

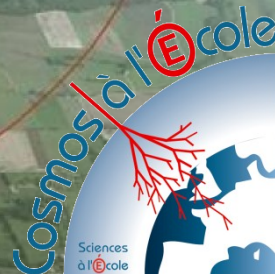
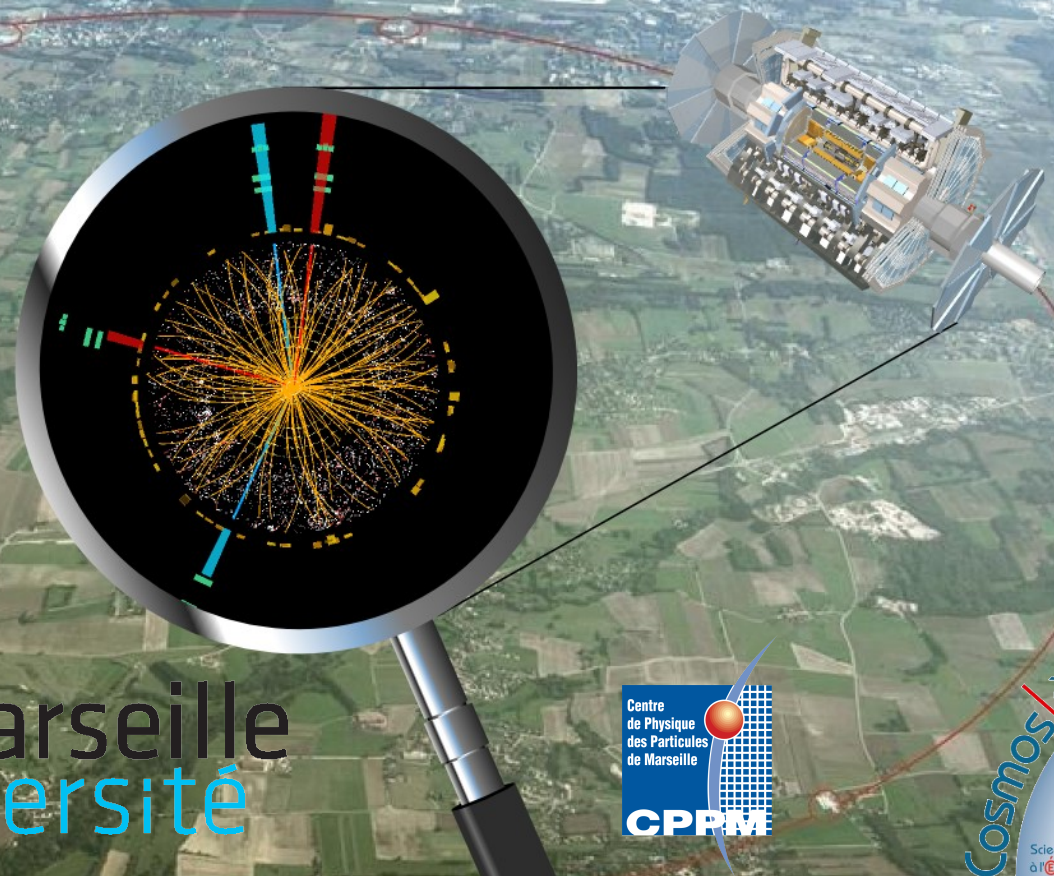
La physique des particules en 2013

Yann Coadou

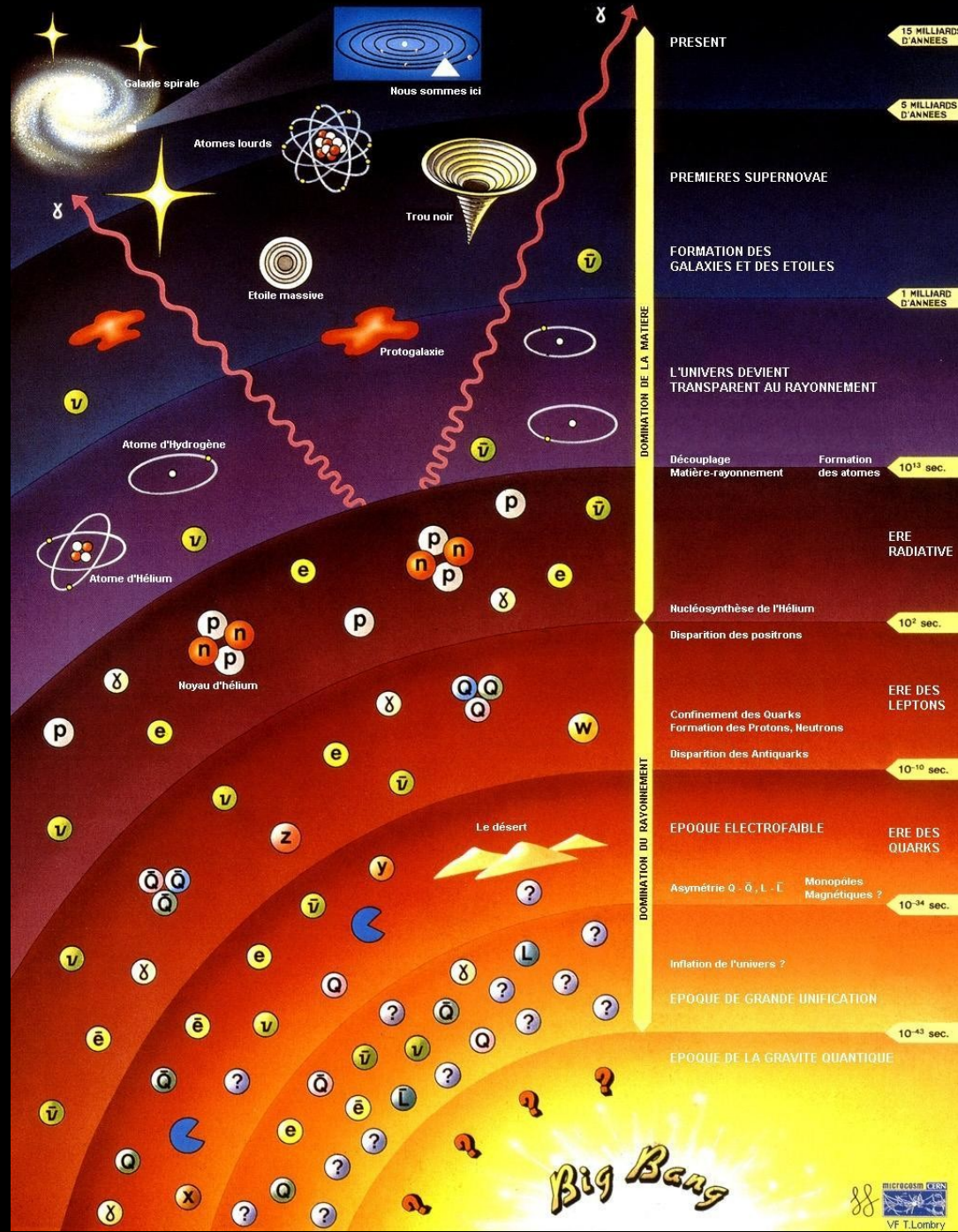
Centre de physique des particules de Marseille

Stage de formation « Cosmos à l'école »

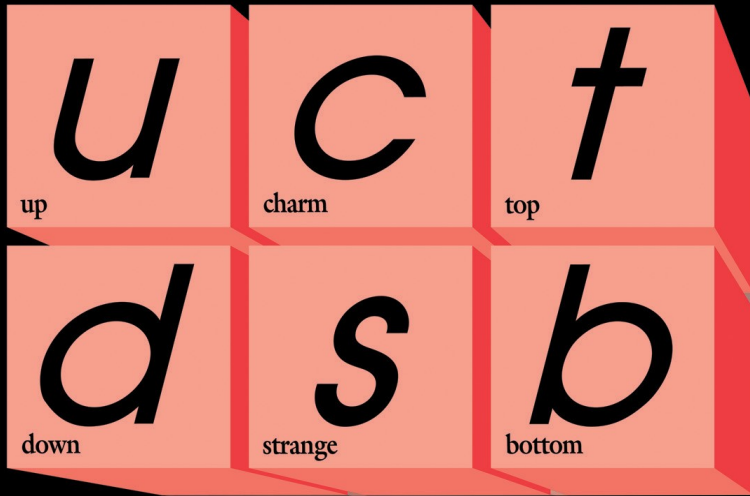
7 juin 2013



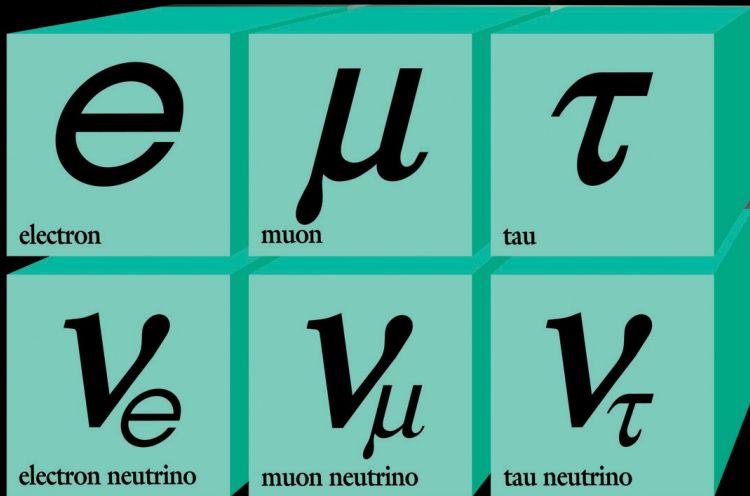
L'histoire de l'Univers



Quarks



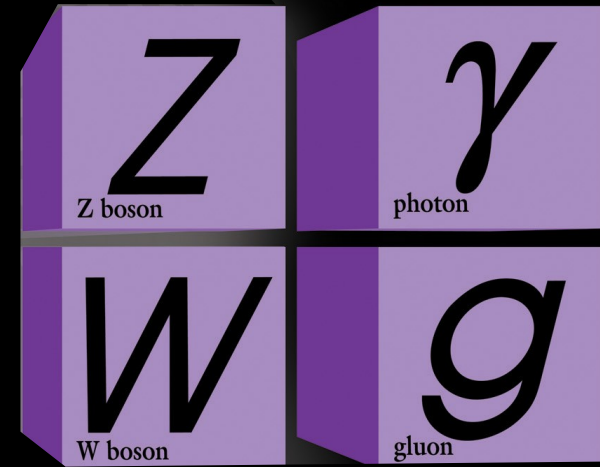
+ anti-matière



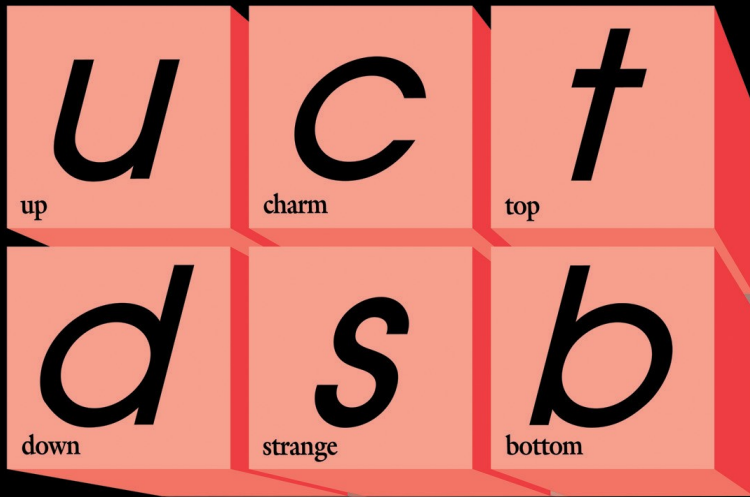
Leptons

Le modèle standard

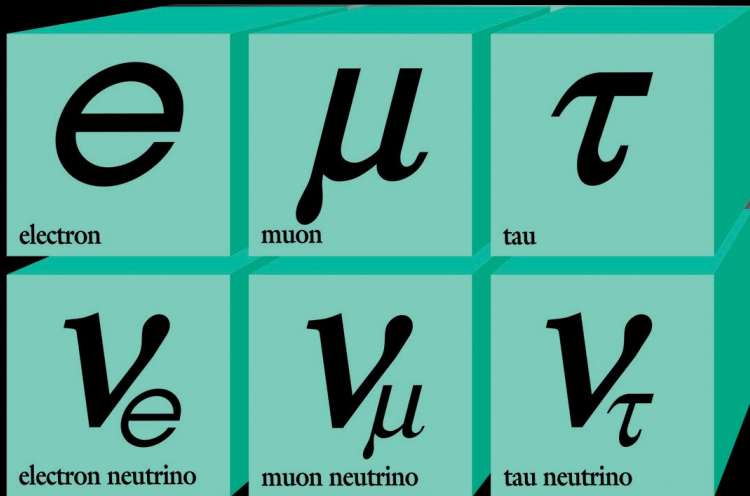
Forces



Quarks



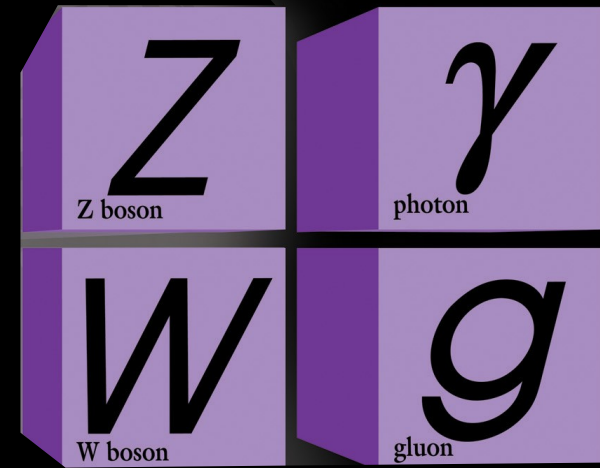
+ anti-matière



Leptons

Le modèle standard

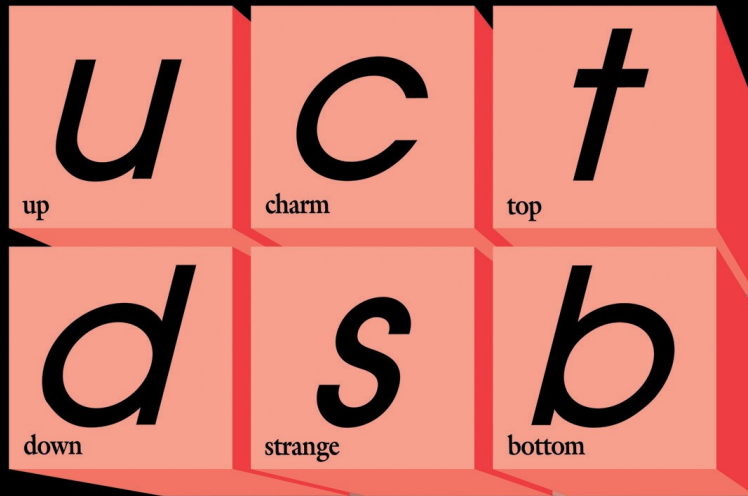
Forces



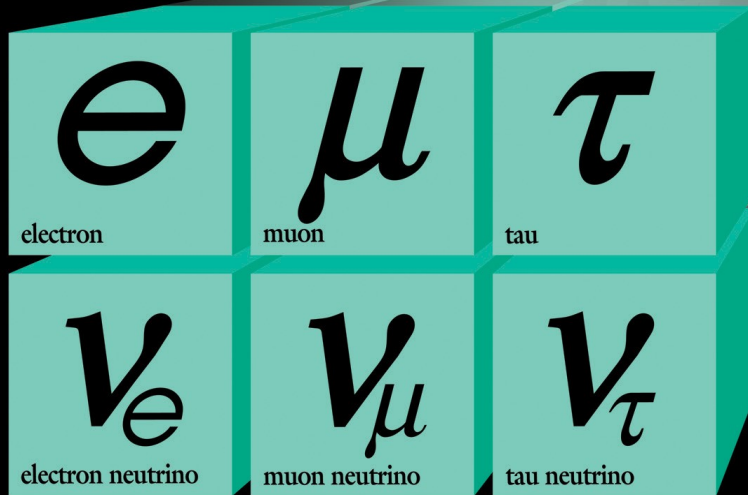
Toutes ces particules ont une masse nulle, c'est contraire à l'expérience...

Quarks

Le modèle standard

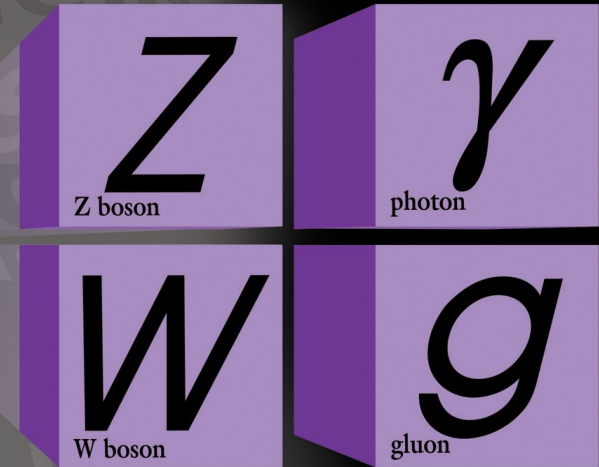


+ anti-matière



Leptons

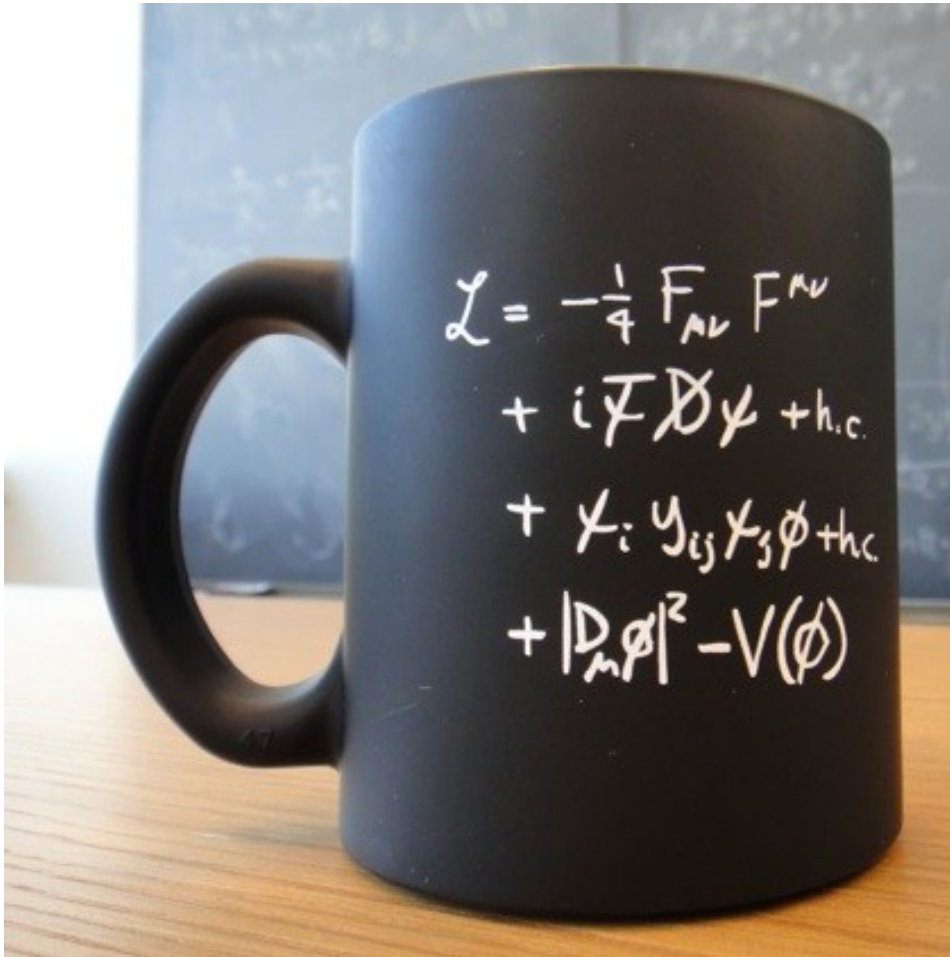
Forces



Solution : rajouter un champ de Higgs

Le Modèle standard

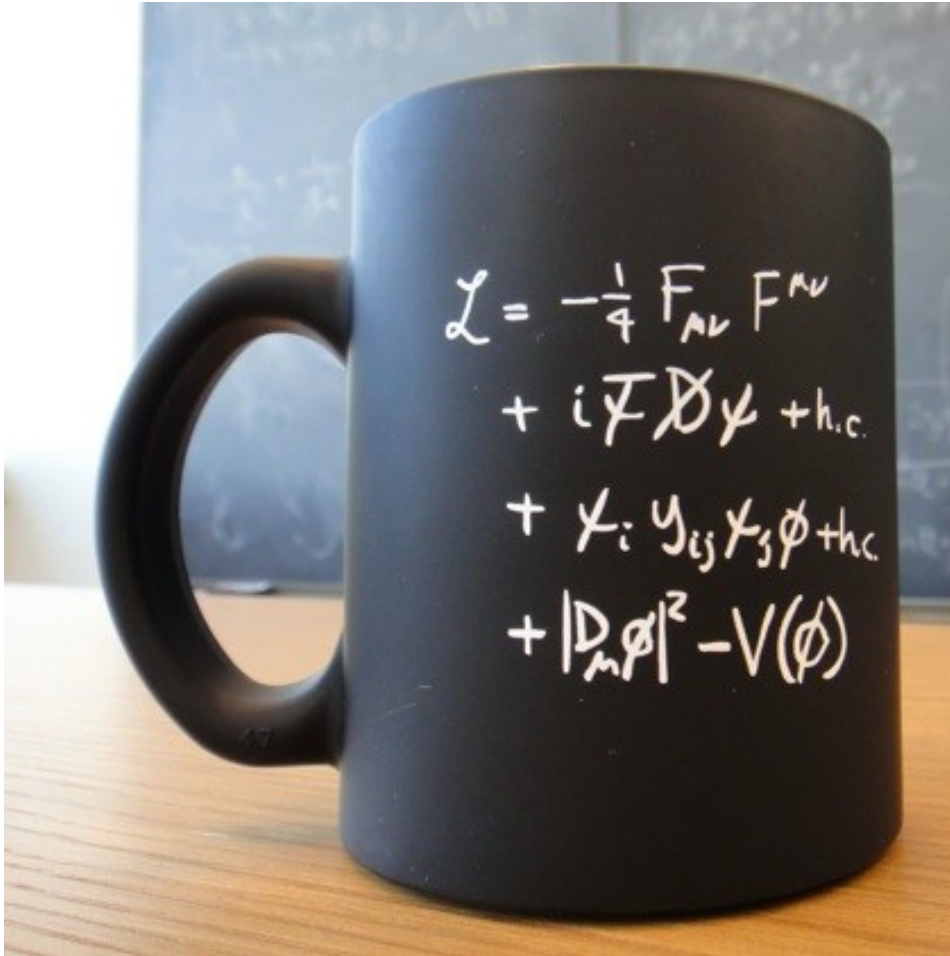
- Version synthétique



Le Modèle standard

- Version synthétique

- Version développée...



$$\begin{aligned} & -\frac{1}{2} \partial_\nu g_\mu^\alpha \partial_\nu g_\mu^\alpha - 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^a g_\nu^b g_\mu^c g_\nu^e + \\ & \frac{1}{2} i g_s^2 (\bar{q}_i^\mu \gamma^\mu q_j^\mu) g_\mu^a + G^a \partial^2 G^a + g_s f^{abc} \partial_\mu 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 H \partial_\mu H - \\ & \frac{1}{2} m_h^2 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 [\frac{2M^2}{g^2} + \\ & \frac{2M}{g} H + \frac{1}{2} (H^2 + \phi^0 \phi^0 + 2\phi^+ \phi^-)] + \frac{2M^4}{g^2} \alpha_h - i g_{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^+)] - i g_{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_\mu^0 Z_\nu^0 W_\mu^+ 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 [H^3 + H \phi^0 \phi^0 + 2H \phi^+ \phi^-] - \\ & \frac{1}{8} g^2 \alpha_h [H^4 + (\phi^0)^4 + 4(\phi^+ \phi^-)^2 + 4(\phi^0)^2 \phi^+ \phi^- + 4H^2 \phi^+ \phi^- + 2(\phi^0)^2 H^2] - \\ & g M W_\mu^+ W_\mu^- H - \frac{1}{2} g \frac{M}{c_w^2} Z_\mu^0 Z_\mu^0 H - \frac{1}{2} i g [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^+ (H \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu H) - W_\mu^- (H \partial_\mu \phi^+ - \\ & \phi^+ \partial_\mu H)] + \frac{1}{2} g \frac{1}{c_w} (Z_\mu^0 (H \partial_\mu \phi^0 - \phi^0 \partial_\mu H) - i g \frac{s_w^2}{c_w} M Z_\mu^0 (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) + \\ & i g s_w M A_\mu (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) - i g \frac{1-2c_w^2}{2c_w} Z_\mu^0 (\phi^+ \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^+) + \\ & i g s_w A_\mu (\phi^+ \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^+) - \frac{1}{4} g^2 W_\mu^+ W_\mu^- [H^2 + (\phi^0)^2 + 2\phi^+ \phi^-] - \\ & \frac{1}{4} g^2 \frac{1}{c_w^2} Z_\mu^0 Z_\mu^0 [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} i g^2 \frac{s_w^2}{c_w} Z_\mu^0 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} i g^2 s_w A_\mu 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^4 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 + i g 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{i g}{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{2}{3}s_w^2 - \gamma^5) d_j^\lambda)] + \frac{i g}{2\sqrt{2}} W_\mu^+ [(\bar{e}^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) e^\lambda) + \\ & (\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) C_{\lambda\kappa} d_j^\kappa)] + \frac{i g}{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{i g}{2\sqrt{2}} \frac{m_\lambda^2}{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^2}{M} [H (\bar{e}^\lambda e^\lambda) + i \phi^0 (\bar{e}^\lambda \gamma^5 e^\lambda)] + \frac{i g}{2M\sqrt{2}} \phi^+ [-m_\lambda^\kappa (\bar{u}_j^\lambda C_{\lambda\kappa} (1 - \gamma^5) d_j^\kappa) + \\ & m_\lambda^\lambda (\bar{u}_j^\lambda C_{\lambda\kappa} (1 + \gamma^5) d_j^\kappa) + \frac{i g}{2M\sqrt{2}} \phi^- [m_\lambda^\lambda (\bar{d}_j^\lambda C_{\lambda\kappa}^\dagger (1 + \gamma^5) u_j^\kappa) - m_\lambda^\kappa (\bar{d}_j^\lambda C_{\lambda\kappa}^\dagger (1 - \\ & \gamma^5) u_j^\kappa)] - \frac{g}{2} \frac{m_\lambda^2}{M} H (\bar{u}_j^\lambda u_j^\lambda) - \frac{g}{2} \frac{m_\lambda^2}{M} H (\bar{d}_j^\lambda d_j^\lambda) + \frac{i g}{2} \frac{m_\lambda^2}{M} \phi^0 (\bar{u}_j^\lambda \gamma^5 u_j^\lambda) - \\ & \frac{i g}{2} \frac{m_\lambda^2}{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 + i g_{c_w} W_\mu^+ (\partial_\mu \bar{X}^0 X^- - \partial_\mu \bar{X}^+ X^0) + i g_{s_w} W_\mu^+ (\partial_\mu \bar{Y} X^- - \\ & \partial_\mu \bar{X}^+ Y) + i g_{c_w} W_\mu^- (\partial_\mu \bar{X}^- X^0 - \partial_\mu \bar{X}^0 X^+) + i g_{s_w} W_\mu^- (\partial_\mu \bar{X}^- Y - \\ & \partial_\mu \bar{Y} X^+) + i g_{c_w} Z_\mu^0 (\partial_\mu \bar{X}^+ X^+ - \partial_\mu \bar{X}^- X^-) + i g_{s_w} A_\mu (\partial_\mu \bar{X}^+ X^+ - \\ & \partial_\mu \bar{X}^- X^-) - \frac{1}{2} g M [\bar{X}^+ X^+ H + \bar{X}^- X^- H + \frac{1}{c_w^2} \bar{X}^0 X^0 H] + \\ & \frac{1-2c_w^2}{2c_w} i g M [\bar{X}^+ X^0 \phi^+ - \bar{X}^- X^0 \phi^-] + \frac{1}{2c_w} i g M [\bar{X}^0 X^- \phi^+ - \bar{X}^0 X^+ \phi^-] + \\ & i g M s_w [\bar{X}^0 X^- \phi^+ - \bar{X}^0 X^+ \phi^-] + \frac{1}{2} i g M [\bar{V}^+ V^+ + \bar{V}^0 V^0 - \bar{V}^- V^- + \bar{V}^0 V^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

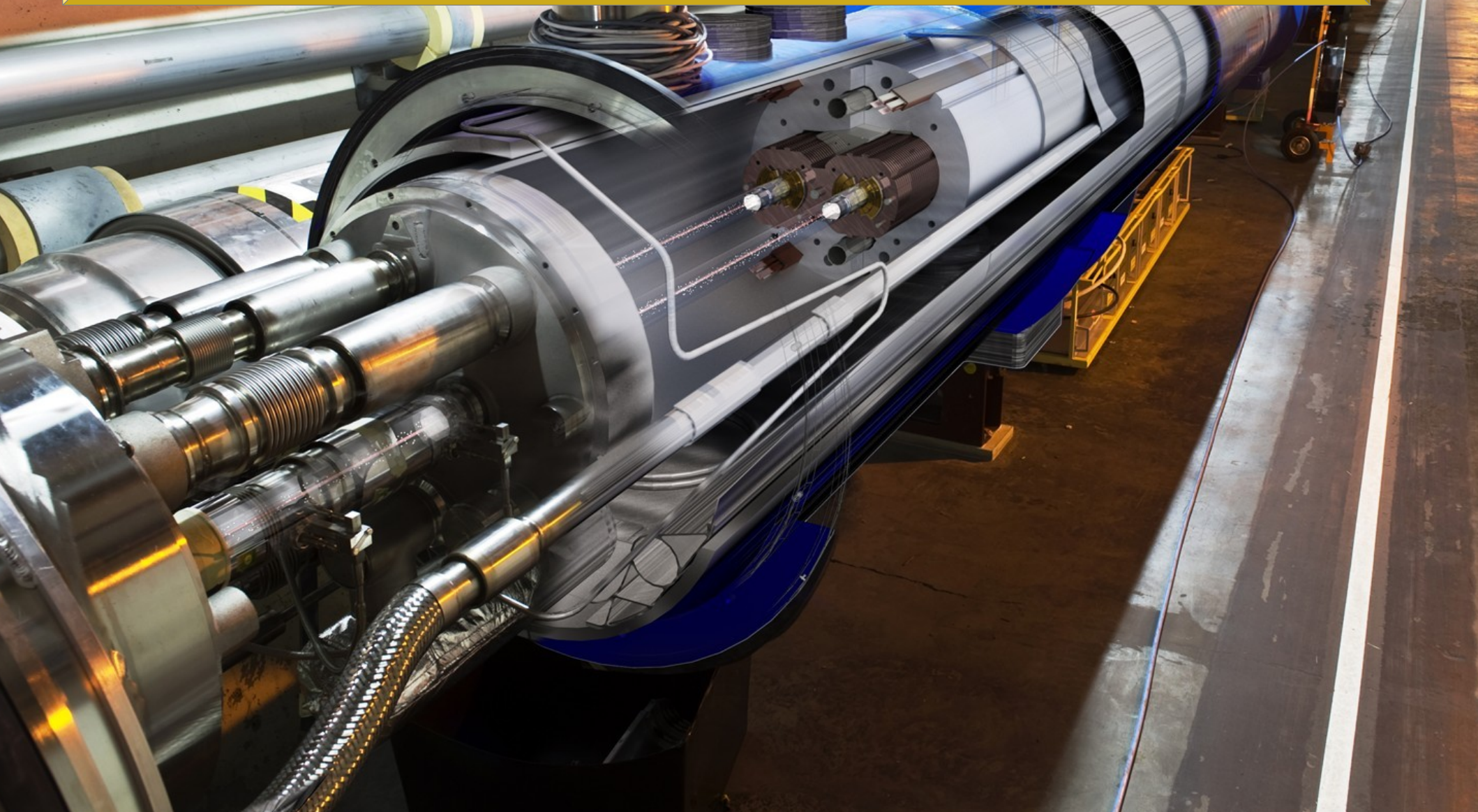


Le LHC : la machine à superlatifs



Le LHC : la machine à superlatifs

La plus grande et la plus complexe machine scientifique jamais construite



Le LHC : la machine à superlatifs

A photograph of the LHC tunnel showing a long row of superconducting magnets. The magnets are blue and silver, and are arranged in a long line that recedes into the distance. A yellow callout bubble is overlaid on the image, containing text. The number '2385' is visible on a small black box attached to one of the magnets. A warning sign is visible on the left wall of the tunnel.

