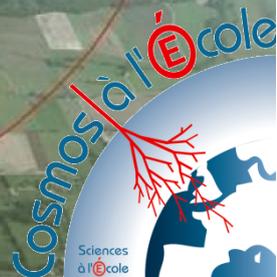


La physique des particules en 2017

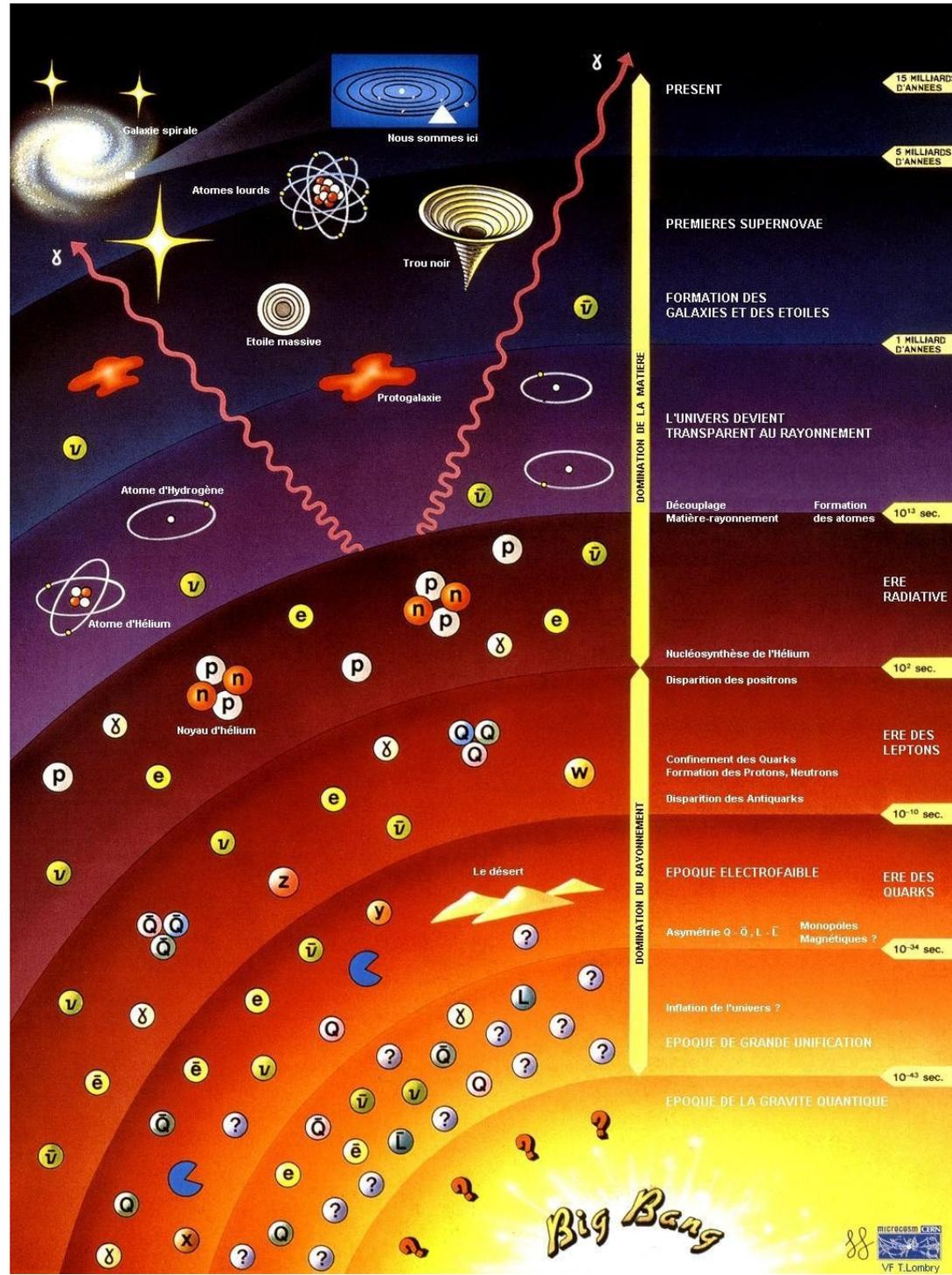
Yann Coadou

Centre de physique des particules de Marseille

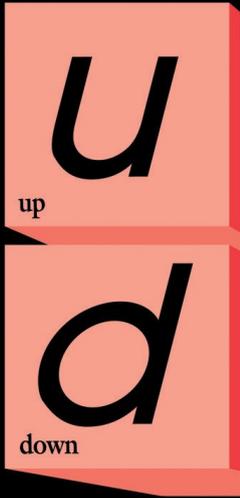
Stage de formation « Cosmos à l'école »
10 mai 2017



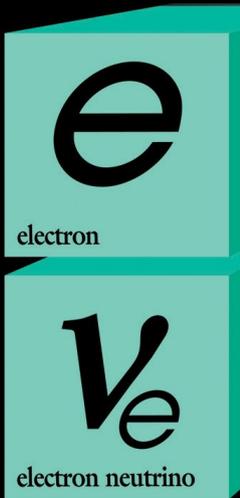
L'histoire de l'Univers



Quarks



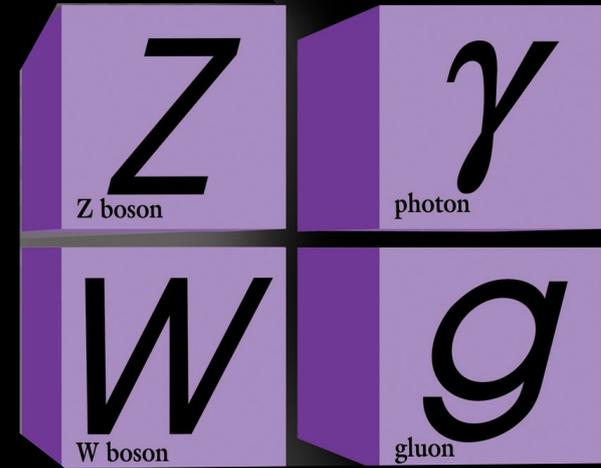
+ anti-matière



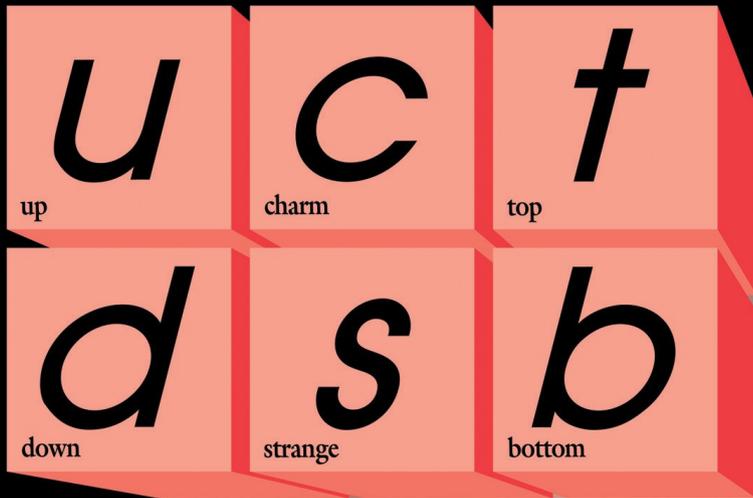
Leptons

Le modèle standard

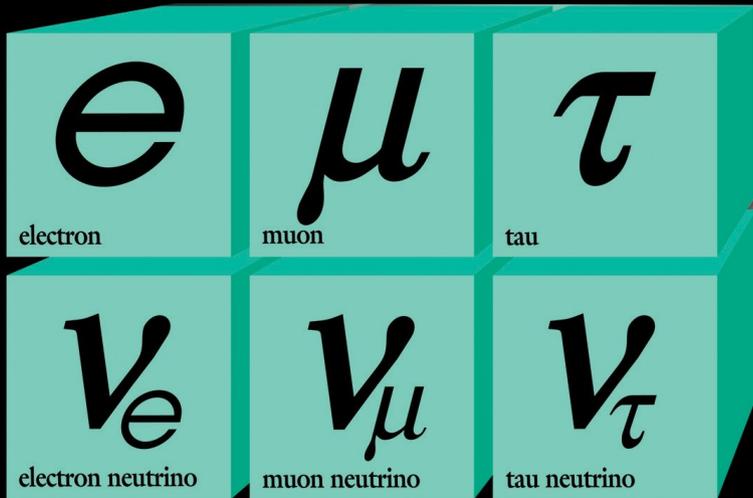
Forces



Quarks



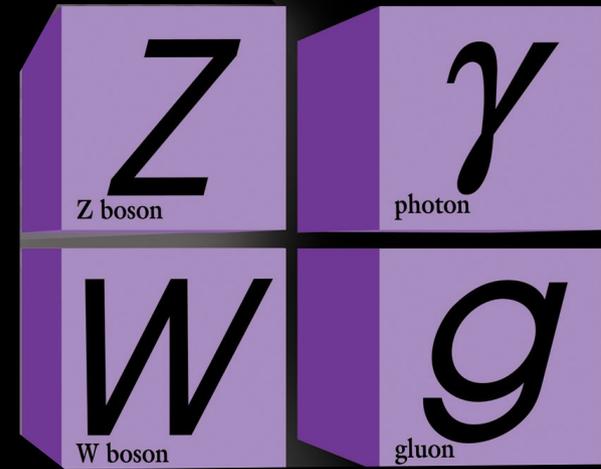
+ anti-matière



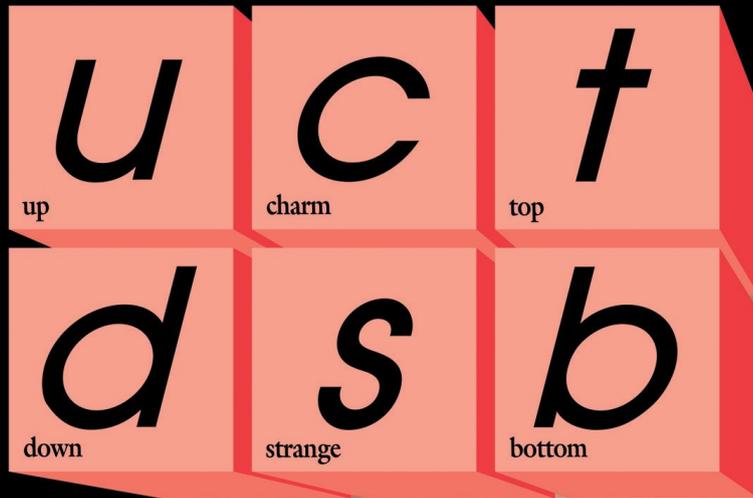
Leptons

Le modèle standard

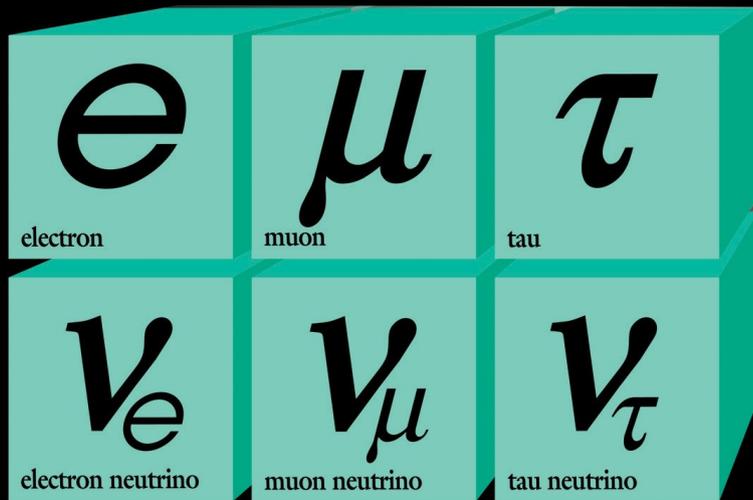
Forces



Quarks



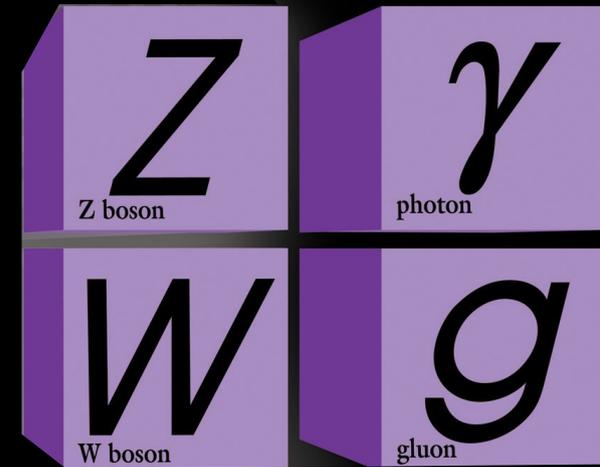
+ anti-matière



Leptons

Le modèle standard

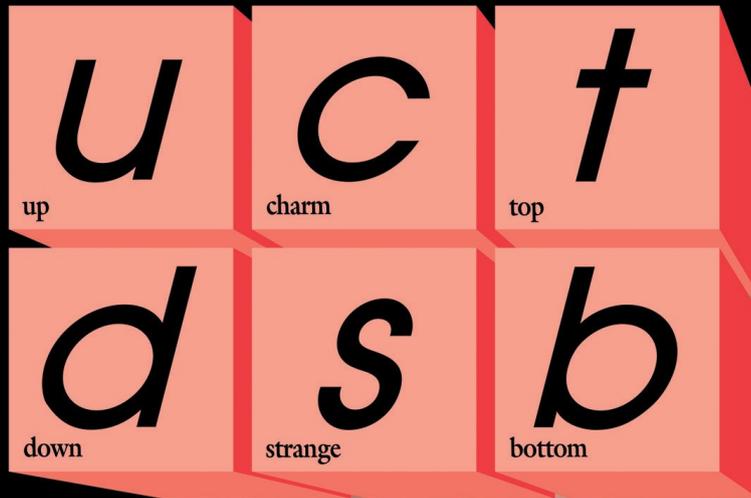
Forces



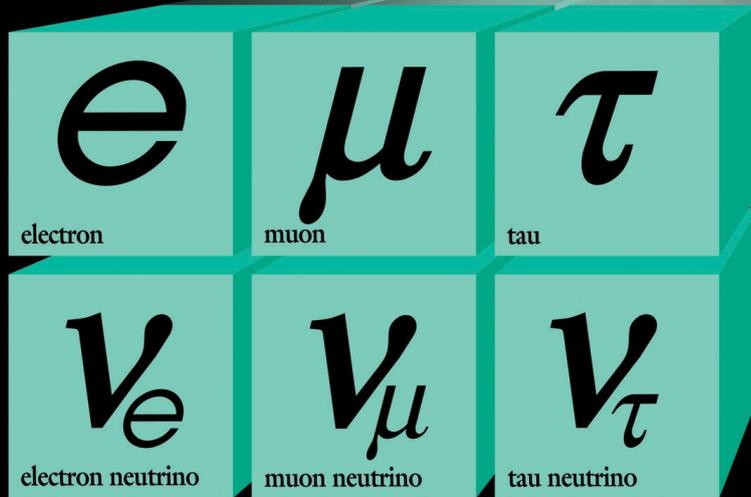
Toutes ces particules ont une masse nulle, c'est contraire à l'expérience...

Quarks

Le modèle standard

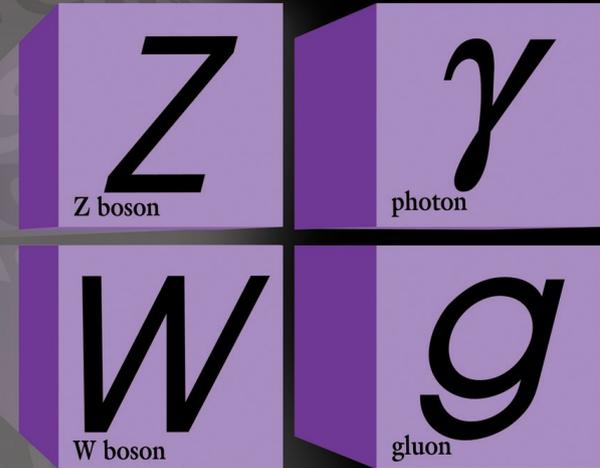


+ anti-matière



Leptons

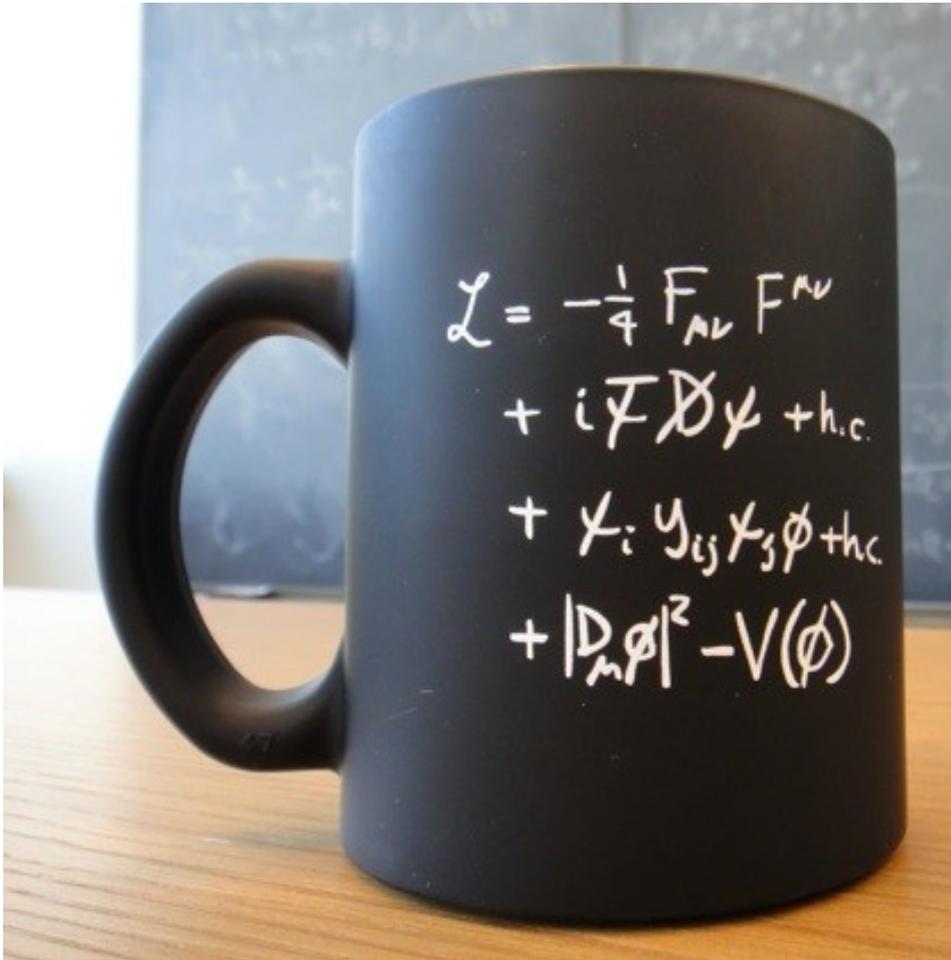
Forces



Solution : rajouter un champ de Higgs

Le modèle standard

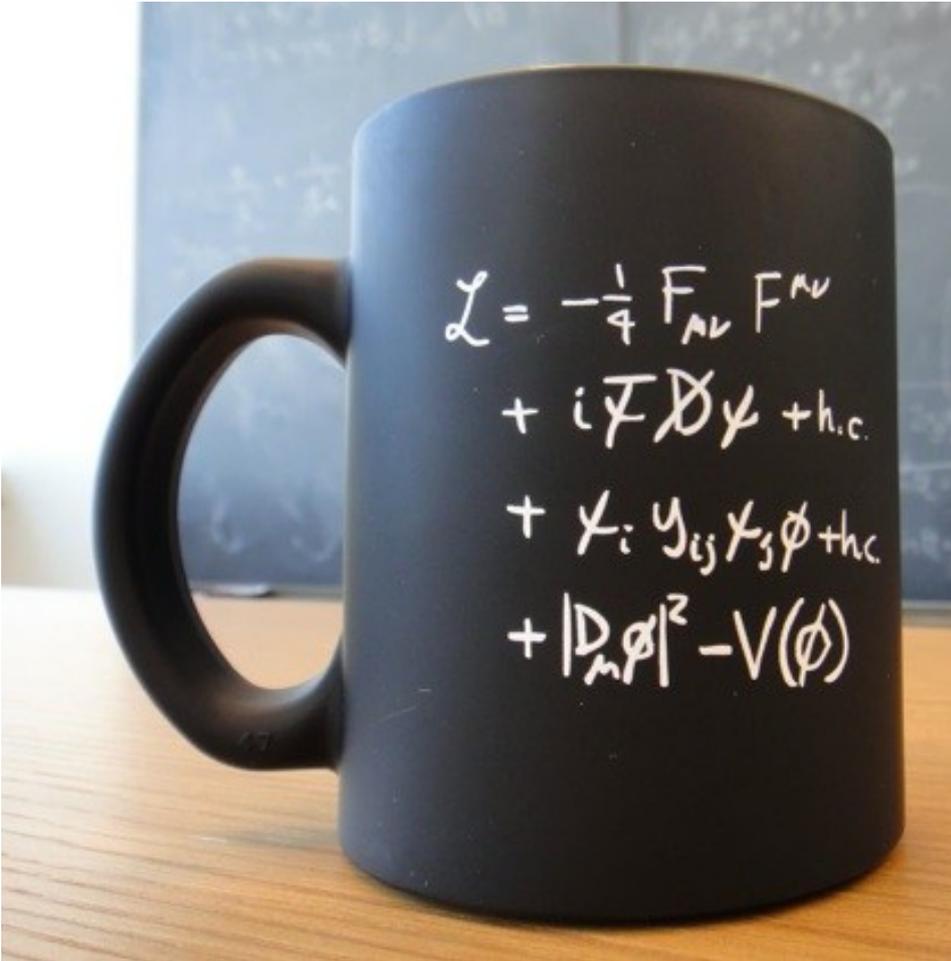
- Version synthétique



Le modèle standard

- Version synthétique

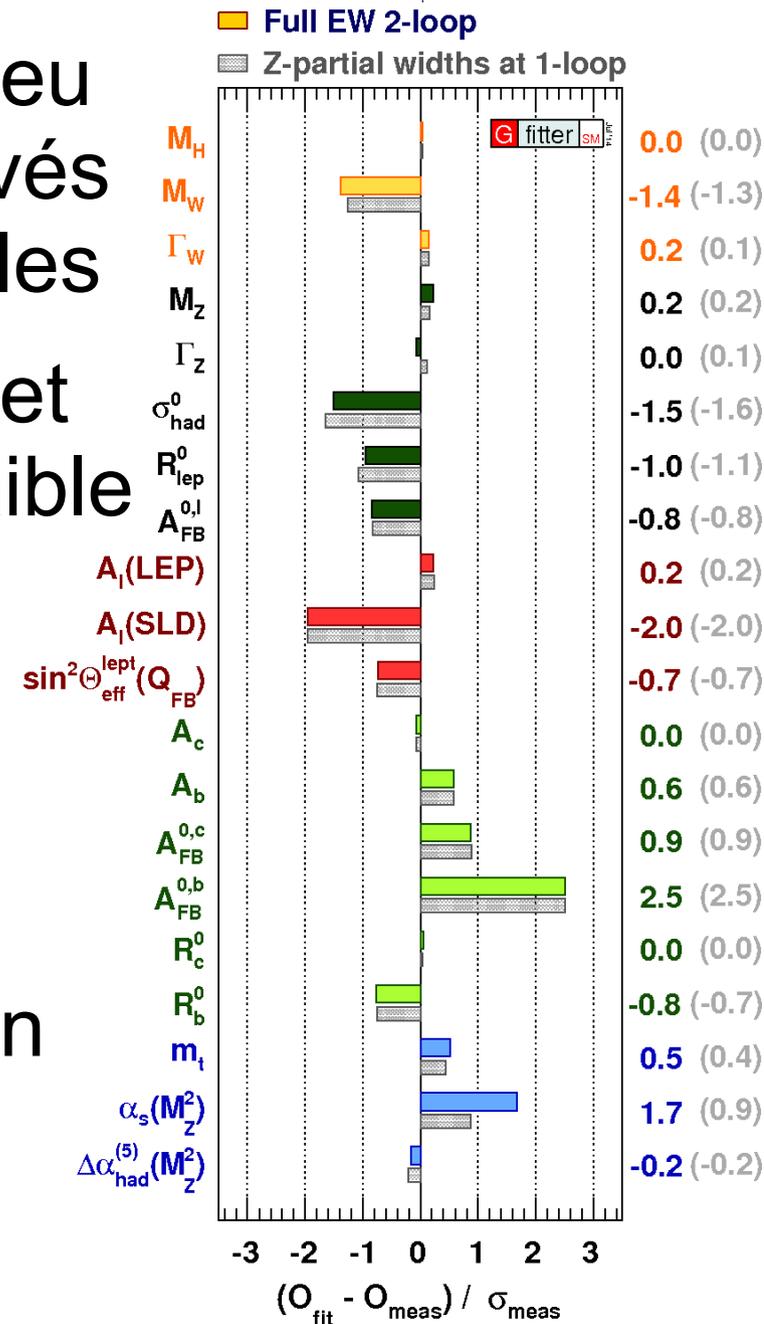
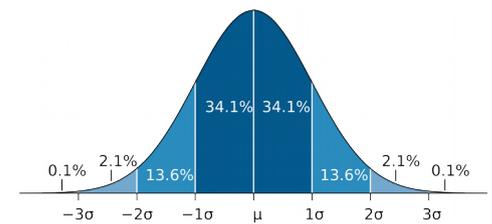
- Version développée...



$$\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 - \\
 & ig_{c_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_\nu (W_\nu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\nu^- \partial_\nu W_\mu^+)] - \\
 & \frac{1}{2} g^2 W_\mu^+ W_\nu^+ W_\mu^- W_\nu^- + \frac{1}{2} g^2 W_\mu^+ W_\nu^- W_\mu^- W_\nu^+ + g^2 c_w^2 (Z_\mu^0 W_\nu^+ Z_\nu^0 W_\mu^- - \\
 & Z_\mu^0 Z_\nu^0 W_\nu^+ W_\mu^-) + g^2 s_w^2 (A_\mu W_\nu^+ A_\nu W_\mu^- - A_\mu A_\nu W_\nu^+ W_\mu^-) + \\
 & 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_\nu \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_e^\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_d^\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^\lambda}{M} \mathbf{H} (\bar{u}_j^\lambda u_j^\lambda) - \frac{g}{2} \frac{m_\lambda^\lambda}{M} \mathbf{H} (\bar{d}_j^\lambda d_j^\lambda) + \frac{ig}{2} \frac{m_\lambda^\lambda}{M} \phi^0 (\bar{u}_j^\lambda \gamma^5 u_j^\lambda) - \\
 & \frac{ig}{2} \frac{m_\lambda^\lambda}{M} \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 + ig_{c_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) + ig_{c_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^+) + ig_{c_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

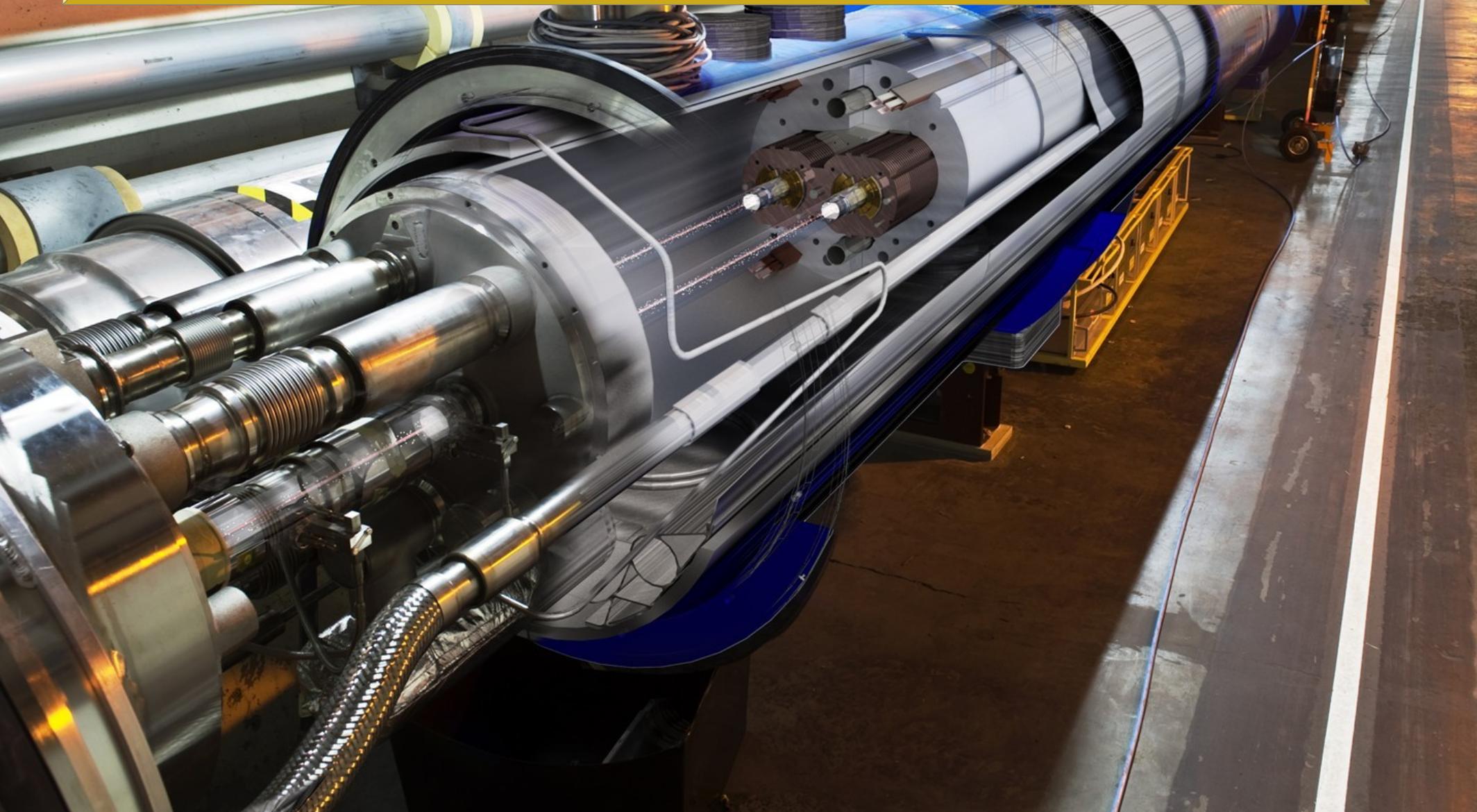


Le LHC : la machine à superlatifs



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



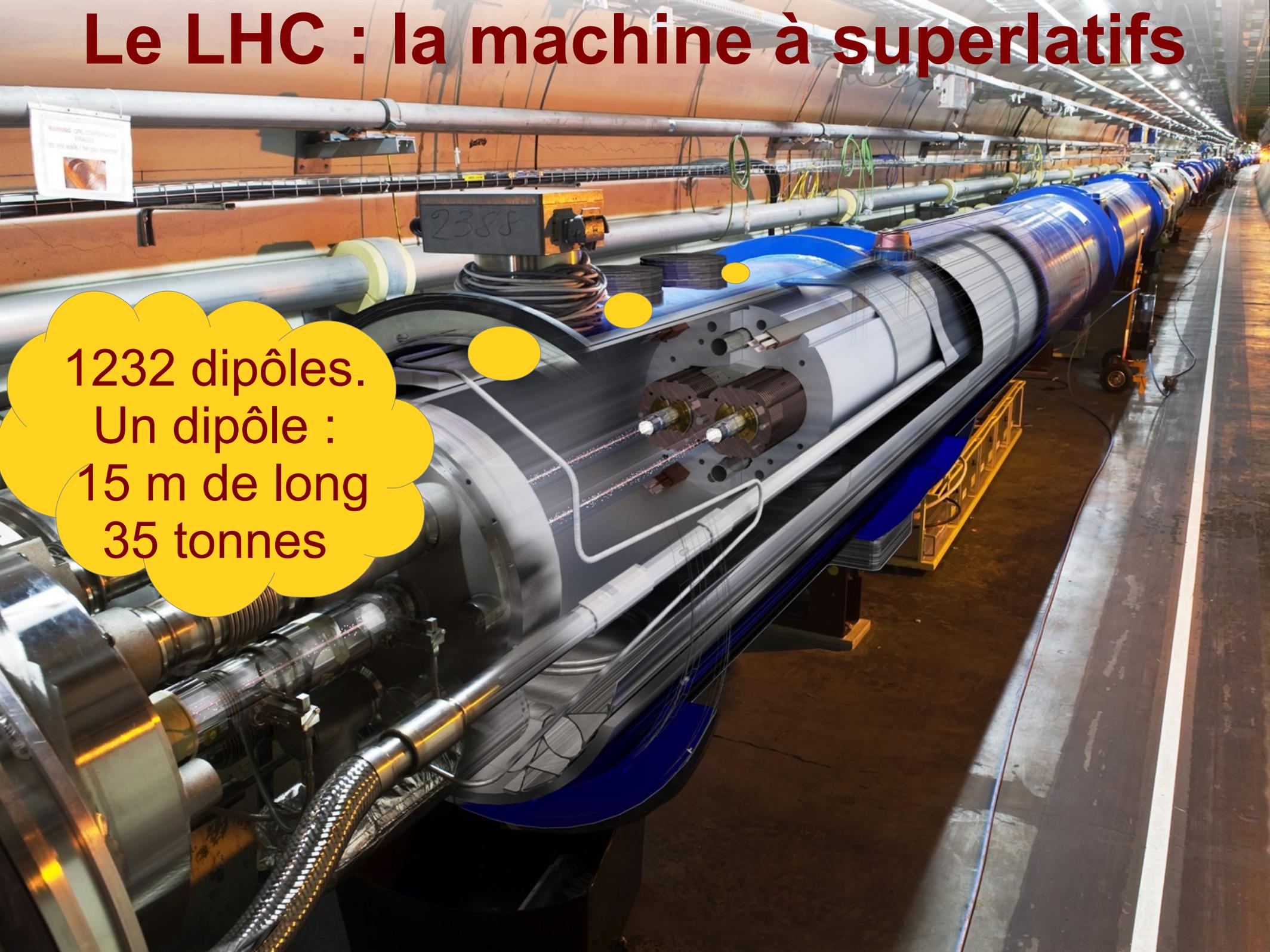
Protons voyageant à
99,9999991%
de la vitesse de la lumière,
soit 11000 tours
par seconde

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 LHC : la machine à superlatifs

A photograph of a long, complex superconducting magnet assembly in a tunnel. The assembly consists of multiple cylindrical sections connected in a line, with various pipes, cables, and support structures. A yellow callout bubble is overlaid on the image, containing text. The background shows the tunnel's interior with other pipes and equipment.

Consommation électrique :
Tous les foyers du canton de Genève



Accélérateur de science

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
Octobre 2009	Redémarrage
Mars 2010	Premières collisions à 7 TeV
Fin 2012	Fin des collisions à 8 TeV
Printemps 2015	Redémarrage à 13 TeV
2023	Fin des collisions à luminosité nominale
2025-2035	Phase à haute luminosité (10 fois plus de données)

25 ans d'exploitation

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 agences
1998-2008	Construction du LHC et des détecteurs
Septembre 2008	Mise en service, panne cryogénique

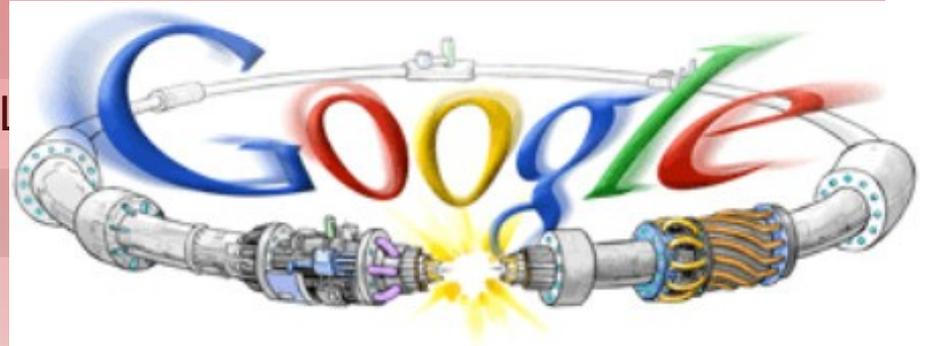
25 ans d'exploitation

Octobre 2009	Redémarrage
Mars 2010	Premières collisions à 7 TeV
Fin 2012	Fin des collisions à 8 TeV
Printemps 2015	Redémarrage à 13 TeV
2023	Fin des collisions à luminosité nominale
2025-2035	Phase à haute luminosité (10 fois plus de données)

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
2023	Fin des collisions à luminosité nominale
2025-2035	Phase à haute luminosité (10 fois plus de données)

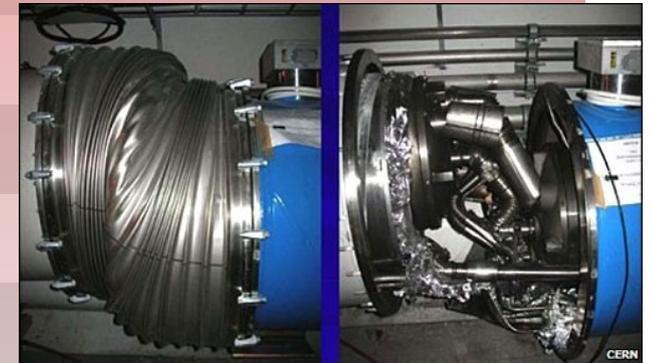
Large Hadron Collider : un projet de longue haleine

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
2023	Fin des collisions à luminosité nominale
2025-2035	Phase à haute luminosité (10 fois plus de données)



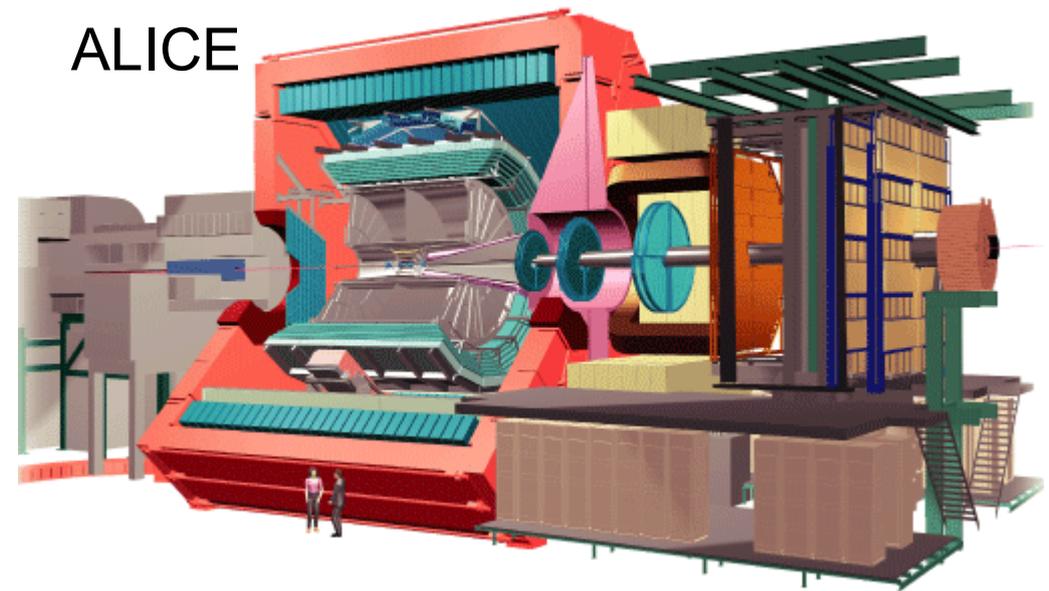
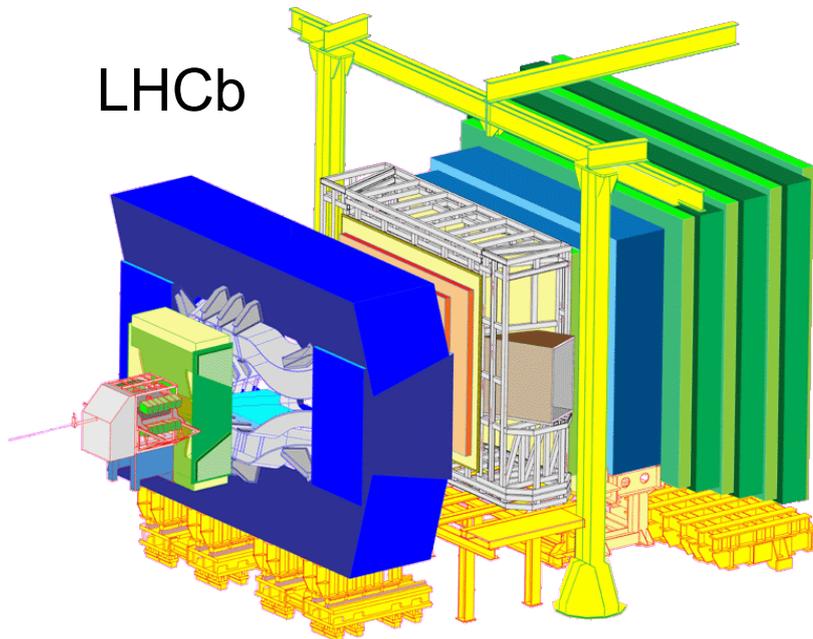
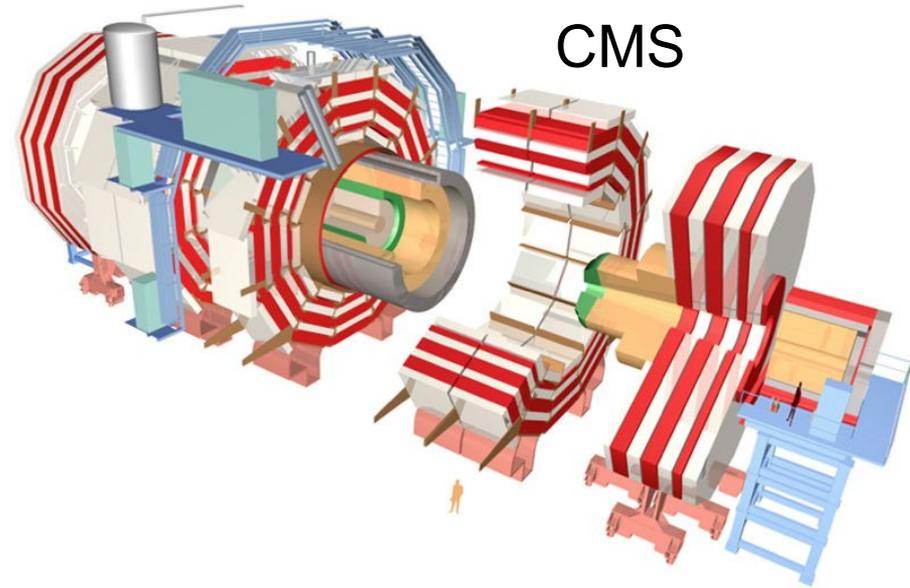
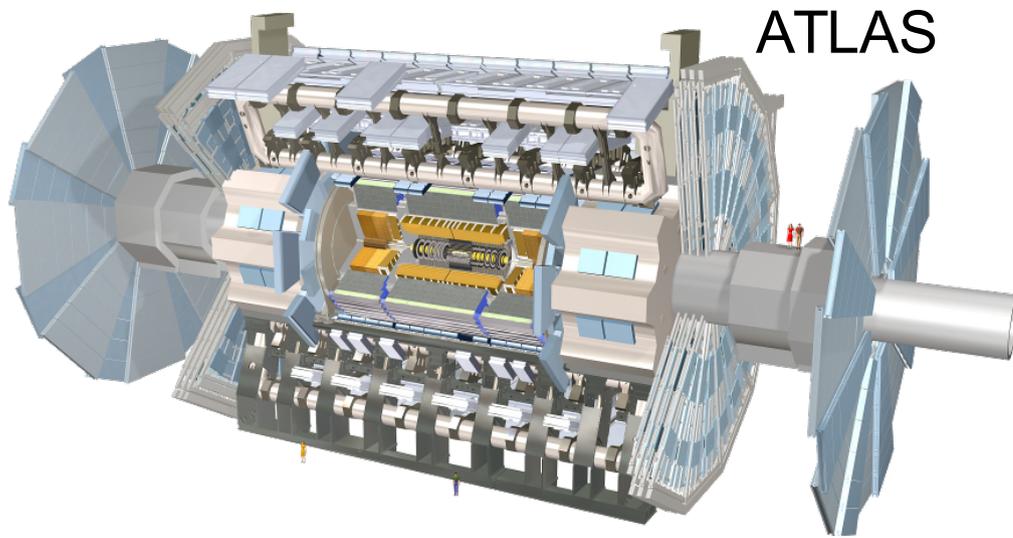
Large Hadron Collider : un projet de longue haleine

