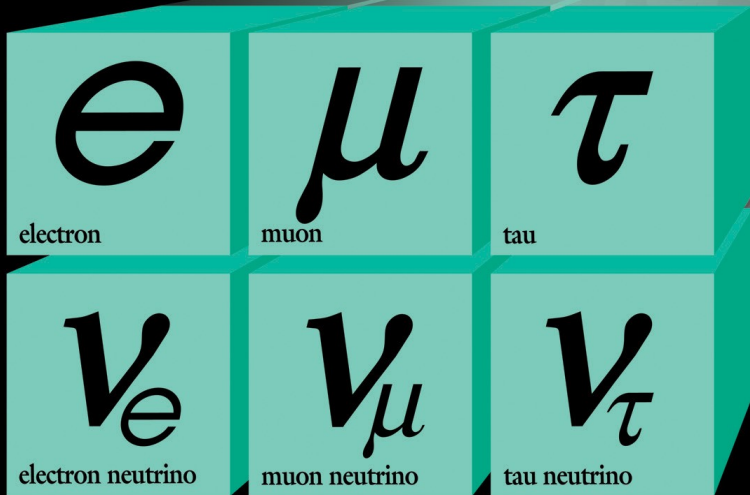
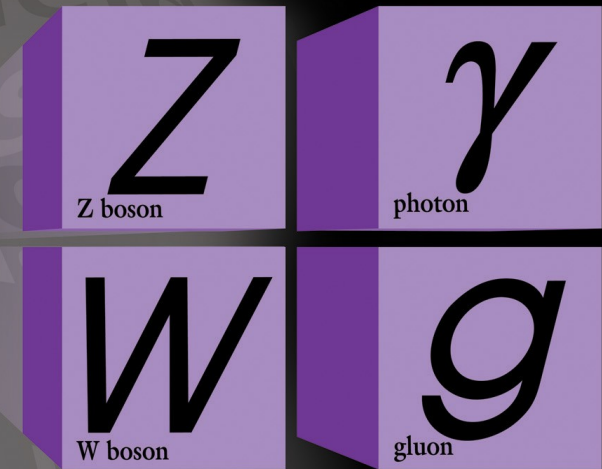
# Quarks

# Le modèle standard



+ anti-matière

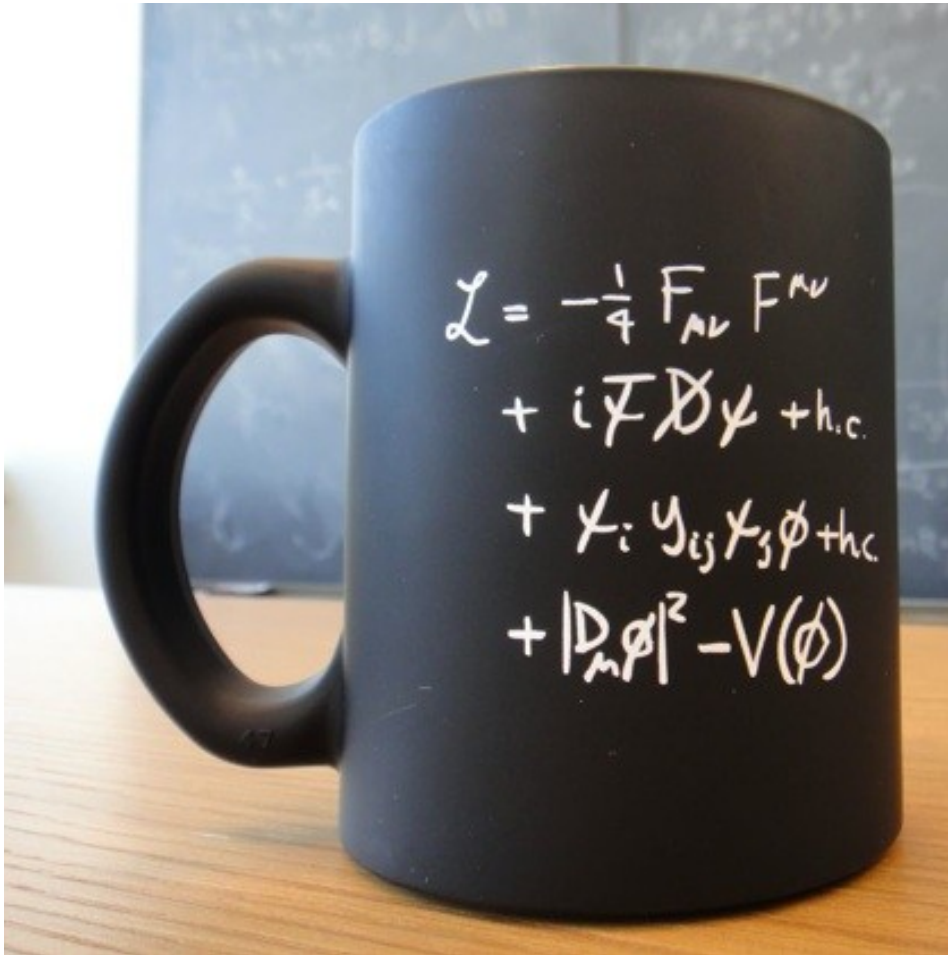
# Forces



# Leptons

# Le modèle standard

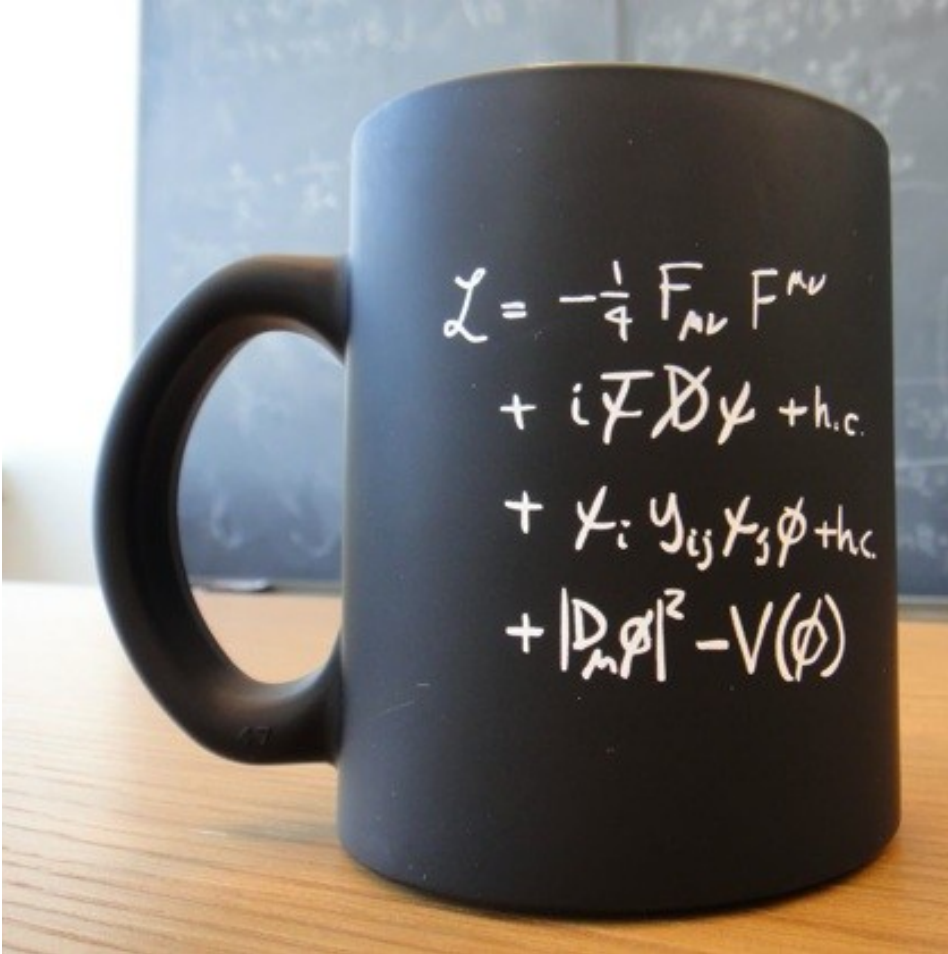
- Version synthétique



# Le modèle standard

- Version synthétique

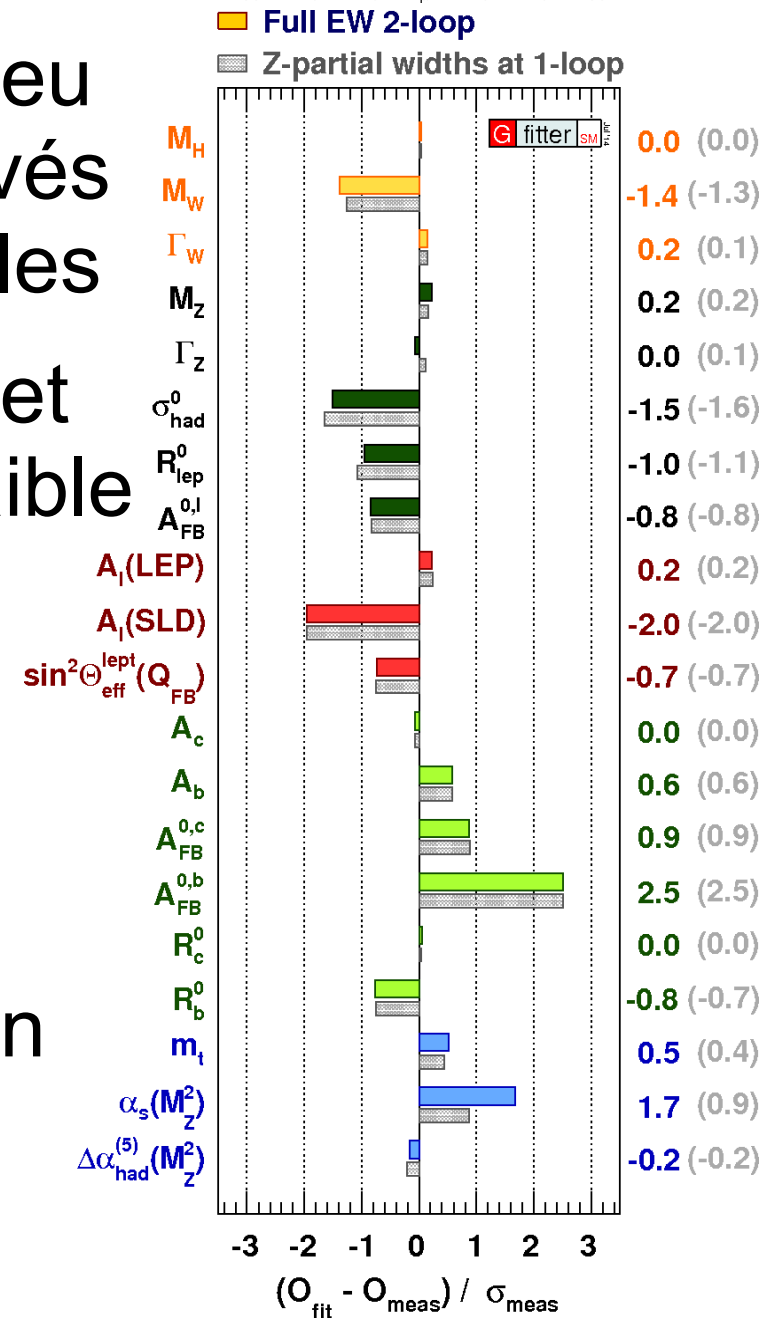
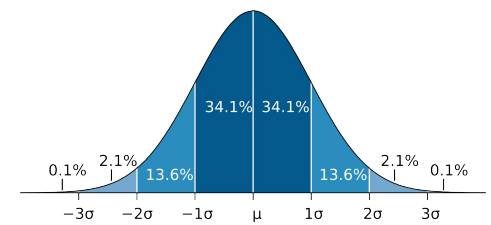
- Version développée...



$$\begin{aligned}
 & -\frac{1}{2} \partial_\nu g_\mu^a \partial_\nu g_\mu^a - g_s f^{abc} \partial_\mu g_\nu^a g_\mu^b g_\nu^c - \frac{1}{4} g_s^2 f^{abc} f^{ade} g_\mu^b g_\nu^c g_\mu^d g_\nu^e + \\
 & \frac{1}{2} i g_s^2 (\bar{q}_i^\sigma \gamma^\mu q_j^\sigma) g_\mu^a + \bar{G}^a \partial^2 G^a + g_s f^{abc} \partial_\mu \bar{G}^a G^b g_\mu^c - \partial_\nu W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - \\
 & M^2 W_\mu^+ W_\mu^- - \frac{1}{2} \partial_\nu Z_\mu^0 \partial_\nu Z_\mu^0 - \frac{1}{2c_w^2} M^2 Z_\mu^0 Z_\mu^0 - \frac{1}{2} \partial_\mu A_\nu \partial_\mu A_\nu - \\
 & \frac{1}{2} \partial_\mu \mathbf{H} \partial_\mu \mathbf{H} - \frac{1}{2} m_h^2 \mathbf{H}^2 - \partial_\mu \phi^+ \partial_\mu \phi^- - M^2 \phi^+ \phi^- - \frac{1}{2} \partial_\mu \phi^0 \partial_\mu \phi^0 - \\
 & \frac{1}{2c_w^2} M \phi^0 \phi^0 - \beta_h \left[ \frac{2M^2}{g^2} + \frac{2M}{g} \mathbf{H} + \frac{1}{2} (\mathbf{H}^2 + \phi^0 \phi^0 + 2\phi^+ \phi^-) \right] + \frac{2M^4}{g^2} \alpha_h - \\
 & igc_w [\partial_\nu Z_\mu^0 (W_\mu^+ W_\nu^- - W_\nu^+ W_\mu^-) - Z_\nu^0 (W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\mu^- \partial_\nu W_\mu^+) + \\
 & Z_\mu^0 (W_\nu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\nu^- \partial_\nu W_\mu^+)] - ig s_w [\partial_\nu A_\mu (W_\mu^+ W_\nu^- - W_\nu^+ W_\mu^-) - \\
 & A_\nu (W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\mu^- \partial_\nu W_\mu^+) + A_\mu (W_\nu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\nu^- \partial_\nu W_\mu^+)] - \\
 & \frac{1}{2} g^2 W_\mu^+ W_\mu^- W_\nu^+ W_\nu^- + \frac{1}{2} g^2 W_\mu^+ W_\nu^- W_\mu^+ W_\nu^- + g^2 c_w^2 (Z_\mu^0 W_\mu^+ Z_\nu^0 W_\nu^- - \\
 & Z_\nu^0 Z_\mu^0 W_\nu^+ W_\nu^-) + g^2 s_w^2 (A_\mu W_\mu^+ A_\nu W_\nu^- - A_\mu A_\nu W_\mu^+ W_\nu^-) + \\
 & g^2 s_w c_w [A_\mu Z_\nu^0 (W_\mu^+ W_\nu^- - W_\nu^+ W_\mu^-) - 2A_\mu Z_\mu^0 W_\nu^+ W_\nu^-] - g\alpha [\mathbf{H}^3 + \\
 & \mathbf{H} \phi^0 \phi^0 + 2\mathbf{H} \phi^+ \phi^-] - \frac{1}{8} g^2 \alpha_h [\mathbf{H}^4 + (\phi^0)^4 + 4(\phi^+ \phi^-)^2 + \\
 & 4(\phi^0)^2 \phi^+ \phi^- + 4\mathbf{H}^2 \phi^+ \phi^- + 2(\phi^0)^2 \mathbf{H}^2] - gM W_\mu^+ W_\mu^- \mathbf{H} - \\
 & \frac{1}{2} g \frac{M}{c_w} Z_\mu^0 Z_\mu^0 \mathbf{H} - \frac{1}{2} ig [W_\mu^+ (\phi^0 \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^0) - W_\mu^- (\phi^0 \partial_\mu \phi^+ - \\
 & \phi^+ \partial_\mu \phi^0)] + \frac{1}{2} g [W_\mu^+ (\mathbf{H} \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \mathbf{H}) - W_\mu^- (\mathbf{H} \partial_\mu \phi^+ - \phi^+ \partial_\mu \mathbf{H})] + \\
 & \frac{1}{2} g \frac{1}{c_w} (Z_\mu^0 (\mathbf{H} \partial_\mu \phi^0 - \phi^0 \partial_\mu \mathbf{H}) - ig \frac{s_w^2}{c_w} M Z_\mu^0 (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) + \\
 & ig s_w M A_\mu (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) - ig \frac{1-2c_w^2}{2c_w} Z_\mu^0 (\phi^+ \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^+) + \\
 & ig s_w A_\mu (\phi^+ \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^+) - \frac{1}{4} g^2 W_\mu^+ W_\mu^- [\mathbf{H}^2 + (\phi^0)^2 + 2\phi^+ \phi^-] - \\
 & \frac{1}{4} g^2 \frac{1}{c_w} Z_\mu^0 Z_\mu^0 [\mathbf{H}^2 + (\phi^0)^2 + 2(2s_w^2 - 1)^2 \phi^+ \phi^-] - \frac{1}{2} g^2 \frac{s_w^2}{c_w} Z_\mu^0 \phi^0 (W_\mu^+ \phi^- + \\
 & W_\mu^- \phi^+) - \frac{1}{2} ig^2 \frac{s_w^2}{c_w} Z_\mu^0 \mathbf{H} (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) + \frac{1}{2} g^2 s_w A_\mu \phi^0 (W_\mu^+ \phi^- + \\
 & W_\mu^- \phi^+) + \frac{1}{2} ig^2 s_w A_\mu \mathbf{H} (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) - g^2 \frac{s_w}{c_w} (2c_w^2 - 1) Z_\mu^0 A_\mu \phi^+ \phi^- - \\
 & g^1 s_w^2 A_\mu A_\mu \phi^+ \phi^- - \bar{e}^\lambda (\gamma \partial + m_e^\lambda) e^\lambda - \bar{\nu}^\lambda \gamma \partial \nu^\lambda - \bar{u}_j^\lambda (\gamma \partial + m_u^\lambda) u_j^\lambda - \\
 & \bar{d}_j^\lambda (\gamma \partial + m_d^\lambda) d_j^\lambda + ig s_w A_\mu [-(\bar{e}^\lambda \gamma^\mu e^\lambda) + \frac{2}{3} (\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu u_j^\lambda) - \frac{1}{3} (\bar{d}_j^\lambda \gamma^\mu d_j^\lambda)] + \\
 & \frac{ig}{4c_w} Z_\mu^0 [(\bar{\nu}^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) \nu^\lambda) + (\bar{e}^\lambda \gamma^\mu (4s_w^2 - 1 - \gamma^5) e^\lambda) + (\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu (\frac{4}{3}s_w^2 - \\
 & 1 - \gamma^5) u_j^\lambda) + (\bar{d}_j^\lambda \gamma^\mu (1 - \frac{8}{3}s_w^2 - \gamma^5) d_j^\lambda)] + \frac{ig}{2\sqrt{2}} W_\mu^+ [(\bar{\nu}^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) e^\lambda) + \\
 & (\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) C_{\lambda\kappa} d_\kappa^j)] + \frac{ig}{2\sqrt{2}} W_\mu^- [(\bar{e}^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) \nu^\lambda) + (\bar{d}_j^\lambda C_{\lambda\kappa}^\dagger \gamma^\mu (1 + \\
 & \gamma^5) u_j^\lambda)] + \frac{ig}{2\sqrt{2}} \frac{m_\lambda}{M} [-\phi^+ (\bar{\nu}^\lambda (1 - \gamma^5) e^\lambda) + \phi^- (\bar{e}^\lambda (1 + \gamma^5) \nu^\lambda)] - \\
 & \frac{g}{2} \frac{m_\lambda}{M} [\mathbf{H} (\bar{e}^\lambda e^\lambda) + i\phi^0 (\bar{e}^\lambda \gamma^5 e^\lambda)] + \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^+ [-m_d^\lambda (\bar{u}_j^\lambda C_{\lambda\kappa} (1 - \gamma^5) d_\kappa^j) + \\
 & m_u^\lambda (\bar{u}_j^\lambda C_{\lambda\kappa} (1 + \gamma^5) d_\kappa^j) + \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^- [m_d^\lambda (\bar{d}_j^\lambda C_{\lambda\kappa}^\dagger (1 + \gamma^5) u_\kappa^j) - m_u^\lambda (\bar{d}_j^\lambda C_{\lambda\kappa}^\dagger (1 - \\
 & \gamma^5) u_\kappa^j) - \frac{g}{2} \frac{m_\lambda}{M} \mathbf{H} (\bar{u}_j^\lambda u_j^\lambda) - \frac{g}{2} \frac{m_\lambda}{M} \mathbf{H} (\bar{d}_j^\lambda d_j^\lambda) + \frac{ig}{2} \frac{m_\lambda}{M} \phi^0 (\bar{u}_j^\lambda \gamma^5 u_j^\lambda) - \\
 & \frac{ig}{2} \frac{m_\lambda}{c_w} \phi^0 (\bar{d}_j^\lambda \gamma^5 d_j^\lambda) + \bar{X}^+ (\partial^2 - M^2) X^+ + \bar{X}^- (\partial^2 - M^2) X^- + \bar{X}^0 (\partial^2 - \\
 & \frac{M^2}{c_w^2}) X^0 + \bar{Y} \partial^2 Y + igc_w W_\mu^+ (\partial_\mu \bar{X}^0 X^- - \partial_\mu \bar{X}^+ X^0) + ig s_w W_\mu^+ (\partial_\mu \bar{Y} X^- - \\
 & \partial_\mu \bar{X}^+ Y) + igc_w W_\mu^- (\partial_\mu \bar{X}^- X^0 - \partial_\mu \bar{X}^0 X^+) + ig s_w W_\mu^- (\partial_\mu \bar{X}^- Y - \\
 & \partial_\mu \bar{Y} X^+) + igc_w Z_\mu^0 (\partial_\mu \bar{X}^+ X^+ - \partial_\mu \bar{X}^- X^-) + ig s_w A_\mu (\partial_\mu \bar{X}^+ X^+ - \\
 & \partial_\mu \bar{X}^- X^-) - \frac{1}{2} gM [\bar{X}^+ X^+ \mathbf{H} + \bar{X}^- X^- \mathbf{H} + \frac{1}{c_w} \bar{X}^0 X^0 \mathbf{H}] + \\
 & \frac{1-2c_w^2}{2c_w} igM [\bar{X}^+ X^0 \phi^- + \bar{X}^- X^0 \phi^+] + \frac{1}{2c_w} igM [\bar{X}^0 X^- \phi^+ + \bar{X}^0 X^+ \phi^-] + \\
 & igM s_w [\bar{X}^0 X^- \phi^+ + \bar{X}^0 X^+ \phi^-] + \frac{1}{2} igM [\bar{X}^+ X^+ \phi^0 - \bar{X}^- X^- \phi^0]
 \end{aligned}$$

# Le modèle standard

- Modèle théorique qui explique à peu près tous les phénomènes observés et prédits en physique des particules
- Décrit les particules élémentaires et leurs interactions forte et électrofaible (faible et électromagnétique)
- Mis en place dans les années 1960-70
- Basé sur des symétries qui impliquent des lois de conservation
- Grand succès : testé avec très grande précision



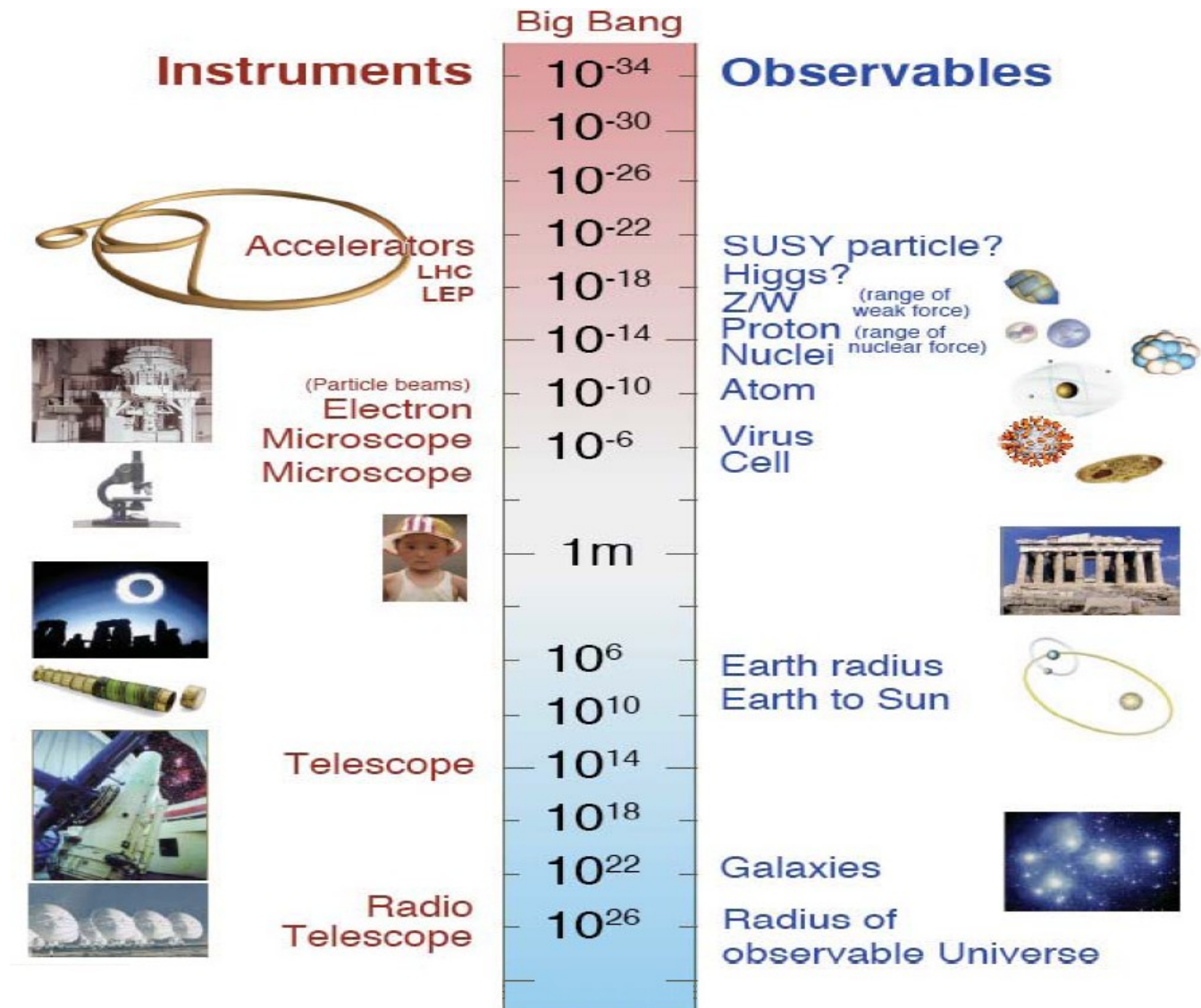
# Pourquoi des accélérateurs de particules ?

- Pour voir des objets plus petits, il faut une énergie plus élevée :

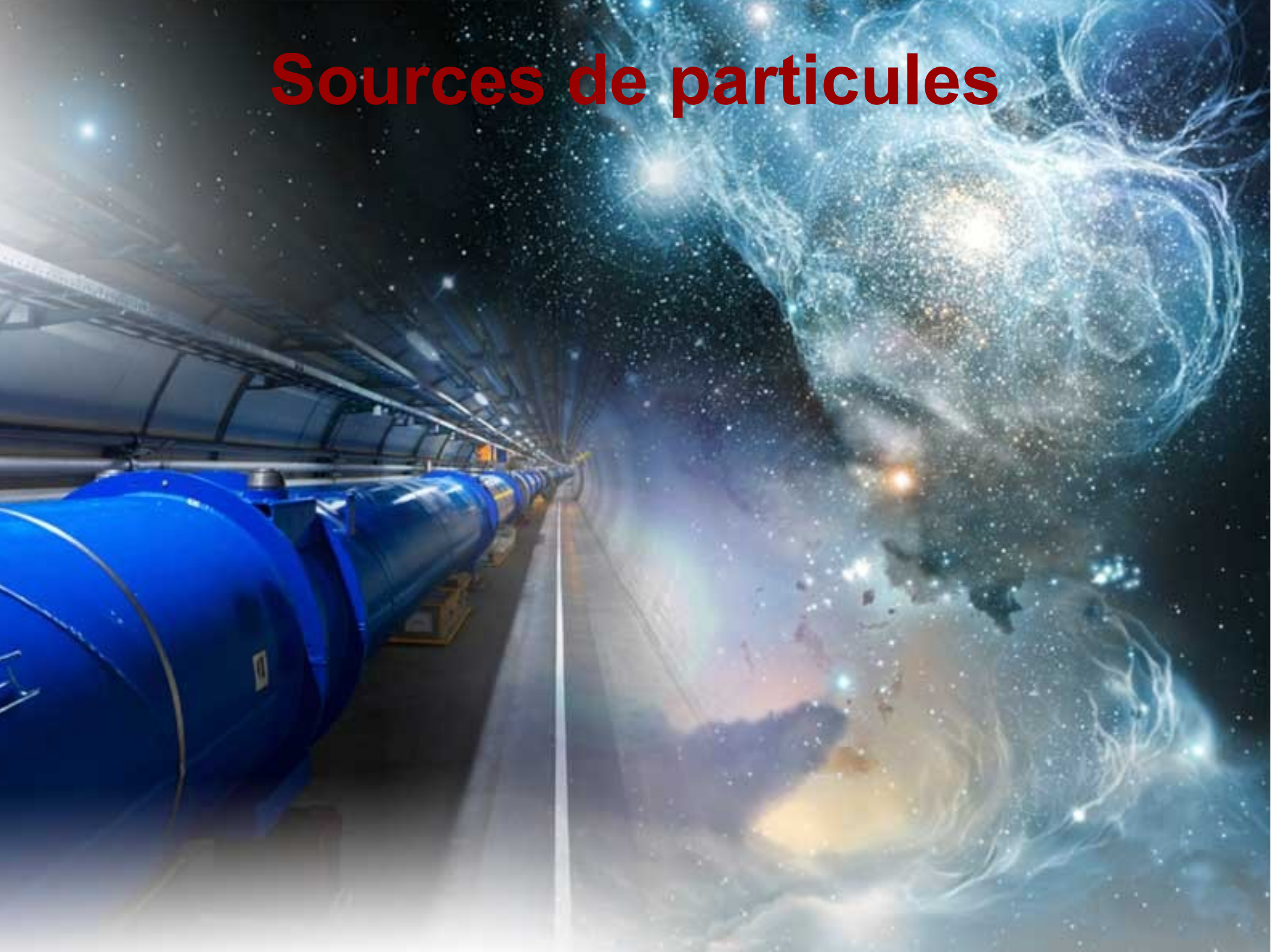
- ▶ longueur d'onde associée  $\lambda = h/p$

- Pour créer des particules plus lourdes

- ▶  $E = mc^2$



# Sources de particules



# Sources de particules

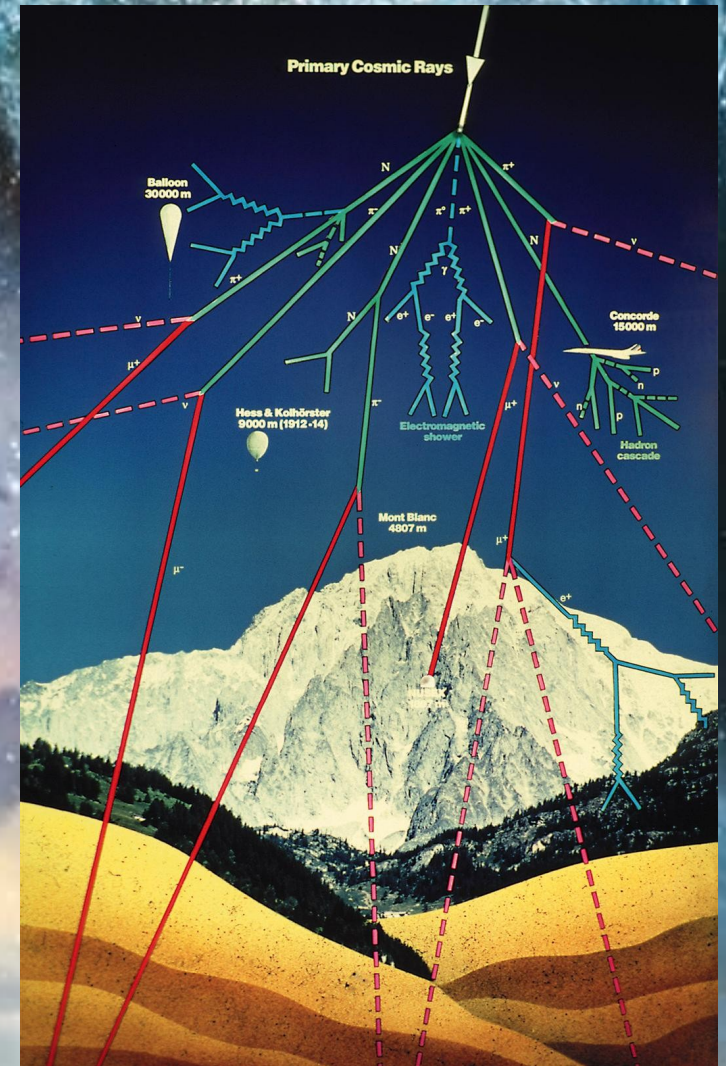
**L'Univers et les  
rayons cosmiques**  
(protons, photons,  
neutrinos, muons)





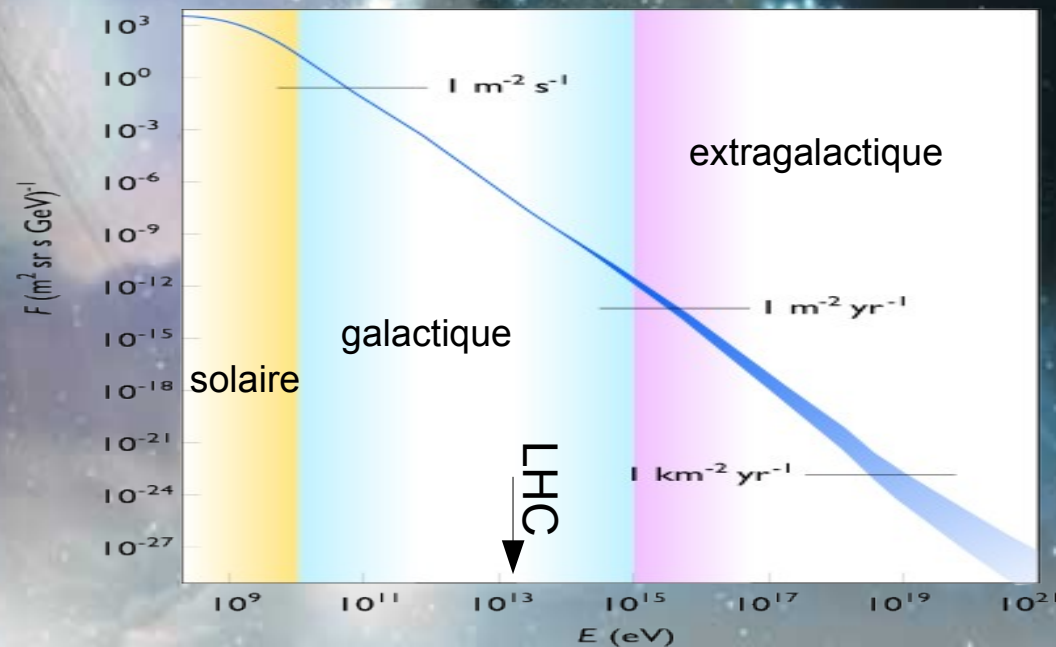
# Sources de particules

## L'Univers et les rayons cosmiques



# Sources de particules

L'Univers et les  
rayons cosmiques  
(protons, photons,  
neutrinos, muons)



# Sources de particules

**L'Univers et les  
rayons cosmiques**  
(protons, photons,  
neutrinos, muons)

**Les accélérateurs  
de particules**  
(protons, photons,  
électrons, muons,  
pions, kaons, etc)

# Le Large hadron collider (LHC)

(grand collisionneur de hadrons)



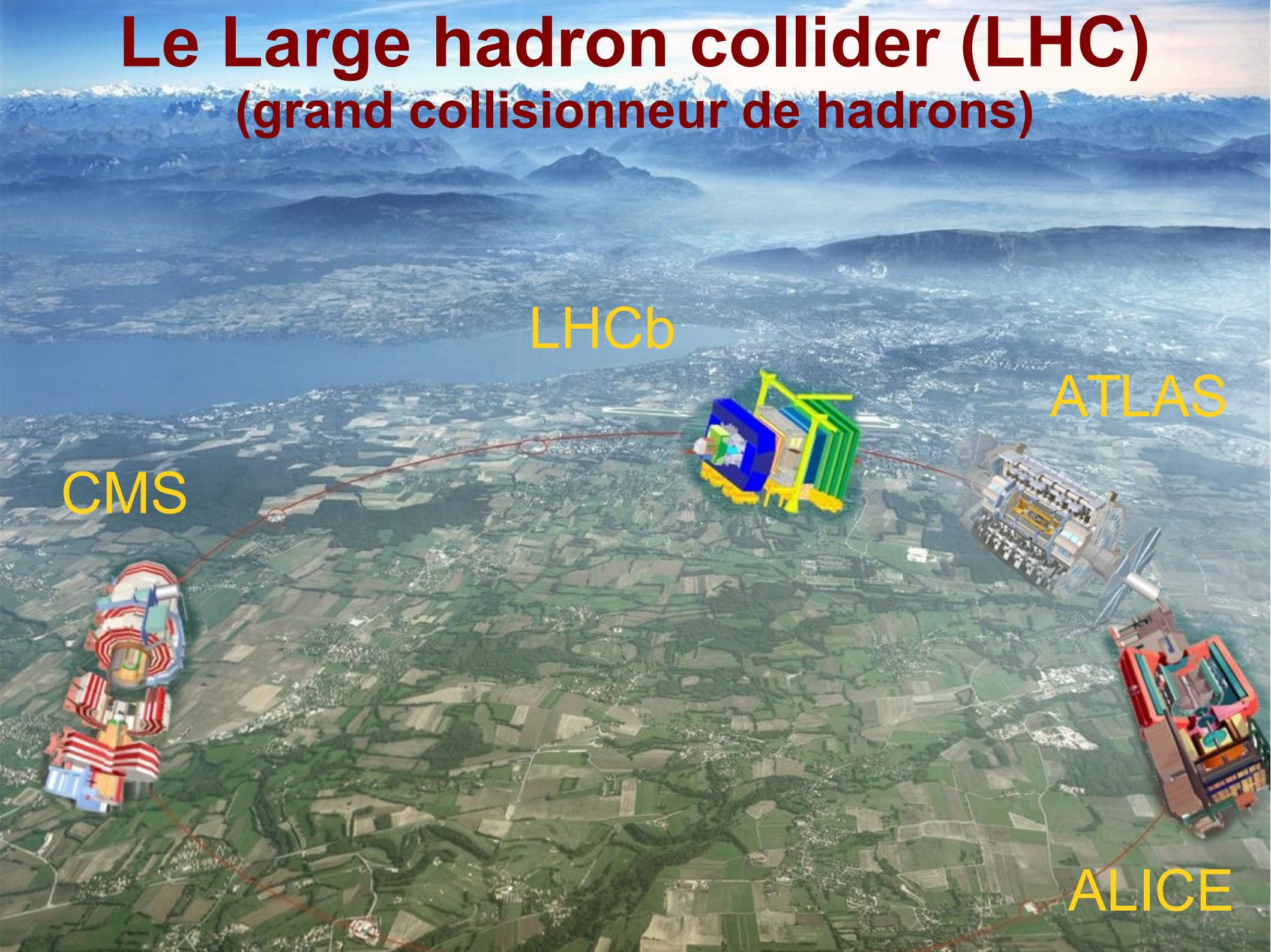
# Le Large hadron collider (LHC) (grand collisionneur de hadrons)