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



Énergie du faisceau : TGV à 150 km/h.
Chaque proton a l'énergie d'un moustique en vol,
mais il y en a 2800 paquets de 100 milliards !

Large Hadron Collider : un projet de longue haleine

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
Fin 2014	Redémarrage à 13-14 TeV
2018-2020	Fin des collisions à luminosité nominale ?
2020-2030	Phase à haute luminosité ?

Large Hadron Collider : un projet de longue haleine



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
Octobre 2009	Redémarrage
Mars 2010	Premières collisions à 7 TeV
Fin 2012	Fin des collisions à 8 TeV
Fin 2014	Redémarrage à 13-14 TeV
2018-2020	Fin des collisions à luminosité nominale ?
2020-2030	Phase à haute luminosité ?

Large Hadron Collider : un projet de longue haleine

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,
Octobre 2009	Redémarrage
Mars 2010	Premières collisions à 7 TeV
Fin 2012	Fin des collisions à 8 TeV
Fin 2014	Redémarrage à 13-14 TeV
2018-2020	Fin des collisions à luminosité nominale ?
2020-2030	Phase à haute luminosité ?



Large Hadron Collider : un projet de longue haleine

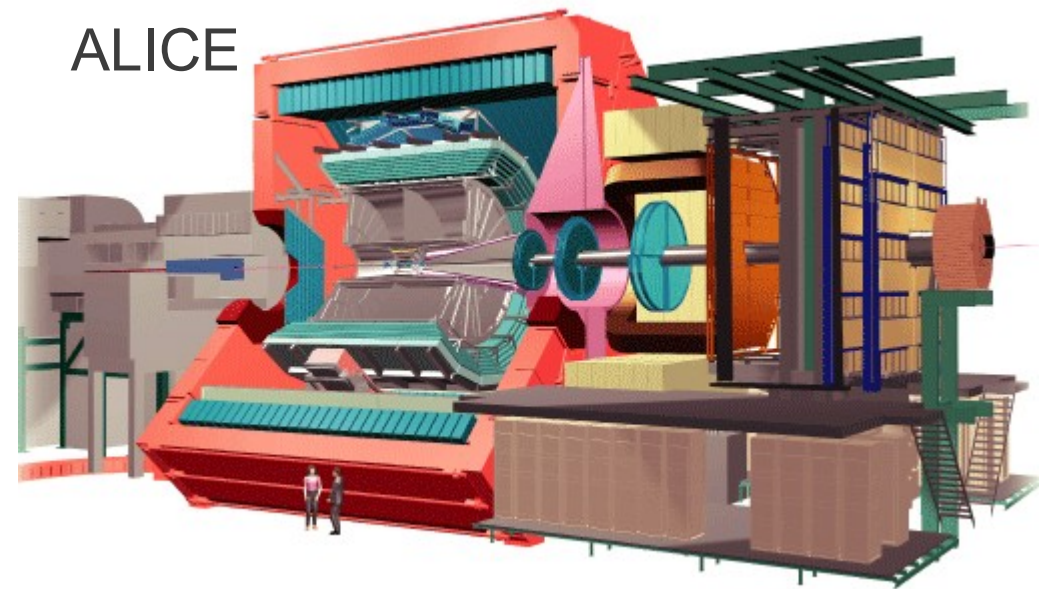
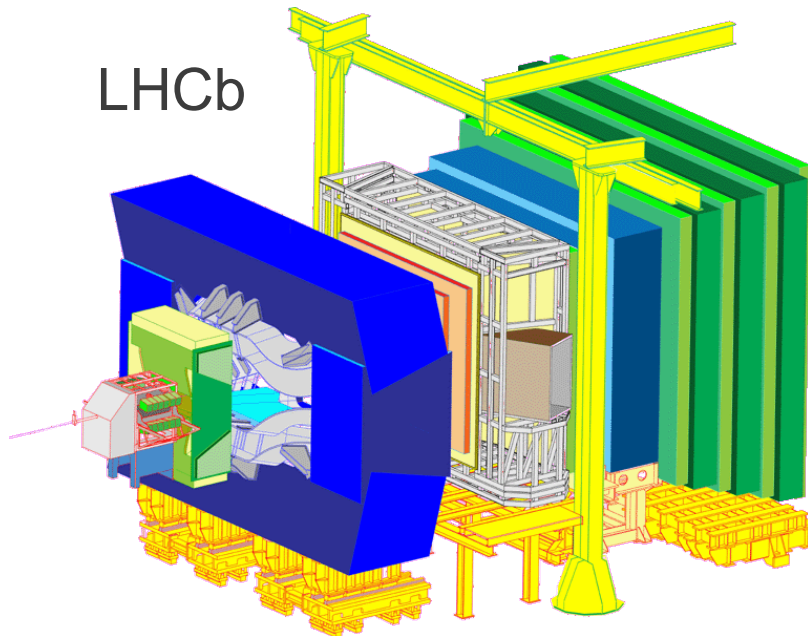
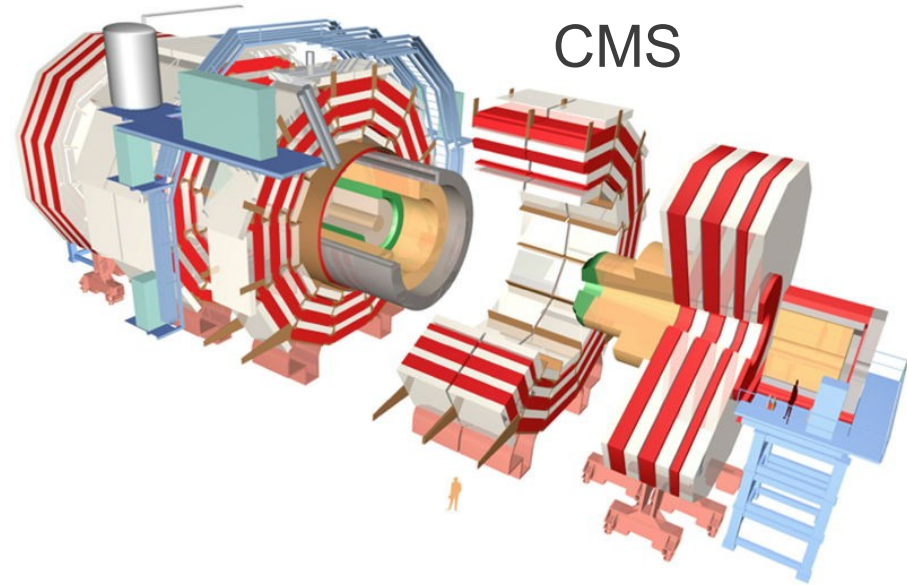
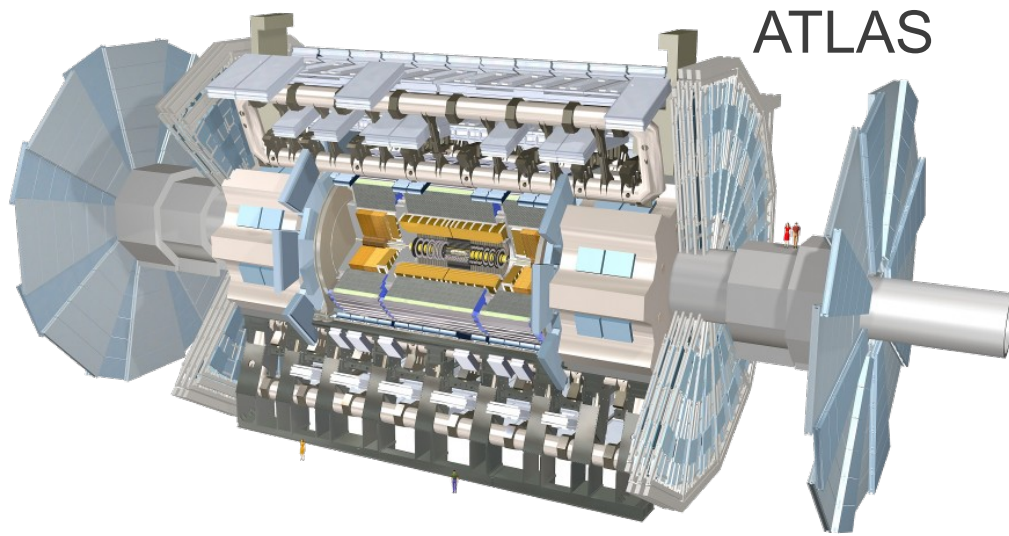
1984	Études préliminaires
1992	Création de la collaboration ATLAS
1994	Approbation par le conseil du CERN
1996-1998	Approbation des quatre grandes expériences
1998-2008	Construction du LHC et des détecteurs
Septembre 2008	Mise en service, panne cryogénique
Octobre 2009	Redémarrage
Mars 2010	Premières collisions à 7 TeV
Fin 2012	Fin des collisions à 8 TeV
Fin 2014	Redémarrage à 13-14 TeV
2018-2020	Fin des collisions à luminosité nominale ?
2020-2030	Phase à haute luminosité ?



Large Hadron Collider : un projet de longue haleine

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
Fin 2014	Redémarrage à 13-14 TeV
2018-2020	Fin des collisions à luminosité nominale ?
2020-2030	Phase à haute luminosité ?

Les détecteurs géants du LHC



La collaboration ATLAS

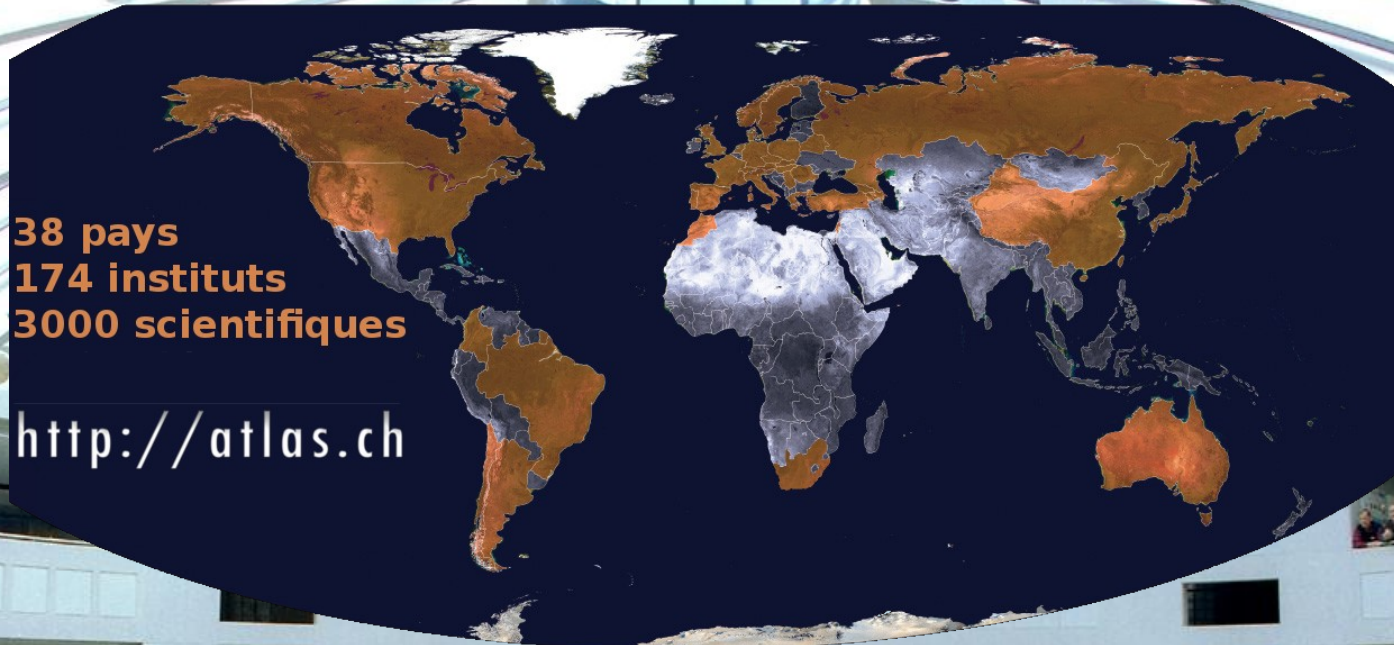


 **ATLAS**
EXPERIMENT

La collaboration ATLAS

38 pays
174 instituts
3000 scientifiques

<http://atlas.ch>

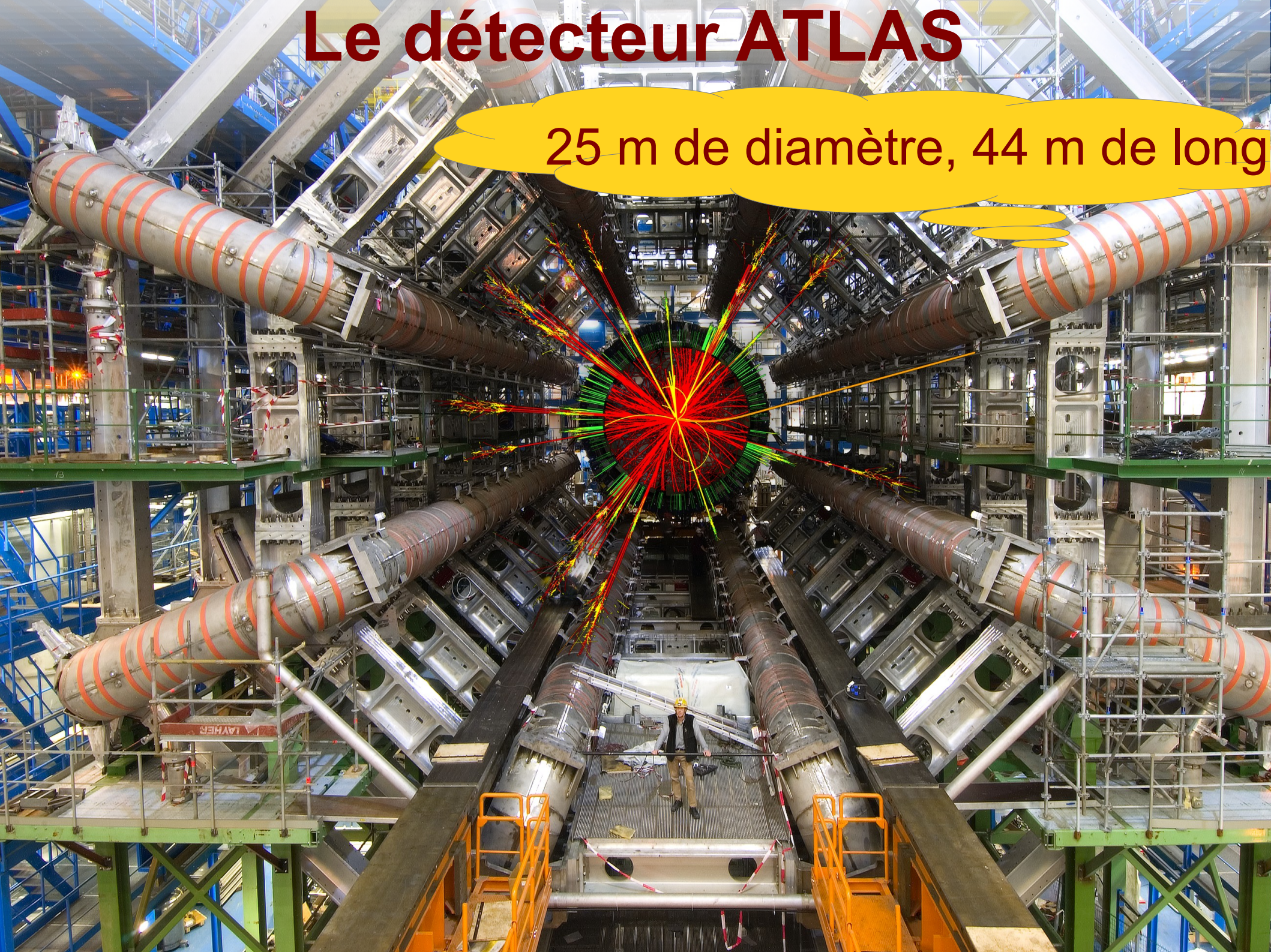


Le détecteur ATLAS



Le détecteur ATLAS

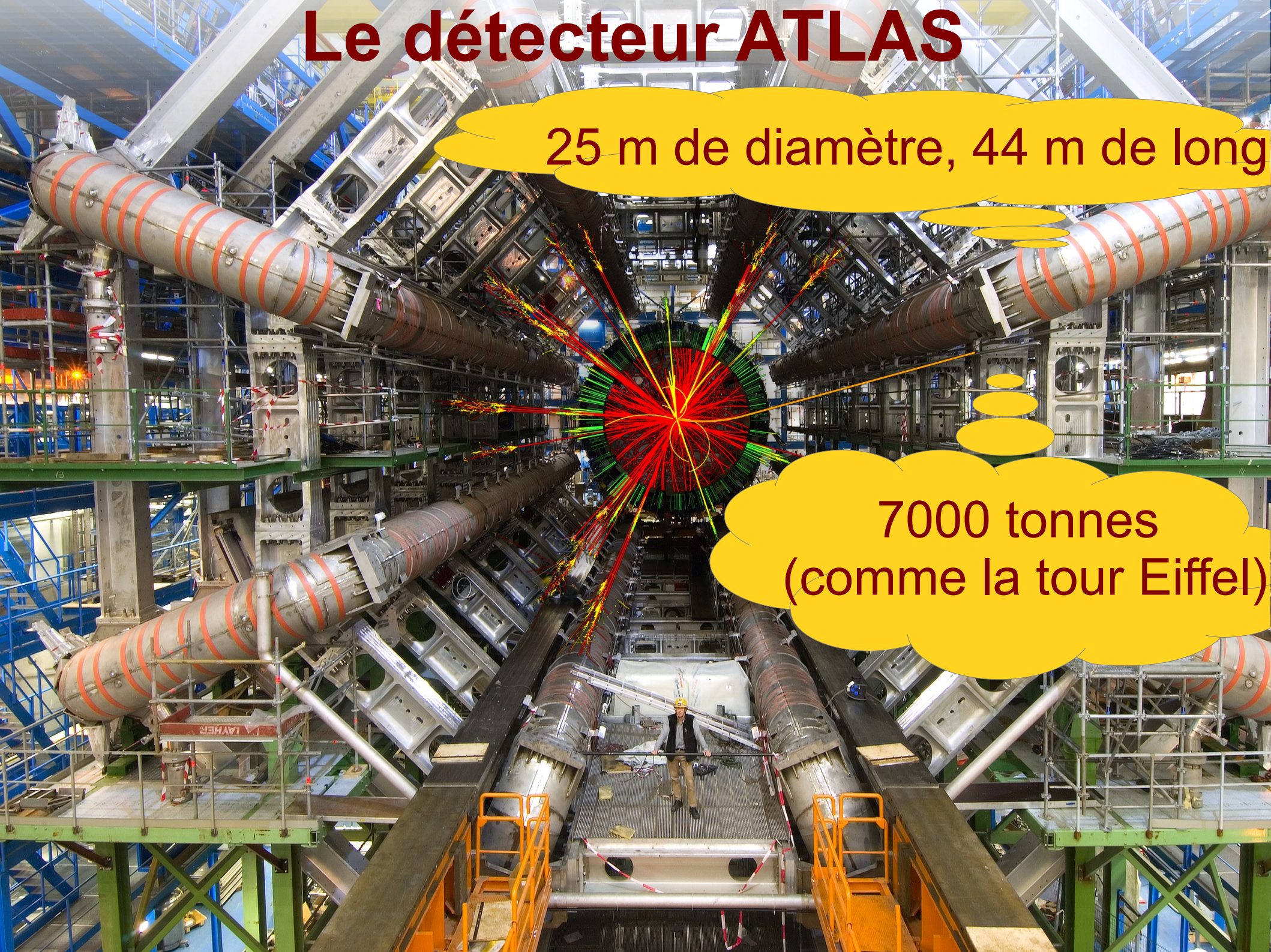
25 m de diamètre, 44 m de long



Le détecteur ATLAS

25 m de diamètre, 44 m de long

7000 tonnes
(comme la tour Eiffel)

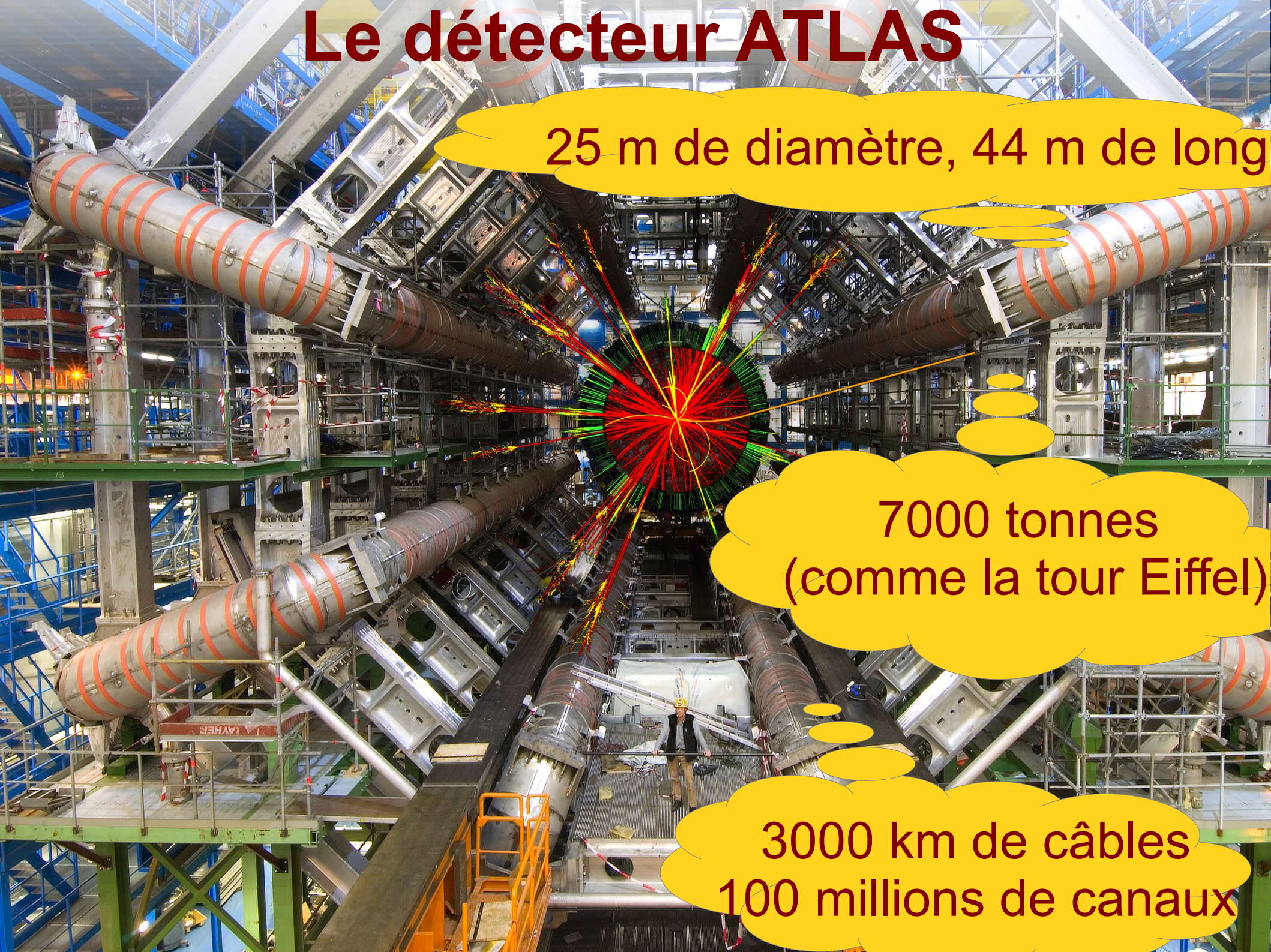


Le détecteur ATLAS

25 m de diamètre, 44 m de long

7000 tonnes
(comme la tour Eiffel)

3000 km de câbles
100 millions de canaux



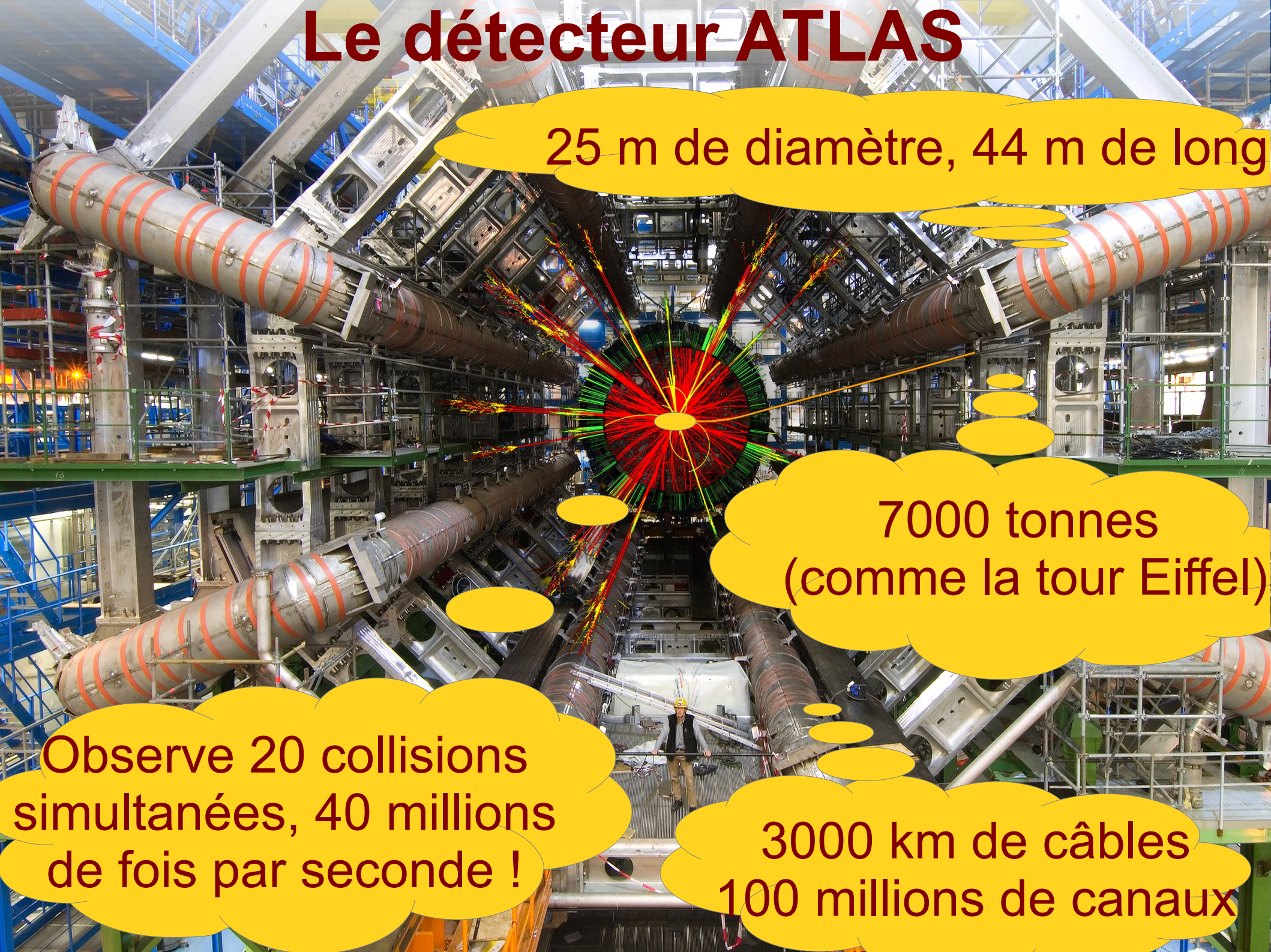
Le détecteur ATLAS

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)

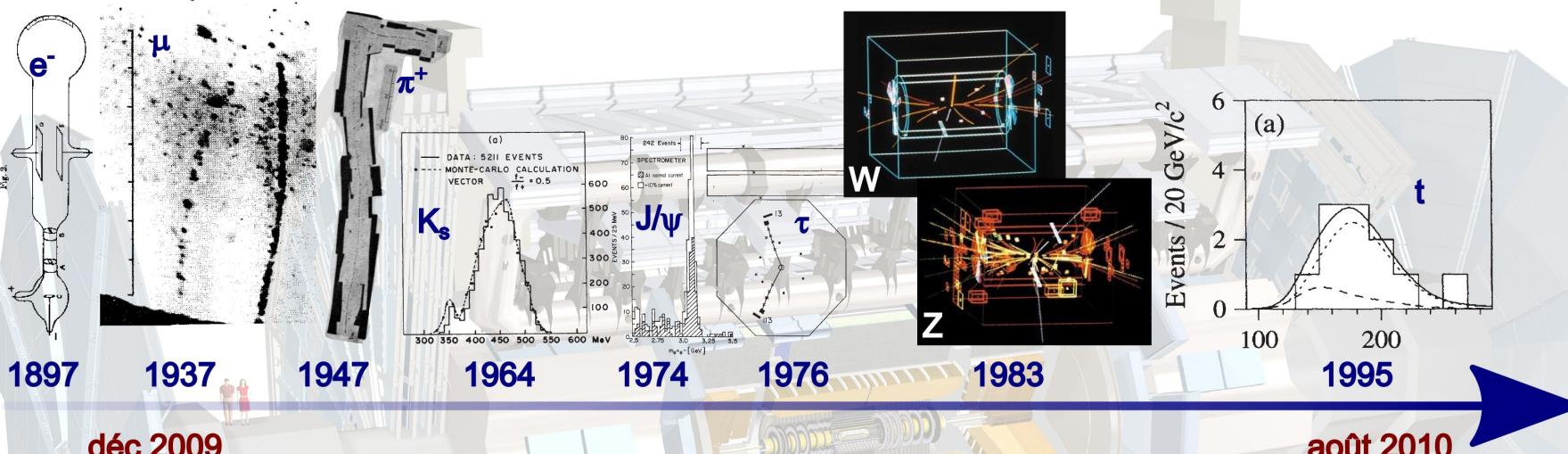
Observe 20 collisions
simultanées, 40 millions
de fois par seconde !