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
Octobre 2009	Redémarrage
Mars 2010	Premières collisions à 7 TeV
Fin 2012	Fin des collisions à 8 TeV
Printemps 2015	Redémarrage à 13 TeV
2023	Fin des collisions à luminosité nominale
2025-2035	Phase à haute luminosité (10 fois plus de données)

25 ans d'exploitation

Les détecteurs géants du LHC



La collaboration ATLAS



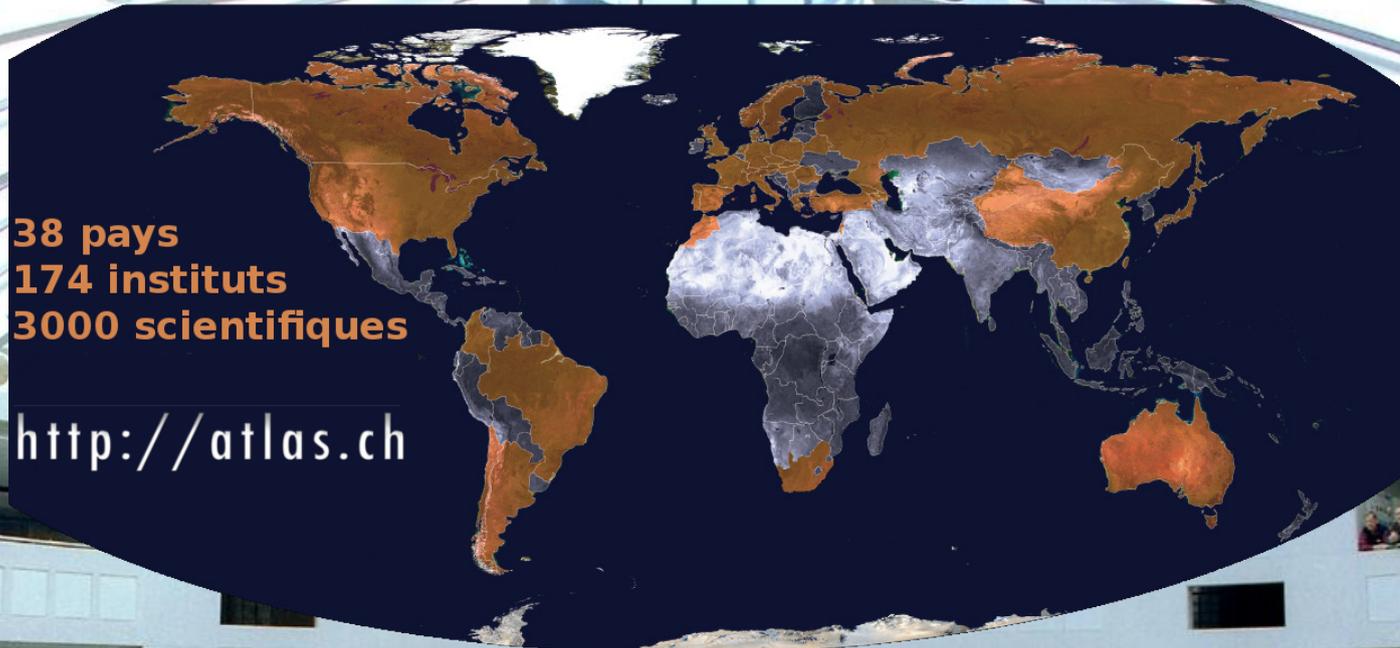
C

D

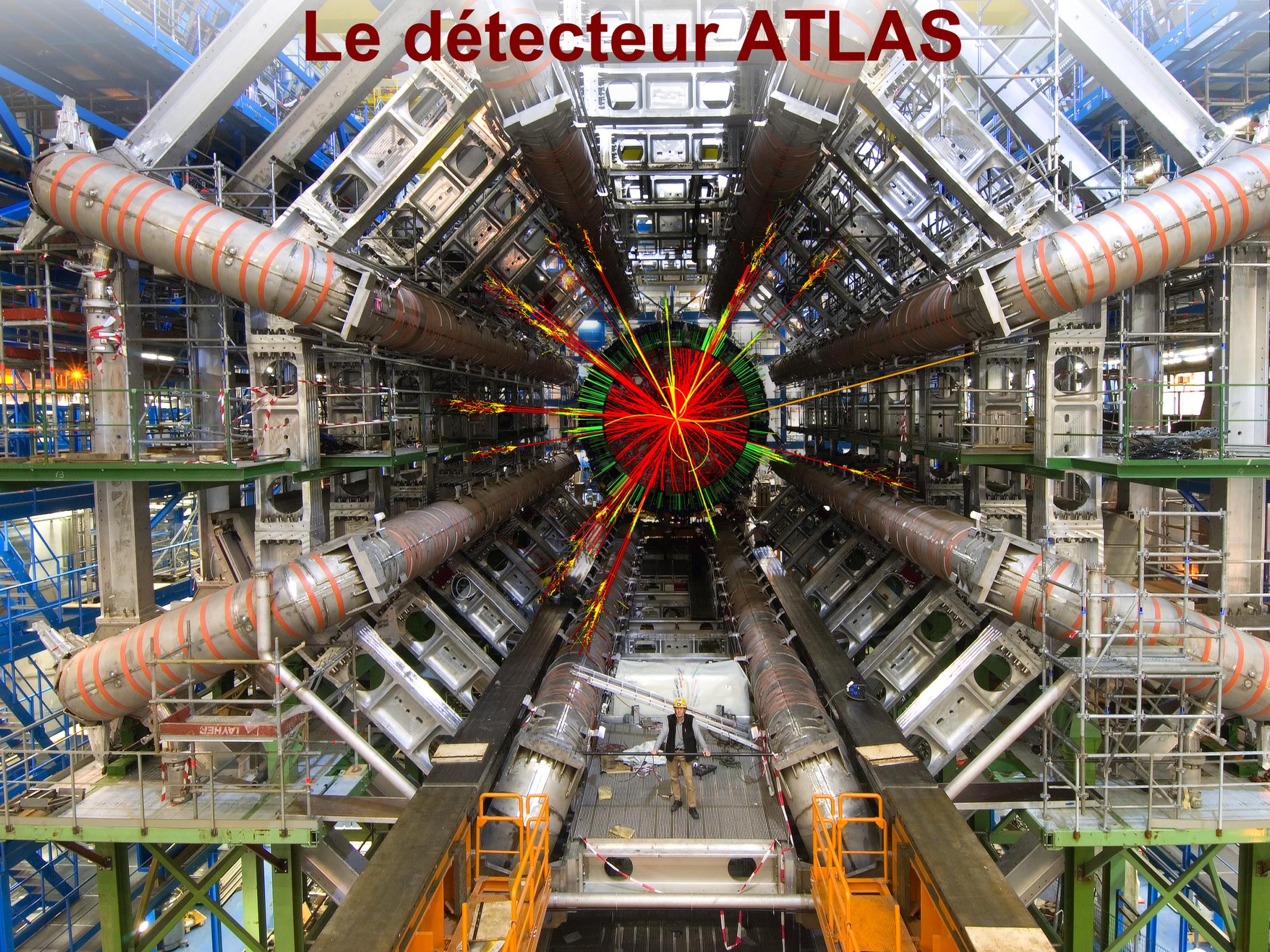
La collaboration ATLAS

38 pays
174 instituts
3000 scientifiques

<http://atlas.ch>

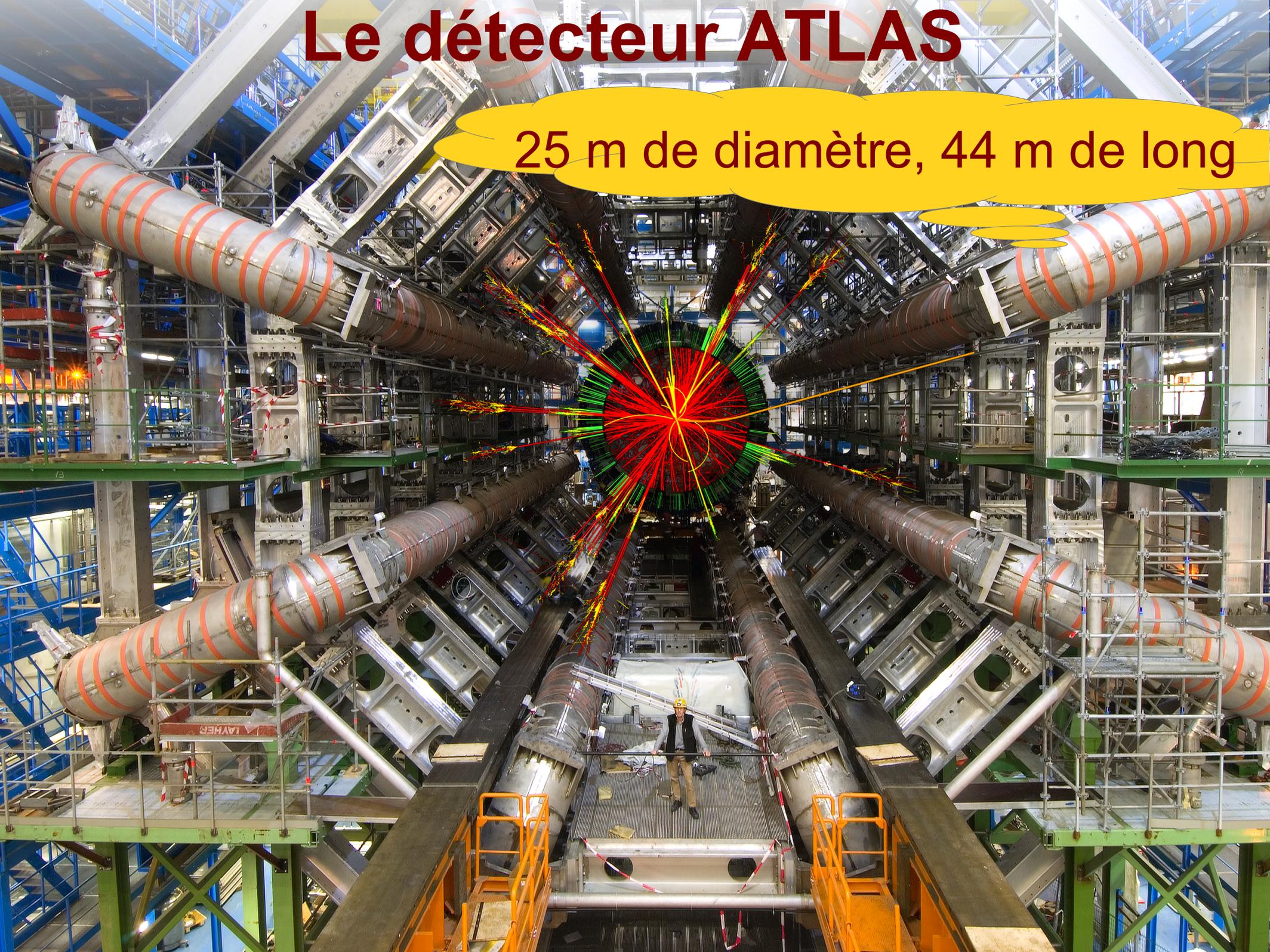


Le détecteur ATLAS



Le détecteur ATLAS

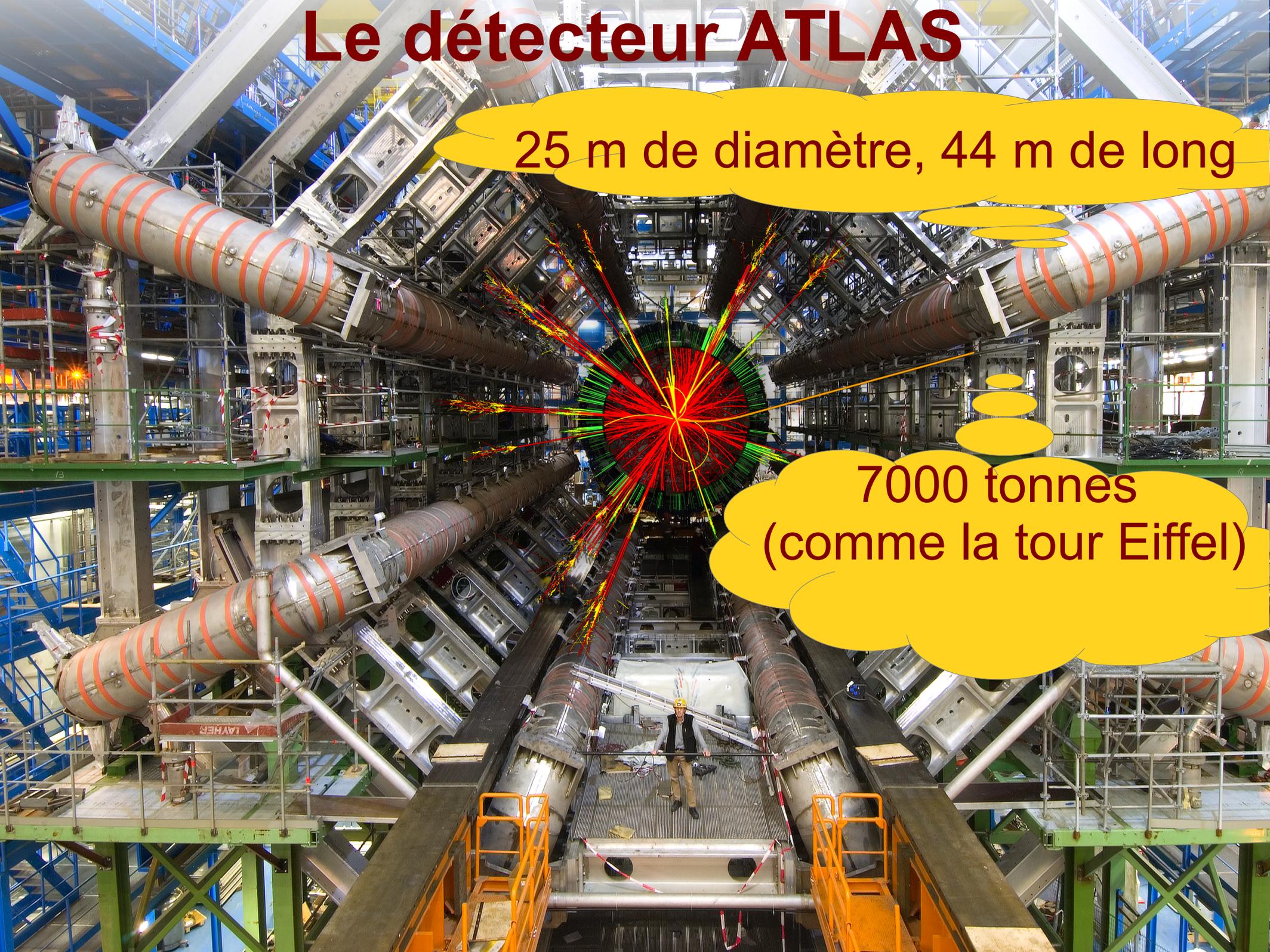
25 m de diamètre, 44 m de long



Le détecteur ATLAS

25 m de diamètre, 44 m de long

7000 tonnes
(comme la tour Eiffel)

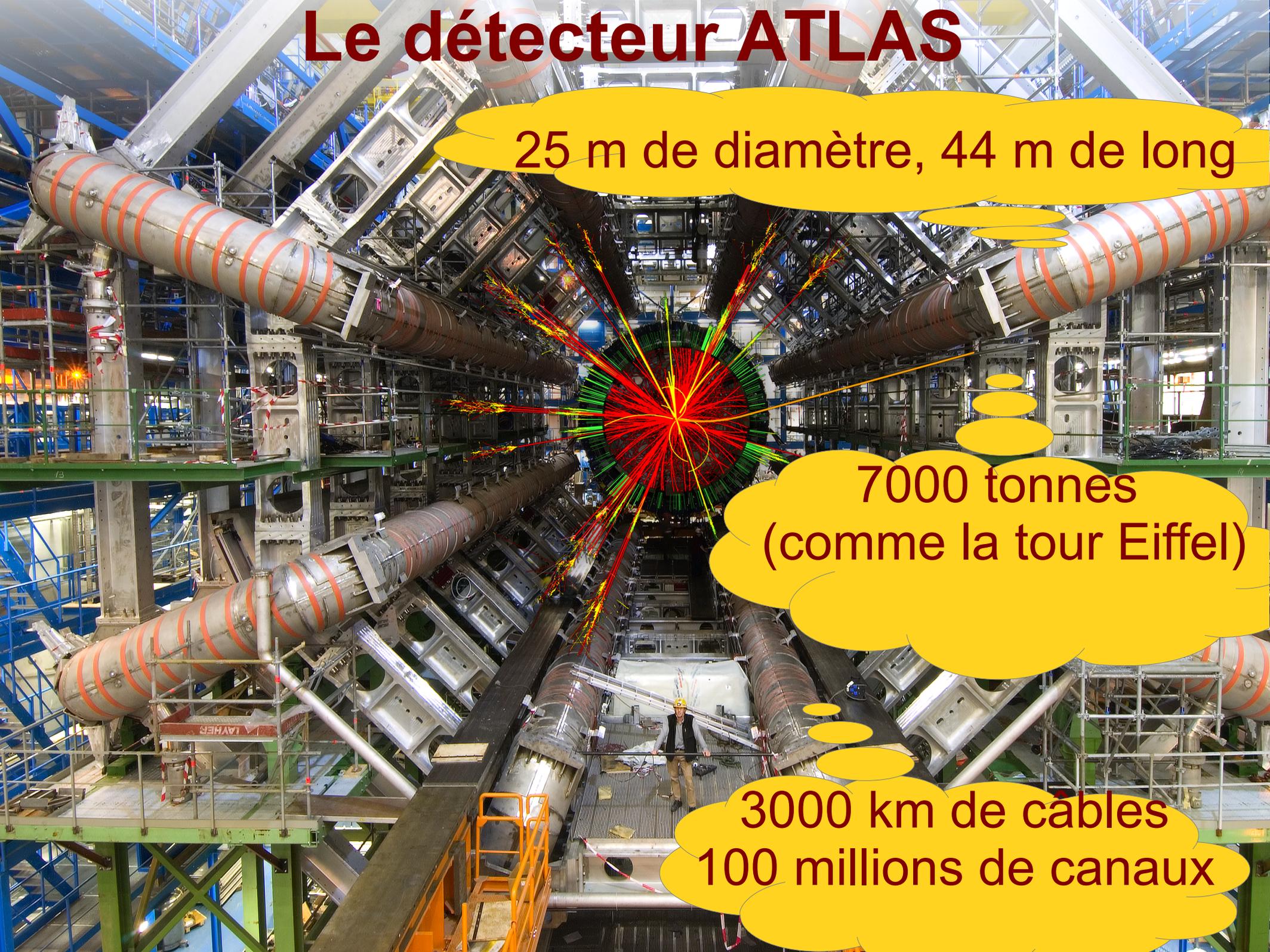


Le détecteur ATLAS

25 m de diamètre, 44 m de long

7000 tonnes
(comme la tour Eiffel)

3000 km de câbles
100 millions de canaux



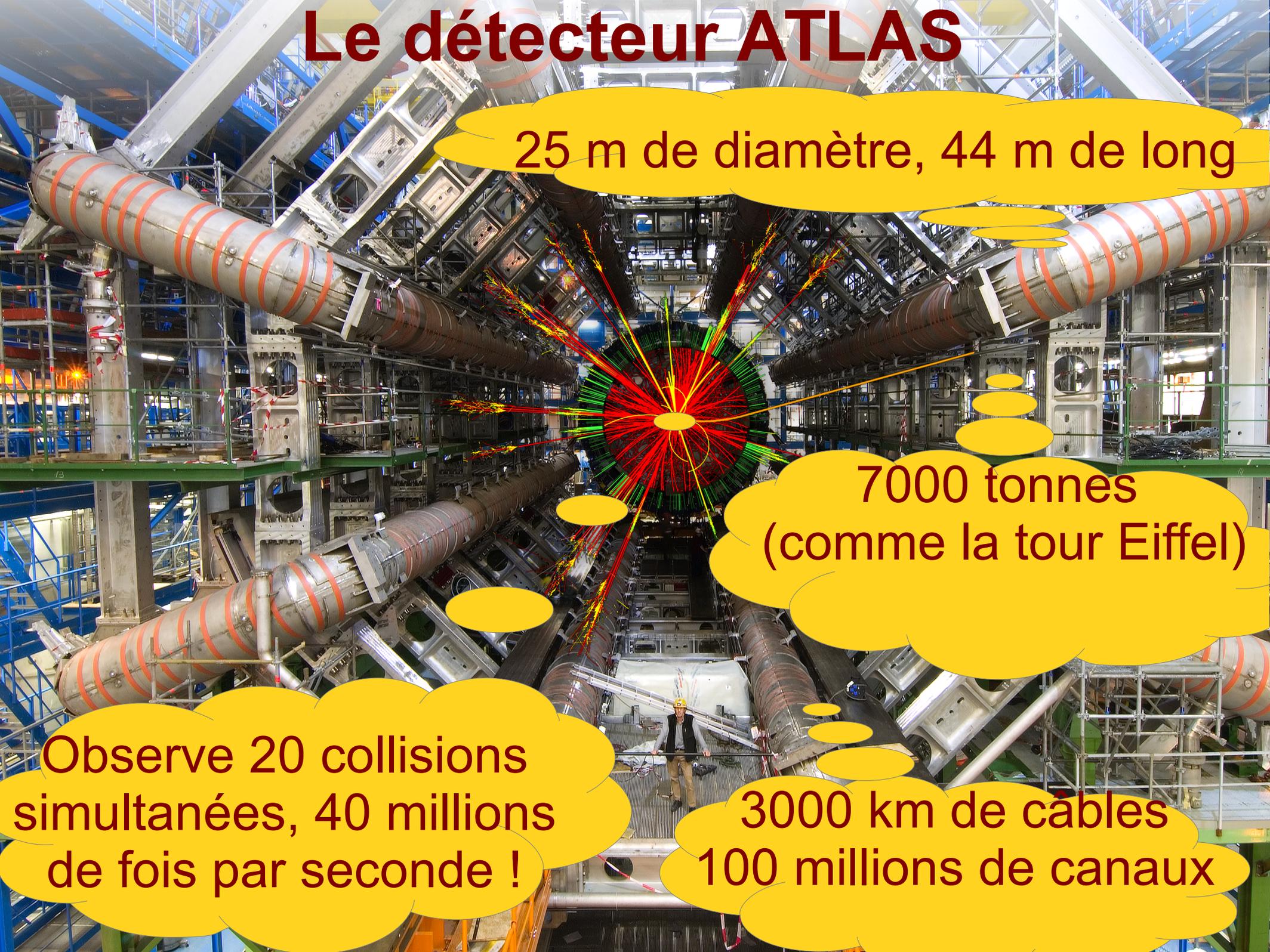
Le détecteur ATLAS

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 !

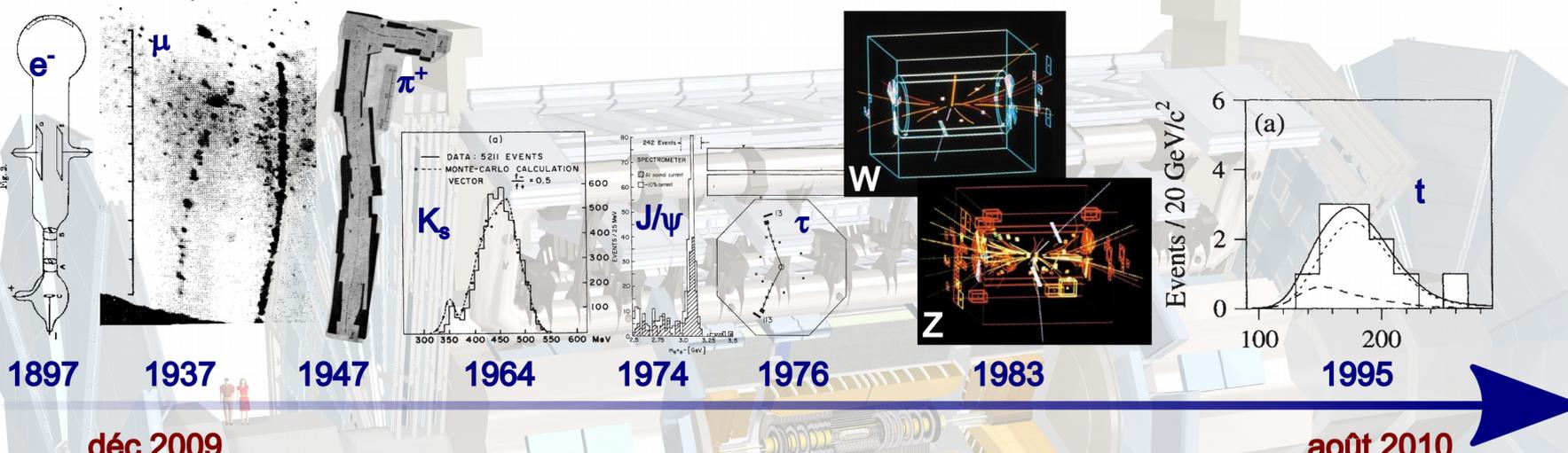
3000 km de câbles
100 millions de canaux



Le modèle standard redécouvert

LHC 2010 : un siècle en un an

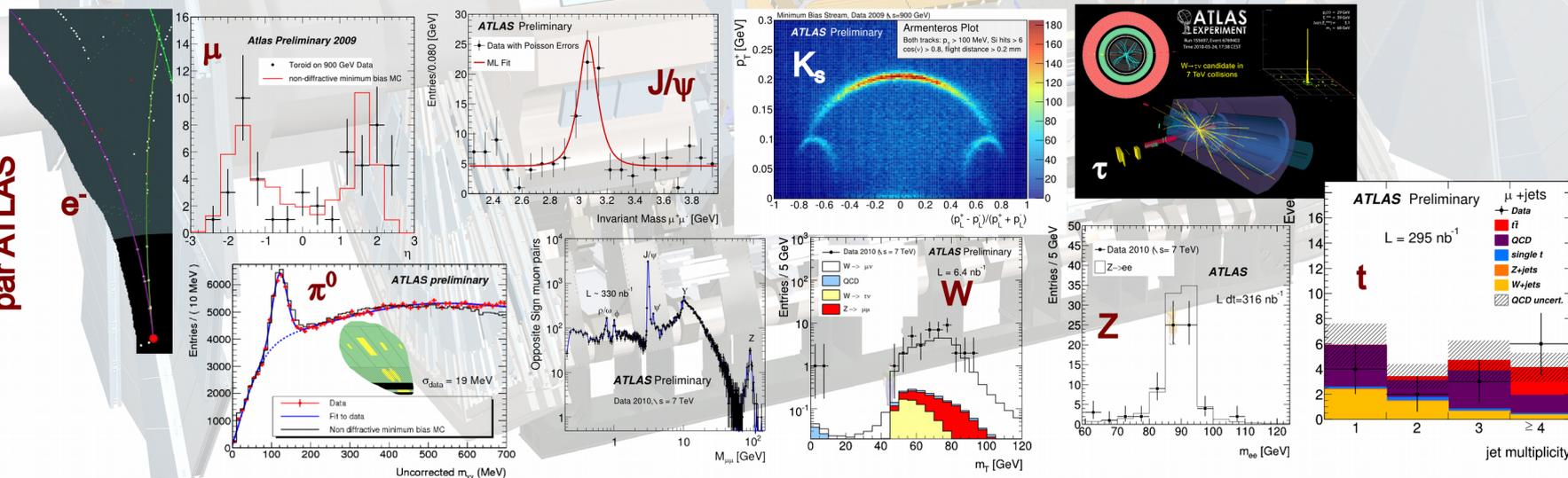
Découverte historique



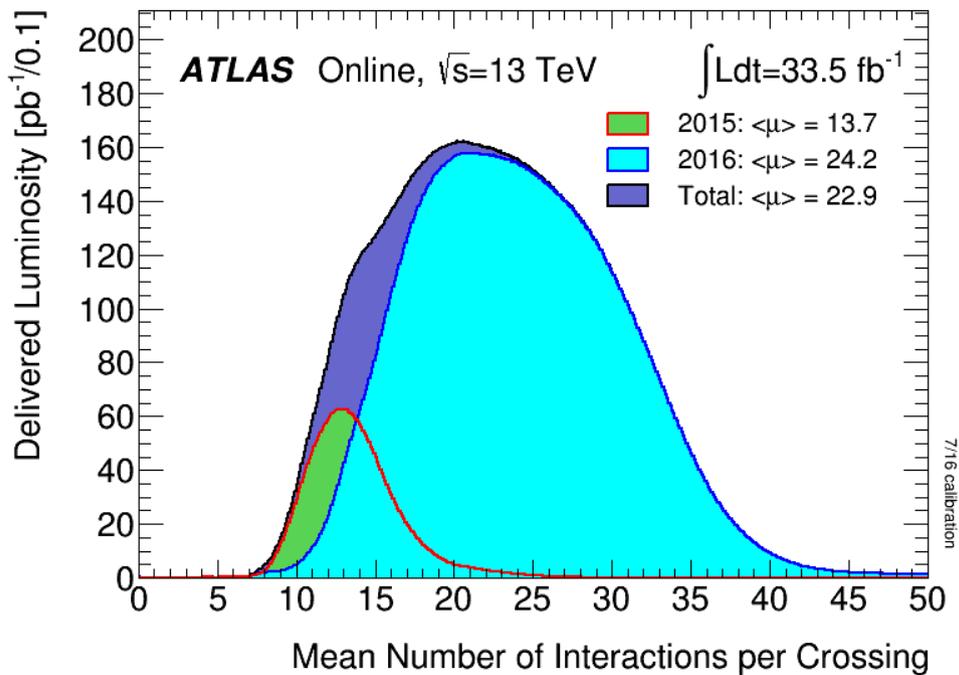
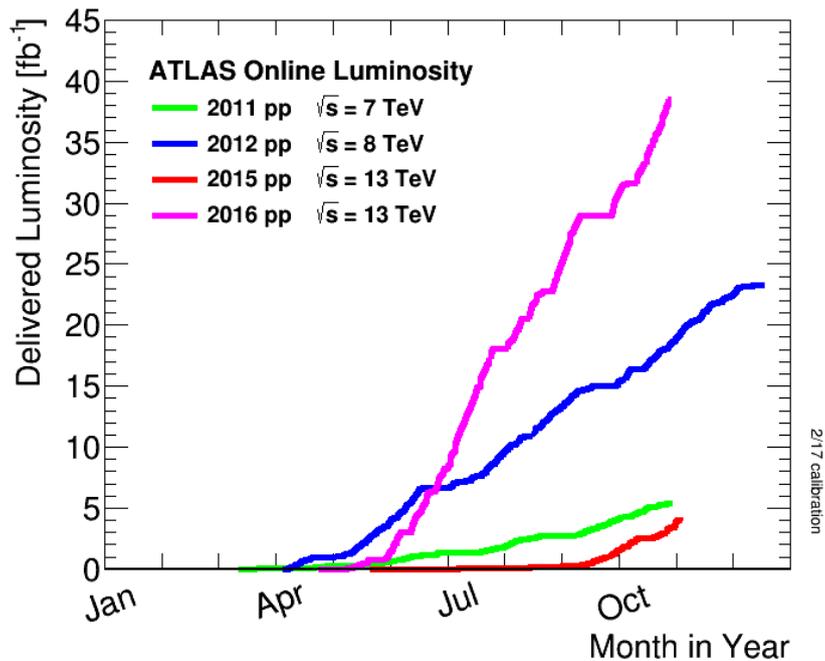
déc 2009

août 2010

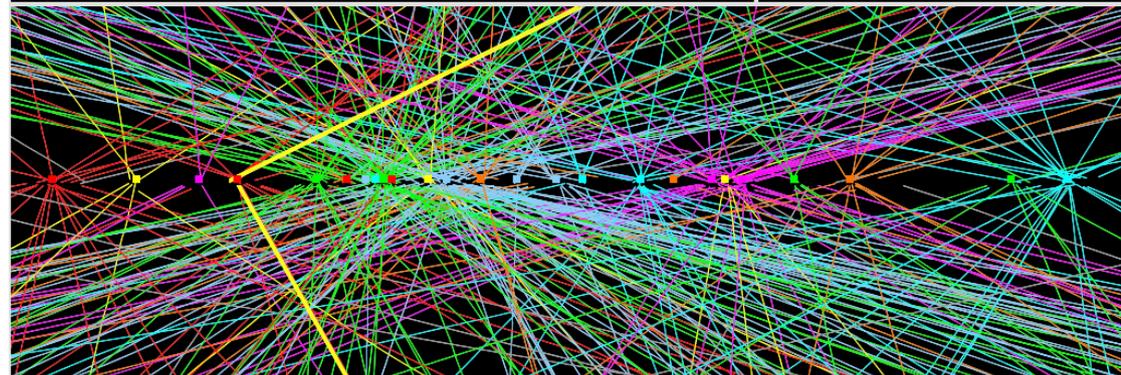
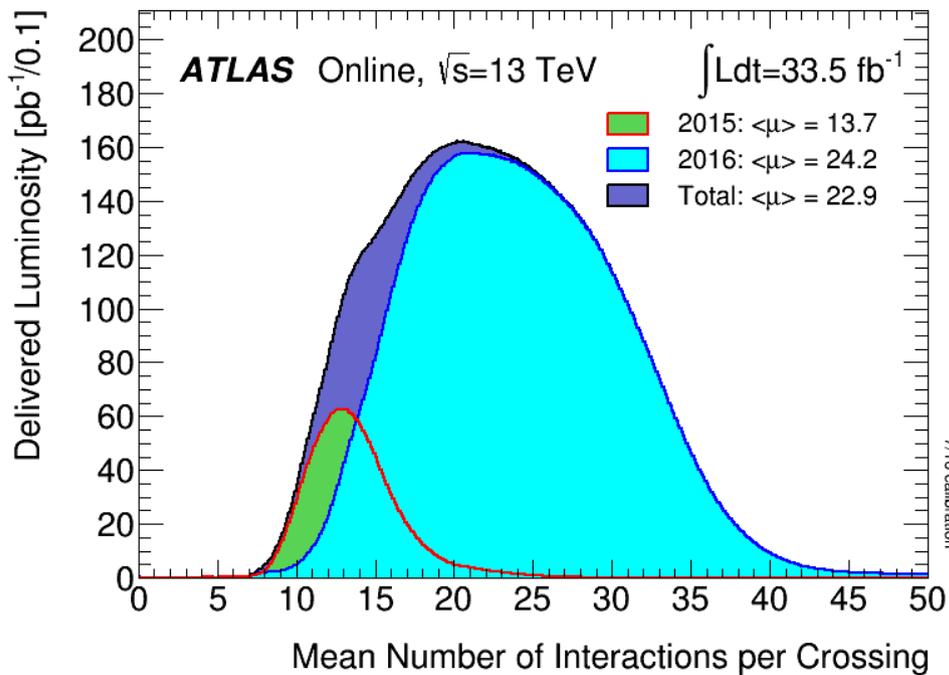
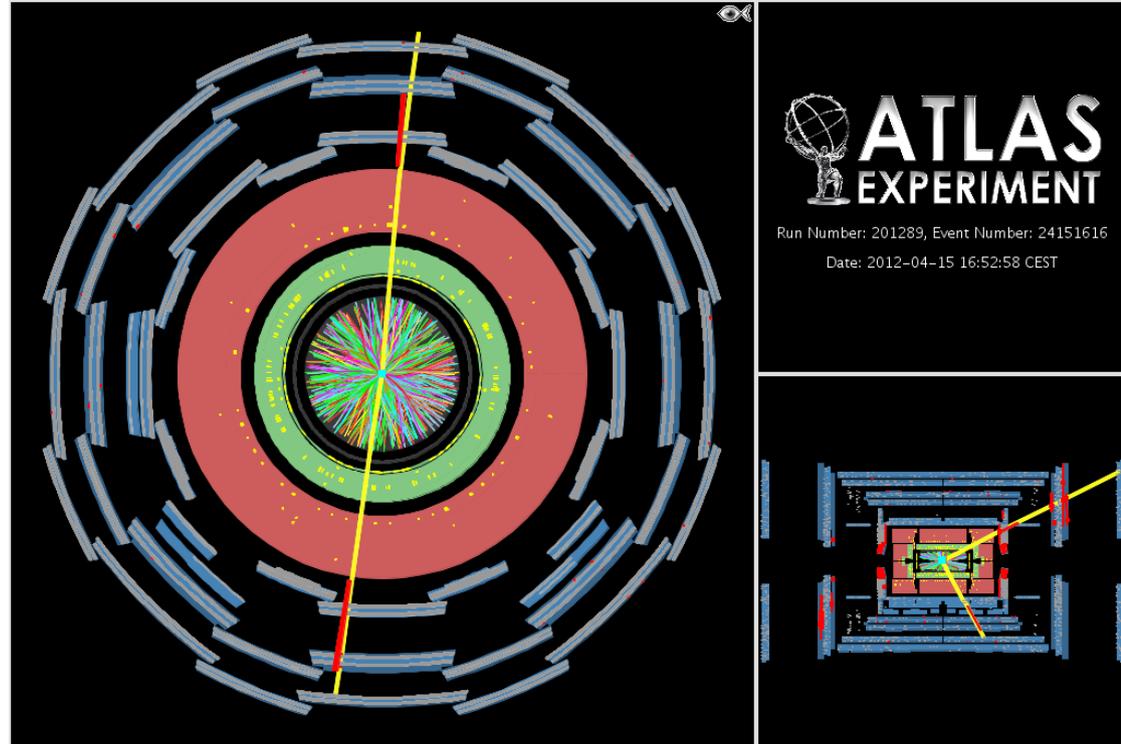
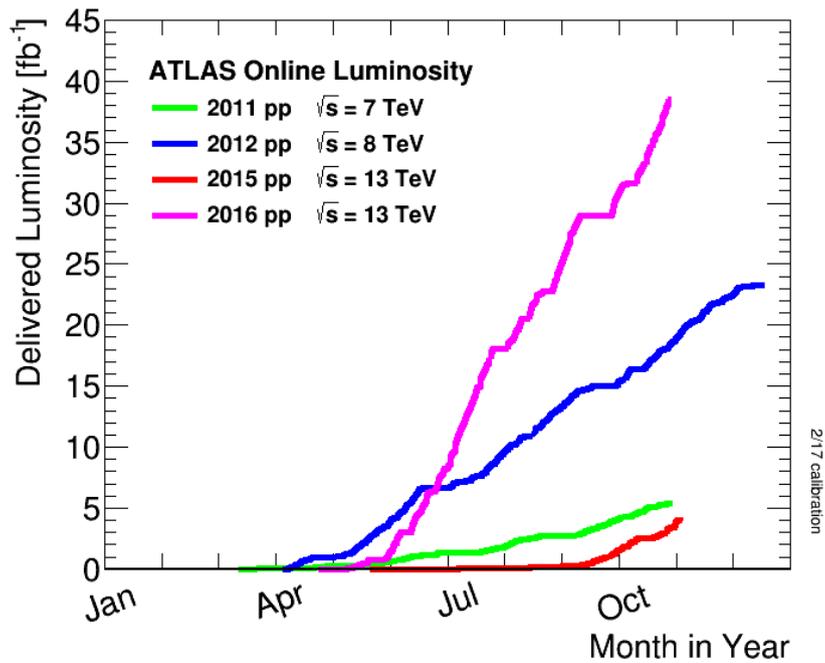
Redécouverte par ATLAS