LHCb

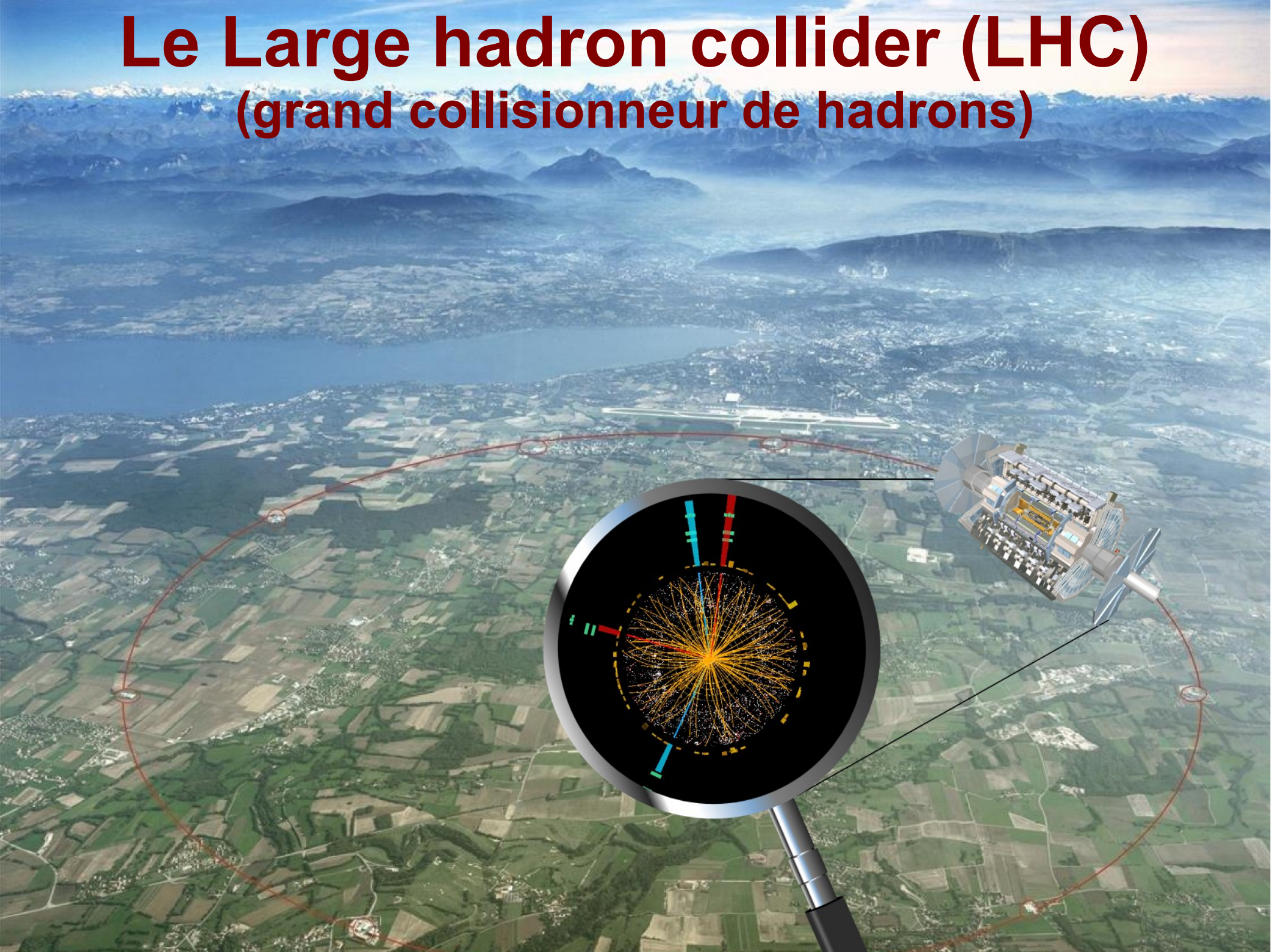
ATLAS

CMS

ALICE



# Le Large hadron collider (LHC) (grand collisionneur de hadrons)



# Le Large hadron collider (LHC) (grand collisionneur de hadrons)



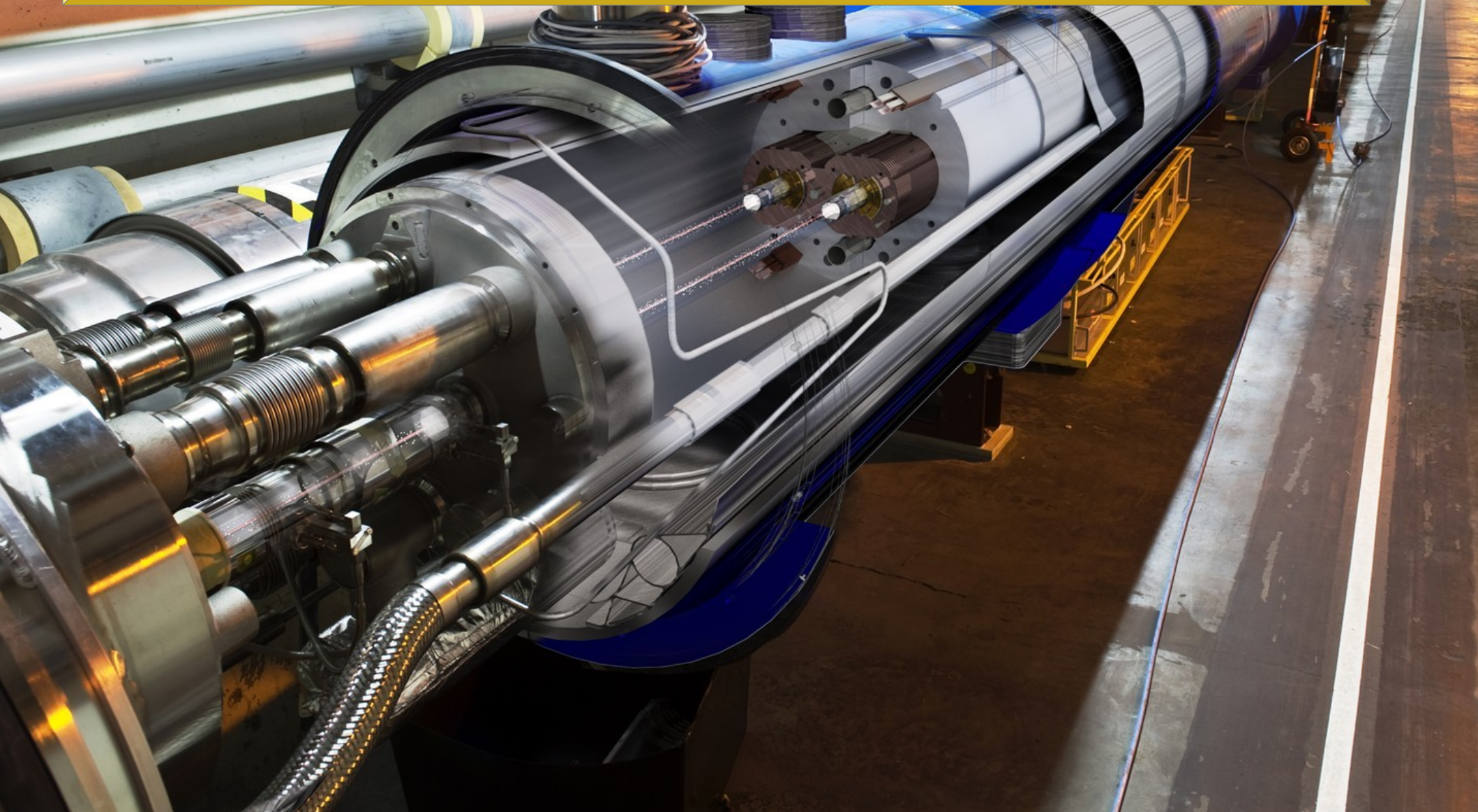
# Le LHC : la machine à superlatifs





# Le LHC : la machine à superlatifs

La plus grande et la plus complexe machine scientifique jamais construite



# Le LHC : la machine à superlatifs



27 km de circonférence  
100 m sous terre

# Le LHC : la machine à superlatifs



Protons voyageant à  
99,9999991%  
de la vitesse de la lumière,  
soit 11000 tours  
par seconde

# Le LHC : la machine à superlatifs



Le plus grand congélateur : 1,9 K (-271 °C), plus froid que l'espace intersidéral (2,7 K), avec de l'hélium superfluide pour rendre les câbles supraconducteurs et générer un champ magnétique de 8,3 T (200000 fois le champ magnétique terrestre)

# Le LHC : la machine à superlatifs

1232 dipôles.  
Un dipôle :  
15 m de long  
35 tonnes



# Le LHC : la machine à superlatifs

Longueur des câbles supraconducteurs :  
assez pour 5 aller-retours Terre-soleil



# Le LHC : la machine à superlatifs

Vide presque parfait ( $10^{-13}$  atm) :  
pression 10 fois plus faible  
que sur la Lune



# Le LHC : la machine à superlatifs

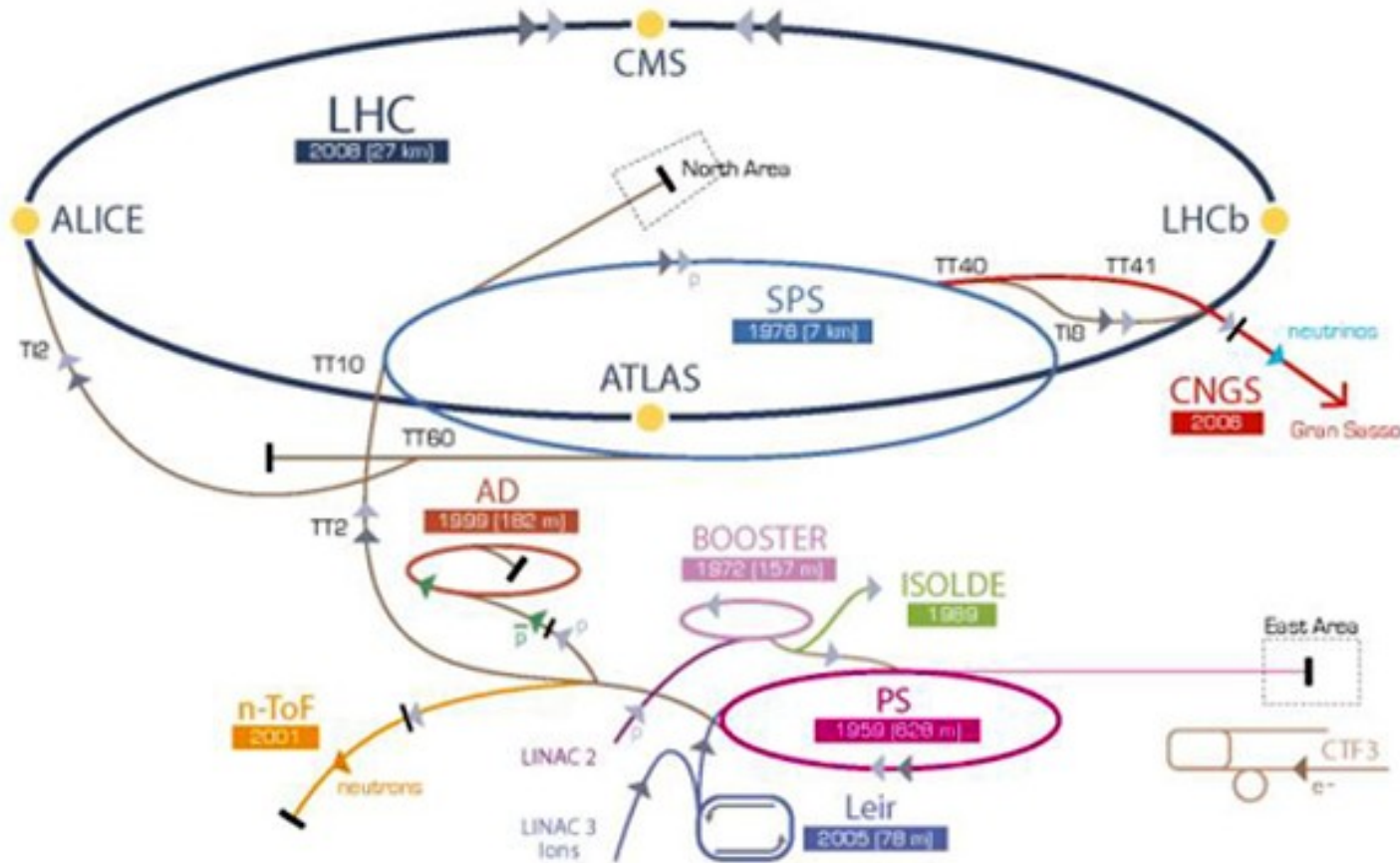


Chaque proton a l'énergie d'un moustique en vol, mais il y en a 2800 paquets de 100 milliards !

► Énergie du faisceau : TGV à 150 km/h.



# Le CERN : les accélérateurs

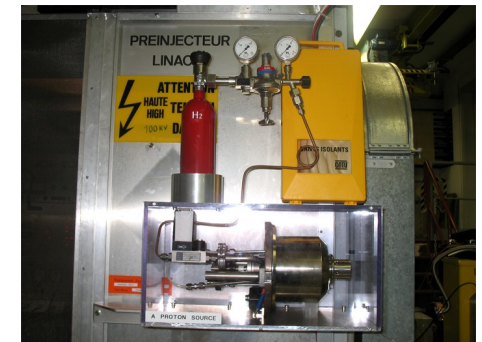


▶ p [protons]   ▶ ions   ▶ neutrons   ▶  $\bar{p}$  [antiproton]   ↔ conversion proton/antiproton   ▶ neutrinos   ▶ électrons

LHC Large Hadron Collider   SPS Super Proton Synchrotron   PS Proton Synchrotron

AD Antiproton Decelerator   CTF3 Clic Test Facility   CNGS Cern Neutrinos to Gran Sasso   ISOLDE Isotope Separator OnLine DEvice

LEIR Low Energy Ion Ring   LINAC LINear ACcelerator   n-ToF Neutrons Time Of Flight



# Bottle to bang

# Large Hadron Collider : un projet de longue haleine

25 ans de préparation

1984	Études préliminaires
1992	Création de la collaboration ATLAS
1994	Approbation par le conseil du CERN
1996-1998	Approbation des quatre grandes expériences
1998-2008	Construction du LHC et des détecteurs
Septembre 2008	Mise en service, panne cryogénique

25 ans d'exploitation

Octobre 2009	Redémarrage
Mars 2010	Premières collisions à 7 TeV
Fin 2012	Fin des collisions à 8 TeV
Printemps 2015	Redémarrage à 13 TeV
2022	Fin des collisions à luminosité nominale ?
2025-2035	Phase à haute luminosité ?

# Large Hadron Collider : un projet de longue haleine



25 ans de préparation

1984	Études préliminaires
1992	Création de la collaboration ATLAS
1994	Approbation par le conseil du CERN
1996-1998	Approbation des quatre grands accélérateurs
1998-2008	Construction du LHC et des détecteurs
Septembre 2008	Mise en service, panne cryogénique

25 ans d'exploitation

Octobre 2009	Redémarrage
Mars 2010	Premières collisions à 7 TeV
Fin 2012	Fin des collisions à 8 TeV
Printemps 2015	Redémarrage à 13 TeV
2022	Fin des collisions à luminosité nominale ?
2025-2035	Phase à haute luminosité ?

# Large Hadron Collider : un projet de longue haleine

25 ans de préparation

1984	Études préliminaires
1992	Création de la collaboration ATLAS
1994	Approbation par le conseil du CERN
1996-1998	Approbation des
1998-2008	Construction du L
Septembre 2008	Mise en service,



25 ans d'exploitation

Octobre 2009	Redémarrage
Mars 2010	Premières collisions à 7 TeV
Fin 2012	Fin des collisions à 8 TeV
Printemps 2015	Redémarrage à 13 TeV
2022	Fin des collisions à luminosité nominale ?
2025-2035	Phase à haute luminosité ?

# Large Hadron Collider : un projet de longue haleine

25 ans de préparation

1984	Études préliminaires
1992	Création de la collaboration ATLAS
1994	Approbation par le conseil du CERN
1996-1998	Approbation des quatre grandes expériences
1998-2008	Construction du LHC et des détecteurs
Septembre 2008	Mise en service, panne cryogénique

25 ans d'exploitation

Octobre 2009	Redémarrage
Mars 2010	Premières collisions à 7 TeV
Fin 2012	Fin des collisions à 8 TeV
Printemps 2015	Redémarrage à 13 TeV
2022	Fin des collisions à luminosité nominale ?
2025-2035	Phase à haute luminosité ?



# Large Hadron Collider : un projet de longue haleine

25 ans de préparation

1984	Études préliminaires
1992	Création de la collaboration ATLAS
1994	Approbation par le conseil du CERN
1996-1998	Approbation des quatre grandes expériences
1998-2008	Construction du LHC et des détecteurs
Septembre 2008	Mise en service, panne cryogénique

25 ans d'exploitation

Octobre 2009	Redémarrage
Mars 2010	Premières collisions à 7 TeV
Fin 2012	Fin des collisions à 8 TeV
Printemps 2015	Redémarrage à 13 TeV
2022	Fin des collisions à luminosité nominale ?
2025-2035	Phase à haute luminosité ?



# Le CERN

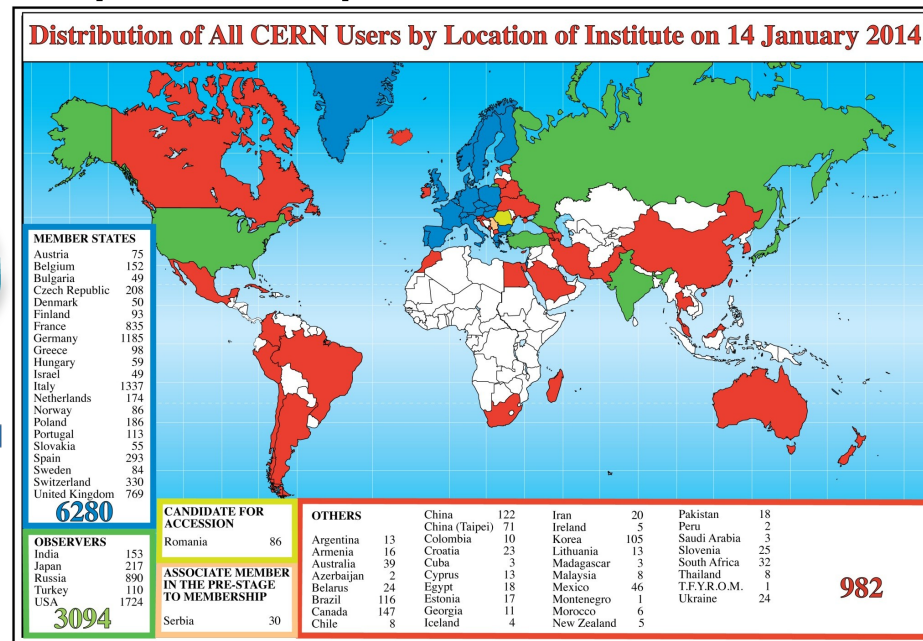


*Organisation européenne pour la recherche nucléaire*

Le laboratoire européen pour la physique des particules

- ▶ organisation internationale
- ▶ créé en 1954 (festivités pour ses 60 ans l'an dernier)
- ▶ 21 état membres
- ▶ Emploie ~2500
- ▶ ~10000 utilisateurs

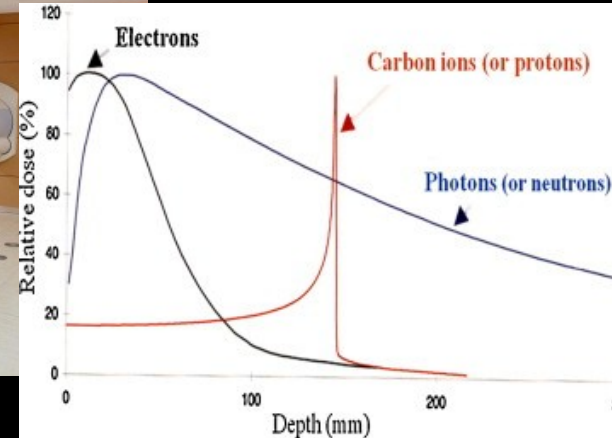
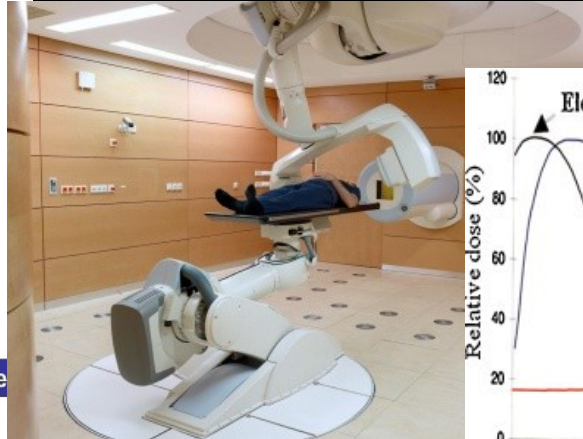
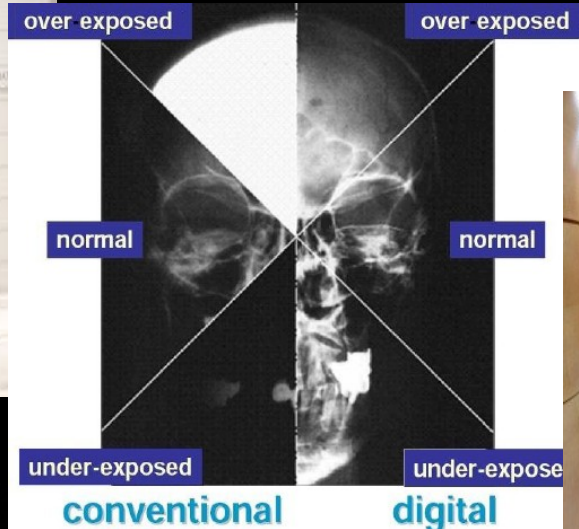
- 500 instituts, 80 pays



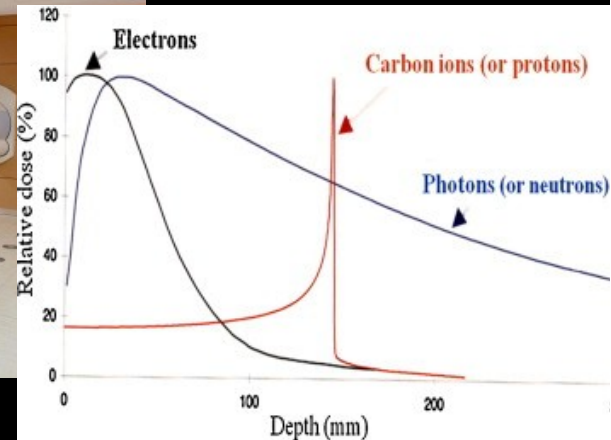
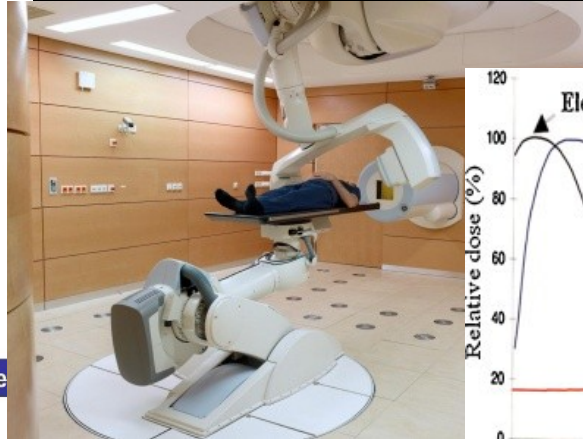
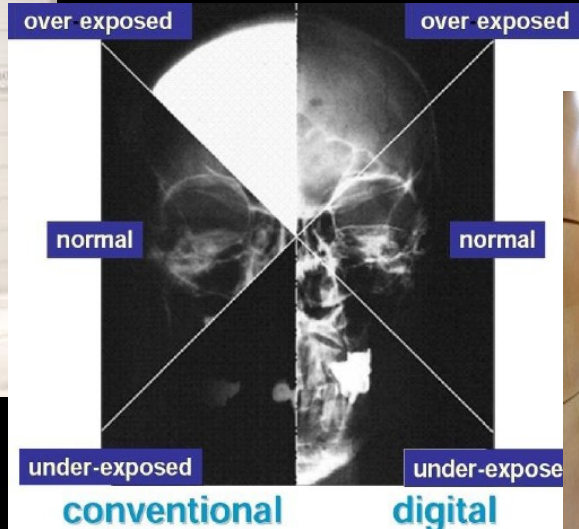
- Nombreuses découvertes scientifiques et techniques / Plusieurs prix Nobel
- Formidable lieu de collaboration internationale
- Programme d'étudiant d'été



# A quoi sert la recherche fondamentale en physique des particules ?



# A quoi sert la recherche fondamentale en physique des particules ?

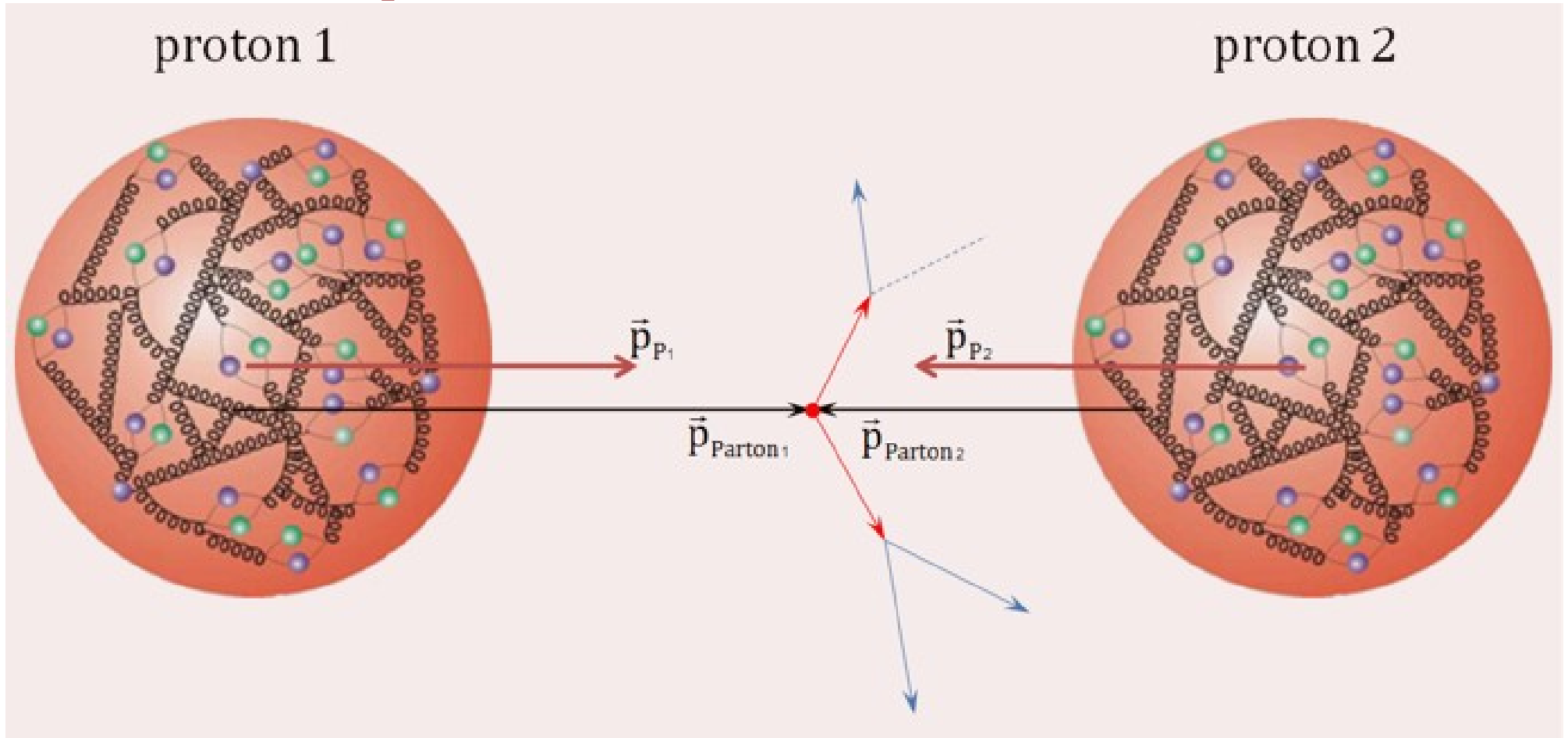


Running jobs: 246791  
Transfer rate: 13.98 GiB/sec



► Le Web a été inventé au CERN !

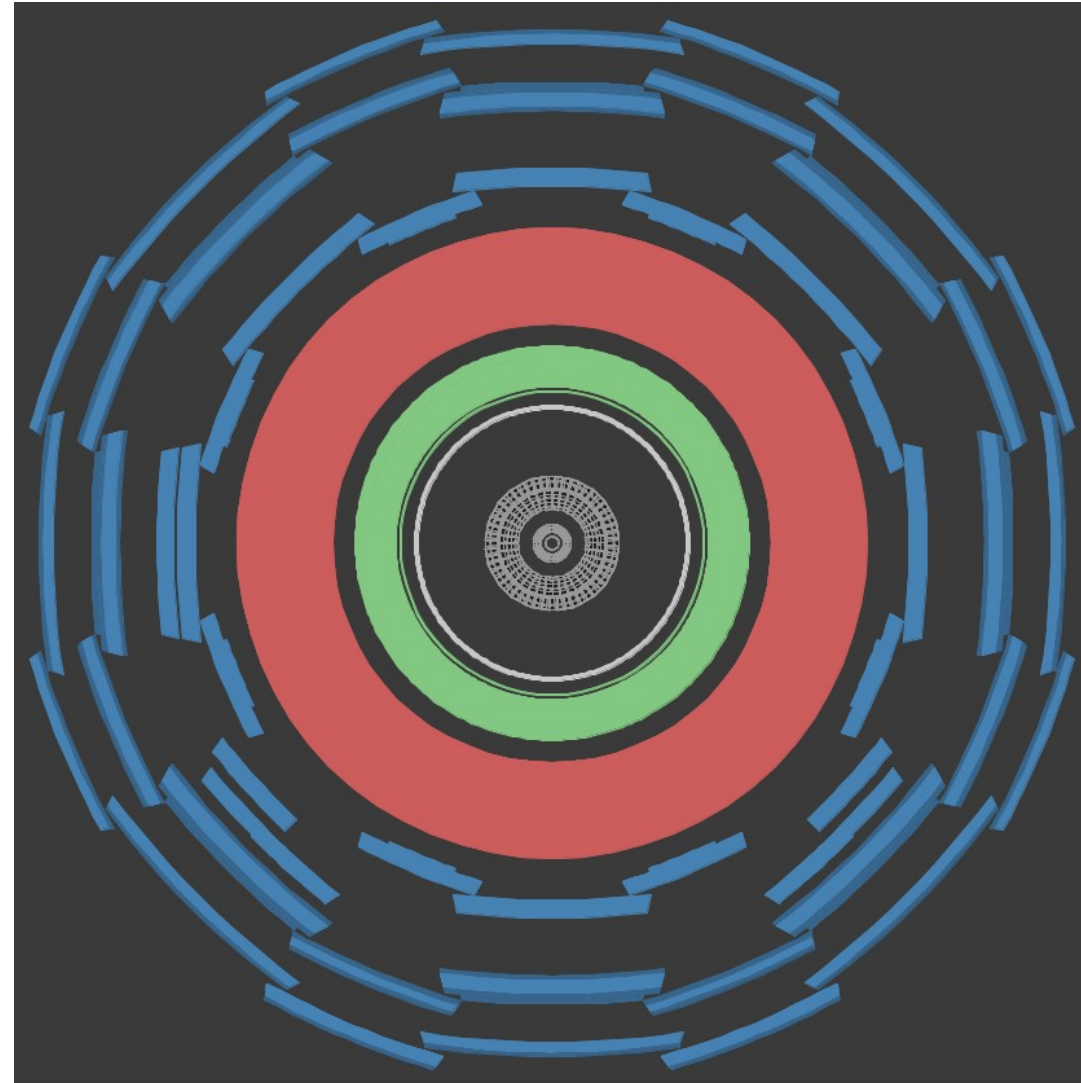
# Deux protons se rencontrent...



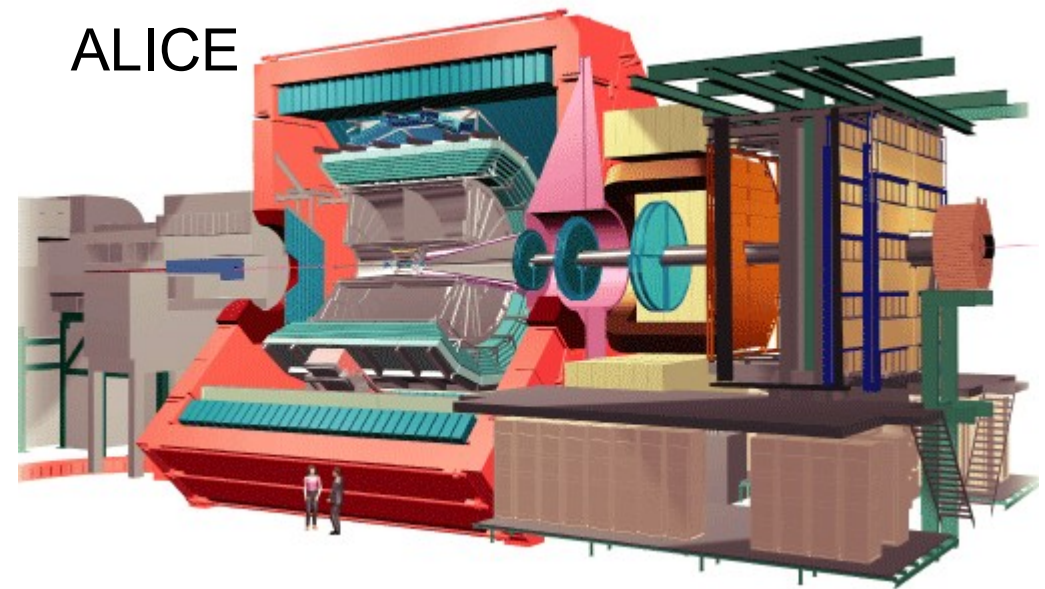
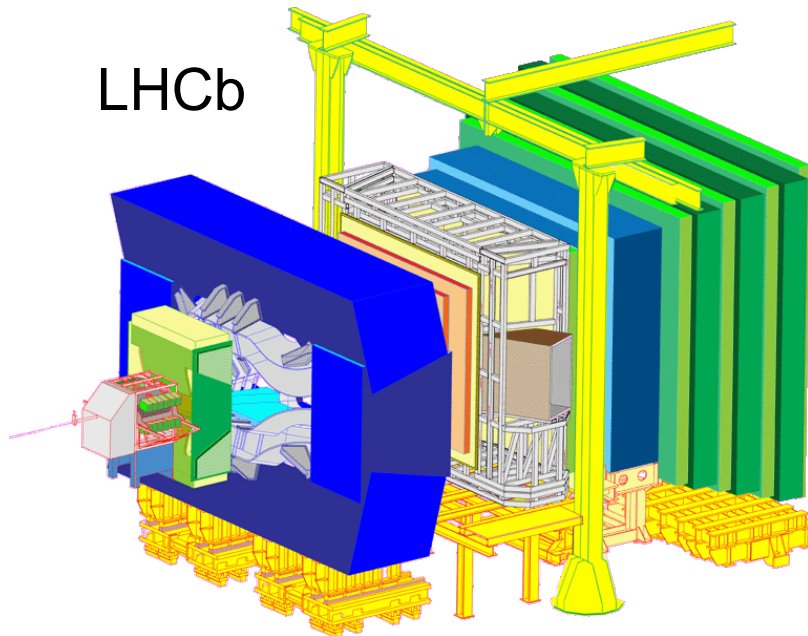
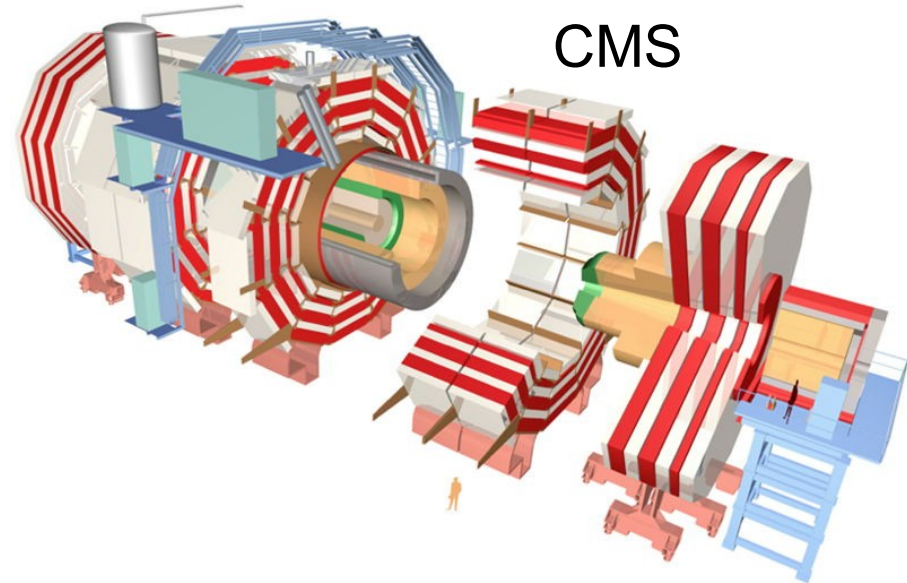
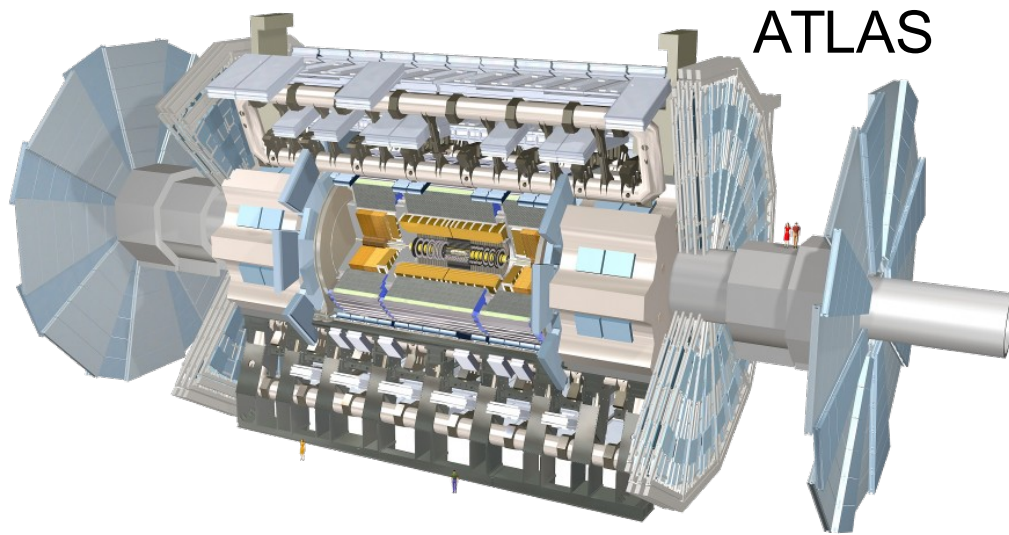
- Collision proton-proton = collision entre constituants (quarks et/ou gluons)
- Jamais deux fois la même collision → mesures statistiques
- Traces de la collision mesurées dans des détecteurs autour du point d'interaction

# Un détecteur, qu'est-ce que c'est ?

- Détecteur interne (trajectographe)
  - ▶ Mesure charge et impulsion des particules chargées, dans un champ magnétique
- Calorimètre électromagnétique
  - ▶ Mesure l'énergie des électrons, positrons et photons
- Calorimètre hadronique
  - ▶ Mesure l'énergie des hadrons (particules contenant des quarks), comme les protons, neutrons, pions, etc.
- Détecteur à muons
  - ▶ Mesure la charge et l'impulsion des muons