3000 km de câbles
100 millions de canaux

Le modèle standard redécouvert

LHC 2010 : un siècle en un an

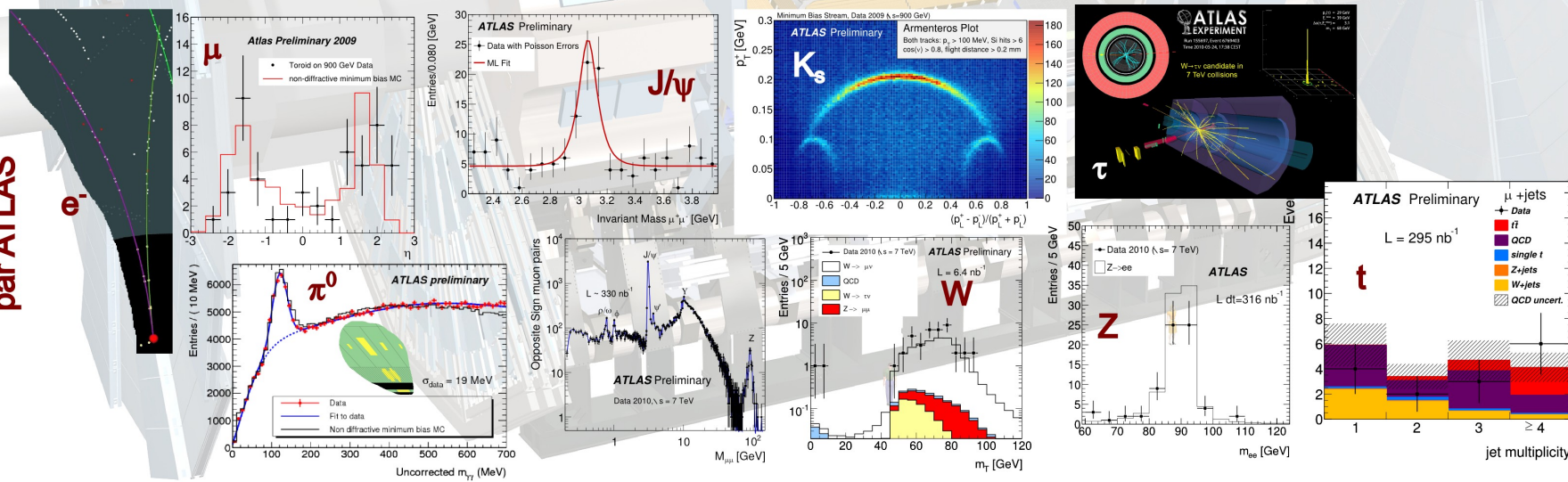
Découverte historique



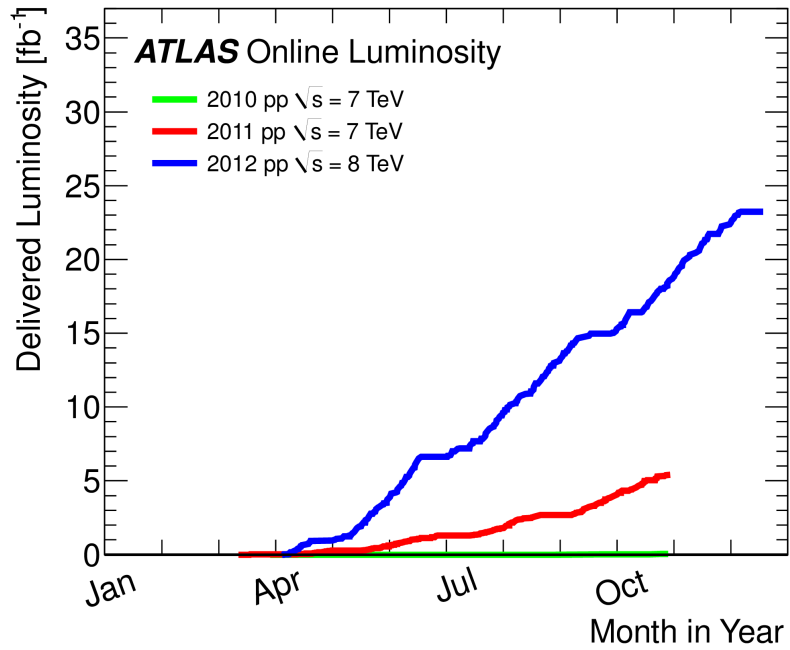
déc 2009

août 2010

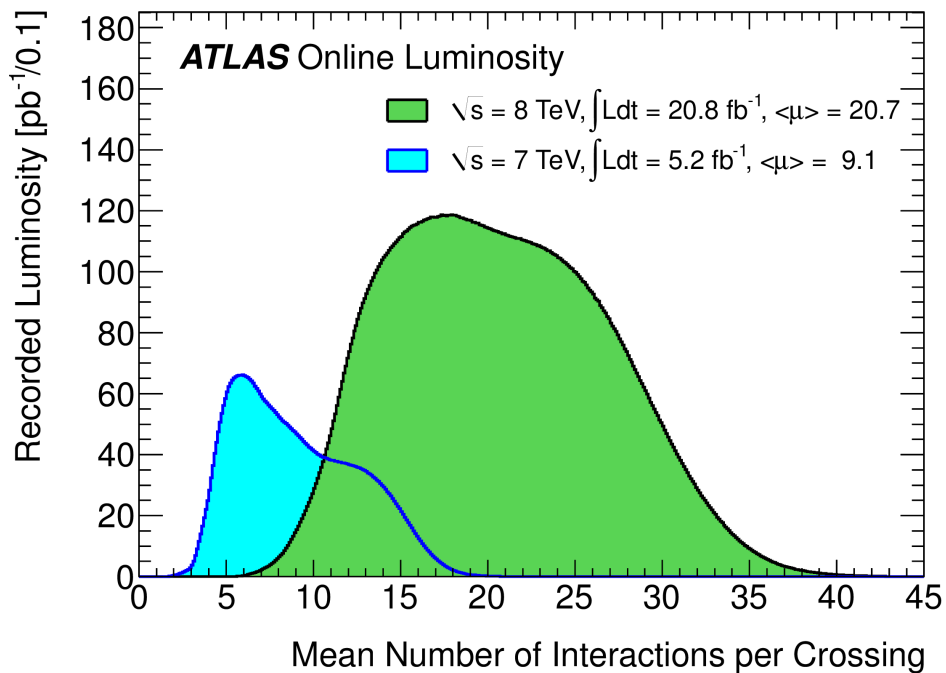
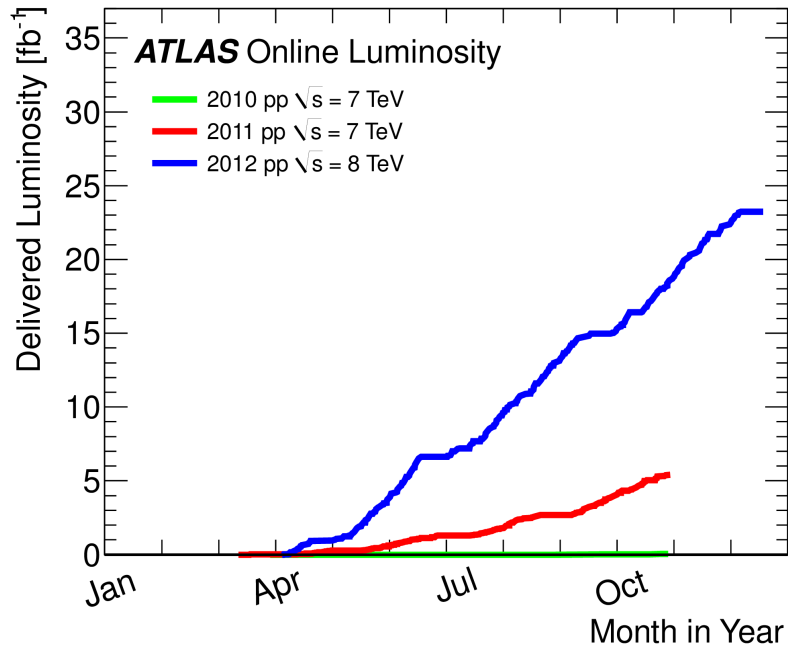
Redécouverte par ATLAS



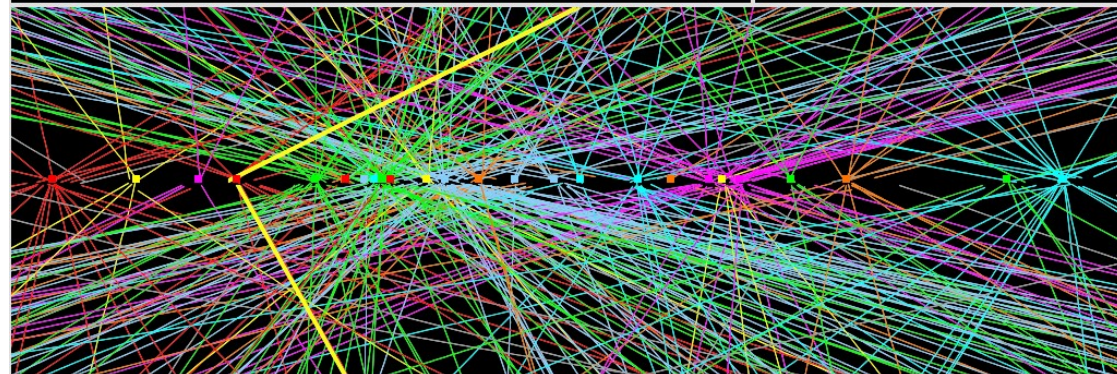
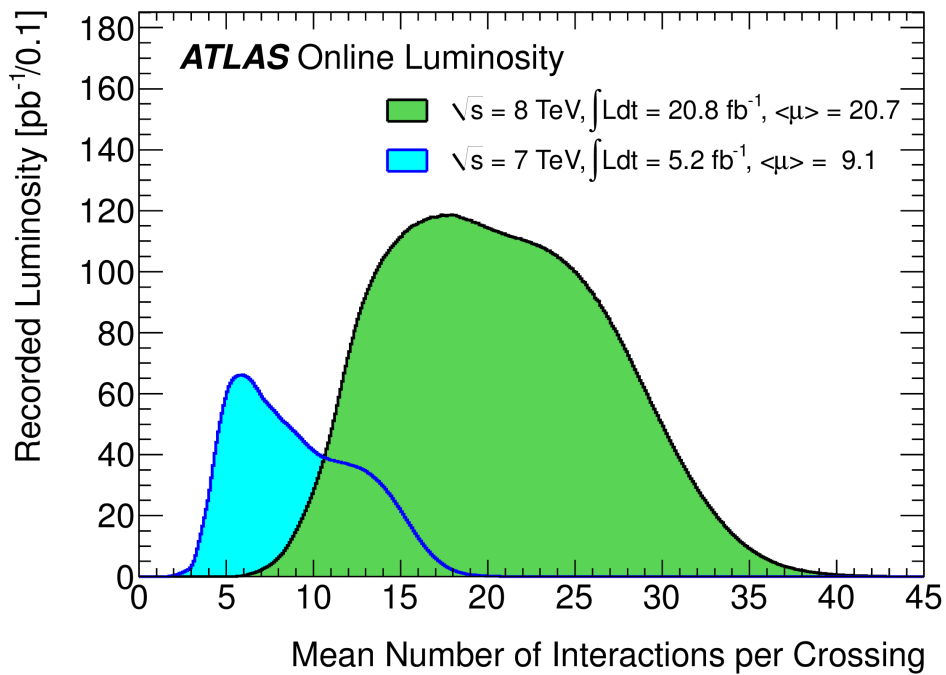
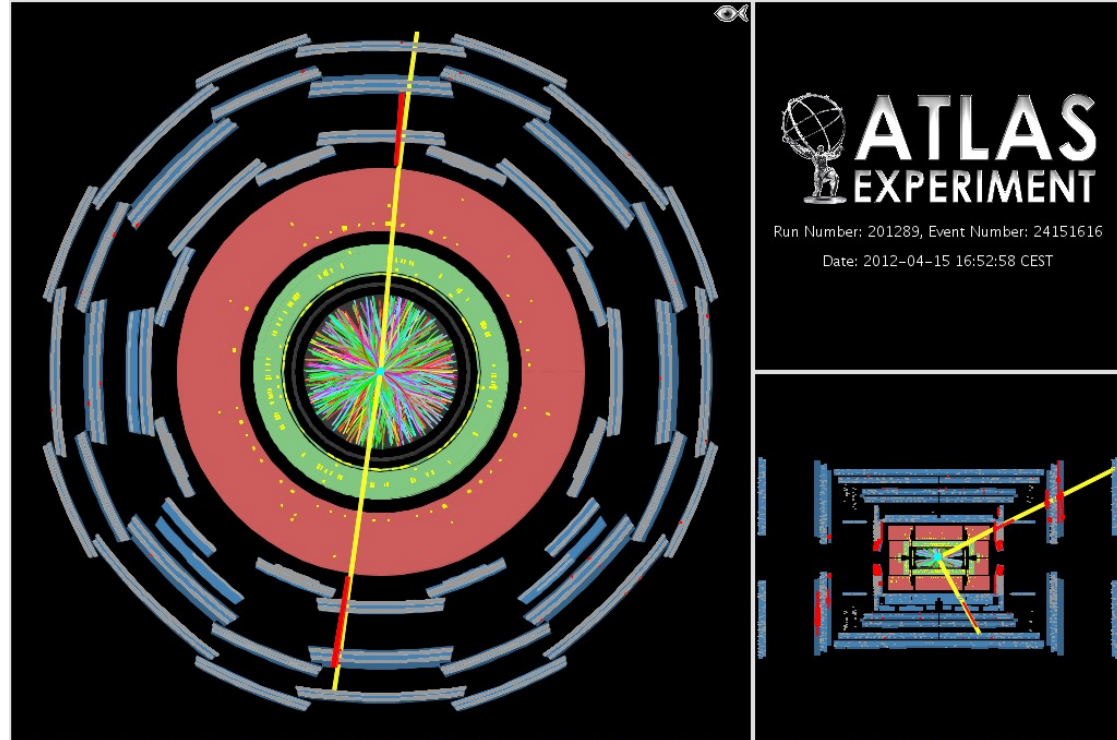
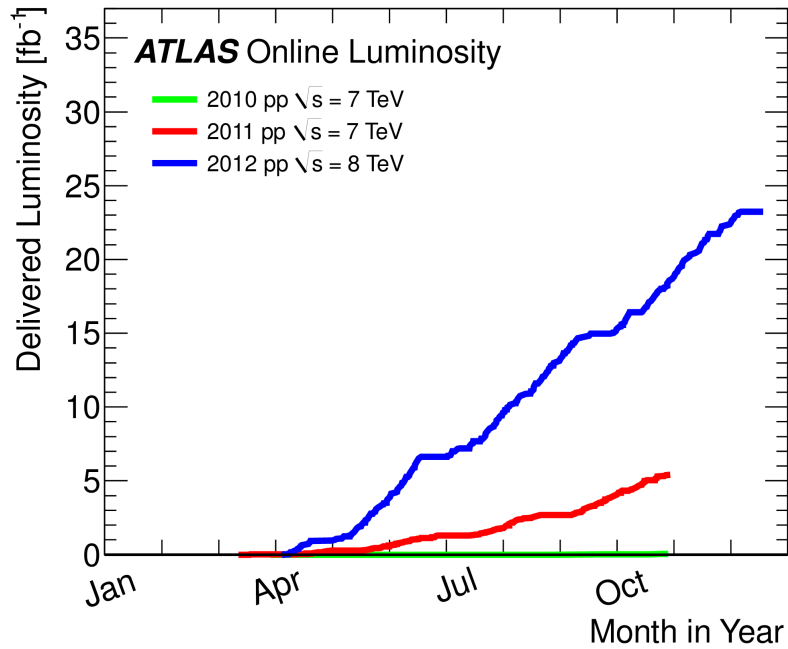
Accumulation des données



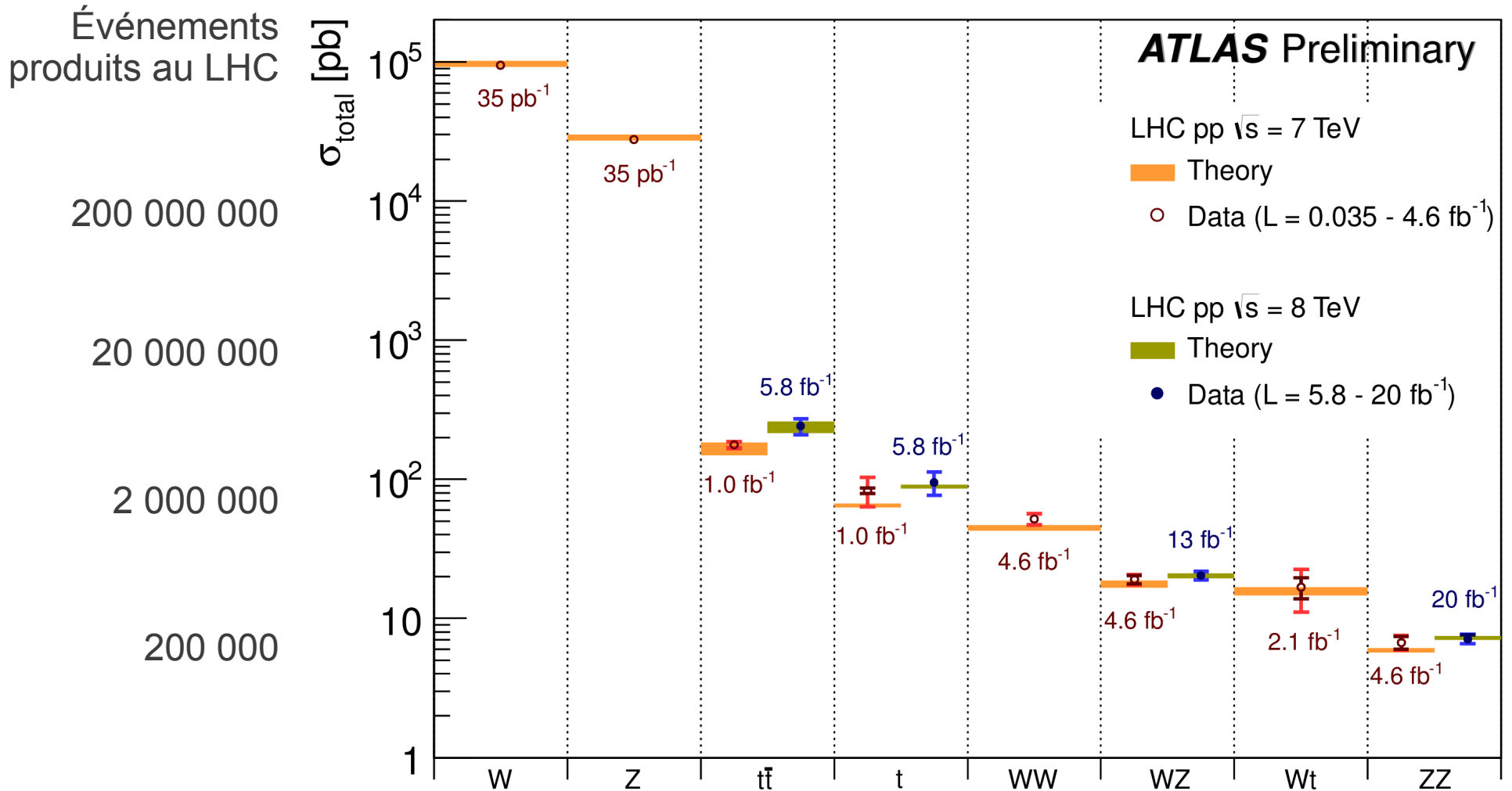
Accumulation des données



Accumulation des données

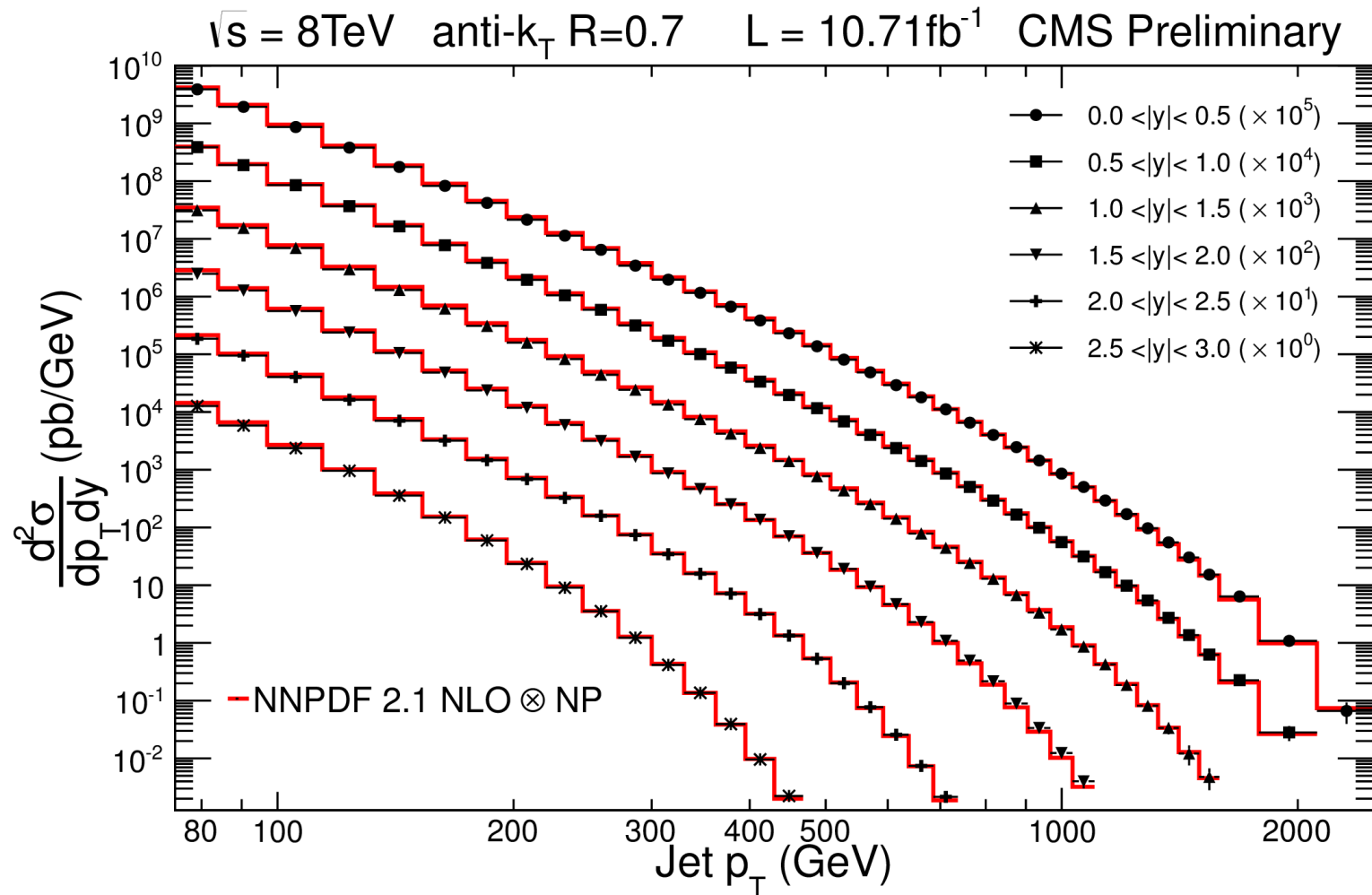


Mesures du Modèle standard



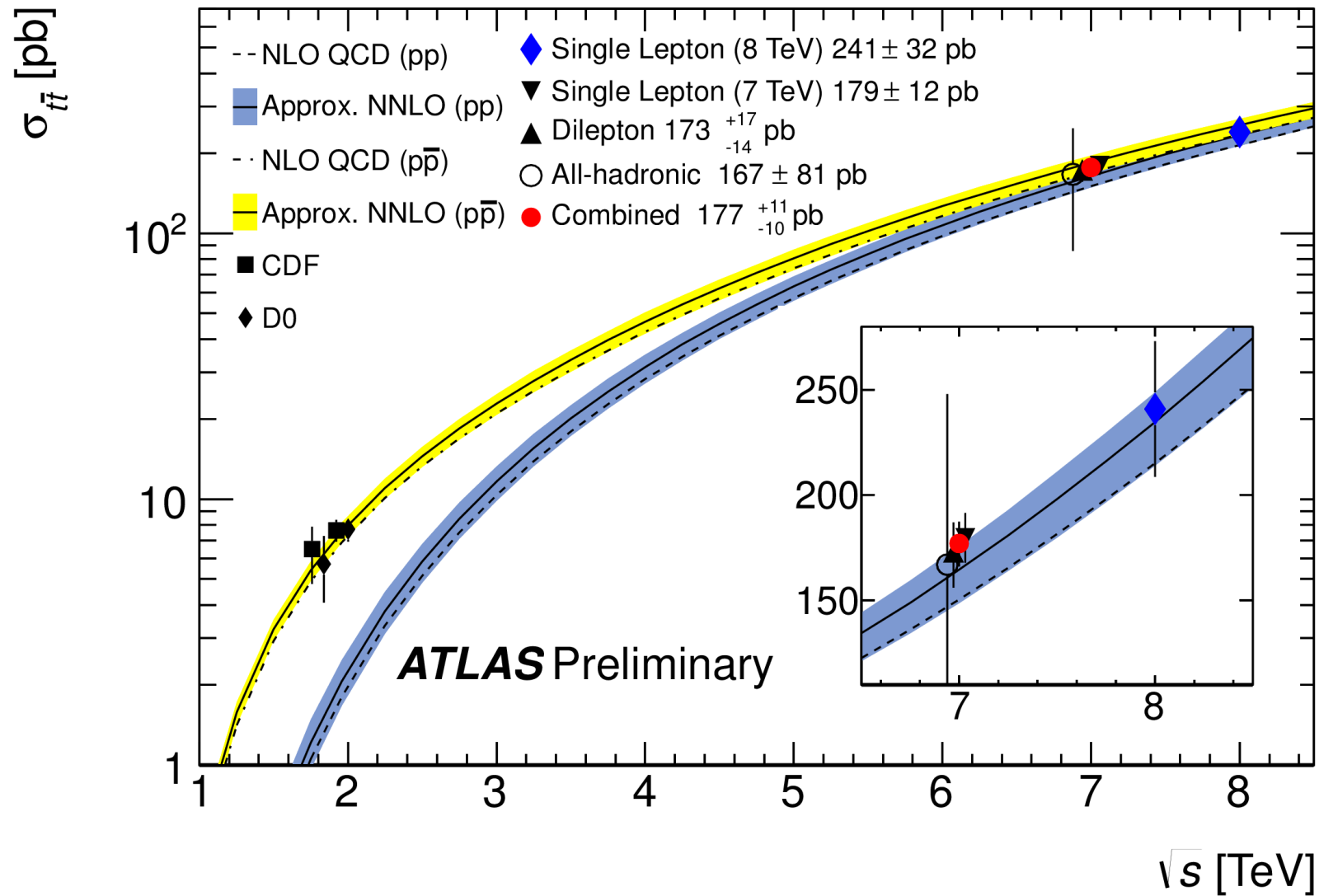
- Processus de plus en plus rares
- Mesures compatibles avec prédictions théoriques