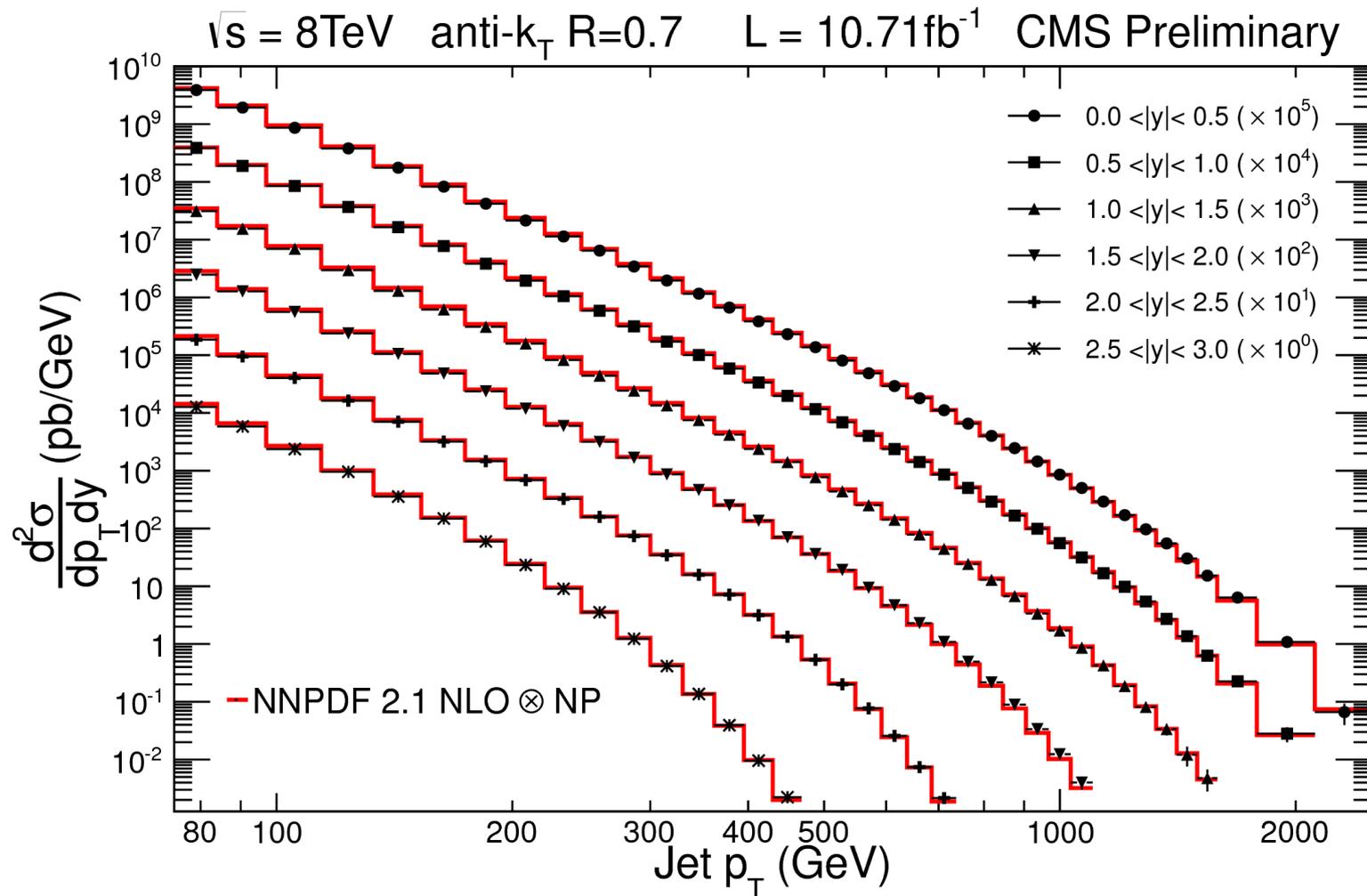
Accumulation des données



Accumulation des données

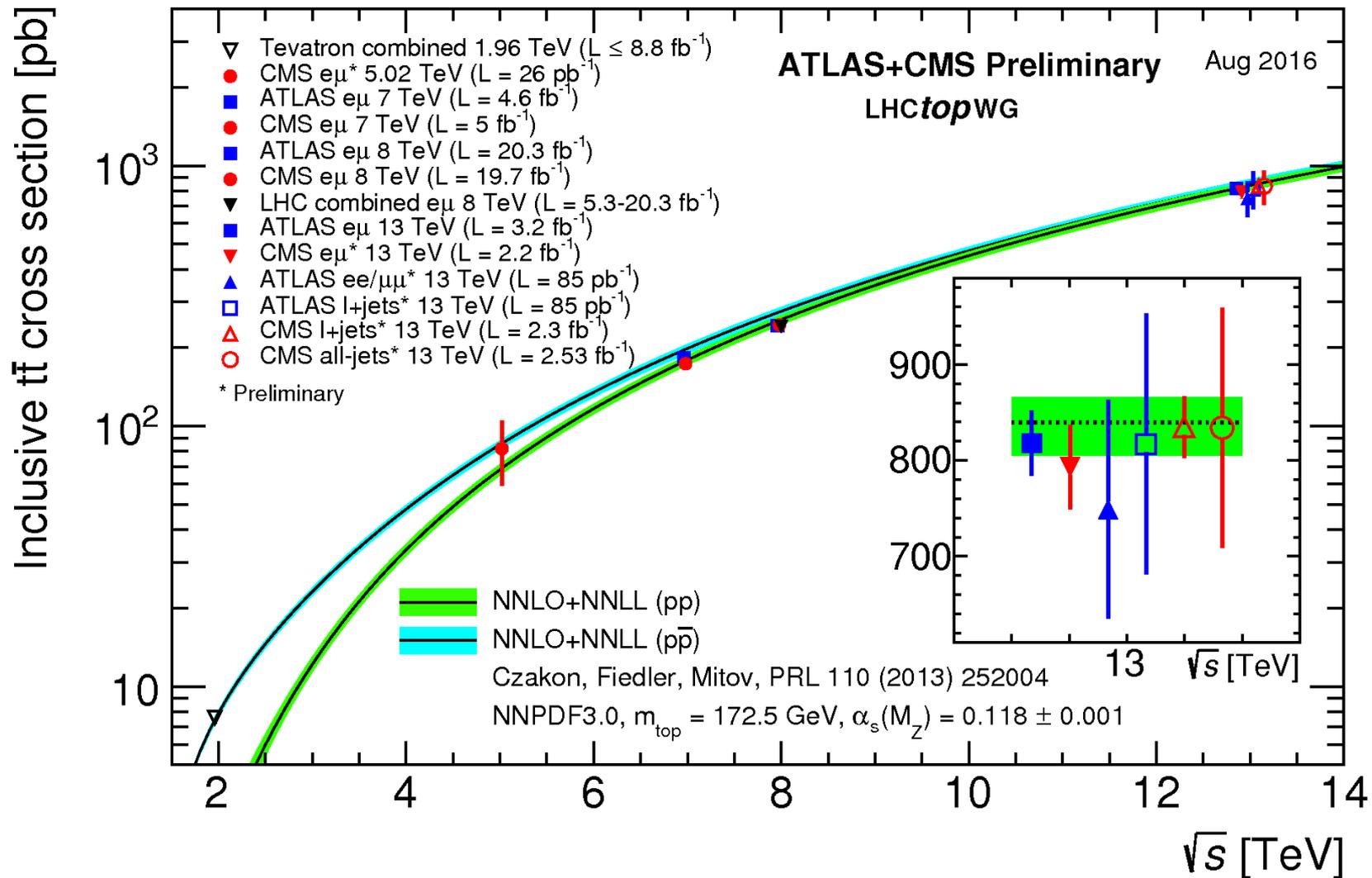


Accord sur de nombreux ordres de grandeur



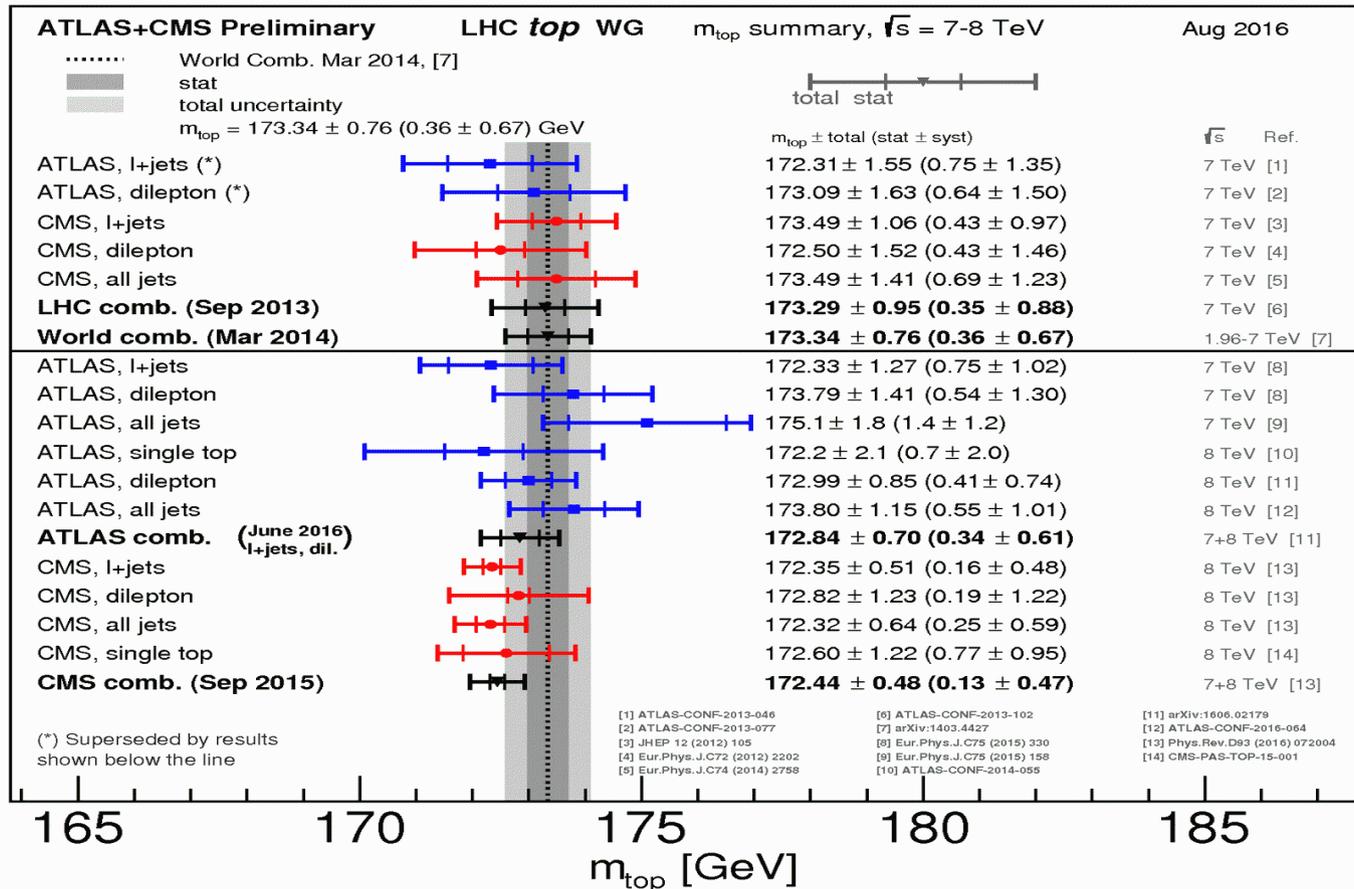
- Quantité de mouvement dans le plan transverse de jets de particules

Production de quarks top



- Toujours en accord avec les prédictions, à 7, 8 et 13 TeV

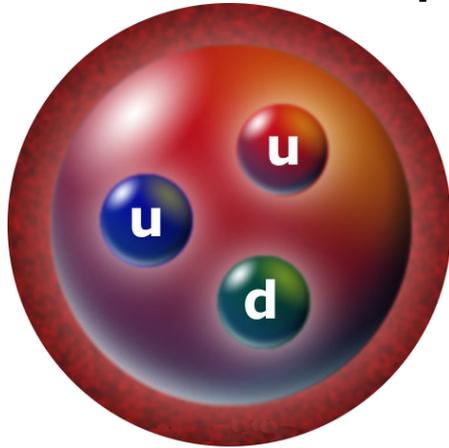
Masse du quark top



- Paramètre important du modèle standard
- Capacités du LHC : une seule expérience fait déjà aussi bien que toutes les mesures de l'accélérateur précédent

La masse

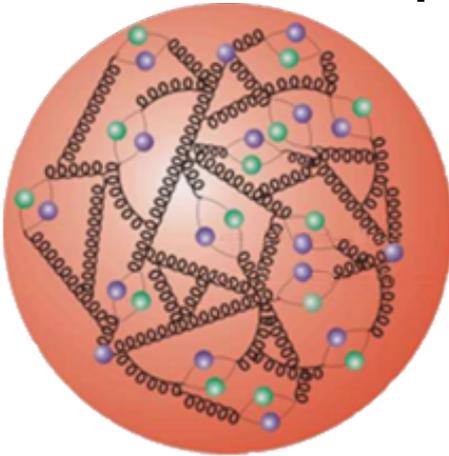
- Notre masse : celle de nos atomes
- Masse des atomes : presque uniquement celle des noyaux, faits de protons et neutrons de masse ~ 1 GeV



- Proton, neutron : 3 quarks, masse ~ 10 MeV

La masse

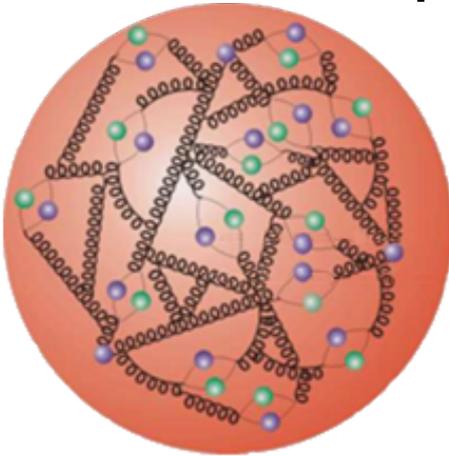
- Notre masse : celle de nos atomes
- Masse des atomes : presque uniquement celle des noyaux, faits de protons et neutrons de masse ~ 1 GeV



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

La masse

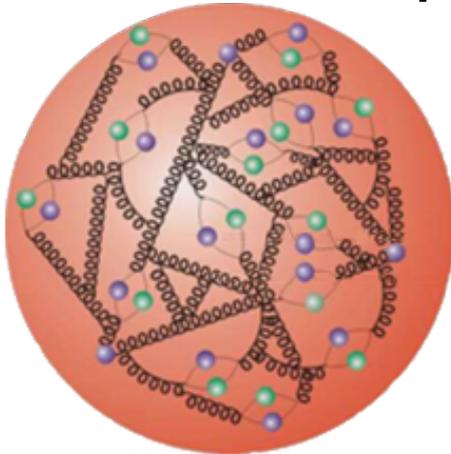
- Notre masse : celle de nos atomes
- Masse des atomes : presque uniquement celle des noyaux, faits de protons et neutrons de masse ~ 1 GeV



- 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

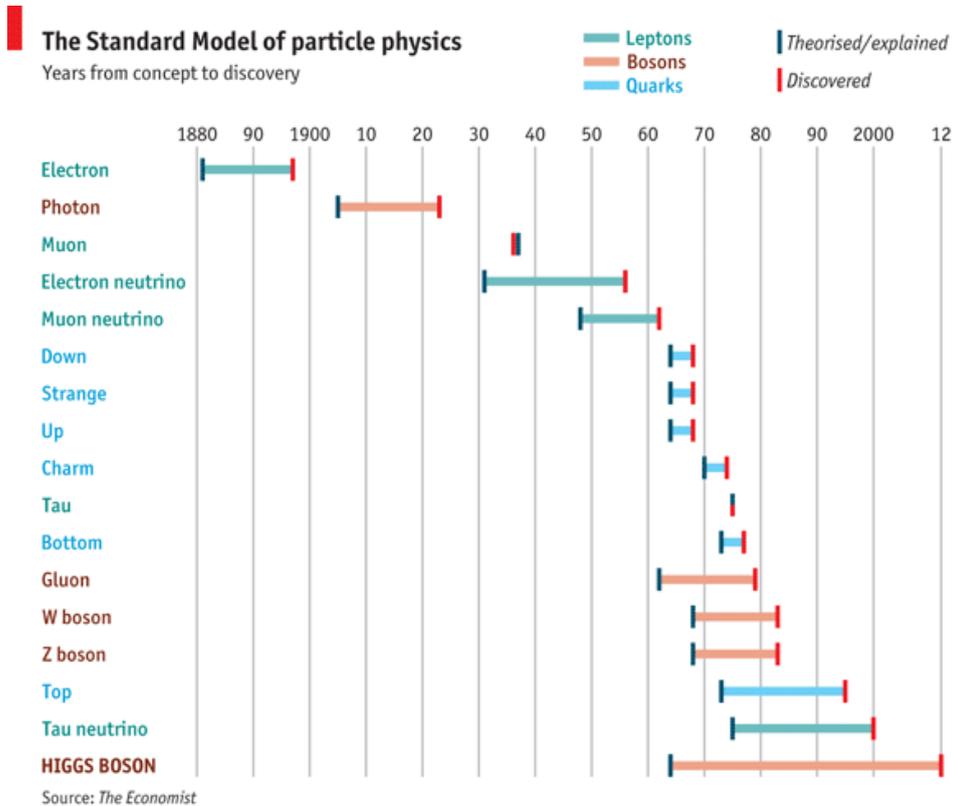
La masse

- Notre masse : celle de nos atomes
- Masse des atomes : presque uniquement celle des noyaux, faits de protons et neutrons de masse ~ 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...

Une longue quête

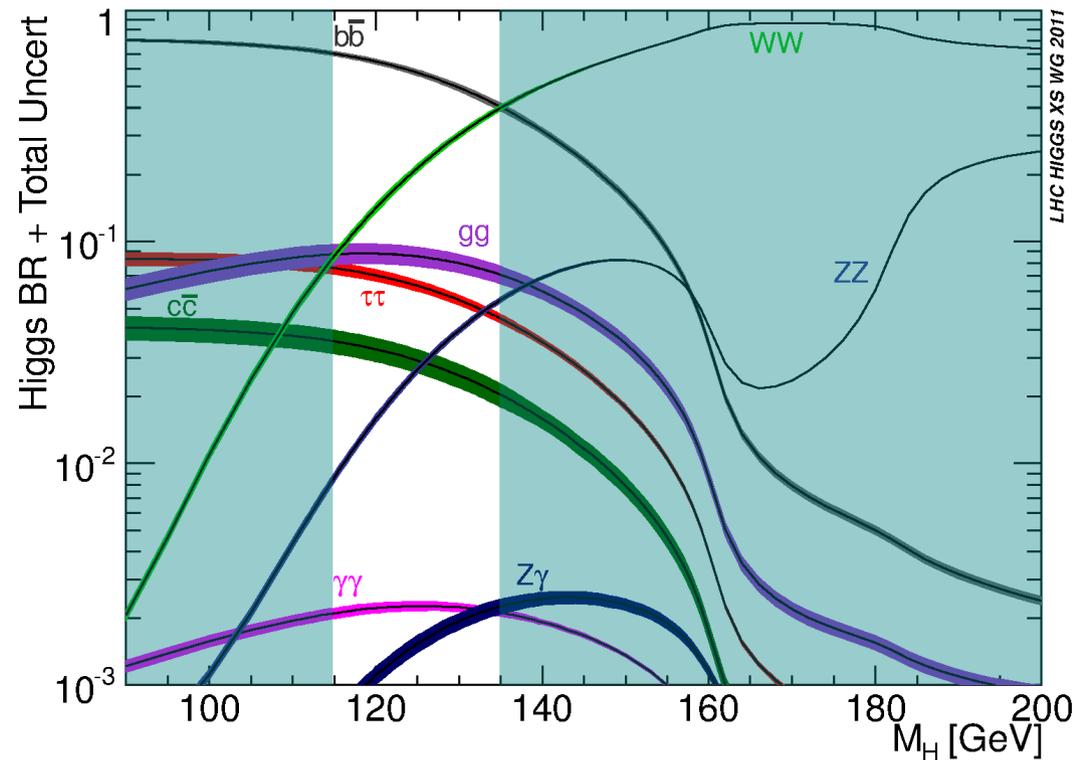


© The Economist

- 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...

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



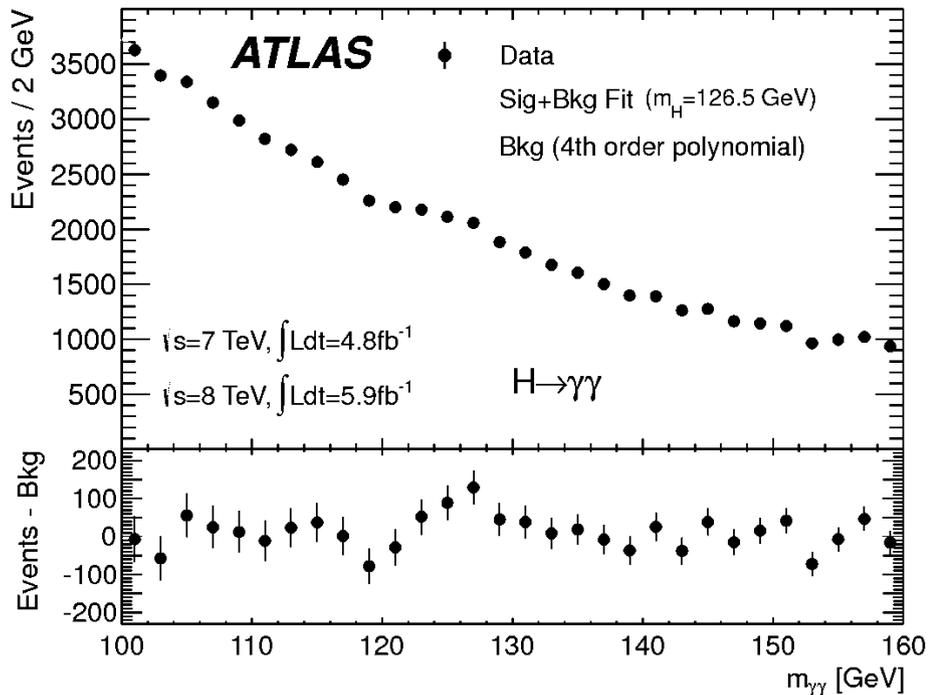
Encore plus dur qu'une aiguille dans une botte de foin

- 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



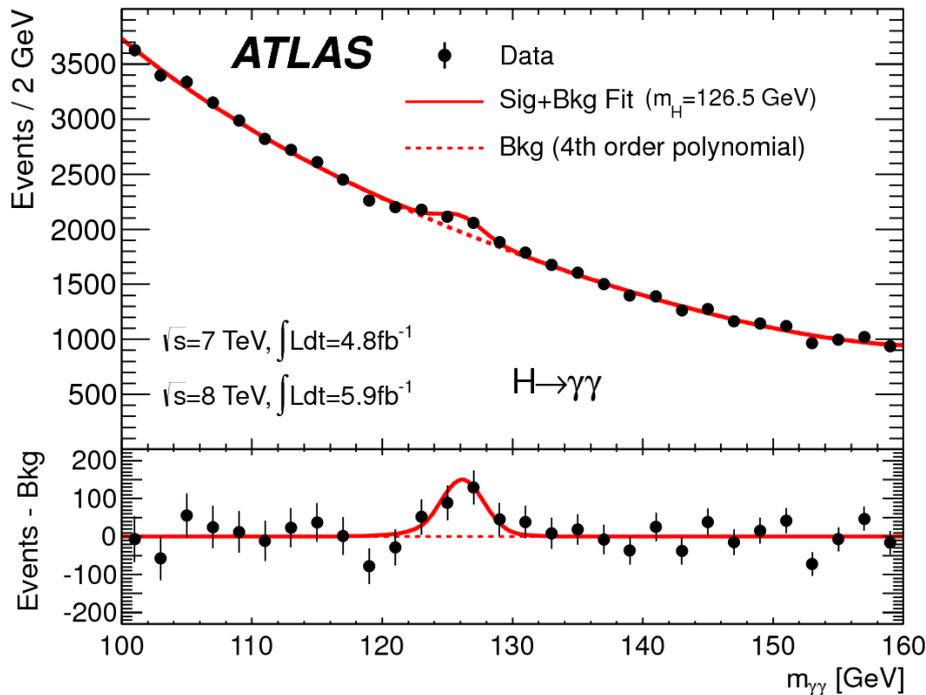
Mesure

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



Mesure

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



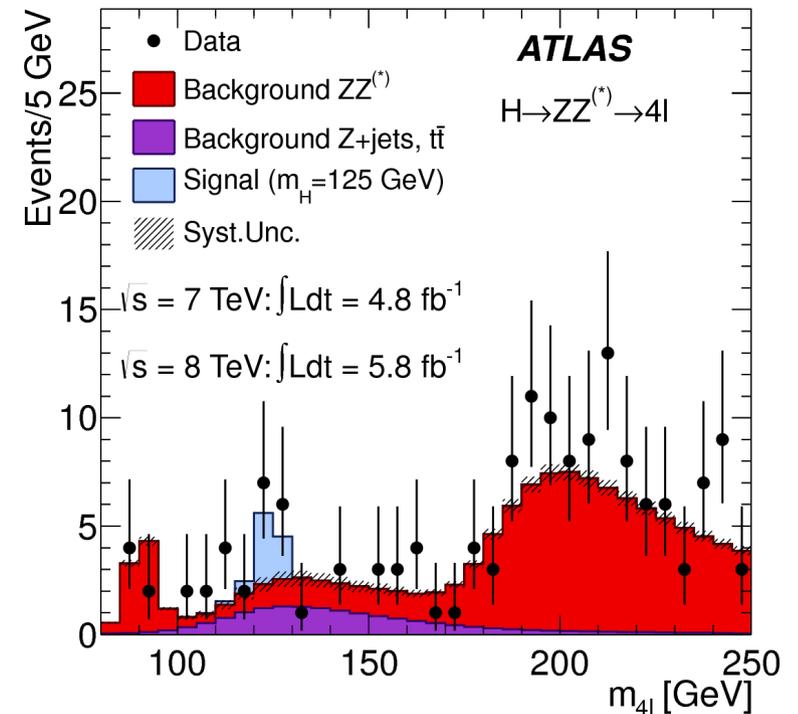
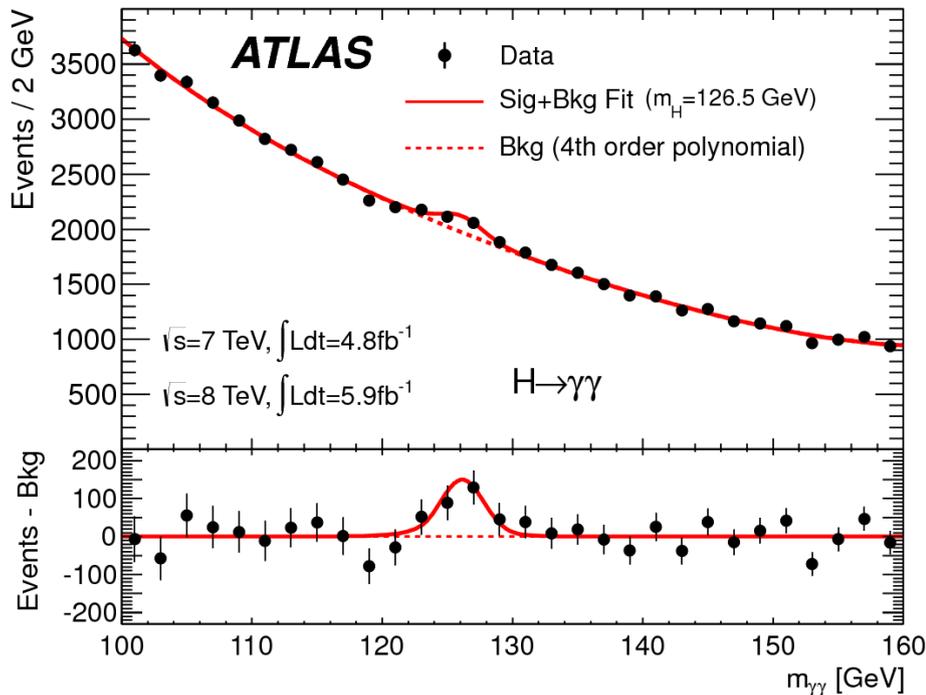
Mesure

- Higgs en 2 photons

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

- Higgs en ZZ

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



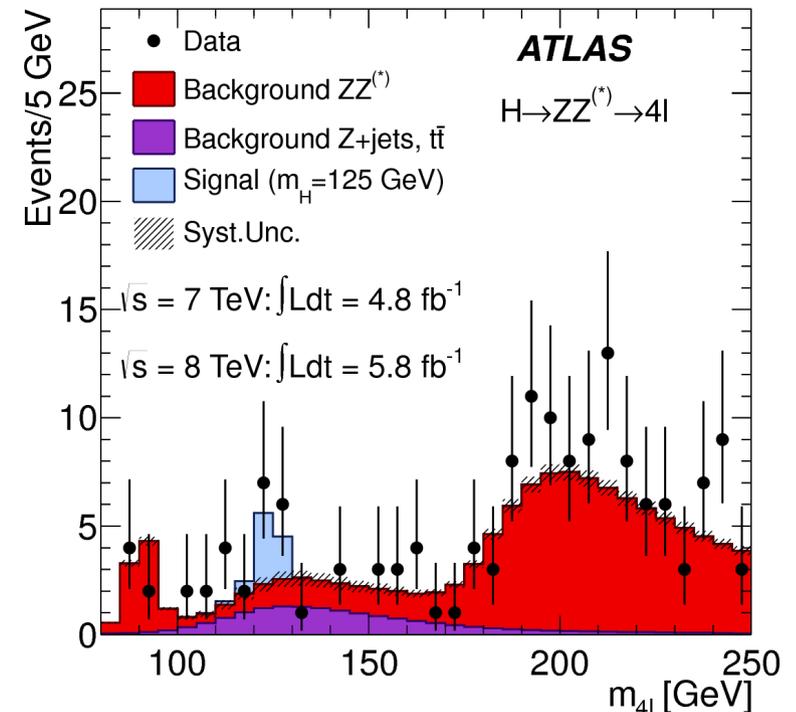
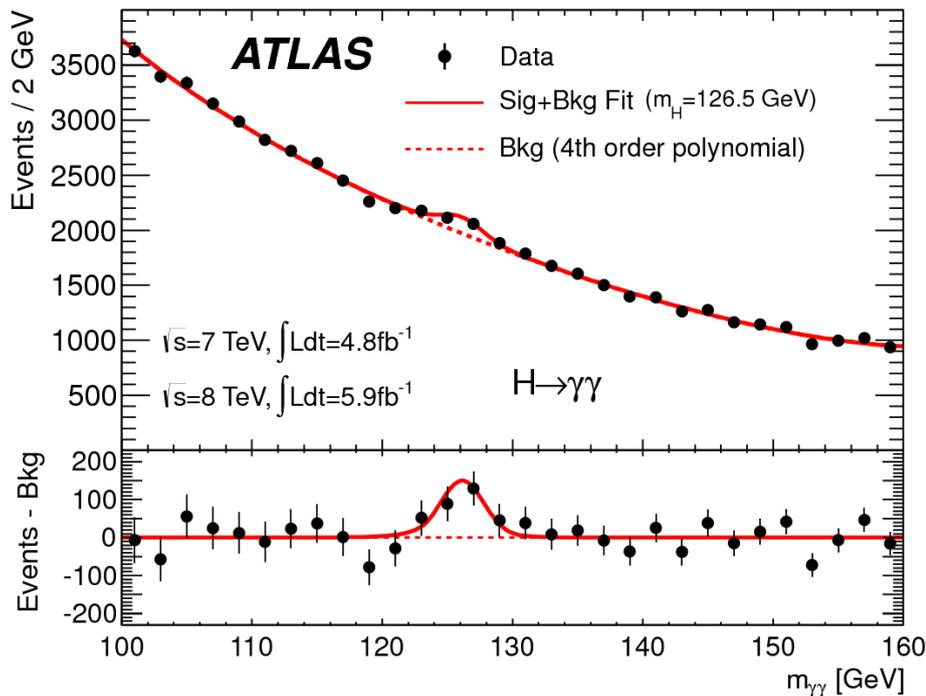
Mesure

- Higgs en 2 photons

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

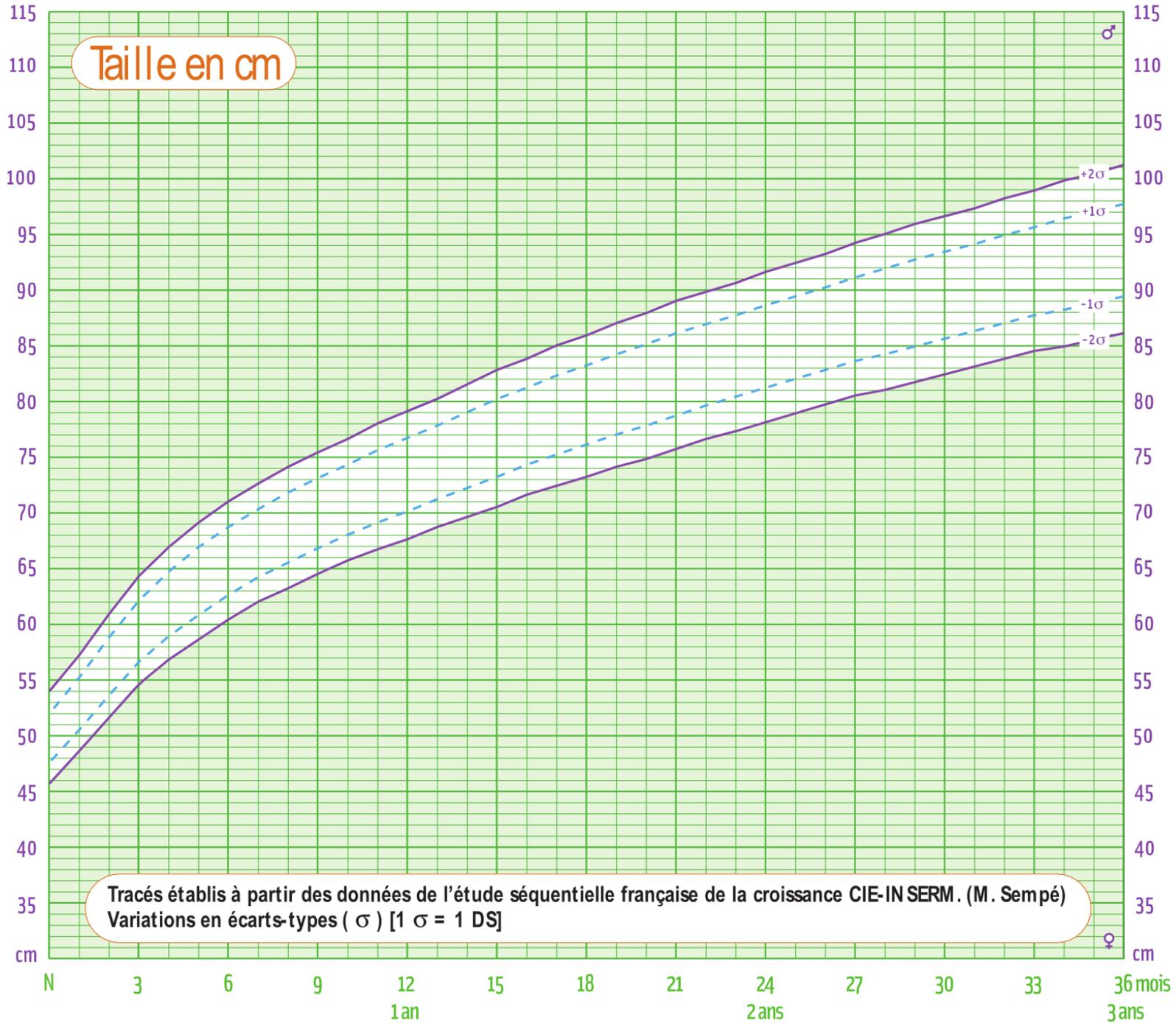
- Higgs en ZZ

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

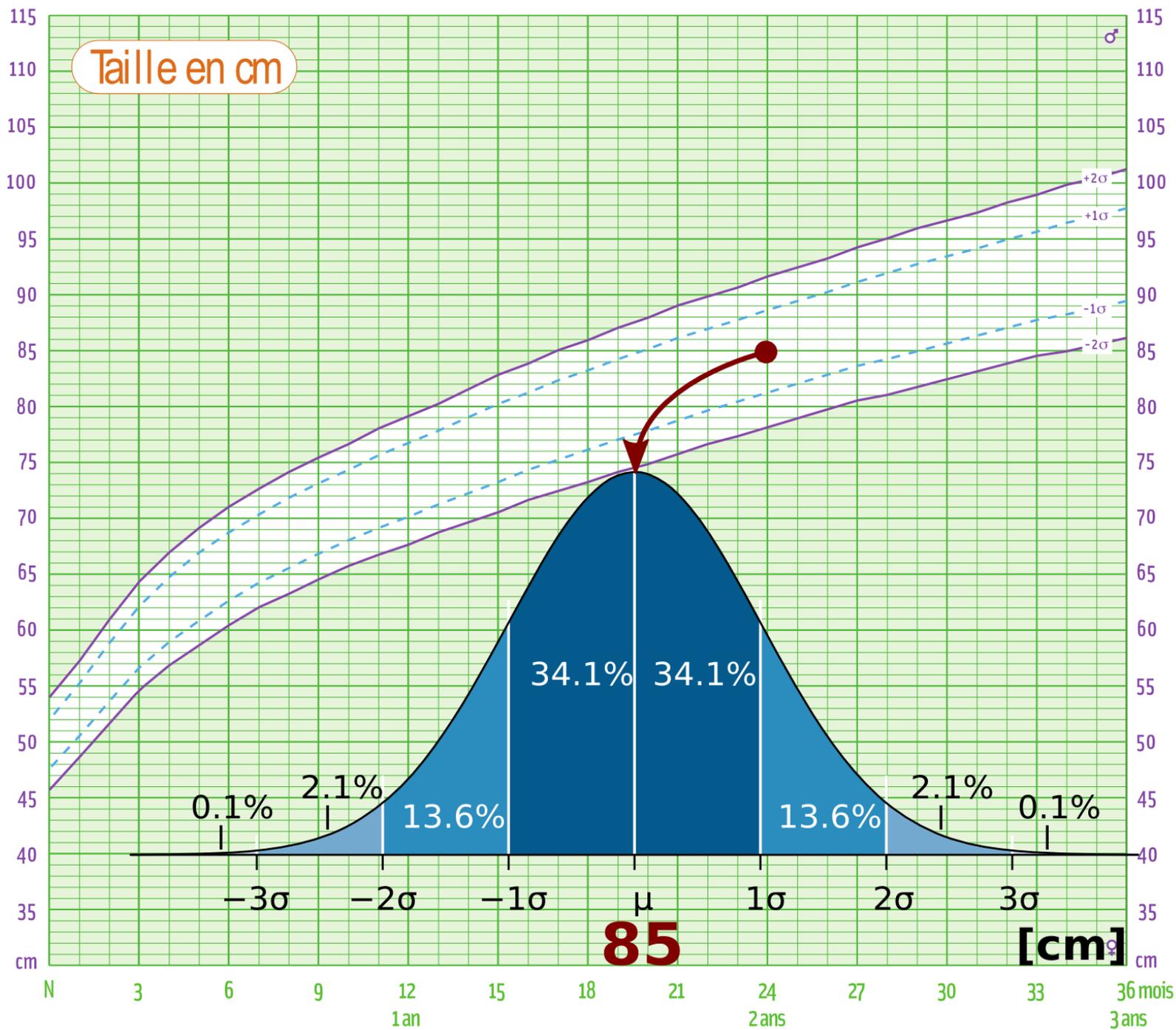


Est-ce que cela est significatif ?
Outils statistiques pour répondre

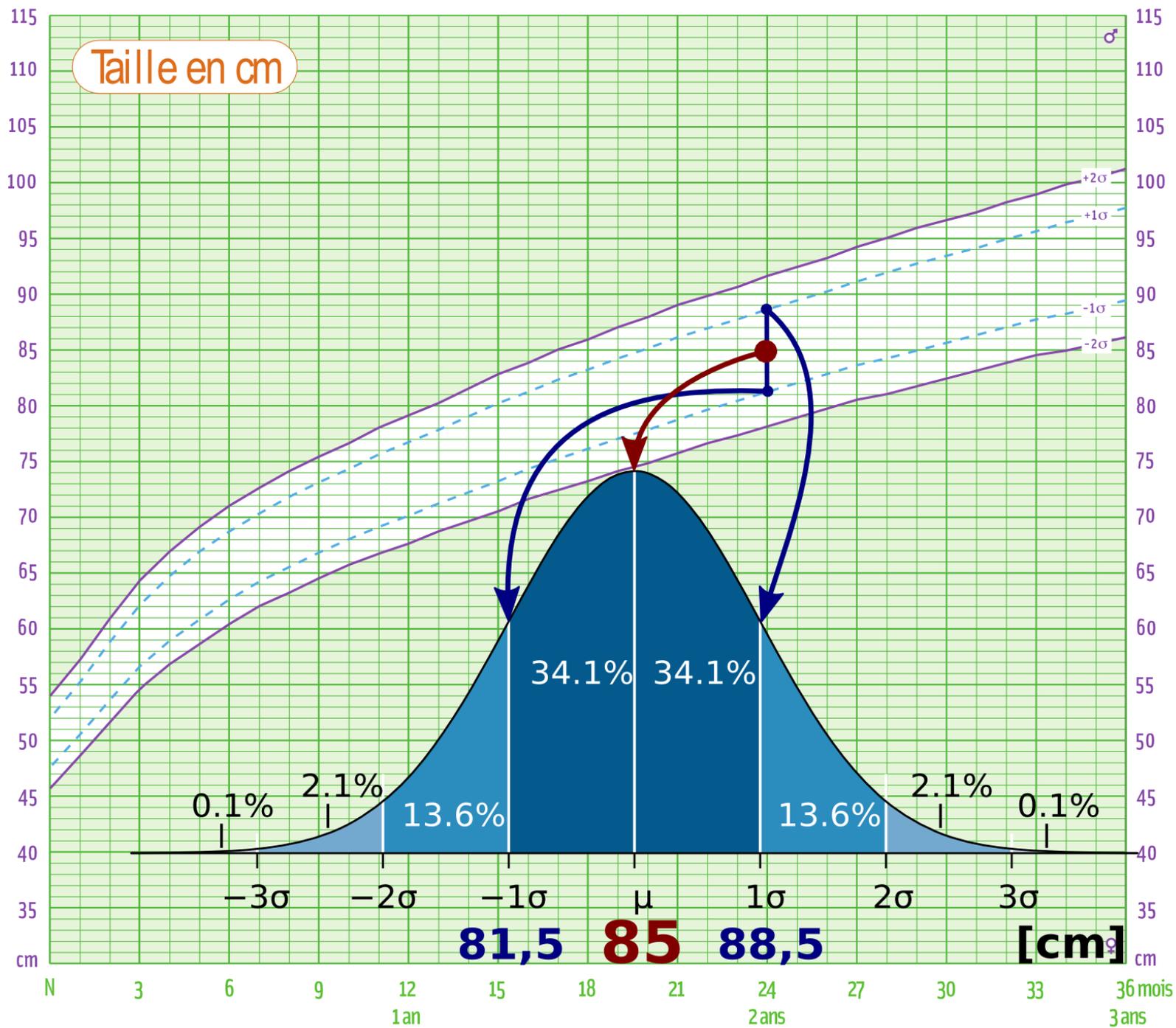
La Gaussienne



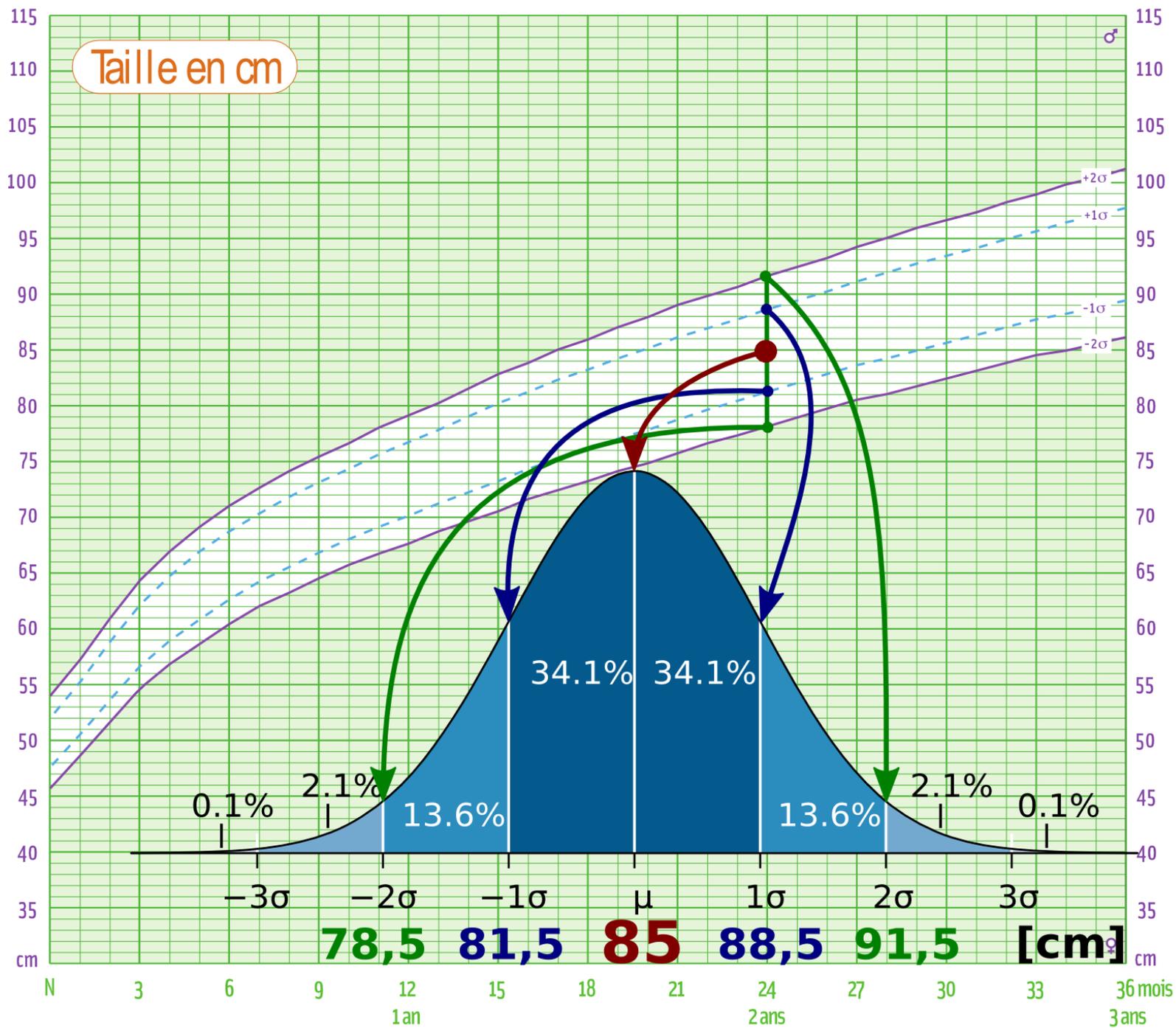
La Gaussienne



La Gaussienne



La Gaussienne



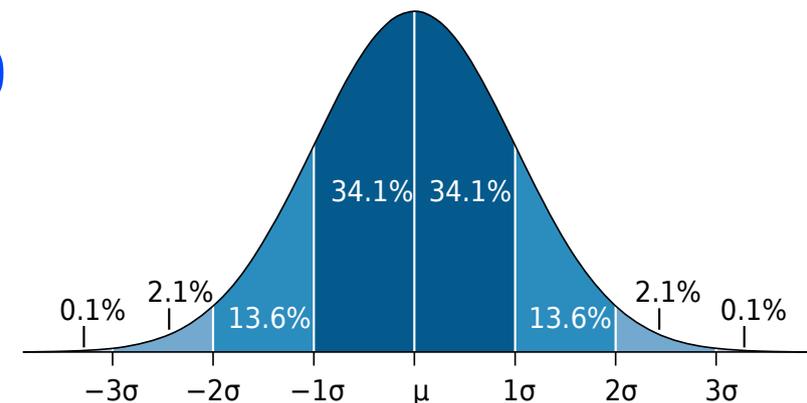
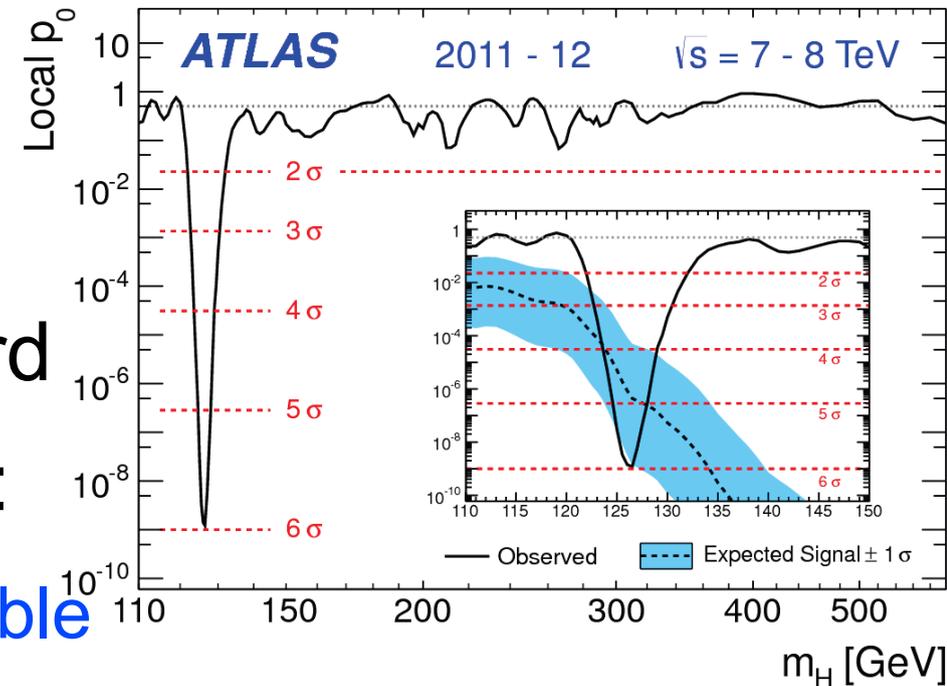
Résultat sur le Higgs : est-ce significatif statistiquement ?