# Les détecteurs géants du LHC



# La collaboration ATLAS

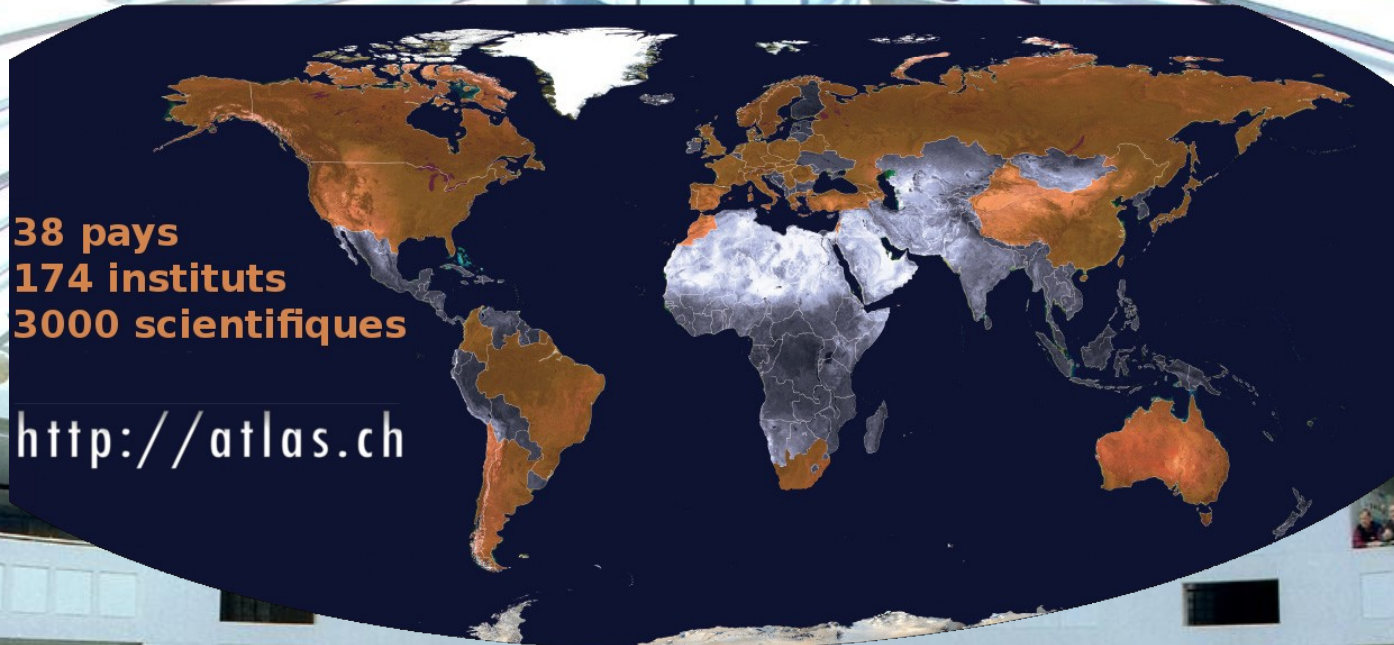


 **ATLAS**  
EXPERIMENT

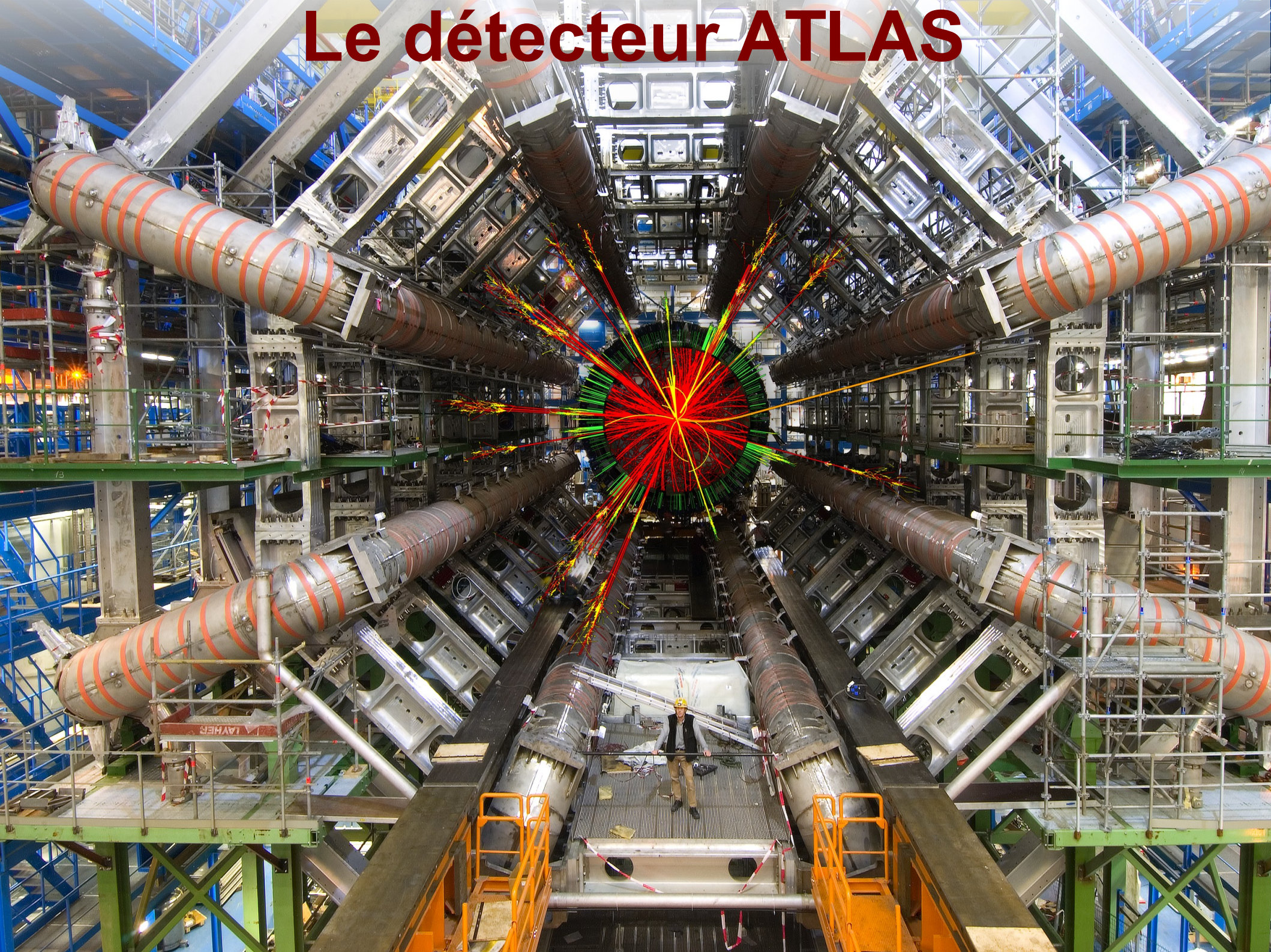
# La collaboration ATLAS

38 pays  
174 instituts  
3000 scientifiques

<http://atlas.ch>



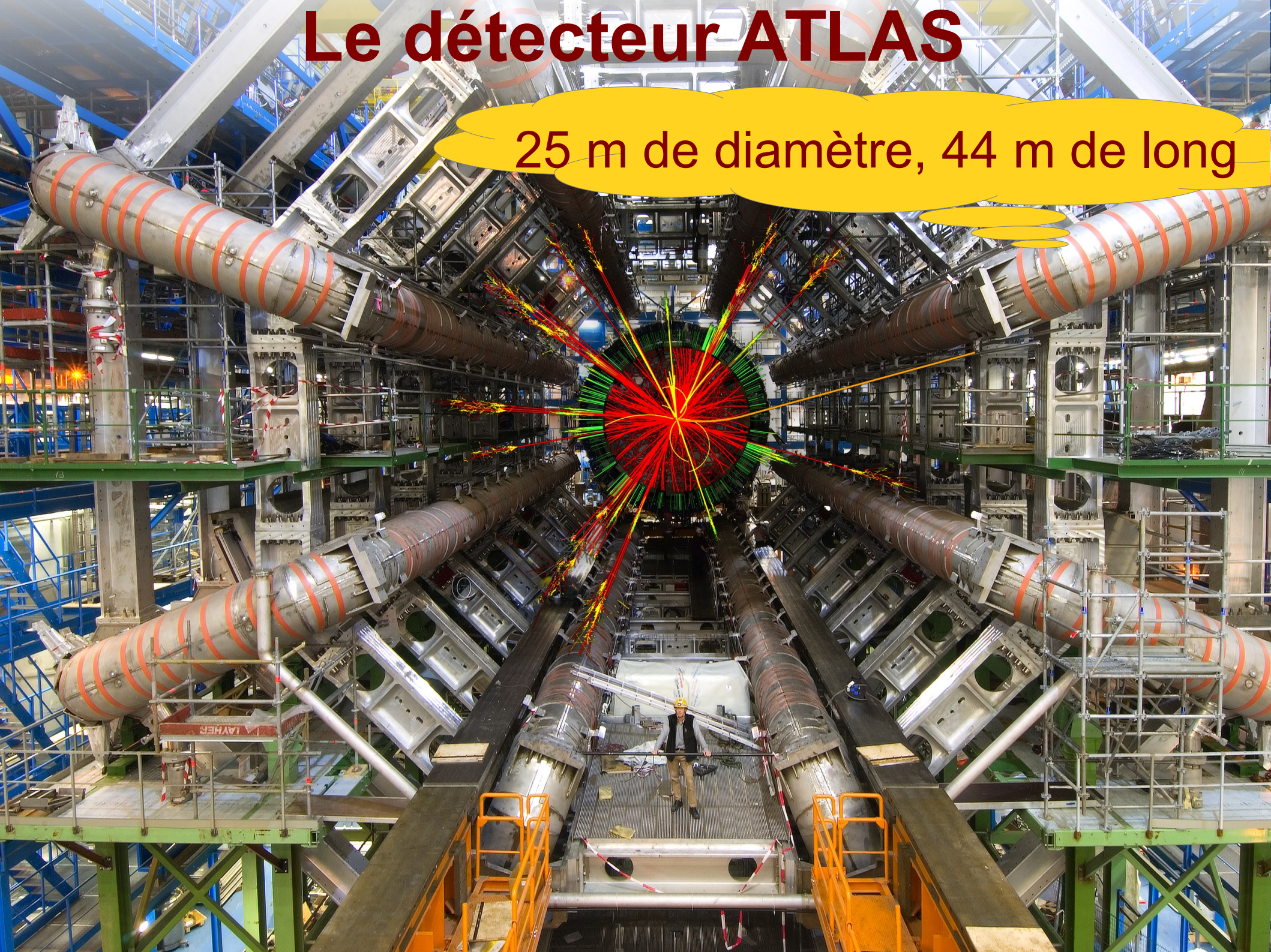
# Le détecteur ATLAS





# Le détecteur ATLAS

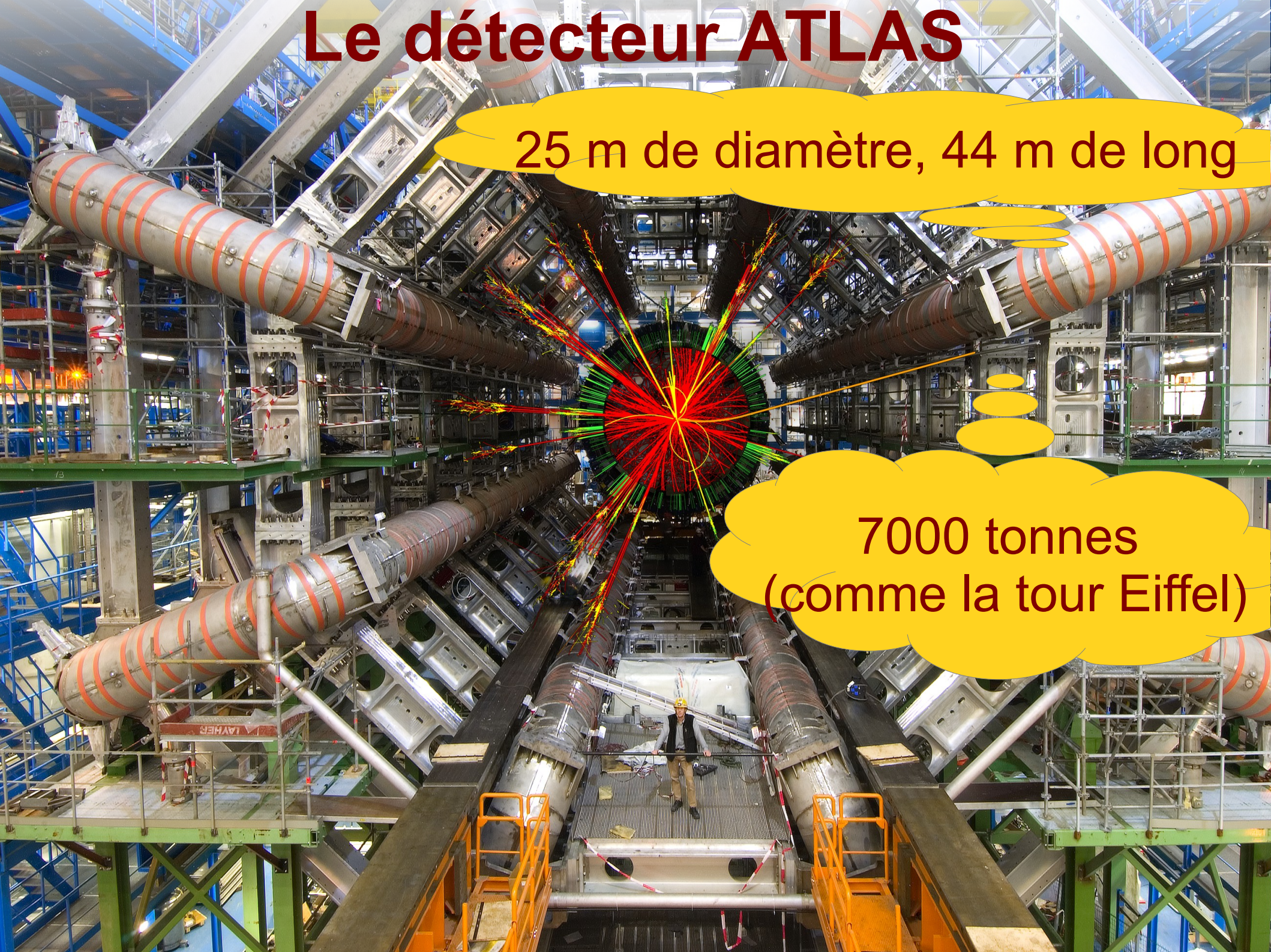
25 m de diamètre, 44 m de long



# Le détecteur ATLAS

25 m de diamètre, 44 m de long

7000 tonnes  
(comme la tour Eiffel)

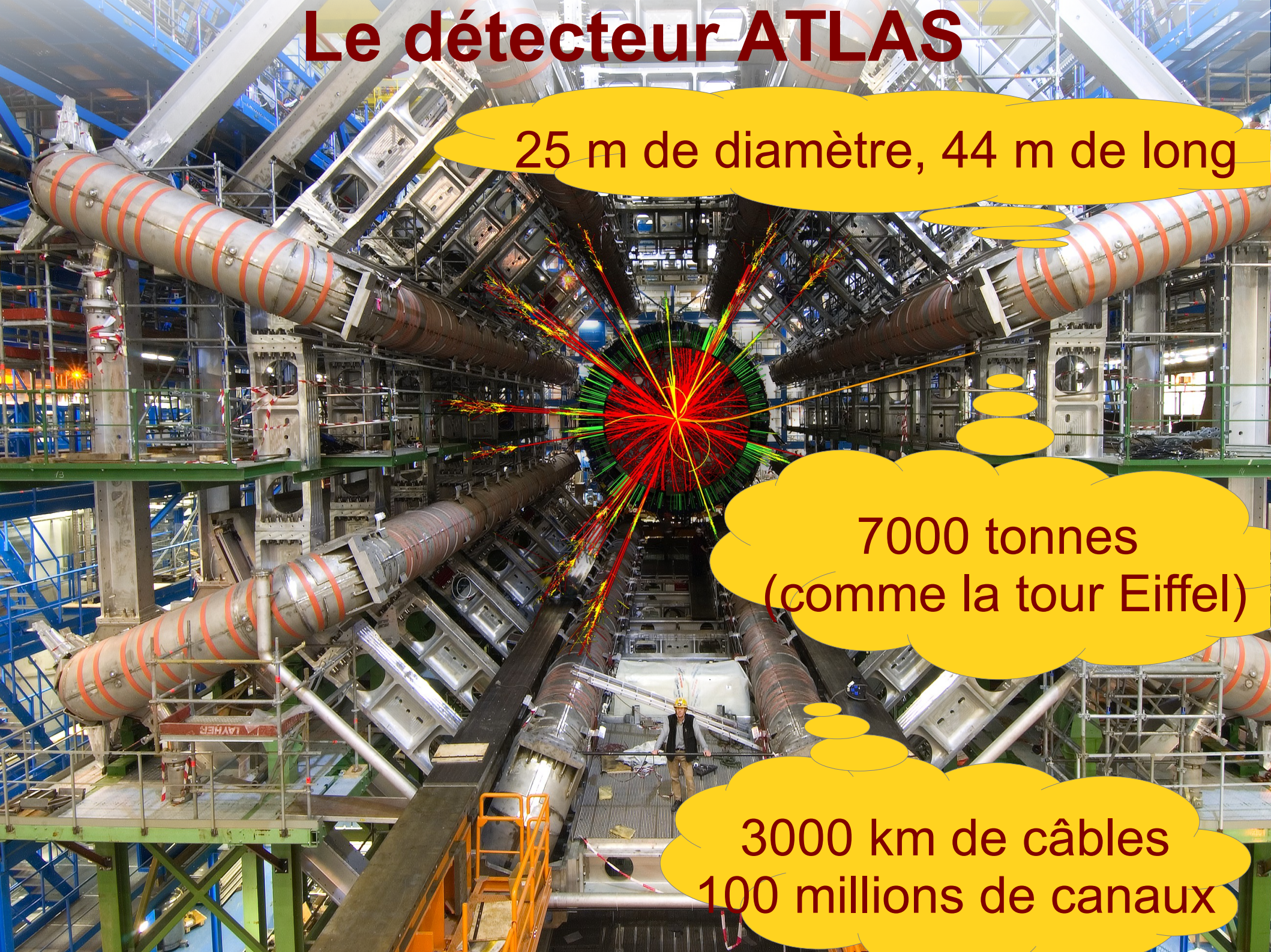


# Le détecteur ATLAS

25 m de diamètre, 44 m de long

7000 tonnes  
(comme la tour Eiffel)

3000 km de câbles  
100 millions de canaux



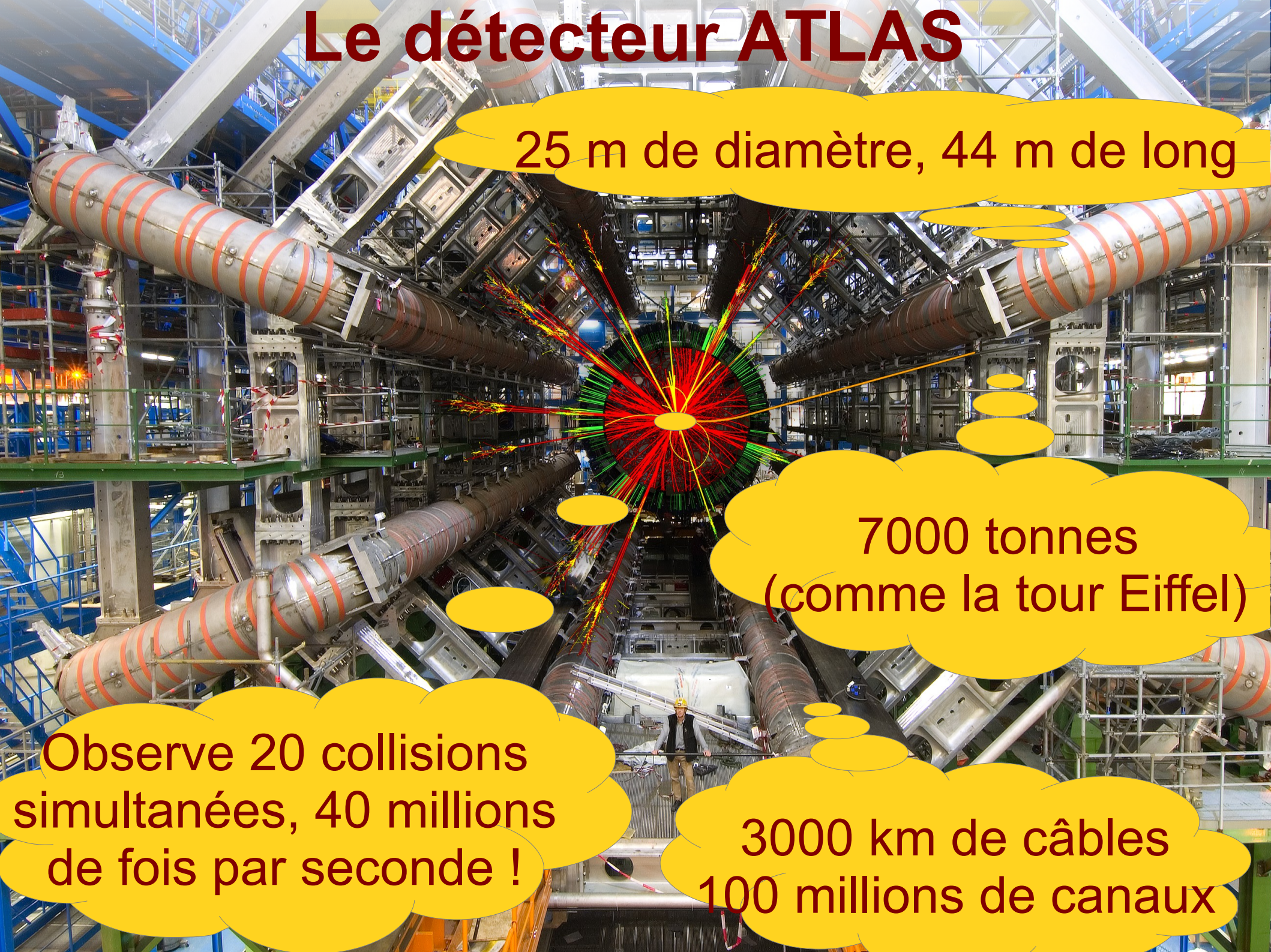
# Le détecteur ATLAS

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 !

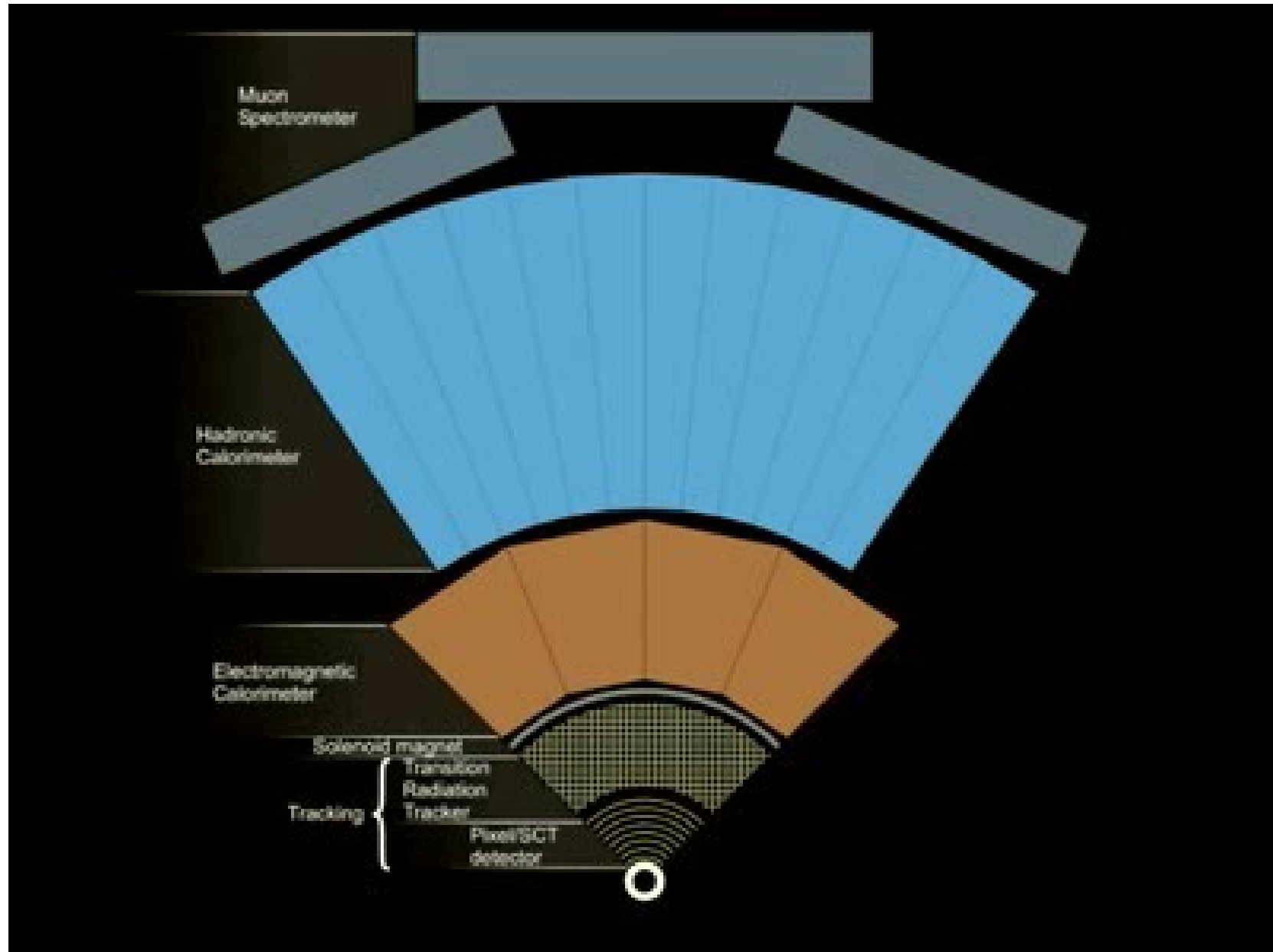
3000 km de câbles  
100 millions de canaux

# Le détecteur ATLAS construit en 1 minute

ATLAS Detecto



# Interaction des particules avec le détecteur



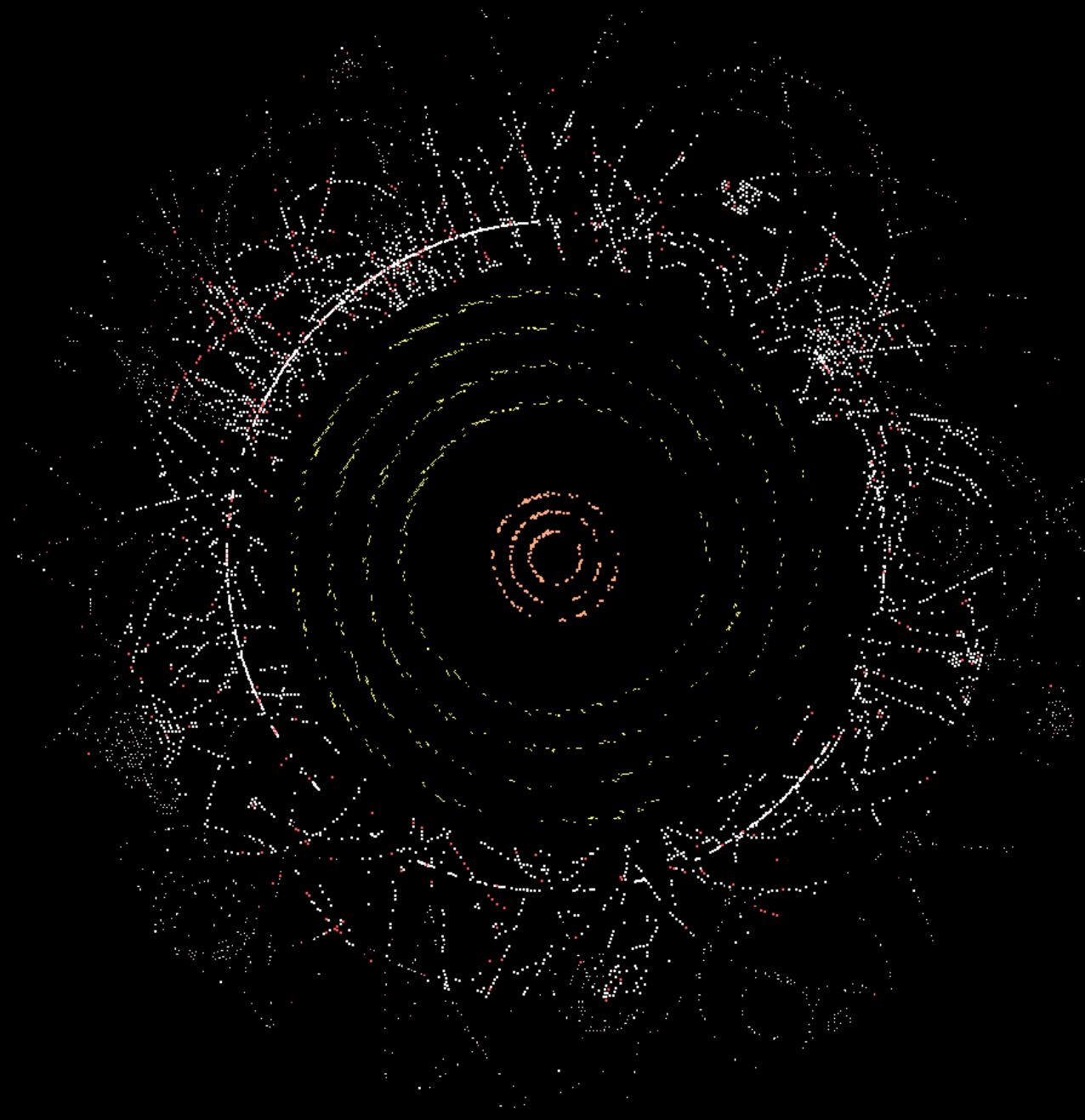
# Mesurer le passage des particules dans le détecteur à pixels



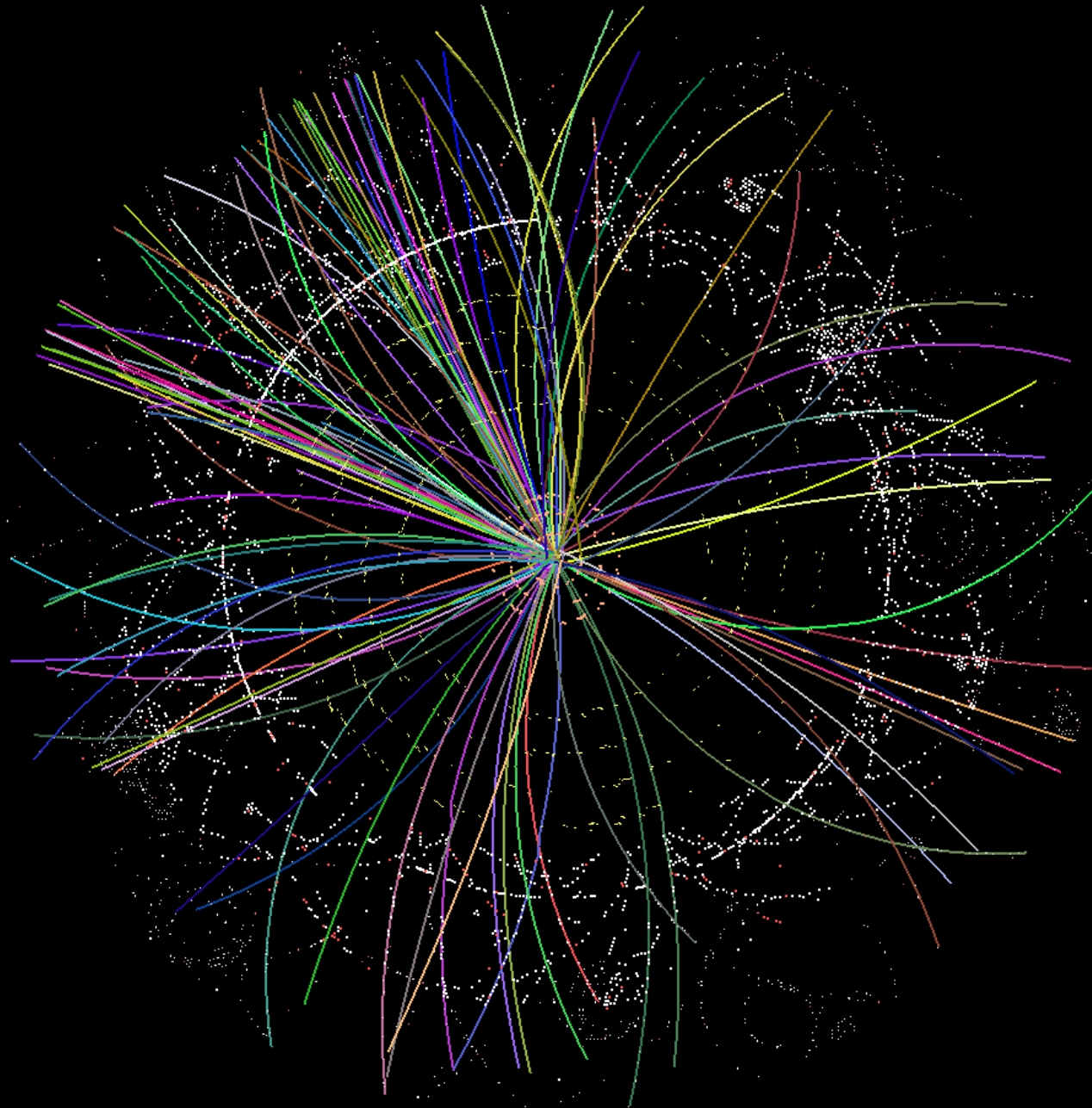
- 80 Mégapixels (+ 10 Mp avec l'IBL, depuis 2014)
- 40 millions d'images par seconde
- 1,7 m<sup>2</sup> de silicium



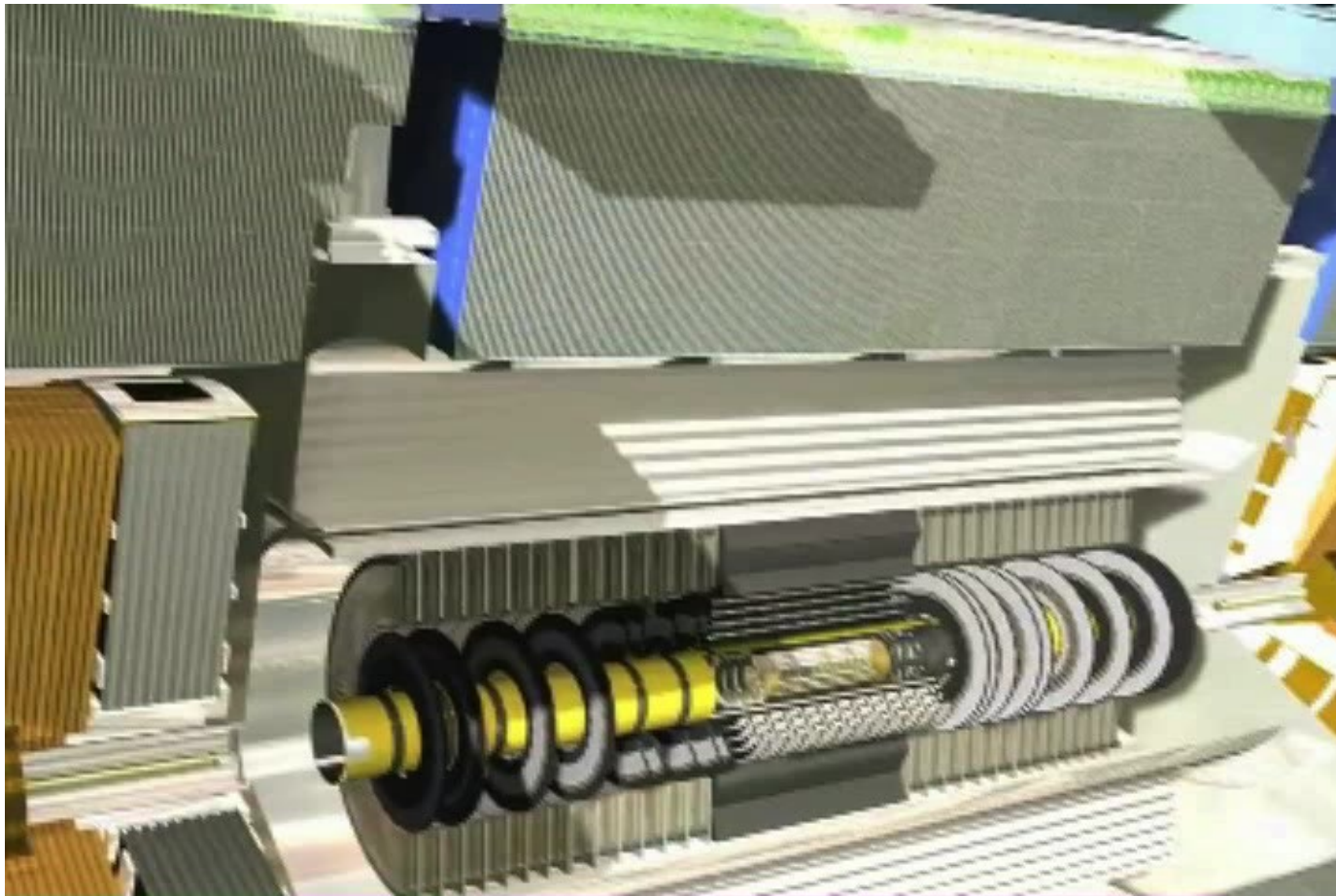
# Passage des particules



# Reconstruction des trajectoires



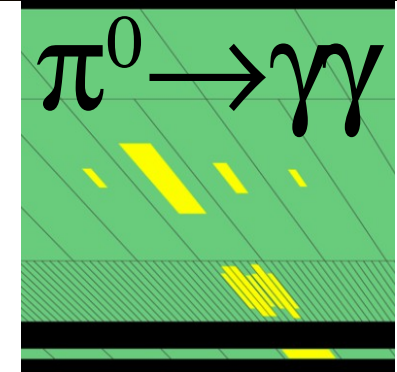
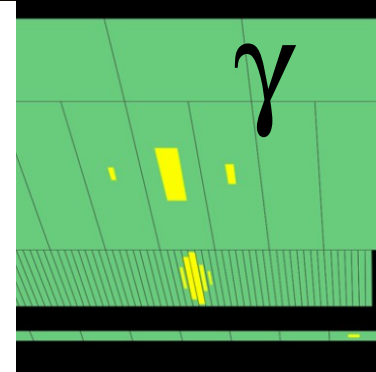
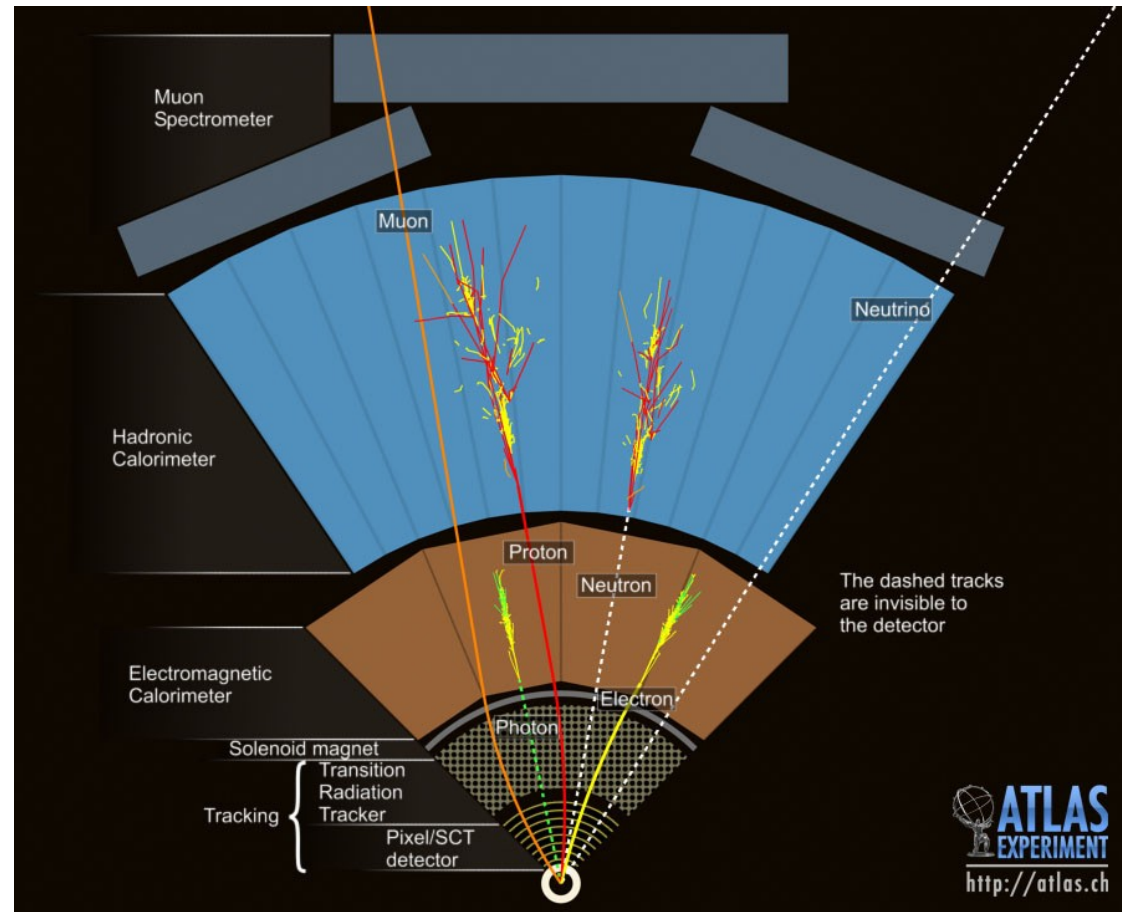
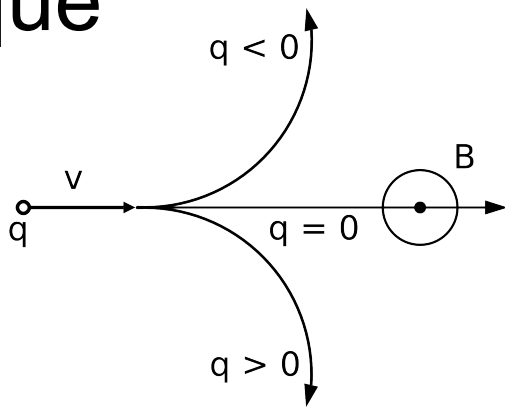
# Mesurer l'énergie des particules dans le calorimètre électromagnétique



- Argon liquide à  $-183^{\circ}\text{C}$

# 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

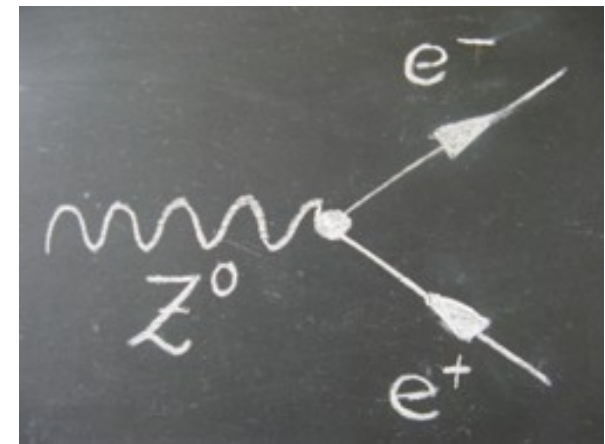
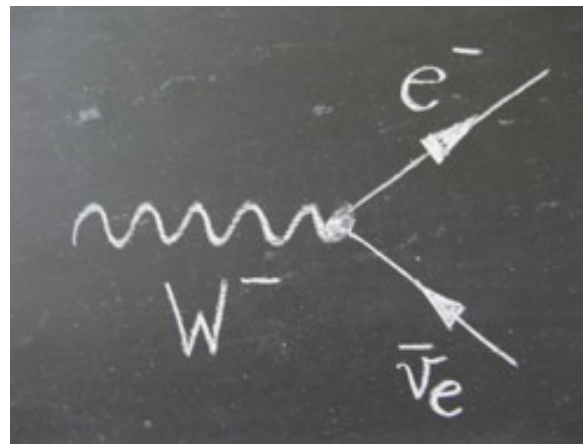
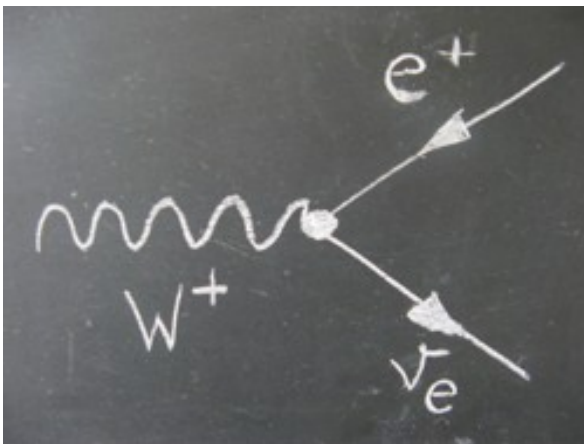


# Difficulté : le bruit de fond

- Signature similaire à ce que l'on cherche, mais venant d'une source différente
- Peut être un vrai processus qui fournit le même état final
- Ou bien dû au fait qu'une particule n'est pas vue dans le détecteur
  - par exemple s'échappe le long du faisceau
- Ou bien à une mauvaise reconstruction dans le détecteur
  - il y a un jet et je crois que c'est un électron
- Ou encore à la présence d'autres particules dans l'événement
  - chaque événement contient plusieurs collisions

# Exemple de signal et bruit de fond

- Signal : désintégration de bosons  $W \rightarrow e\nu$
- Bruit de fond :  $Z \rightarrow ee$
- Un des  $e$  n'est pas reconstruit

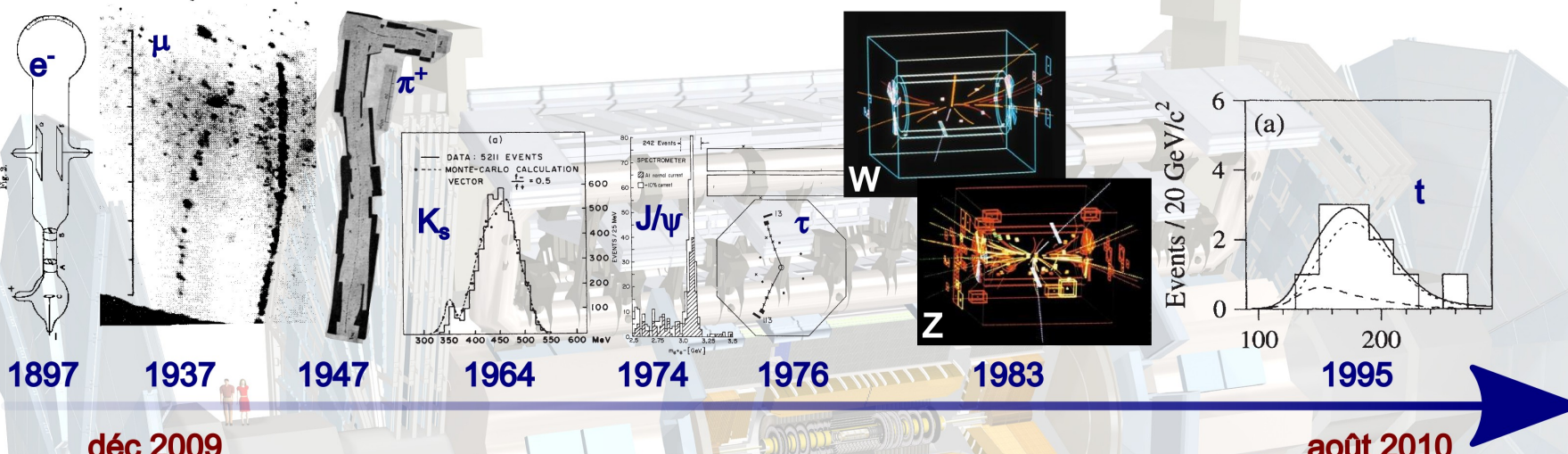


- Si on cherche des événements  $Z$ , alors les  $W$  peuvent être un bruit de fond !