Accord sur de nombreux ordres de grandeur



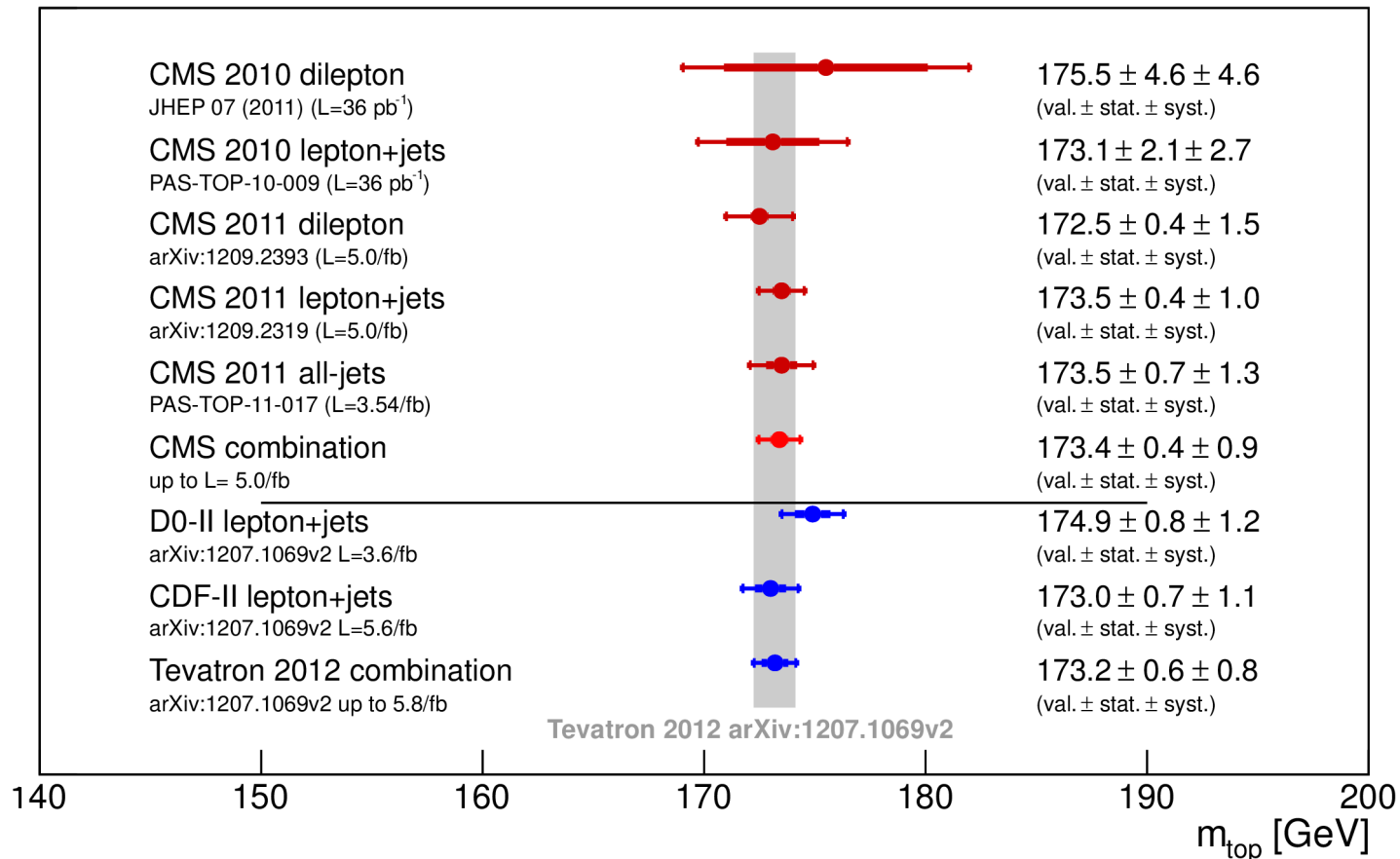
- Quantité de mouvement dans le plan transverse de jets de particules

Production de quarks top



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

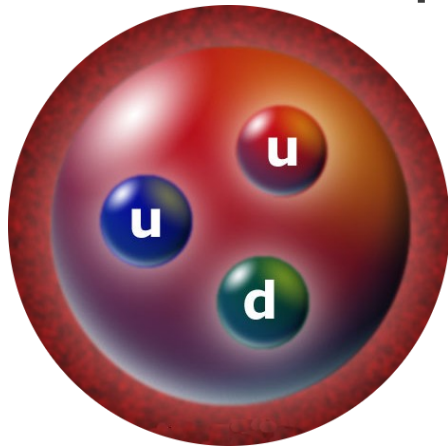
Masse du quark top



- 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

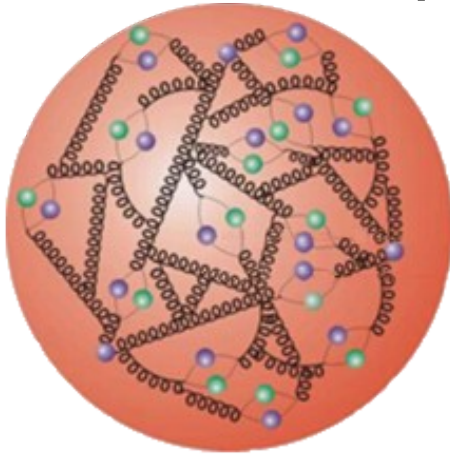
- Notre masse : celle de nos atomes
- Masse des atomes : presque uniquement celle des noyaux, faits de protons et neutrons de masse ~ 1 GeV



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

La masse

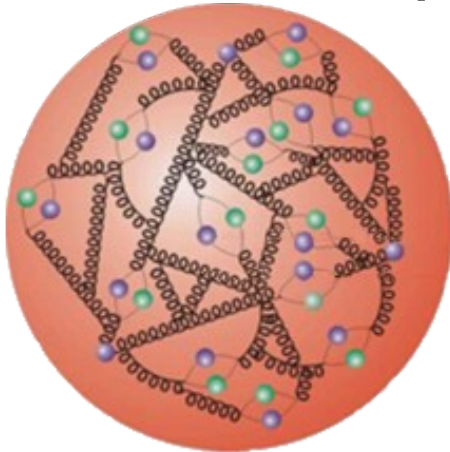
- Notre masse : celle de nos atomes
- Masse des atomes : presque uniquement celle des noyaux, faits de protons et neutrons de masse ~ 1 GeV



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

La masse

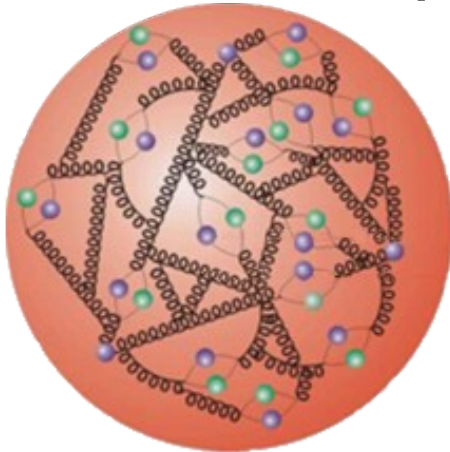
- Notre masse : celle de nos atomes
- Masse des atomes : presque uniquement celle des noyaux, faits de protons et neutrons de masse ~ 1 GeV



- 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

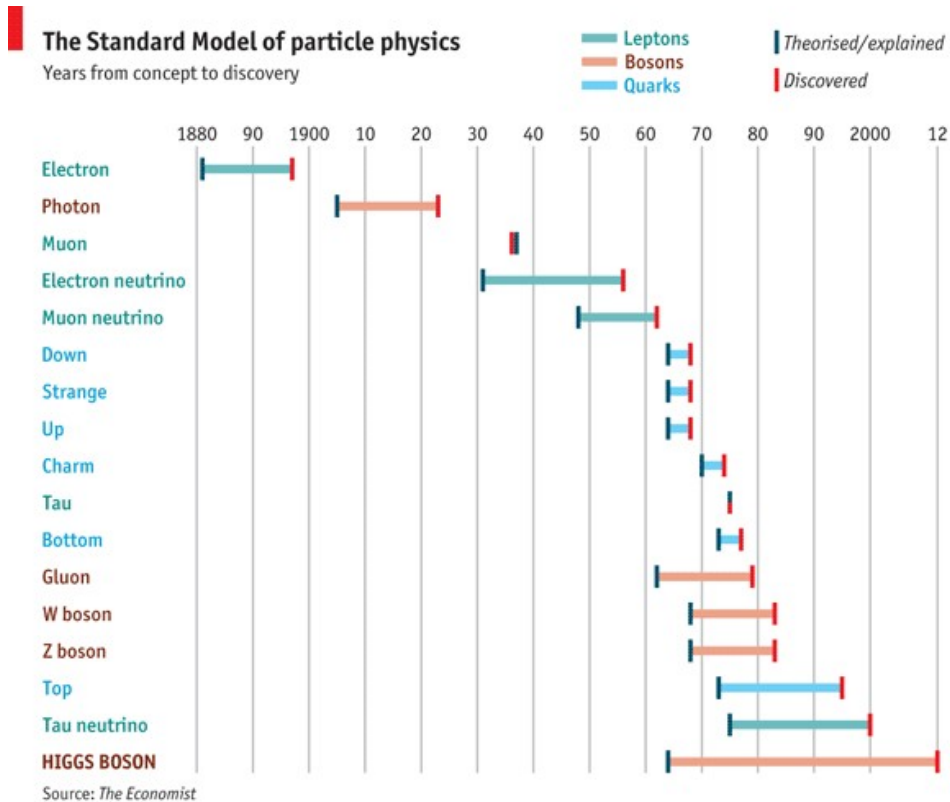
La masse

- 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

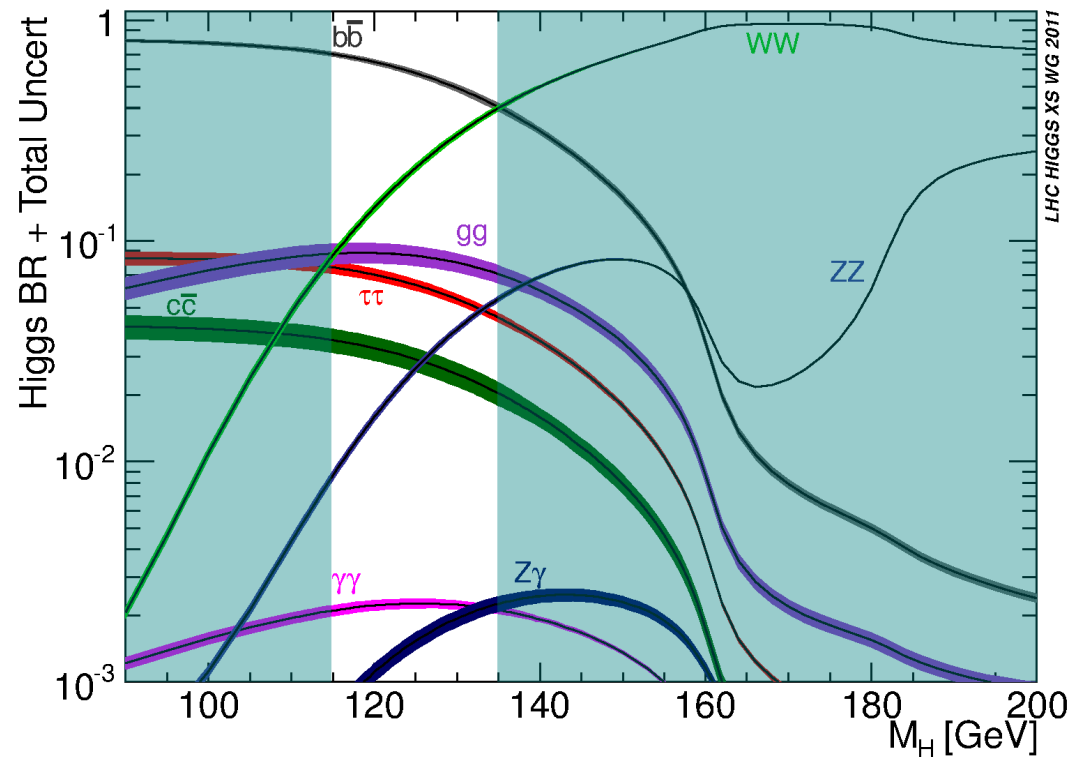
- Modèle standard : énorme succès, sauf que les particules n'ont pas de masse...
- Boson de Higgs : pièce essentielle pour accorder théorie et expérience
- 48 ans entre la prédiction théorique et la découverte expérimentale !
- Pourquoi ? La théorie prédit tout sur le boson de Higgs, sauf sa masse ! 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 126 GeV :

- ▶ 56 fois sur 100 en $b\bar{b}$
- ▶ 3 fois sur 100 en ZZ
- ▶ 2 fois sur 1000 en $\gamma\gamma$



- Note : le plus fréquent n'est pas forcément le plus facile à observer

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

- Le boson de Higgs n'est pas produit très souvent, il faut donc analyser énormément de collisions
- La trace de sa désintégration dans le détecteur peut être imitée par d'autres processus, c'est le bruit de fond