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

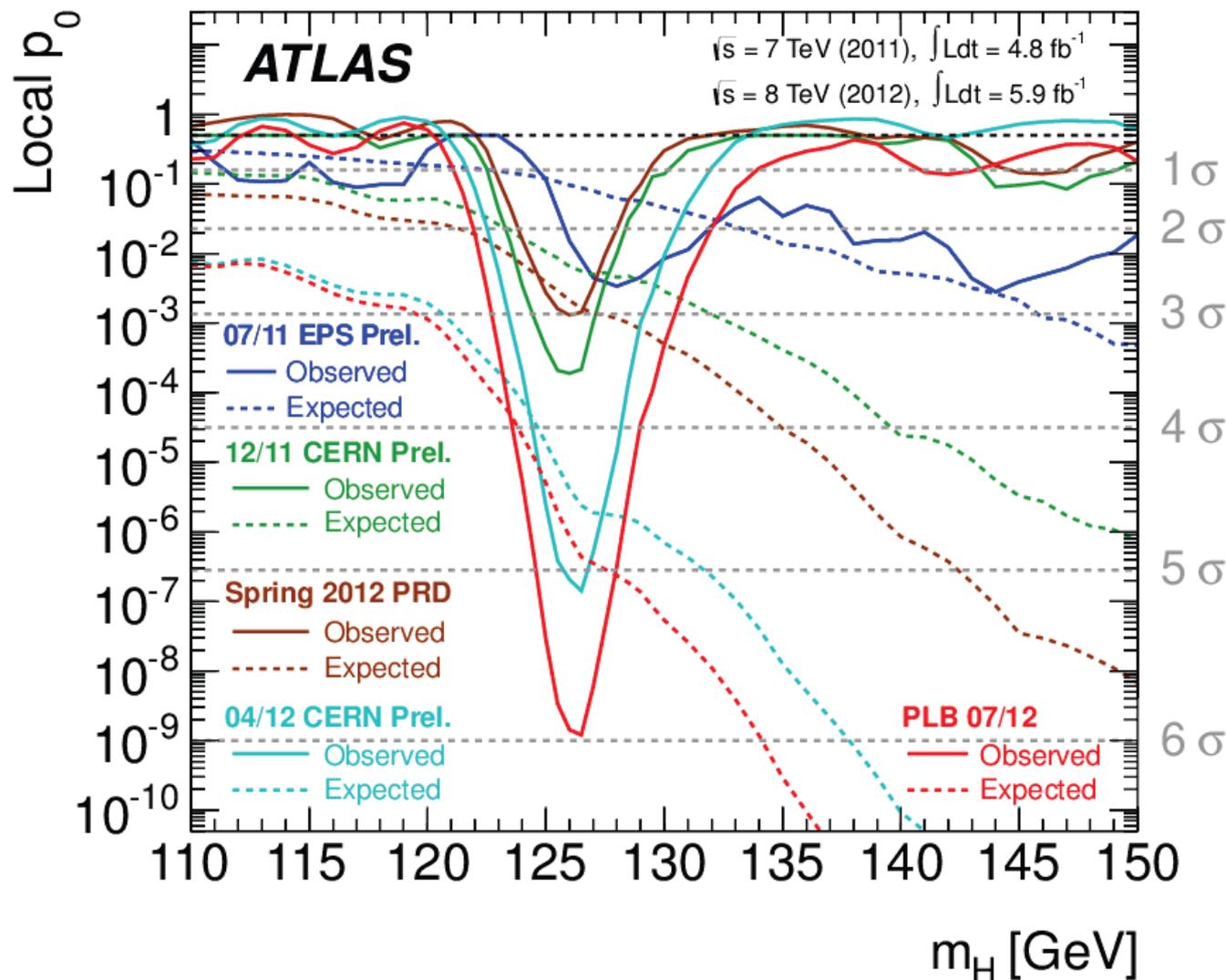
- Quantifié en nombre de « σ » :

- ▶ 1σ : 1 chance sur 3 (trop probable pour conclure quoi que ce soit)
- ▶ 3σ (évidence) : 3 chances sur 1000
- ▶ 5σ (observation) : 1 chance sur 2 millions
- ▶ $5,9\sigma$: 3 chances sur 1 milliard

- Donc nous sommes sûrs d'avoir trouvé quelque chose

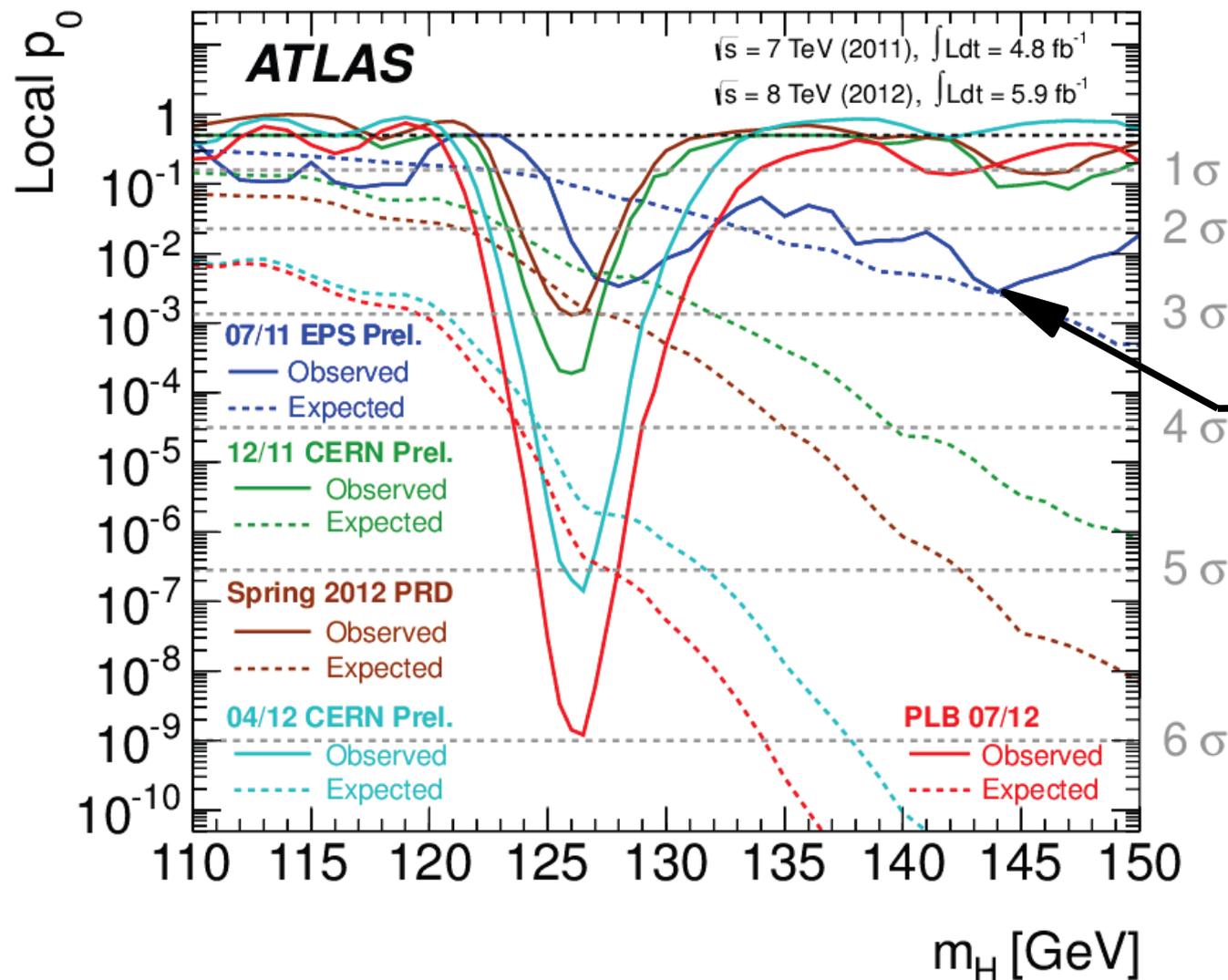


Évolution dans le temps (jusqu'à la découverte)



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

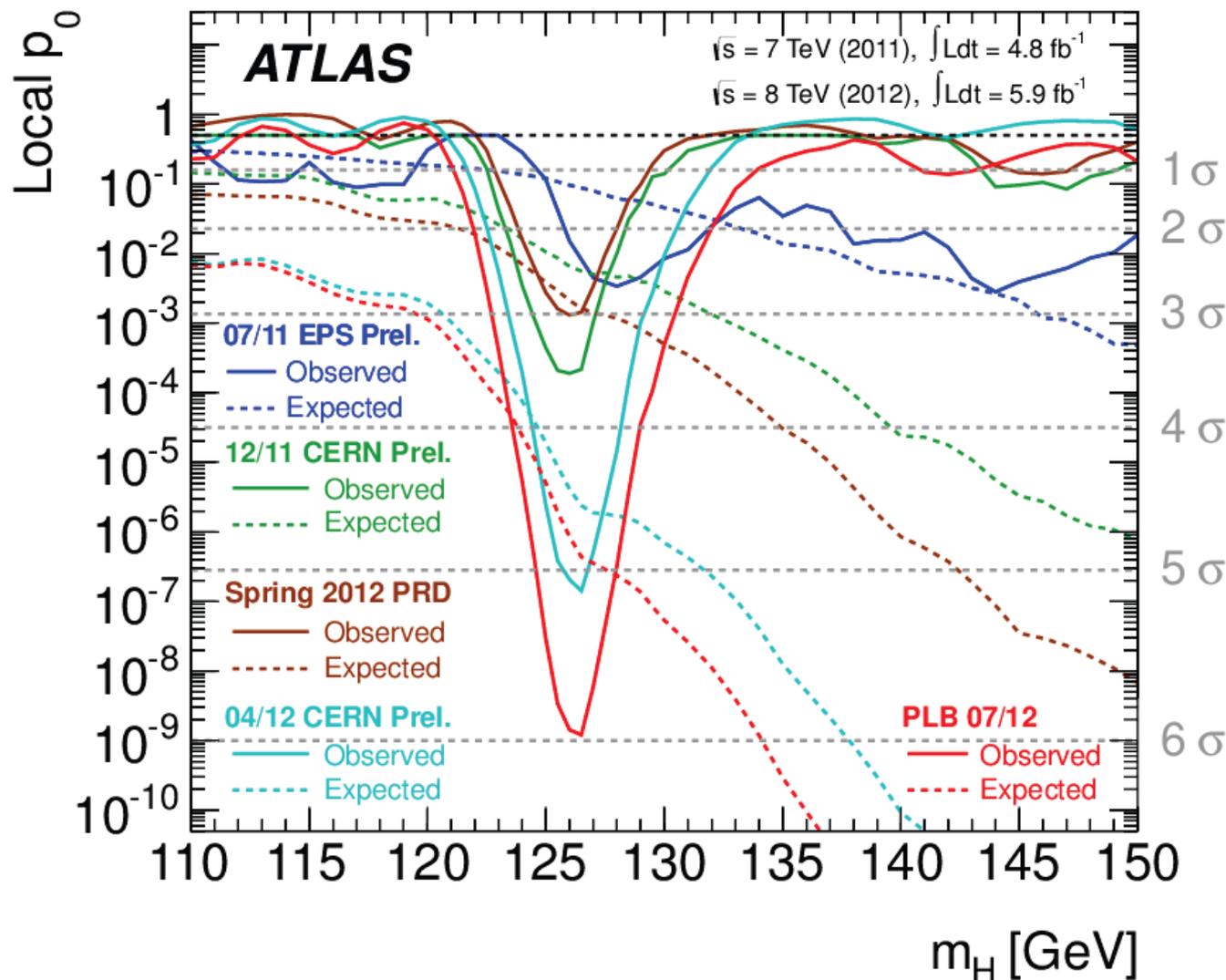
Évolution dans le temps (jusqu'à la découverte)



Généra beaucoup d'excitation chez les théoriciens !

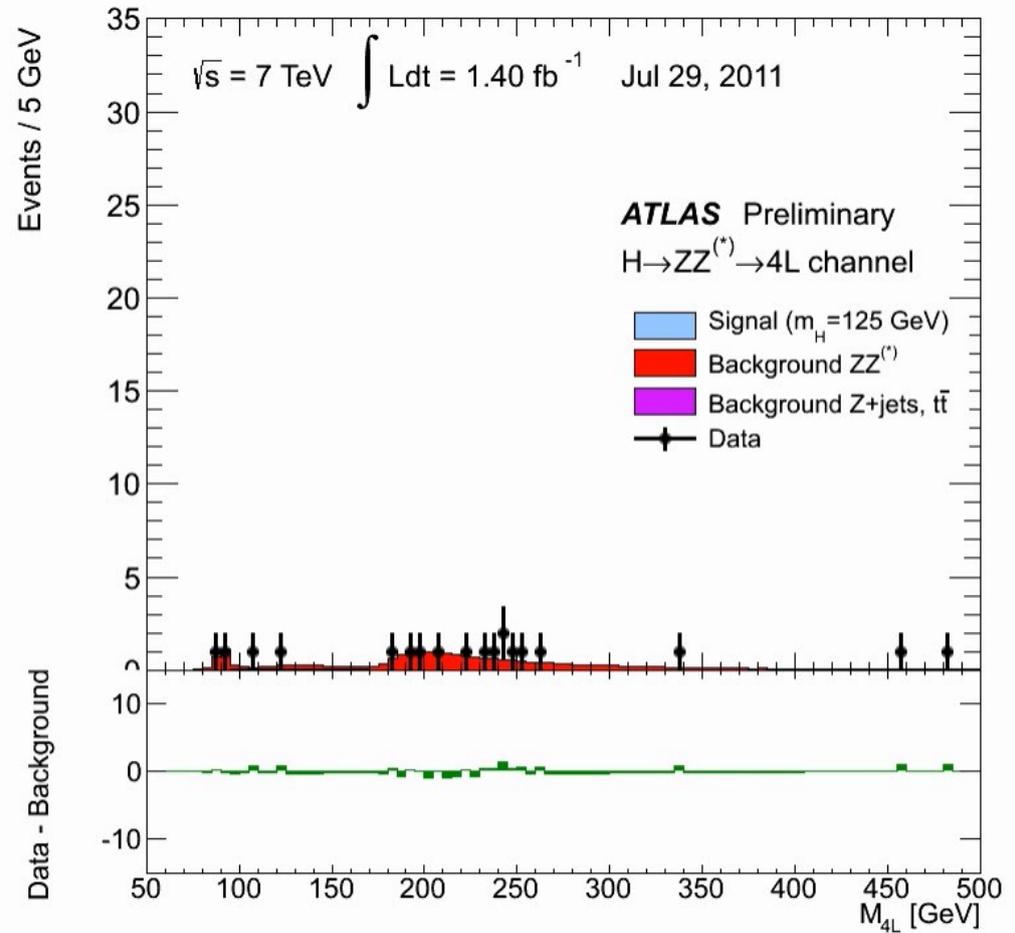
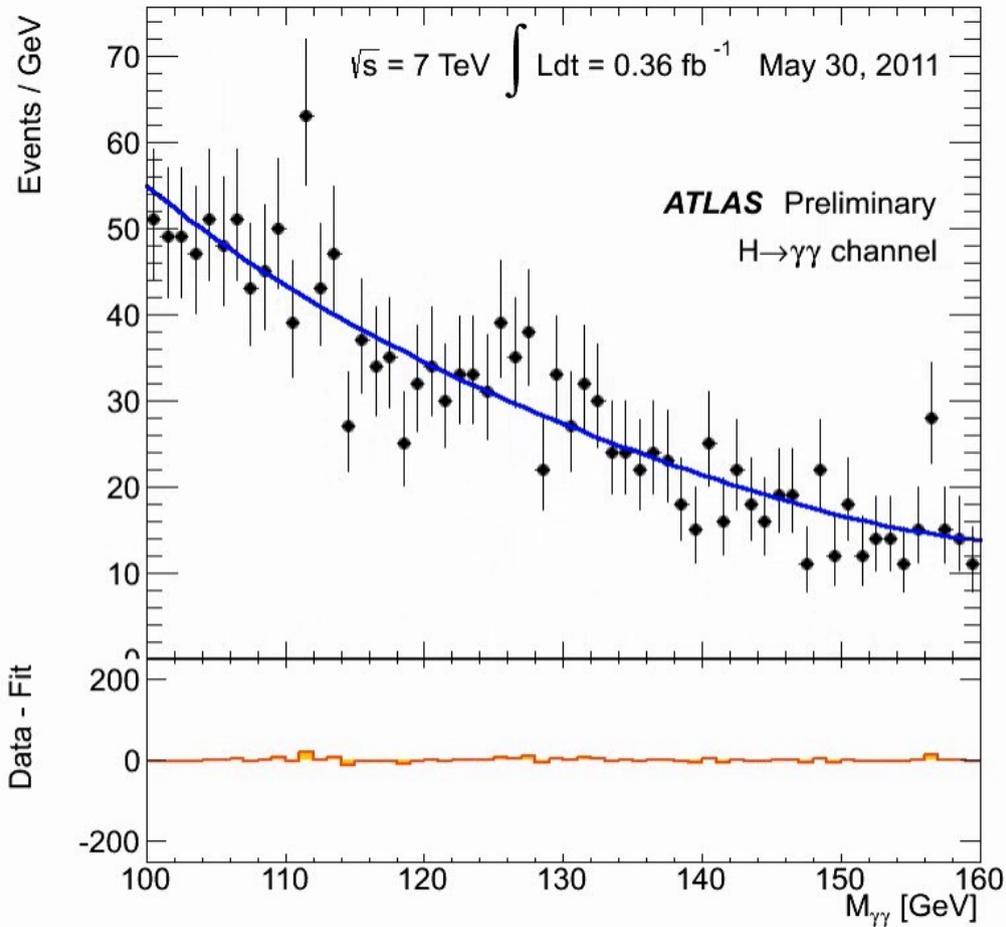
- D'abord des fluctuations statistiques un peu partout
- Puis les mesures se stabilisent

Évolution dans le temps (jusqu'à la découverte)



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

Évolution dans le temps



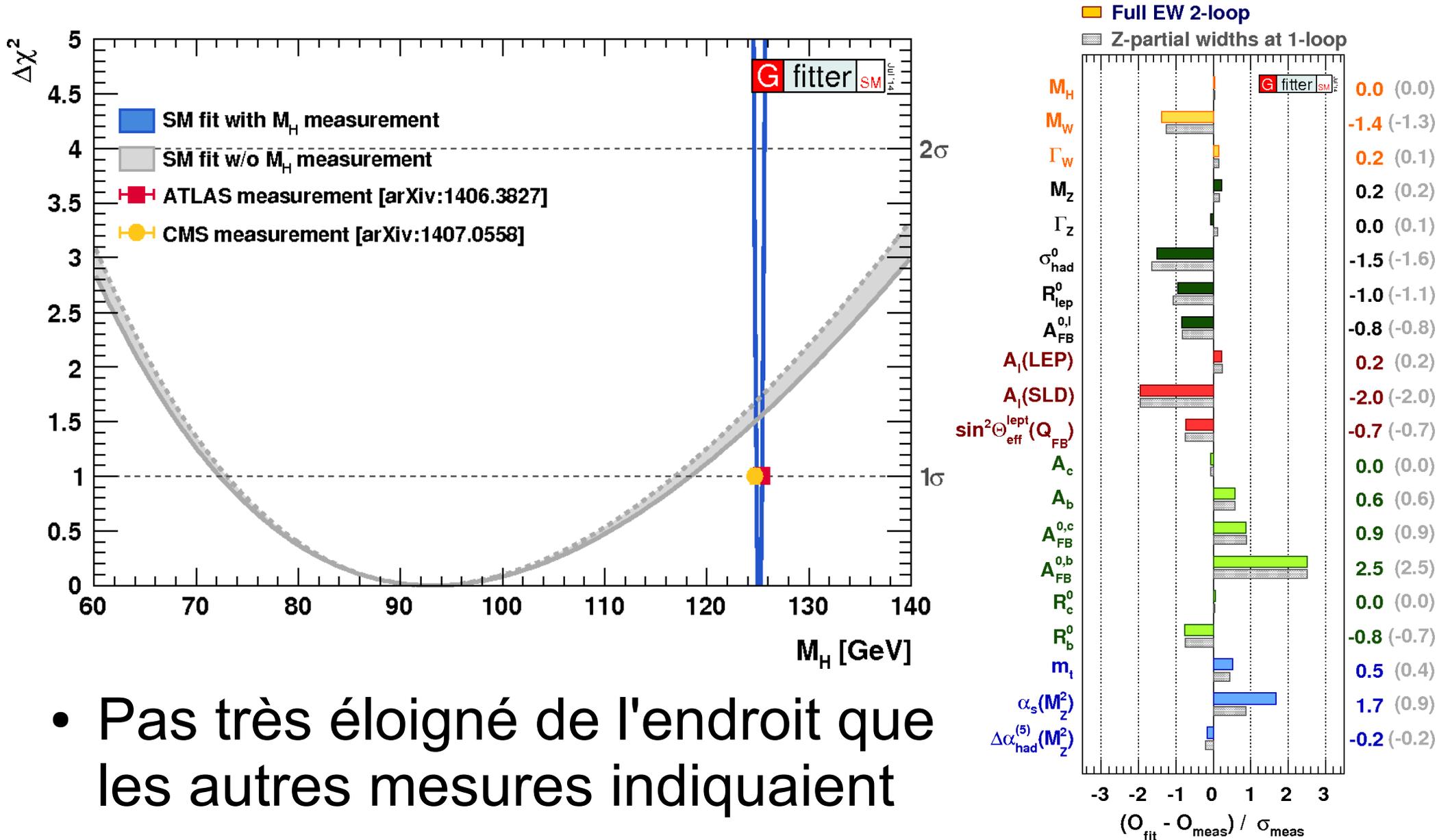
film

$$H \rightarrow \gamma\gamma$$

film

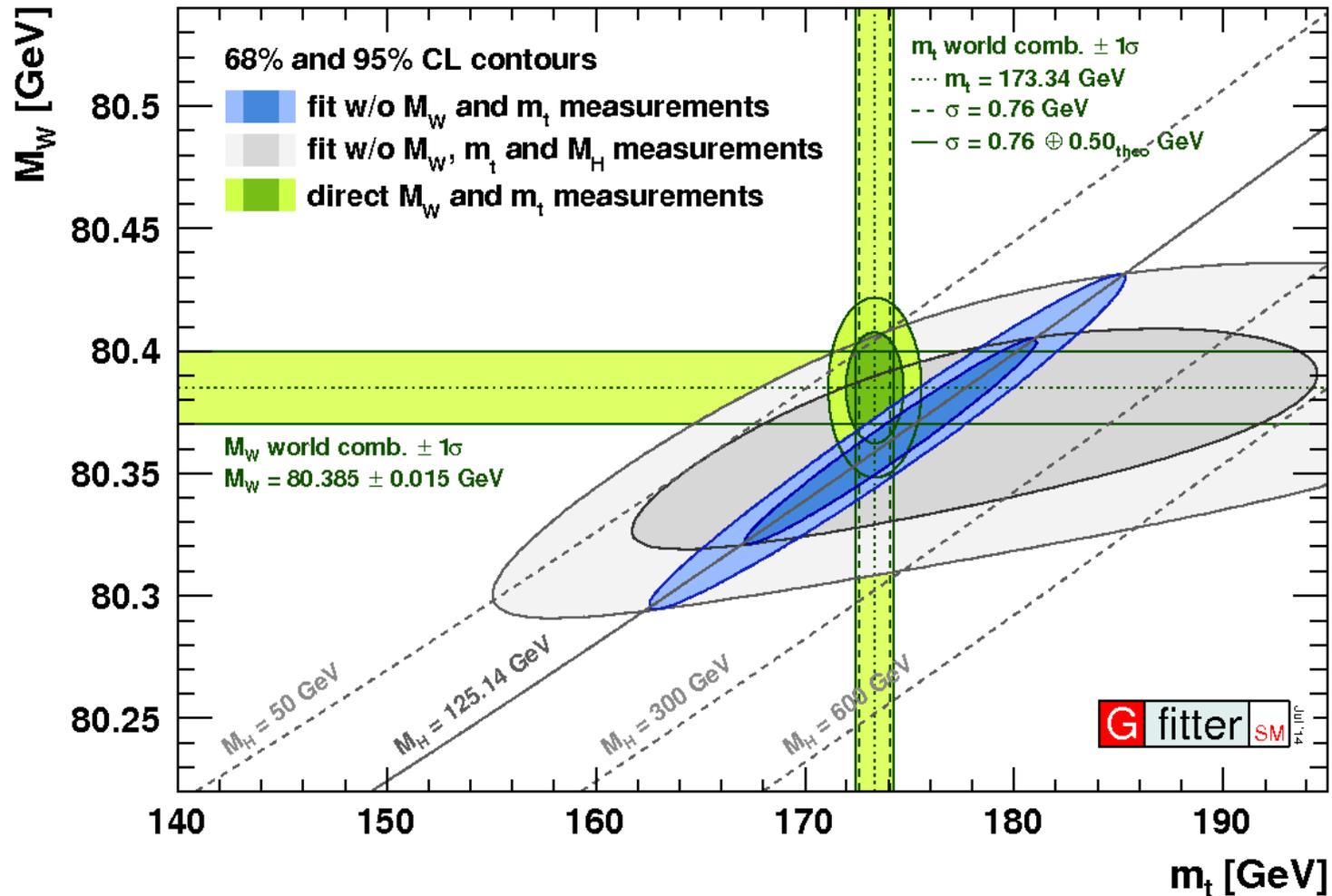
$$H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4l$$

Consistent avec les autres mesures du modèle standard ?



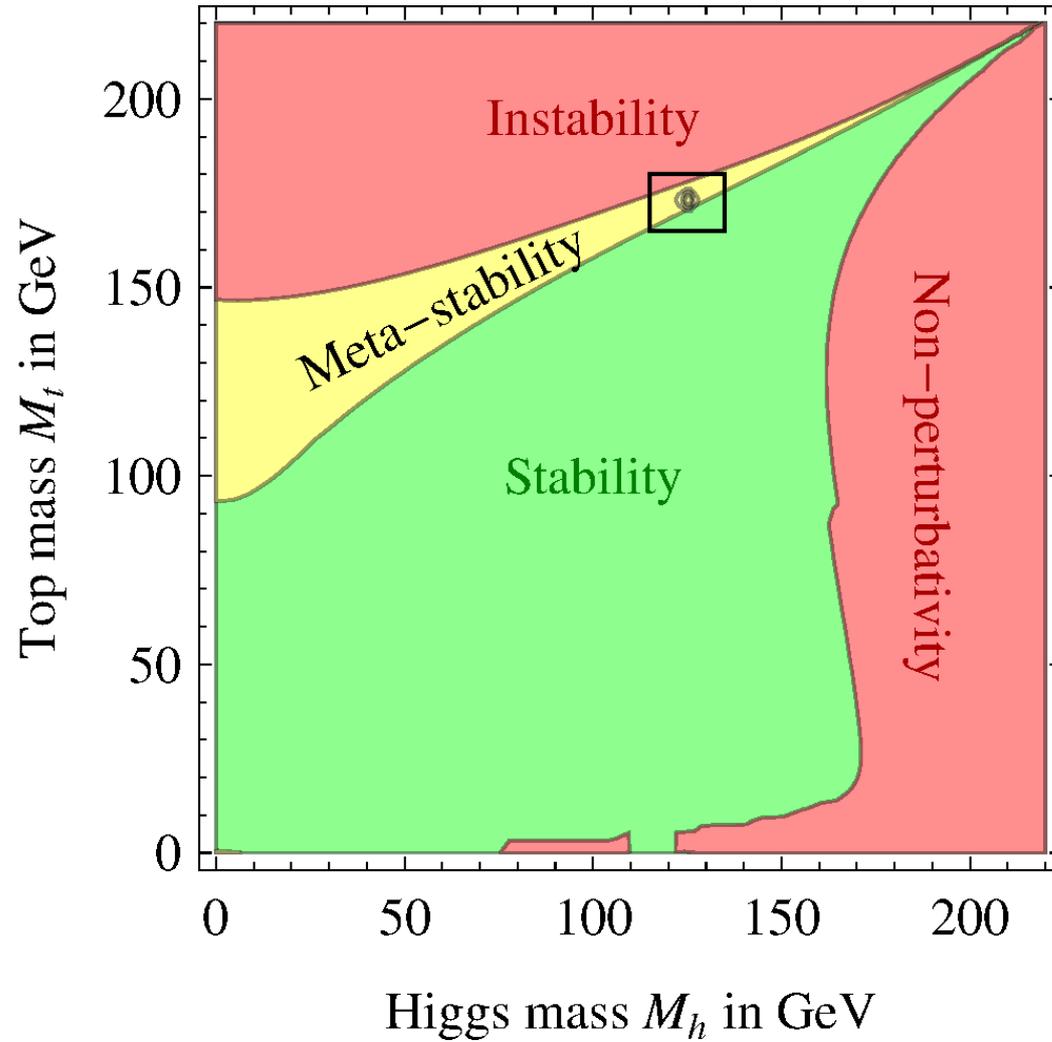
- Pas très éloigné de l'endroit que les autres mesures indiquaient
- Pas de « tension » avec le modèle standard

Consistent avec les autres mesures du modèle standard ?

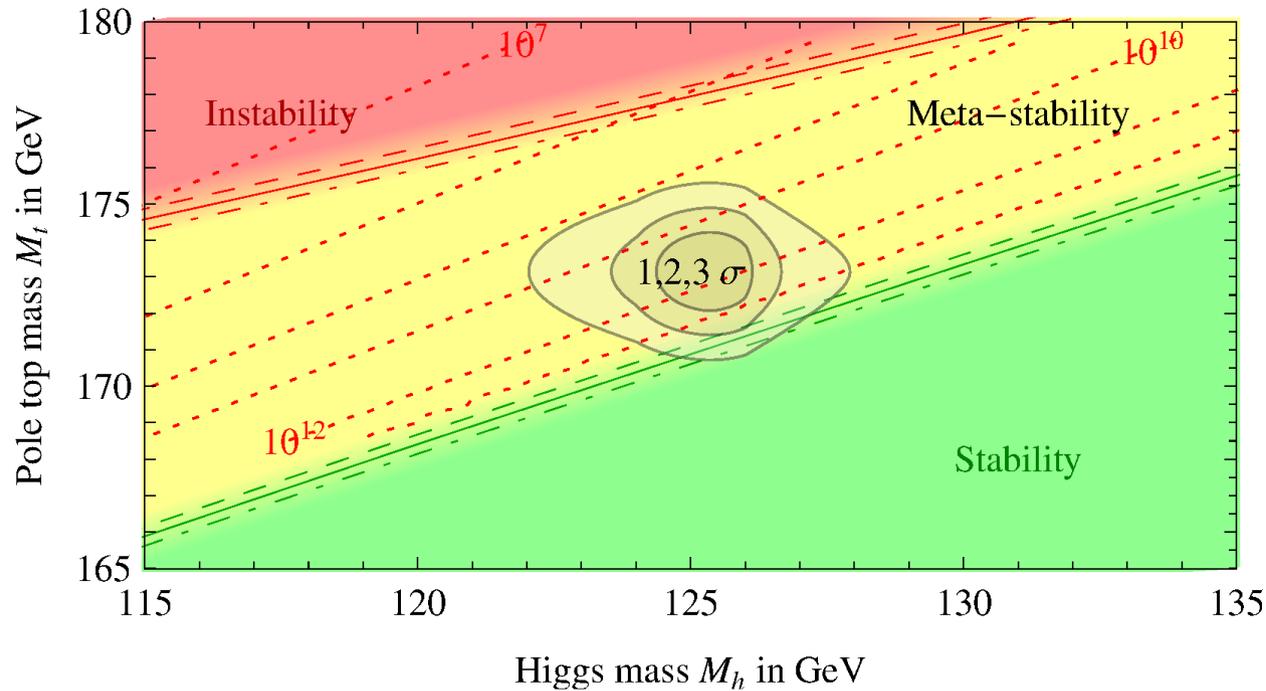


- Pas très éloigné de l'endroit que les autres mesures indiquaient
- Pas de « tension » avec le modèle standard

Un univers instable ?



Un univers instable ?

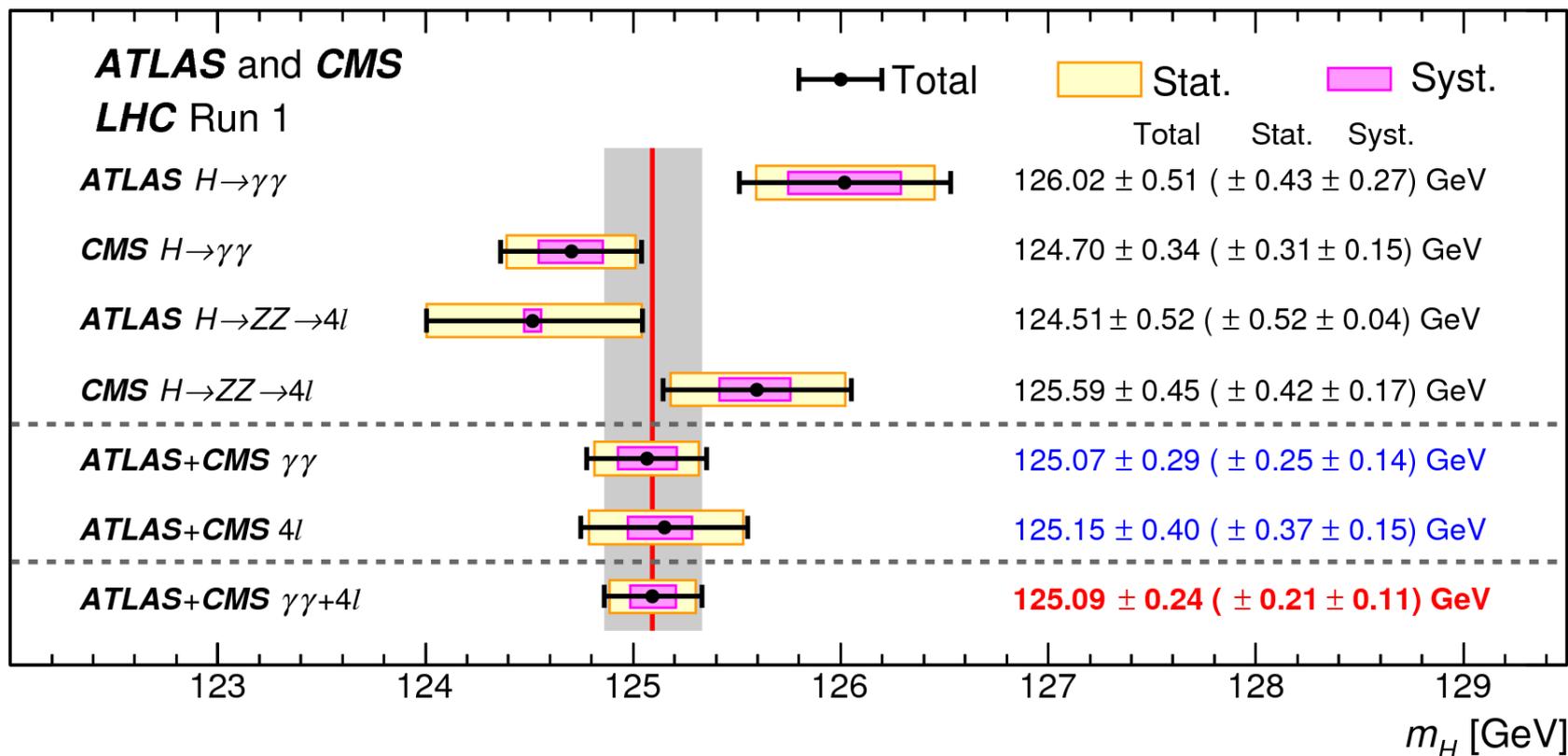


- Plutôt méta-stable, stable à l'échelle de l'âge de l'Univers.
Ouf !
- Besoin d'améliorer la précision de m_t pour en savoir plus

Est-ce le Higgs du modèle standard ?

- Masse compatible avec les autres mesures du modèle standard :

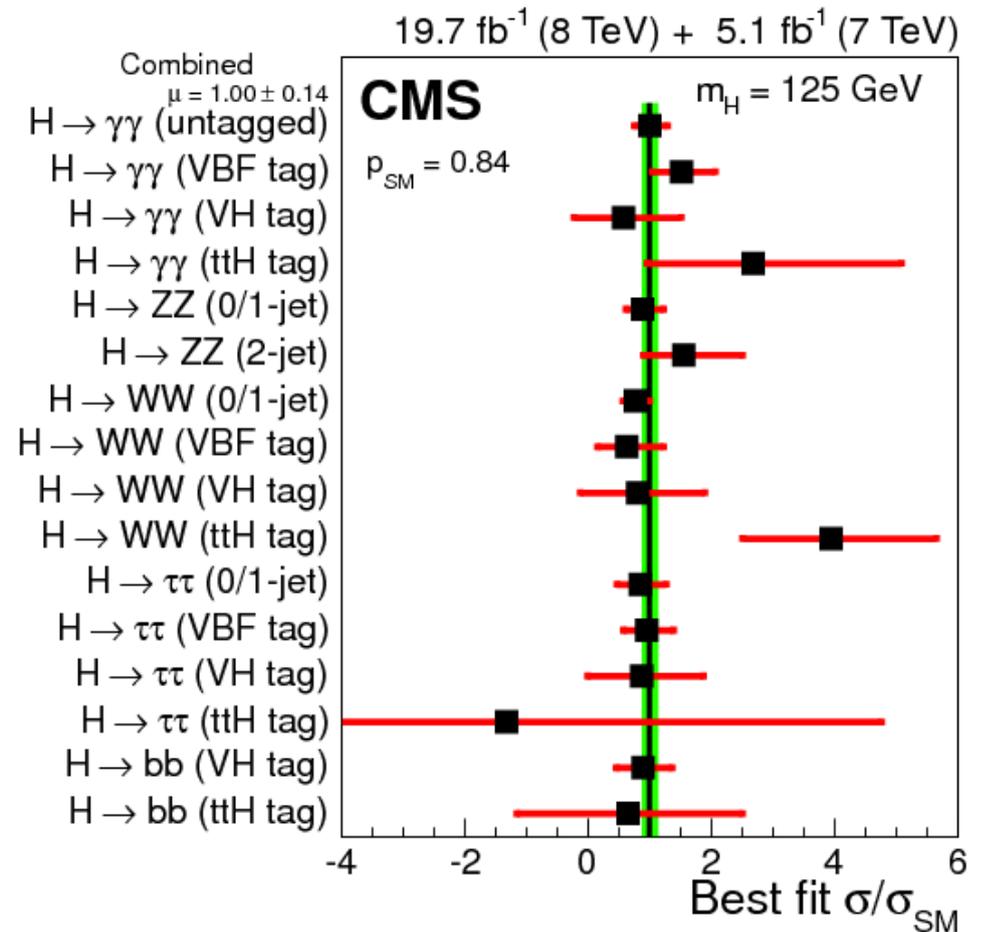
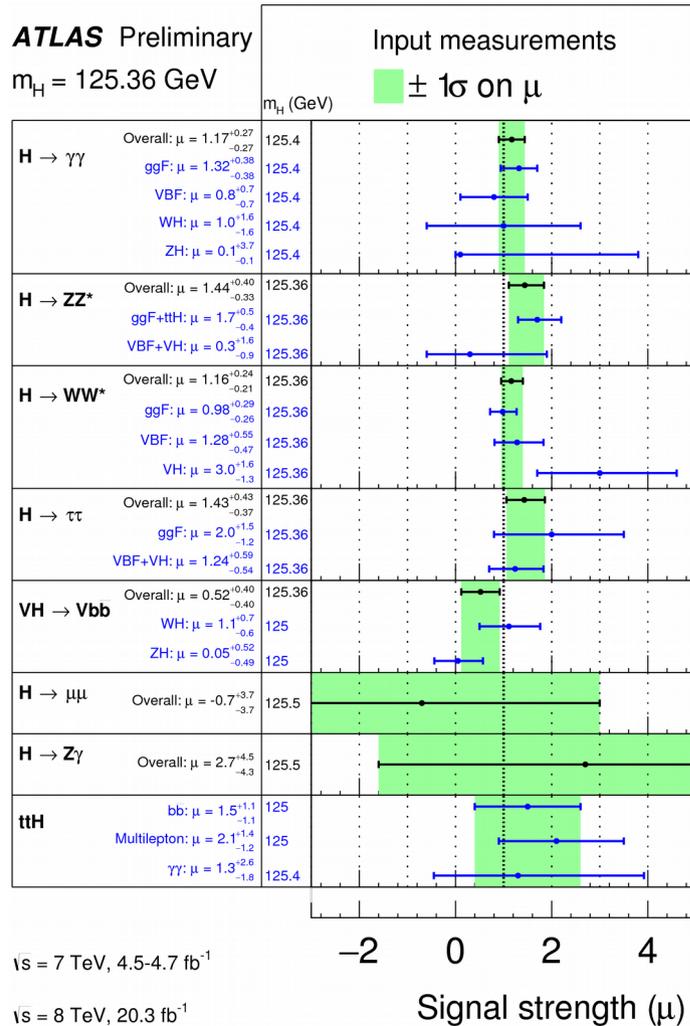
- ▶ $m_H = 125.09 \pm 0.24$ (0.21 stat. \pm 0.11 syst.) GeV
 [ATLAS+CMS, mars 2015, données 2011-2012]
 (134 fois la masse du proton)



Est-ce le Higgs du modèle standard ?