# Le modèle standard redécouvert

## LHC 2010 : un siècle en un an

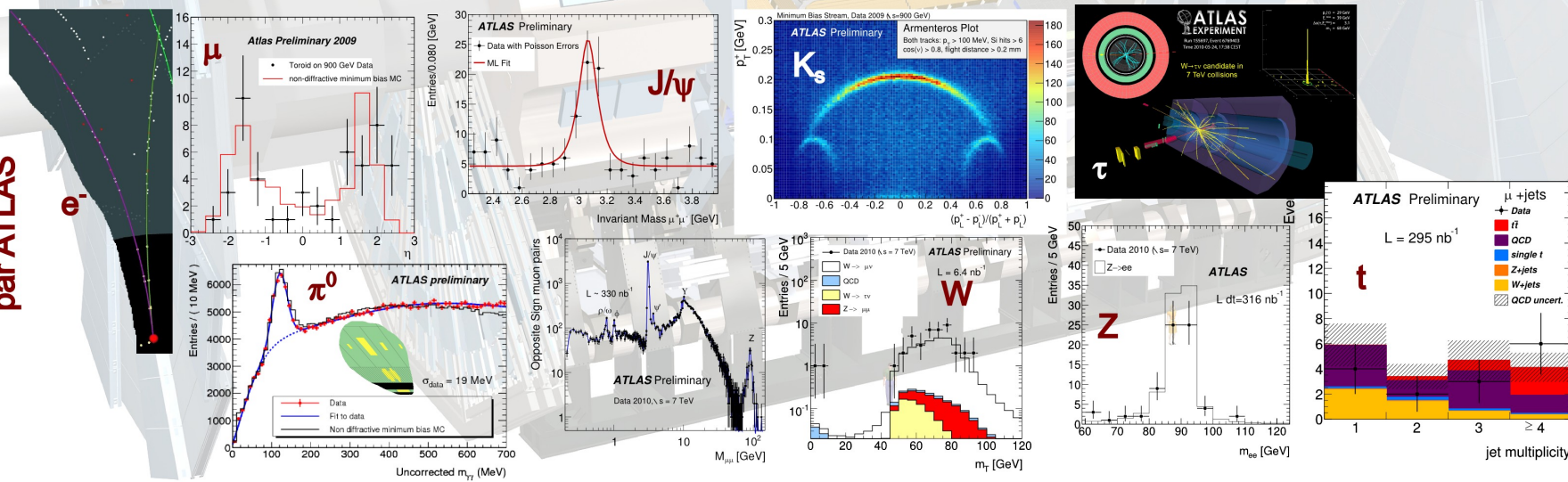
Découverte historique



déc 2009

août 2010

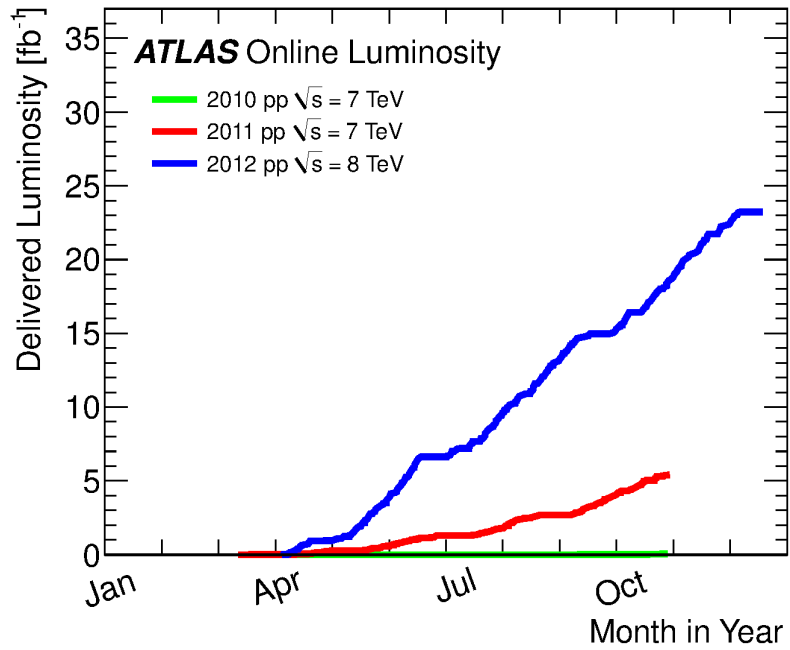
Redécouverte par ATLAS



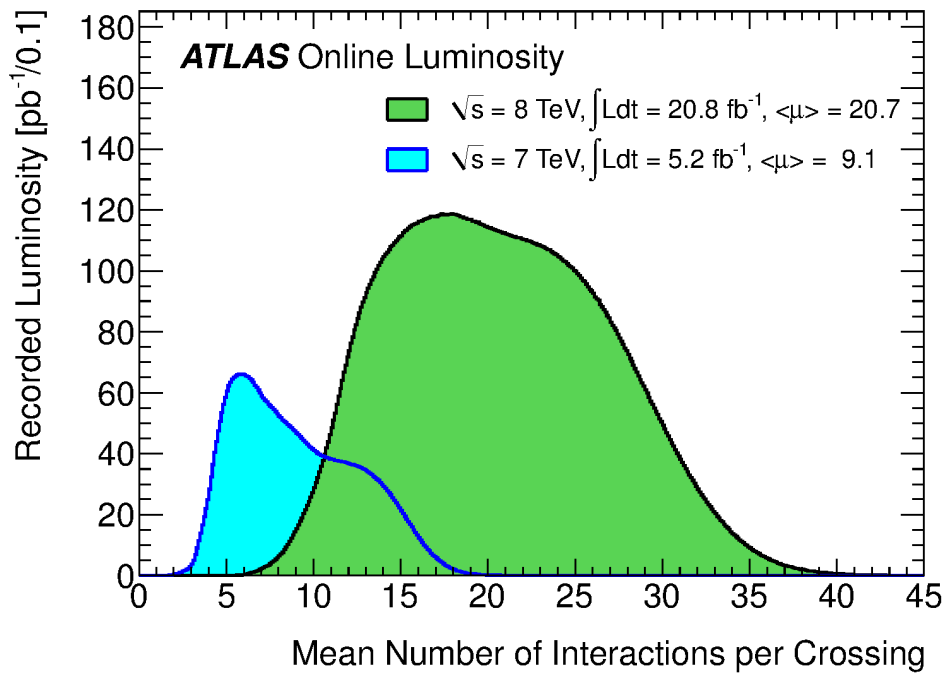
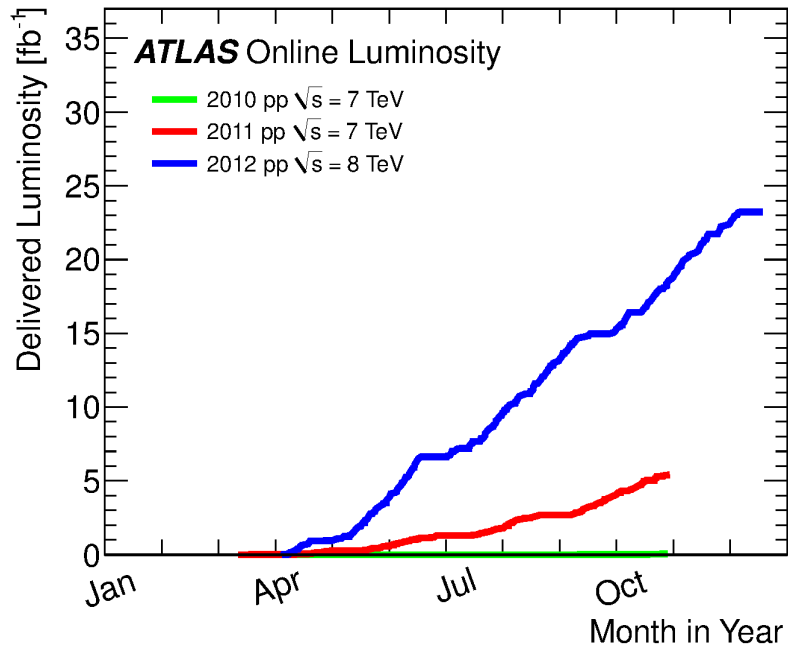
# Accumulation des données



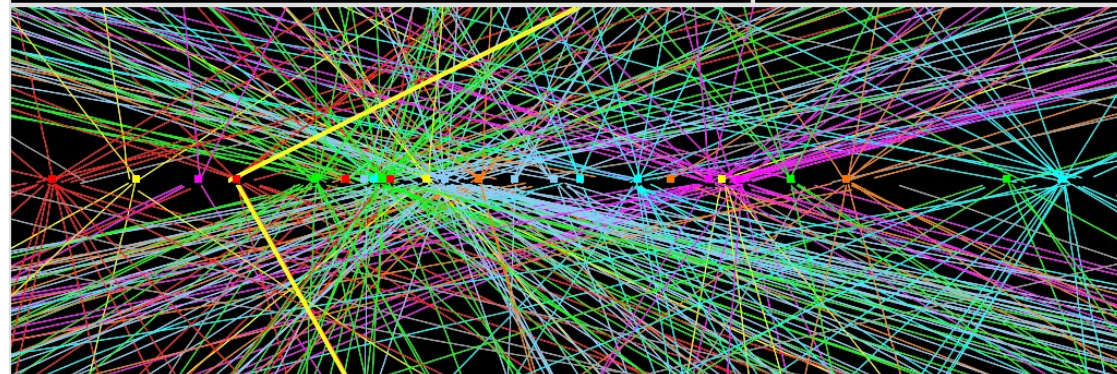
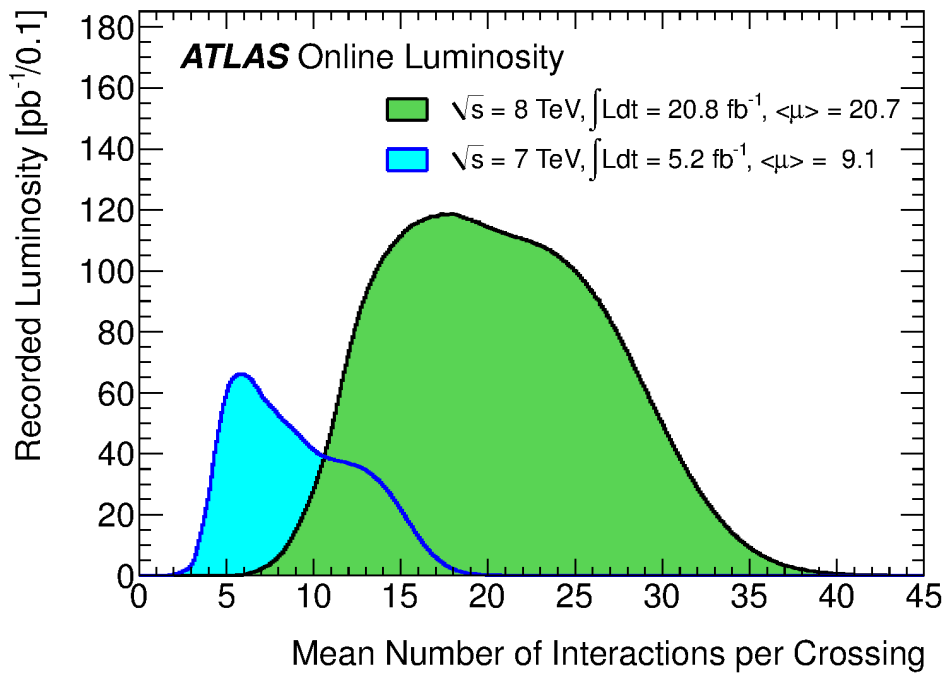
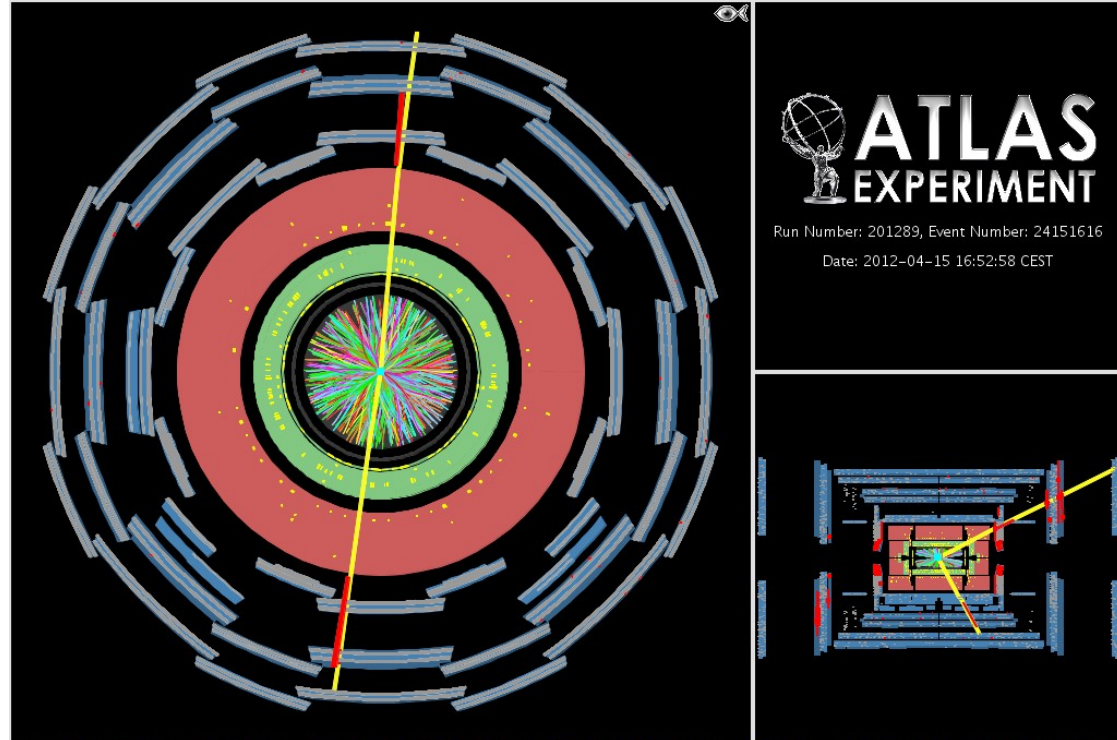
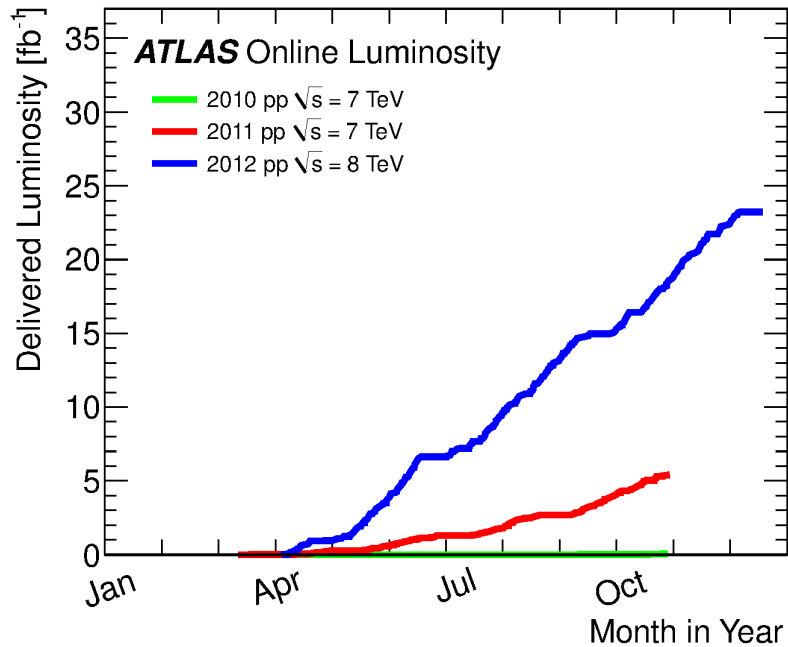
# Accumulation des données



# Accumulation des données



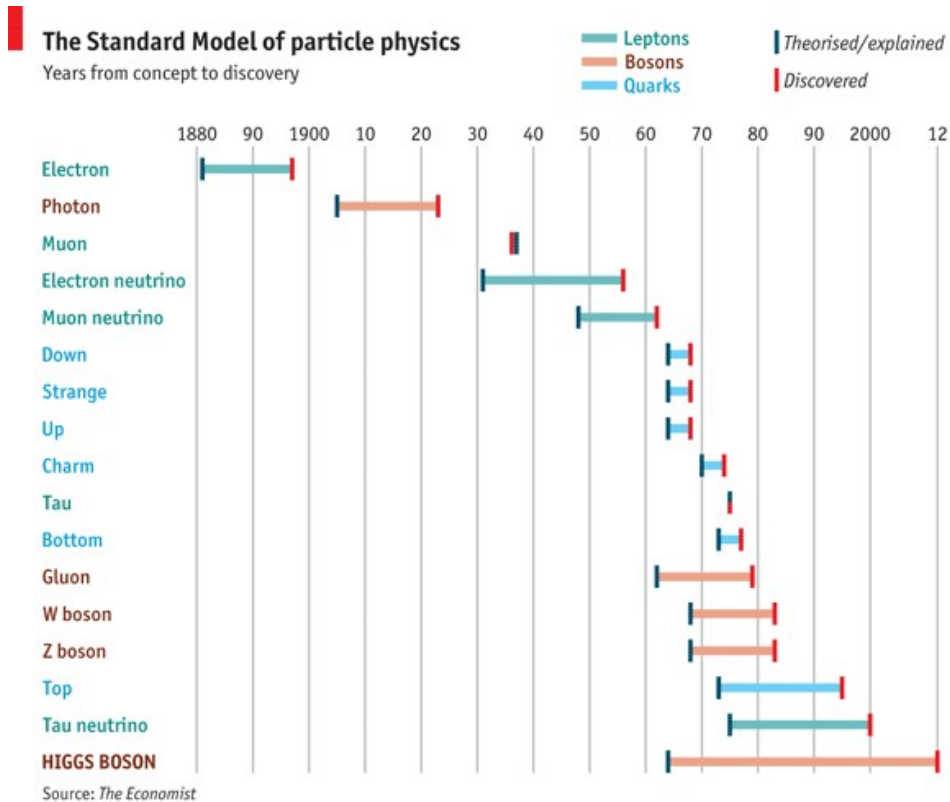
# Accumulation des données



# Découverte du boson de Higgs annoncée le 4 juillet 2012



# Une longue quête

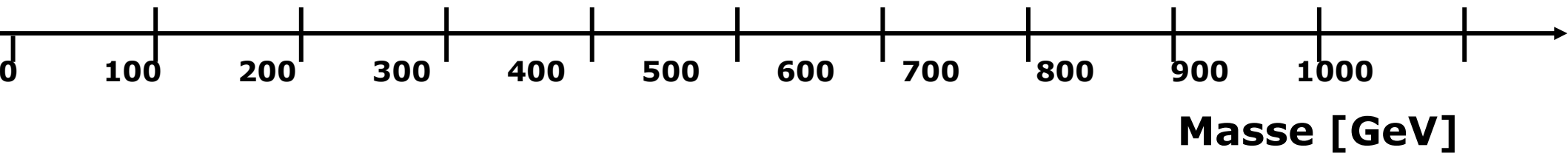


© The Economist

- 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

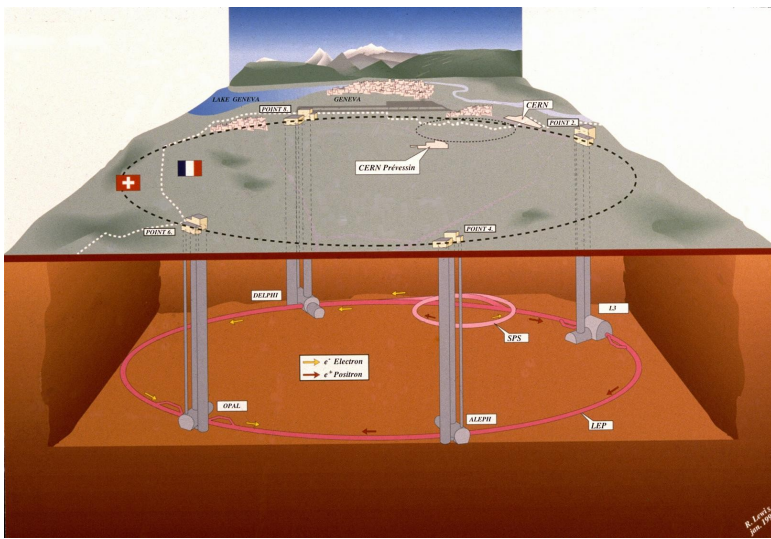
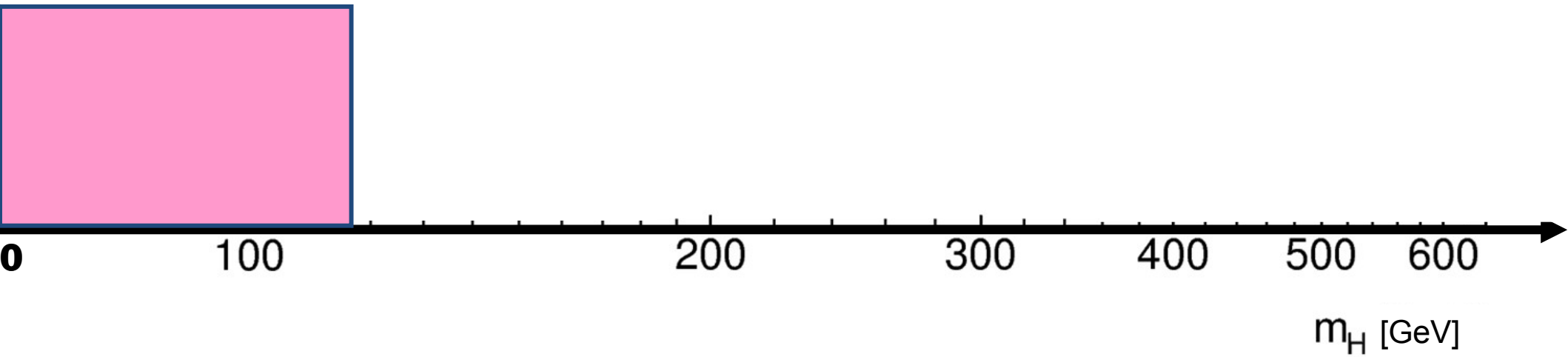
?



- Seule contrainte théorique : masse  $< 1000$  GeV

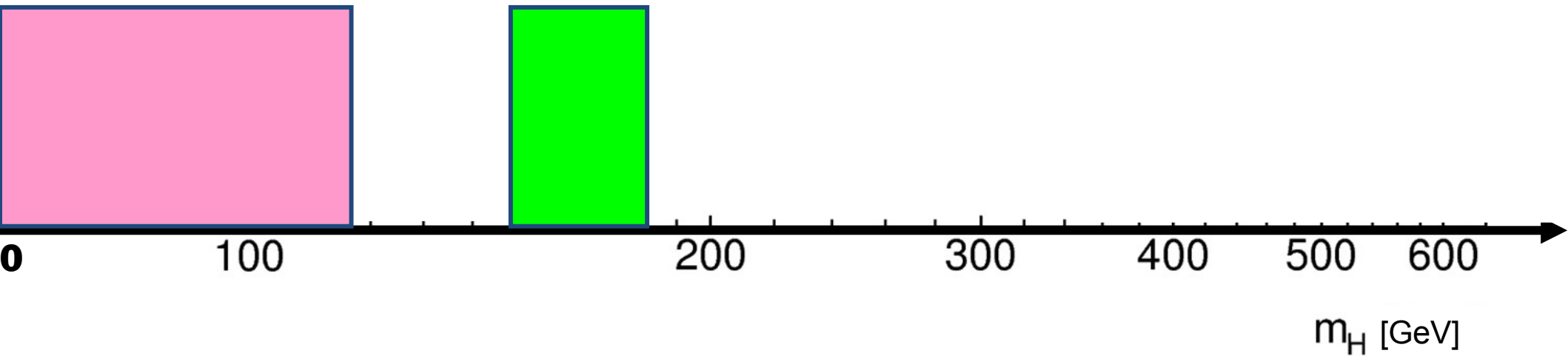
# La chasse au boson de Higgs

LEP  
1989-2000



# La chasse au boson de Higgs

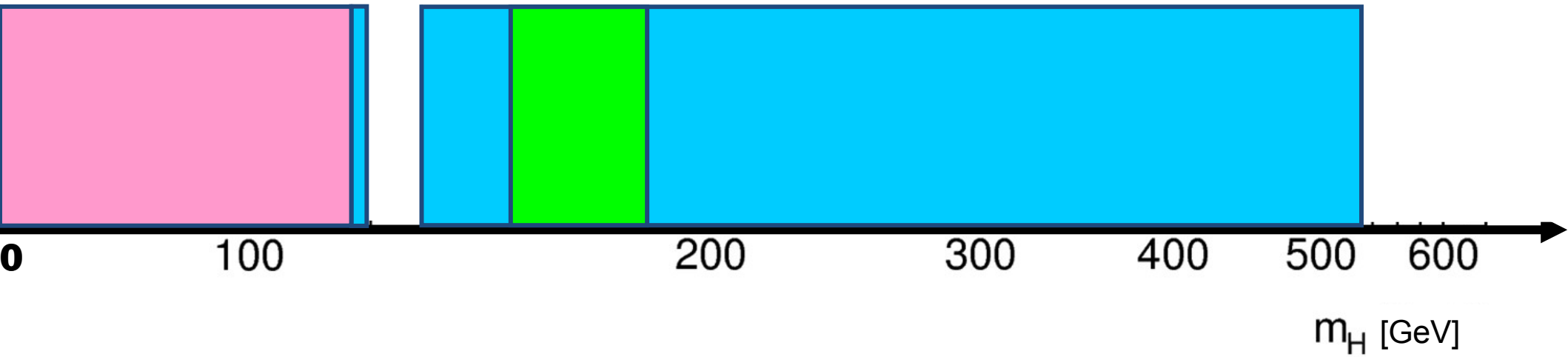
Tevatron  
1983-2011



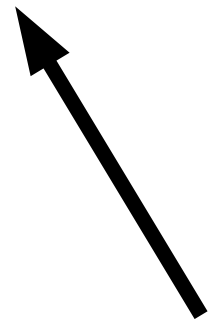
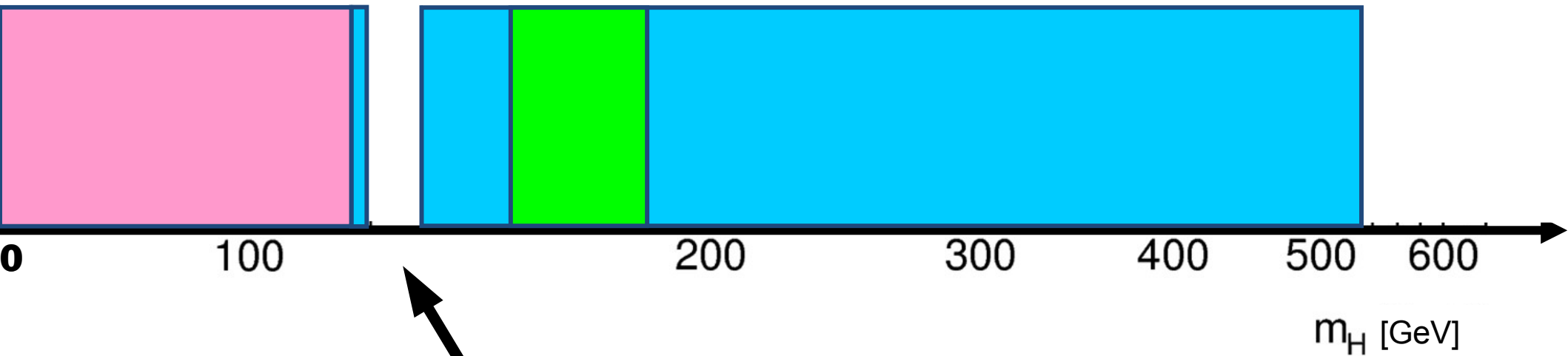


# La chasse au boson de Higgs

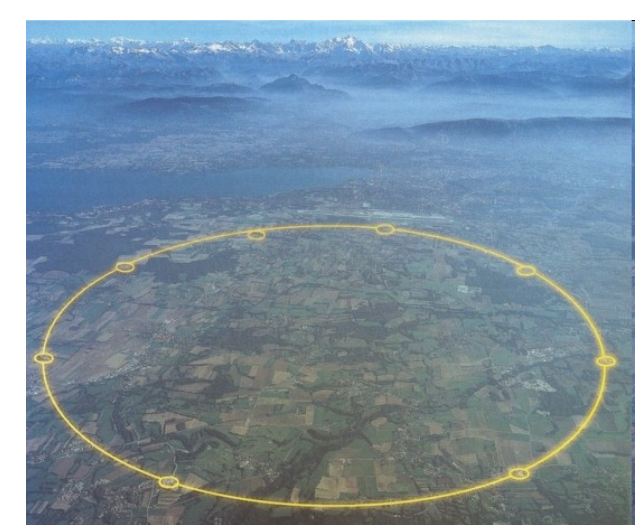
LHC  
2009-2011



# La chasse au boson de Higgs



?



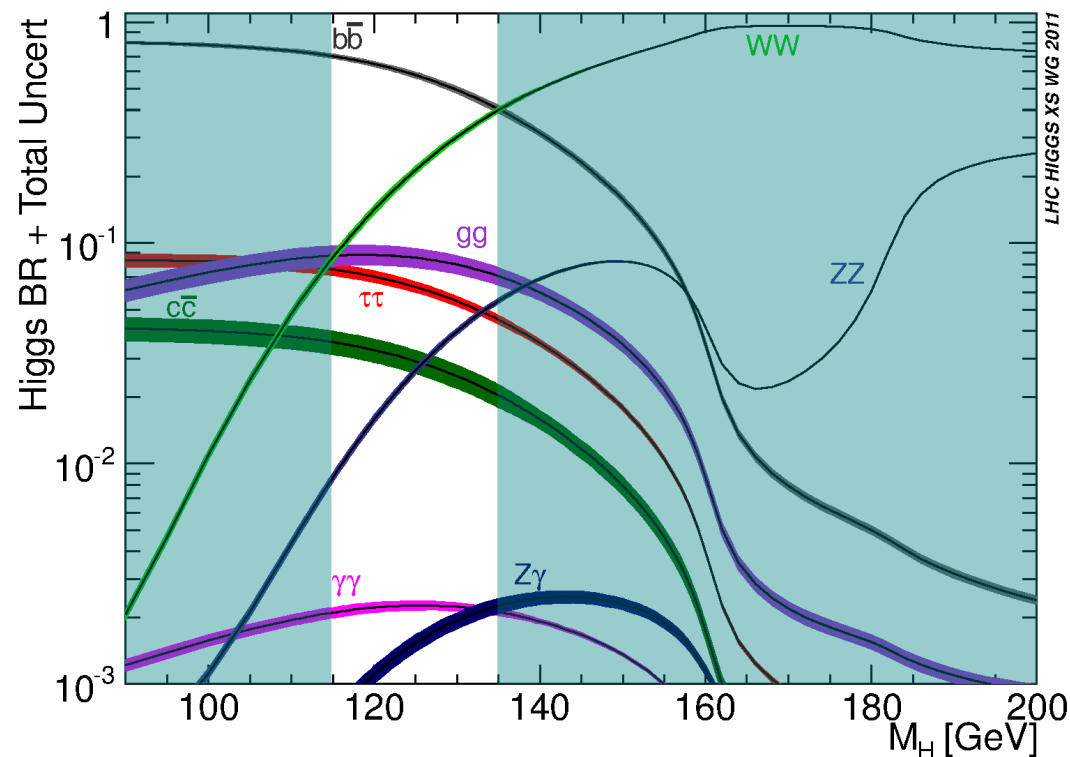
# Comment s'y prend-on ?