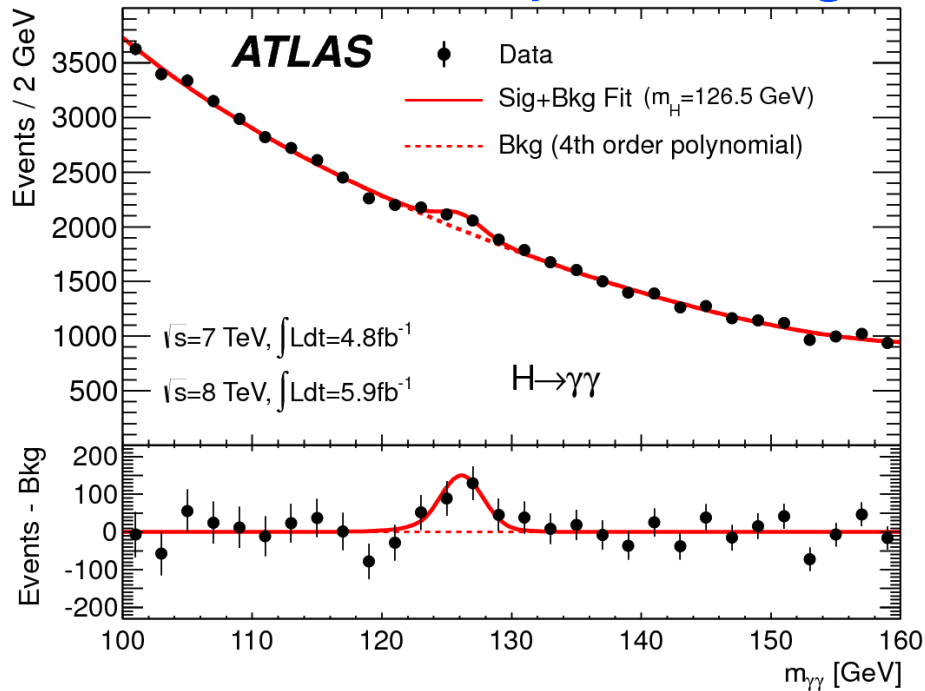


Boson de Higgs dans ATLAS

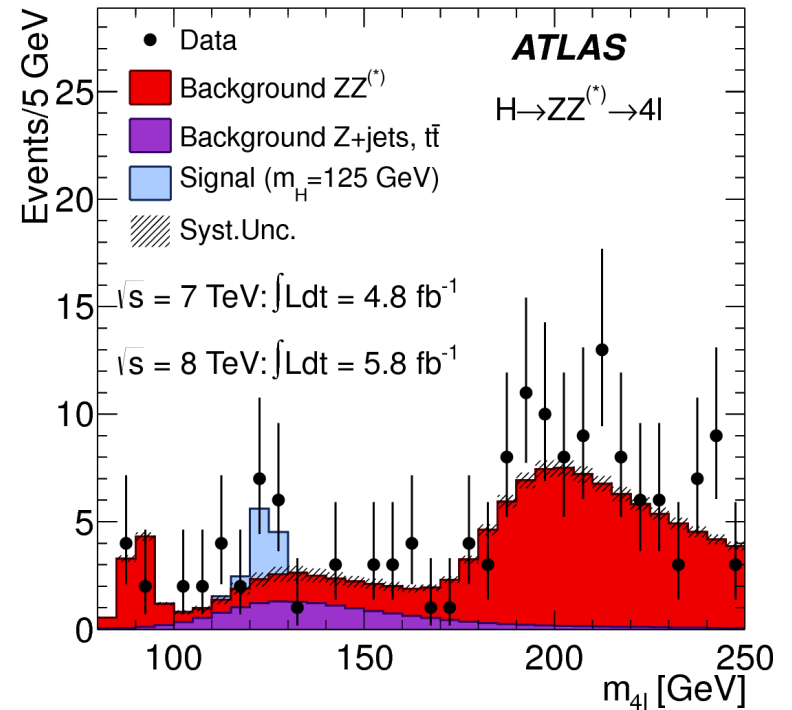


Mesure

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

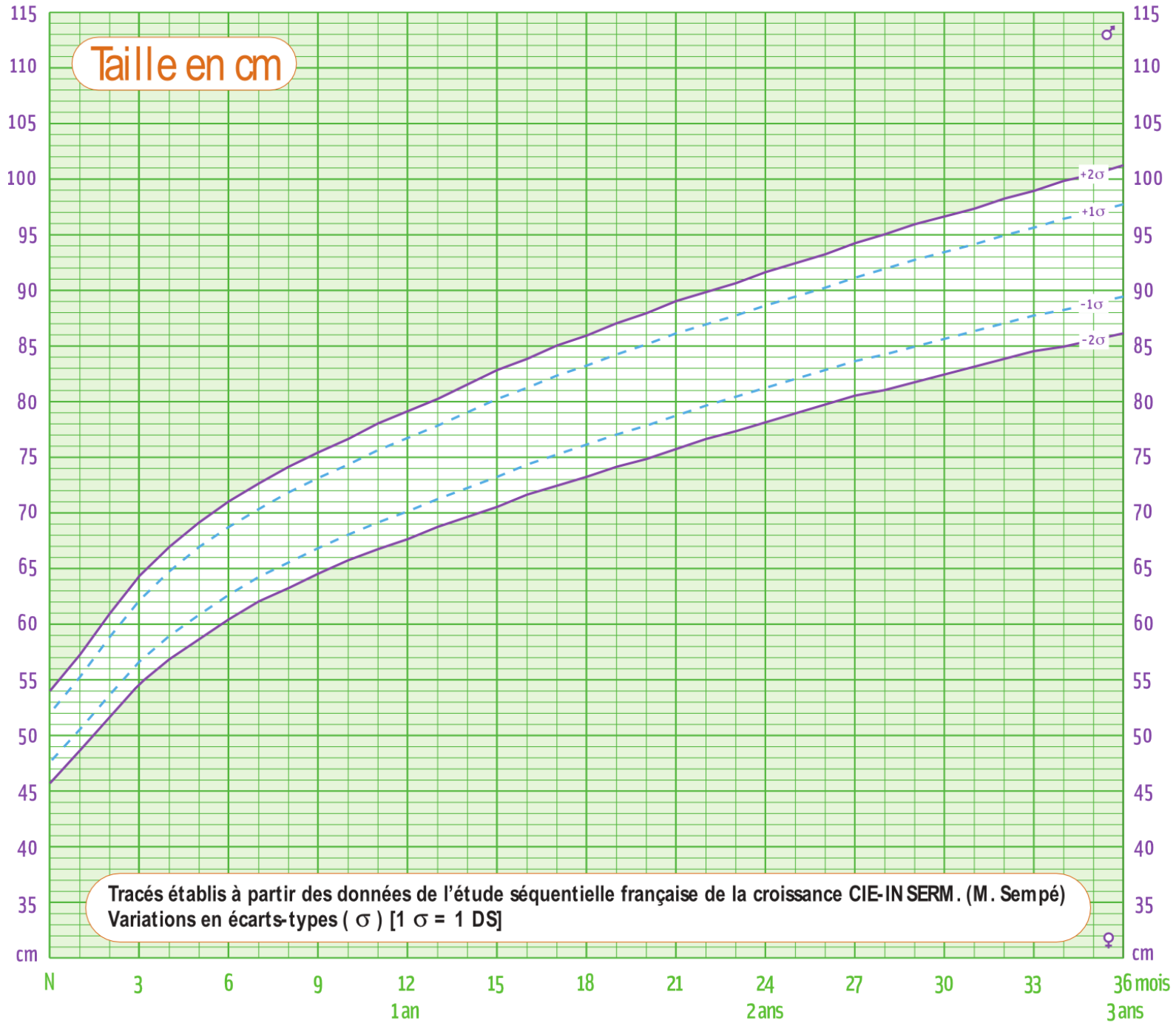


- Higgs en ZZ
 - ▶ Très peu de bruit de fond
 - ▶ Très peu d'événements

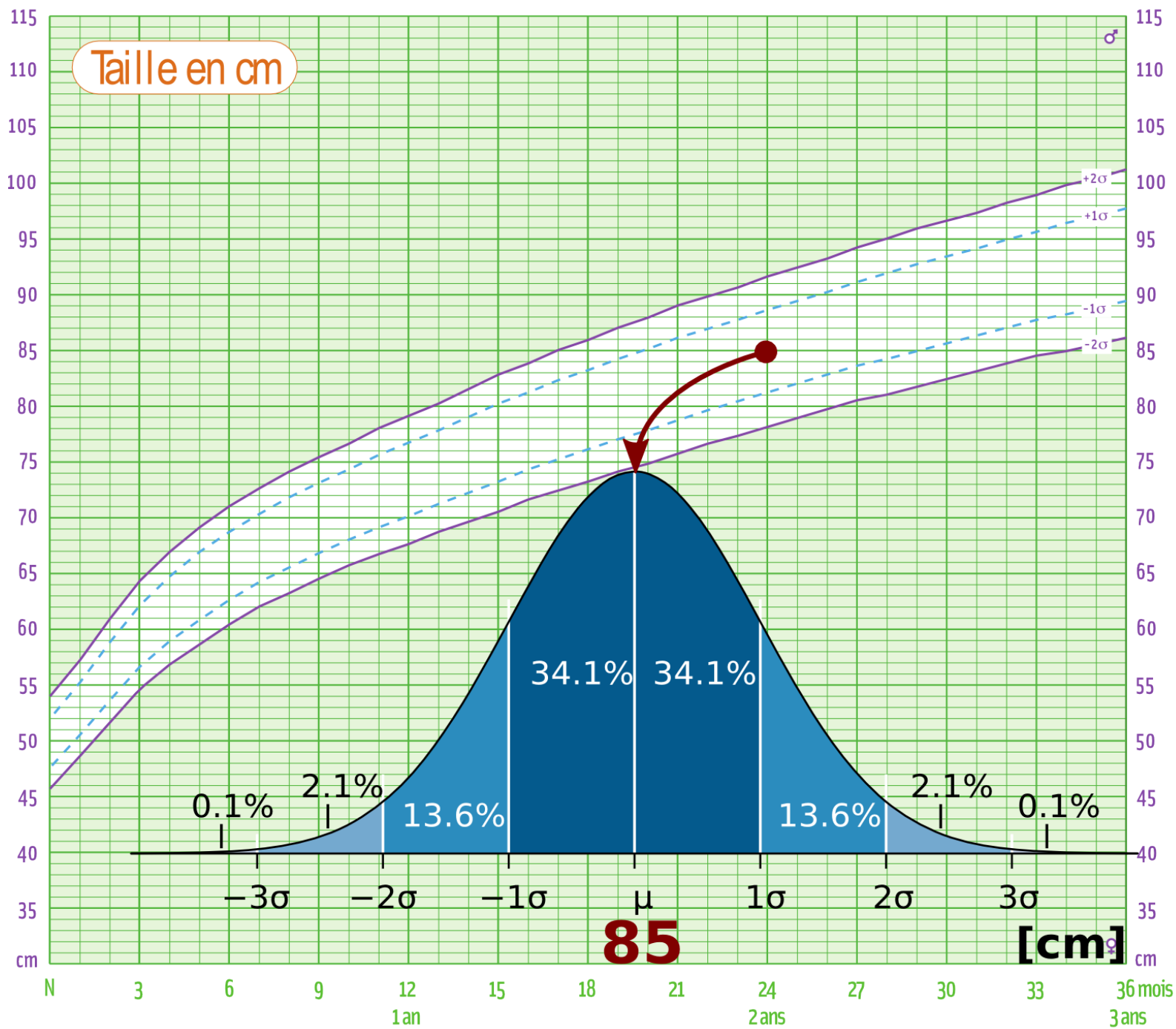


- Est-ce que cela est significatif ?
- Outils statistiques pour répondre

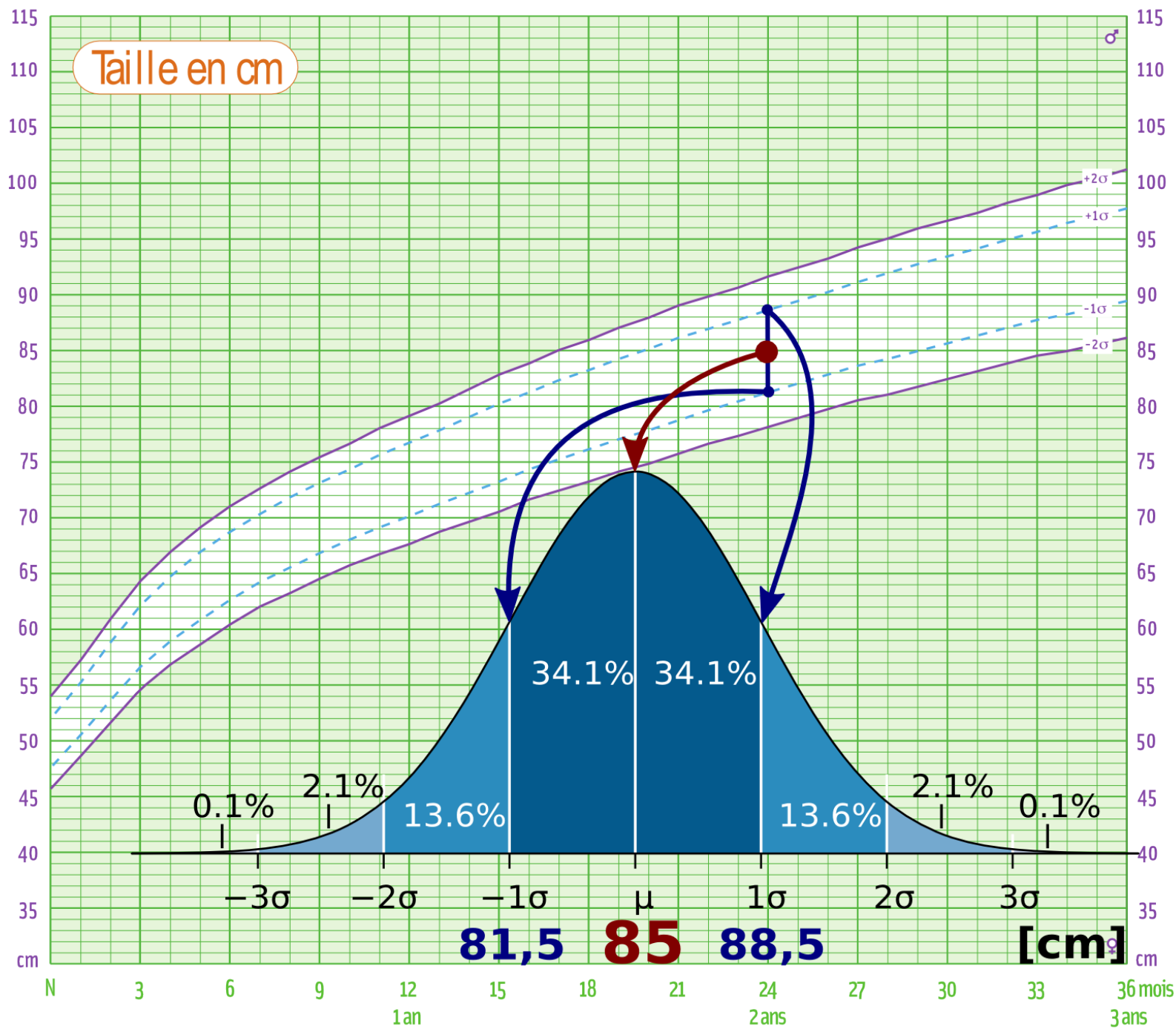
La Gaussienne



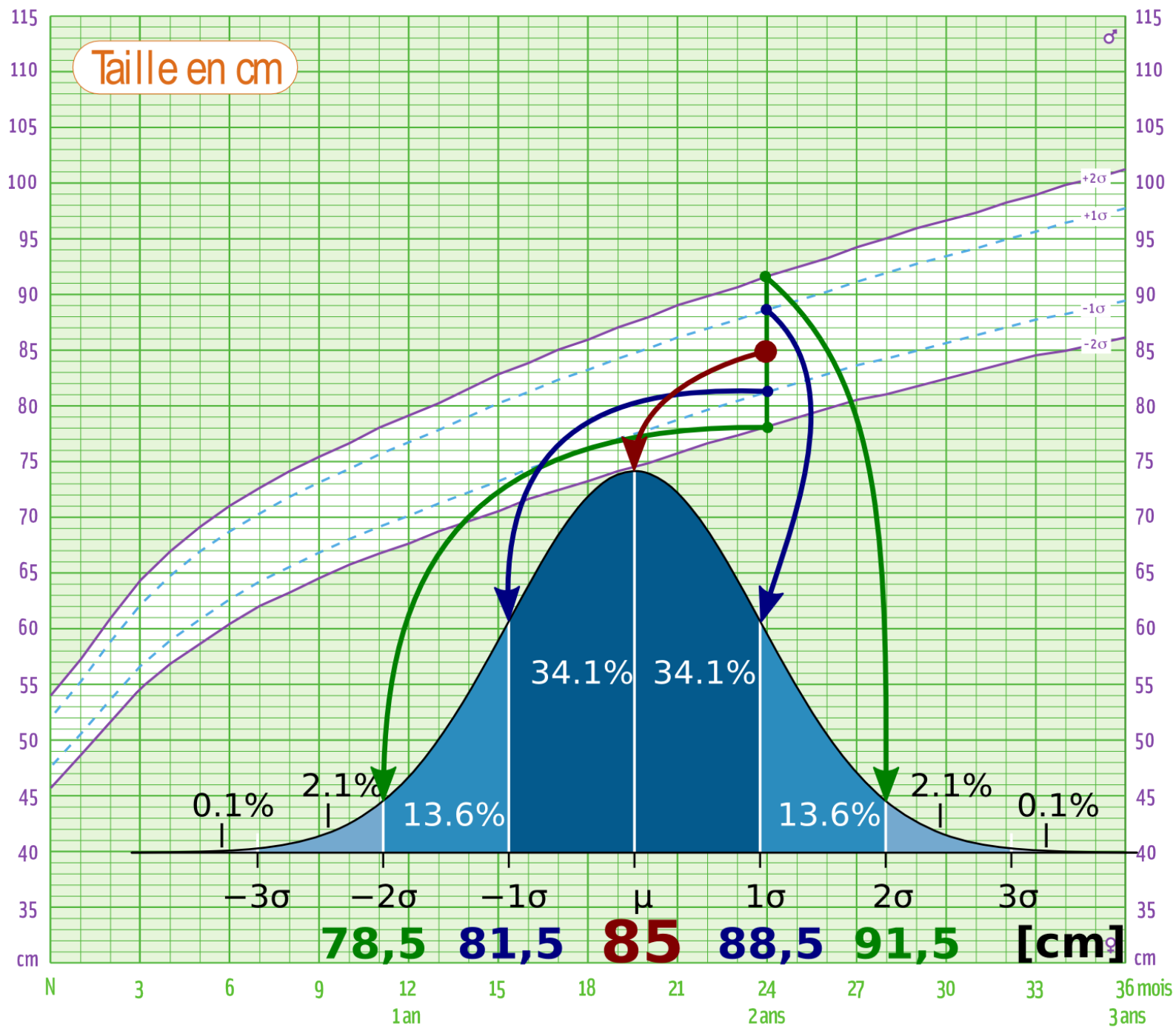
La Gaussienne



La Gaussienne



La Gaussienne

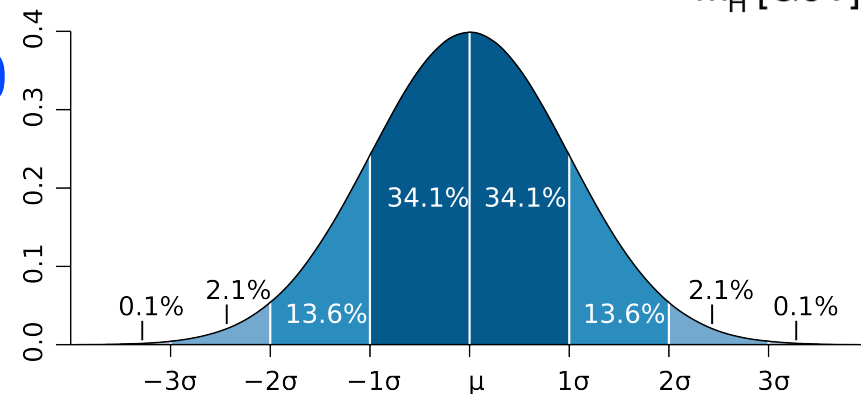
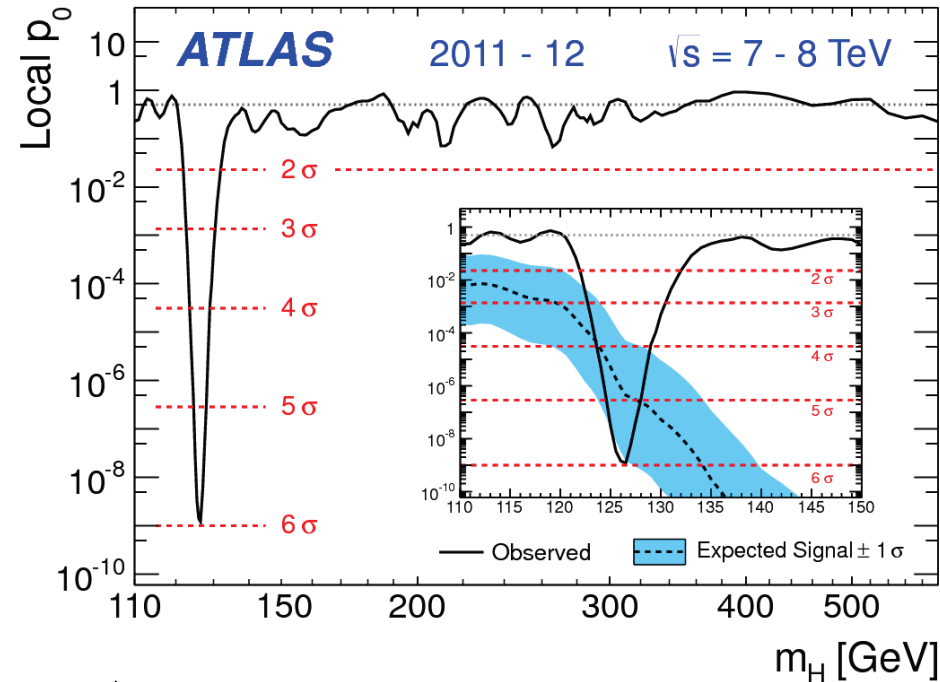


Significance statistique

- p_0 : mesure la probabilité que des événements du bruit de fond produisent quelque chose qui ressemble autant au signal recherché
- Quantifié en nombre de déviations standard :

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

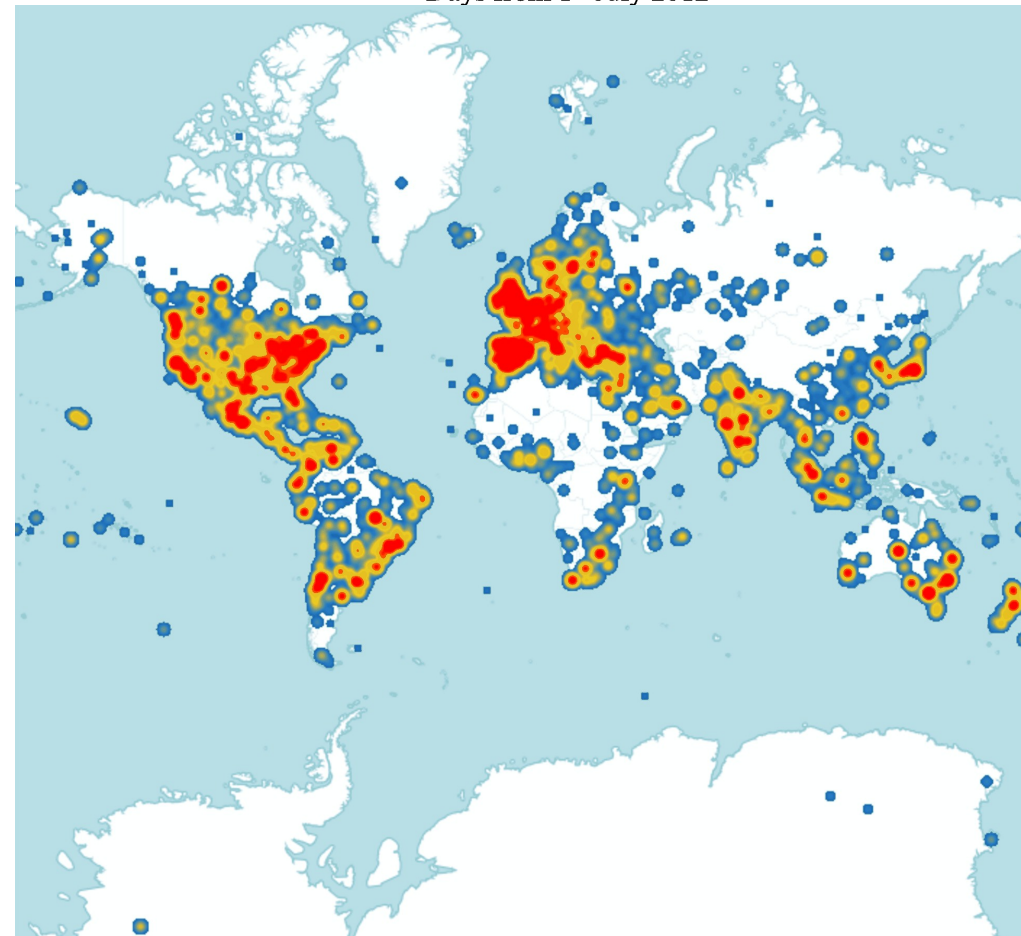
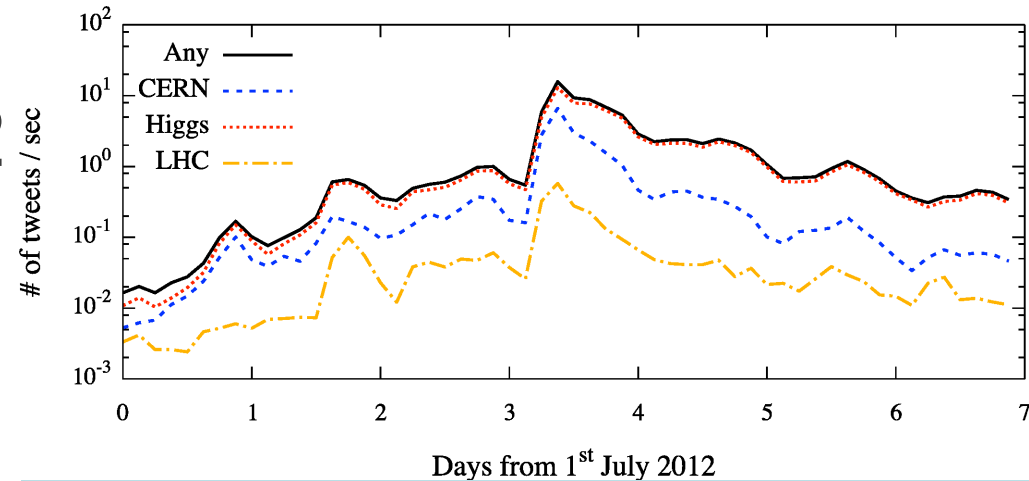
- Donc nous sommes sûrs d'avoir trouvé quelque chose



Résultats

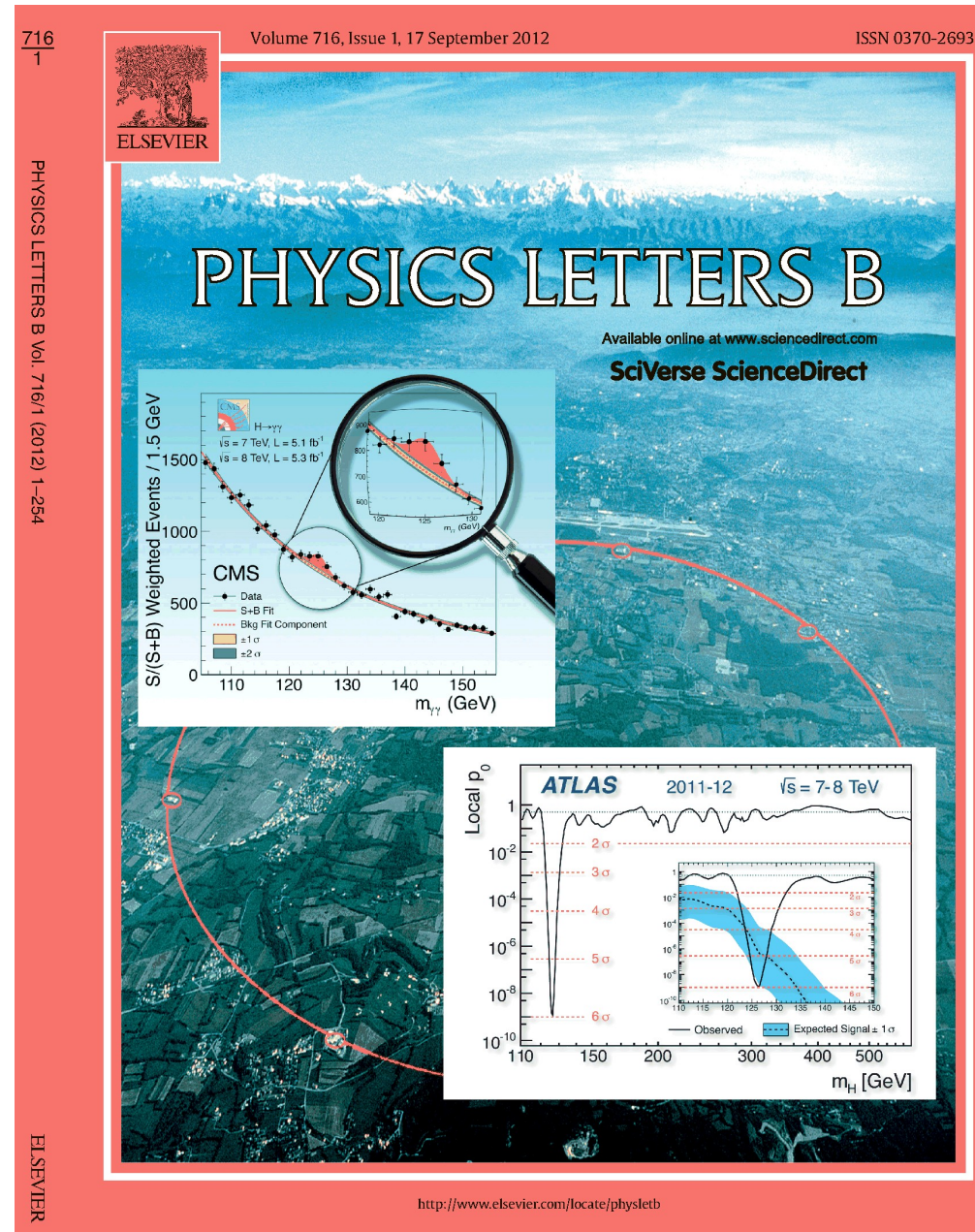
- Annoncés le 4 juillet 2012 lors d'un séminaire au CERN

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

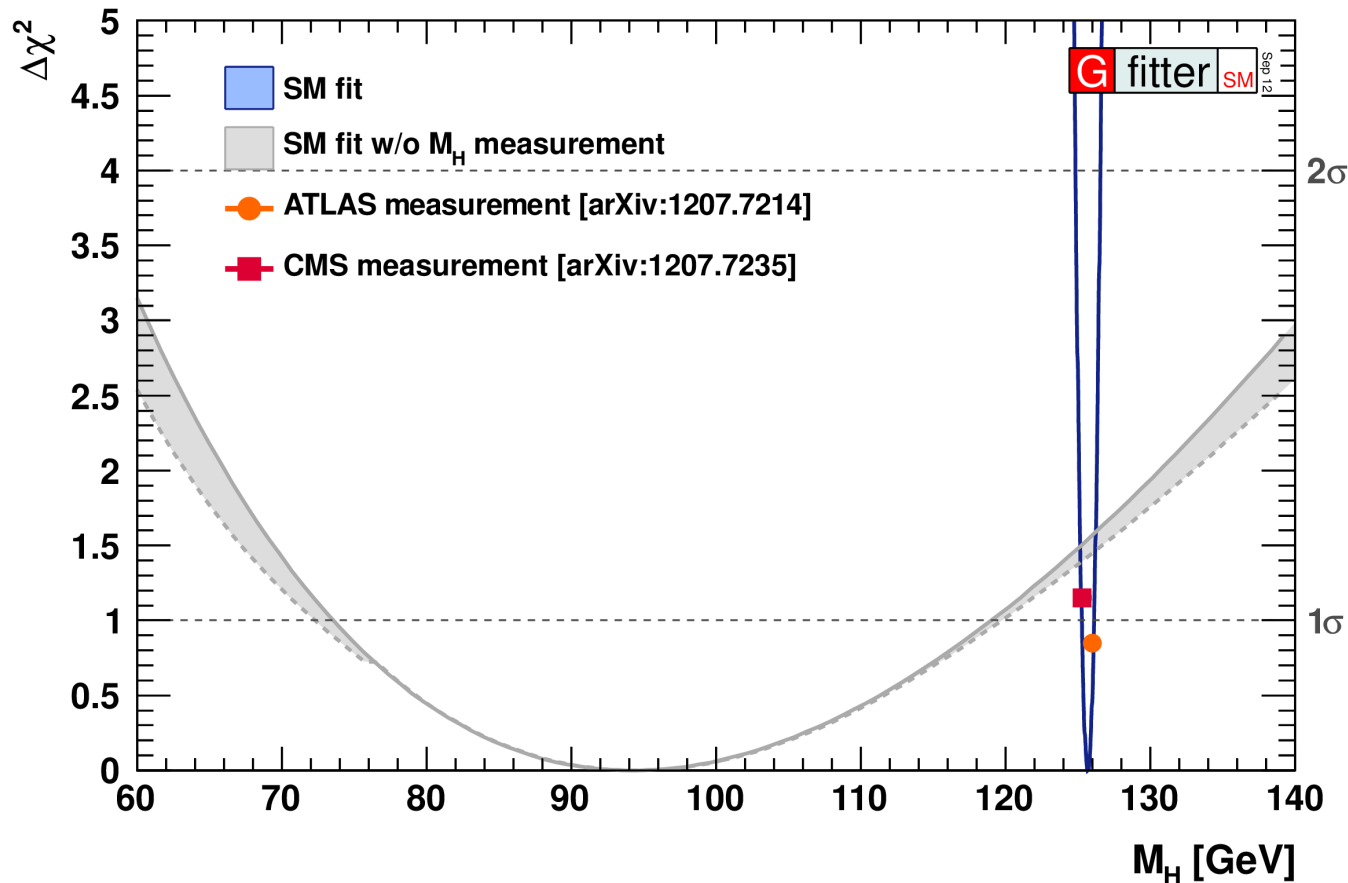


Résultats

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

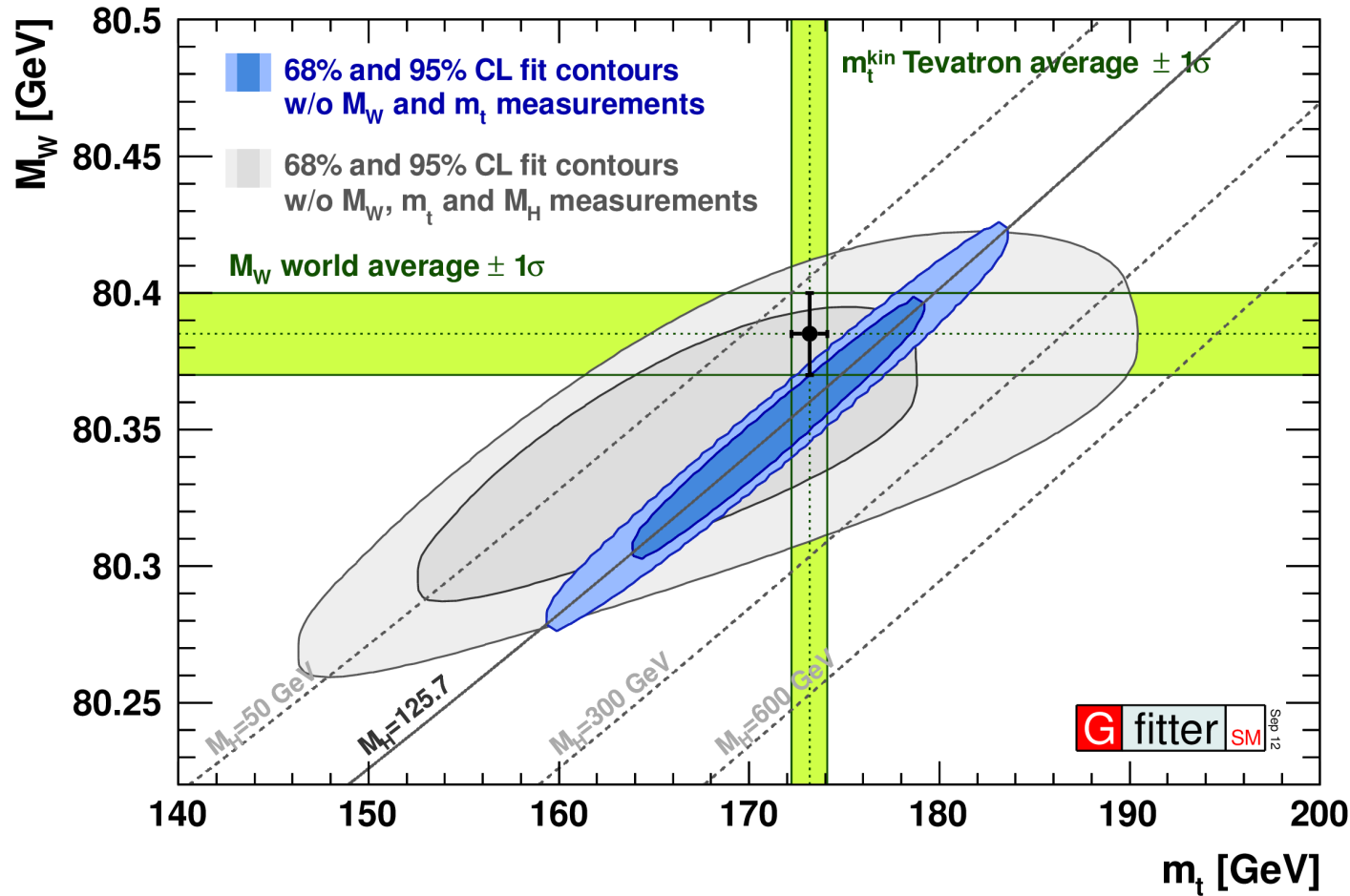


Consistent avec les autres mesures du modèle standard ?



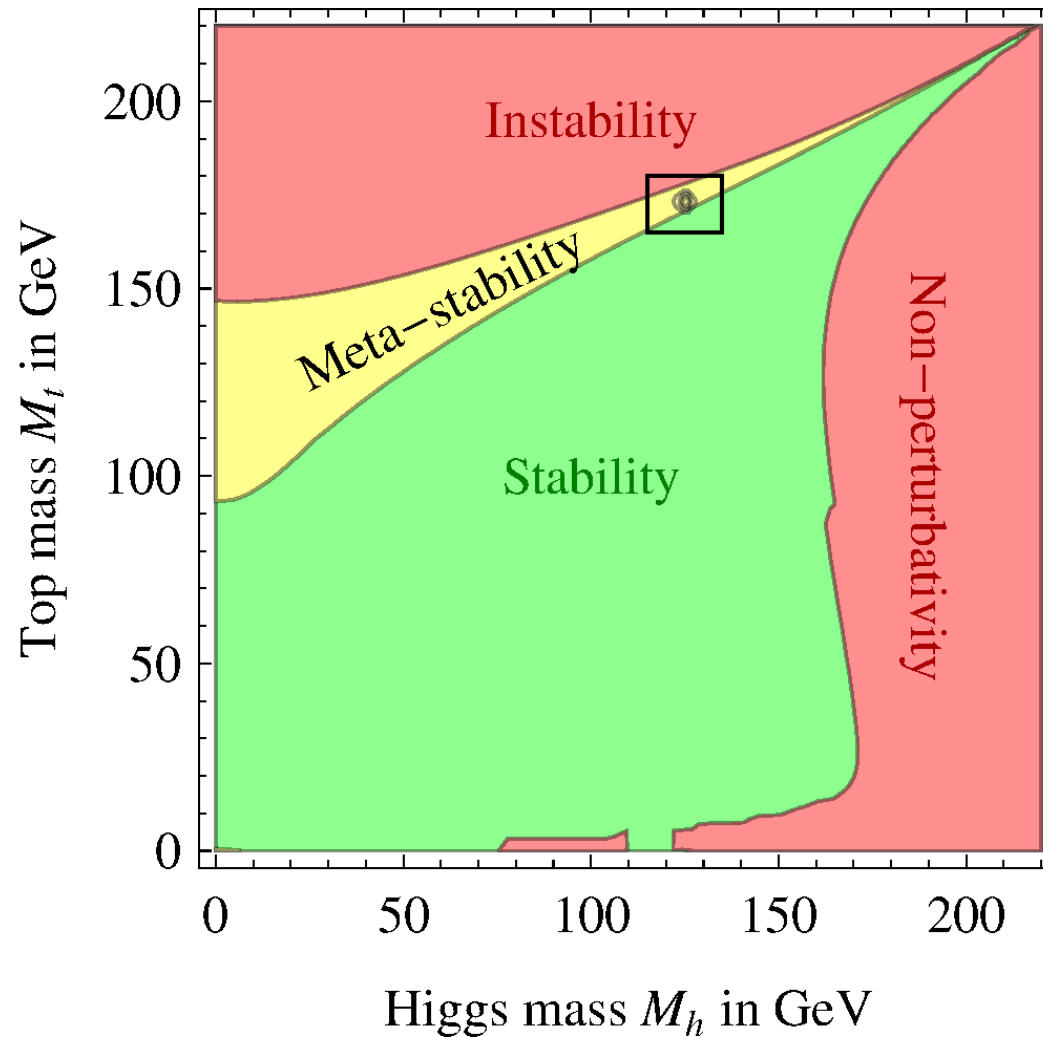
- Pas très éloigné de l'endroit que les autres mesures indiquaient
- Pas de « tension » avec le modèle standard

Consistent avec les autres mesures du modèle standard ?



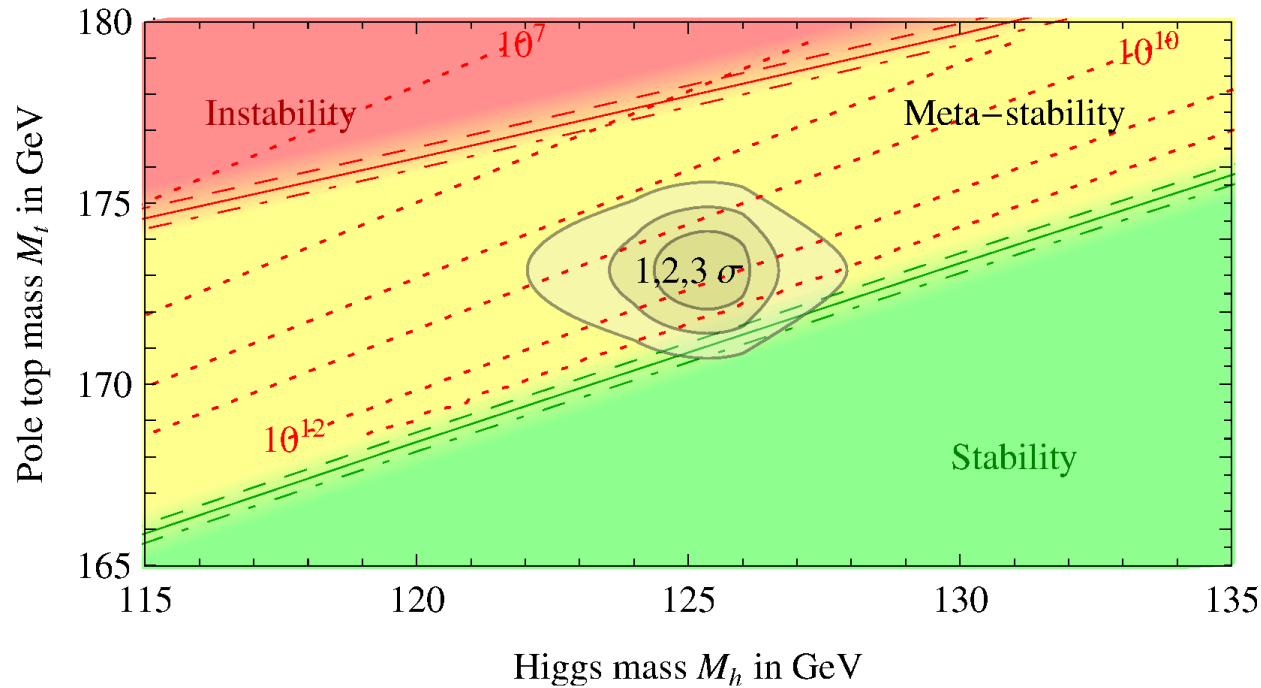
- Pas très éloigné de l'endroit que les autres mesures indiquaient
- Pas de « tension » avec le modèle standard

Un univers instable ?