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

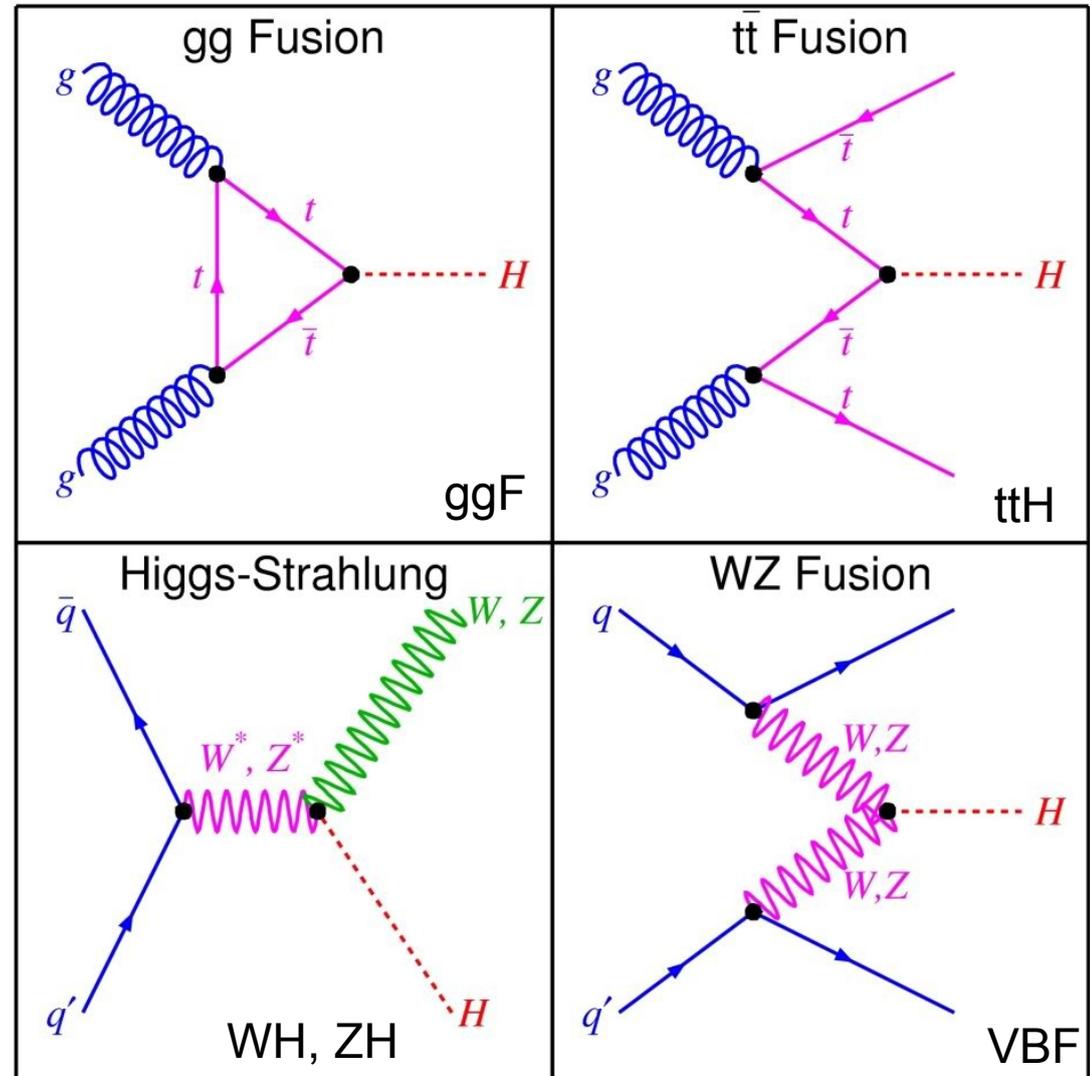
Mesures dans plusieurs canaux



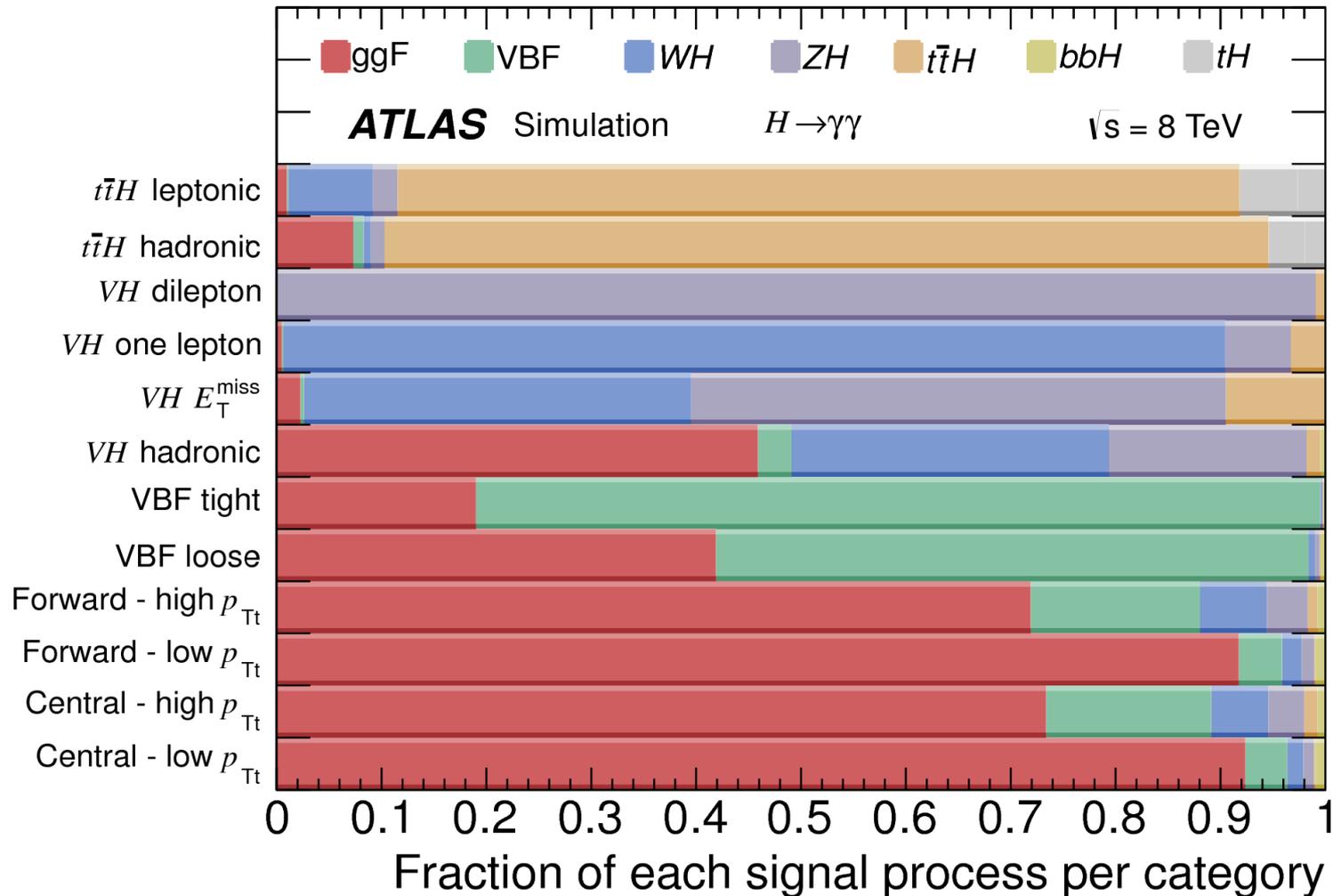
- $\mu = \sigma/\sigma_{SM} = 1$ si la particule est comme le boson de Higgs du modèle standard
- Pour le moment très proche des prédictions

Production du boson de Higgs

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

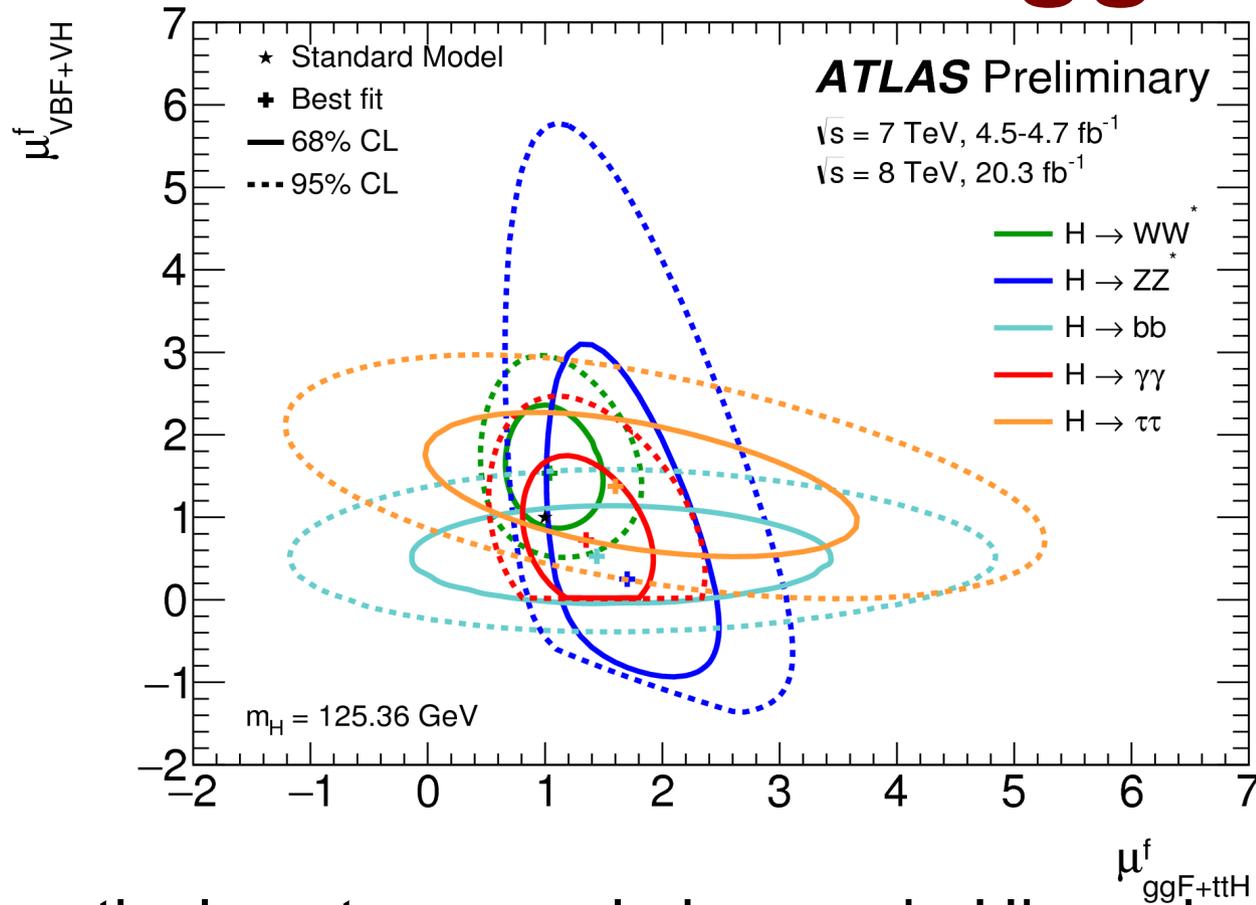


Séparation des canaux de production



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

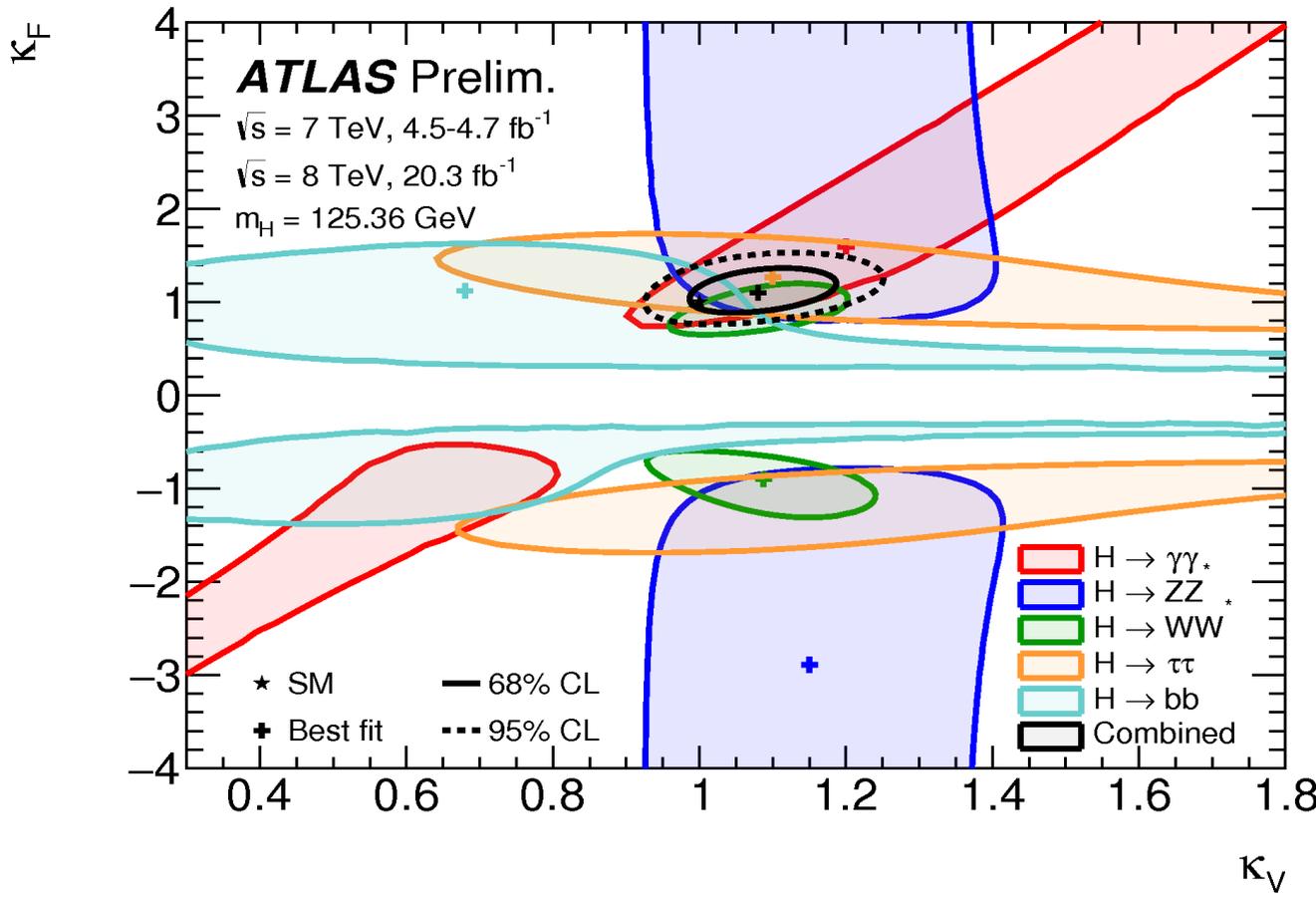
Plutôt « VBF » ou « ggF » ?



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

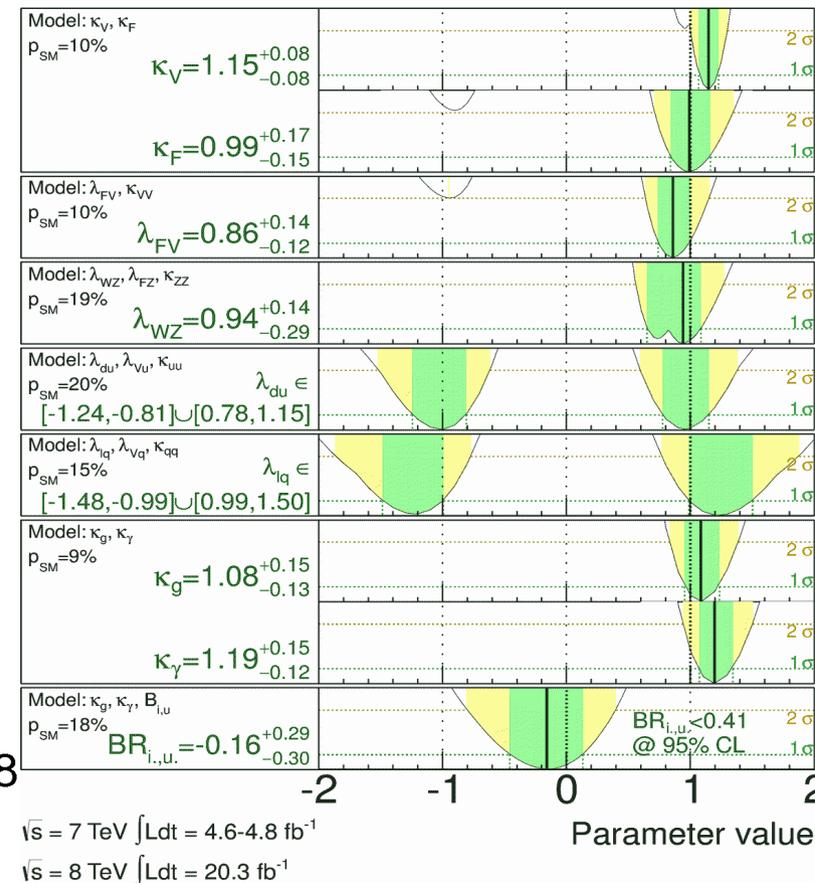
Couplage aux fermions et bosons

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



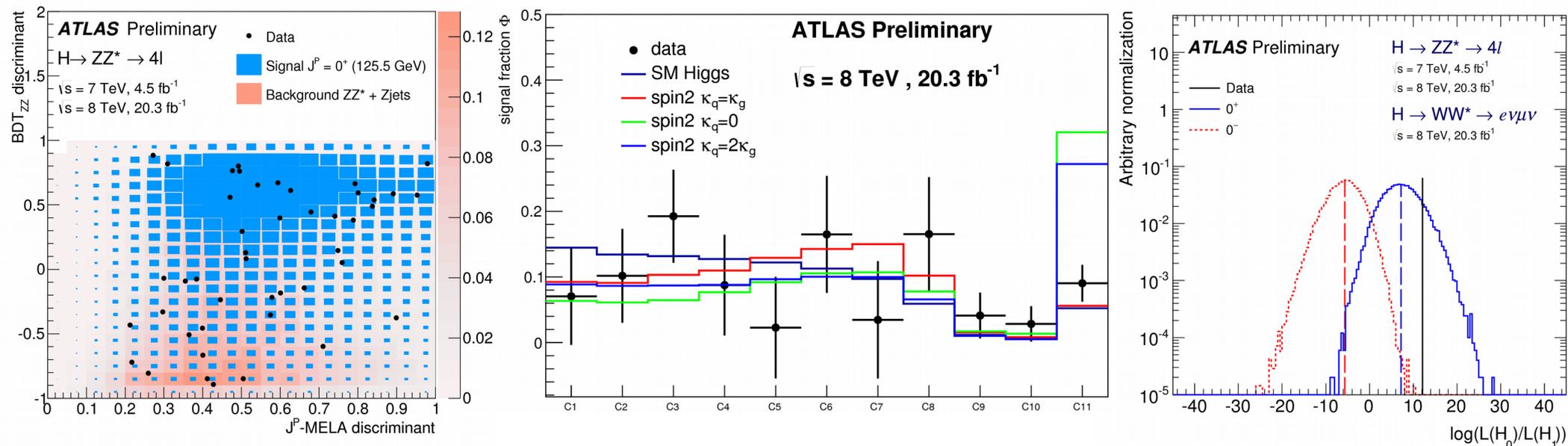
ATLAS Preliminary
 $m_H = 125.5 \text{ GeV}$

Total uncertainty
■ $\pm 1\sigma$ ■ $\pm 2\sigma$

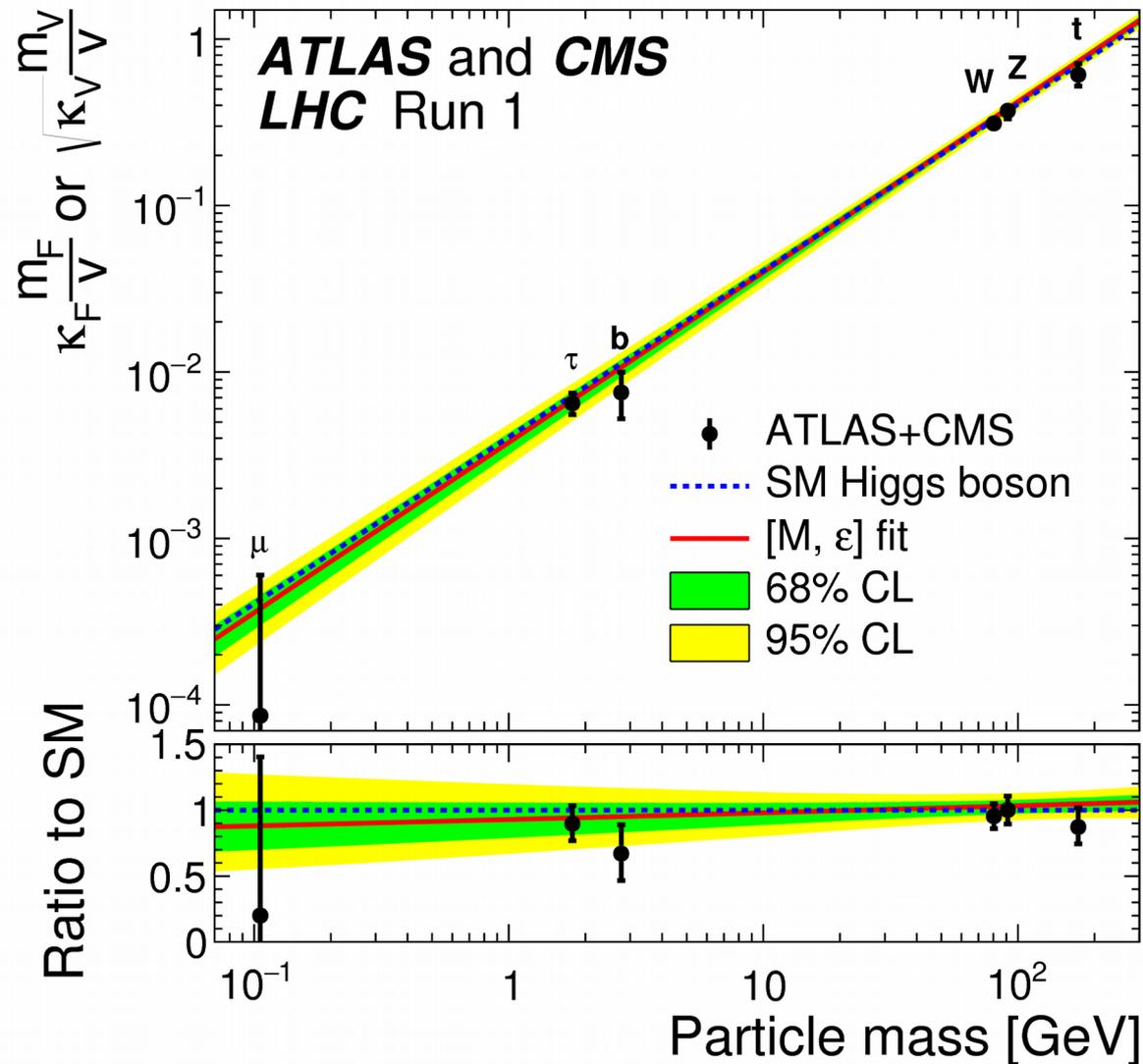


Spin et parité

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



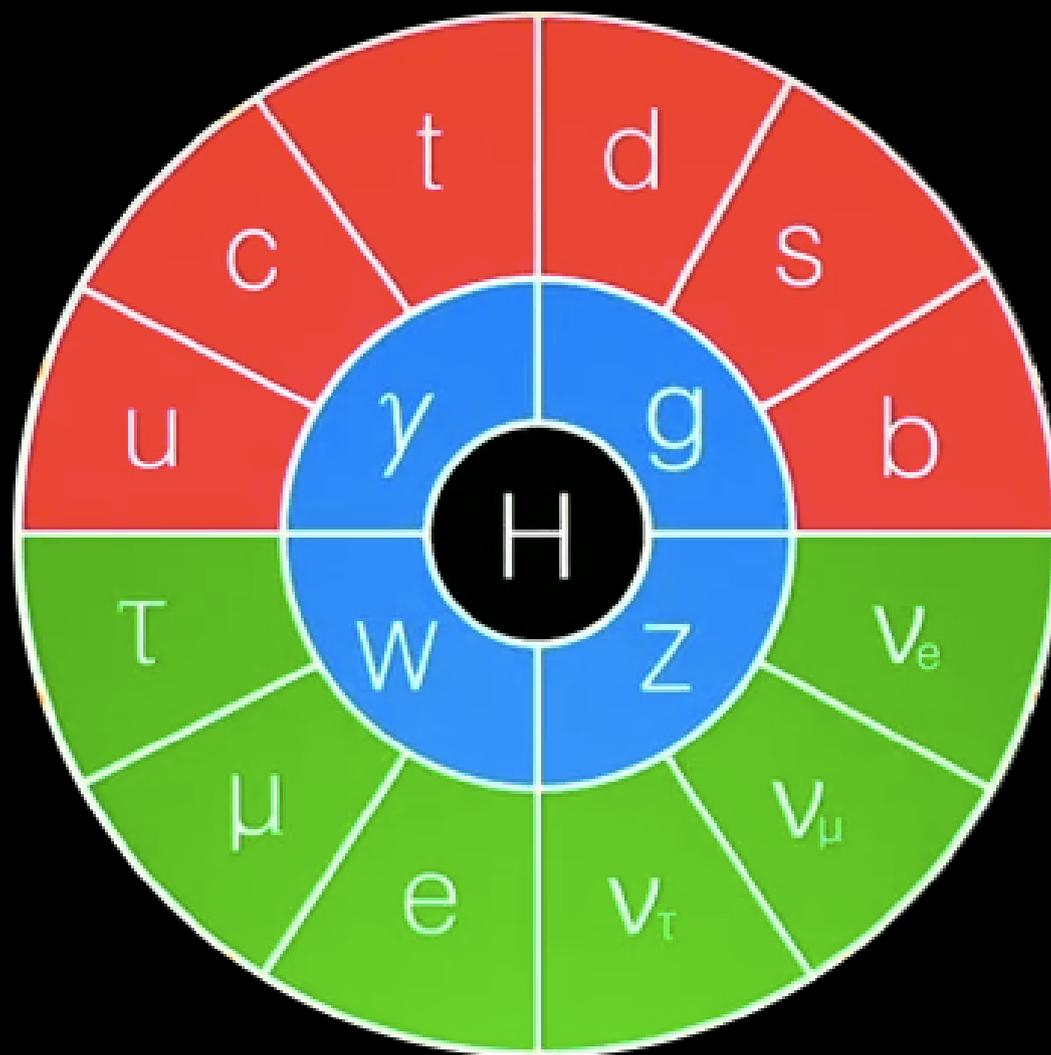
Masse des particules et couplage au boson de Higgs

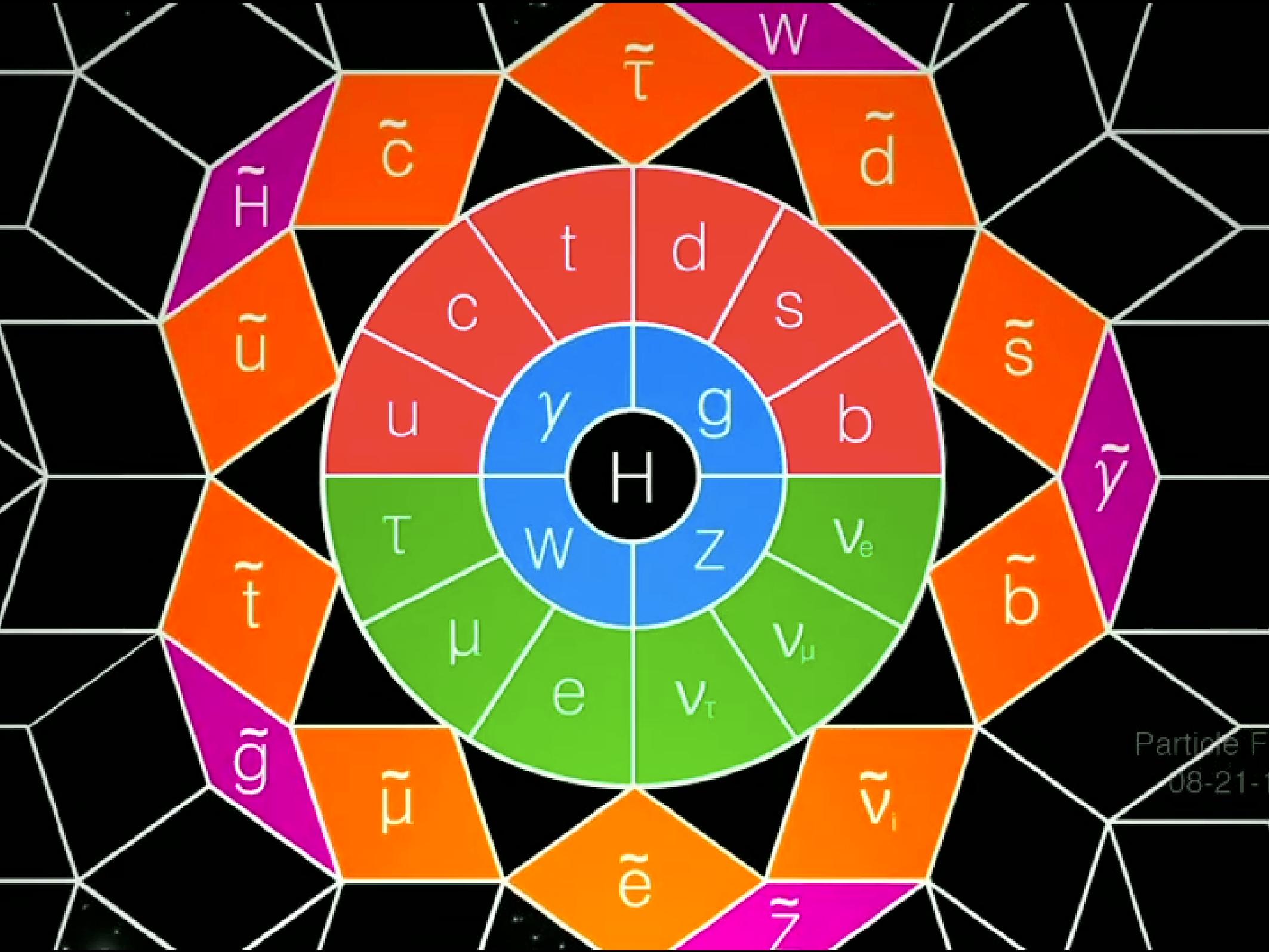


- Relation comme prévue par le modèle standard

Autres théories

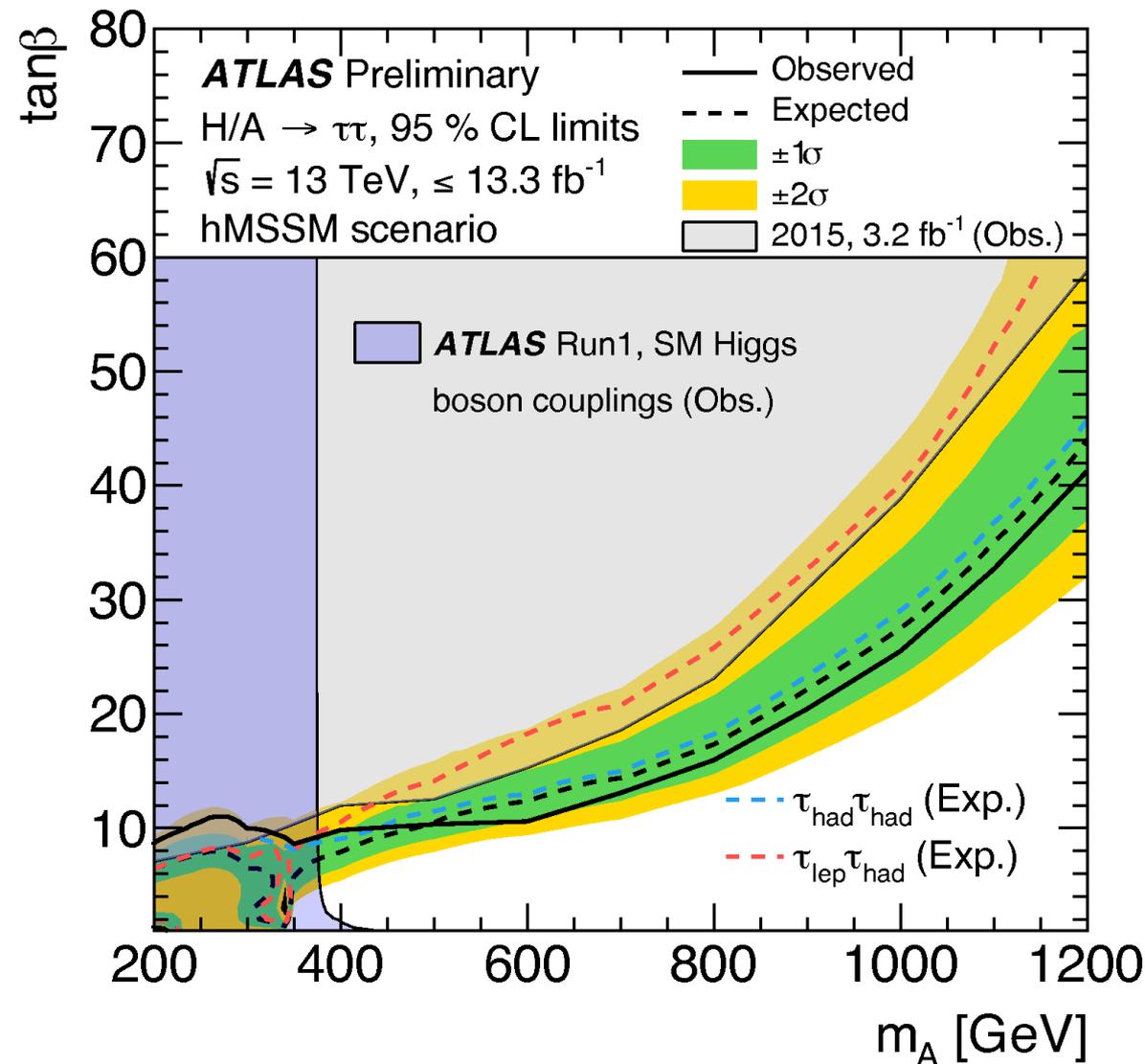
- Le modèle standard n'explique pas tout :
 - ▶ Pourquoi trois familles ?
 - ▶ Pourquoi les particules élémentaires ont des masses si différentes ?
 - ▶ Que sont la matière noire et l'énergie noire ?
 - ▶ Pourquoi l'antimatière a presque disparu ?
- Les théoriciens ne manquent pas d'idées pour le compléter
- 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





D'autres bosons de Higgs ?

- Extensions du modèle standard avec 5 bosons de Higgs au lieu d'un
- Apparaît par exemple en supersymétrie
- Nouveaux paramètres



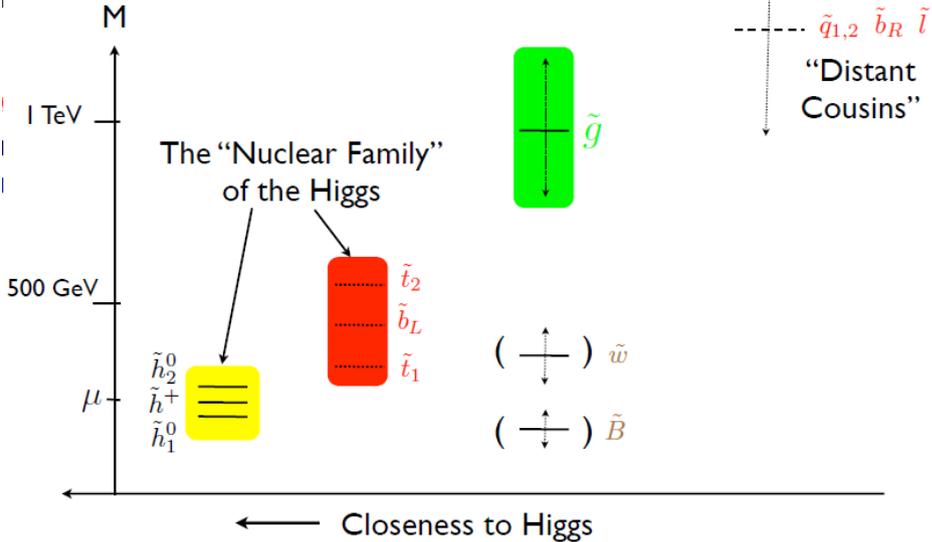
- Jusqu'à maintenant on exclut leur existence
- De moins en moins de recoins encore disponibles

Supersymétrie

- Double le nombre de particules existantes
- Augmente encore plus le nombre de paramètres

A Natural Spectrum

General "bottom-up" viewpoint

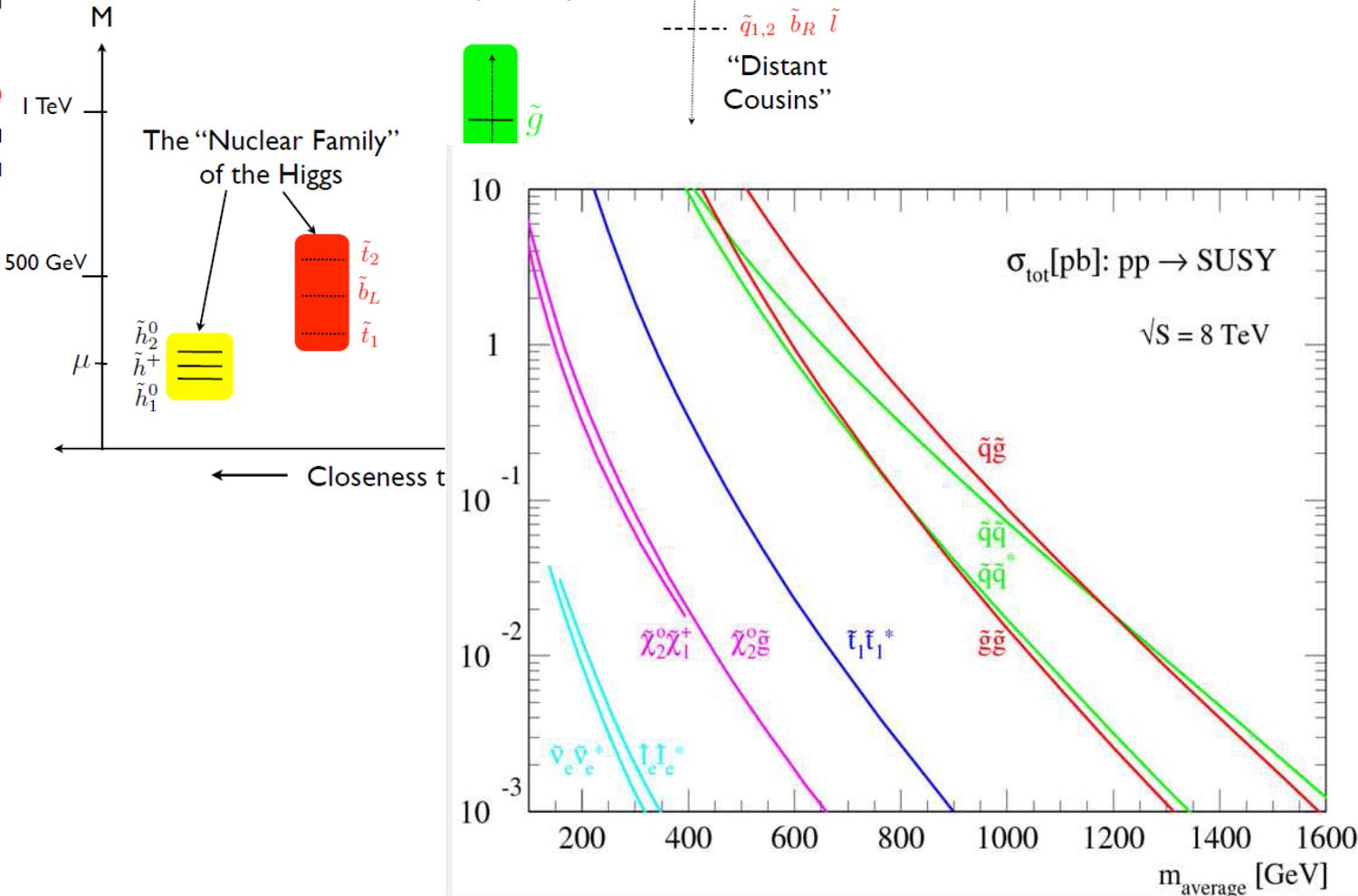


Supersymétrie

- Double le nombre de particules existantes
- Augmente encore plus le nombre de paramètres