- 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 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

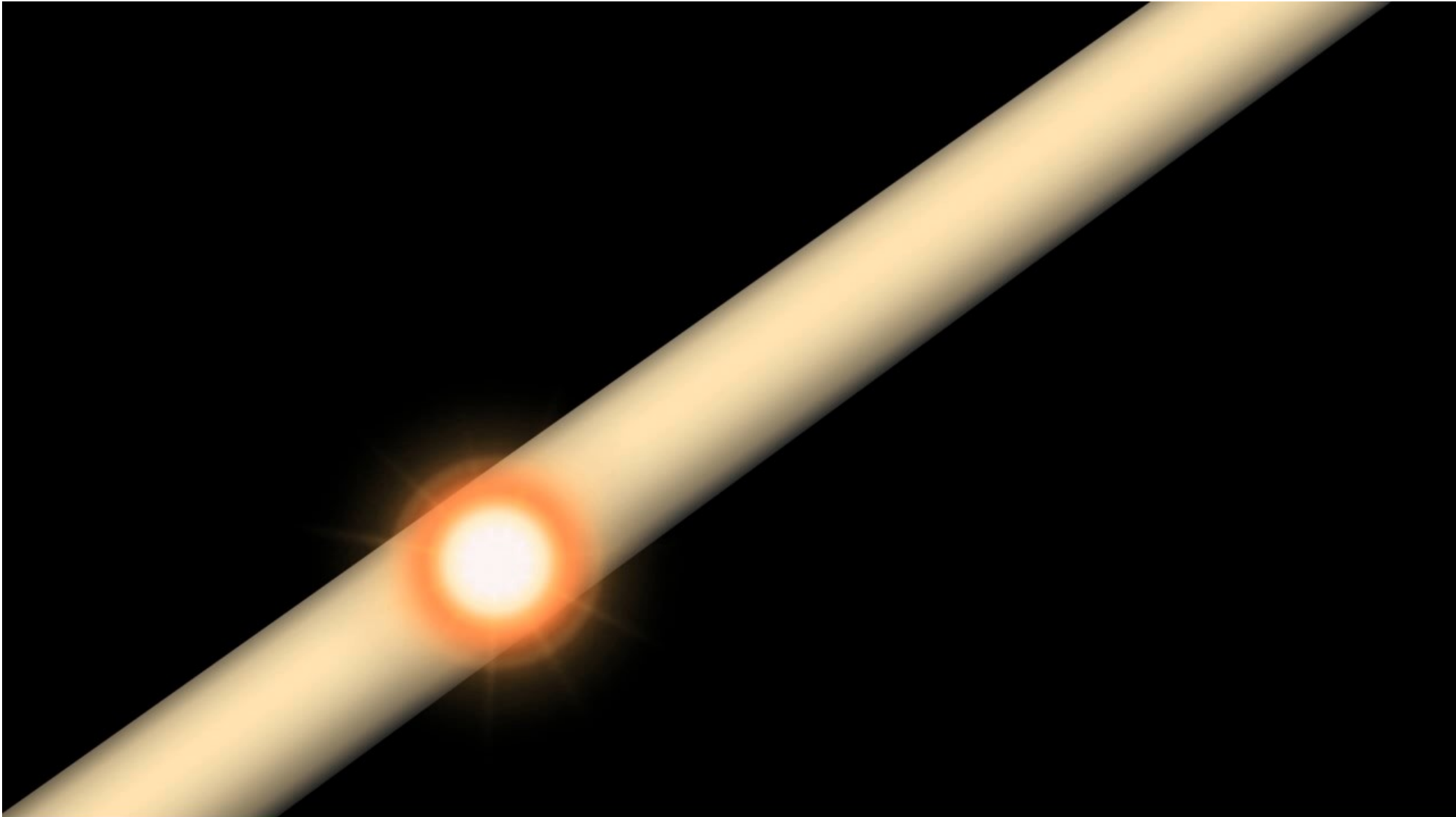


# Encore plus dur qu'une aiguille dans une botte de foin

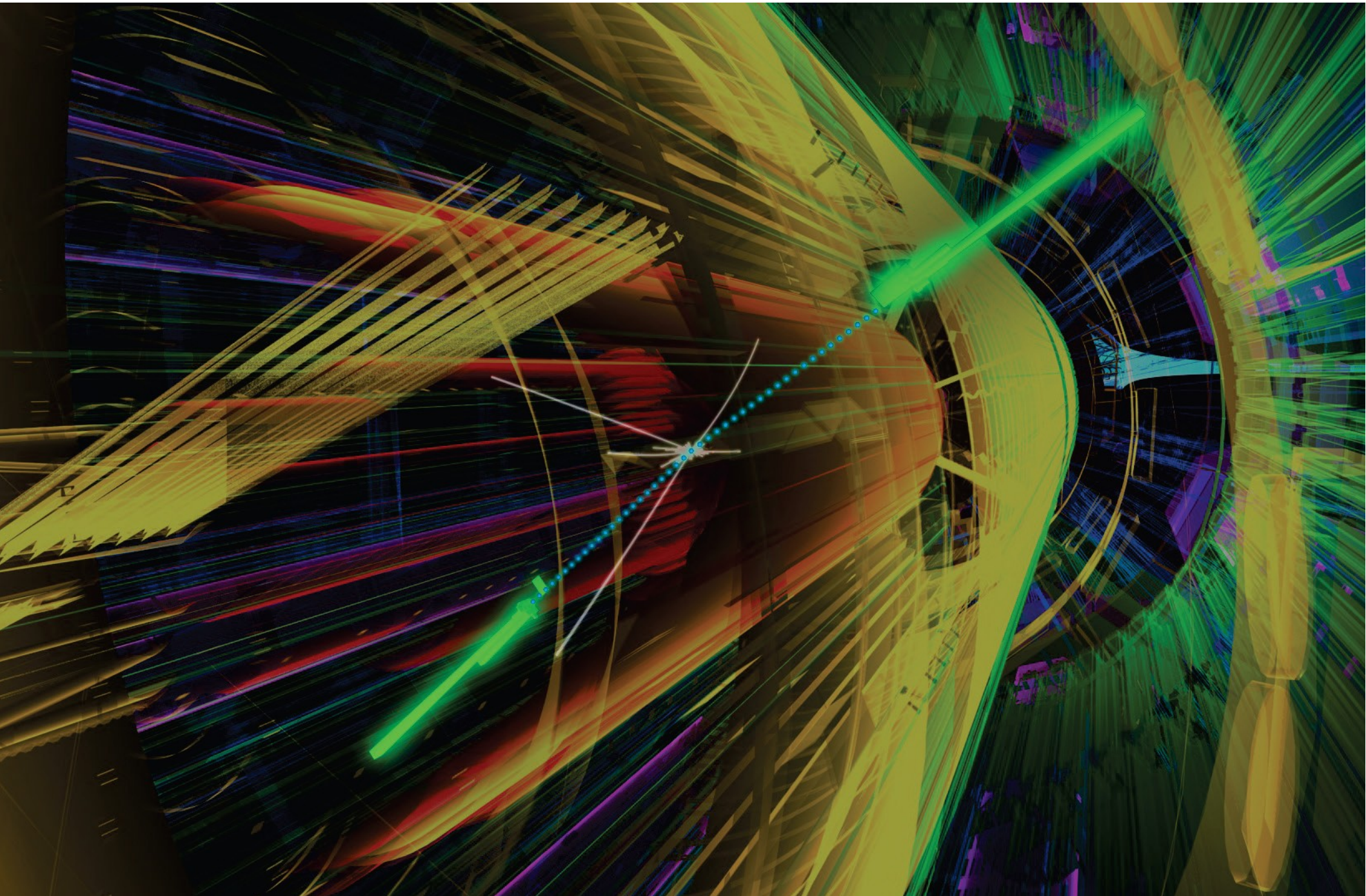
- Le boson de Higgs n'est pas produit très souvent, il faut donc analyser énormément de collisions
- La trace de sa désintégration dans le détecteur peut être imitée par d'autres processus, très difficiles à différencier de ce que l'on cherche
- Une aiguille dans une botte d'aiguilles



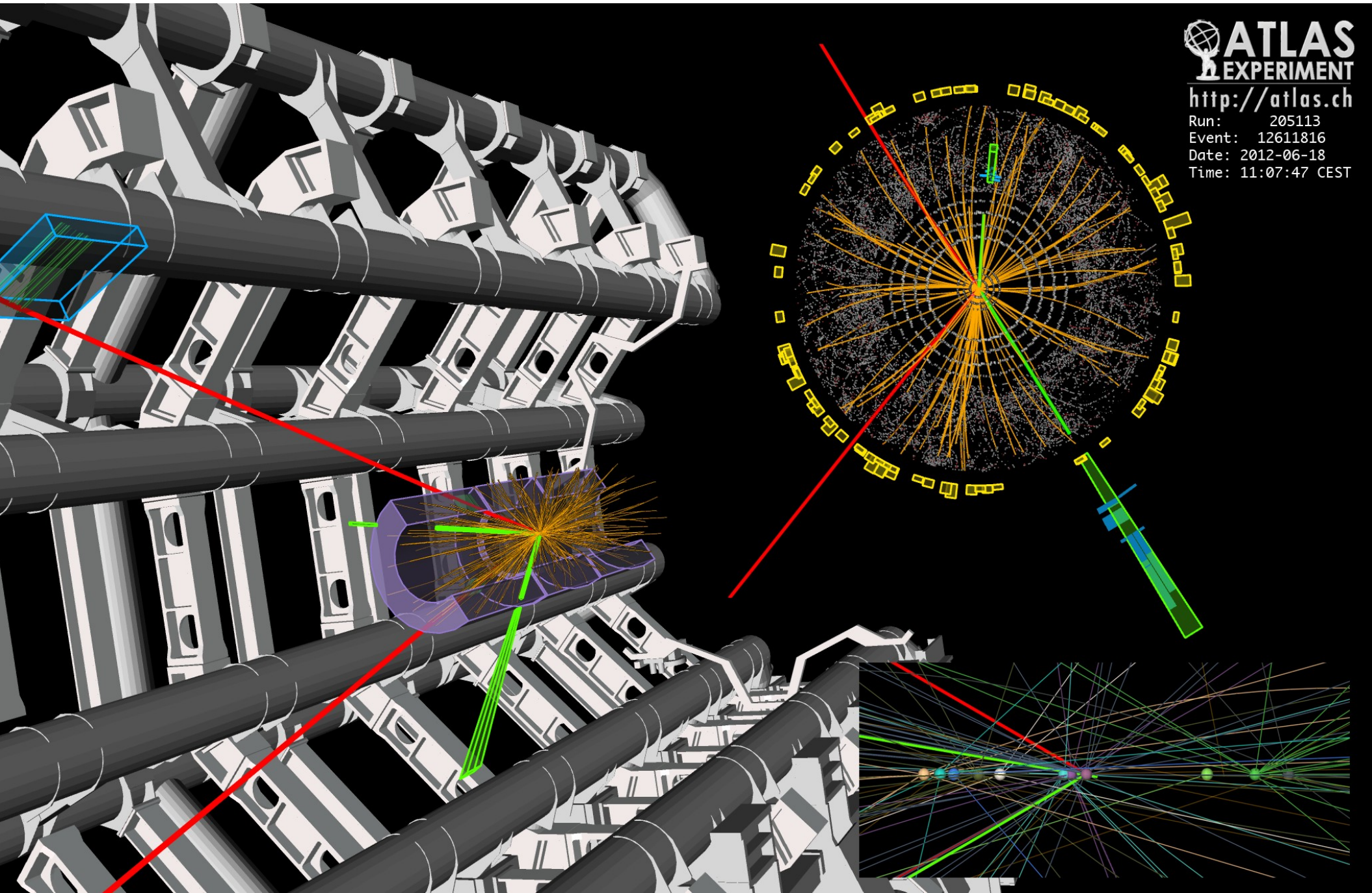
# Boson de Higgs dans ATLAS



# Candidat $H \rightarrow \gamma\gamma$



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



**ATLAS**  
EXPERIMENT

<http://atlas.ch>

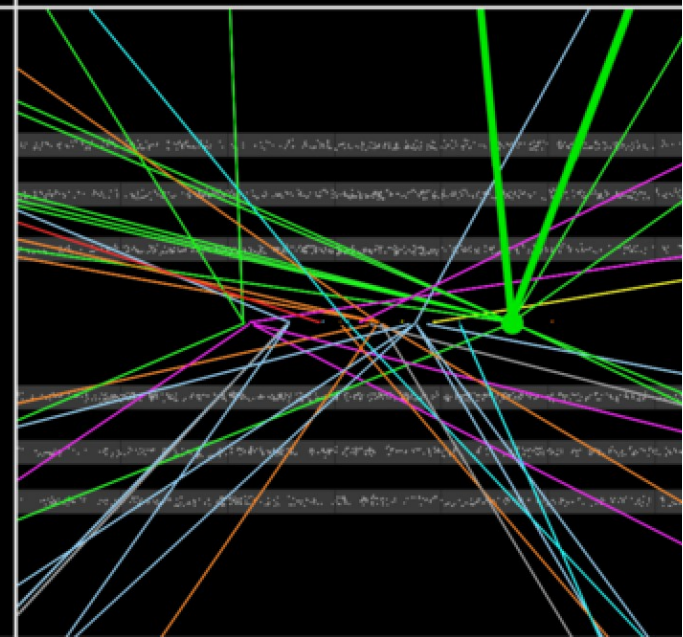
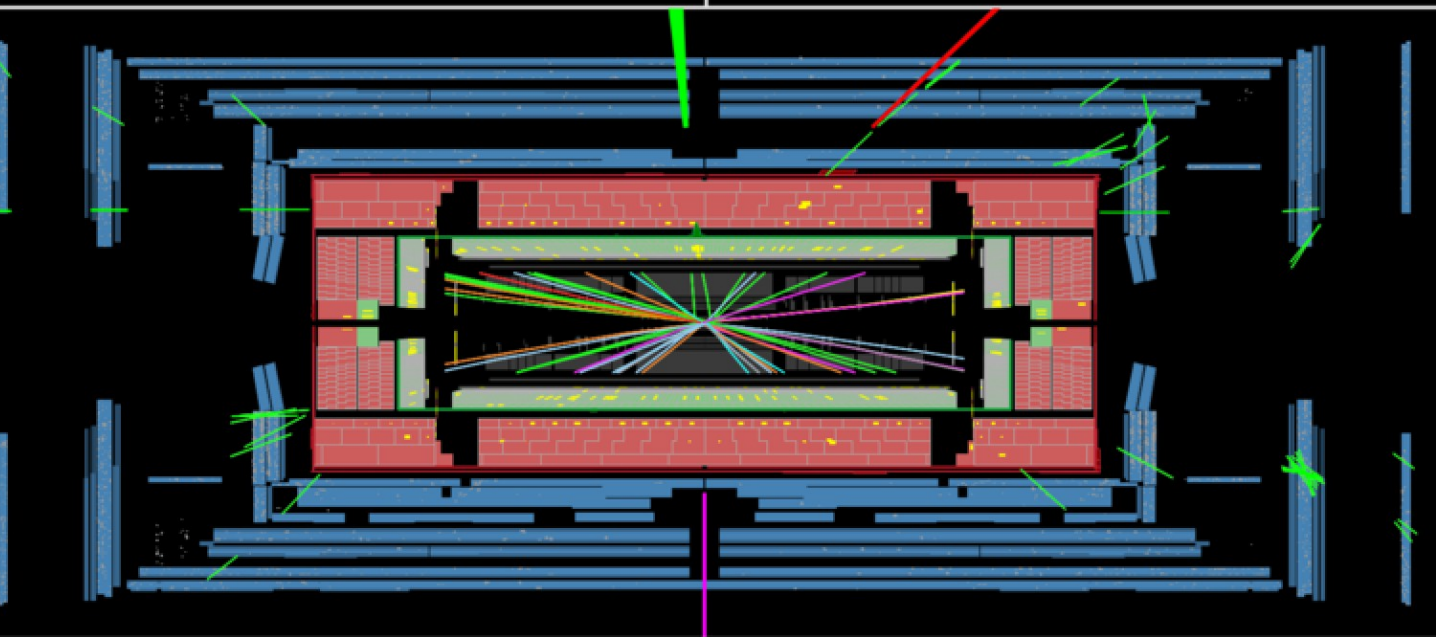
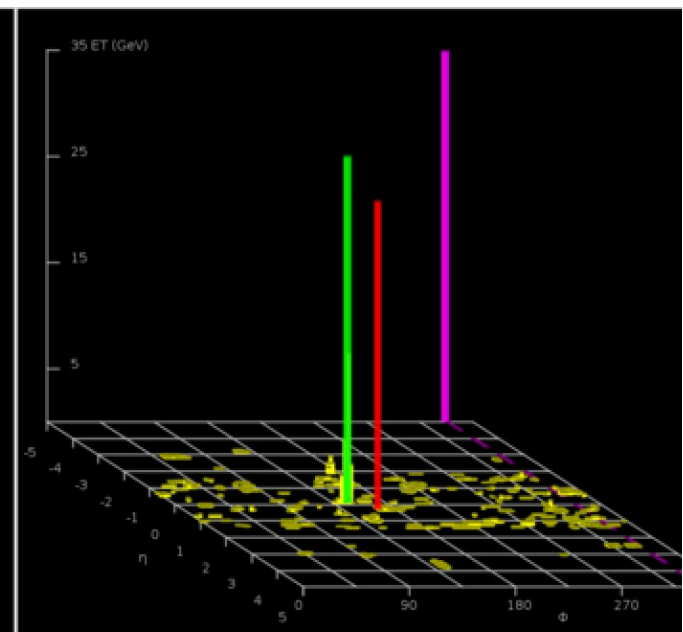
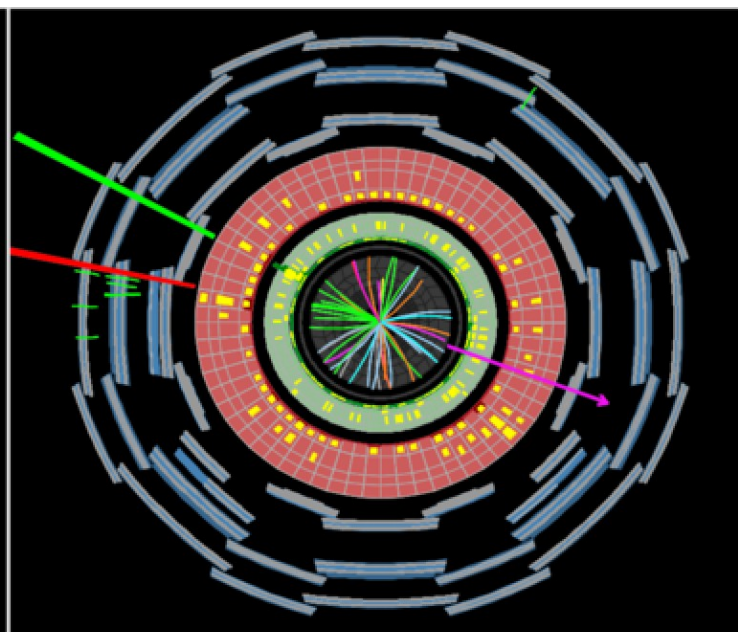
Run: 205113  
Event: 12611816  
Date: 2012-06-18  
Time: 11:07:47 CEST

# 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



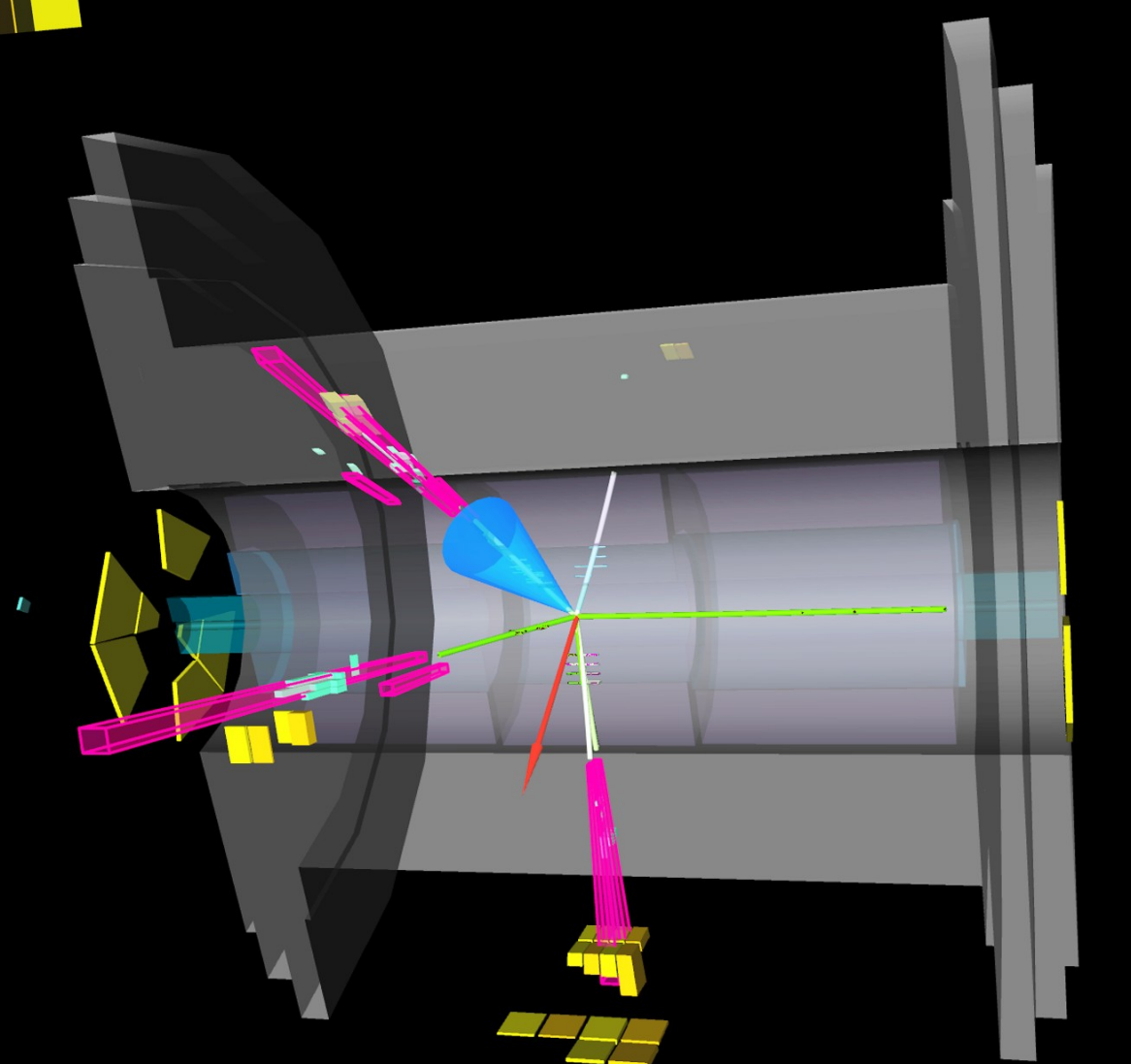
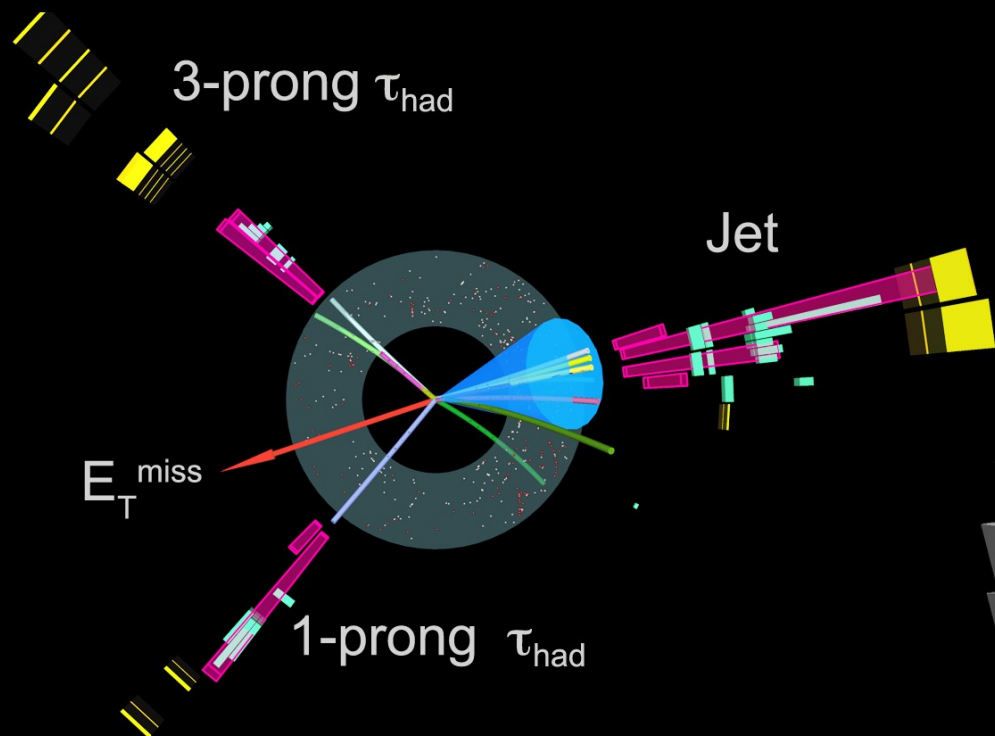


# Candidat $H \rightarrow \tau\tau$



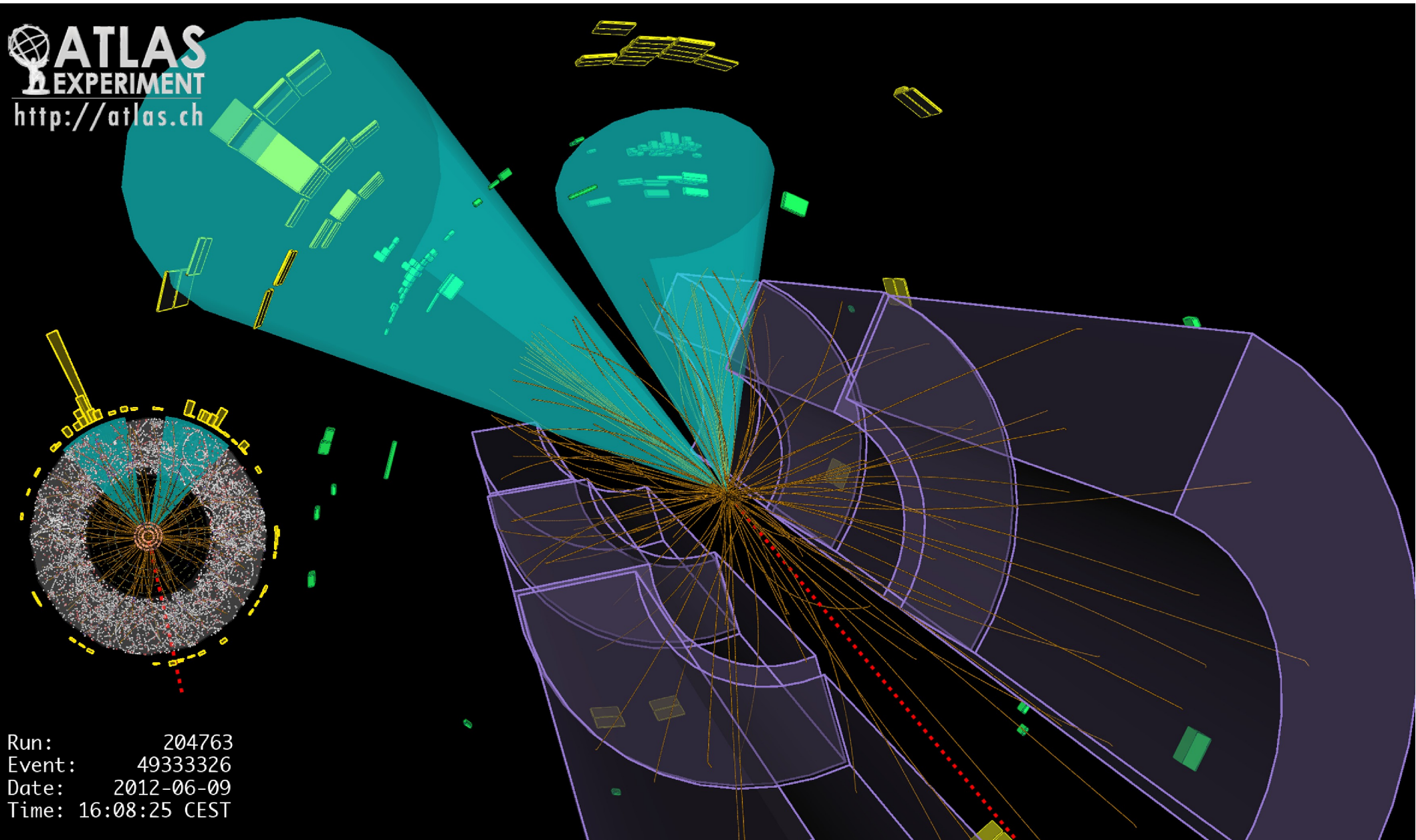
Run 190878, Event 2721965

Time 2011-10-12, 12:09 CEST



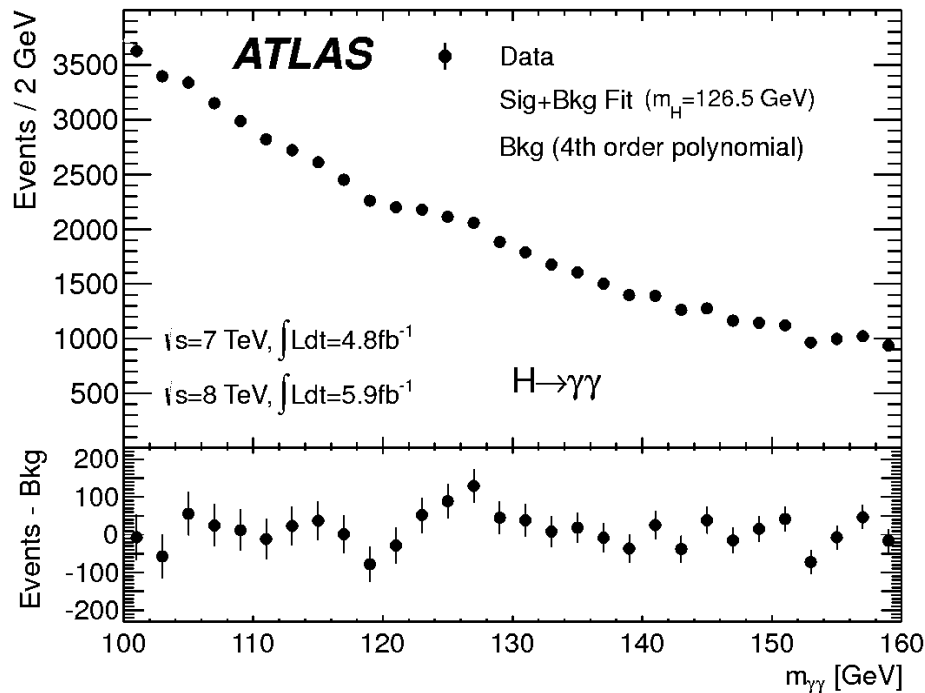
$p_T(\tau_{\text{had}}^{\text{3-prong}}) = 72 \text{ GeV}$   
 $p_T(\tau_{\text{had}}^{\text{1-prong}}) = 45 \text{ GeV}$   
 $E_T^{\text{miss}} = 28 \text{ GeV}$   
 $p_T(\text{jet}) = 107 \text{ GeV}$   
Coll. mass = 121 GeV

# Candidat $pp \rightarrow ZH \rightarrow \bar{\nu}\bar{\nu}b\bar{b}$



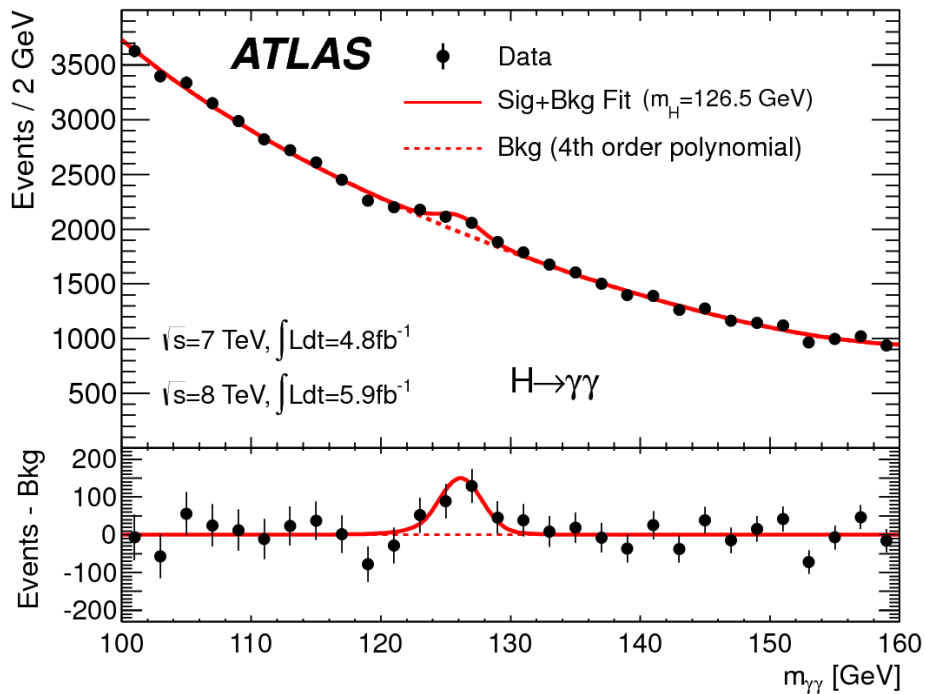
# Mesure

- 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



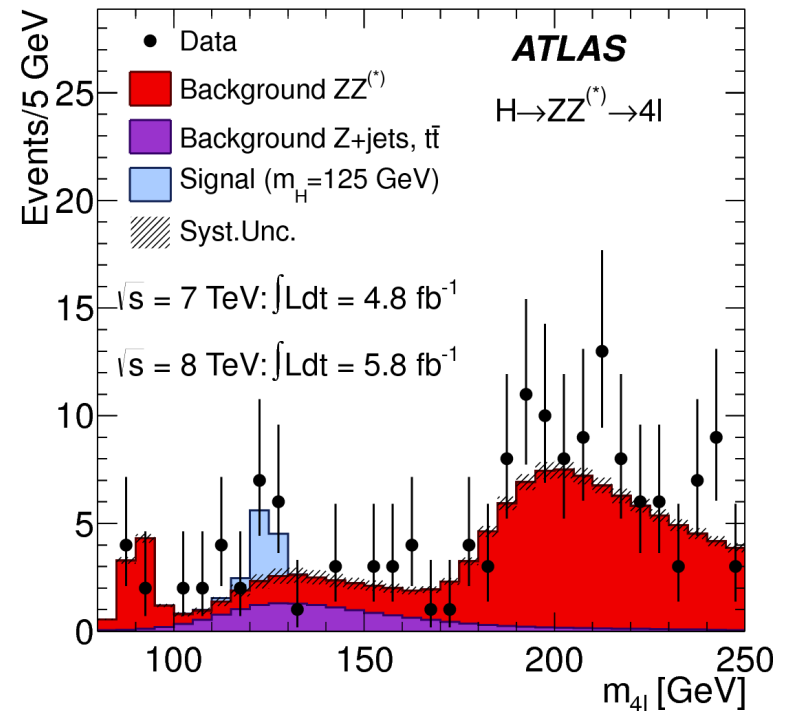
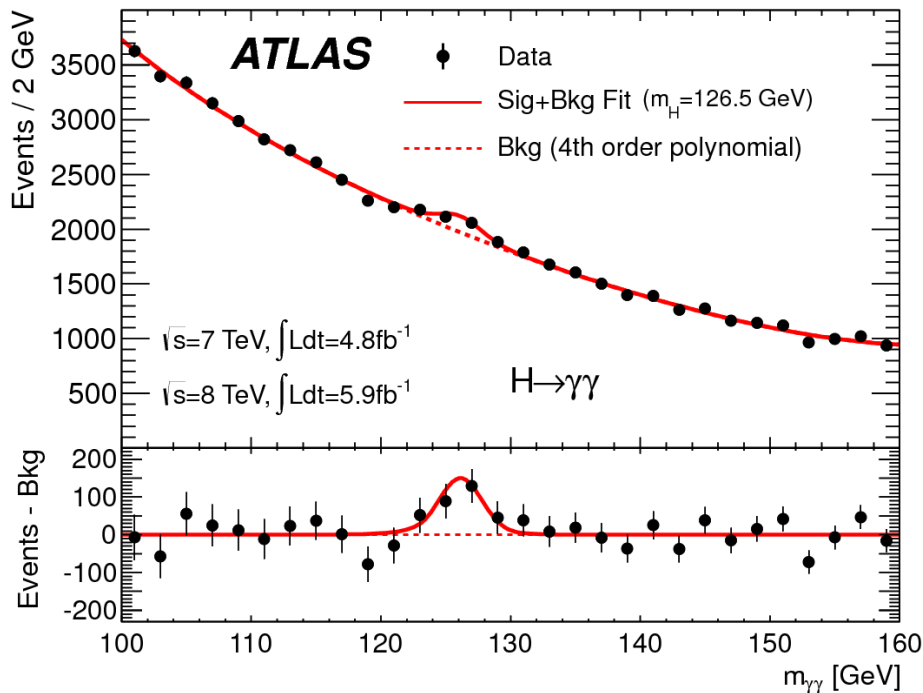
# Mesure

- 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



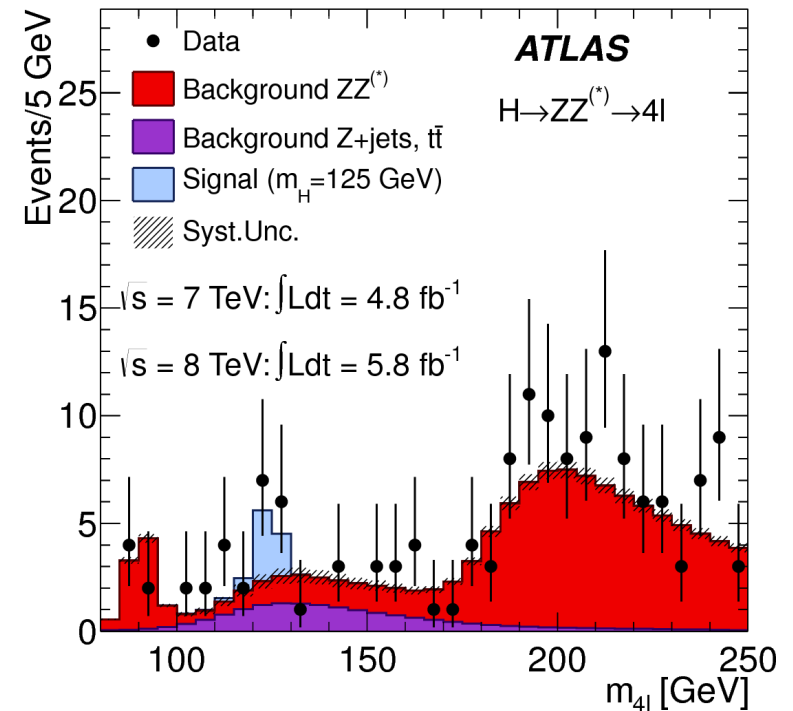
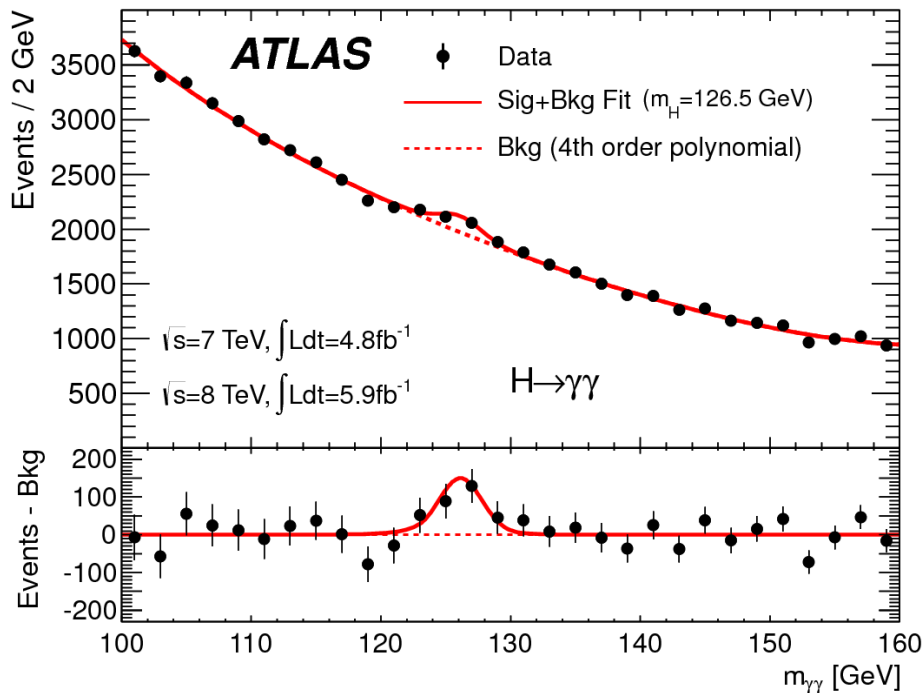
# Mesure