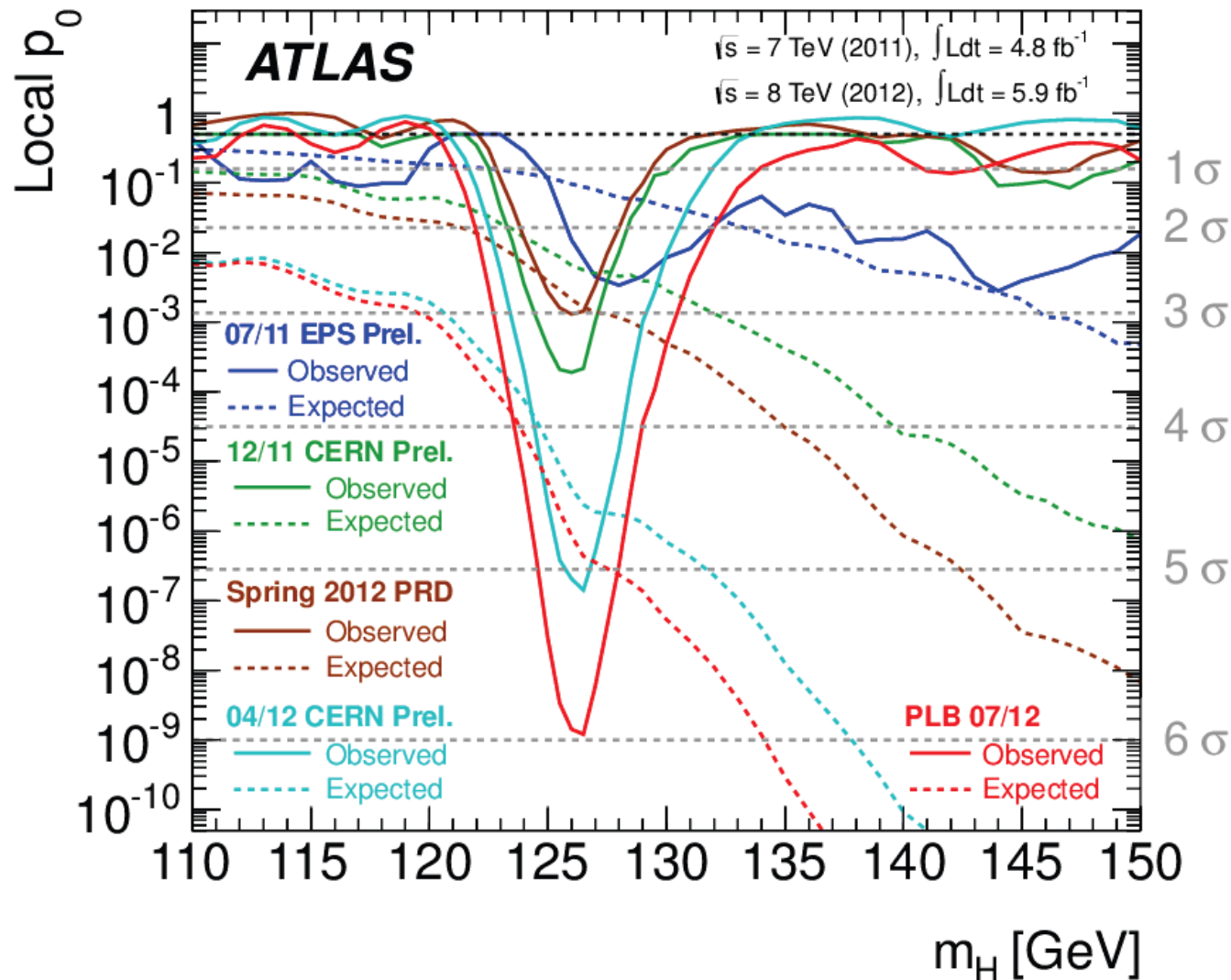
- Plutôt méta-stable, stable à l'échelle de l'âge de l'Univers. Ouf !
- Besoin d'améliorer la précision de m_t pour en savoir plus

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

Évolution dans le temps



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

Évolution dans le temps



film

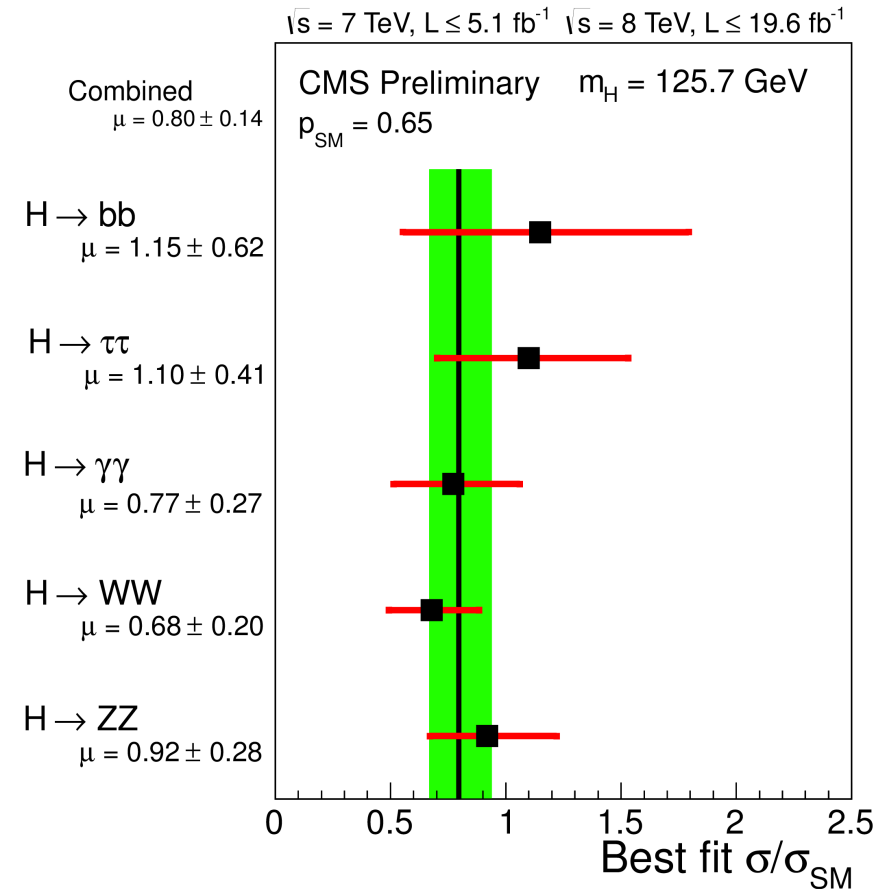
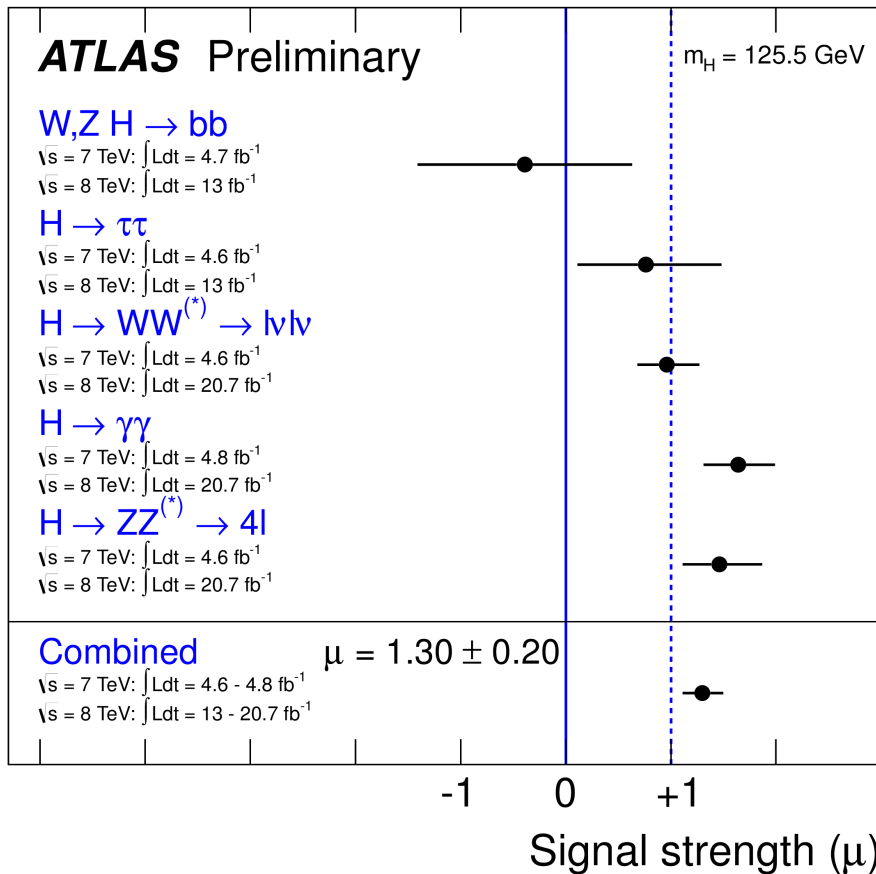
$$H \rightarrow \gamma\gamma$$



film

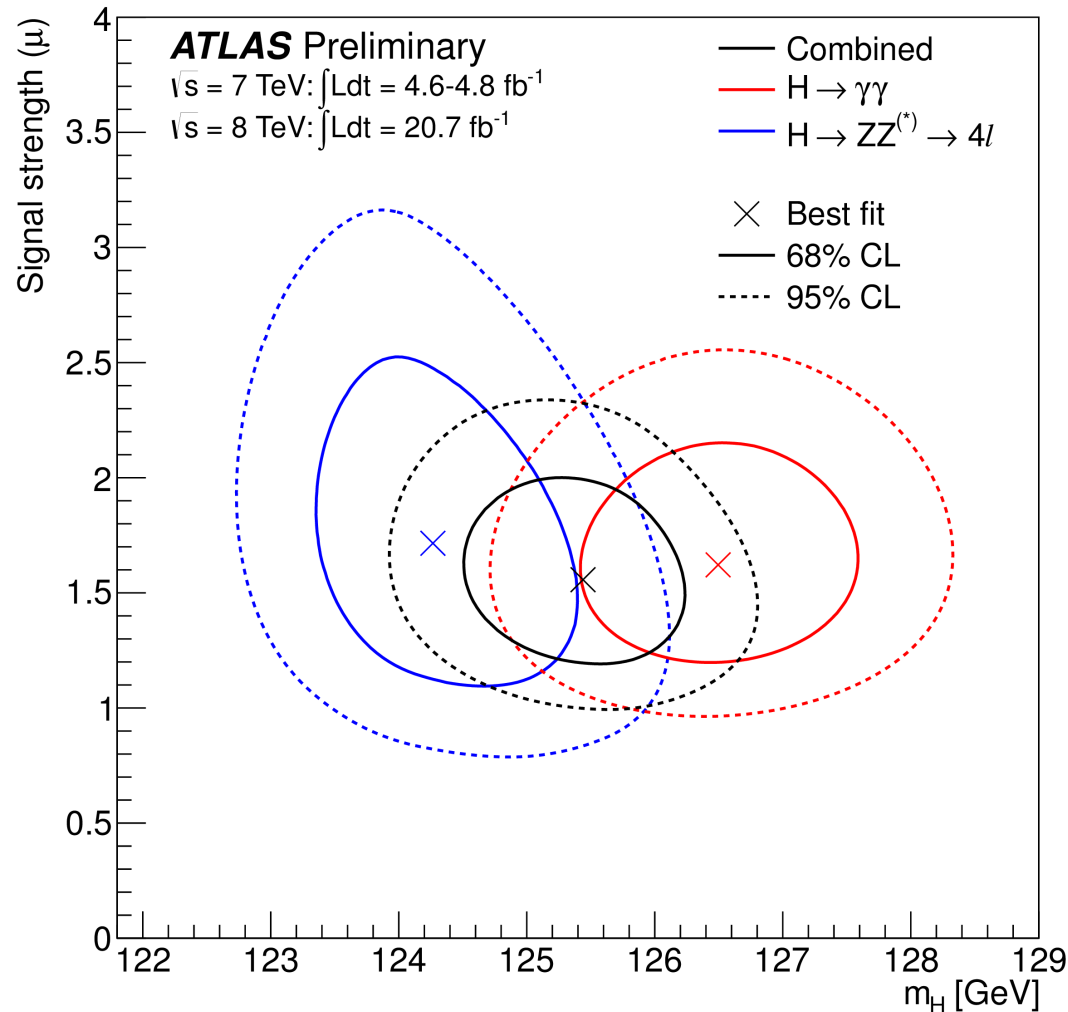
$$H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4l$$

Mesures dans plusieurs canaux



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

Mesure de la masse



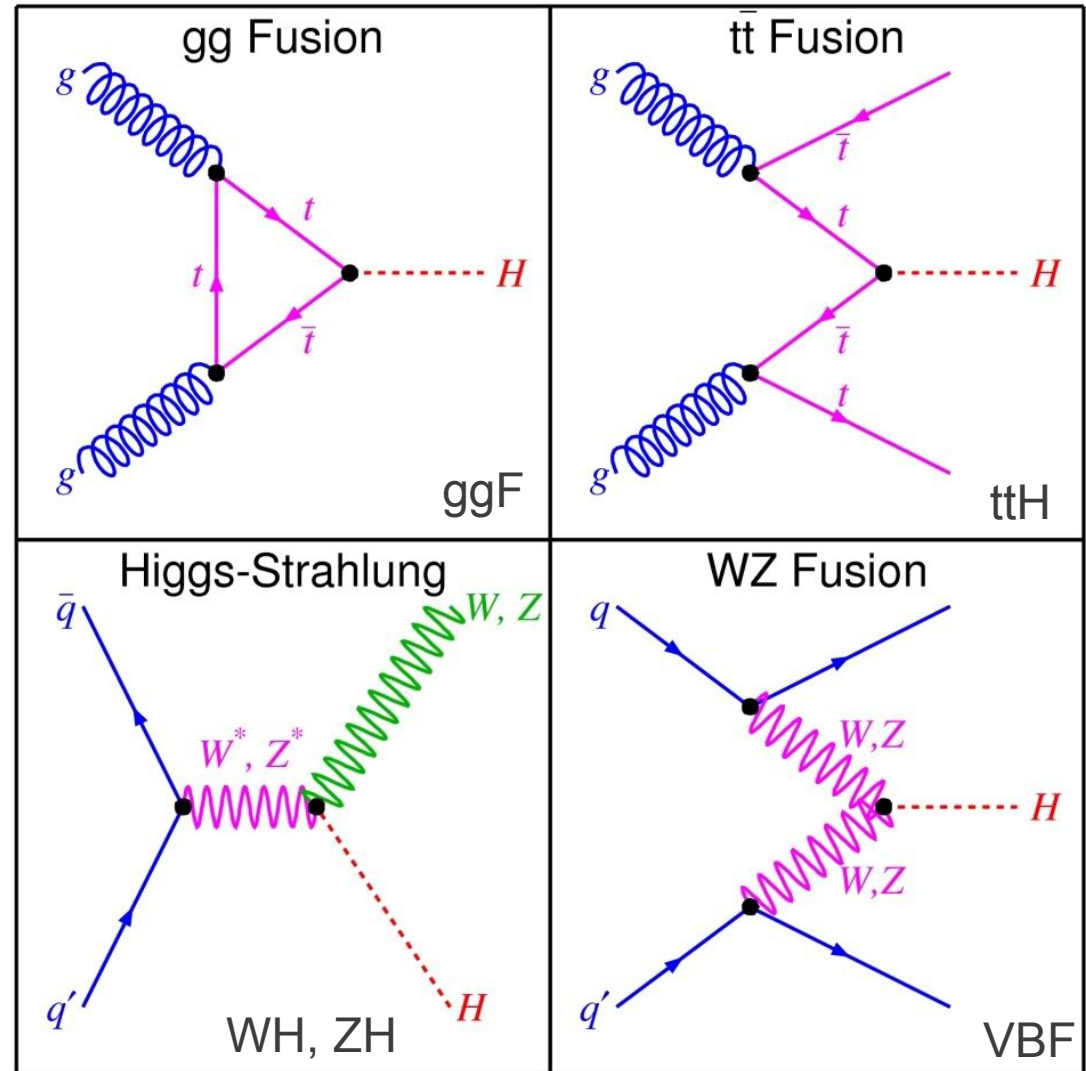
- Canaux différents → mesures légèrement différentes
- Malgré tout compatibles

Est-ce le Higgs du modèle standard ?

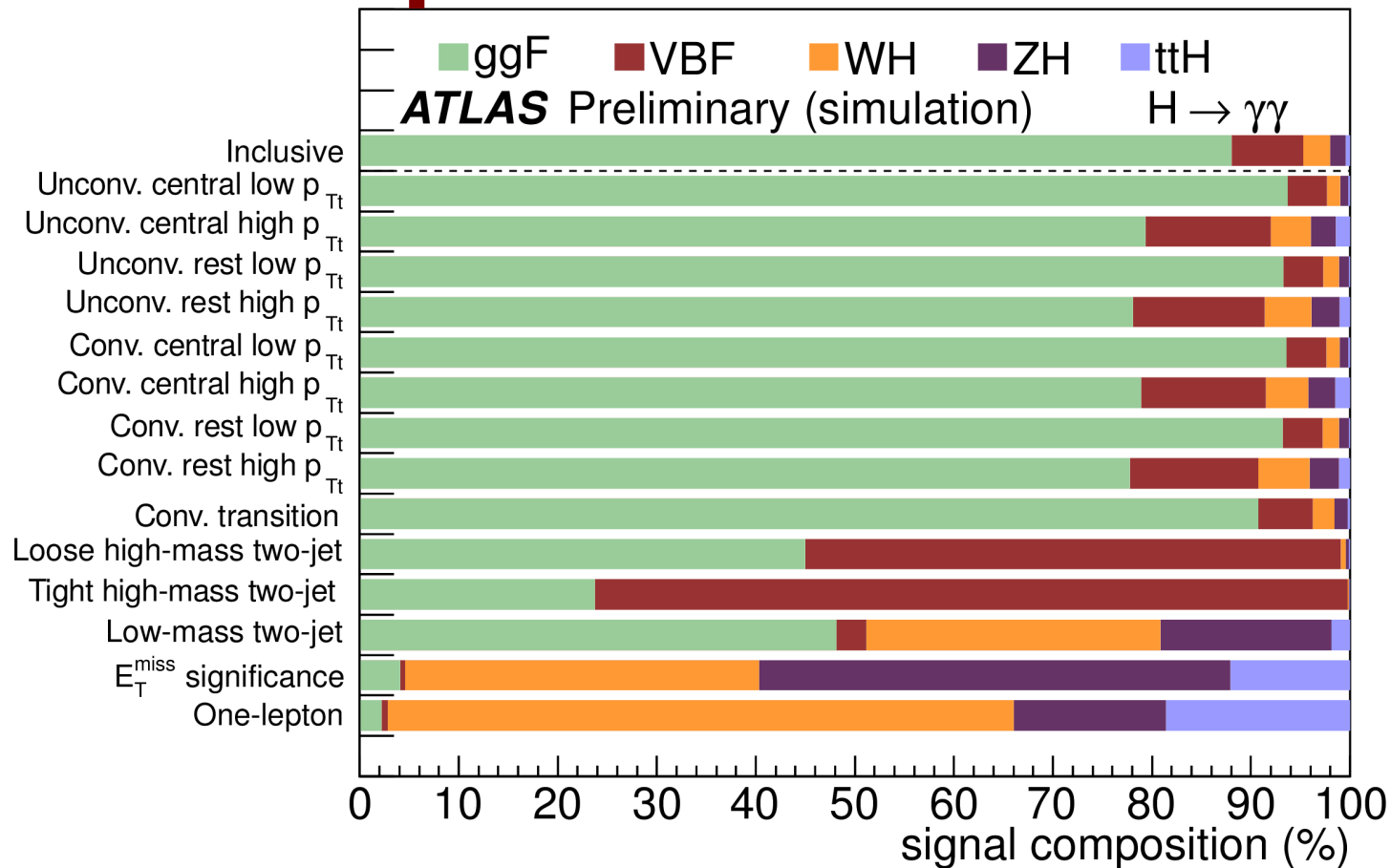
- Masse compatible avec les autres mesures du modèle standard, **$\sim 126 \text{ GeV}$** (134 fois la masse du proton)
- Derniers résultats présentés au mois d'avril 2013
- La signification statistique continue d'augmenter
- Mesures dans plusieurs canaux de désintégration
- Résultats d'ATLAS et CMS consistants
- Mesure des propriétés :
 - ▶ Confirmation du modèle standard...
 - ▶ ... ou observation de petites divergences, signe de physique au delà du modèle standard

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...

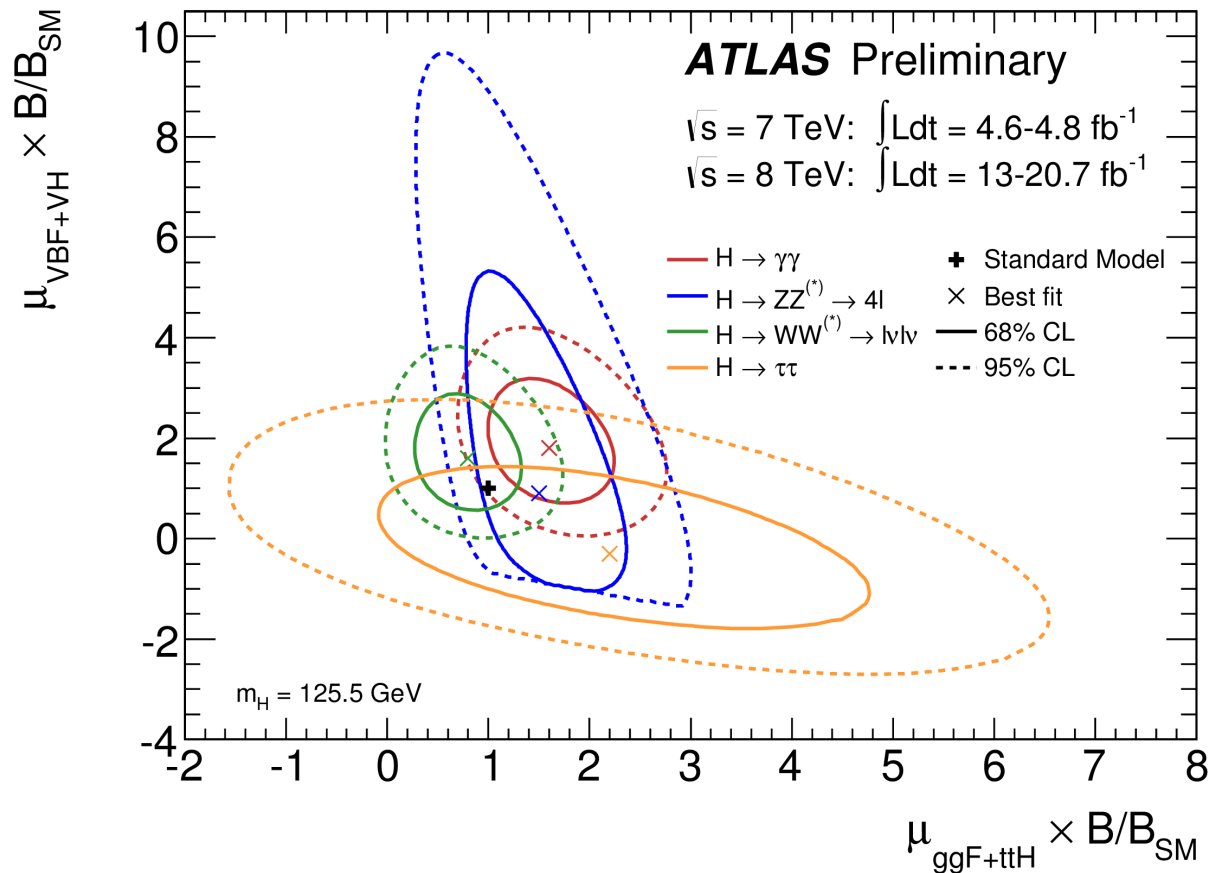


Séparation des canaux de production



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

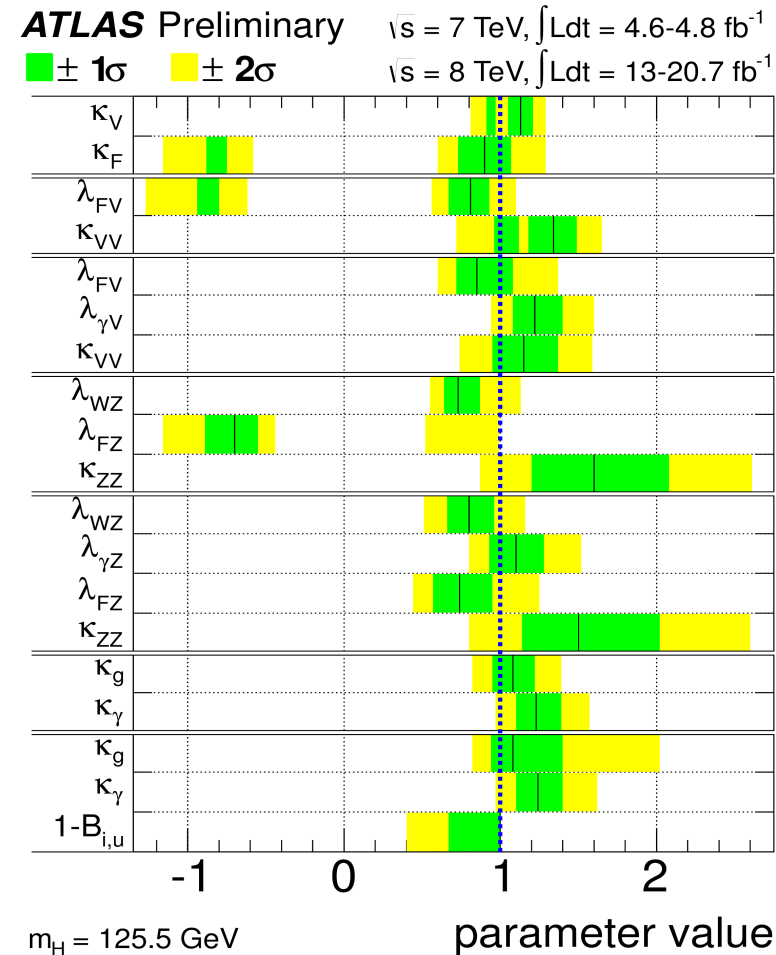
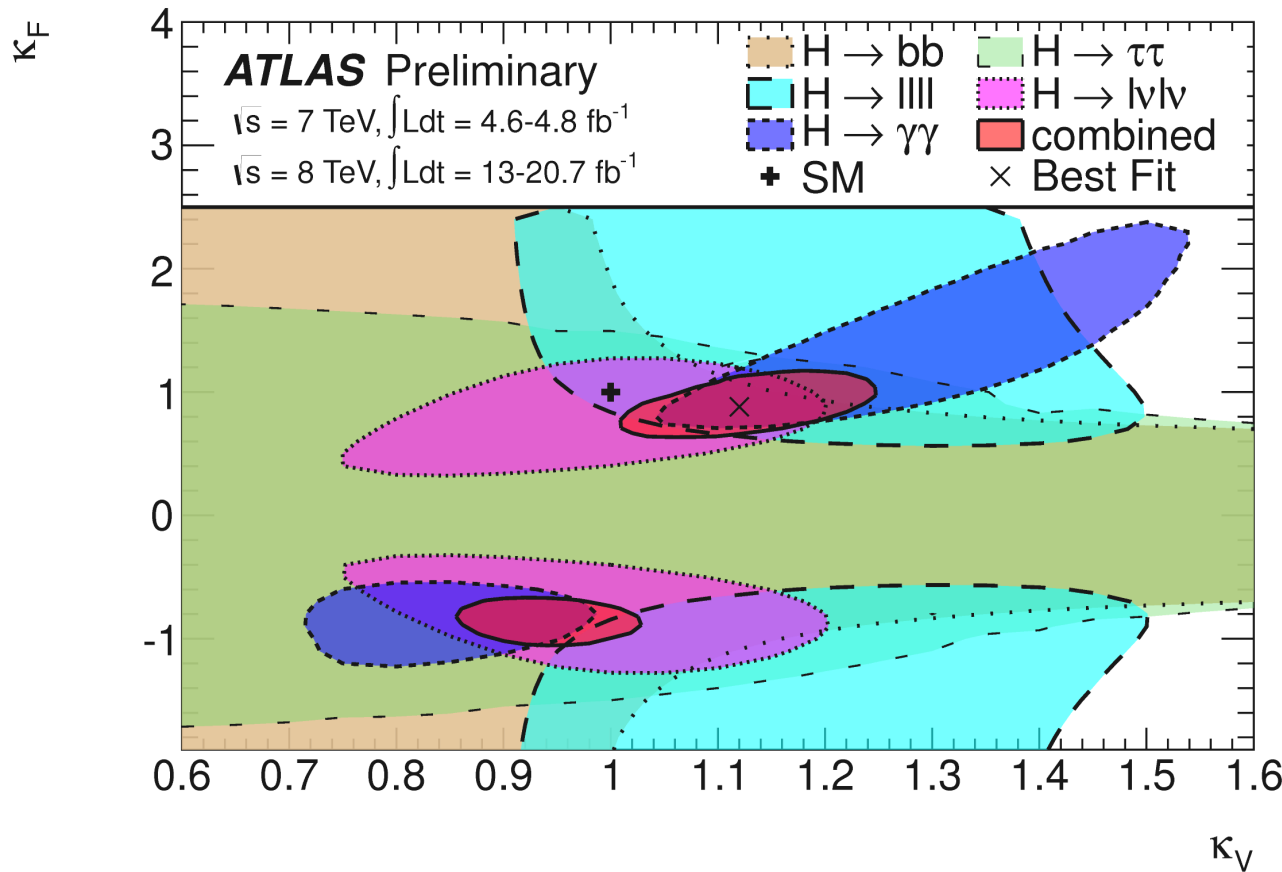
Plutôt « VBF » ou « ggF » ?