A Natural Spectrum

General "bottom-up" viewpoint

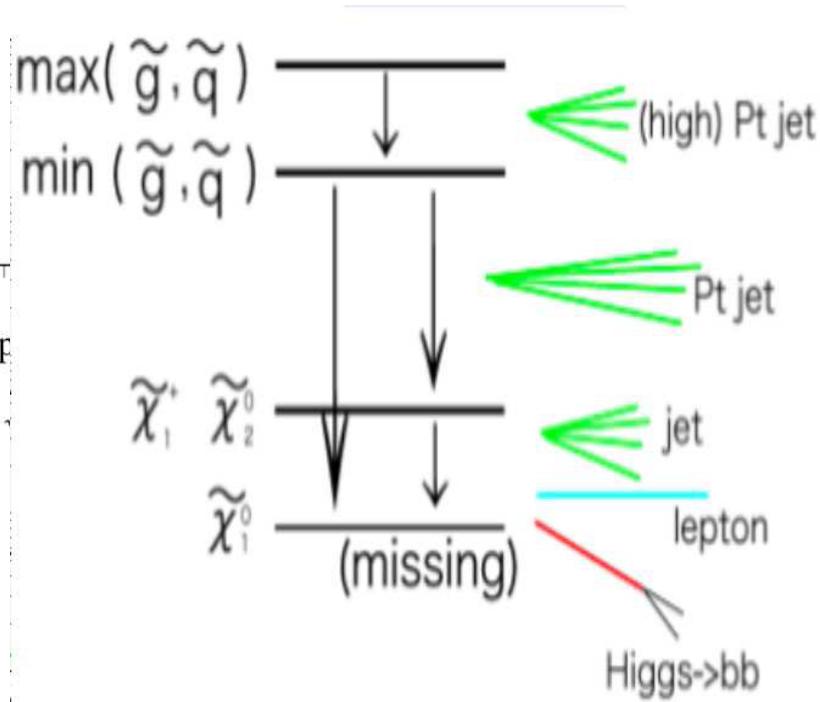
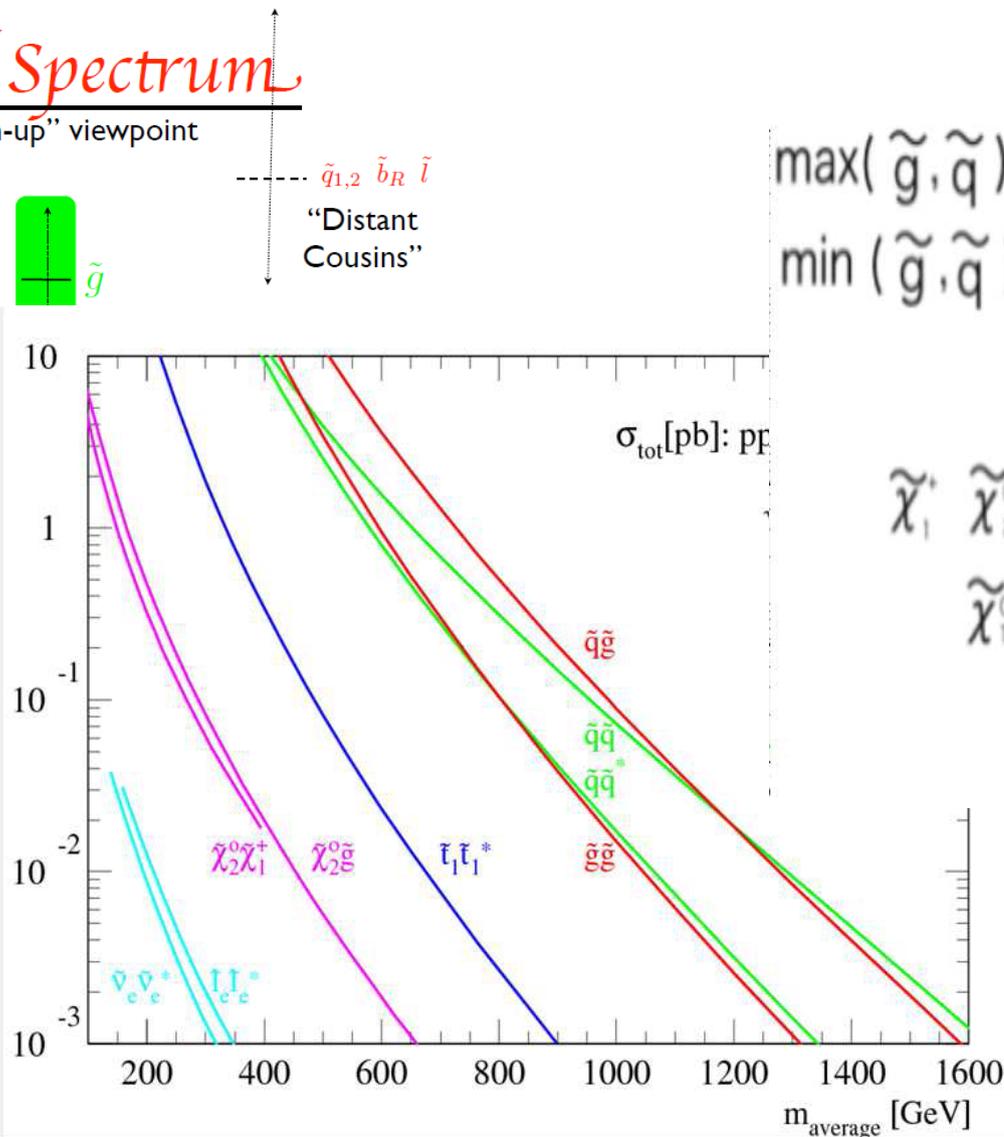
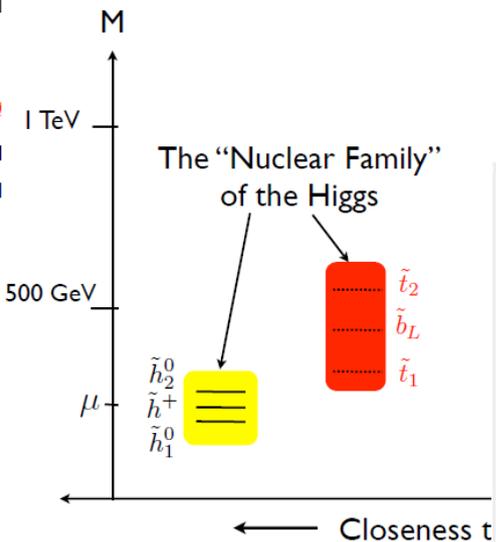


Supersymétrie

- Double le nombre de particules existantes
- Augmente encore plus le nombre de paramètres

A Natural Spectrum

General "bottom-up" viewpoint

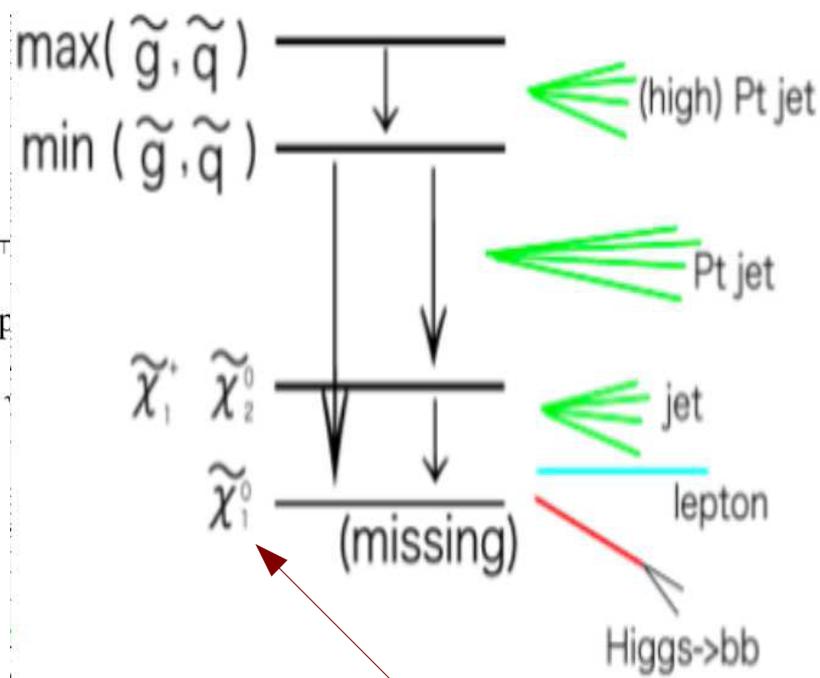
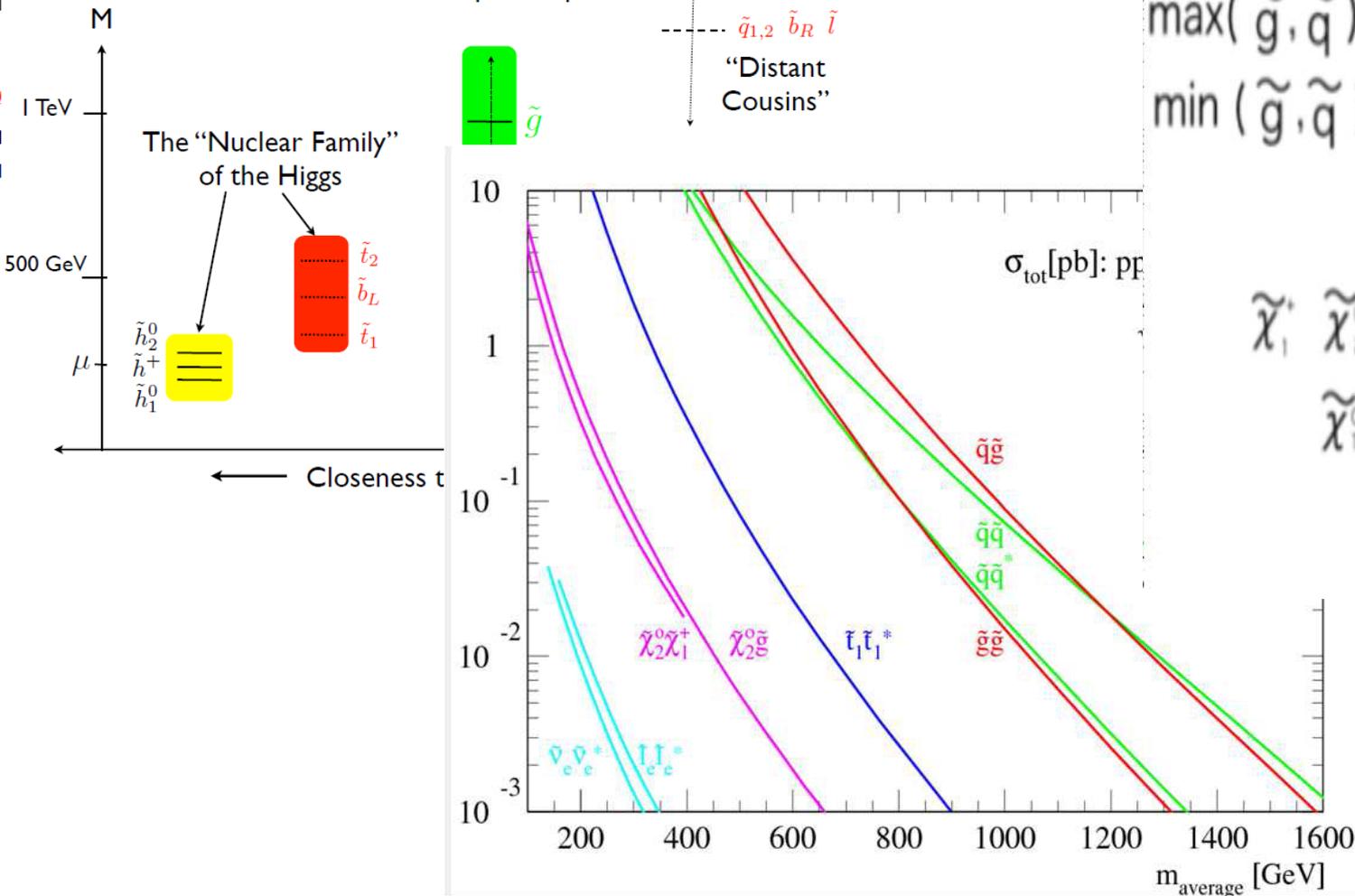


Supersymétrie

- Double le nombre de particules existantes
- Augmente encore plus le nombre de paramètres

A Natural Spectrum

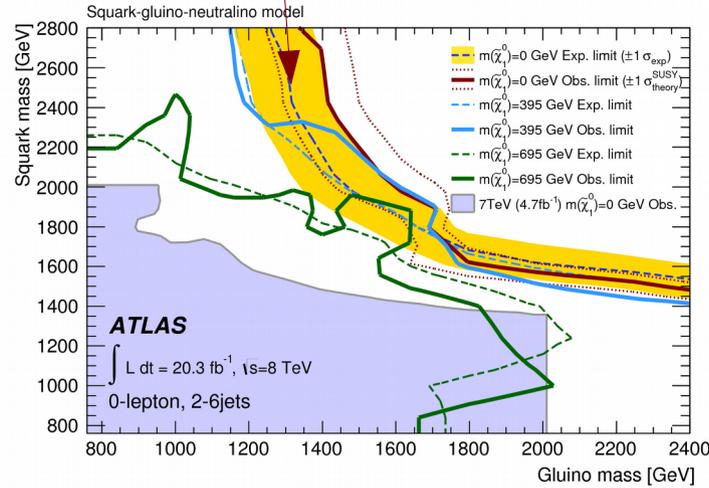
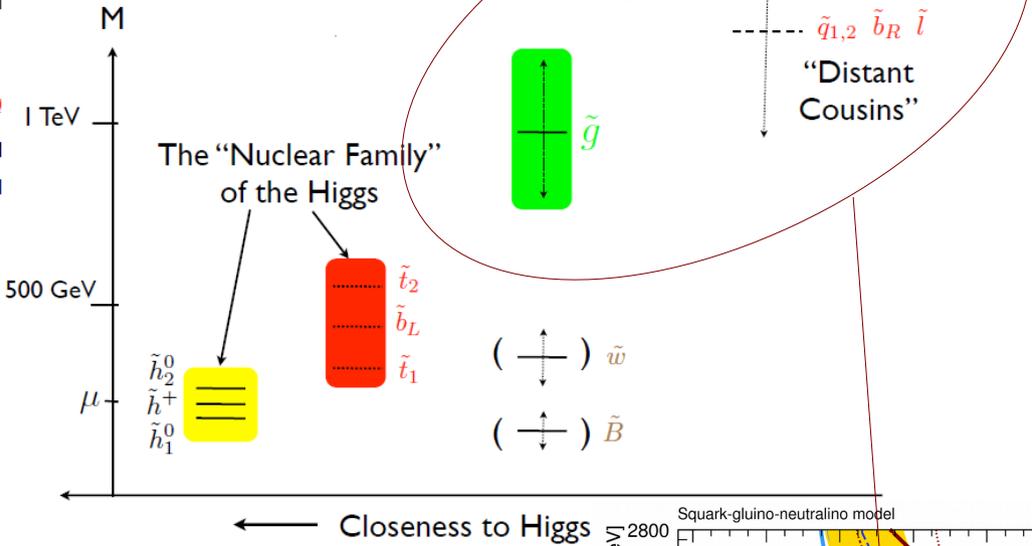
General "bottom-up" viewpoint



SUSY : 1^{ère} et 2^{ème} générations

A Natural Spectrum

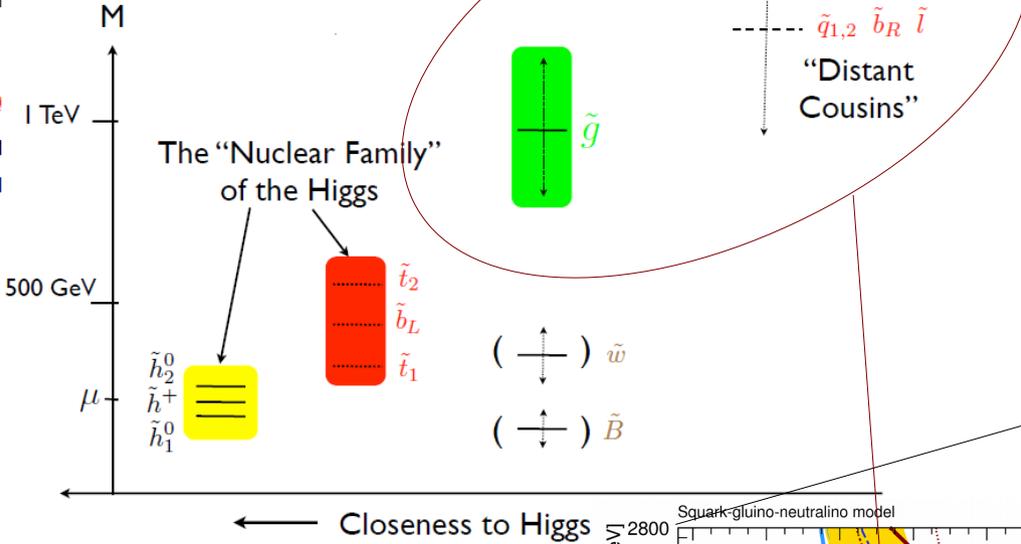
General "bottom-up" viewpoint



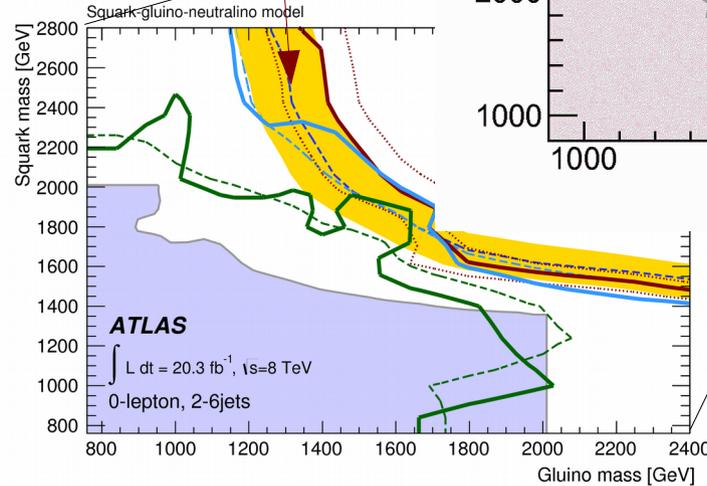
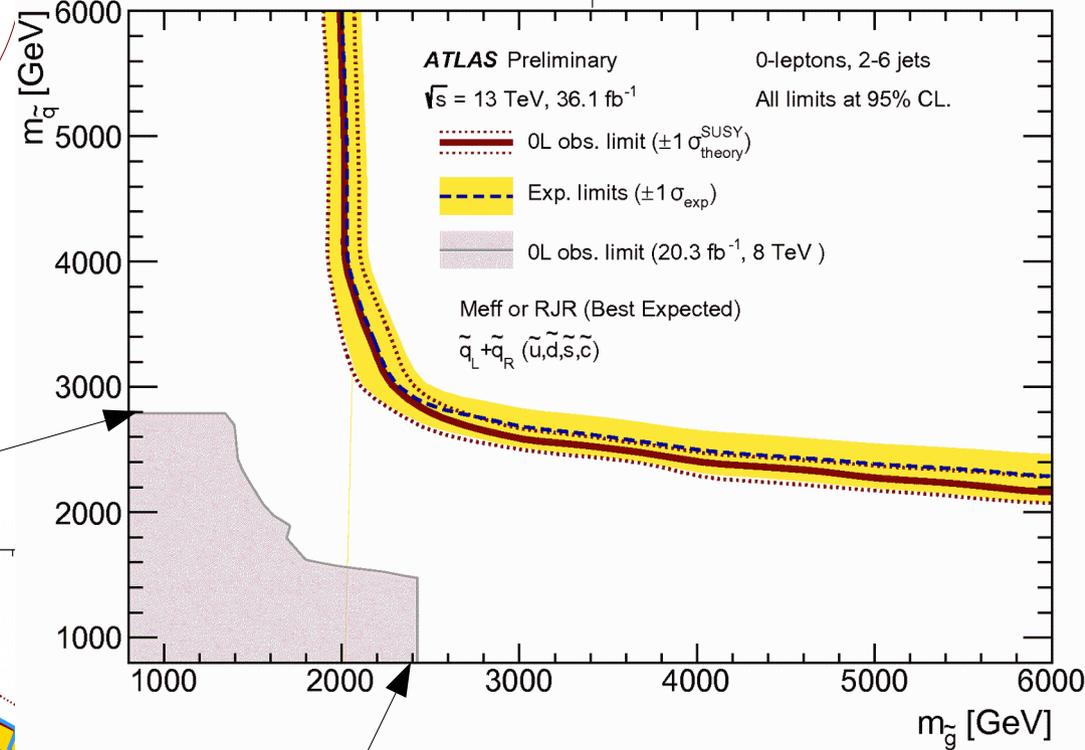
SUSY : 1^{ère} et 2^{ème} générations

A Natural Spectrum

General "bottom-up" viewpoint



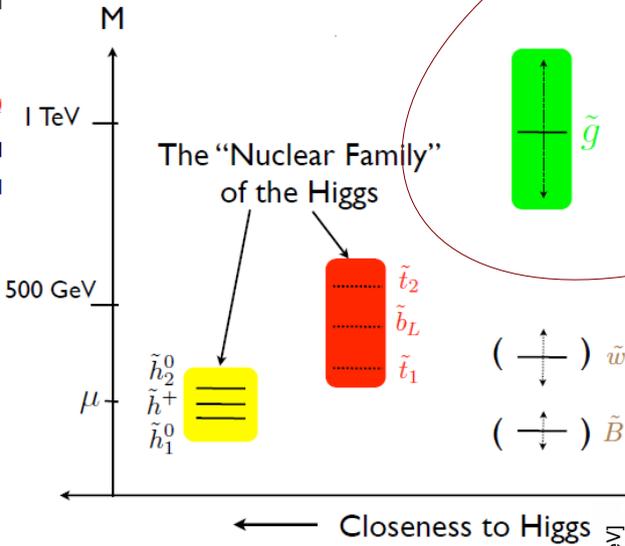
Squark-gluino-neutralino model, $m(\tilde{\chi}_1^0)=0$ GeV



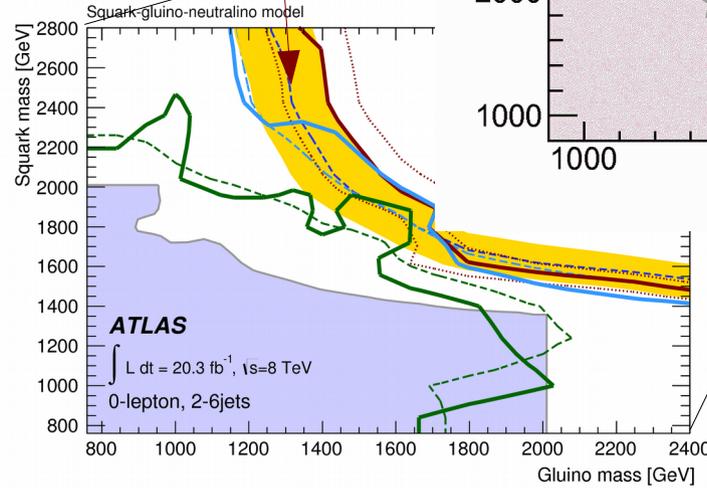
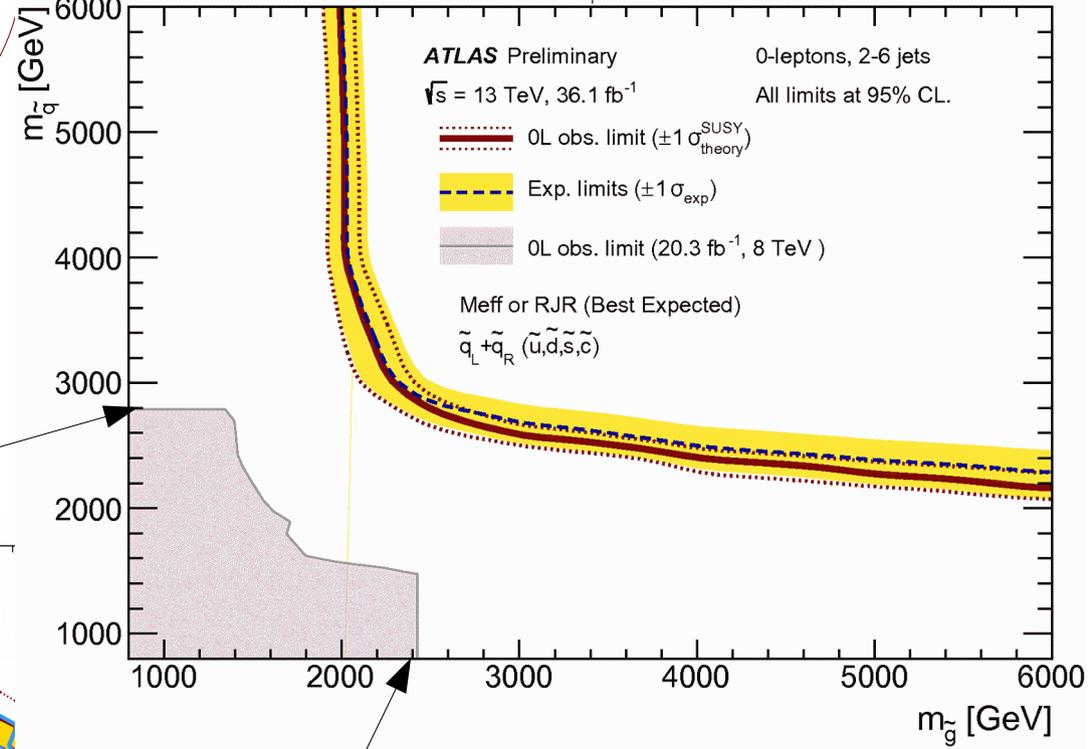
SUSY : 1^{ère} et 2^{ème} générations

A Natural Spectrum

General "bottom-up" viewpoint



Squark-gluino-neutralino model, $m(\tilde{\chi}_1^0) = 0$ GeV

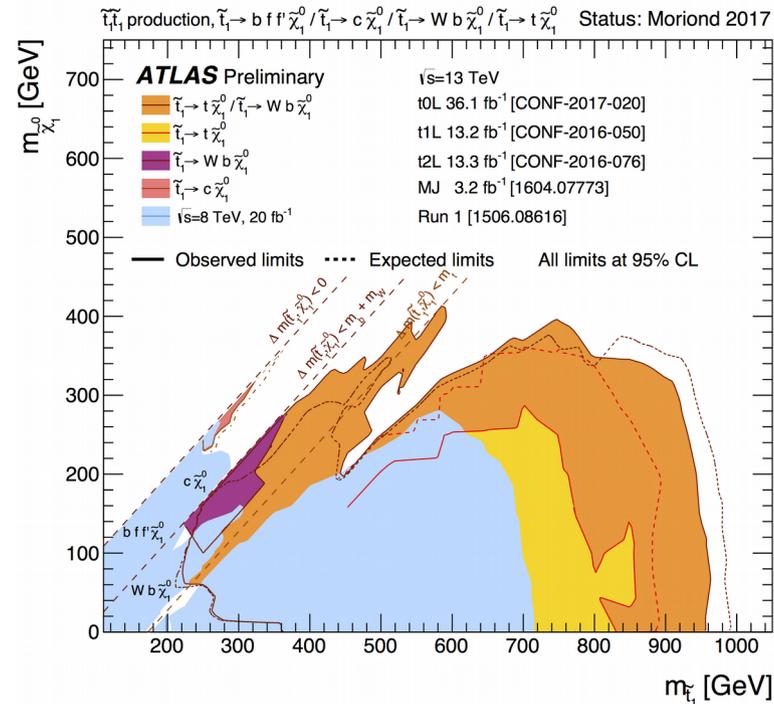
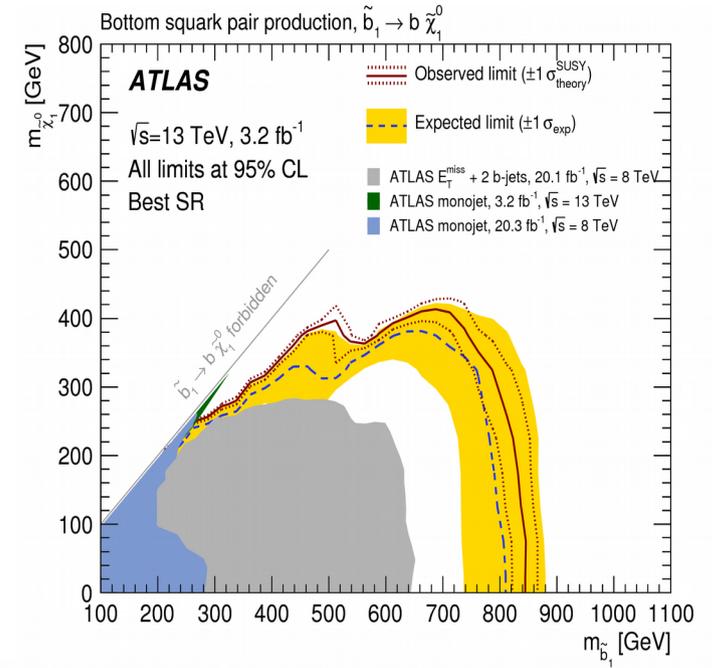
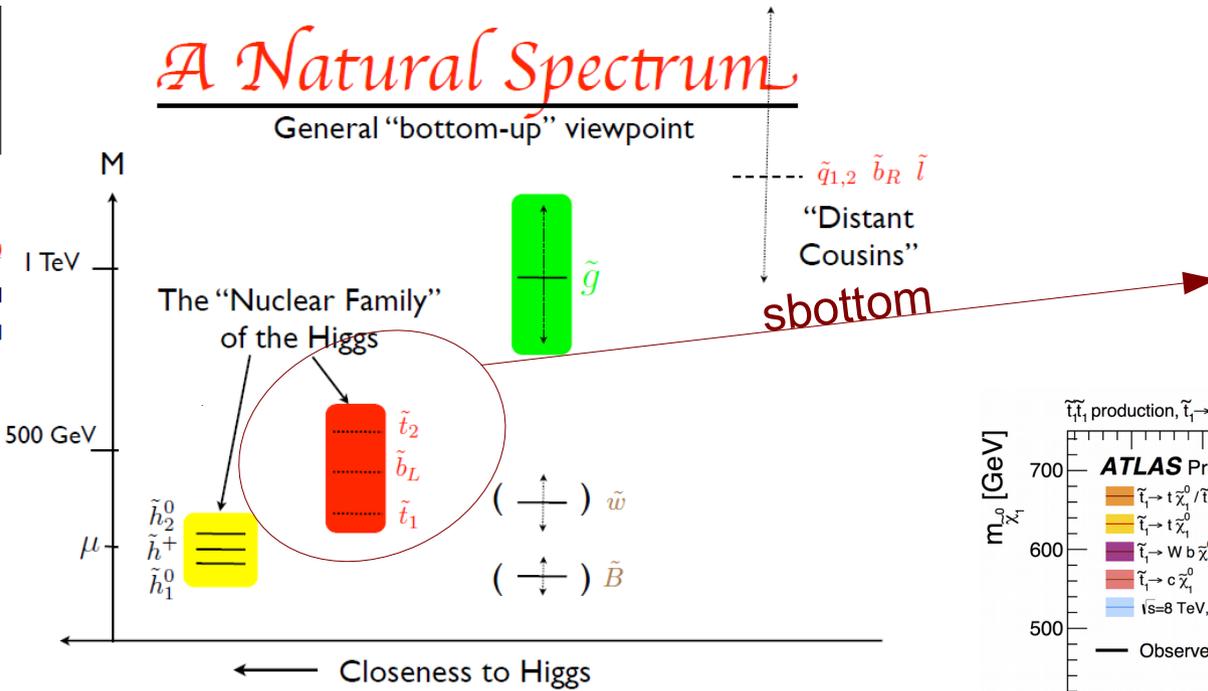


- Dans des modèles simplifiés, aucune trace...
- Masse des gluinos > 2 TeV, masse des squarks $> 2,2$ TeV

SUSY : 3^{ème} génération

A Natural Spectrum

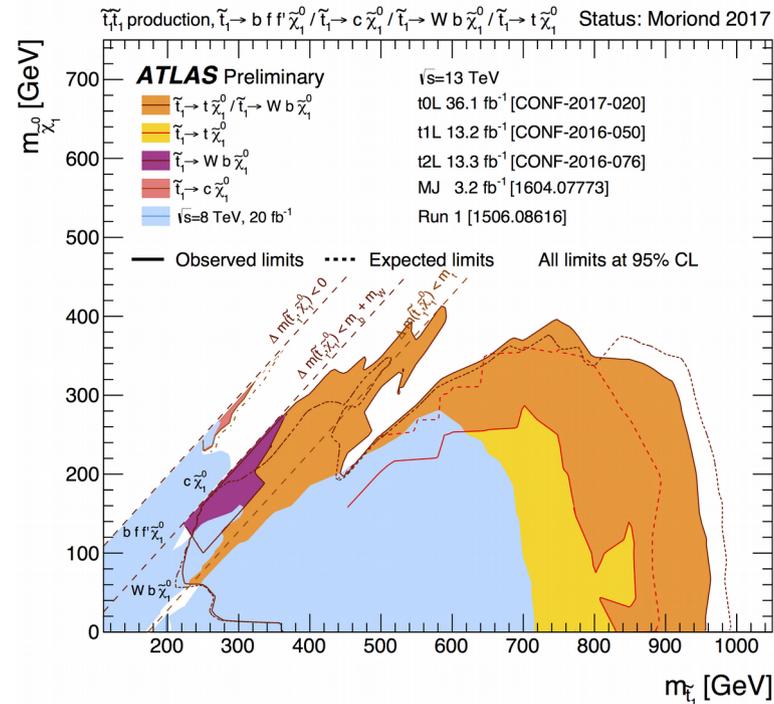
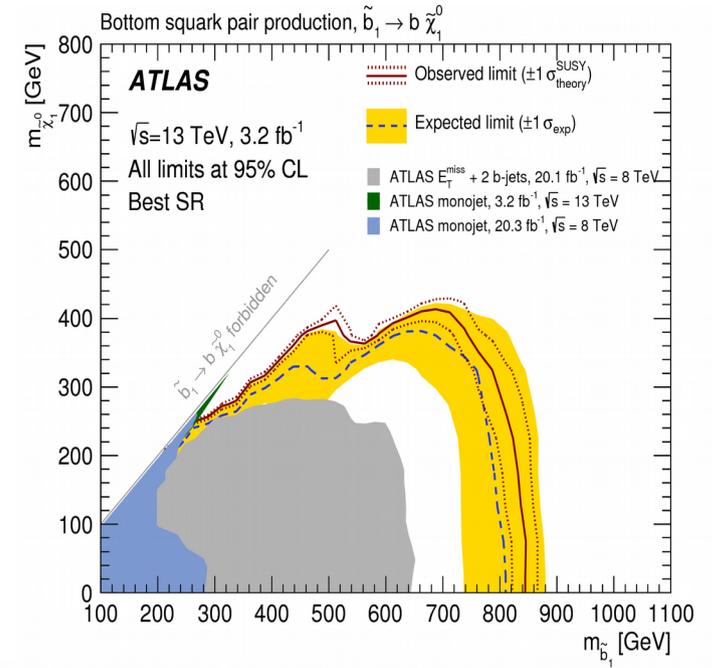
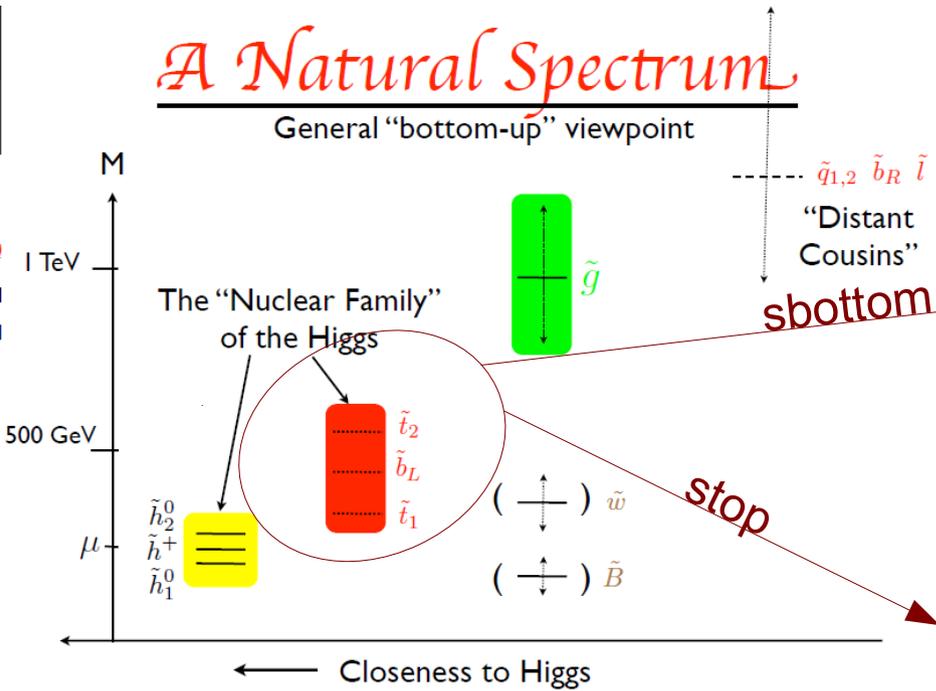
General "bottom-up" viewpoint



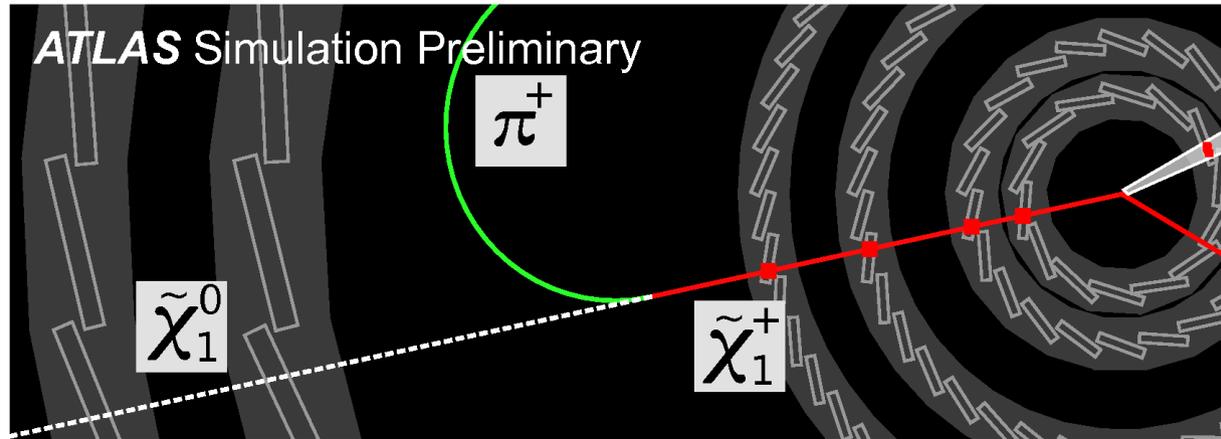
SUSY : 3^{ème} génération

A Natural Spectrum

General "bottom-up" viewpoint



« Disappearing tracks » / « displaced vertex »



- Nouvelle particule chargée
- Voyage suffisamment longtemps pour laisser une trace dans le détecteur à pixels
- Puis se désintègre : la trace s'arrête
- On a aussi cherché le contraire : une particule neutre qui traverse les premières couches, et des traces qui apparaissent plus loin
- Rien trouvé d'anormal...