- Higgs en 2 photons

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

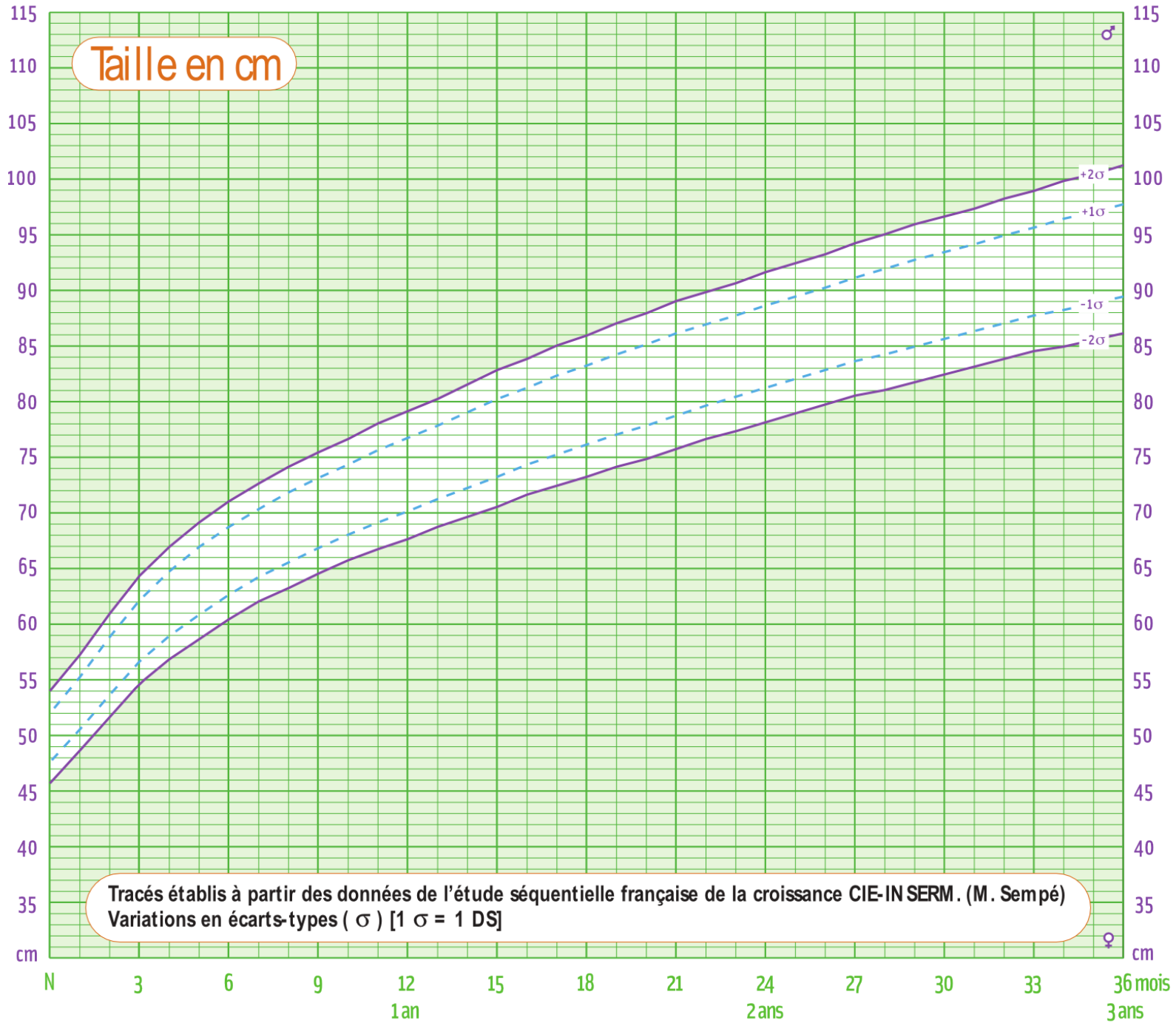
- Higgs en ZZ

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

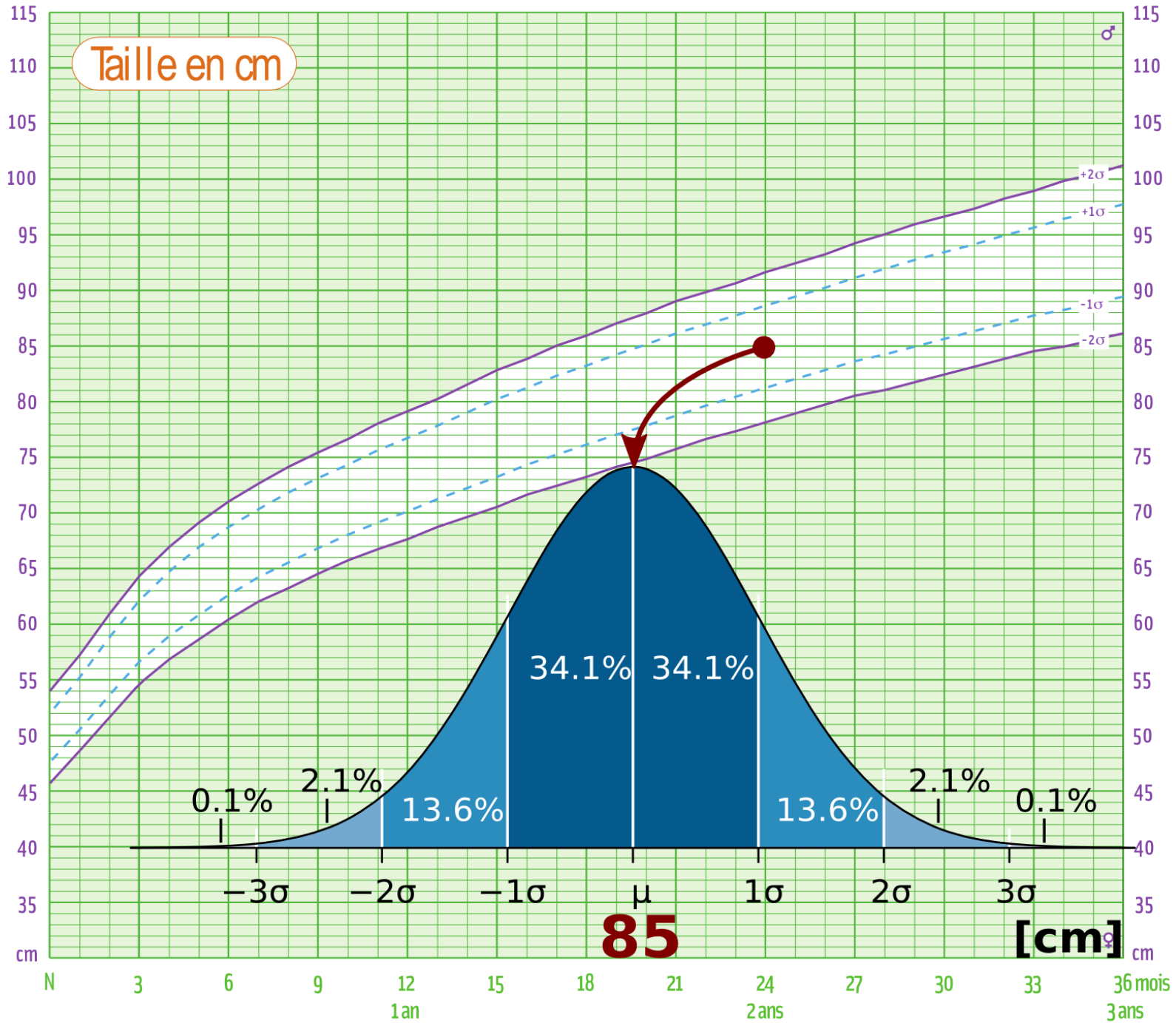


Est-ce que cela est significatif ?  
Outils statistiques pour répondre

# La Gaussienne

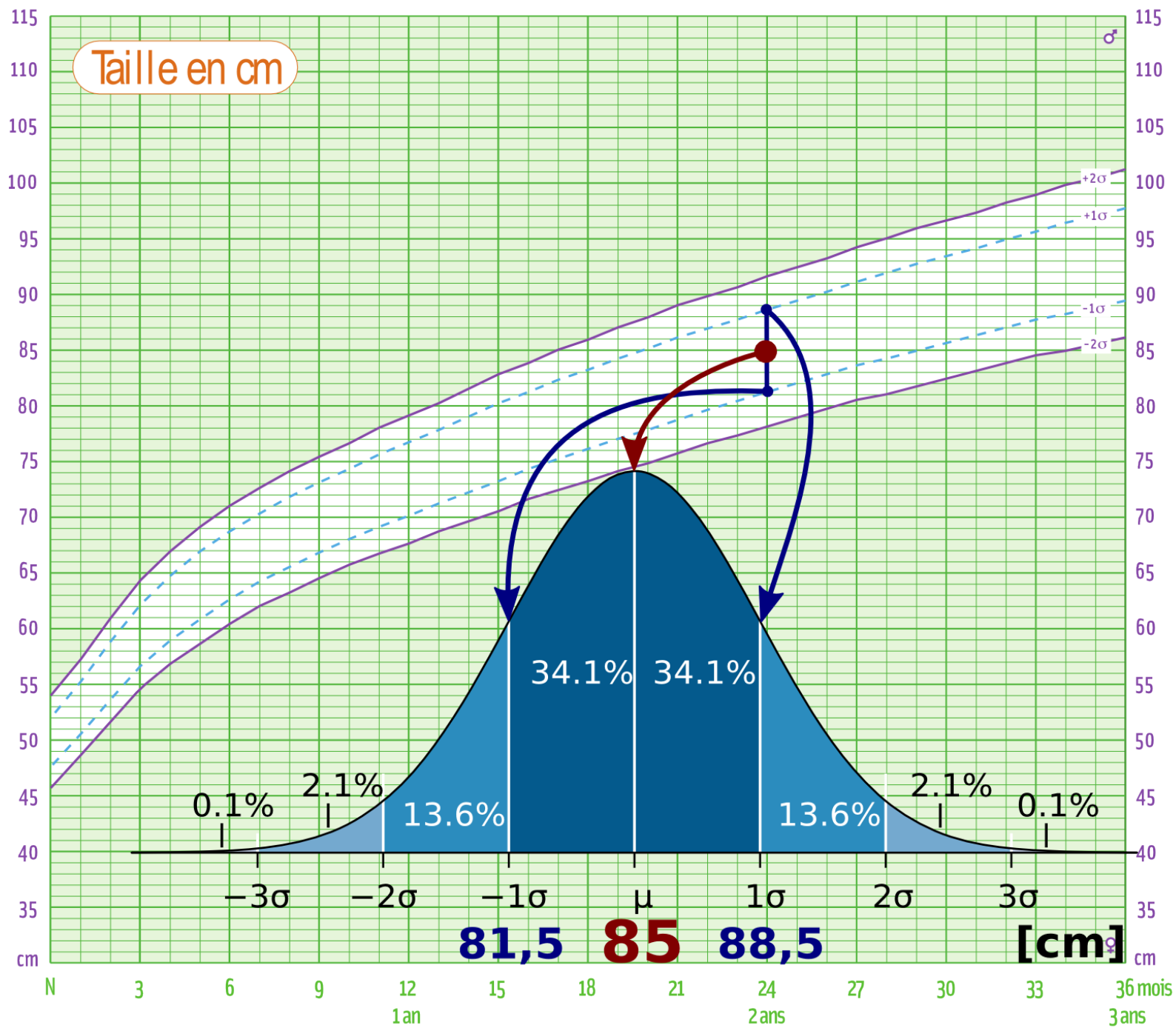


# La Gaussienne

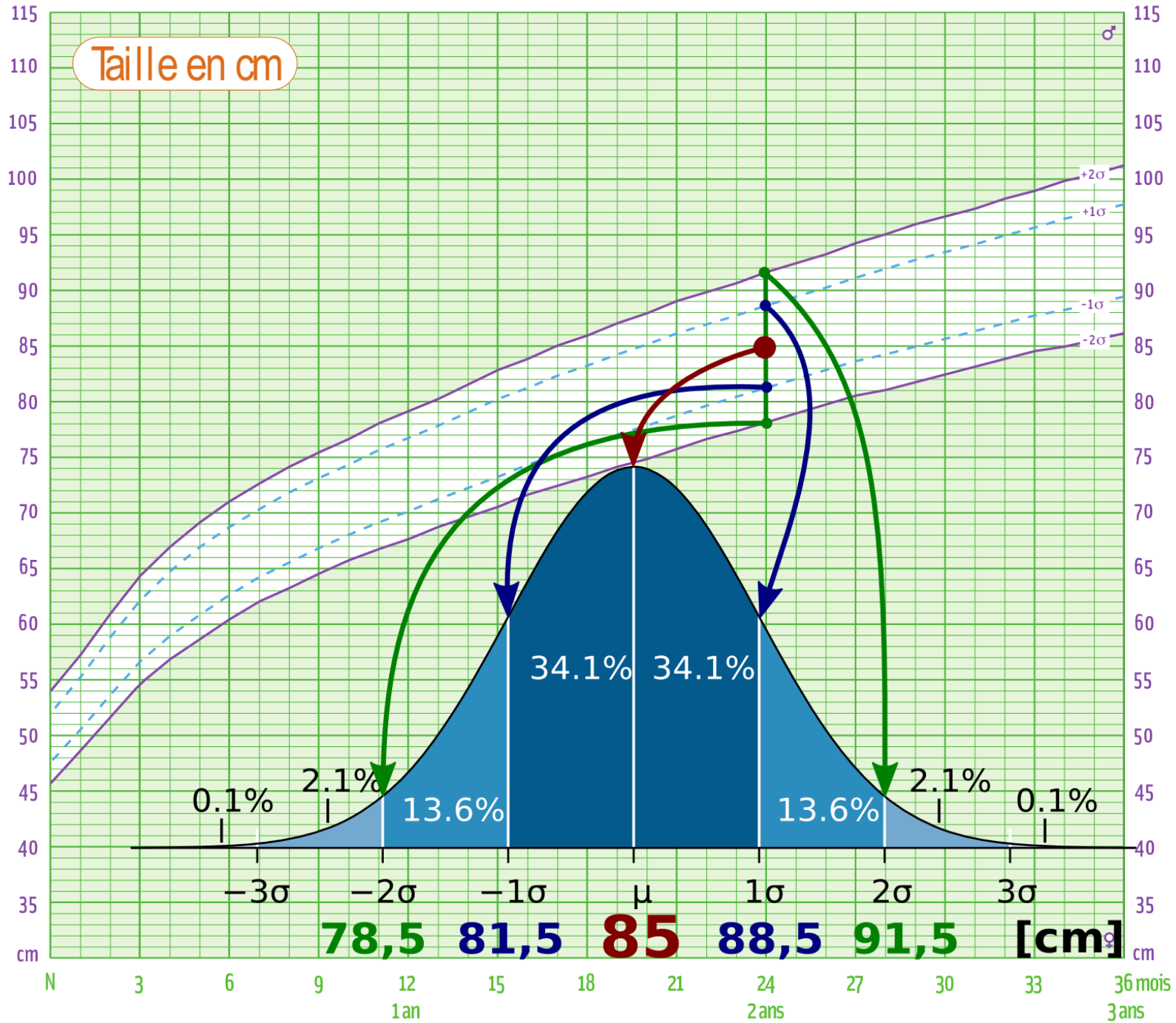




# La Gaussienne



# La Gaussienne



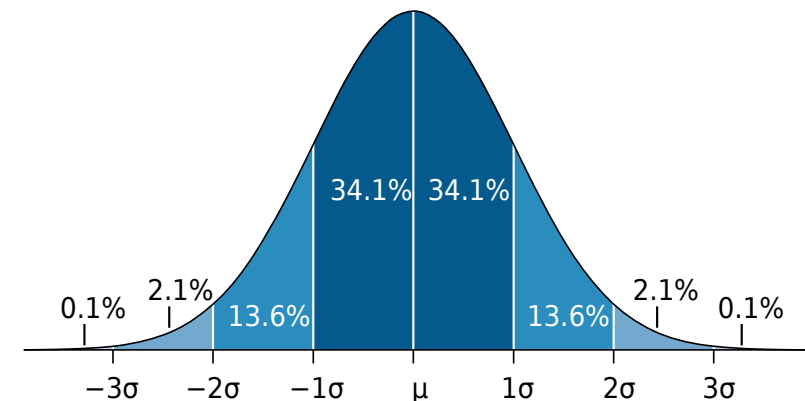
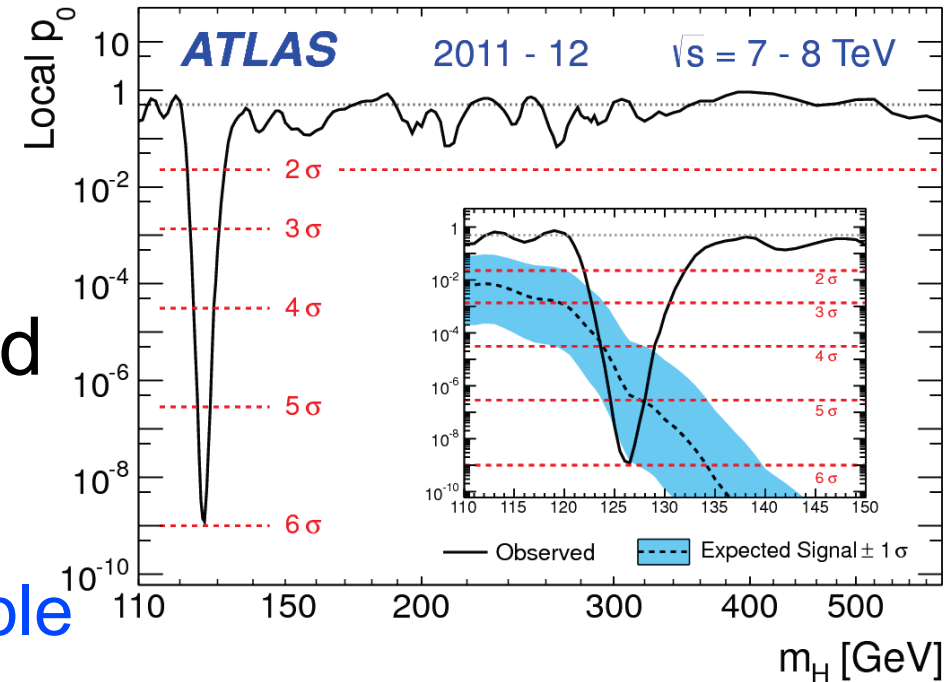
# Résultat sur le Higgs : est-ce significatif statistiquement ?

- 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

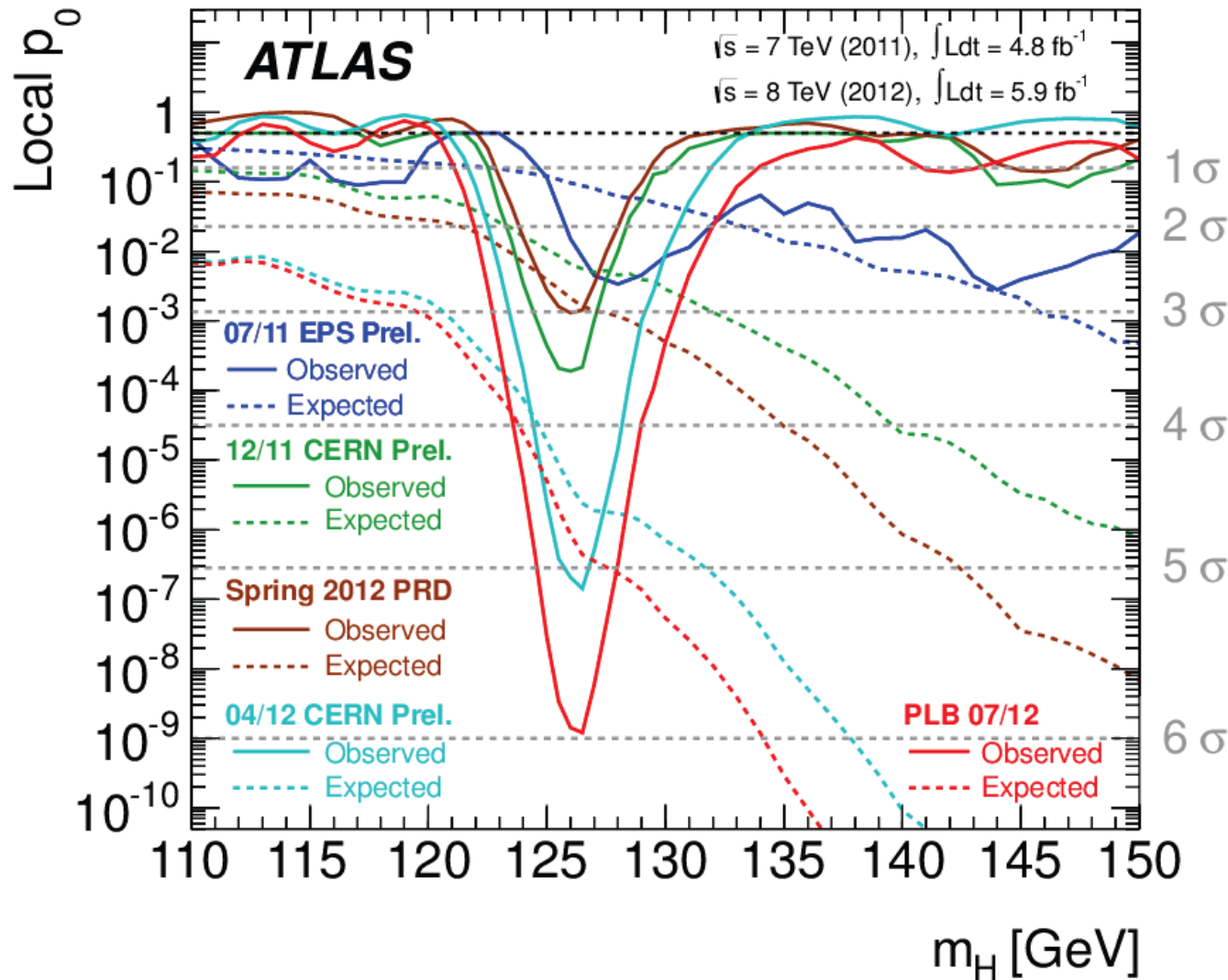
- Quantifié en nombre de «  $\sigma$  »:

- ▶  $1\sigma$  : 1 chance sur 3 (trop probable pour conclure quoi que ce soit)
- ▶  $3\sigma$  (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

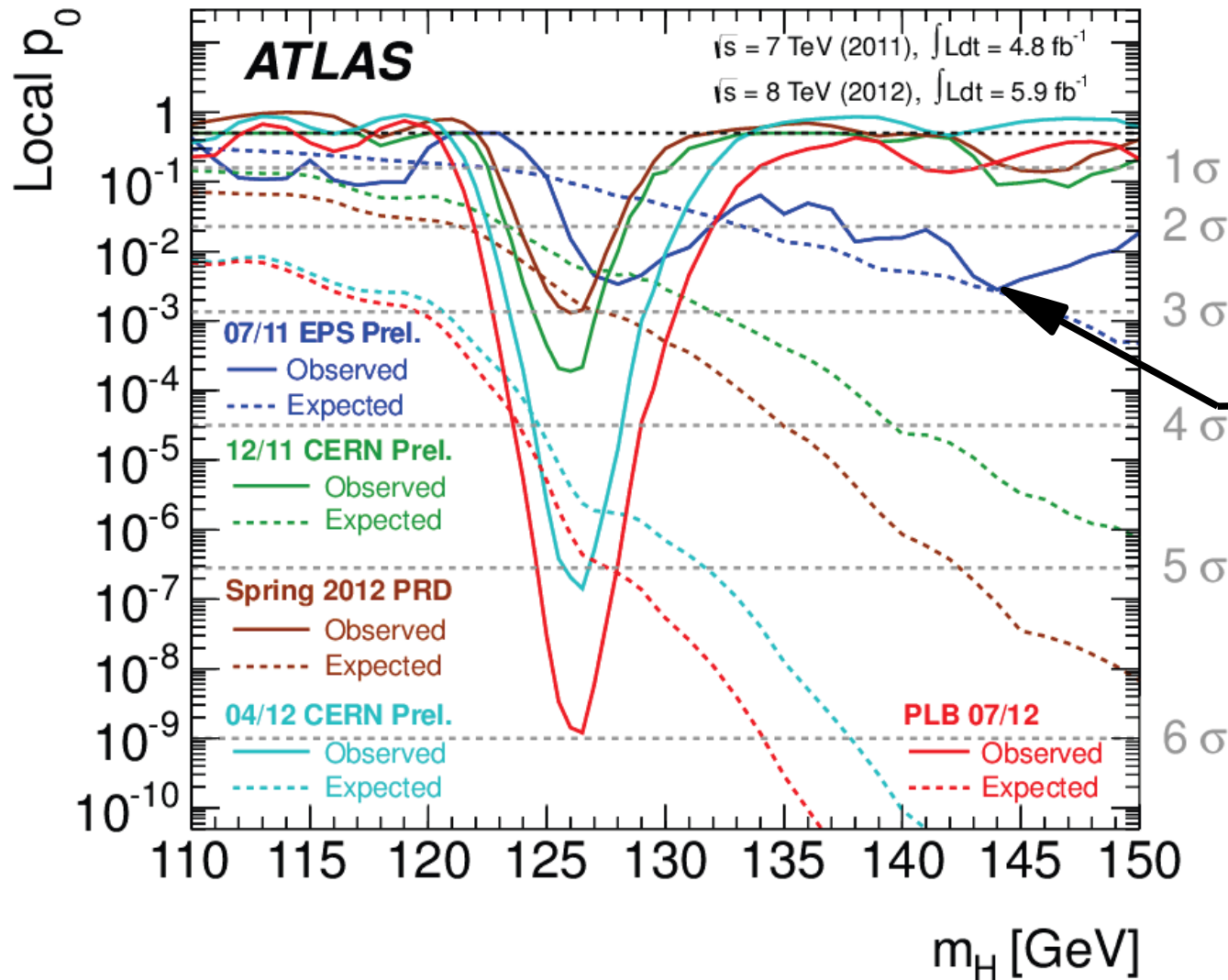


# Évolution dans le temps (jusqu'à la découverte)



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

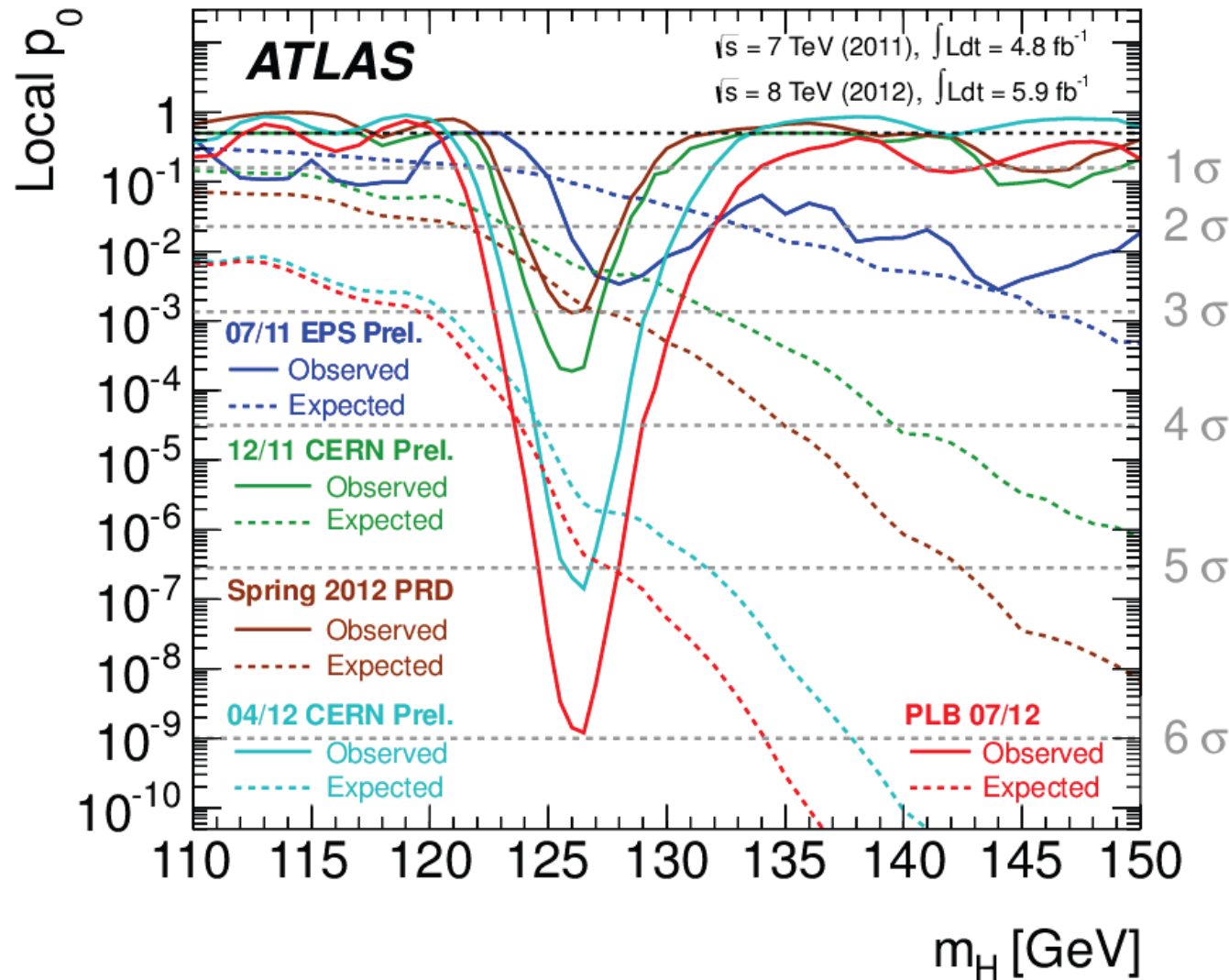
# Évolution dans le temps (jusqu'à la découverte)



Généra beaucoup d'excitation chez les théoriciens !

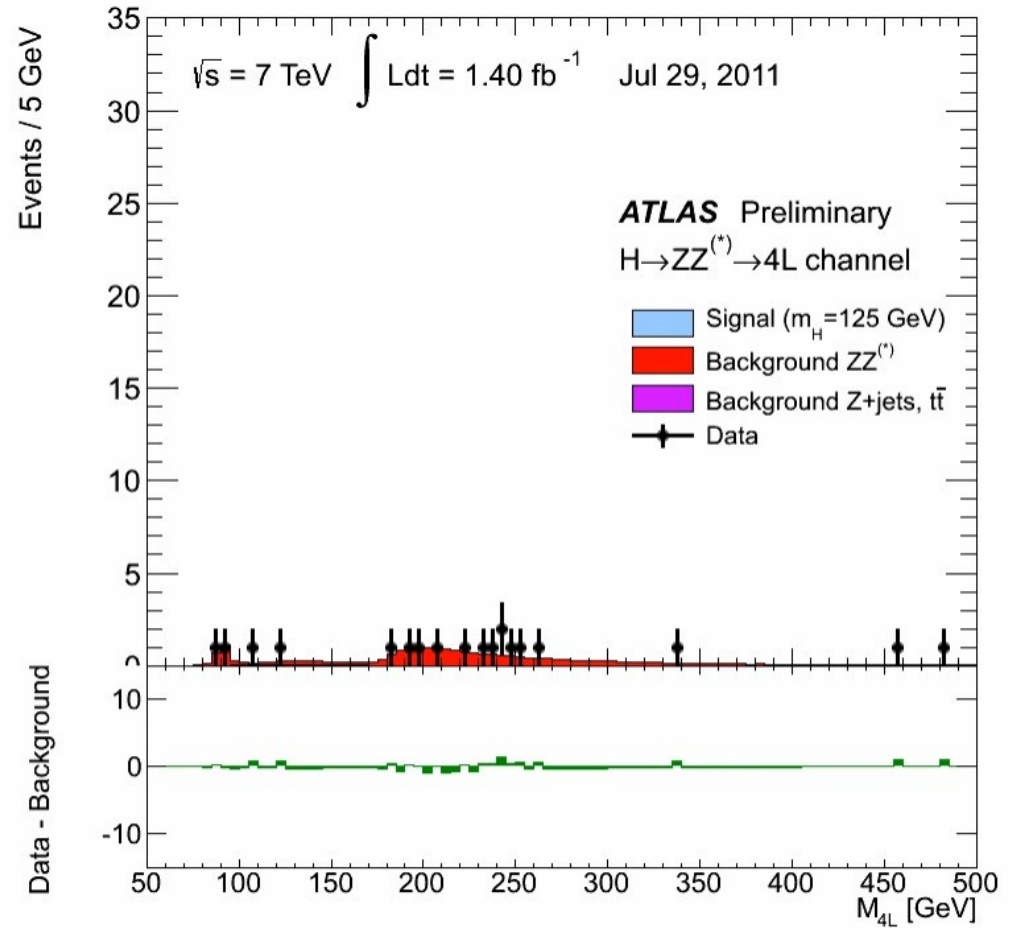
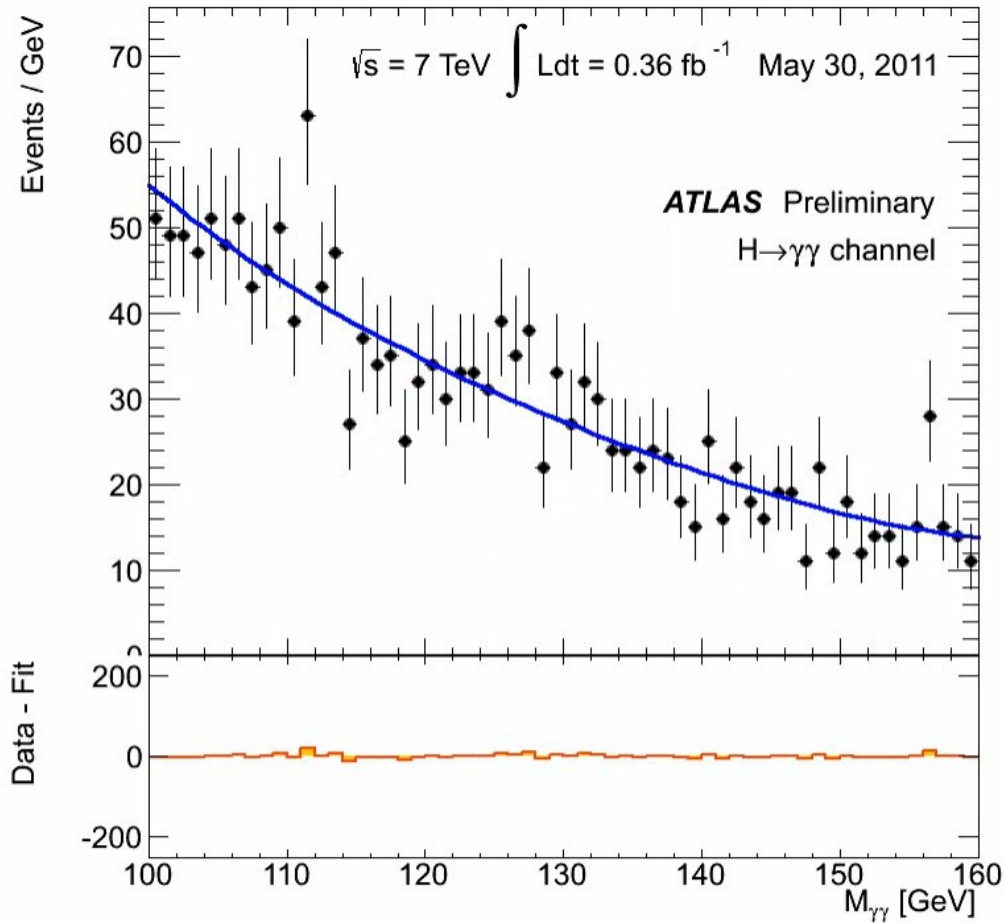
- D'abord des fluctuations statistiques un peu partout
- Puis les mesures se stabilisent

# Évolution dans le temps (jusqu'à la découverte)



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

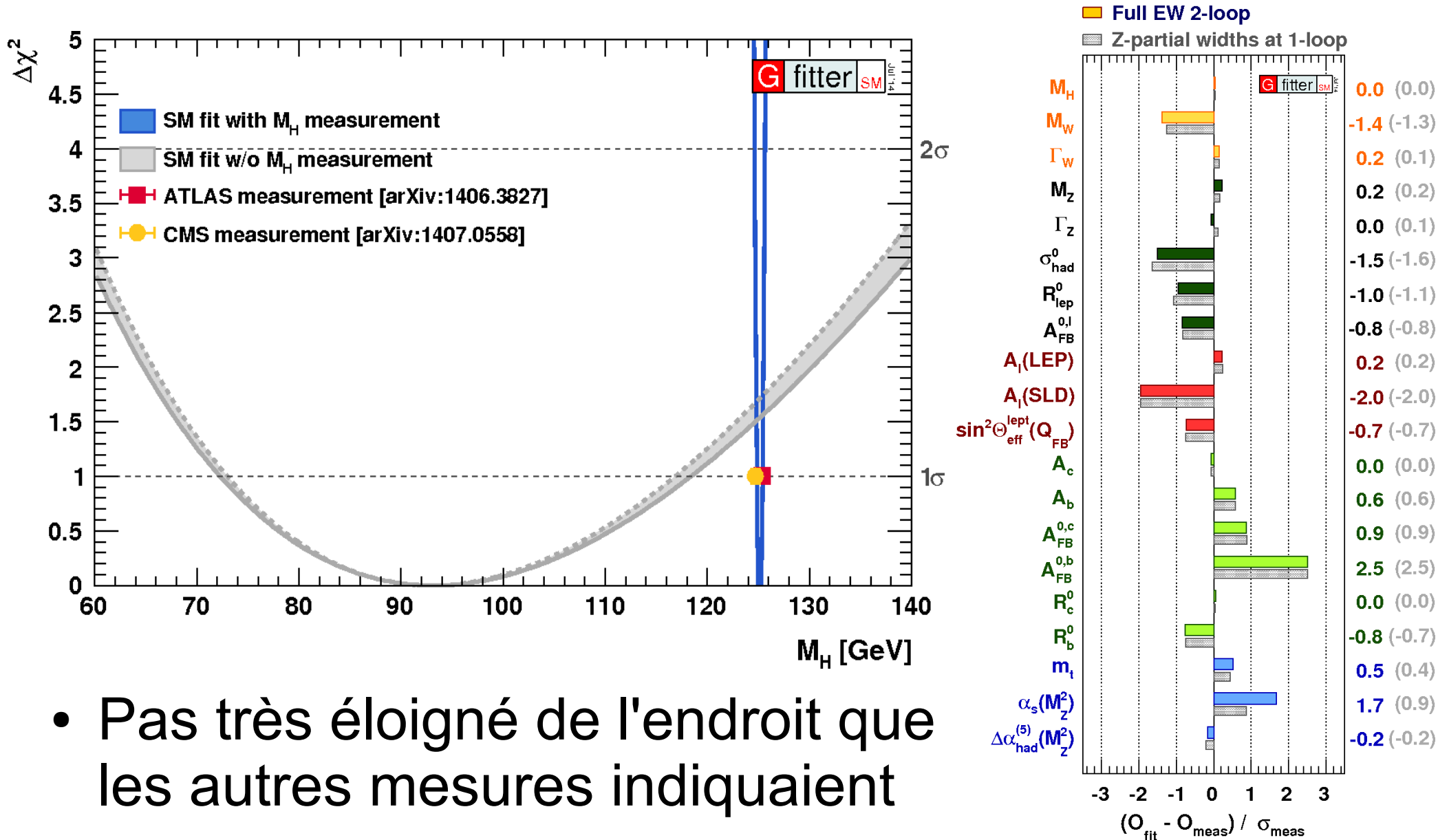
# Évolution dans le temps (jusqu'à fin 2012)



$H \rightarrow \gamma\gamma$

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

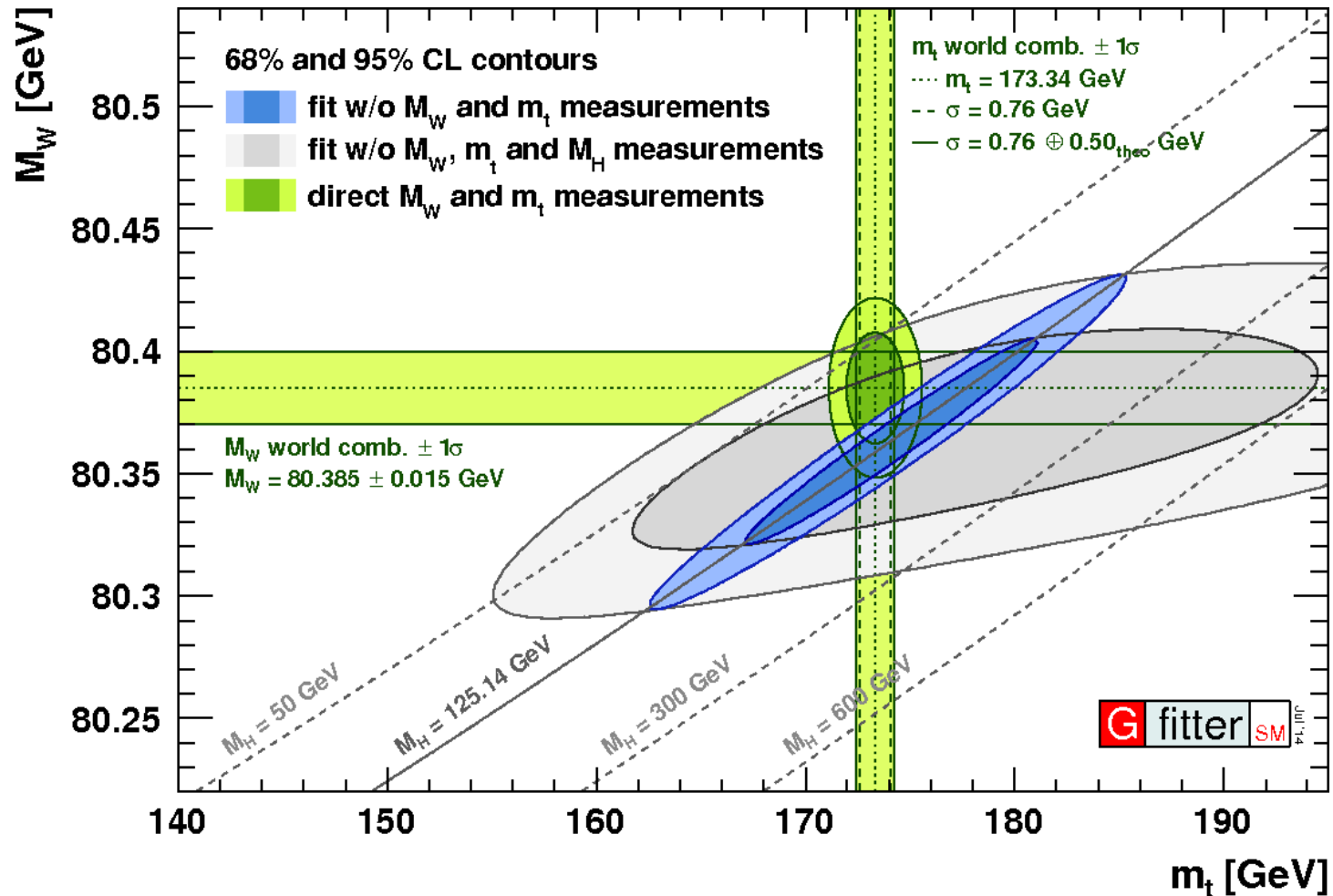
# Consistent avec les autres mesures du modèle standard ?