- $\mu = 1$ 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

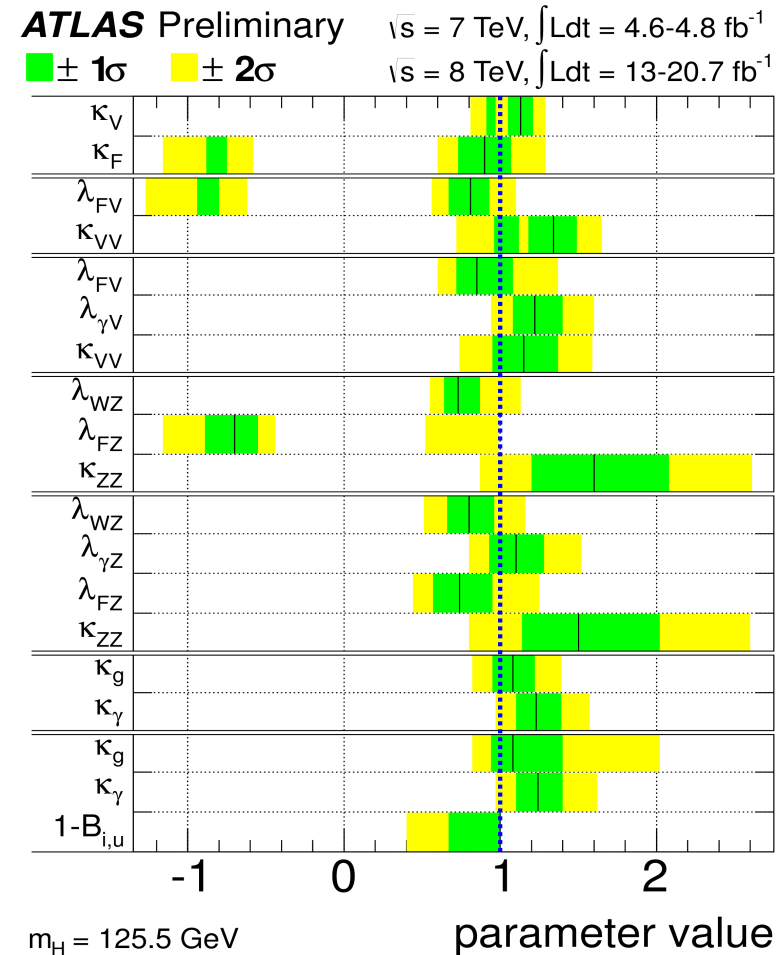
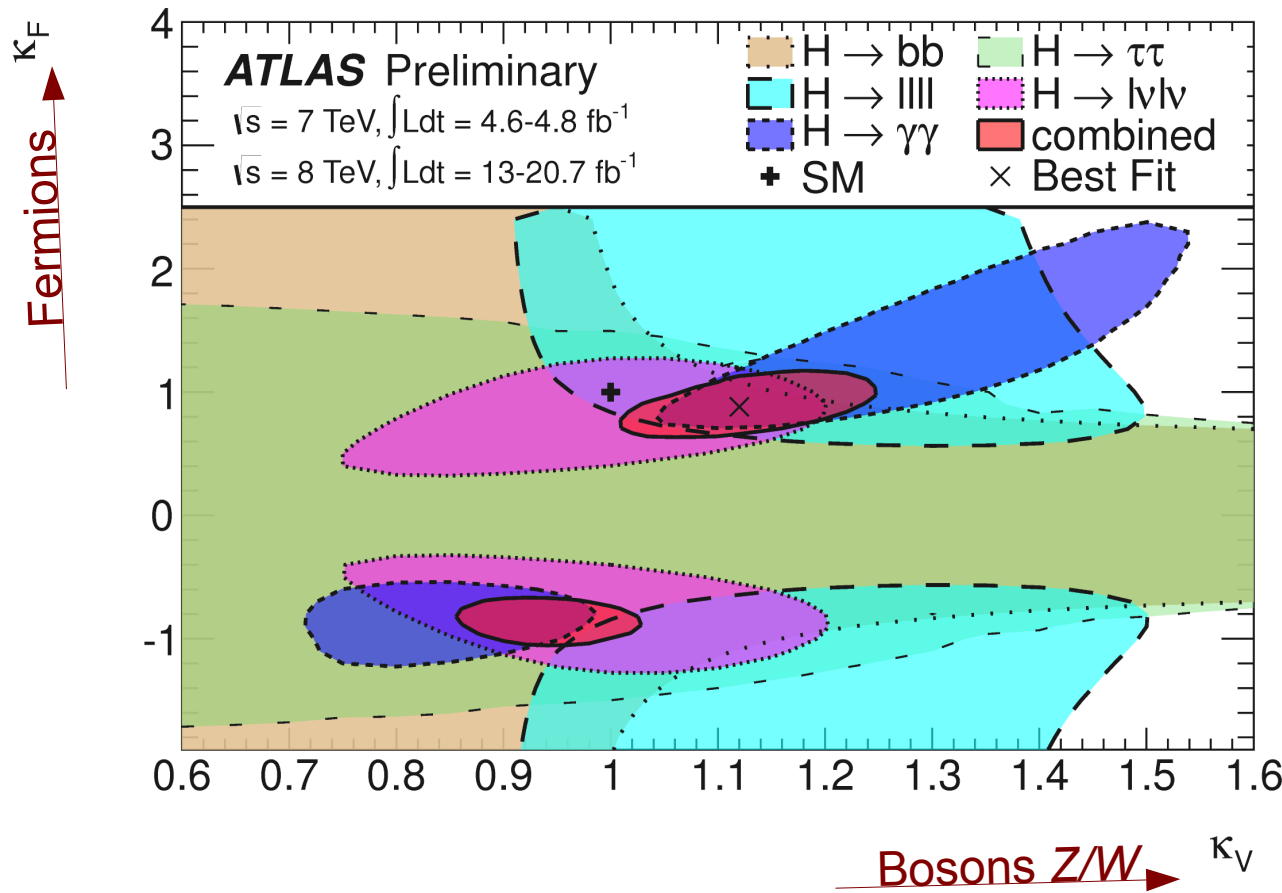
Couplage aux fermions et bosons

- 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



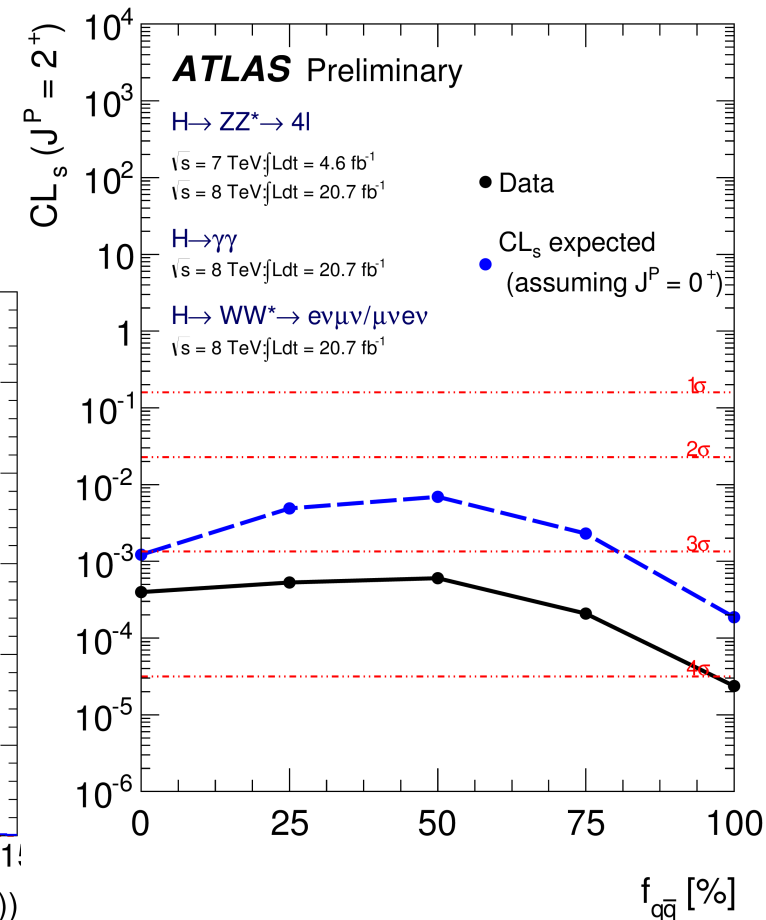
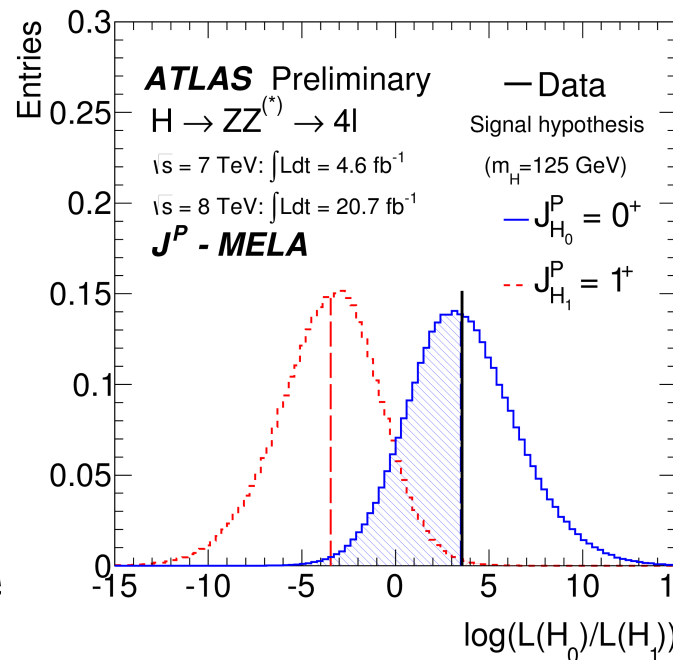
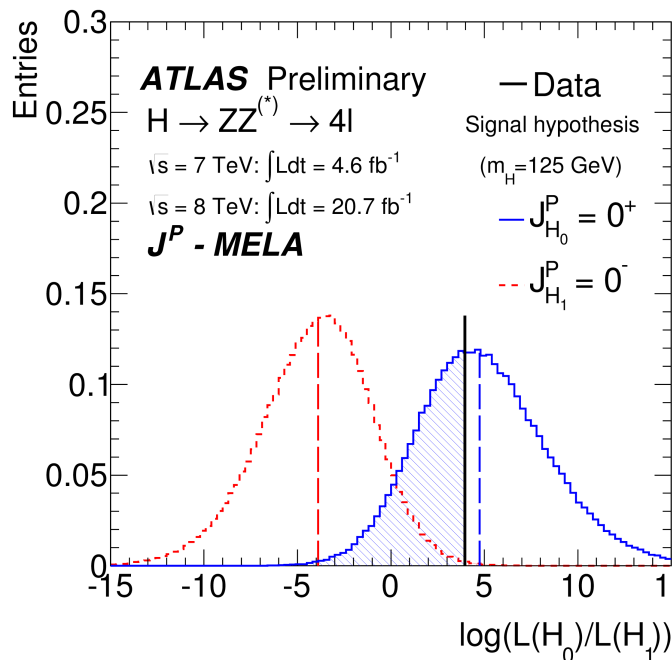
Couplage aux fermions et bosons

- 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

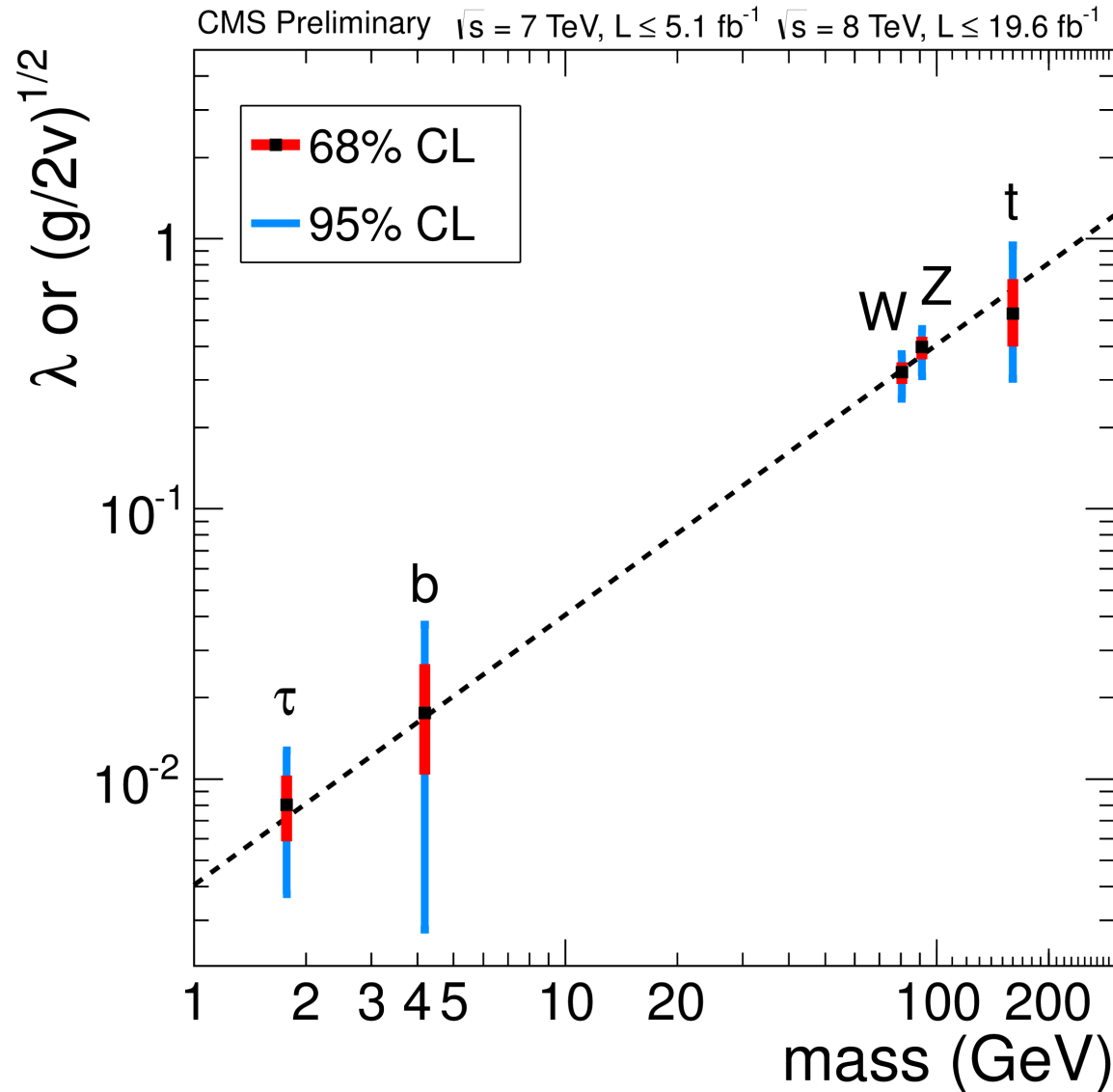


Spin et parité

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



Masse des particules et couplage au boson de Higgs

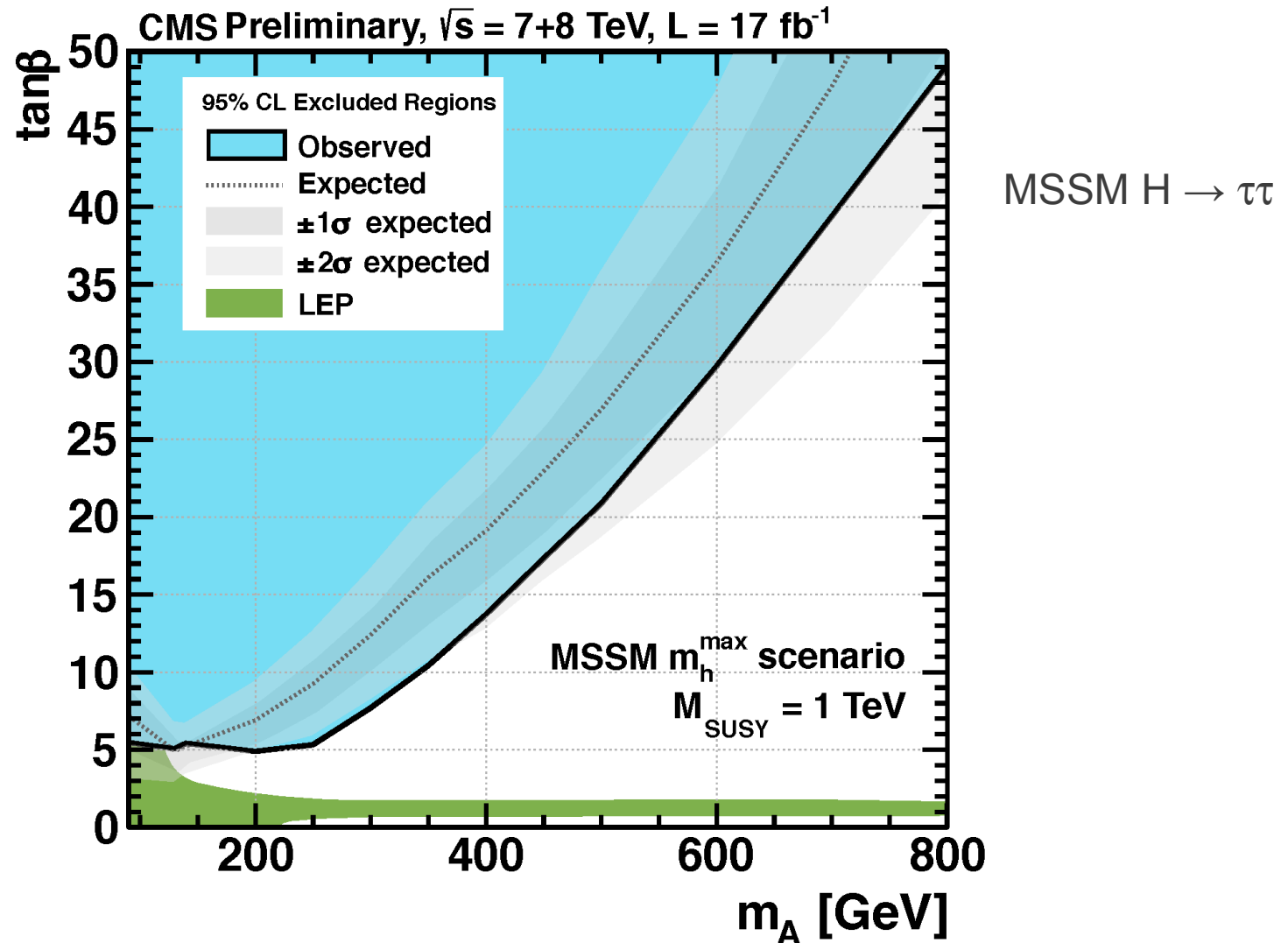


- Relation comme prévue par le modèle standard

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

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

D'autres bosons de Higgs ?



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

Autres théories

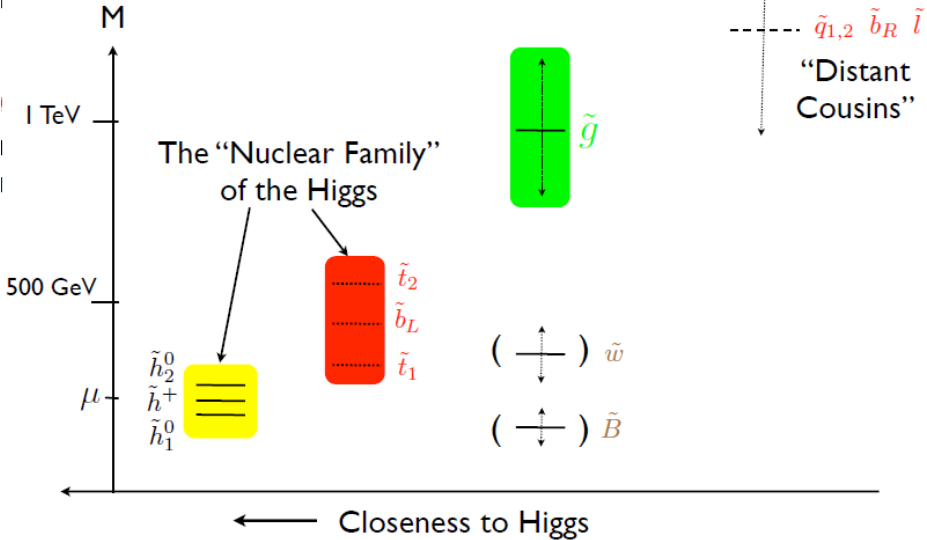
- Le modèle standard n'explique pas tout
- Les théoriciens ne manquent pas d'idées pour le compléter
- Beaucoup de modèles font des prédictions que l'on peut tester au LHC
- Supersymétrie, modèles exotiques, dimensions supplémentaires d'espace, ...
 - ▶ Prédiction de nouvelles particules, ou d'effets sur les phénomènes déjà connus
- Besoin de mesures expérimentales pour orienter les théoriciens

Supersymétrie

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

A Natural Spectrum

General "bottom-up" viewpoint

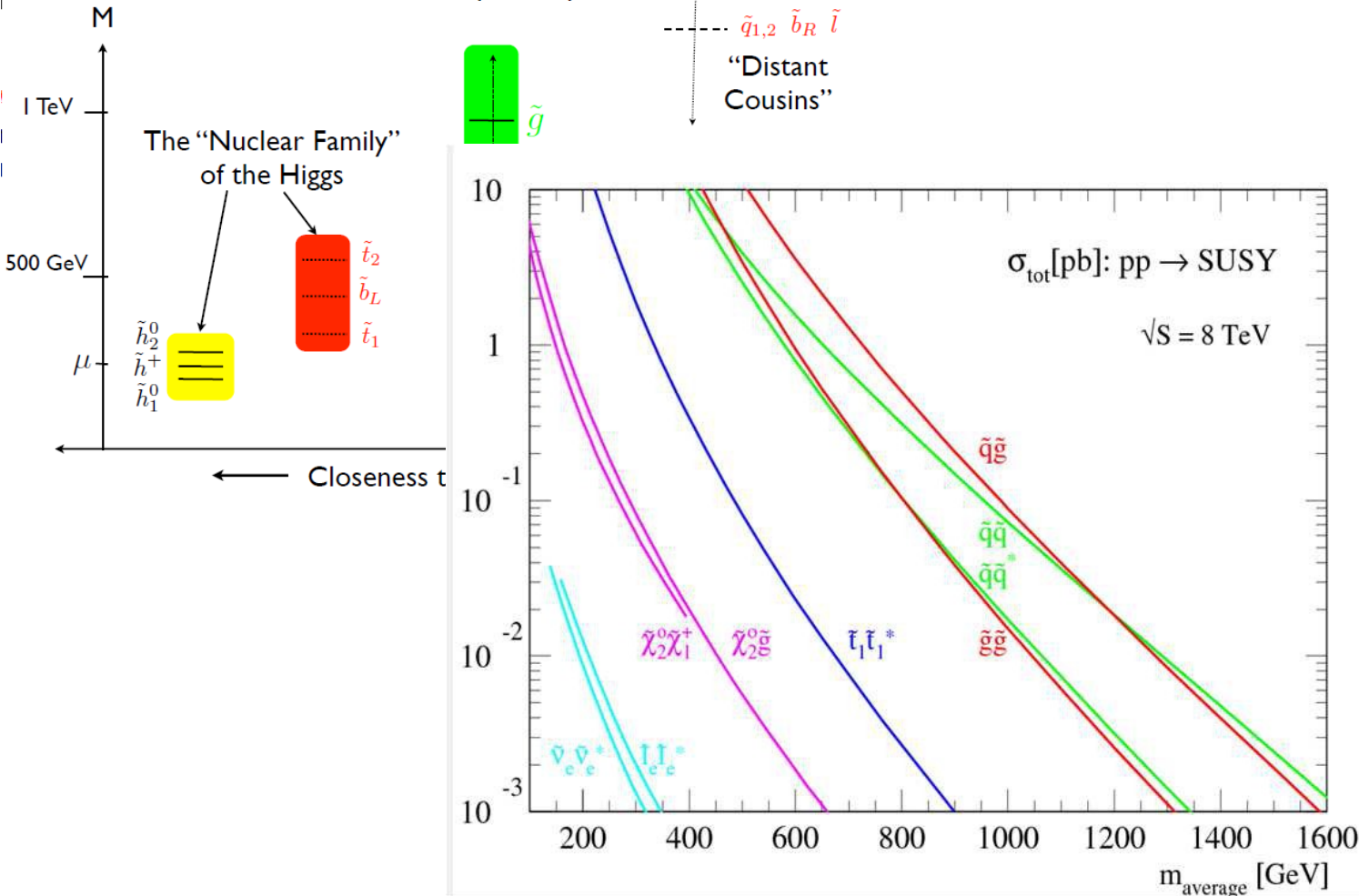


Supersymétrie

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

A Natural Spectrum

General "bottom-up" viewpoint

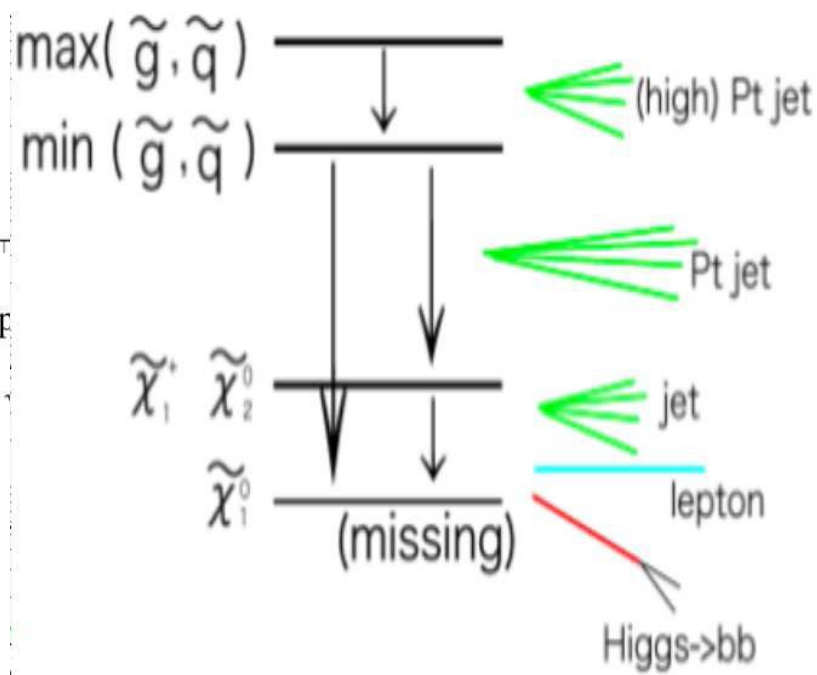
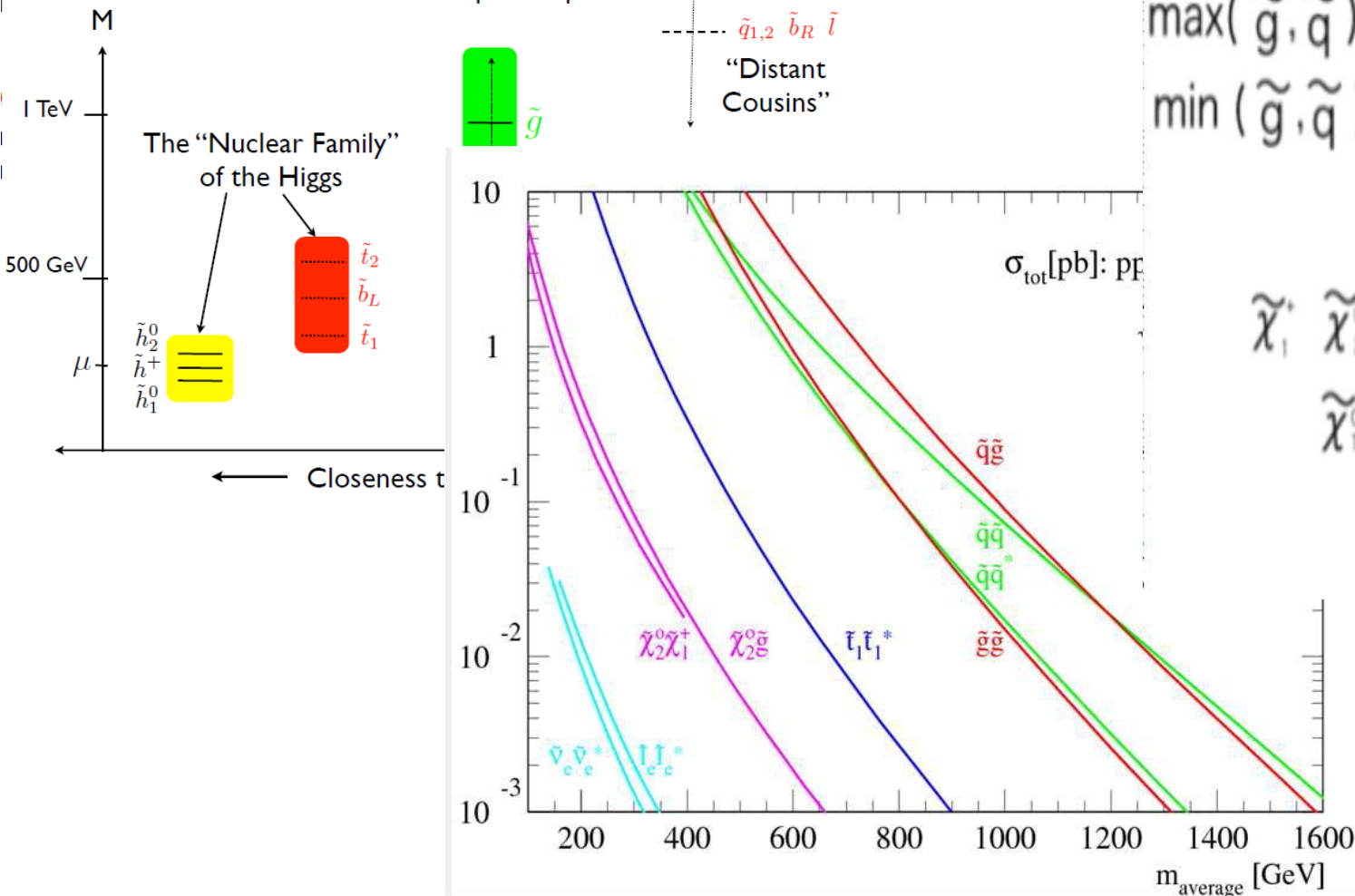