SUSY : état des lieux

ATLAS SUSY Searches* - 95% CL Lower Limits

Status: March 2017

ATLAS Preliminary

$\sqrt{s} = 7, 8, 13$ TeV

Model	e, μ, τ, γ	Jets	E_T^{miss}	$\int \mathcal{L} dt [\text{fb}^{-1}]$	Mass limit	$\sqrt{s} = 7, 8$ TeV	$\sqrt{s} = 13$ 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}	1.85 TeV	$m(\tilde{g})=m(\tilde{q})$
	$\tilde{q}\tilde{q}, \tilde{q} \rightarrow q\tilde{\chi}_1^0$	0	2-6 jets	Yes	36.1	\tilde{q}	1.57 TeV	$m(\tilde{\chi}_1^0) < 200$ GeV, $m(1^{\text{st}} \text{ gen. } \tilde{q})=m(2^{\text{nd}} \text{ gen. } \tilde{q})$
	$\tilde{q}\tilde{q}, \tilde{q} \rightarrow q\tilde{\chi}_1^0$ (compressed)	mono-jet	1-3 jets	Yes	3.2	\tilde{q}	608 GeV	$m(\tilde{g})-m(\tilde{\chi}_1^0) < 5$ GeV
	$\tilde{g}\tilde{g}, \tilde{g} \rightarrow q\tilde{q}\tilde{\chi}_1^0$	0	2-6 jets	Yes	36.1	\tilde{g}	2.02 TeV	$m(\tilde{\chi}_1^0) < 200$ GeV
	$\tilde{g}\tilde{g}, \tilde{g} \rightarrow q\tilde{q}\tilde{\chi}_1^0$	0	2-6 jets	Yes	36.1	\tilde{g}	2.01 TeV	$m(\tilde{\chi}_1^0) < 200$ GeV, $m(\tilde{\chi}^{\pm})=0.5(m(\tilde{\chi}_1^0)+m(\tilde{g}))$
	$\tilde{g}\tilde{g}, \tilde{g} \rightarrow q\tilde{q}(\ell/\nu)\tilde{\chi}_1^0$	3 e, μ	4 jets	-	13.2	\tilde{g}	1.7 TeV	$m(\tilde{\chi}_1^0) < 400$ GeV
	$\tilde{g}\tilde{g}, \tilde{g} \rightarrow q\tilde{q}WZ\tilde{\chi}_1^0$	2 e, μ (SS)	0-3 jets	Yes	13.2	\tilde{g}	1.6 TeV	$m(\tilde{\chi}_1^0) < 500$ GeV
	GMSB ($\tilde{\ell}$ NLSP)	1-2 $\tau + 0-1 \ell$	0-2 jets	Yes	3.2	\tilde{g}	2.0 TeV	$\text{ct}(\text{NLSP}) < 0.1$ mm
	GGM (bino NLSP)	2 γ	-	Yes	3.2	\tilde{g}	1.65 TeV	$m(\tilde{\chi}_1^0) < 950$ GeV, $\text{ct}(\text{NLSP}) < 0.1$ mm, $\mu < 0$
	GGM (higgsino-bino NLSP)	γ	1 b	Yes	20.3	\tilde{g}	1.37 TeV	$m(\tilde{\chi}_1^0) > 680$ GeV, $\text{ct}(\text{NLSP}) < 0.1$ mm, $\mu > 0$
	GGM (higgsino-bino NLSP)	γ	2 jets	Yes	13.3	\tilde{g}	1.8 TeV	$m(\text{NLSP}) > 430$ GeV
	GGM (higgsino NLSP)	2 e, μ (Z)	2 jets	Yes	20.3	\tilde{g}	900 GeV	$m(\tilde{G}) > 1.8 \times 10^{-4}$ eV, $m(\tilde{g})=m(\tilde{q})=1.5$ TeV
Gravitino LSP	0	mono-jet	Yes	20.3	$R^{1/2}$ scale	865 GeV		
3 rd gen. \tilde{g} med.	$\tilde{g}\tilde{g}, \tilde{g} \rightarrow b\tilde{b}\tilde{\chi}_1^0$	0	3 b	Yes	36.1	\tilde{g}	1.92 TeV	$m(\tilde{\chi}_1^0) < 600$ GeV
	$\tilde{g}\tilde{g}, \tilde{g} \rightarrow t\tilde{t}\tilde{\chi}_1^0$	0-1 e, μ	3 b	Yes	36.1	\tilde{g}	1.97 TeV	$m(\tilde{\chi}_1^0) < 200$ GeV
	$\tilde{g}\tilde{g}, \tilde{g} \rightarrow b\tilde{t}\tilde{\chi}_1^0$	0-1 e, μ	3 b	Yes	20.1	\tilde{g}	1.37 TeV	$m(\tilde{\chi}_1^0) < 300$ GeV
3 rd gen. squarks direct production	$\tilde{b}_1\tilde{b}_1, \tilde{b}_1 \rightarrow b\tilde{\chi}_1^0$	0	2 b	Yes	3.2	\tilde{b}_1	840 GeV	$m(\tilde{\chi}_1^0) < 100$ GeV
	$\tilde{b}_1\tilde{b}_1, \tilde{b}_1 \rightarrow b\tilde{\chi}_1^0$	2 e, μ (SS)	1 b	Yes	13.2	\tilde{b}_1	325-685 GeV	$m(\tilde{\chi}_1^0) < 150$ GeV, $m(\tilde{\chi}_1^{\pm}) = m(\tilde{\chi}_1^0) + 100$ GeV
	$\tilde{t}_1\tilde{t}_1, \tilde{t}_1 \rightarrow b\tilde{\chi}_1^0$	0-2 e, μ	1-2 b	Yes	4.7/13.3	\tilde{t}_1	117-170 GeV	$m(\tilde{\chi}_1^0) = 2m(\tilde{\chi}_1^{\pm}), m(\tilde{\chi}_1^{\pm})=55$ GeV
	$\tilde{t}_1\tilde{t}_1, \tilde{t}_1 \rightarrow Wb\tilde{\chi}_1^0$ or $\tilde{t}\tilde{t}^0$	0-2 e, μ	0-2 jets/1-2 b	Yes	20.3	\tilde{t}_1	90-198 GeV	$m(\tilde{\chi}_1^0)=1$ GeV
	$\tilde{t}_1\tilde{t}_1, \tilde{t}_1 \rightarrow c\tilde{\chi}_1^0$	0	mono-jet	Yes	3.2	\tilde{t}_1	90-323 GeV	$m(\tilde{t}_1)-m(\tilde{\chi}_1^0)=5$ GeV
	$\tilde{t}_1\tilde{t}_1$ (natural GMSB)	2 e, μ (Z)	1 b	Yes	20.3	\tilde{t}_1	150-600 GeV	$m(\tilde{\chi}_1^0) > 150$ GeV
	$\tilde{t}_2\tilde{t}_2, \tilde{t}_2 \rightarrow \tilde{t}_1 + Z$	3 e, μ (Z)	1 b	Yes	36.1	\tilde{t}_2	290-790 GeV	$m(\tilde{\chi}_1^0)=0$ GeV
$\tilde{t}_2\tilde{t}_2, \tilde{t}_2 \rightarrow \tilde{t}_1 + h$	1-2 e, μ	4 b	Yes	36.1	\tilde{t}_2	320-880 GeV	$m(\tilde{\chi}_1^0)=0$ GeV	
EW direct	$\tilde{\chi}_{1,2}^0\tilde{\chi}_{1,2}^0, \tilde{\chi} \rightarrow \tilde{\chi}\tilde{\chi}^0$	2 e, μ	0	Yes	20.3	$\tilde{\chi}$	90-335 GeV	$m(\tilde{\chi}_1^0)=0$ GeV
	$\tilde{\chi}_1^+\tilde{\chi}_1^-, \tilde{\chi}_1^+ \rightarrow \tilde{\chi}\tilde{\chi}^0$	2 e, μ	0	Yes	13.3	$\tilde{\chi}_1^{\pm}$	640 GeV	$m(\tilde{\chi}_1^0)=0$ GeV, $m(\tilde{\chi}, \tilde{\nu})=0.5(m(\tilde{\chi}_1^+)+m(\tilde{\chi}_1^-))$
	$\tilde{\chi}_1^+\tilde{\chi}_1^-, \tilde{\chi}_1^+ \rightarrow \tau(\tau\tilde{\nu})$	2 τ	-	Yes	14.8	$\tilde{\chi}_1^{\pm}$	580 GeV	$m(\tilde{\chi}_1^0)=0$ GeV, $m(\tilde{\chi}, \tilde{\nu})=0.5(m(\tilde{\chi}_1^+)+m(\tilde{\chi}_1^-))$
	$\tilde{\chi}_1^+\tilde{\chi}_1^0 \rightarrow \tilde{\chi}_1^0\tilde{\chi}_1^0, \tilde{\chi}_1^0 \rightarrow \tilde{\chi}\tilde{\chi}^0$	3 e, μ	0	Yes	13.3	$\tilde{\chi}_1^{\pm}, \tilde{\chi}_1^0$	1.0 TeV	$m(\tilde{\chi}_1^0)=m(\tilde{\chi}_2^0), m(\tilde{\chi}_1^{\pm})=0, m(\tilde{\chi}, \tilde{\nu})=0.5(m(\tilde{\chi}_1^+)+m(\tilde{\chi}_1^-))$
	$\tilde{\chi}_1^+\tilde{\chi}_1^0 \rightarrow W\tilde{\chi}_1^0\tilde{\chi}_1^0, \tilde{\chi}_1^0 \rightarrow \tilde{\chi}\tilde{\chi}^0$	2-3 e, μ	0-2 jets	Yes	20.3	$\tilde{\chi}_1^{\pm}, \tilde{\chi}_1^0$	425 GeV	$m(\tilde{\chi}_1^0)=m(\tilde{\chi}_2^0), m(\tilde{\chi}_1^{\pm})=0, \tilde{\ell}$ decoupled
	$\tilde{\chi}_1^+\tilde{\chi}_1^0 \rightarrow W\tilde{\chi}_1^0\tilde{\chi}_1^0, h \rightarrow b\tilde{b}/W\tilde{\tau}\tau/\gamma\gamma$	e, μ, γ	0-2 b	Yes	20.3	$\tilde{\chi}_1^{\pm}, \tilde{\chi}_1^0$	270 GeV	$m(\tilde{\chi}_1^0)=m(\tilde{\chi}_2^0), m(\tilde{\chi}_1^{\pm})=0, \tilde{\ell}$ decoupled
	$\tilde{\chi}_1^+\tilde{\chi}_1^0 \rightarrow W\tilde{\chi}_1^0\tilde{\chi}_1^0, h \rightarrow b\tilde{b}/W\tilde{\tau}\tau/\gamma\gamma$	4 e, μ	0	Yes	20.3	$\tilde{\chi}_{2,3}^0$	635 GeV	$m(\tilde{\chi}_2^0)=m(\tilde{\chi}_3^0), m(\tilde{\chi}_1^0)=0, m(\tilde{\chi}, \tilde{\nu})=0.5(m(\tilde{\chi}_2^0)+m(\tilde{\chi}_3^0))$
	GGM (wino NLSP) weak prod.	1 $e, \mu + \gamma$	-	Yes	20.3	\tilde{W}	115-370 GeV	$\text{ct} < 1$ mm
	GGM (bino NLSP) weak prod.	2 γ	-	Yes	20.3	\tilde{W}	590 GeV	$\text{ct} < 1$ mm
	Long-lived particles	Direct $\tilde{\chi}_1^+\tilde{\chi}_1^-$ prod., long-lived $\tilde{\chi}_1^{\pm}$	Disapp. trk	1 jet	Yes	36.1	$\tilde{\chi}_1^{\pm}$	430 GeV
Direct $\tilde{\chi}_1^+\tilde{\chi}_1^-$ prod., long-lived $\tilde{\chi}_1^{\pm}$		dE/dx trk	-	Yes	18.4	$\tilde{\chi}_1^{\pm}$	495 GeV	$m(\tilde{\chi}_1^0)-m(\tilde{\chi}_1^{\pm}) \sim 160$ MeV, $\tau(\tilde{\chi}_1^{\pm}) < 15$ ns
Stable, stopped \tilde{g} R-hadron		0	1-5 jets	Yes	27.9	\tilde{g}	850 GeV	$m(\tilde{\chi}_1^0)=100$ GeV, $10 \mu\text{s} < \tau(\tilde{g}) < 1000$ s
Stable \tilde{g} R-hadron		trk	-	-	3.2	\tilde{g}	1.58 TeV	1606.05129
Metastable \tilde{g} R-hadron		dE/dx trk	-	-	3.2	\tilde{g}	1.57 TeV	1604.04520
GMSB, stable $\tilde{\tau}, \tilde{\chi}_1^0 \rightarrow \tilde{\tau}(\tilde{b}, \tilde{d}) + \tau(e, \mu)$		1-2 μ	-	-	19.1	$\tilde{\chi}_1^0$	537 GeV	$10 < \text{ctan}\beta < 50$
GMSB, $\tilde{\chi}_1^0 \rightarrow \gamma G$, long-lived $\tilde{\chi}_1^0$		2 γ	-	Yes	20.3	$\tilde{\chi}_1^0$	440 GeV	$1 < \tau(\tilde{\chi}_1^0) < 3$ ns, SPS8 model
$\tilde{g}\tilde{g}, \tilde{g} \rightarrow e\tilde{e}/\mu\tilde{\nu}/\mu\tilde{\nu}$		displ. $e\tilde{e}/\mu\tilde{\nu}$	-	-	20.3	$\tilde{\chi}_1^0$	1.0 TeV	$7 < \text{ct}(\tilde{\chi}_1^0) < 740$ mm, $m(\tilde{g})=1.3$ TeV
GGM $\tilde{g}\tilde{g}, \tilde{g} \rightarrow ZG$	displ. vtx + jets	-	-	20.3	$\tilde{\chi}_1^0$	1.0 TeV	$6 < \text{ct}(\tilde{\chi}_1^0) < 480$ mm, $m(\tilde{g})=1.1$ TeV	
RPV	LFV $pp \rightarrow \tilde{\nu}_\tau + X, \tilde{\nu}_\tau \rightarrow e\mu/\tau\mu$	$e\mu, e\tau, \mu\tau$	-	-	3.2	$\tilde{\nu}_\tau$	1.9 TeV	$\lambda'_{311}=0.11, \lambda'_{132}/\lambda'_{133}=0.07$
	Bilinear RPV CMSSM	2 e, μ (SS)	0-3 b	Yes	20.3	\tilde{q}, \tilde{g}	1.45 TeV	$m(\tilde{g})=m(\tilde{q}), \text{ct}_{\text{LSP}} < 1$ mm
	$\tilde{\chi}_1^+\tilde{\chi}_1^-, \tilde{\chi}_1^+ \rightarrow W\tilde{\chi}_1^0, \tilde{\chi}_1^0 \rightarrow e\tilde{e}, \mu\tilde{\nu}, \mu\tilde{\nu}$	4 e, μ	-	Yes	13.3	$\tilde{\chi}_1^{\pm}$	1.14 TeV	$m(\tilde{\chi}_1^0) > 400$ GeV, $A_{12k} \neq 0$ ($k=1, 2$)
	$\tilde{\chi}_1^+\tilde{\chi}_1^-, \tilde{\chi}_1^+ \rightarrow W\tilde{\chi}_1^0, \tilde{\chi}_1^0 \rightarrow \tau\nu_e, \tau\nu_\tau$	3 $e, \mu + \tau$	-	Yes	20.3	$\tilde{\chi}_1^{\pm}$	450 GeV	$m(\tilde{\chi}_1^0) > 0.2 \times m(\tilde{\chi}_1^{\pm}), A_{133} \neq 0$
	$\tilde{g}\tilde{g}, \tilde{g} \rightarrow q\tilde{q}$	0	4-5 large-R jets	-	14.8	\tilde{g}	1.08 TeV	$\text{BR}(\tilde{g})-\text{BR}(b)-\text{BR}(c)=0\%$
	$\tilde{g}\tilde{g}, \tilde{g} \rightarrow q\tilde{q}\tilde{\chi}_1^0, \tilde{\chi}_1^0 \rightarrow q\tilde{q}$	0	4-5 large-R jets	-	14.8	\tilde{g}	1.55 TeV	$m(\tilde{\chi}_1^0)=800$ GeV
	$\tilde{g}\tilde{g}, \tilde{g} \rightarrow t\tilde{t}\tilde{\chi}_1^0, \tilde{\chi}_1^0 \rightarrow q\tilde{q}$	1 e, μ	8-10 jets/0-4 b	-	36.1	\tilde{g}	2.1 TeV	$m(\tilde{\chi}_1^0)=1$ TeV, $A_{112} \neq 0$
	$\tilde{g}\tilde{g}, \tilde{g} \rightarrow t\tilde{t}, \tilde{t}_1 \rightarrow b\tilde{s}$	1 e, μ	8-10 jets/0-4 b	-	36.1	\tilde{g}	1.65 TeV	$m(\tilde{t}_1)=1$ TeV, $A_{323} \neq 0$
	$\tilde{t}_1\tilde{t}_1, \tilde{t}_1 \rightarrow b\tilde{s}$	0	2 jets + 2 b	-	15.4	\tilde{t}_1	410 GeV	
	$\tilde{t}_1\tilde{t}_1, \tilde{t}_1 \rightarrow b\tilde{\ell}$	2 e, μ	2 b	-	20.3	\tilde{t}_1	450-510 GeV	$\text{BR}(\tilde{t}_1 \rightarrow b\tilde{e}/\mu) > 20\%$
Other	Scalar charm, $\tilde{c} \rightarrow c\tilde{\chi}_1^0$	0	2 c	Yes	20.3	\tilde{c}	510 GeV	$m(\tilde{\chi}_1^0) < 200$ GeV

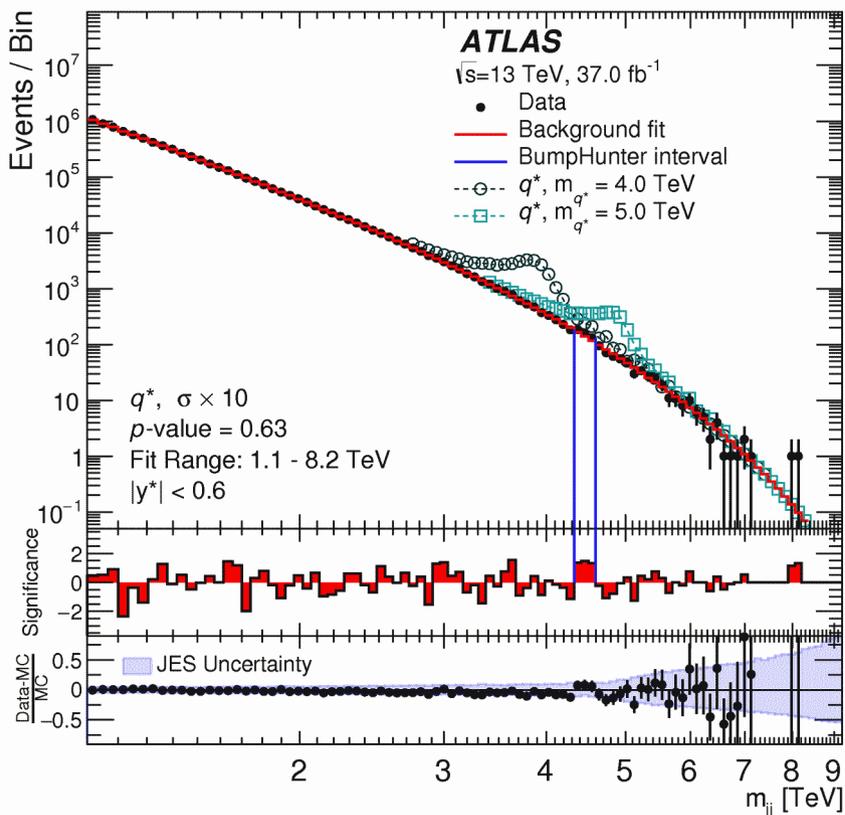
*Only a selection of the available mass limits on new states or phenomena is shown. Many of the limits are based on simplified models, c.f. refs. for the assumptions made.

10⁻¹ 1 Mass scale [TeV]

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

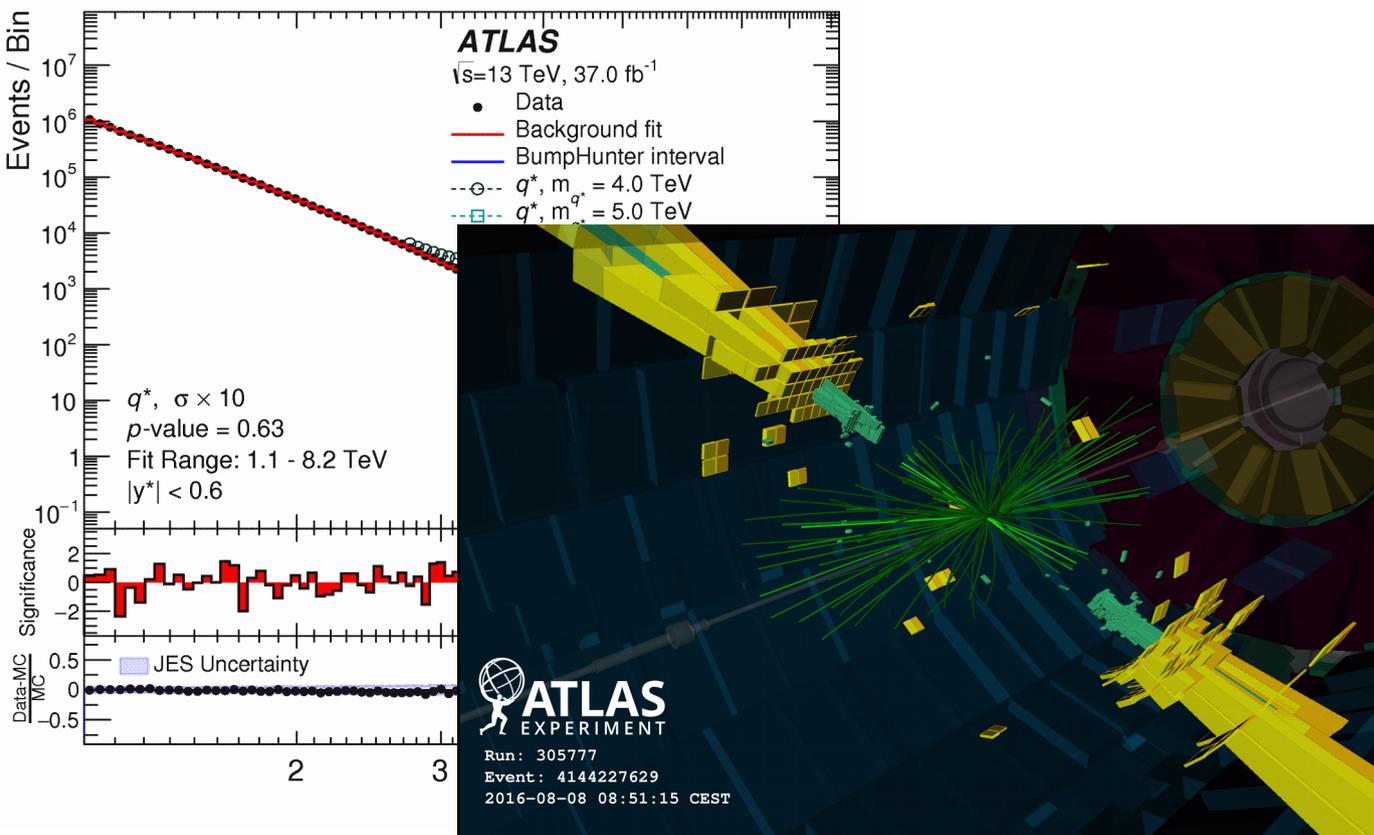
Exotiques

- On cherche la signature de particules nouvelles
- Désintégrations en jets, paires d'électrons ou muons, ...



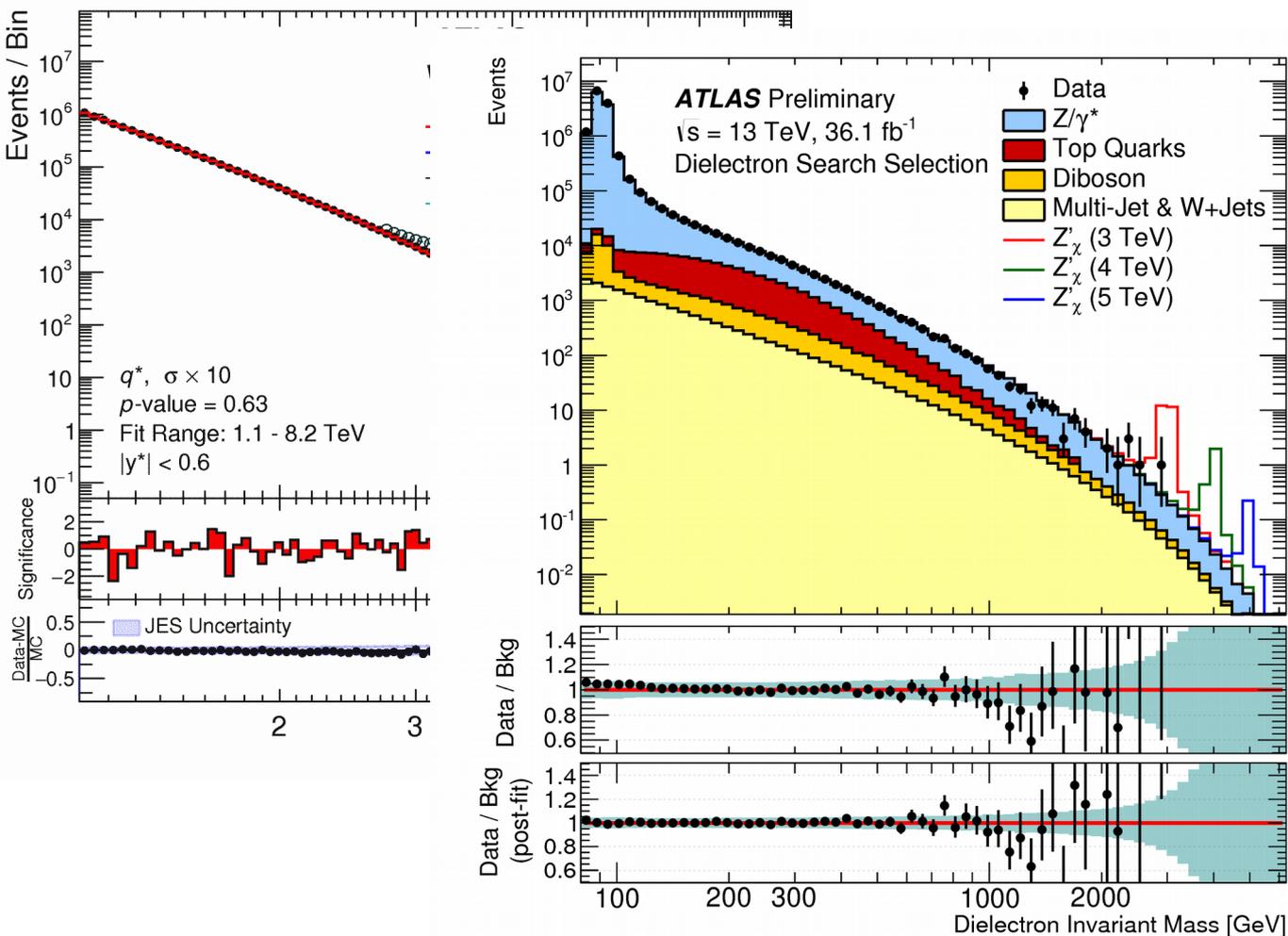
Exotiques

- On cherche la signature de particules nouvelles
- Désintégrations en jets, paires d'électrons ou muons, ...



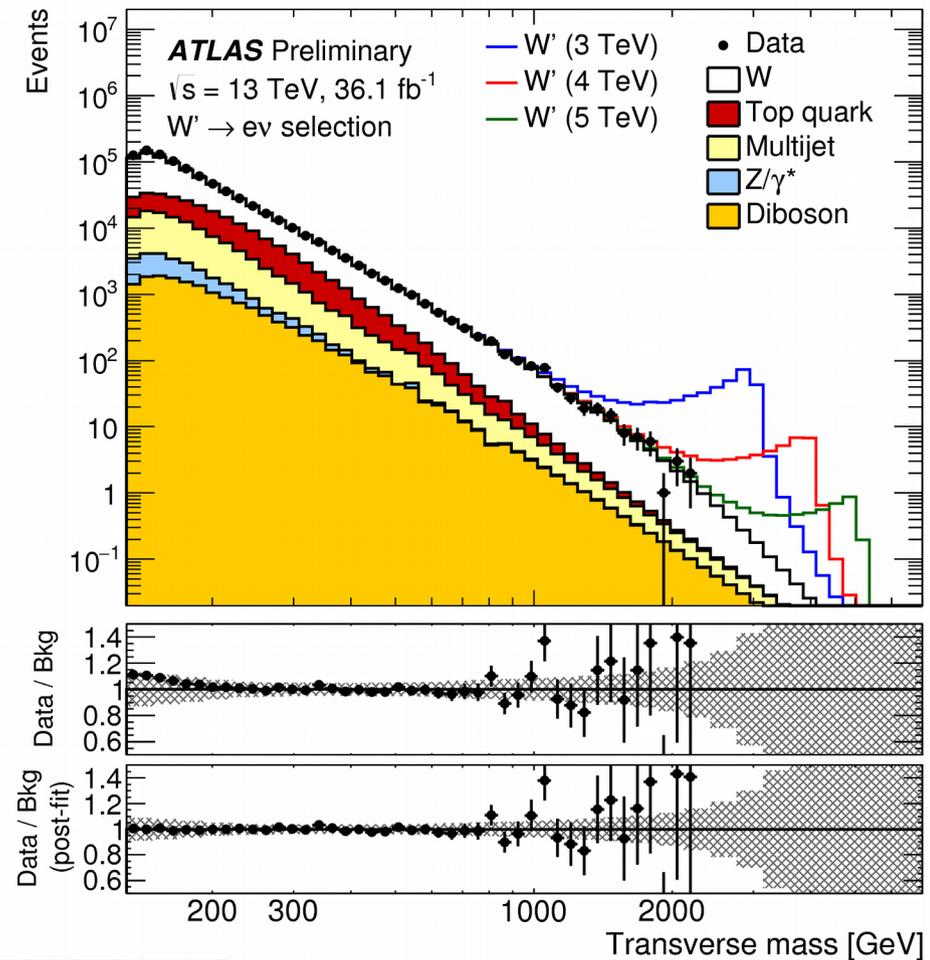
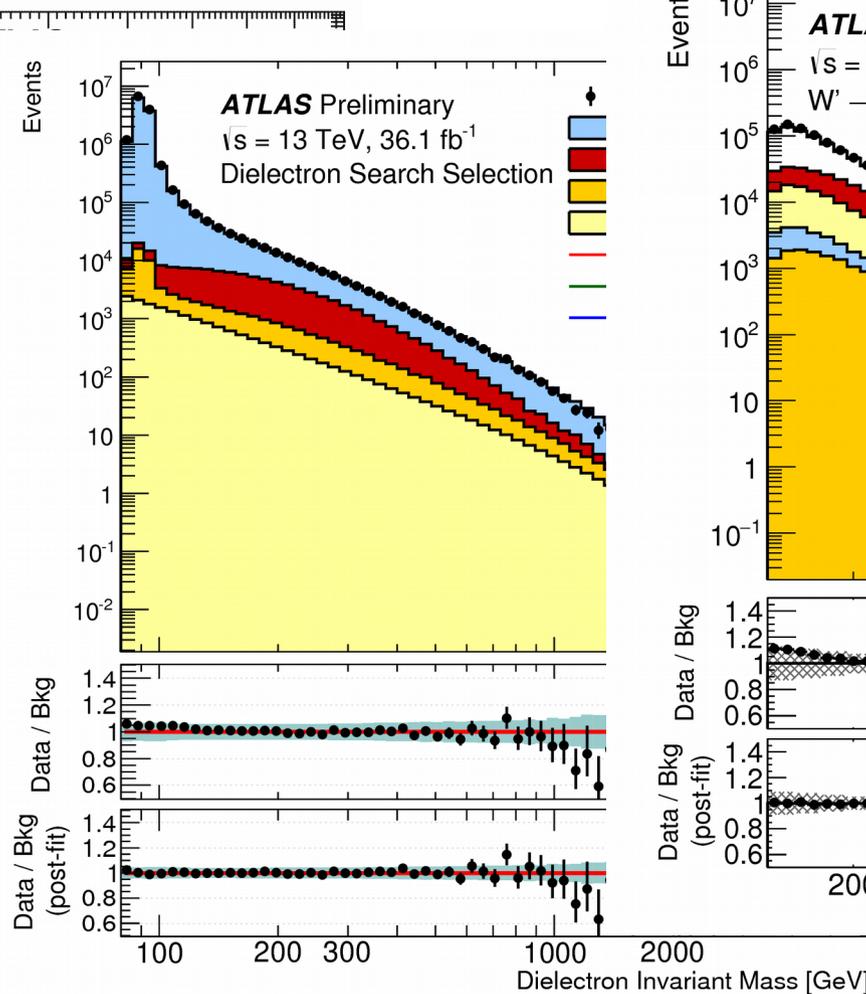
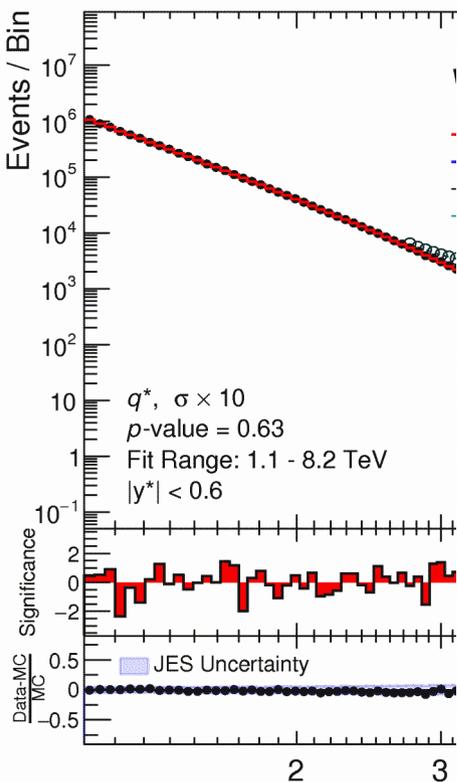
Exotiques

- On cherche la signature de particules nouvelles
- Désintégrations en jets, paires d'électrons ou muons, ...



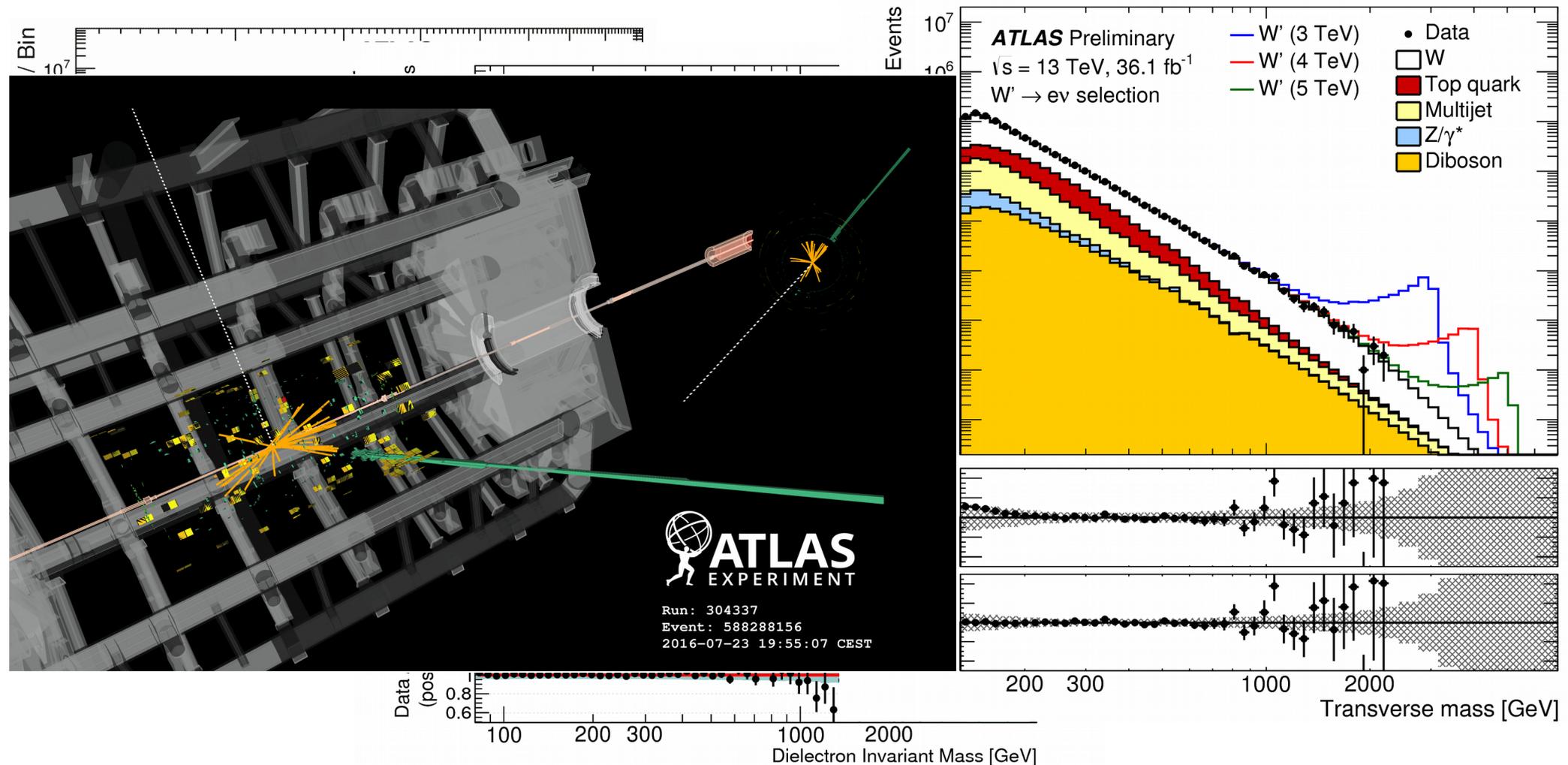
Exotiques

- On cherche la signature de particules nouvelles
- Désintégrations en jets, paires d'électrons ou muons, ...



Exotiques

- On cherche la signature de particules nouvelles
- Désintégrations en jets, paires d'électrons ou muons, ...



Exotiques : état des lieux

ATLAS Exotics Searches* - 95% CL Exclusion

Status: August 2016

ATLAS Preliminary

$\sqrt{s} = 8, 13 \text{ TeV}$

$\int \mathcal{L} dt = (3.2 - 20.3) \text{ fb}^{-1}$

Model	ℓ, γ	Jets [†]	$E_{\text{T}}^{\text{miss}}$	$\int \mathcal{L} dt [\text{fb}^{-1}]$	Limit	Reference	
Extra dimensions	ADD $G_{KK} + g/q$	-	$\geq 1j$	Yes	3.2	M_D 6.58 TeV	$n = 2$ 1604.07773
	ADD non-resonant $\ell\ell$	$2 e, \mu$	-	-	20.3	M_S 4.7 TeV	$n = 3 \text{ HLZ}$ 1407.2410
	ADD QBH $\rightarrow \ell q$	$1 e, \mu$	$1j$	-	20.3	M_{th} 5.2 TeV	$n = 6$ 1311.2006
	ADD QBH	-	$2j$	-	15.7	M_{th} 8.7 TeV	$n = 6$ ATLAS-CONF-2016-069
	ADD BH high $\sum p_T$	$\geq 1 e, \mu$	$\geq 2j$	-	3.2	M_{th} 8.2 TeV	$n = 6, M_D = 3 \text{ TeV, rot BH}$ 1606.02265
	ADD BH multijet	-	$\geq 3j$	-	3.6	M_{th} 9.55 TeV	$n = 6, M_D = 3 \text{ TeV, rot BH}$ 1512.02586
	RS1 $G_{KK} \rightarrow \ell\ell$	$2 e, \mu$	-	-	20.3	$G_{KK} \text{ mass}$ 2.68 TeV	$k/\overline{M}_{Pl} = 0.1$ 1405.4123
	RS1 $G_{KK} \rightarrow \gamma\gamma$	2γ	-	-	3.2	$G_{KK} \text{ mass}$ 3.2 TeV	$k/\overline{M}_{Pl} = 0.1$ 1606.03833
	Bulk RS $G_{KK} \rightarrow WW \rightarrow qq\ell\nu$	$1 e, \mu$	$1j$	Yes	13.2	$G_{KK} \text{ mass}$ 1.24 TeV	$k/\overline{M}_{Pl} = 1.0$ ATLAS-CONF-2016-062
	Bulk RS $G_{KK} \rightarrow HH \rightarrow bbbb$	-	$4b$	-	13.3	$G_{KK} \text{ mass}$ 360-860 GeV	$k/\overline{M}_{Pl} = 1.0$ ATLAS-CONF-2016-049
Bulk RS $g_{KK} \rightarrow tt$	$1 e, \mu$	$\geq 1b, \geq 1J/2j$	Yes	20.3	$g_{KK} \text{ mass}$ 2.2 TeV	$BR = 0.925$ 1505.07018	
2UED / RPP	$1 e, \mu$	$\geq 2b, \geq 4j$	Yes	3.2	$KK \text{ mass}$ 1.46 TeV	Tier (1,1), $BR(A^{(1,1)} \rightarrow tt) = 1$ ATLAS-CONF-2016-013	
Gauge bosons	SSM $Z' \rightarrow \ell\ell$	$2 e, \mu$	-	-	13.3	$Z' \text{ mass}$ 4.05 TeV	ATLAS-CONF-2016-045
	SSM $Z' \rightarrow \tau\tau$	2τ	-	-	19.5	$Z' \text{ mass}$ 2.02 TeV	1502.07177
	Leptophobic $Z' \rightarrow bb$	-	$2b$	-	3.2	$Z' \text{ mass}$ 1.5 TeV	1603.08791
	SSM $W' \rightarrow \ell\nu$	$1 e, \mu$	-	Yes	13.3	$W' \text{ mass}$ 4.74 TeV	ATLAS-CONF-2016-061
	HVT $W' \rightarrow WZ \rightarrow qq\nu\nu$ model A	$0 e, \mu$	$1J$	Yes	13.2	$W' \text{ mass}$ 2.4 TeV	ATLAS-CONF-2016-082
	HVT $W' \rightarrow WZ \rightarrow qqqq$ model B	-	$2J$	-	15.5	$W' \text{ mass}$ 3.0 TeV	ATLAS-CONF-2016-055
CI	HVT $V' \rightarrow WH/ZH$ model B	multi-channel	-	-	3.2	$V' \text{ mass}$ 2.31 TeV	$g_V = 1$ $g_V = 3$ $g_V = 3$ 1607.05621
	LRSM $W'_R \rightarrow tb$	$1 e, \mu$	$2b, 0-1j$	Yes	20.3	$W' \text{ mass}$ 1.92 TeV	1410.4103
	LRSM $W'_R \rightarrow tb$	$0 e, \mu$	$\geq 1b, 1J$	-	20.3	$W' \text{ mass}$ 1.76 TeV	1408.0886
DM	CI $qqqq$	-	$2j$	-	15.7	Λ 19.9 TeV $\eta_{LL} = -1$	ATLAS-CONF-2016-069
	CI $\ell\ell qq$	$2 e, \mu$	-	-	3.2	Λ 25.2 TeV $\eta_{LL} = -1$	1607.03669
	CI $uutt$	$2(SS) \geq 3 e, \mu$	$\geq 1b, \geq 1j$	Yes	20.3	Λ 4.9 TeV $ C_{RR} = 1$	1504.04605
LQ	Axial-vector mediator (Dirac DM)	$0 e, \mu$	$\geq 1j$	Yes	3.2	m_A 1.0 TeV	$g_q = 0.25, g_\gamma = 1.0, m(\chi) < 250 \text{ GeV}$ 1604.07773
	Axial-vector mediator (Dirac DM)	$0 e, \mu, 1 \gamma$	$1j$	Yes	3.2	m_A 710 GeV	$g_q = 0.25, g_\gamma = 1.0, m(\chi) < 150 \text{ GeV}$ 1604.01306
	$ZZ\chi\chi$ EFT (Dirac DM)	$0 e, \mu$	$1J, \leq 1j$	Yes	3.2	M_χ 550 GeV	$m(\chi) < 150 \text{ GeV}$ ATLAS-CONF-2015-080
Heavy quarks	Scalar LQ 1 st gen	$2e$	$\geq 2j$	-	3.2	LQ mass 1.1 TeV	$\beta = 1$ 1605.06035
	Scalar LQ 2 nd gen	2μ	$\geq 2j$	-	3.2	LQ mass 1.05 TeV	$\beta = 1$ 1605.06035
	Scalar LQ 3 rd gen	$1 e, \mu$	$\geq 1b, \geq 3j$	Yes	20.3	LQ mass 640 GeV	$\beta = 0$ 1508.04735
Excited fermions	VLQ $TT \rightarrow Ht + X$	$1 e, \mu$	$\geq 2b, \geq 3j$	Yes	20.3	T mass 855 GeV	T in (T,B) doublet 1505.04306
	VLQ $YY \rightarrow Wb + X$	$1 e, \mu$	$\geq 1b, \geq 3j$	Yes	20.3	Y mass 770 GeV	Y in (B,Y) doublet 1505.04306
	VLQ $BB \rightarrow Hb + X$	$1 e, \mu$	$\geq 2b, \geq 3j$	Yes	20.3	B mass 735 GeV	isospin singlet 1505.04306
	VLQ $BB \rightarrow Zb + X$	$2/\geq 3 e, \mu$	$\geq 2/\geq 1b$	-	20.3	B mass 755 GeV	B in (B,Y) doublet 1409.5500
	VLQ $QQ \rightarrow WqWq$	$1 e, \mu$	$\geq 4j$	Yes	20.3	Q mass 690 GeV	1509.04261
	VLQ $T_{5/3} T_{5/3} \rightarrow WtWt$	$2(SS) \geq 3 e, \mu$	$\geq 1b, \geq 1j$	Yes	3.2	$T_{5/3} \text{ mass}$ 990 GeV	ATLAS-CONF-2016-032
Other	Excited quark $q^* \rightarrow q\gamma$	1γ	$1j$	-	3.2	$q^* \text{ mass}$ 4.4 TeV	only u^* and d^* , $\Lambda = m(q^*)$ 1512.05910
	Excited quark $q^* \rightarrow qg$	-	$2j$	-	15.7	$q^* \text{ mass}$ 5.6 TeV	only u^* and d^* , $\Lambda = m(q^*)$ ATLAS-CONF-2016-069
	Excited quark $b^* \rightarrow bg$	-	$1b, 1j$	-	8.8	$b^* \text{ mass}$ 2.3 TeV	ATLAS-CONF-2016-060
	Excited quark $b^* \rightarrow Wt$	$1 \text{ or } 2 e, \mu$	$1b, 2-0j$	Yes	20.3	$b^* \text{ mass}$ 1.5 TeV	$f_g = f_t = f_b = 1$ 1510.02664
	Excited lepton ℓ^*	$3 e, \mu$	-	-	20.3	$\ell^* \text{ mass}$ 3.0 TeV	$\Lambda = 3.0 \text{ TeV}$ 1411.2921
	Excited lepton ν^*	$3 e, \mu, \tau$	-	-	20.3	$\nu^* \text{ mass}$ 1.6 TeV	$\Lambda = 1.6 \text{ TeV}$ 1411.2921
Other	LSTC $a_T \rightarrow W\gamma$	$1 e, \mu, 1 \gamma$	-	Yes	20.3	$a_T \text{ mass}$ 960 GeV	1407.8150
	LRSM Majorana ν	$2 e, \mu$	$2j$	-	20.3	$N^0 \text{ mass}$ 2.0 TeV	$m(W_R) = 2.4 \text{ TeV, no mixing}$ 1506.06020
	Higgs triplet $H^{\pm\pm} \rightarrow ee$	$2e$ (SS)	-	-	13.9	$H^{\pm\pm} \text{ mass}$ 570 GeV	DY production, $BR(H^{\pm\pm} \rightarrow ee)=1$ ATLAS-CONF-2016-051
	Higgs triplet $H^{\pm\pm} \rightarrow \ell\tau$	$3 e, \mu, \tau$	-	-	20.3	$H^{\pm\pm} \text{ mass}$ 400 GeV	DY production, $BR(H^{\pm\pm} \rightarrow \ell\tau)=1$ 1411.2921
	Monotop (non-res prod)	$1 e, \mu$	$1b$	Yes	20.3	spin-1 invisible particle mass 657 GeV	$a_{\text{non-res}} = 0.2$ 1410.5404
	Multi-charged particles	-	-	-	20.3	multi-charged particle mass 785 GeV	DY production, $ q = 5e$ 1504.04188
	Magnetic monopoles	-	-	-	7.0	monopole mass 1.34 TeV	DY production, $ g = 1g_D, \text{spin } 1/2$ 1509.08059

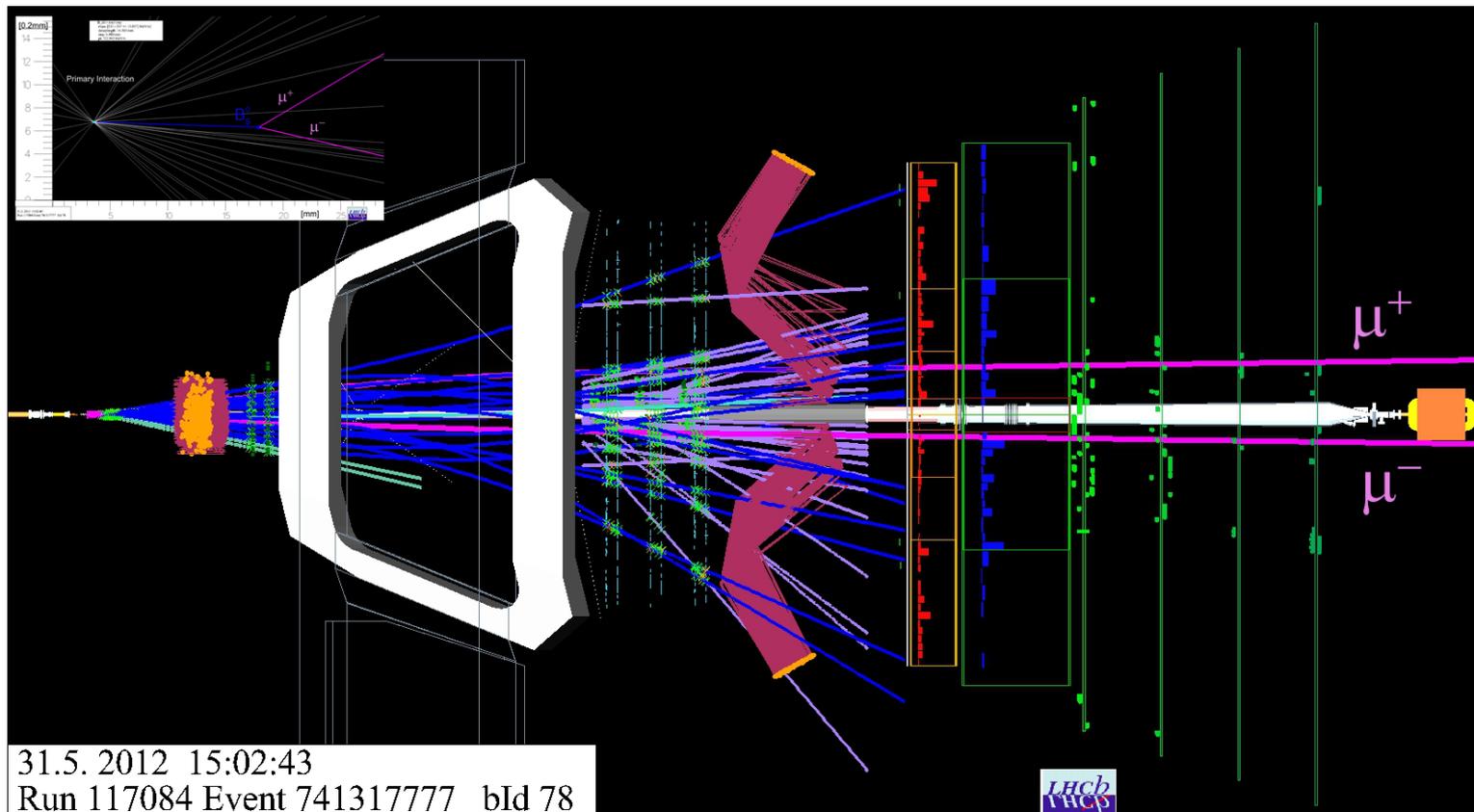
*Only a selection of the available mass limits on new states or phenomena is shown. Lower bounds are specified only when explicitly not excluded.