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

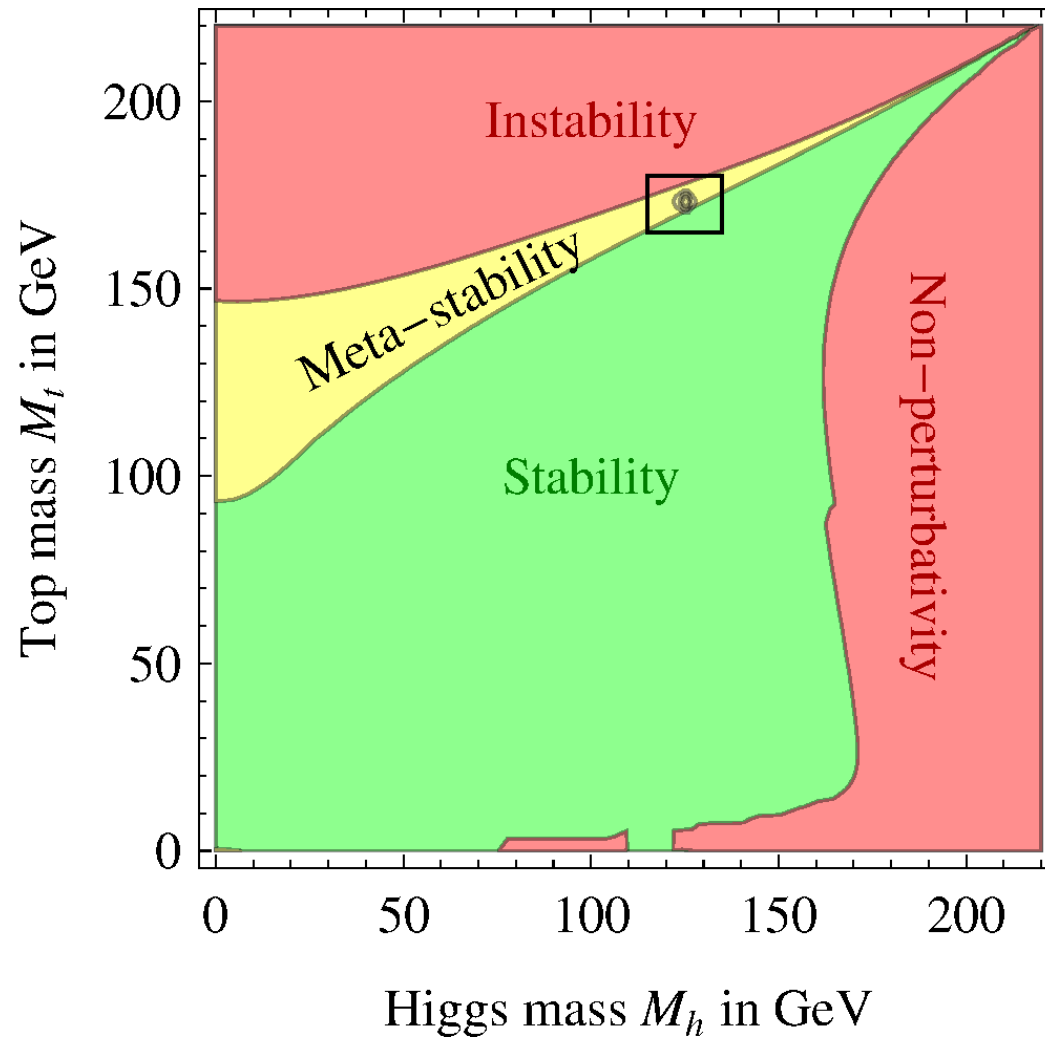


# Consistent avec les autres mesures du modèle standard ?

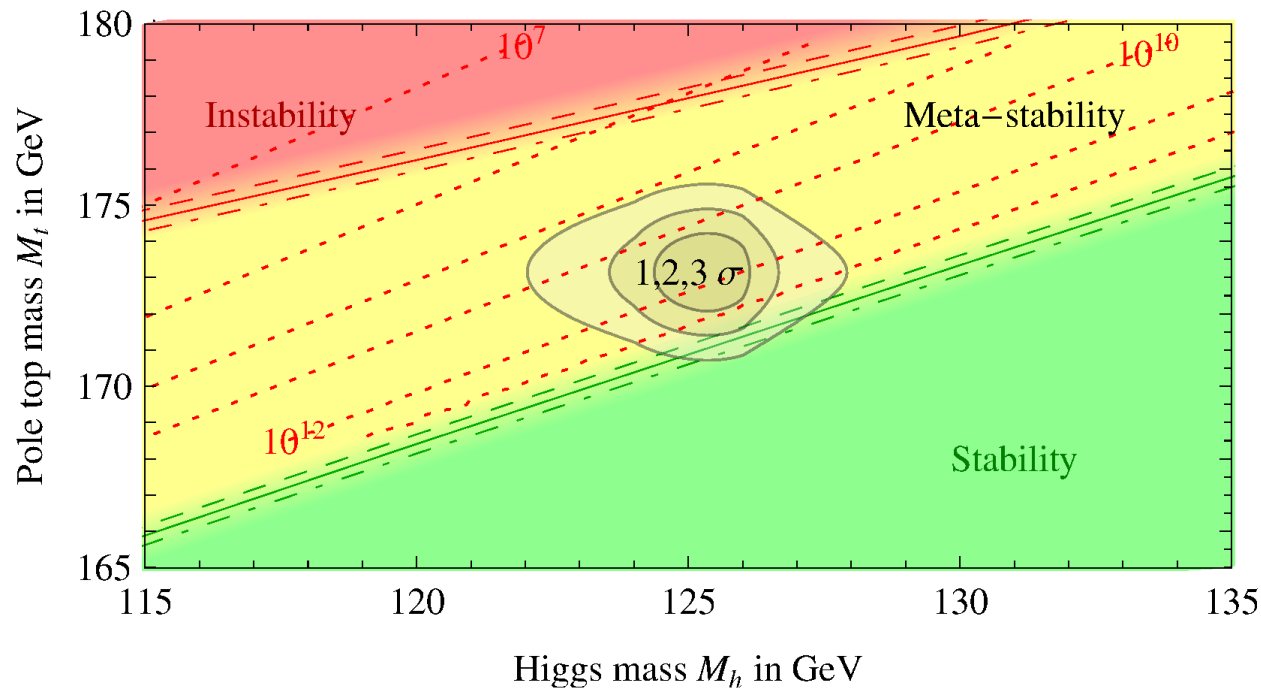


- Pas très éloigné de l'endroit que les autres mesures indiquaient
- Pas de « tension » avec le modèle standard

# Un univers instable ?



# Un univers instable ?

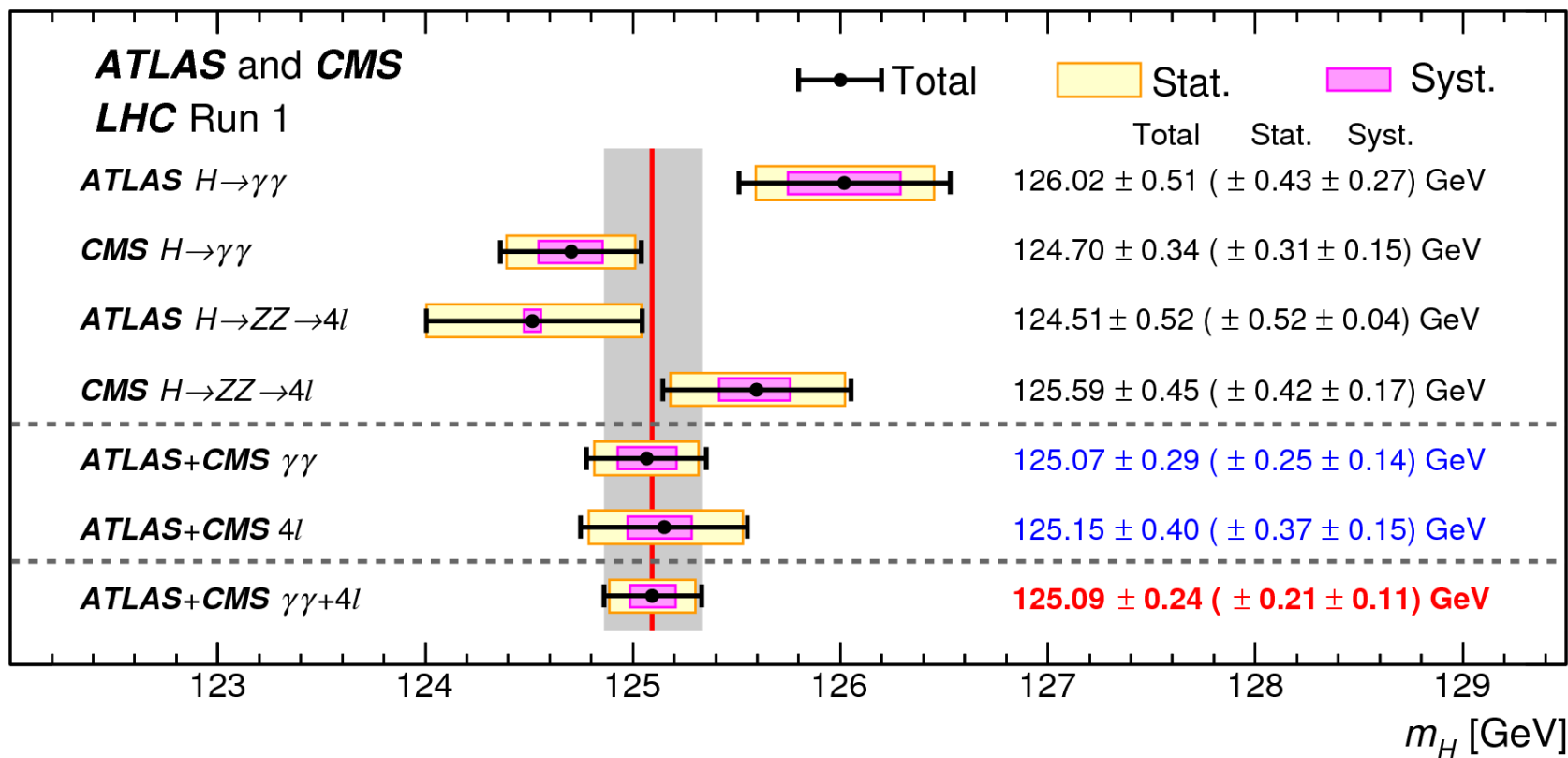


- Plutôt méta-stable, stable à l'échelle de l'âge de l'Univers.  
Ouf !
- Besoin d'améliorer la précision de  $m_t$  pour en savoir plus

# Est-ce le Higgs du modèle standard ?

- Masse compatible avec les autres mesures du modèle standard :

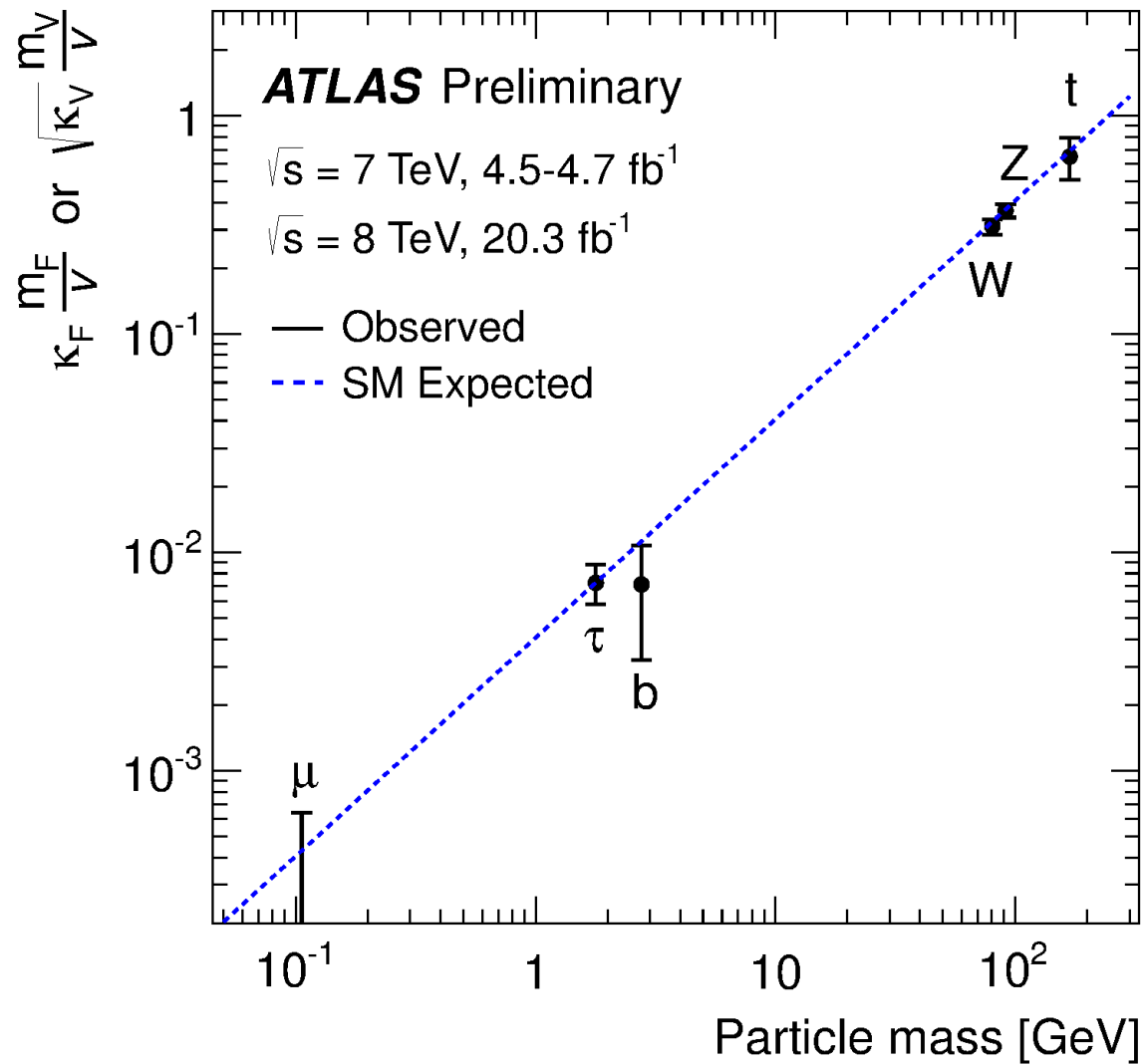
- ▶  $m_H = 125.09 \pm 0.24$  (0.21 stat.  $\pm$  0.11 syst.) GeV  
 [ATLAS+CMS, 17 mars 2015]  
 (134 fois la masse du proton)



# 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, 17 mars 2015]  
(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
- Mesure des propriétés :
  - ▶ Canaux divers, modes de production, couplages, spin...
  - ▶ Confirmation du modèle standard...

# Masse des particules et couplage au boson de Higgs



- Relation comme prévue par le modèle standard

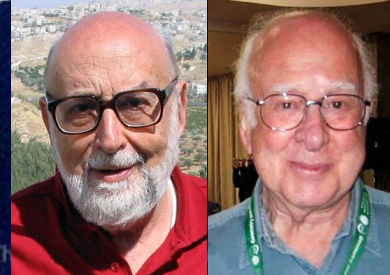
**Pour le moment, cette particule ressemble beaucoup au boson de Higgs du modèle standard.**

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

# Prix Nobel de physique 2013

2013 NOBEL PRIZE IN PHYSICS

François Englert  
Peter W. Higgs



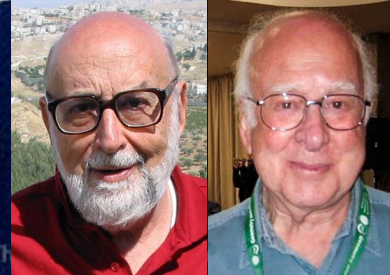
« pour la découverte théorique d'un mécanisme qui nous aide à comprendre l'origine de la masse des particules subatomiques, et qui a été récemment confirmé par la découverte de la particule fondamentale prédite, par les expériences ATLAS et CMS du grand collisionneur de hadrons (LHC) du CERN »



# Prix Nobel de physique 2013

2013 NOBEL PRIZE IN PHYSICS

François Englert  
Peter W. Higgs

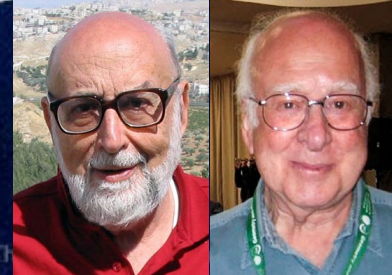


« pour la découverte théorique d'un mécanisme qui nous aide à comprendre l'origine de la masse des particules subatomiques, et qui a été récemment confirmé par la découverte de la particule fondamentale prédite, par les expériences ATLAS et CMS du grand collisionneur de hadrons (LHC) du CERN »

# Prix Nobel de physique 2013

2013 NOBEL PRIZE IN PHYSICS

François Englert  
Peter W. Higgs



« pour la découverte théorique d'un mécanisme qui nous aide à comprendre l'origine de la masse des particules subatomiques, et qui a été récemment confirmé par la découverte de la particule fondamentale prédite, par les expériences ATLAS et CMS du grand collisionneur de hadrons (LHC) du CERN »



**Le CERN et les expériences ATLAS & CMS**

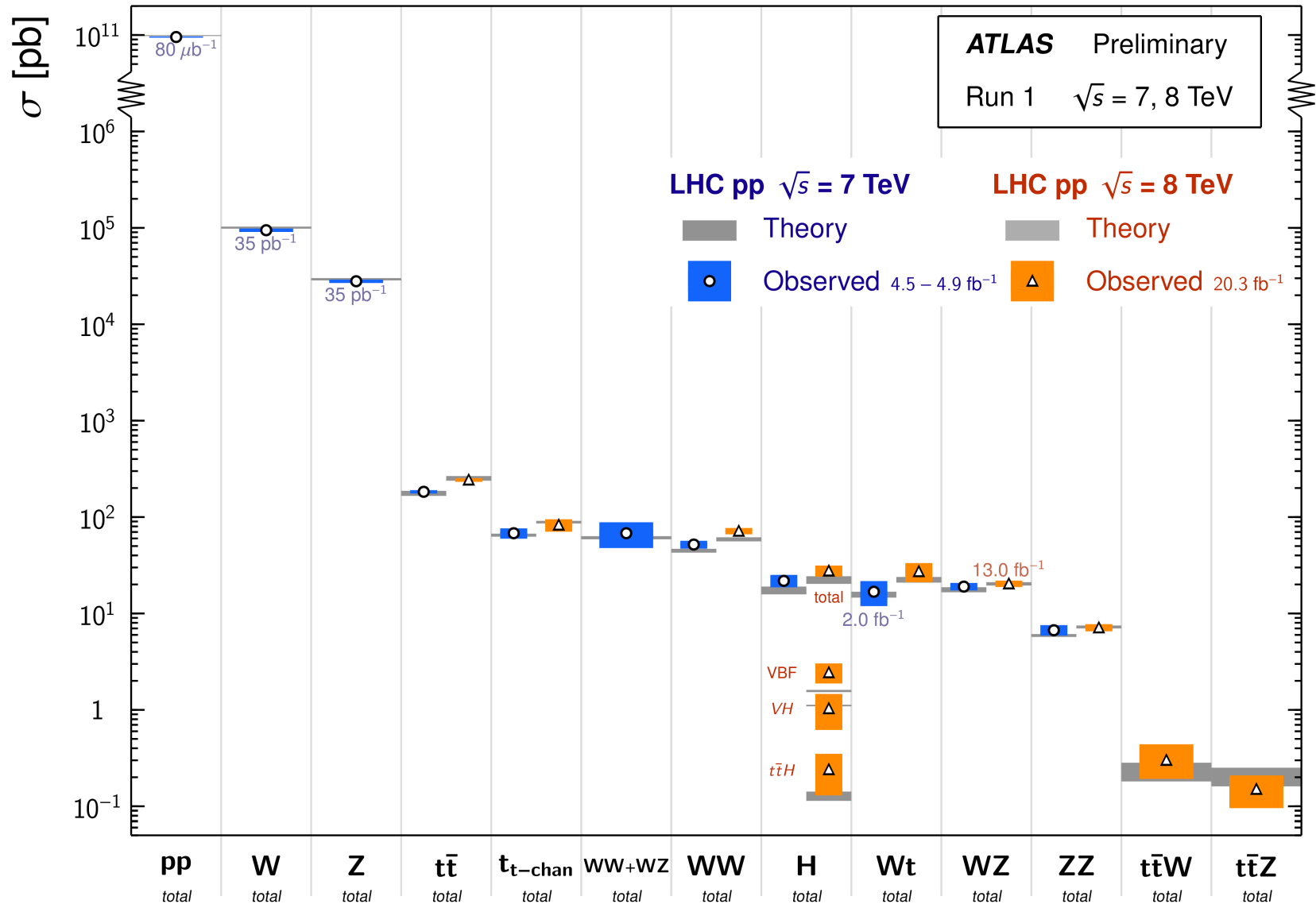
# Et maintenant ?

Quelques prédictions « intéressantes » :

- Lord Kelvin en 1900 (British Association for the advancement of Science) :
  - ▶ « There is nothing new to be discovered in physics now. All that remains is more and more precise measurement. »
    - Oops, il manquait « juste » la physique quantique et les relativités restreinte et générale
- Charles de Gaulle, voeux pour l'année 1968 (31/12/1967, six mois avant mai 68) :
  - ▶ « L'avenir n'appartient pas aux hommes et je ne le prédis pas. Pourtant en considérant la façon dont les choses se présentent, c'est vraiment avec confiance que j'envisage pour les 12 prochains mois, l'existence de notre pays »

# Modèle standard : état des lieux

Standard Model Total Production Cross Section Measurements Status: March 2015

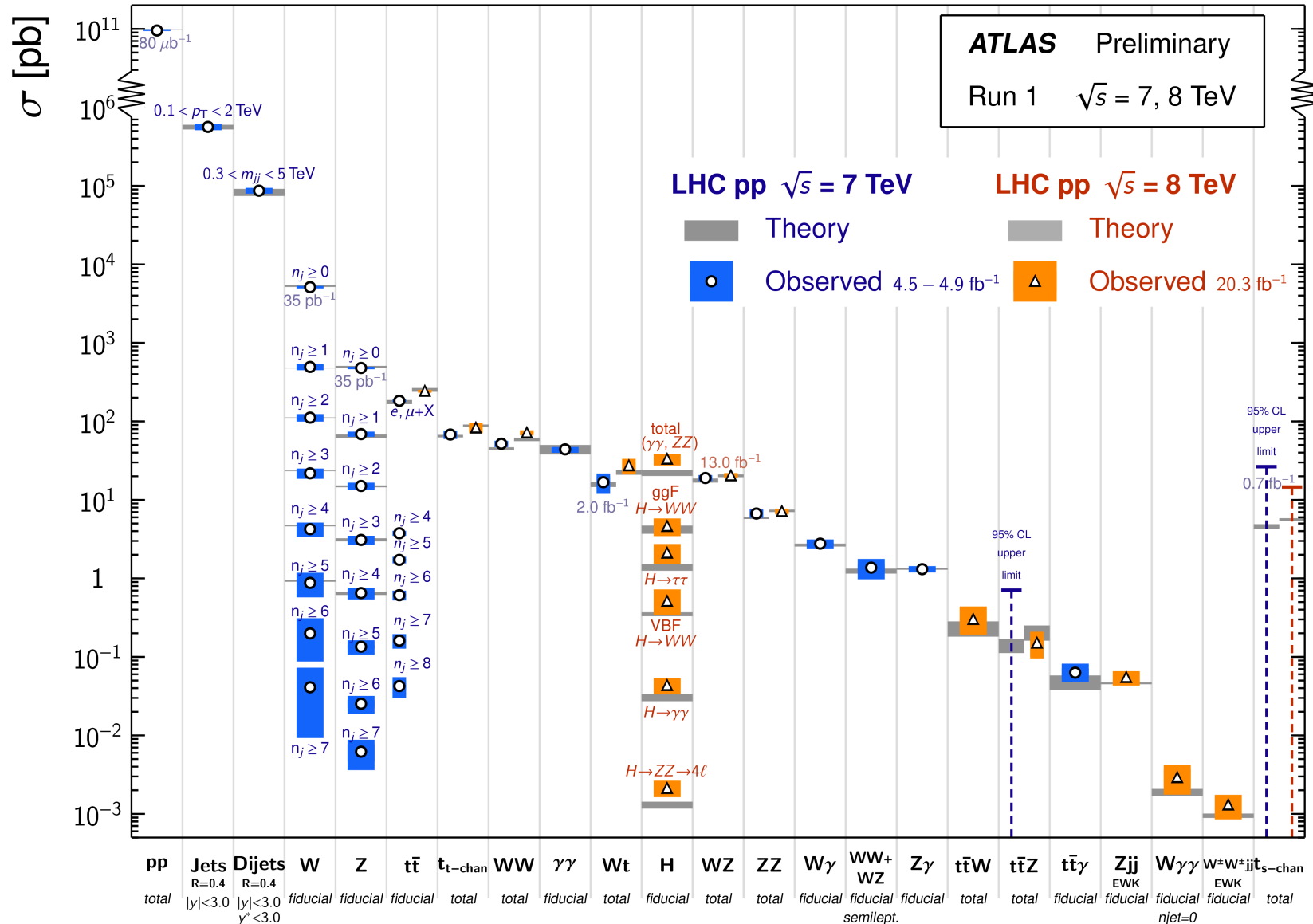


- Très bon accord avec les prédictions théoriques !

# Modèle standard : état des lieux

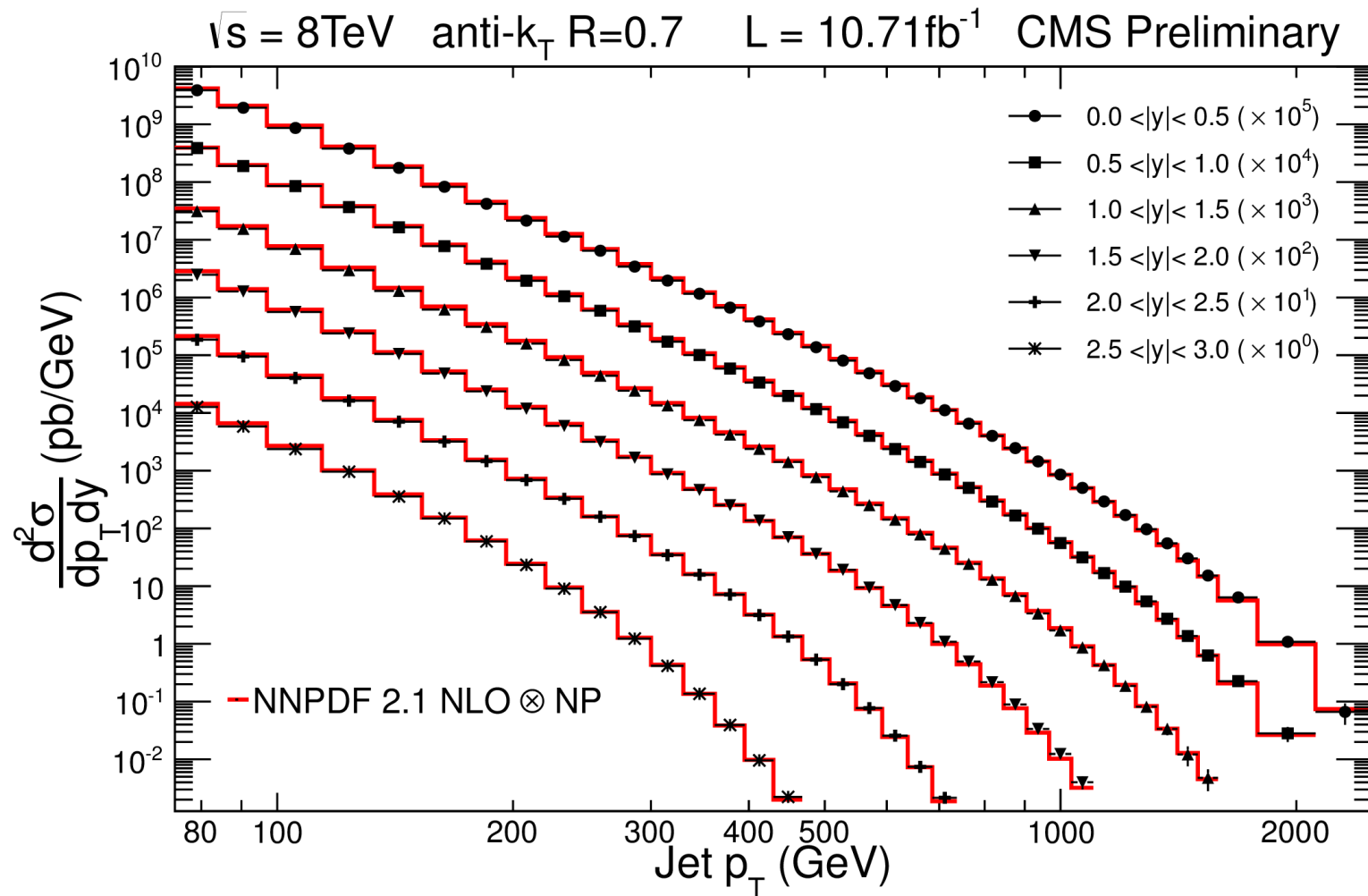
Standard Model Production Cross Section Measurements

Status: March 2015



- Très bon accord avec les prédictions théoriques !

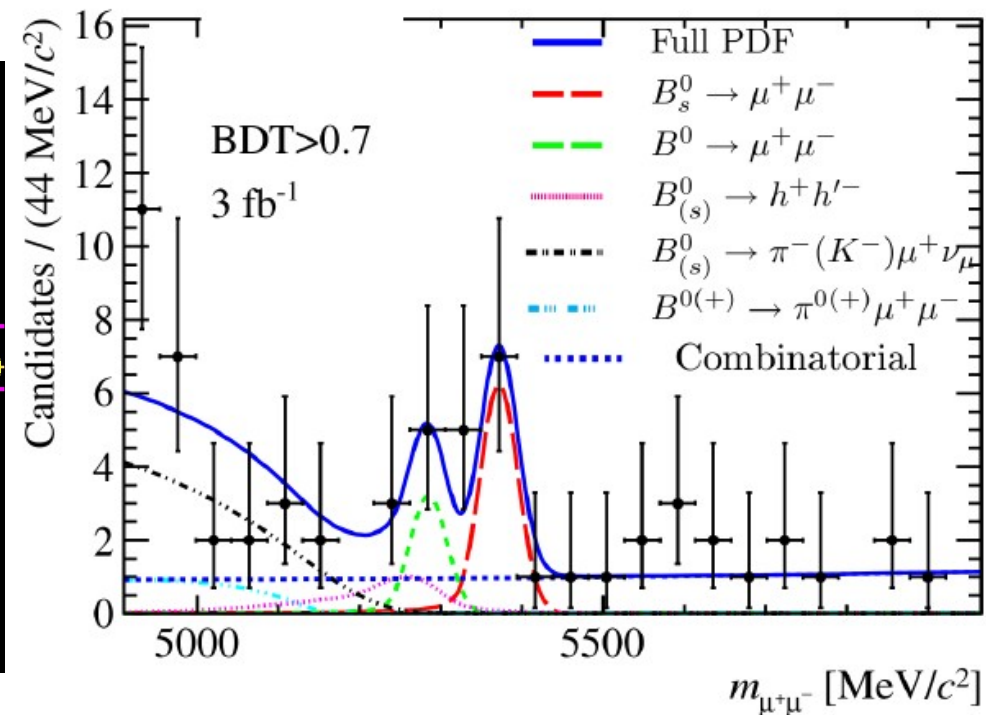
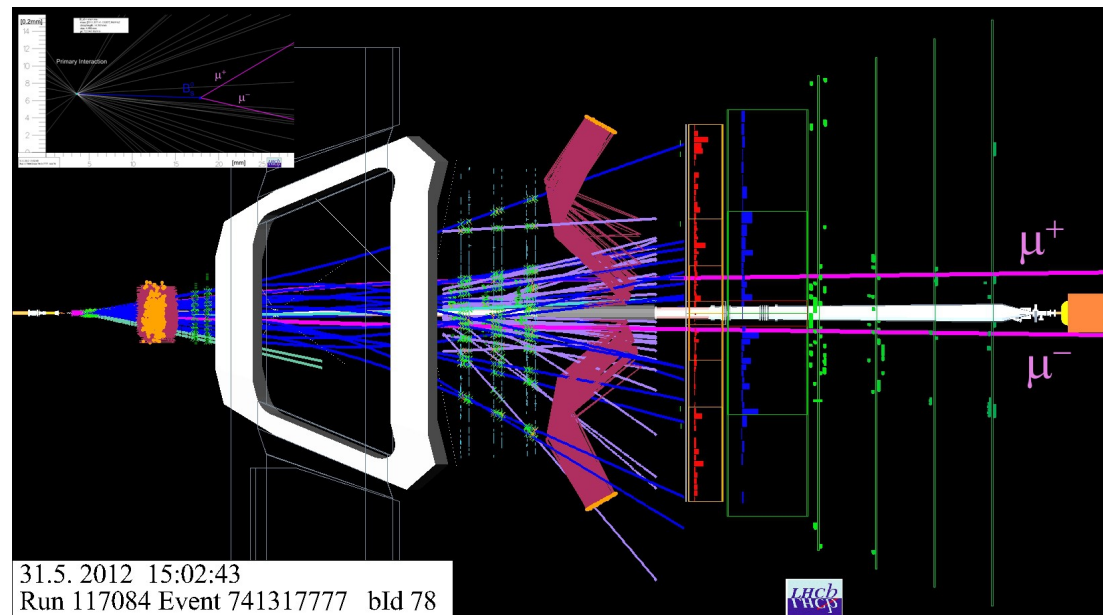
# Accord sur de nombreux ordres de grandeur



- Quantité de mouvement dans le plan transverse de jets de particules

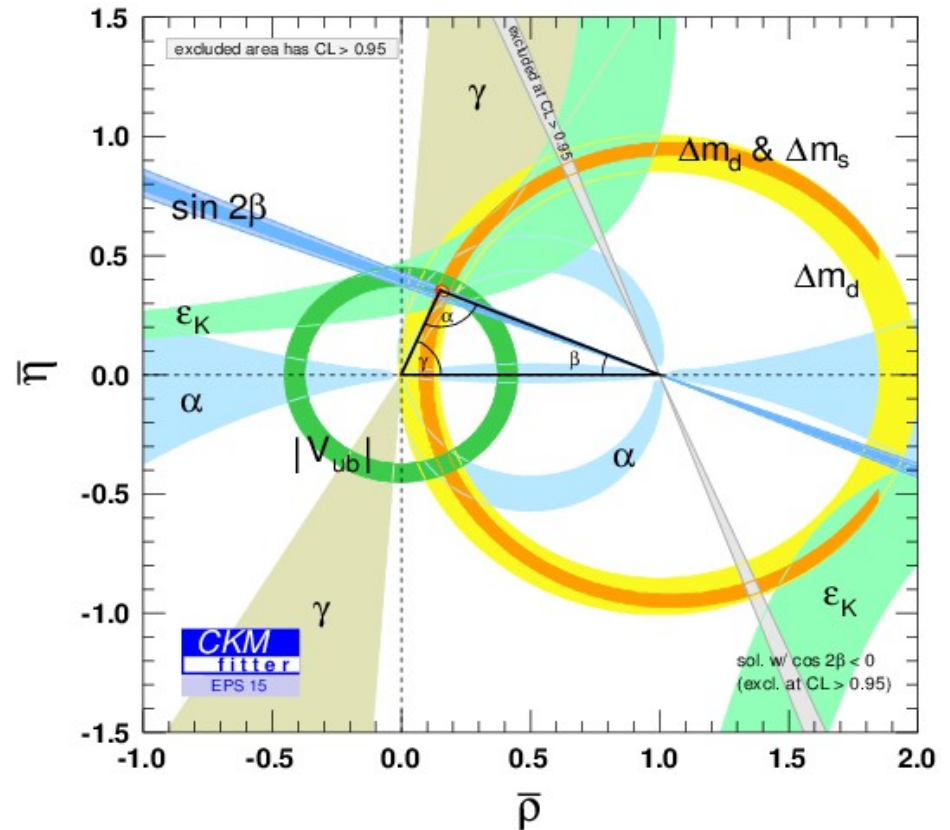
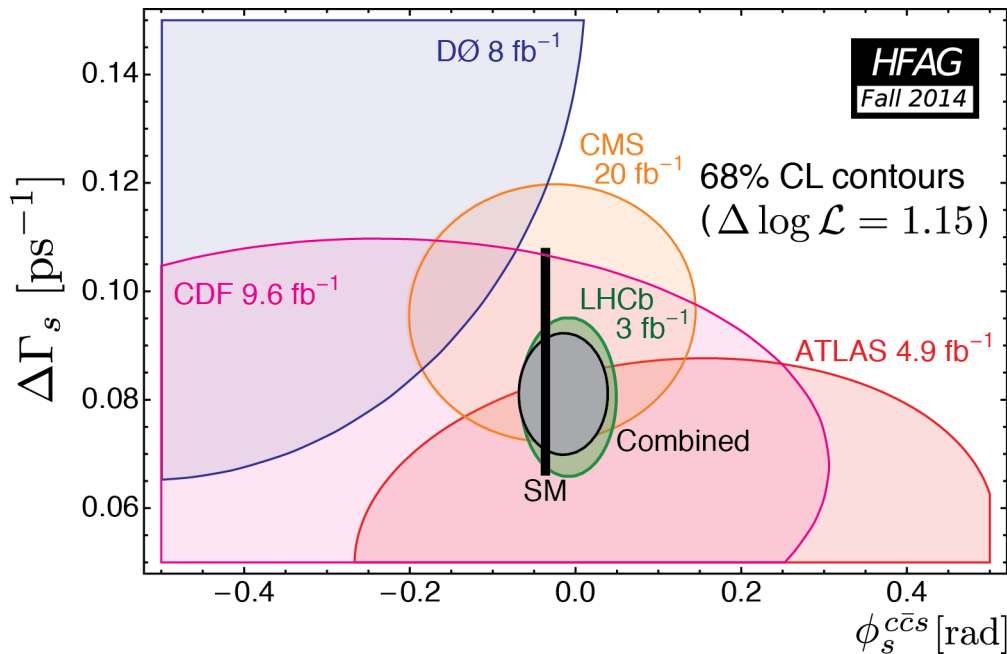
# Nouvelle physique, indirectement

- Déviations dans des mesures de précision
  - peuvent indiquer la présence de nouvelles particules
- Exemple : production de  $B_s \rightarrow \mu\mu$
- Résultat : encore une fois presque exactement la prédiction du modèle standard,  $(3.2^{+1.5}_{-1.2}) \times 10^{-9} \dots$



# Asymétrie matière-antimatière

- Pas assez d'antimatière dans l'Univers
- Mesures de précision pour quantifier les infimes différences entre matière et antimatière
- Toutes les mesures sont compatibles avec les prédictions du modèle standard





# Asymétrie matière-antimatière

- Pas assez d'antimatière dans l'Univers
- Mesures de précision pour quantifier les infimes différences entre matière et antimatière
- Toutes les mesures sont compatibles avec les prédictions du modèle standard



**HOT OFF THE PRESS**

**Hier (*Nature*) :**  
l'expérience BASE du CERN  
a comparé des protons et des  
antiprotons avec une précision  
inédite. Résultat : même rapport  
masse-sur-charge pour  $H^-$  et  $\bar{p}$ .

$\phi_s^{c\bar{c}s}$  [rad]

$\bar{p}$

# C'est tout ?

Nous et l'Univers visible

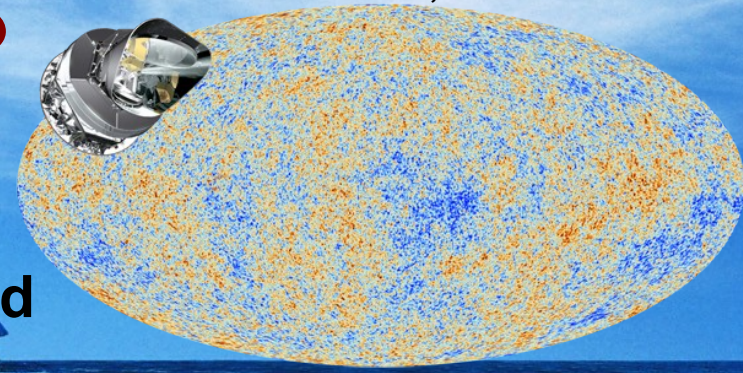


**Modèle standard**



Planck, mars 2013

# C'est tout ?



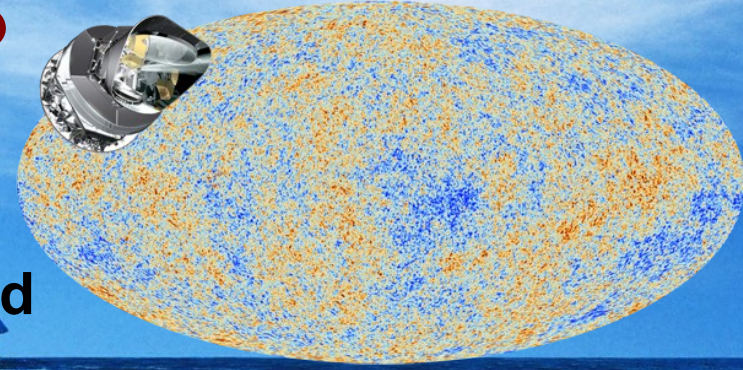
Nous et l'Univers visible



5% Modèle standard



# C'est tout ?



Nous et l'Univers visible

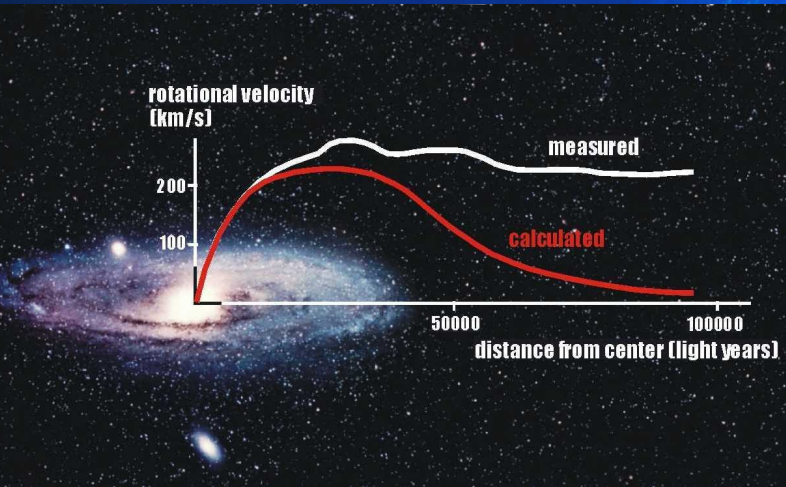


5% Modèle standard

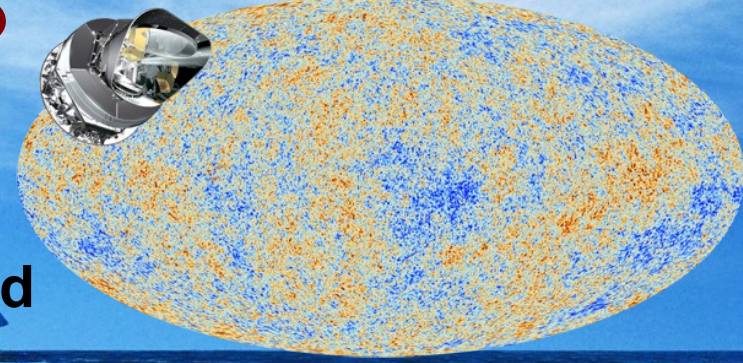
27% Matière noire



- 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

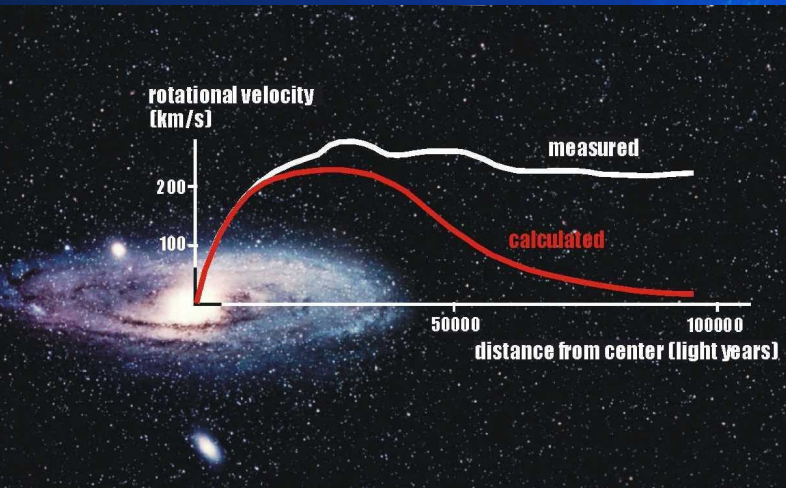


5% Modèle standard

27% Matière noire



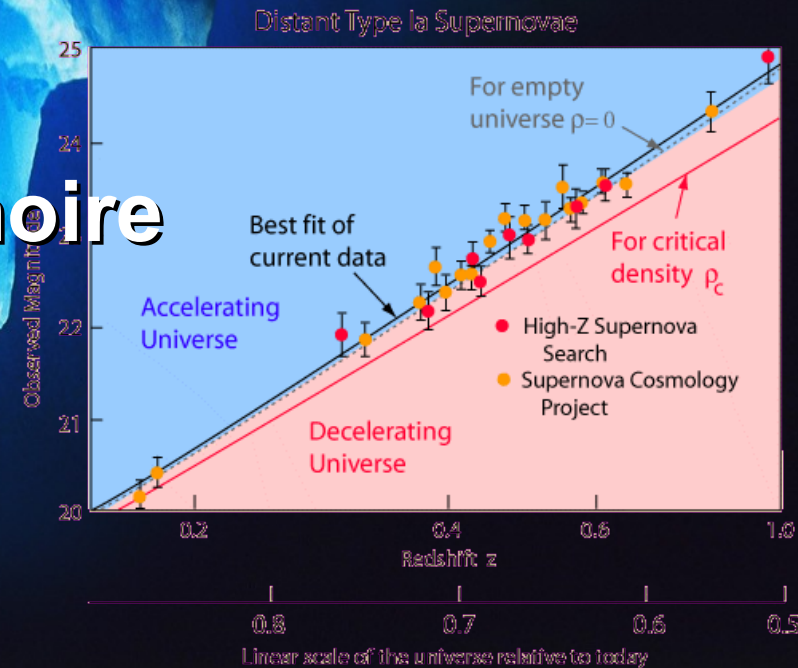
- On ne sait pas ce que c'est mais on croit savoir que c'est là
- Candidats observables au LHC (supersymétrie, ... ) ?



68% Énergie noire



Pas la moindre idée de son origine !



# Autres théories

- Le modèle standard n'explique pas tout :
  - ▶ Pourquoi trois familles ?
  - ▶ Pourquoi les particules élémentaires ont des masses si différentes ?
  - ▶ Que sont la matière noire et l'énergie noire ?
  - ▶ Pourquoi l'antimatière a presque disparu ?
- Les théoriciens ne manquent pas d'idées pour le compléter
- Beaucoup de modèles font des prédictions que l'on peut tester au LHC
- Supersymétrie, modèles exotiques, dimensions supplémentaires d'espace, ...
  - ▶ Prédiction de nouvelles particules, ou d'effets sur les phénomènes déjà connus
- Besoin de mesures expérimentales pour orienter les théoriciens

# Supersymétrie : état des lieux

## ATLAS SUSY Searches\* - 95% CL Lower Limits

Status: July 2015

ATLAS Preliminary

$\sqrt{s} = 7, 8 \text{ TeV}$

Model	$e, \mu, \tau, \gamma$	Jets	$E_T^{\text{miss}}$	$\int \mathcal{L} dt [\text{fb}^{-1}]$	Mass limit	$\sqrt{s} = 7 \text{ TeV}$	$\sqrt{s} = 8 \text{ TeV}$	Reference	
Inclusive Searches	MSUGRA/CMSSM	0-3 $e, \mu$ /1-2 $\tau$	2-10 jets/3 $b$	Yes	20.3	$\tilde{q}, \tilde{g}$	1.8 TeV	$m(\tilde{q})=m(\tilde{g})$	1507.05525
	$\tilde{q}\tilde{q}, \tilde{q} \rightarrow q\tilde{\chi}_1^0$	0	2-6 jets	Yes	20.3	$\tilde{q}$	850 GeV	$m(\tilde{\chi}_1^0)=0 \text{ GeV}, m(1^{\text{st}} \text{ gen. } \tilde{q})=m(2^{\text{nd}} \text{ gen. } \tilde{q})$	1405.7875
	$\tilde{q}\tilde{q}, \tilde{q} \rightarrow q\tilde{\chi}_1^0$ (compressed)	mono-jet	1-3 jets	Yes	20.3	$\tilde{q}$	100-440 GeV	$m(\tilde{q})-m(\tilde{\chi}_1^0)<10 \text{ GeV}$	1507.05525
	$\tilde{q}\tilde{q}, \tilde{q} \rightarrow q\ell(\ell/\nu/\nu\nu)\tilde{\chi}_1^0$	2 $e, \mu$ (off-Z)	2 jets	Yes	20.3	$\tilde{q}$	780 GeV	$m(\tilde{\chi}_1^0)=0 \text{ GeV}$	1503.03290
	$\tilde{g}\tilde{g}, \tilde{g} \rightarrow q\tilde{\chi}_1^0$	0	2-6 jets	Yes	20.3	$\tilde{g}$	1.33 TeV	$m(\tilde{\chi}_1^0)=0 \text{ GeV}$	1405.7875
	$\tilde{g}\tilde{g}, \tilde{g} \rightarrow q\tilde{\chi}_1^0$	0-1 $e, \mu$	2-6 jets	Yes	20	$\tilde{g}$	1.26 TeV	$m(\tilde{\chi}_1^0)=300 \text{ GeV}, m(\tilde{\chi}^{\pm})=0.5(m(\tilde{\chi}_1^0)+m(\tilde{g}))$	1507.05525
	$\tilde{g}\tilde{g}, \tilde{g} \rightarrow q\ell(\ell/\nu/\nu\nu)\tilde{\chi}_1^0$	2 $e, \mu$	0-3 jets	-	20	$\tilde{g}$	1.32 TeV	$m(\tilde{\chi}_1^0)=0 \text{ GeV}$	1501.03555
	GMSB ( $\tilde{\ell}$ NLSP)	1-2 $\tau + 0-1 \ell$	0-2 jets	Yes	20.3	$\tilde{g}$	1.6 TeV	$\tan\beta > 20$	1407.0603
	GGM (bino NLSP)	2 $\gamma$	-	Yes	20.3	$\tilde{g}$	1.29 TeV	$c\tau(\text{NLSP}) < 0.1 \text{ mm}$	1507.05493
	GGM (higgsino-bino NLSP)	$\gamma$	1 $b$	Yes	20.3	$\tilde{g}$	1.3 TeV	$m(\tilde{\chi}_1^0) < 900 \text{ GeV}, c\tau(\text{NLSP}) < 0.1 \text{ mm}, \mu < 0$	1507.05493
	GGM (higgsino-bino NLSP)	$\gamma$	2 jets	Yes	20.3	$\tilde{g}$	1.25 TeV	$m(\tilde{\chi}_1^0) < 850 \text{ GeV}, c\tau(\text{NLSP}) < 0.1 \text{ mm}, \mu > 0$	1507.05493
	GGM (higgsino NLSP)	2 $e, \mu$ (Z)	2 jets	Yes	20.3	$\tilde{g}$	850 GeV	$m(\text{NLSP}) > 430 \text{ GeV}$	1503.03290
	Gravitino LSP	0	mono-jet	Yes	20.3	$F^{1/2}$ scale	865 GeV	$m(\tilde{G}) > 1.8 \times 10^{-4} \text{ eV}, m(\tilde{g})=m(\tilde{q})=1.5 \text{ TeV}$	1502.01518
	$3^{\text{rd}}$ gen. $\tilde{g}$ med.	$\tilde{g}\tilde{g}, \tilde{g} \rightarrow b\tilde{\chi}_1^0$	0	3 $b$	Yes	20.1	$\tilde{g}$	1.25 TeV	$m(\tilde{\chi}_1^0) < 400 \text{ GeV}$
$\tilde{g}\tilde{g}, \tilde{g} \rightarrow t\tilde{\chi}_1^0$		0	7-10 jets	Yes	20.3	$\tilde{g}$	1.1 TeV	$m(\tilde{\chi}_1^0) < 350 \text{ GeV}$	1308.1841
$\tilde{g}\tilde{g}, \tilde{g} \rightarrow t\tilde{\chi}_1^0$		0-1 $e, \mu$	3 $b$	Yes	20.1	$\tilde{g}$	1.34 TeV	$m(\tilde{\chi}_1^0) < 400 \text{ GeV}$	1407.0600
$\tilde{g}\tilde{g}, \tilde{g} \rightarrow b\tilde{\chi}_1^0$		0-1 $e, \mu$	3 $b$	Yes	20.1	$\tilde{g}$	1.3 TeV	$m(\tilde{\chi}_1^0) < 300 \text{ GeV}$	1407.0600
$3^{\text{rd}}$ gen. squarks direct production	$\tilde{b}_1\tilde{b}_1, \tilde{b}_1 \rightarrow b\tilde{\chi}_1^0$	0	2 $b$	Yes	20.1	$\tilde{b}_1$	100-620 GeV	$m(\tilde{\chi}_1^0) < 90 \text{ GeV}$	1308.2631
	$\tilde{b}_1\tilde{b}_1, \tilde{b}_1 \rightarrow t\tilde{\chi}_1^0$	2 $e, \mu$ (SS)	0-3 $b$	Yes	20.3	$\tilde{b}_1$	275-440 GeV	$m(\tilde{\chi}_1^0)=2 m(\tilde{\chi}_1^0)$	1404.2500
	$\tilde{t}_1\tilde{t}_1, \tilde{t}_1 \rightarrow b\tilde{\chi}_1^0$	1-2 $e, \mu$	1-2 $b$	Yes	4.7/20.3	$\tilde{t}_1$	110-167 GeV	$m(\tilde{\chi}_1^0) = 2m(\tilde{\chi}_1^0), m(\tilde{\chi}_1^0)=55 \text{ GeV}$	1209.2102, 1407.0583
	$\tilde{t}_1\tilde{t}_1, \tilde{t}_1 \rightarrow Wb\tilde{\chi}_1^0$ or $t\tilde{\chi}_1^0$	0-2 $e, \mu$	0-2 jets/1-2 $b$	Yes	20.3	$\tilde{t}_1$	90-191 GeV	$m(\tilde{\chi}_1^0)=1 \text{ GeV}$	1506.08616
	$\tilde{t}_1\tilde{t}_1, \tilde{t}_1 \rightarrow c\tilde{\chi}_1^0$	0	mono-jet/ $c$ -tag	Yes	20.3	$\tilde{t}_1$	90-240 GeV	$m(\tilde{t}_1)-m(\tilde{\chi}_1^0) < 85 \text{ GeV}$	1407.0608
	$\tilde{t}_1\tilde{t}_1$ (natural GMSB)	2 $e, \mu$ (Z)	1 $b$	Yes	20.3	$\tilde{t}_1$	150-580 GeV	$m(\tilde{\chi}_1^0) > 150 \text{ GeV}$	1403.5222
	$\tilde{t}_2\tilde{t}_2, \tilde{t}_2 \rightarrow \tilde{t}_1 + Z$	3 $e, \mu$ (Z)	1 $b$	Yes	20.3	$\tilde{t}_2$	290-600 GeV	$m(\tilde{\chi}_1^0) < 200 \text{ GeV}$	1403.5222
EW direct	$\tilde{\ell}_{L,R}\tilde{\ell}_{L,R}, \tilde{\ell} \rightarrow \ell\tilde{\chi}_1^0$	2 $e, \mu$	0	Yes	20.3	$\tilde{\ell}$	90-325 GeV	$m(\tilde{\chi}_1^0)=0 \text{ GeV}$	1403.5294
	$\tilde{\chi}_1^{\pm}\tilde{\chi}_1^{\pm}, \tilde{\chi}_1^{\pm} \rightarrow \ell\nu(\ell\bar{\nu})$	2 $e, \mu$	0	Yes	20.3	$\tilde{\chi}_1^{\pm}$	140-465 GeV	$m(\tilde{\chi}_1^0)=0 \text{ GeV}, m(\tilde{\ell}, \tilde{\nu})=0.5(m(\tilde{\chi}_1^{\pm})+m(\tilde{\chi}_1^0))$	1403.5294
	$\tilde{\chi}_1^{\pm}\tilde{\chi}_1^{\pm}, \tilde{\chi}_1^{\pm} \rightarrow \tilde{\tau}\nu(\tilde{\tau}\bar{\nu})$	2 $\tau$	-	Yes	20.3	$\tilde{\chi}_1^{\pm}$	100-350 GeV	$m(\tilde{\chi}_1^0)=0 \text{ GeV}, m(\tilde{\ell}, \tilde{\nu})=0.5(m(\tilde{\chi}_1^{\pm})+m(\tilde{\chi}_1^0))$	1407.0350
	$\tilde{\chi}_1^{\pm}\tilde{\chi}_1^{\pm} \rightarrow \tilde{\ell}_L\nu_L(\tilde{\ell}\bar{\nu}), (\tilde{\nu}\tilde{\ell}_L\ell(\bar{\nu}\nu))$	3 $e, \mu$	0	Yes	20.3	$\tilde{\chi}_1^{\pm}$	700 GeV	$m(\tilde{\chi}_1^0)=m(\tilde{\chi}_2^0), m(\tilde{\chi}_1^0)=0, m(\tilde{\ell}, \tilde{\nu})=0.5(m(\tilde{\chi}_1^{\pm})+m(\tilde{\chi}_1^0))$	1402.7029
	$\tilde{\chi}_1^{\pm}\tilde{\chi}_2^0 \rightarrow W\tilde{\chi}_1^0 Z\tilde{\chi}_1^0$	2-3 $e, \mu$	0-2 jets	Yes	20.3	$\tilde{\chi}_1^{\pm}, \tilde{\chi}_2^0$	420 GeV	$m(\tilde{\chi}_1^0)=m(\tilde{\chi}_2^0), m(\tilde{\chi}_1^0)=0, \text{sleptons decoupled}$	1403.5294, 1402.7029
	$\tilde{\chi}_1^{\pm}\tilde{\chi}_2^0 \rightarrow W\tilde{\chi}_1^0 h\tilde{\chi}_1^0, h \rightarrow b\bar{b}/W\tilde{\tau}\tau/\gamma\gamma$	$e, \mu, \gamma$	0-2 $b$	Yes	20.3	$\tilde{\chi}_1^{\pm}, \tilde{\chi}_2^0$	250 GeV	$m(\tilde{\chi}_1^0)=m(\tilde{\chi}_2^0), m(\tilde{\chi}_1^0)=0, \text{sleptons decoupled}$	1501.07110
	$\tilde{\chi}_2^0\tilde{\chi}_3^0, \tilde{\chi}_2^0 \rightarrow \tilde{\ell}_R\ell$	4 $e, \mu$	0	Yes	20.3	$\tilde{\chi}_2^0, \tilde{\chi}_3^0$	620 GeV	$m(\tilde{\chi}_2^0)=m(\tilde{\chi}_3^0), m(\tilde{\chi}_1^0)=0, m(\tilde{\ell}, \tilde{\nu})=0.5(m(\tilde{\chi}_2^0)+m(\tilde{\chi}_1^0))$	1405.5086
	GGM (wino NLSP) weak prod.	1 $e, \mu + \gamma$	-	Yes	20.3	$\tilde{W}$	124-361 GeV	$c\tau < 1 \text{ mm}$	1507.05493
	Long-lived particles	Direct $\tilde{\chi}_1^{\pm}\tilde{\chi}_1^{\pm}$ prod., long-lived $\tilde{\chi}_1^{\pm}$	Disapp. trk	1 jet	Yes	20.3	$\tilde{\chi}_1^{\pm}$	270 GeV	$m(\tilde{\chi}_1^{\pm})-m(\tilde{\chi}_1^0) \sim 160 \text{ MeV}, \tau(\tilde{\chi}_1^{\pm})=0.2 \text{ ns}$
Direct $\tilde{\chi}_1^{\pm}\tilde{\chi}_1^{\pm}$ prod., long-lived $\tilde{\chi}_1^{\pm}$		dE/dx trk	-	Yes	18.4	$\tilde{\chi}_1^{\pm}$	482 GeV	$m(\tilde{\chi}_1^{\pm})-m(\tilde{\chi}_1^0) \sim 160 \text{ MeV}, \tau(\tilde{\chi}_1^{\pm}) < 15 \text{ ns}$	1506.05332
Stable, stopped $\tilde{g}$ R-hadron		0	1-5 jets	Yes	27.9	$\tilde{g}$	832 GeV	$m(\tilde{\chi}_1^0)=100 \text{ GeV}, 10 \mu\text{s} < \tau(\tilde{g}) < 1000 \text{ s}$	1310.6584
Stable $\tilde{g}$ R-hadron		trk	-	-	19.1	$\tilde{g}$	1.27 TeV	-	1411.6795
GMSB, stable $\tilde{\tau}, \tilde{\chi}_1^0 \rightarrow \tilde{\tau}(\tilde{e}, \tilde{\mu}) + \tau(e, \mu)$		1-2 $\mu$	-	-	19.1	$\tilde{\chi}_1^0$	537 GeV	$10 < \tan\beta < 50$	1411.6795
GMSB, $\tilde{\chi}_1^0 \rightarrow \gamma\tilde{G}$ , long-lived $\tilde{\chi}_1^0$		2 $\gamma$	-	Yes	20.3	$\tilde{\chi}_1^0$	435 GeV	$2 < \tau(\tilde{\chi}_1^0) < 3 \text{ ns}, \text{SPS8 model}$	1409.5542
$\tilde{g}\tilde{g}, \tilde{\chi}_1^0 \rightarrow ee\nu/\mu\nu/\mu\nu$		displ. $ee/\mu\mu/\mu\nu$	-	-	20.3	$\tilde{\chi}_1^0$	1.0 TeV	$7 < c\tau(\tilde{\chi}_1^0) < 740 \text{ mm}, m(\tilde{g})=1.3 \text{ TeV}$	1504.05162
GGM $\tilde{g}\tilde{g}, \tilde{\chi}_1^0 \rightarrow Z\tilde{G}$		displ. vtx + jets	-	-	20.3	$\tilde{\chi}_1^0$	1.0 TeV	$6 < c\tau(\tilde{\chi}_1^0) < 480 \text{ mm}, m(\tilde{g})=1.1 \text{ TeV}$	1504.05162
RPV	LFV $pp \rightarrow \tilde{\nu}_\tau + X, \tilde{\nu}_\tau \rightarrow e\mu/\tau\mu$	$e\mu, \tau\mu$	-	-	20.3	$\tilde{\nu}_\tau$	1.7 TeV	$\lambda_{311}^{\nu} = 0.11, \lambda_{132}/\lambda_{133}/\lambda_{233} = 0.07$	1503.04430
	Bilinear RPV CMSSM	2 $e, \mu$ (SS)	0-3 $b$	Yes	20.3	$\tilde{q}, \tilde{g}$	1.35 TeV	$m(\tilde{q})=m(\tilde{g}), c\tau_{\text{LSP}} < 1 \text{ mm}$	1404.2500
	$\tilde{\chi}_1^{\pm}\tilde{\chi}_1^{\pm}, \tilde{\chi}_1^{\pm} \rightarrow W\tilde{\chi}_1^0, \tilde{\chi}_1^{\pm} \rightarrow ee\nu, \mu\tilde{\nu}_\tau$	4 $e, \mu$	-	Yes	20.3	$\tilde{\chi}_1^{\pm}$	750 GeV	$m(\tilde{\chi}_1^0) > 0.2 \times m(\tilde{\chi}_1^{\pm}), \lambda_{121} \neq 0$	1405.5086
	$\tilde{\chi}_1^{\pm}\tilde{\chi}_1^{\pm}, \tilde{\chi}_1^{\pm} \rightarrow W\tilde{\chi}_1^0, \tilde{\chi}_1^{\pm} \rightarrow \tau\tau\tilde{\nu}_\tau, e\tau\tilde{\nu}_\tau$	3 $e, \mu + \tau$	-	Yes	20.3	$\tilde{\chi}_1^{\pm}$	450 GeV	$m(\tilde{\chi}_1^0) > 0.2 \times m(\tilde{\chi}_1^{\pm}), \lambda_{133} \neq 0$	1405.5086
	$\tilde{g}\tilde{g}, \tilde{g} \rightarrow qq$	0	6-7 jets	-	20.3	$\tilde{g}$	917 GeV	$\text{BR}(\tilde{g}) = \text{BR}(h) = \text{BR}(c) = 0\%$	1502.05686
	$\tilde{g}\tilde{g}, \tilde{g} \rightarrow q\tilde{\chi}_1^0 \rightarrow qq$	0	6-7 jets	-	20.3	$\tilde{g}$	870 GeV	$m(\tilde{\chi}_1^0)=600 \text{ GeV}$	1502.05686
	$\tilde{g}\tilde{g}, \tilde{g} \rightarrow t\tilde{t}, \tilde{t}_1 \rightarrow bs$	2 $e, \mu$ (SS)	0-3 $b$	Yes	20.3	$\tilde{g}$	850 GeV	-	1404.250
	$\tilde{t}_1\tilde{t}_1, \tilde{t}_1 \rightarrow bs$	0	2 jets + 2 $b$	-	20.3	$\tilde{t}_1$	100-308 GeV	-	ATLAS-CONF-2015-026
$\tilde{t}_1\tilde{t}_1, \tilde{t}_1 \rightarrow bl$	2 $e, \mu$	2 $b$	-	20.3	$\tilde{t}_1$	0.4-1.0 TeV	$\text{BR}(\tilde{t}_1 \rightarrow bc/\mu) > 20\%$	ATLAS-CONF-2015-015	
Other	Scalar charm, $\tilde{c} \rightarrow c\tilde{\chi}_1^0$	0	2 $c$	Yes	20.3	$\tilde{c}$	490 GeV	$m(\tilde{\chi}_1^0) < 200 \text{ GeV}$	1501.01325

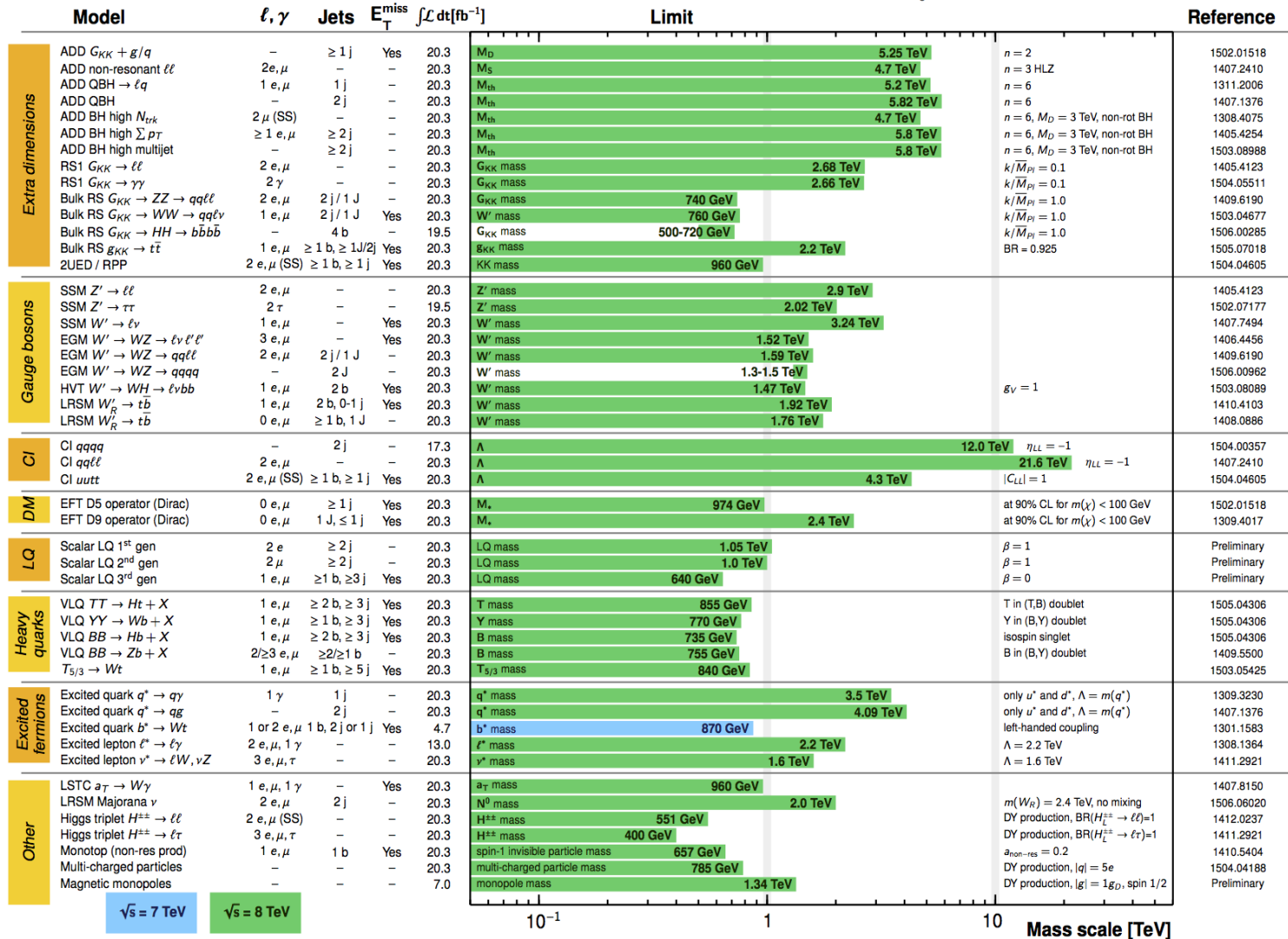
\*Only a selection of the available mass limits on new states or phenomena is shown. All limits quoted are observed minus  $1\sigma$  theoretical signal cross section uncertainty.

• On n'a rien trouvé, et pourtant on cherche !

# Exotiques : état des lieux

ATLAS Exotics Searches\* - 95% CL Exclusion  
 Status: July 2015

ATLAS Preliminary  
 $\int \mathcal{L} dt = (4.7 - 20.3) \text{ fb}^{-1}$   $\sqrt{s} = 7, 8 \text{ TeV}$



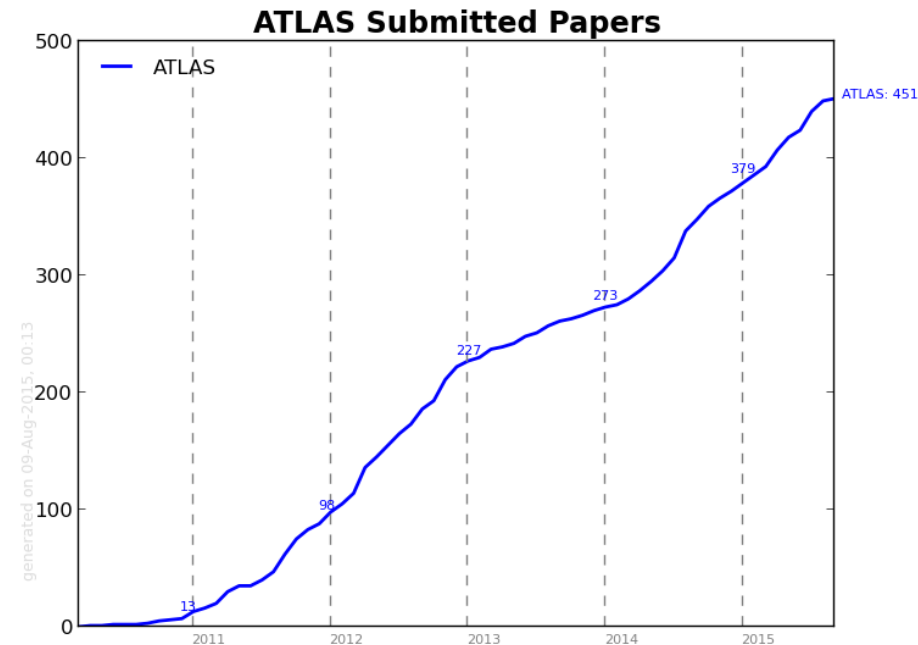
\*Only a selection of the available mass limits on new states or phenomena is shown.

• On n'a rien trouvé non plus, mais on continue de chercher !



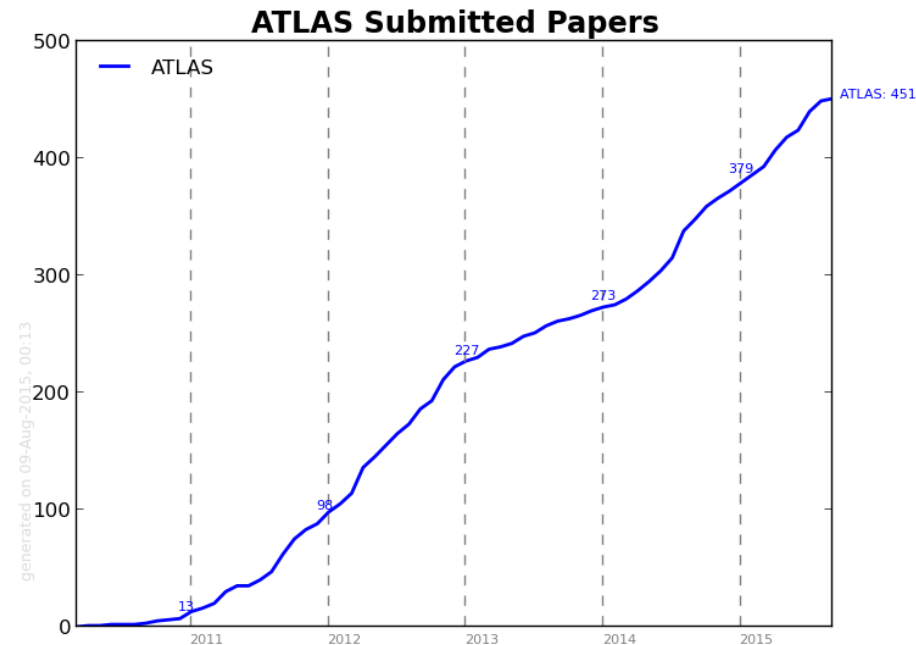
# Publications

- ATLAS :
  - ▶ >450 publications
  - ▶ >650 notes de conférence
- CMS : similaire
- LHCb :
  - ▶ >250 publications et 120 notes de conférence
- ALICE :
  - ▶ >100 publications



# Publications

- ATLAS :
  - ▶ >450 publications
  - ▶ >650 notes de conférence
- CMS : similaire
- LHCb :
  - ▶ >250 publications et 120 notes de conférence
- ALICE :
  - ▶ >100 publications

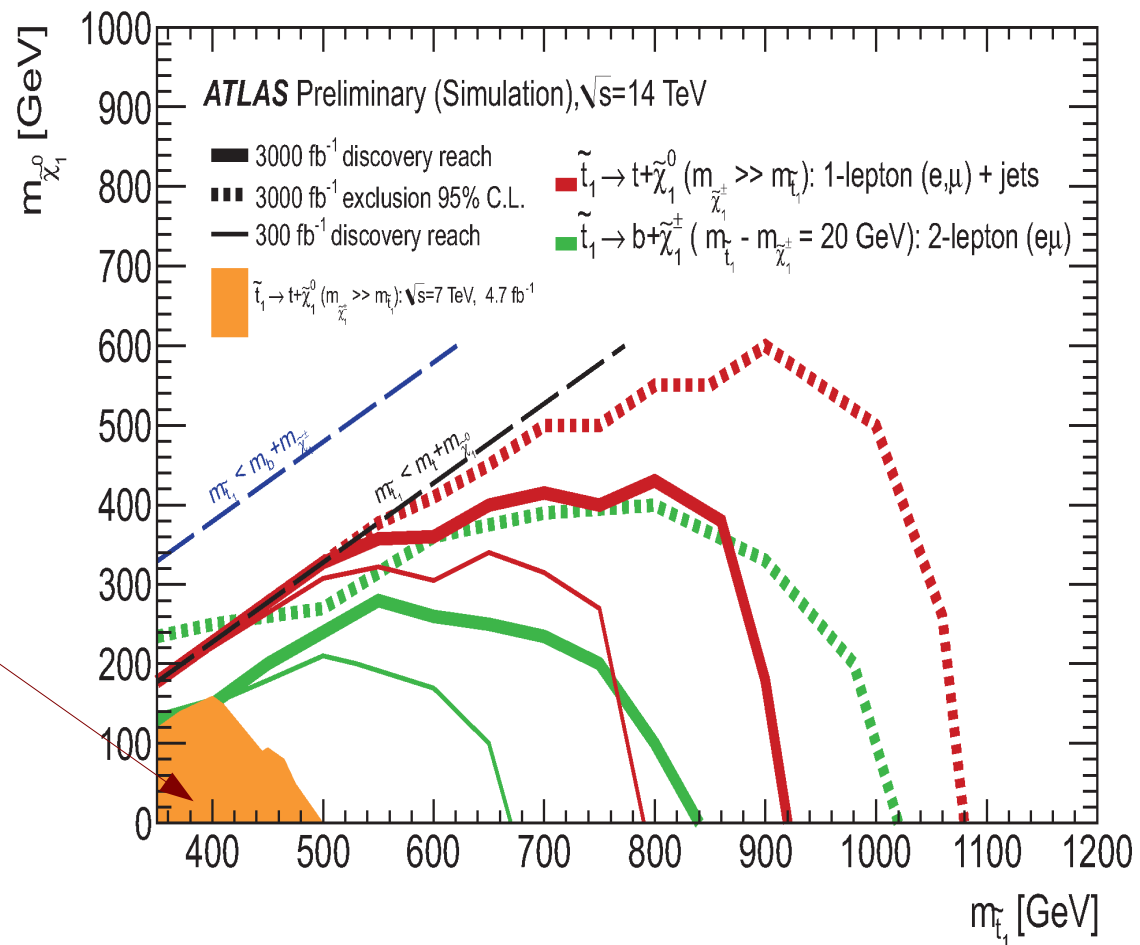


**Toutes les publications du LHC sont accessibles gratuitement par tous**  
(forte pression du CERN sur les journaux)

# SUSY et exotiques : le futur

- Pour l'instant, 25 fb<sup>-1</sup> collectés jusqu'en 2012 (7-8 TeV), 0,1 fb<sup>-1</sup> depuis juin 2015
- On envisage 300 fb<sup>-1</sup> d'ici 2021-2022
- puis 3000 fb<sup>-1</sup> pour 2030-2035

Exclus actuellement



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

- Lien entre le boson de Higgs et l'inflation ?
- Lien avec la masse des neutrinos ?



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

- Lien entre le boson de Higgs et l'inflation ?
- Lien avec la masse des neutrinos ?

## LHC Saison 2 :

- Étude des propriétés du boson observé
  - ▶ Déviations du modèle standard ?
- Recherche d'autres bosons de Higgs
  - ▶ Signe de nouvelle physique ?

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

- Lien entre le boson de Higgs et l'inflation ?
- Lien avec la masse des neutrinos ?

## LHC Saison 2 :

- Étude des propriétés du boson observé
  - ▶ Déviations du modèle standard ?
- Recherche d'autres bosons de Higgs
  - ▶ Signe de nouvelle physique ?
- Recherche de candidats pour expliquer la matière noire
- Asymétrie matière-antimatière
- On espère des surprises !

# Poursuivre au Centre Culturel

Festival  
d'**astronomie**  
de Fleurance

Ferme des étoiles

- Exposition du

Labex



Voyage <sup>vers les</sup> **2** <sup>infinis</sup>

- Vendredi 14/8 (demain) :

- ▶ 14h30 : film « Particle fever »  
(« La fièvre des particules »)

(YC)

JUPITER FILMS présente  
UNE AVENTURE HUMAINE VERS L'INFINIMENT PETIT



PARTICLE **FEVER**  
LA FIÈVRE DES PARTICULES



- ▶ 17h00 : Café astro

« Que reste-t-il à découvrir pour comprendre l'univers ? »

(H. Reeves, YC, N. Palanque, Olivier Sanguy)

# Liens

Site français du  LHC FRANCE

Les Masterclasses 

ATLAS grand public 

ATLAS en direct

ATLAS sur 

ATLAS sur 

ATLAS sur 

ATLAS sur 

Le CPPM 

Le CERN 

Le CERN sur 

Nouvelle affiche du SM

[www.lhc-france.fr](http://www.lhc-france.fr)

[physicsmasterclasses.org](http://physicsmasterclasses.org)

[atlas.ch](http://atlas.ch)

[atlas-live.cern.ch](http://atlas-live.cern.ch)

[twitter.com/ATLASexperiment](https://twitter.com/ATLASexperiment)

[www.facebook.com/ATLASexperiment](https://www.facebook.com/ATLASexperiment)

[www.google.com/+ATLASexperiment](https://www.google.com/+ATLASexperiment)

[www.youtube.com/theATLASExperiment](https://www.youtube.com/theATLASExperiment)

[www.cppm.in2p3.fr](http://www.cppm.in2p3.fr)

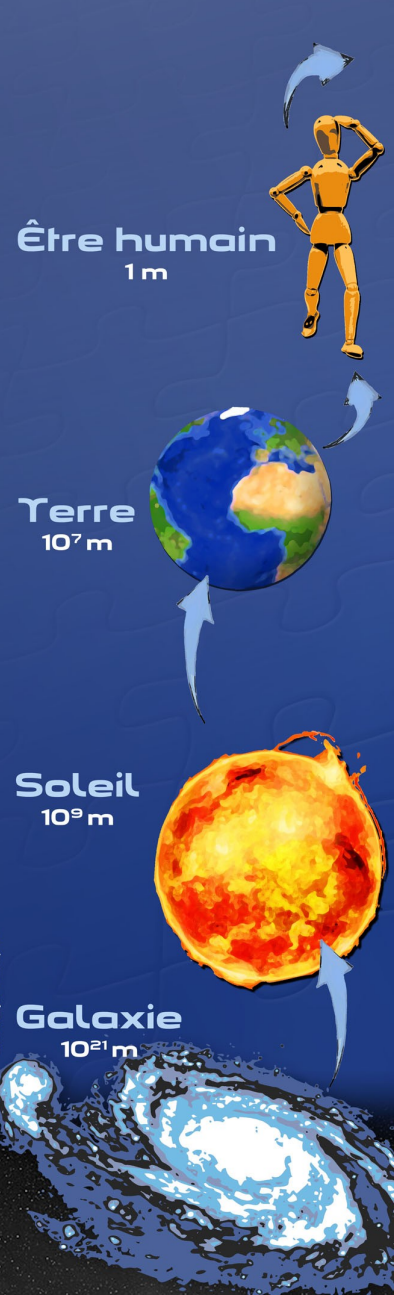
[cern.ch](http://cern.ch)

[twitter.com/cern](https://twitter.com/cern)

[www.particuleselementaires.fr](http://www.particuleselementaires.fr)



# Composants élémentaires de la matière



	LEPTONS		QUARKS		BOSON de HIGGS H
<b>1<sup>re</sup> famille</b> Constituants de la matière usuelle	$\nu_e$ neutrino électron $t = \infty$ $Q = 0$ $m < 2 \cdot 10^{-36}$ GeV/c <sup>2</sup>	$e$ électron $t = \infty$ $Q = -e$ $m = 0,00051$ GeV/c <sup>2</sup>	$u$ haut / up $t = \infty$ $Q = 2e/3$ $m = 0,002$ GeV/c <sup>2</sup>	$d$ bas / down $t = 15$ min $Q = -e/3$ $m = 0,005$ GeV/c <sup>2</sup>	$t = 1,6 \cdot 10^{-12}$ s $Q = 0$ $m = 125$ GeV/c <sup>2</sup> Le boson de Higgs est la manifestation du champ de Higgs. Par son interaction avec les constituants élémentaires de la matière, ce champ est responsable de leur masse. Il provoque aussi la séparation entre interactions électromagnétique et faible.
<b>2<sup>e</sup> famille</b> Réplique plus massive de la 1 <sup>re</sup> famille	$\nu_\mu$ neutrino muon $t = \infty$ $Q = 0$ $m < 2 \cdot 10^{-36}$ GeV/c <sup>2</sup>	$\mu$ muon $t = 2,2 \cdot 10^{-6}$ s $Q = -e$ $m = 0,106$ GeV/c <sup>2</sup>	$c$ charme / charm $t = 10^{-12}$ s $Q = 2e/3$ $m = 1,3$ GeV/c <sup>2</sup>	$s$ étrange / strange $t = 10^{-10}$ s $Q = -e/3$ $m = 0,1$ GeV/c <sup>2</sup>	
<b>3<sup>e</sup> famille</b> Réplique plus massive des 1 <sup>re</sup> et 2 <sup>e</sup> familles	$\nu_\tau$ neutrino tau $t = \infty$ $Q = 0$ $m < 2 \cdot 10^{-36}$ GeV/c <sup>2</sup>	$\tau$ tau $t = 2,9 \cdot 10^{-13}$ s $Q = -e$ $m = 1,78$ GeV/c <sup>2</sup>	$t$ top $t = 3 \cdot 10^{-25}$ s $Q = 2e/3$ $m = 173$ GeV/c <sup>2</sup>	$b$ beau / beauty / bottom $t = 1,5 \cdot 10^{-12}$ s $Q = -e/3$ $m = 4,2$ GeV/c <sup>2</sup>	



## INTERACTIONS FONDAMENTALES

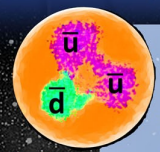
Portée	Interaction
$10^{-17}$ m	Interaction faible
infinie	Interaction électromagnétique
$10^{-15}$ m	Interaction forte
infinie	Gravitation

Bosons Z, W <sup>±</sup>	Désintégrations radioactives $\beta^+$ et $\beta^-$ de certains noyaux instables
Photon $\gamma$	Electricité, magnétisme, cohésion des atomes et des molécules, chimie
Gluons g	Cohésion des protons, des neutrons et des noyaux, énergie nucléaire
Graviton (?)	Gravité, pesanteur, système solaire, galaxies

Chaque interaction fondamentale est transmise par des **particules** qui lui sont associées

Chacune des quatre interactions fondamentales joue un rôle dans le fonctionnement des étoiles qui peuplent les galaxies, et en particulier du Soleil :

- la gravitation permet la formation des étoiles à partir de nuages de gaz ;
- les interactions faible et forte interviennent lors des réactions de fusion nucléaire ;
- l'interaction électromagnétique est liée à la production de lumière.



Antiproton

## ANTIMATIÈRE

À chaque particule correspond une antiparticule. Leurs caractéristiques physiques sont quasiment identiques. Une particule et son antiparticule ont la même masse, mais des charges opposées.

# 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>
- Bottle to Bang (chaîne d'accélération du LHC)  
<http://cds.cern.ch/record/1179452>
- Détection des particules dans ATLAS  
<http://www.atlas.ch/multimedia/how-atlas-detects-particles.html>
- ATLAS construit en une minute  
<http://www.atlas.ch/multimedia/atlas-built-1-minute.html>
- 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  $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow \ell\ell\ell\ell$   
<http://twiki.cern.ch/twiki/pub/AtlasPublic/HiggsPublicResults/4l-FixedScale-NoMuProf2.gif>