†Small-radius (large-radius) jets are denoted by the letter j (J).

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

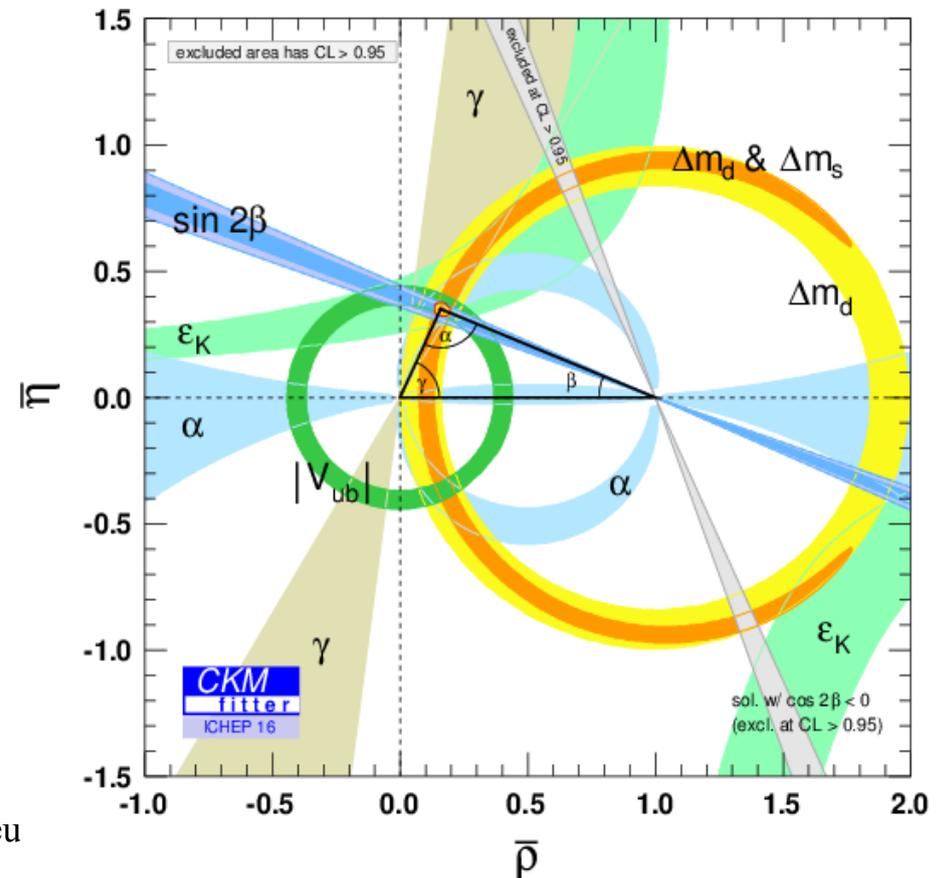
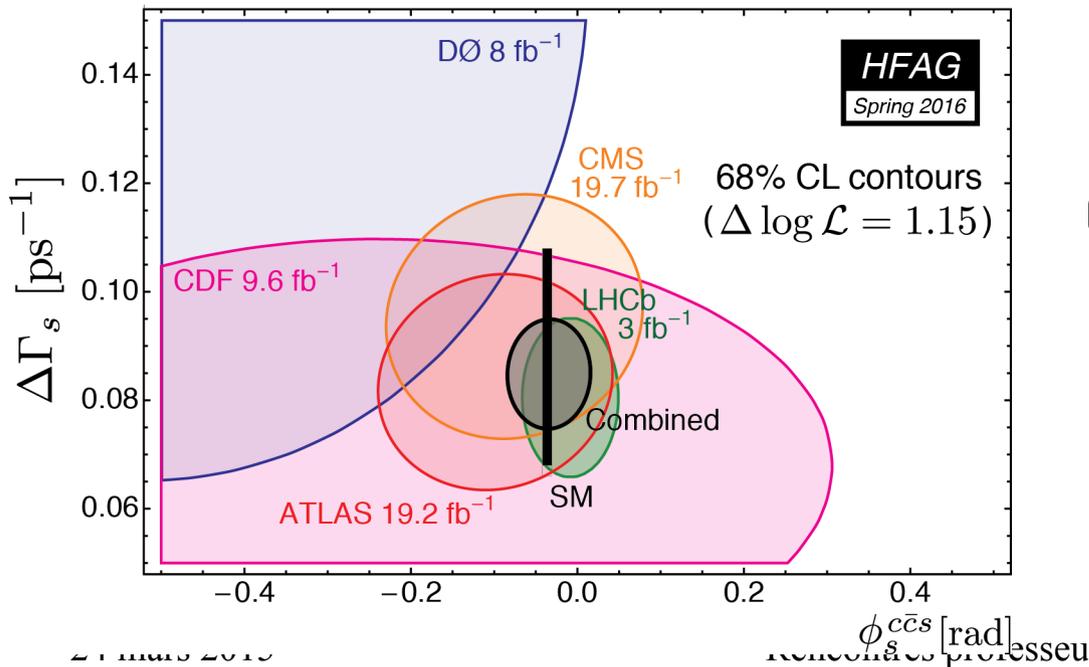
Nouvelle physique indirectement

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



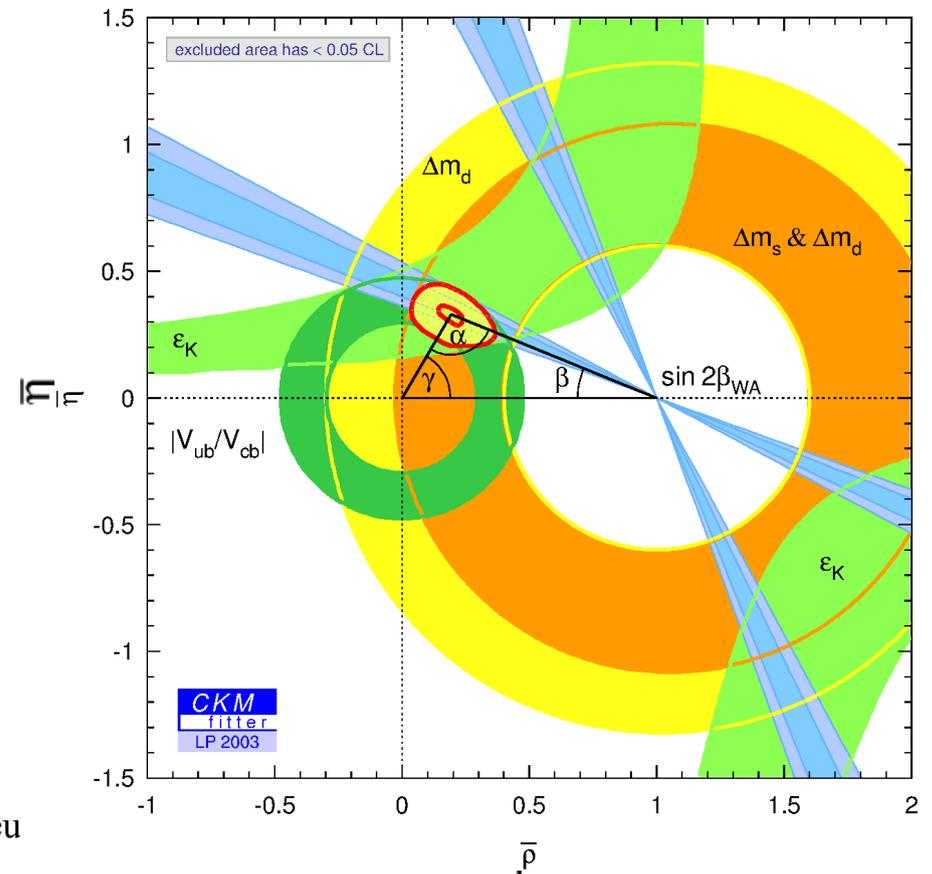
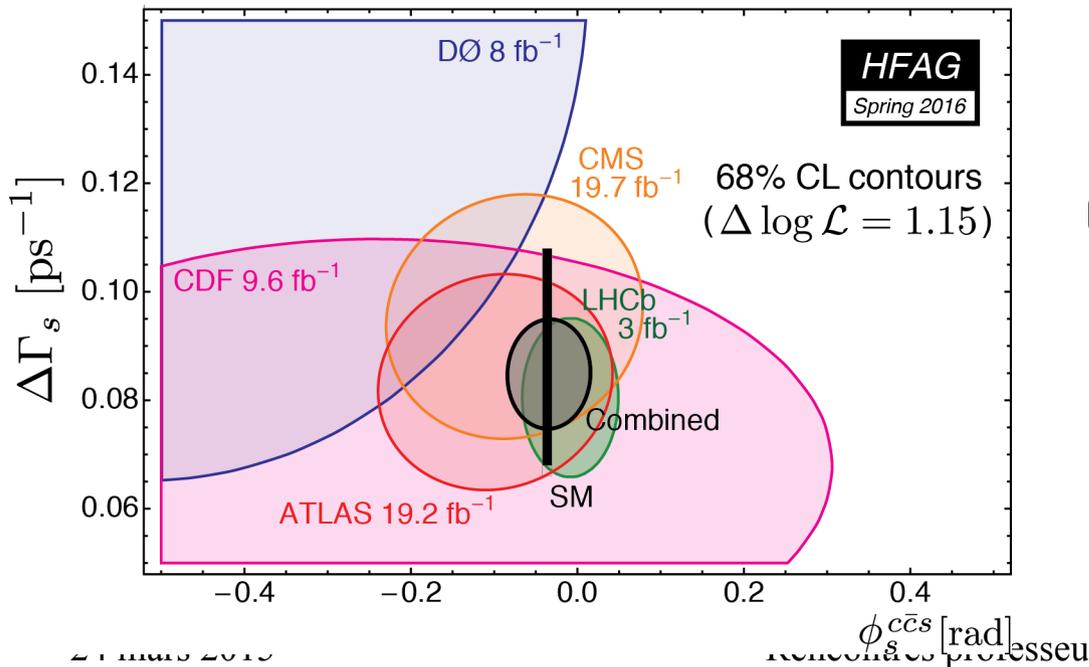
Asymétrie matière-antimatière

- 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



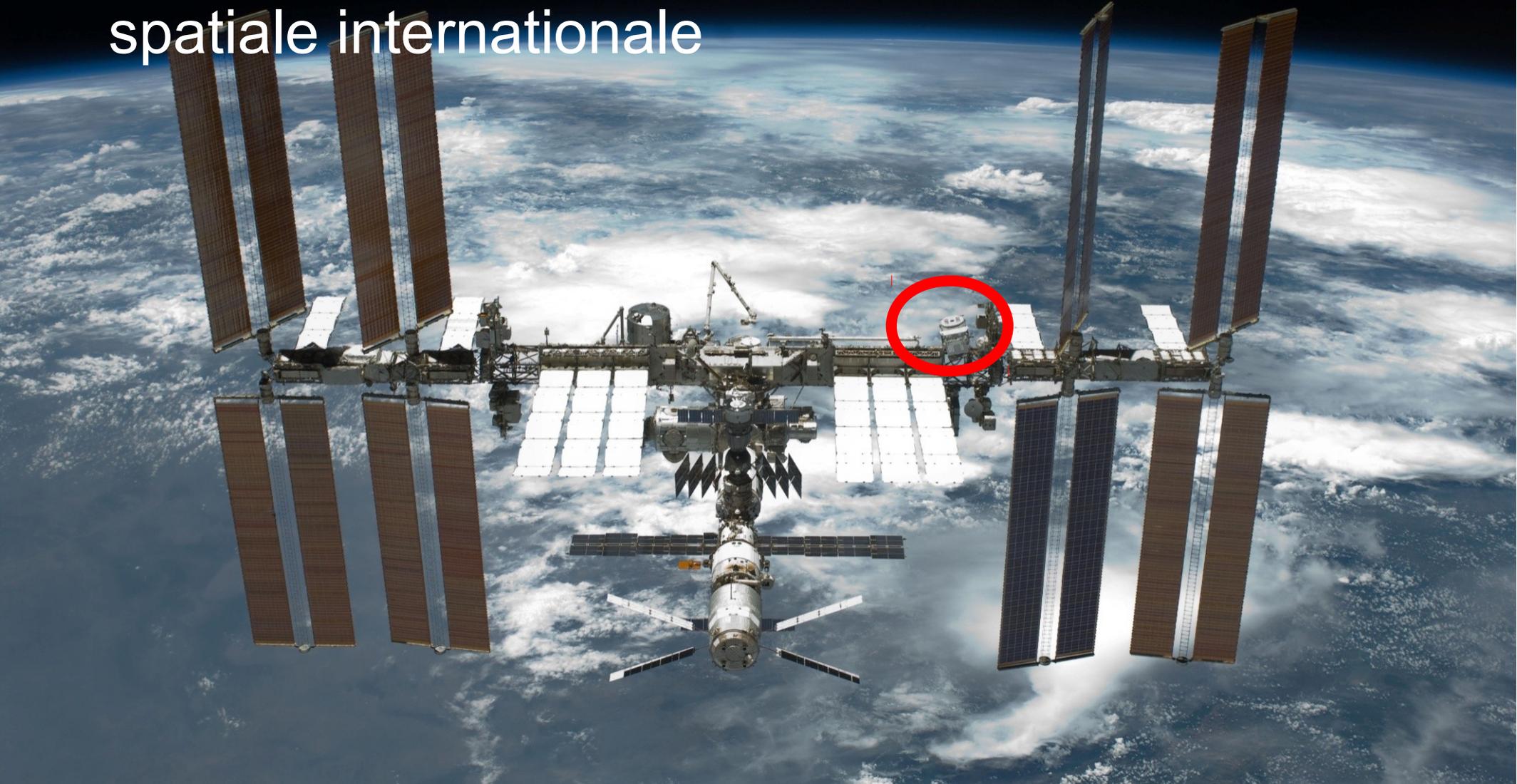
Asymétrie matière-antimatière

- 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



Asymétrie matière-antimatière dans l'espace : AMS

- Alpha Magnetic Spectrometer
- Détecteur de particules à bord de la station spatiale internationale



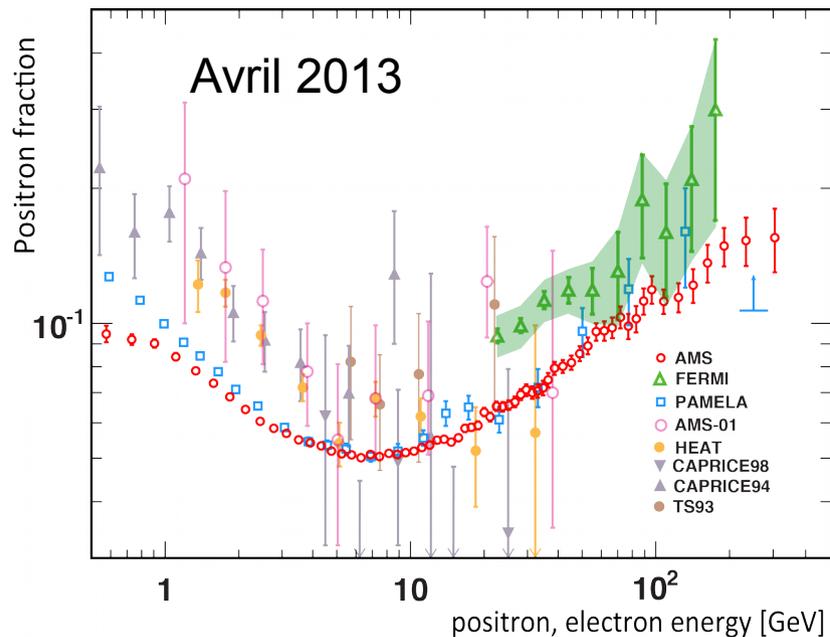
Asymétrie matière-antimatière dans l'espace : AMS

- Alpha Magnetic Spectrometer
- Détecteur de particules à bord de la station spatiale internationale



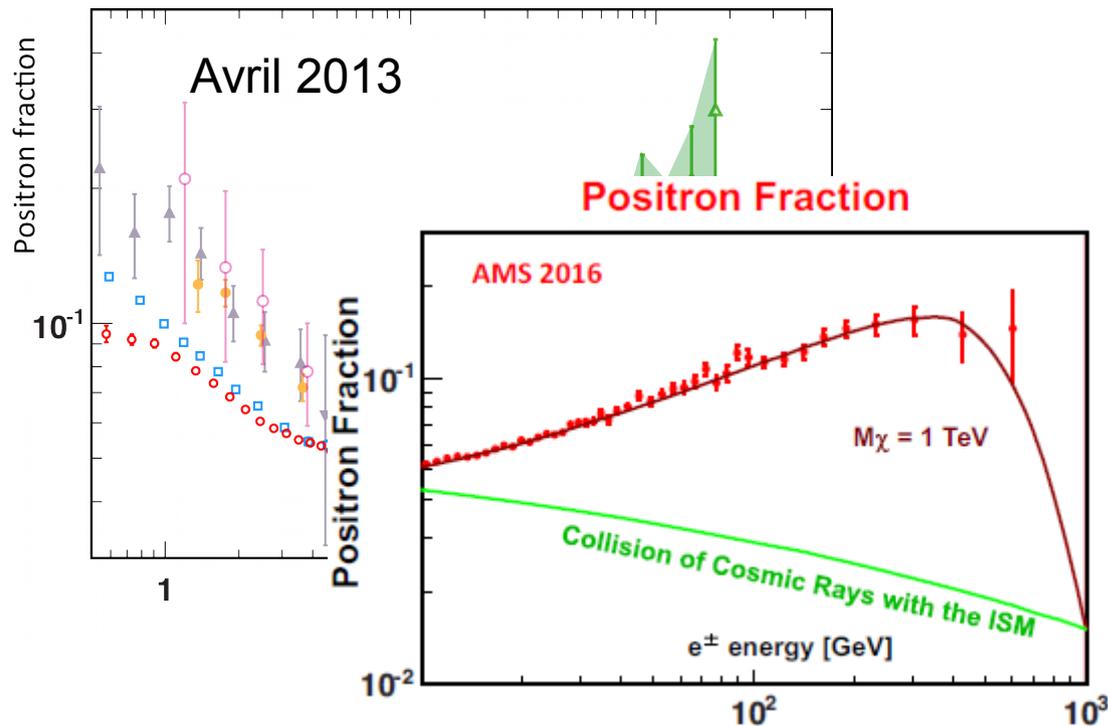
Asymétrie matière-antimatière dans l'espace : AMS

- Mesure le rapport des flux d'électrons et de positrons
- Confirme un excès de positrons connu depuis longtemps
- Mais aussi excès d'antiprotons, de divers éléments
- Encore des données jusqu'en 2024



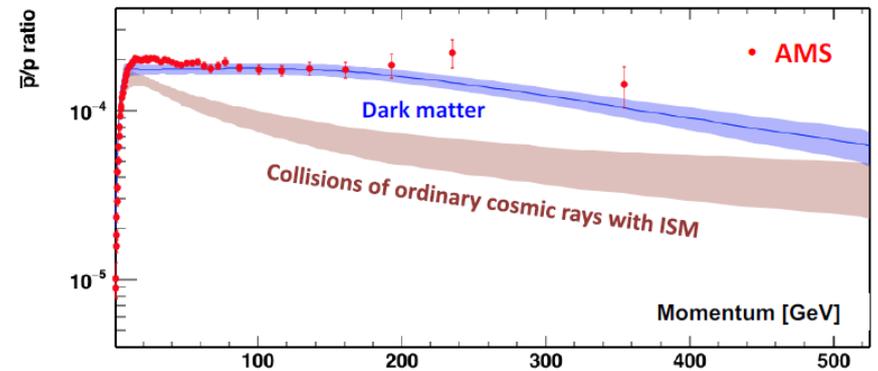
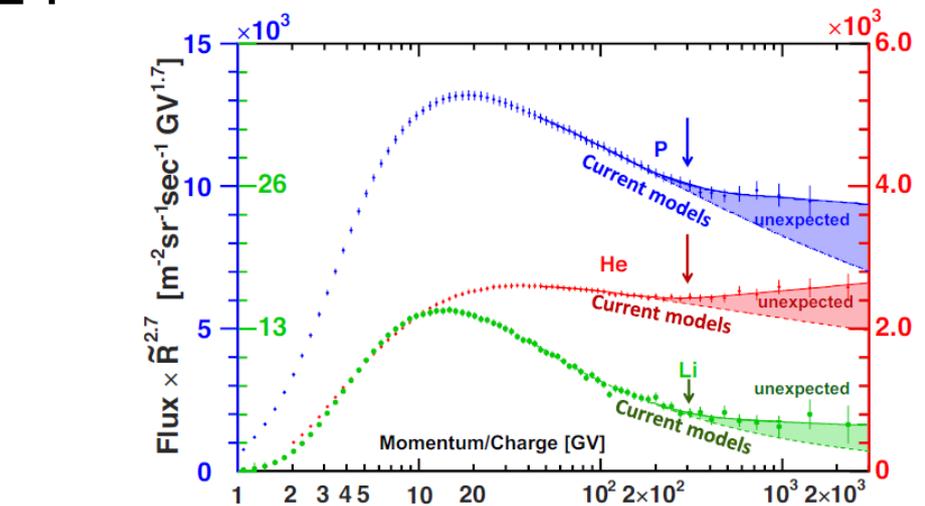
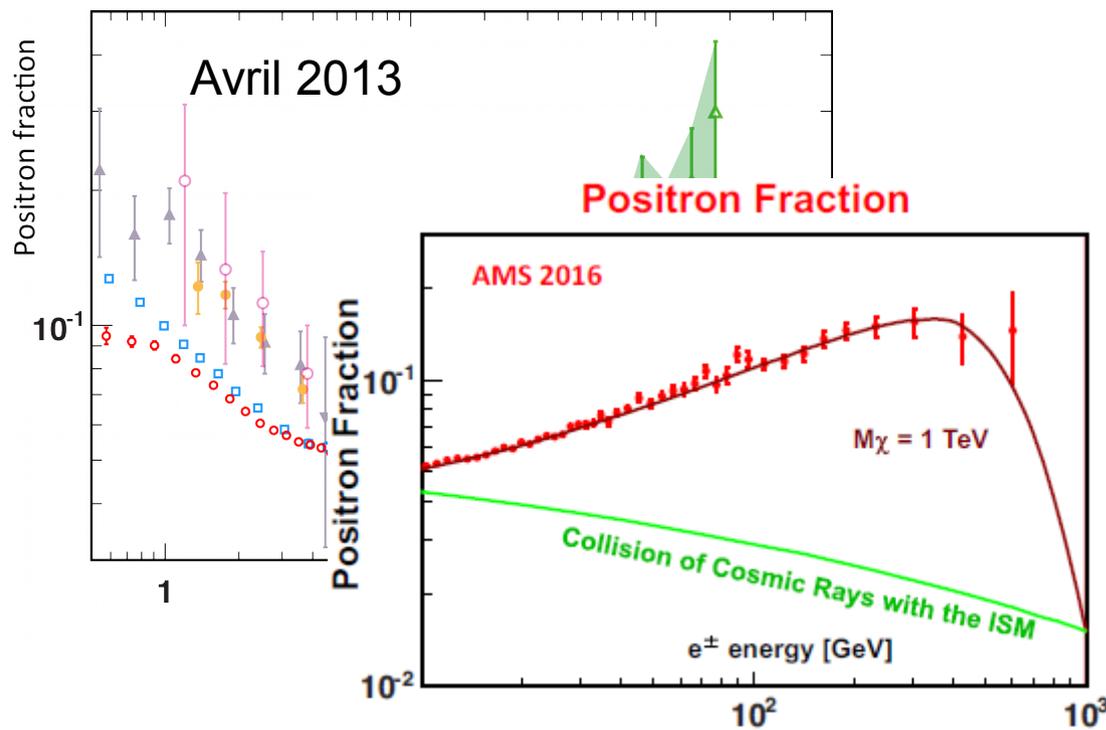
Asymétrie matière-antimatière dans l'espace : AMS

- Mesure le rapport des flux d'électrons et de positrons
- Confirme un excès de positrons connu depuis longtemps
- Mais aussi excès d'antiprotons, de divers éléments
- Encore des données jusqu'en 2024



Asymétrie matière-antimatière dans l'espace : AMS

- Mesure le rapport des flux d'électrons et de positrons
- Confirme un excès de positrons connu depuis longtemps
- Mais aussi excès d'antiprotons, de divers éléments
- Encore des données jusqu'en 2024



C'est tout ?

Nous et l'Univers visible

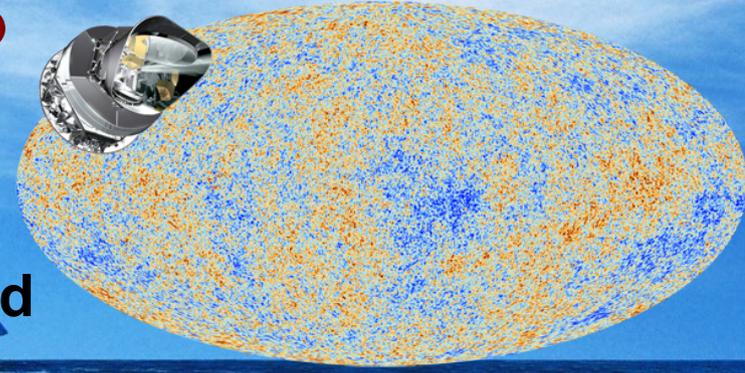


Modèle standard

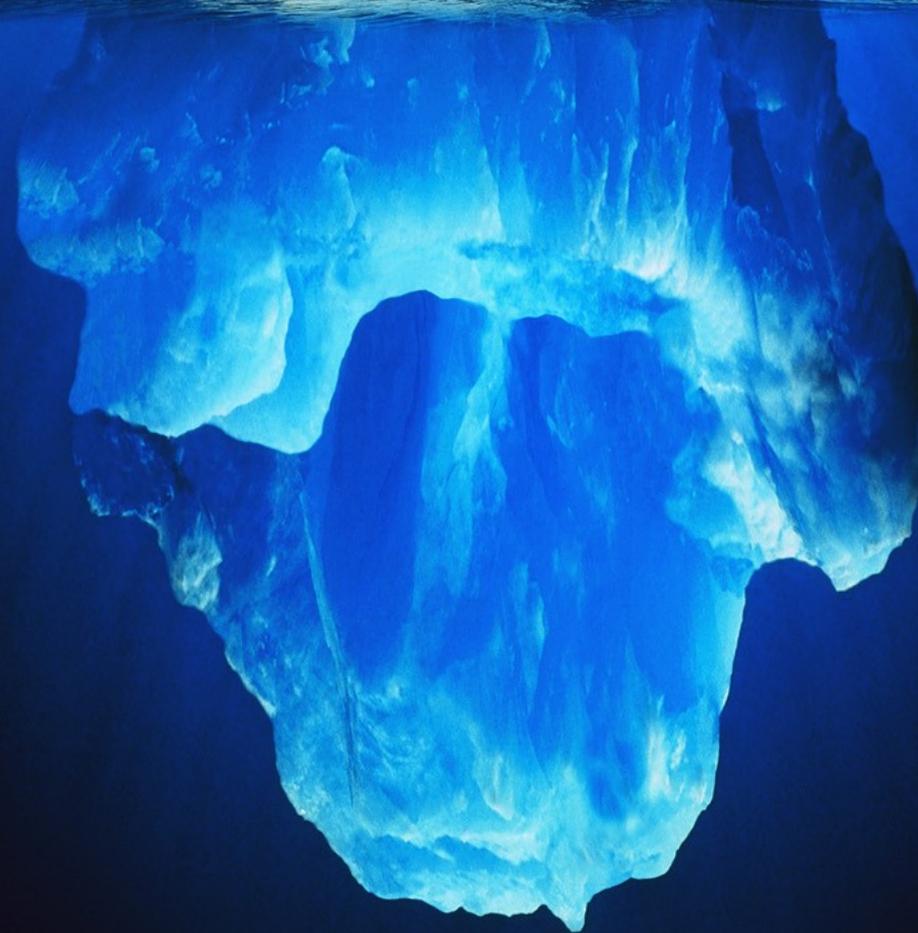


Planck, mars 2013

C'est tout ?

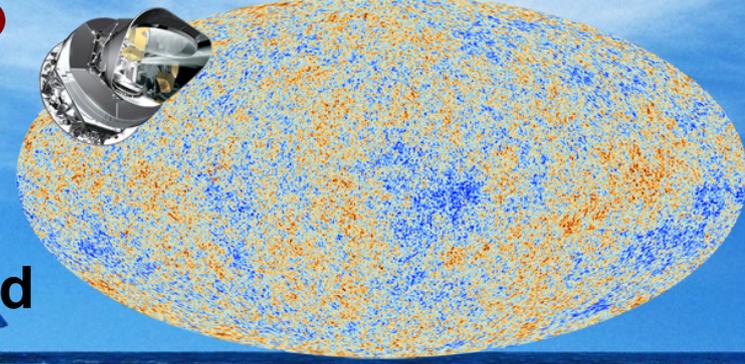


5% Modèle standard



Nous et l'Univers visible

C'est tout ?



Nous et l'Univers visible

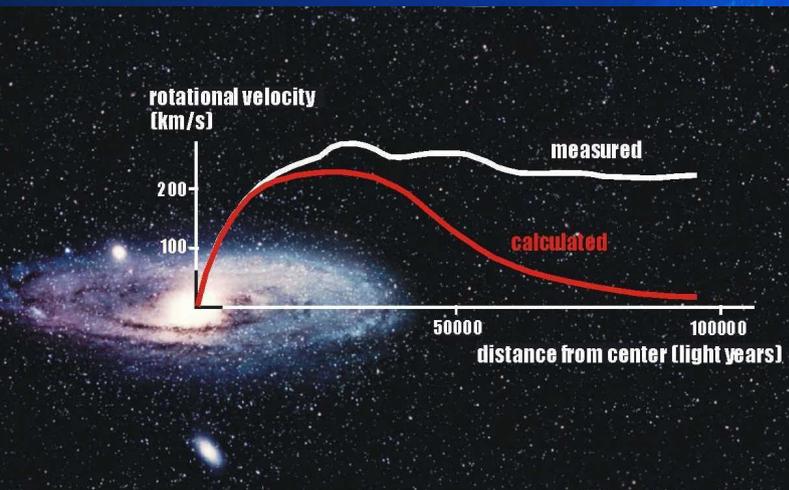


5% Modèle standard

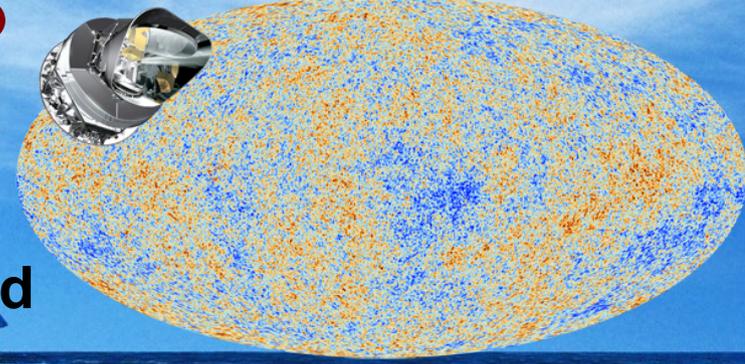
27% Matière noire



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



C'est tout ?



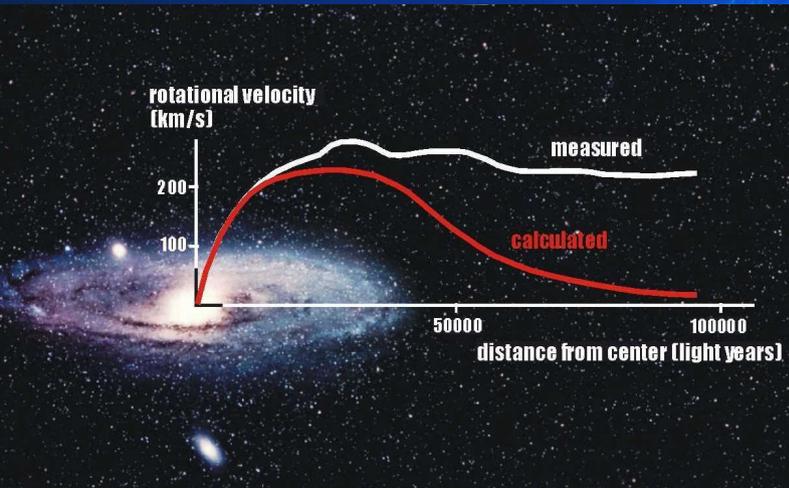
Nous et l'Univers visible



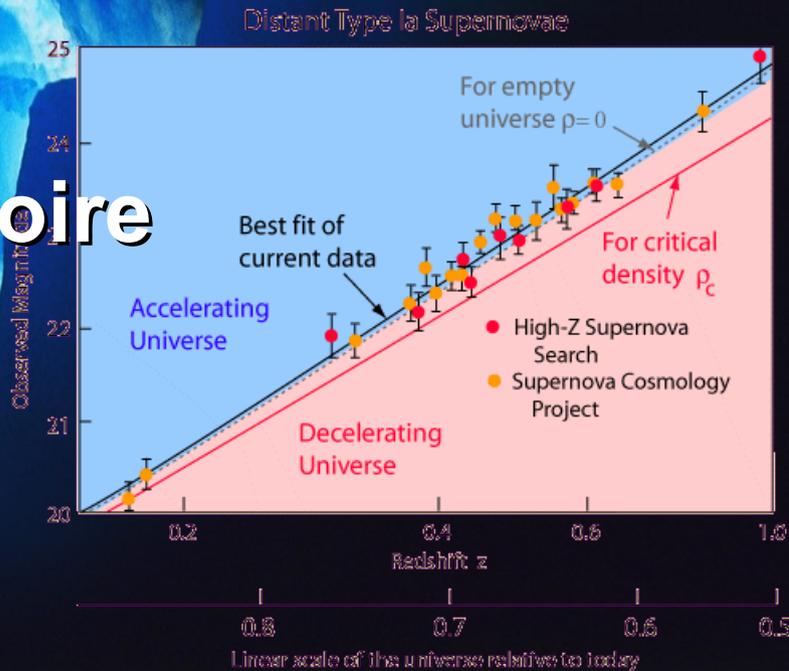
5% Modèle standard

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 !

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 ?

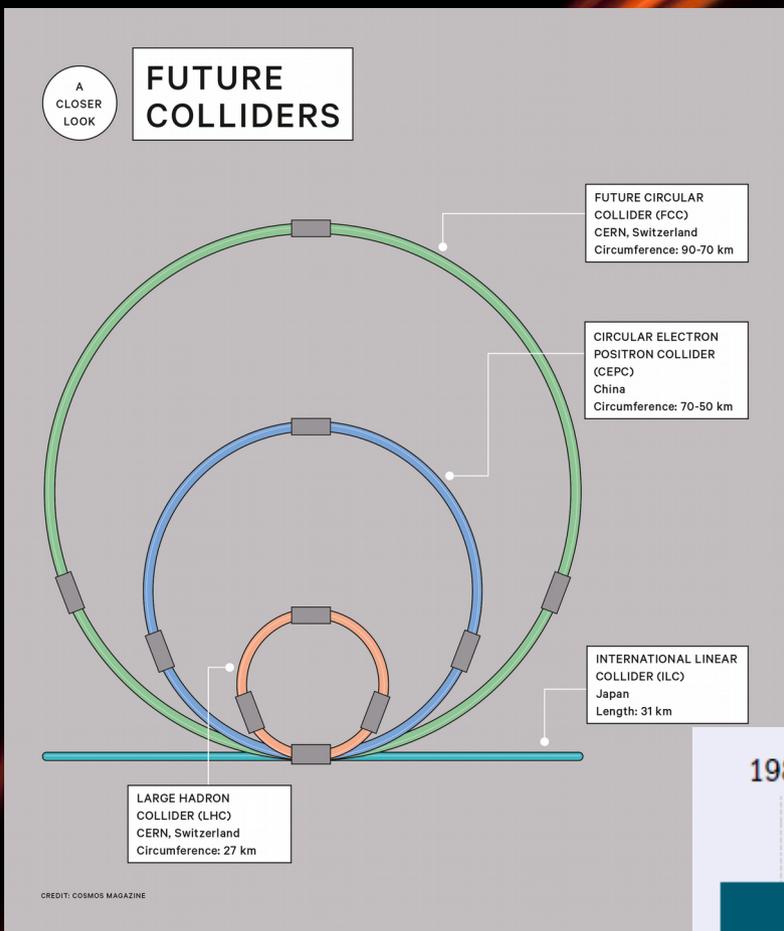
Lien entre l'infiniment grand et l'infiniment petit

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

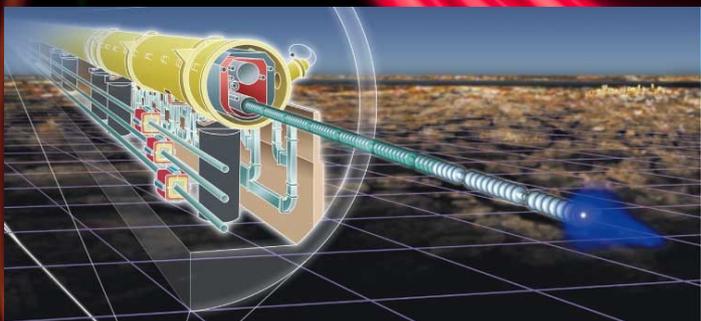
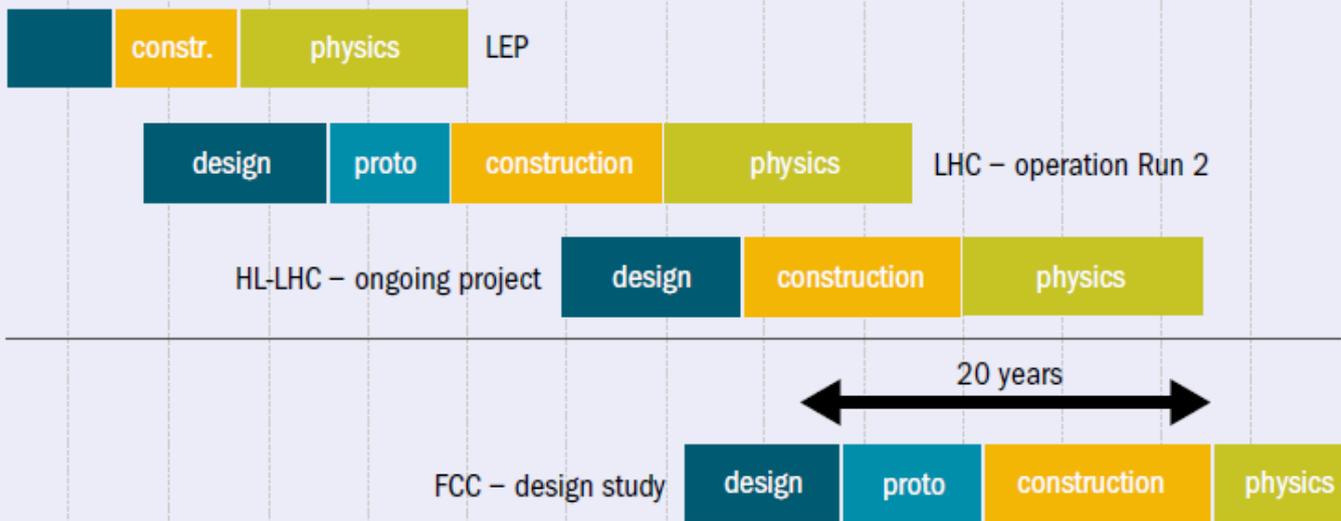
LHC Saison 2 :

- 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 !

Et après ?



1980 1985 1990 1995 2000 2005 2010 2015 2020 2025 2030 2035 2040



Liens

ATLAS grand public



atlas.ch

ATLAS en direct

atlas-live.cern.ch

ATLAS sur



twitter.com/ATLASexperiment

ATLAS sur



www.facebook.com/ATLASexperiment

ATLAS sur



www.google.com/+ATLASexperiment

ATLAS sur



www.youtube.com/theATLASExperiment

Site français du



www.lhc-france.fr

Le CPPM



marwww.in2p3.fr

Le CERN



cern.ch

Le CERN sur



twitter.com/cern



<http://atlasathome.cern.ch>