Supersymétrie

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

A Natural Spectrum

General "bottom-up" viewpoint

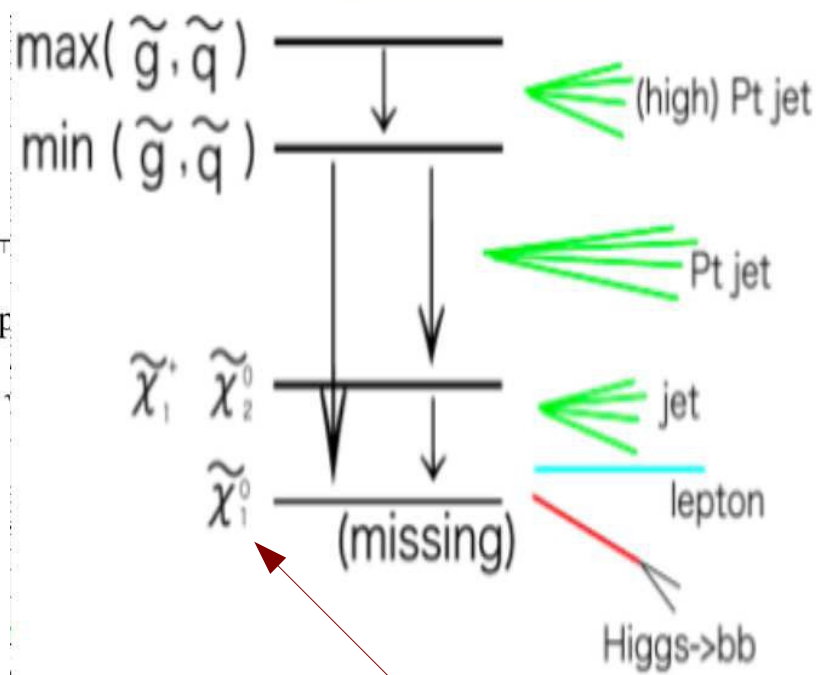
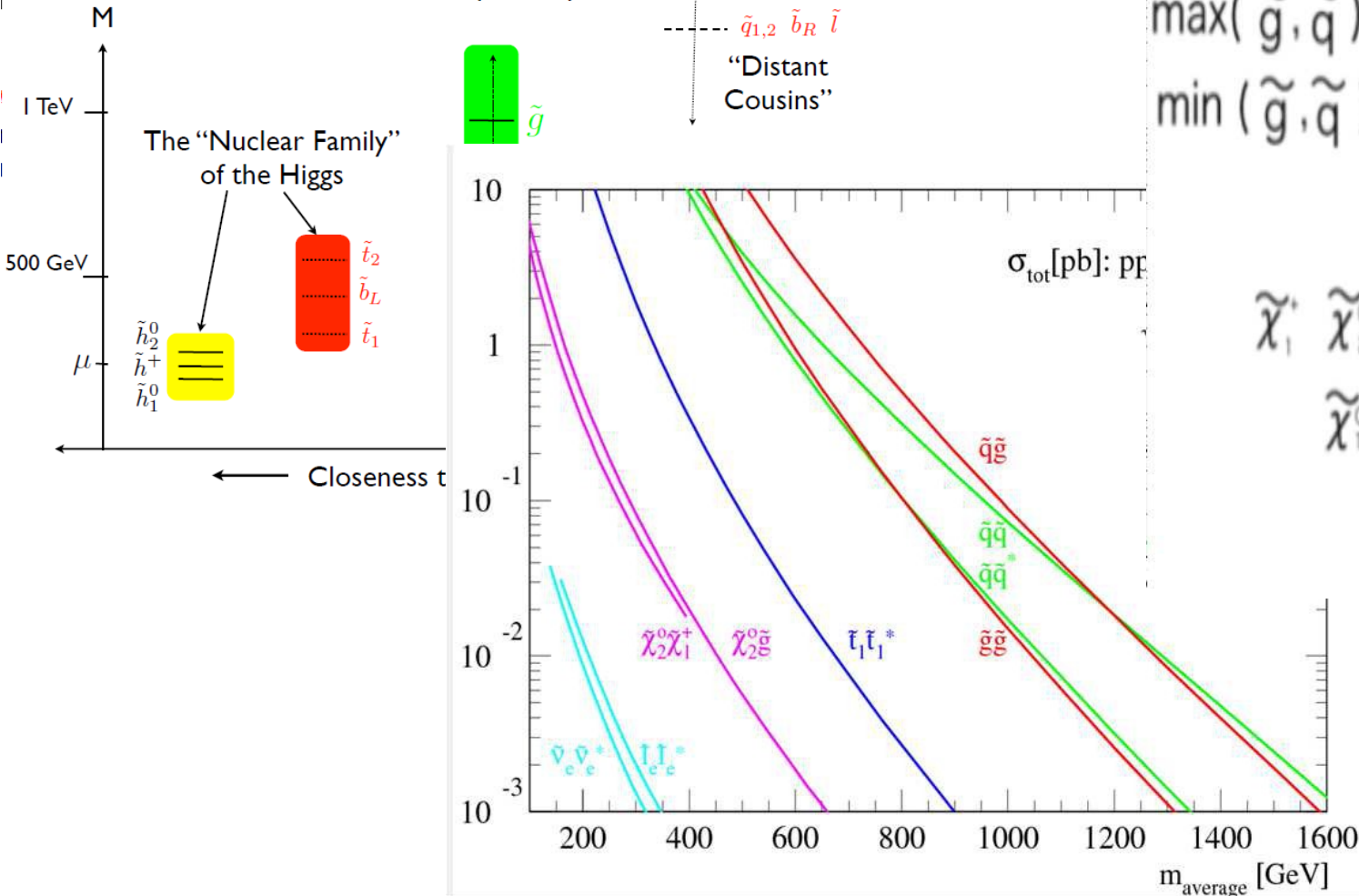


Supersymétrie

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

A Natural Spectrum

General "bottom-up" viewpoint



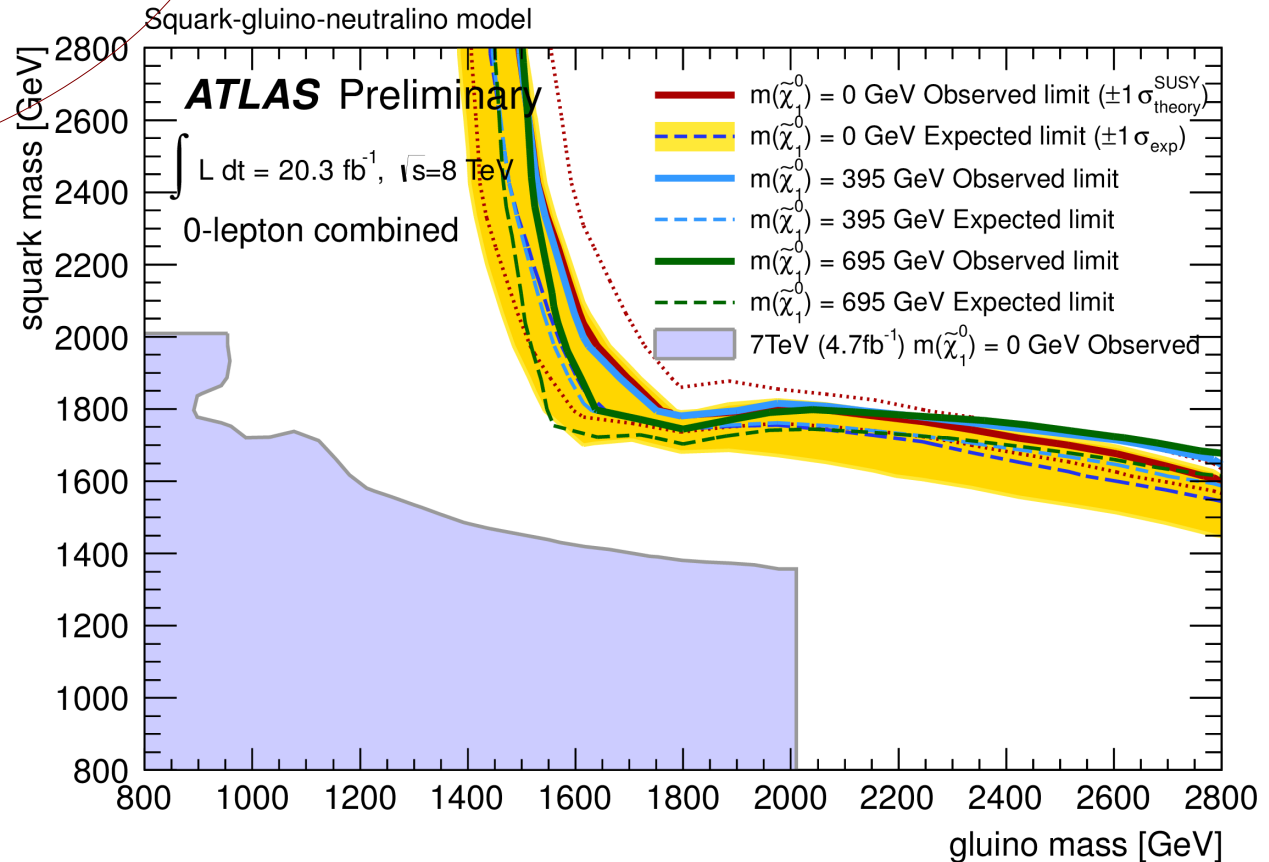
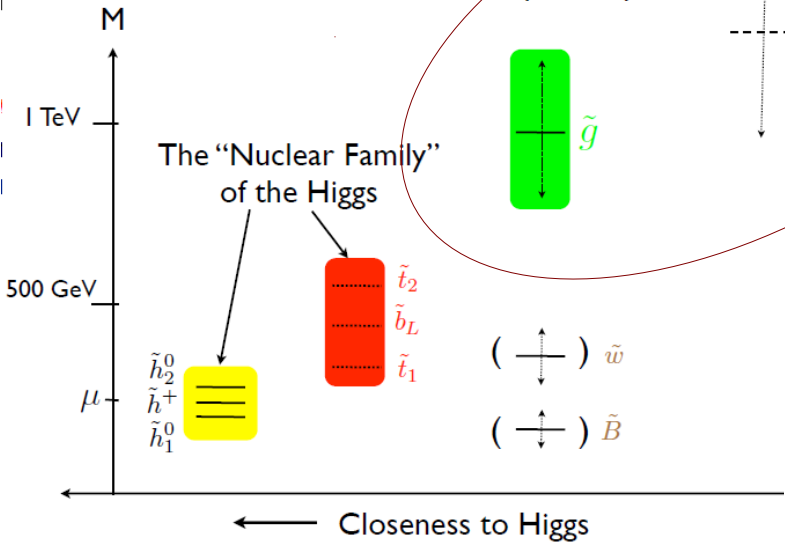
Candidat matière noire !

SUSY : 1^{ère} et 2^{ème} générations

- Dans des modèles simplifiés, aucune trace...
- Masse des gluinos > 1,5 TeV, masse des squarks > 1,7 TeV

A Natural Spectrum

General "bottom-up" viewpoint

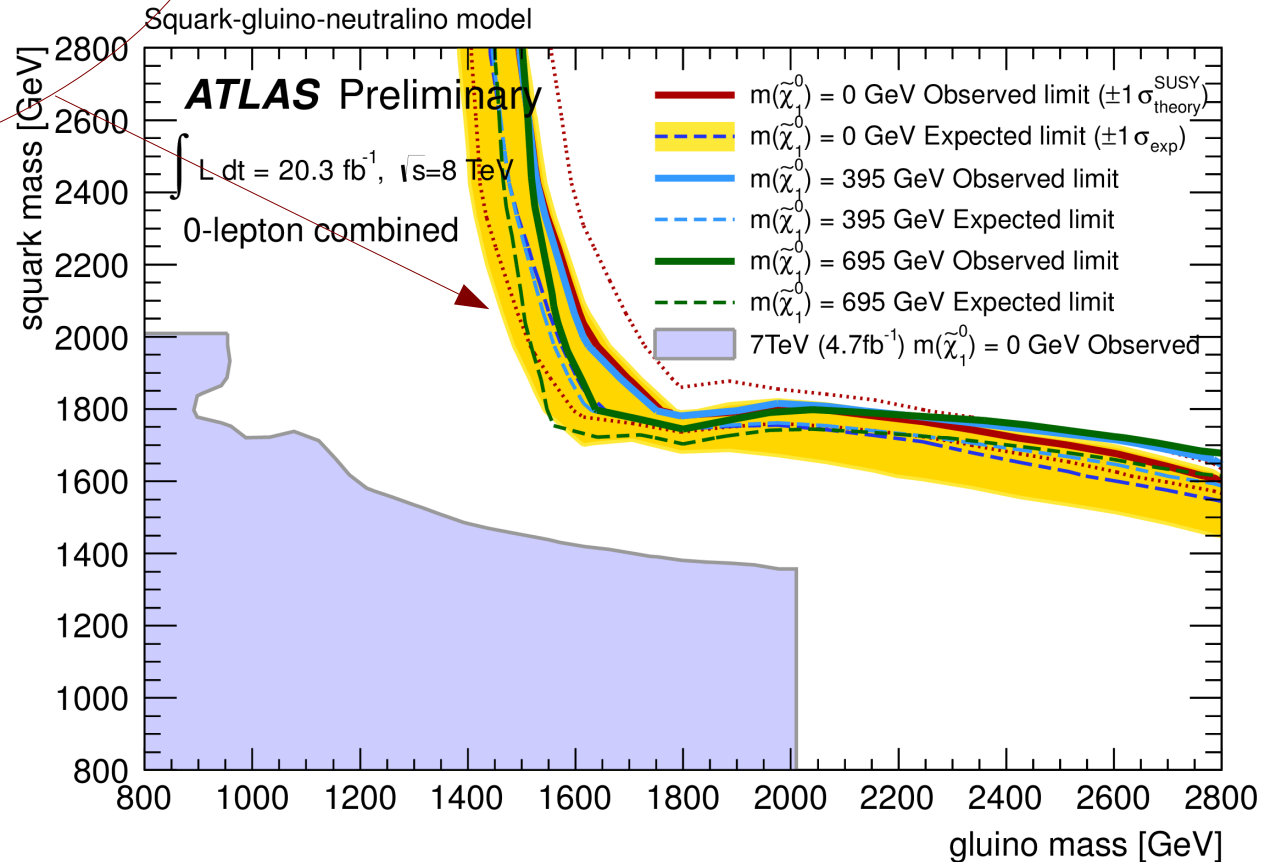
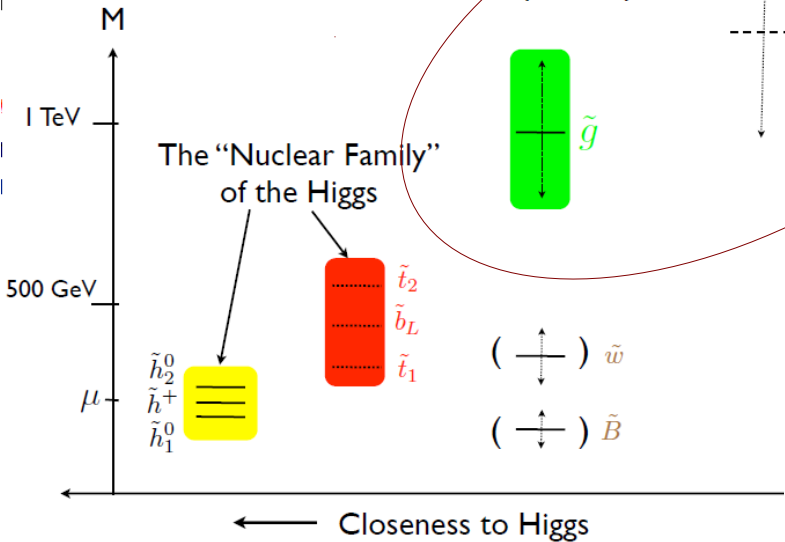


SUSY : 1^{ère} et 2^{ème} générations

- Dans des modèles simplifiés, aucune trace...
- Masse des gluinos > 1,5 TeV, masse des squarks > 1,7 TeV

A Natural Spectrum

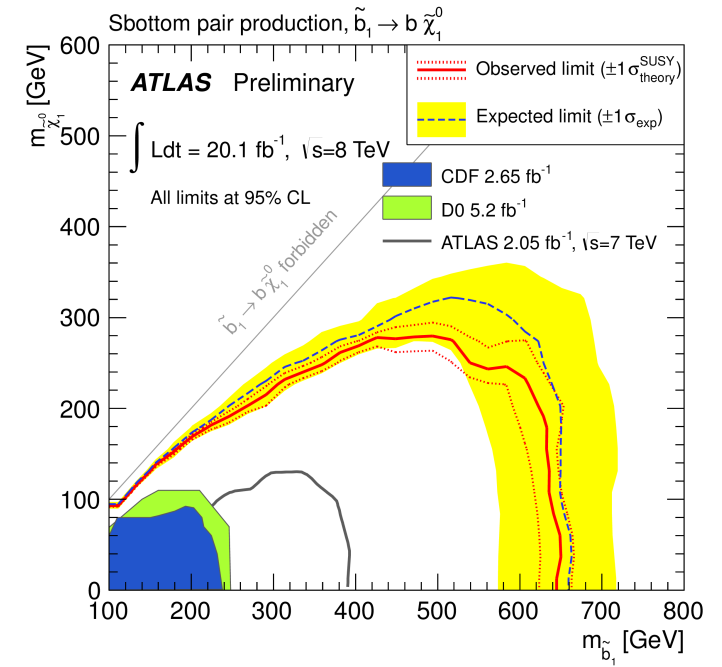
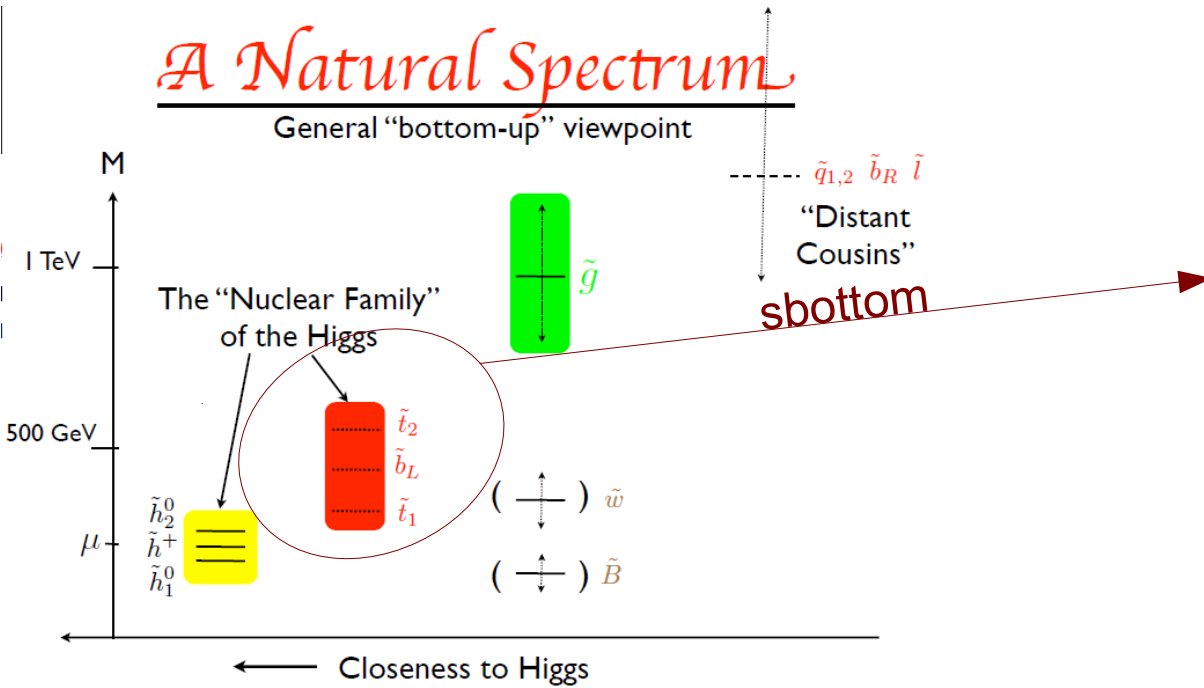
General "bottom-up" viewpoint



SUSY : 3^{ème} génération

A Natural Spectrum

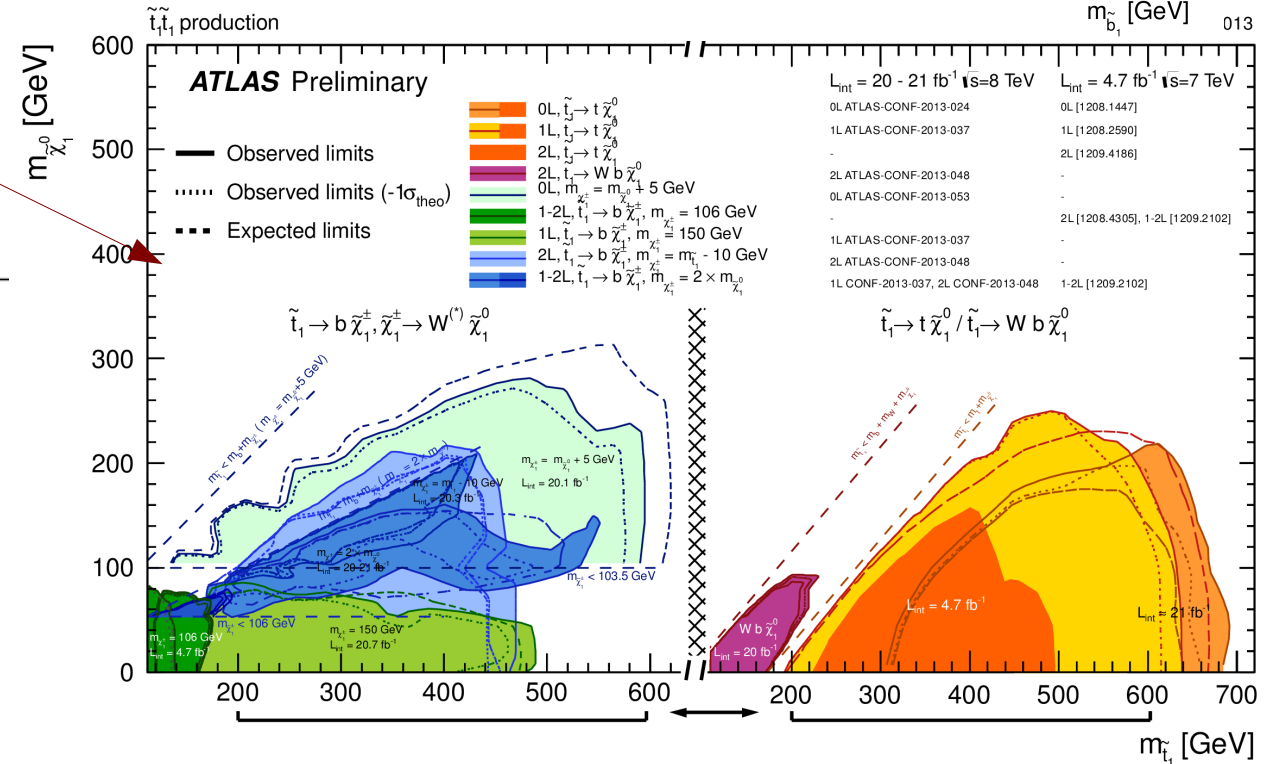
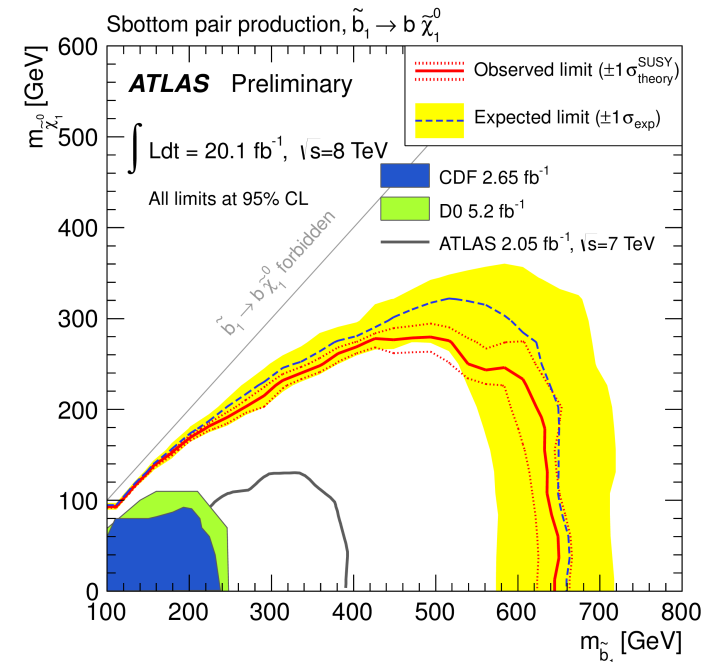
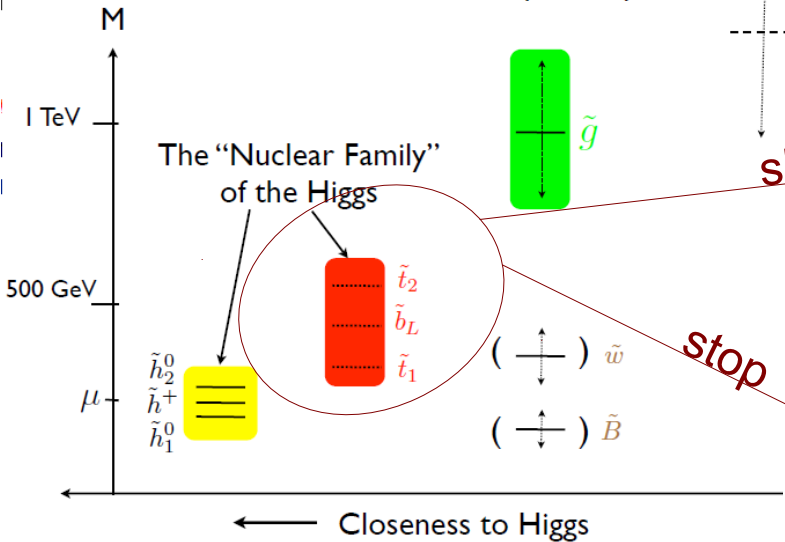
General "bottom-up" viewpoint



SUSY : 3^{ème} génération

A Natural Spectrum

General "bottom-up" viewpoint



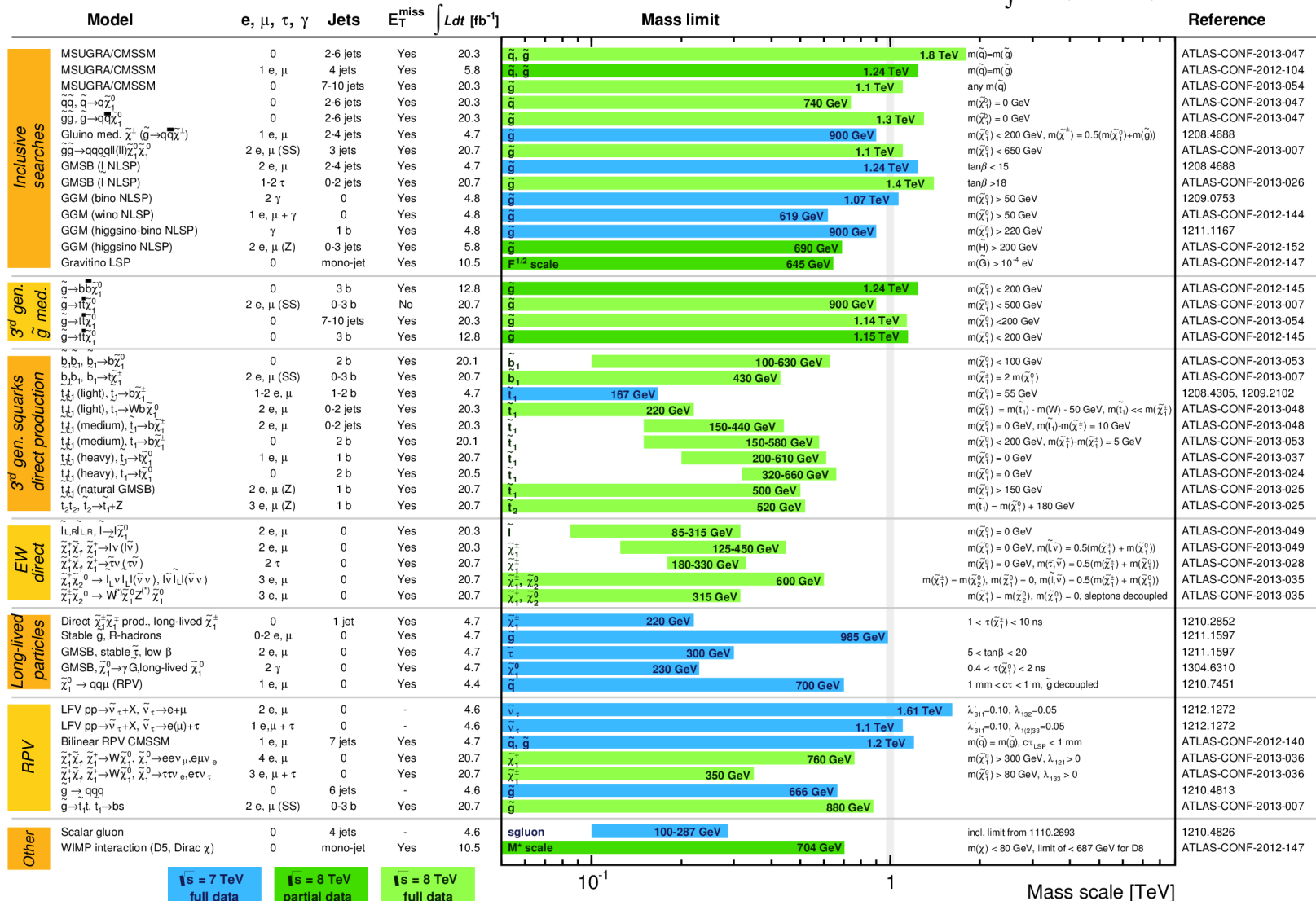
SUSY : état des lieux

ATLAS SUSY Searches* - 95% CL Lower Limits

Status: LHCP 2013

ATLAS Preliminary

$$\int L dt = (4.4 - 20.7) \text{ fb}^{-1} \quad \sqrt{s} = 7, 8 \text{ TeV}$$



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

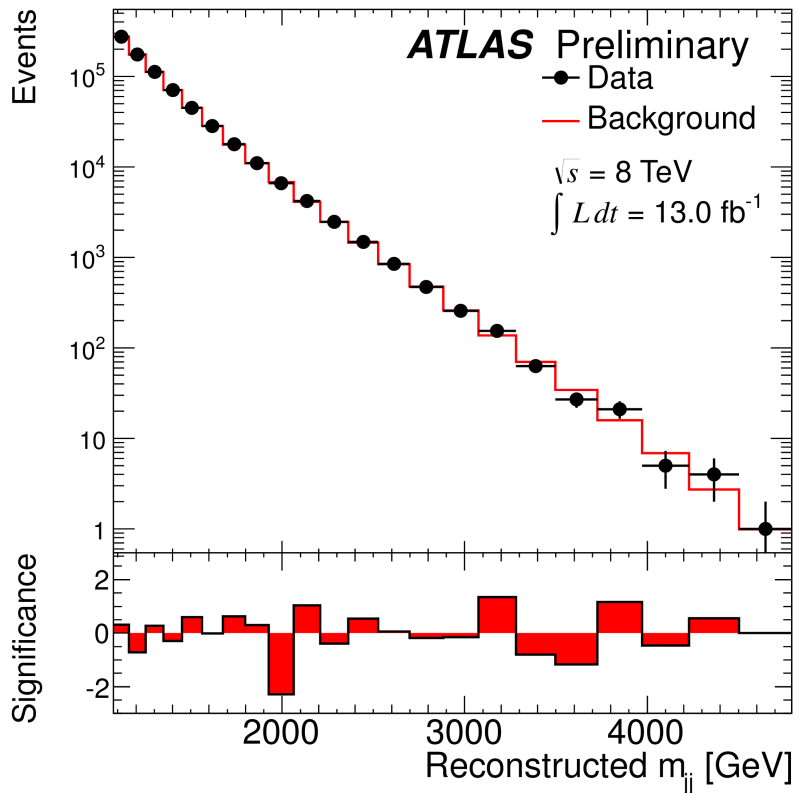
• On n'a rien trouvé, et pourtant on cherche !

Exotiques

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

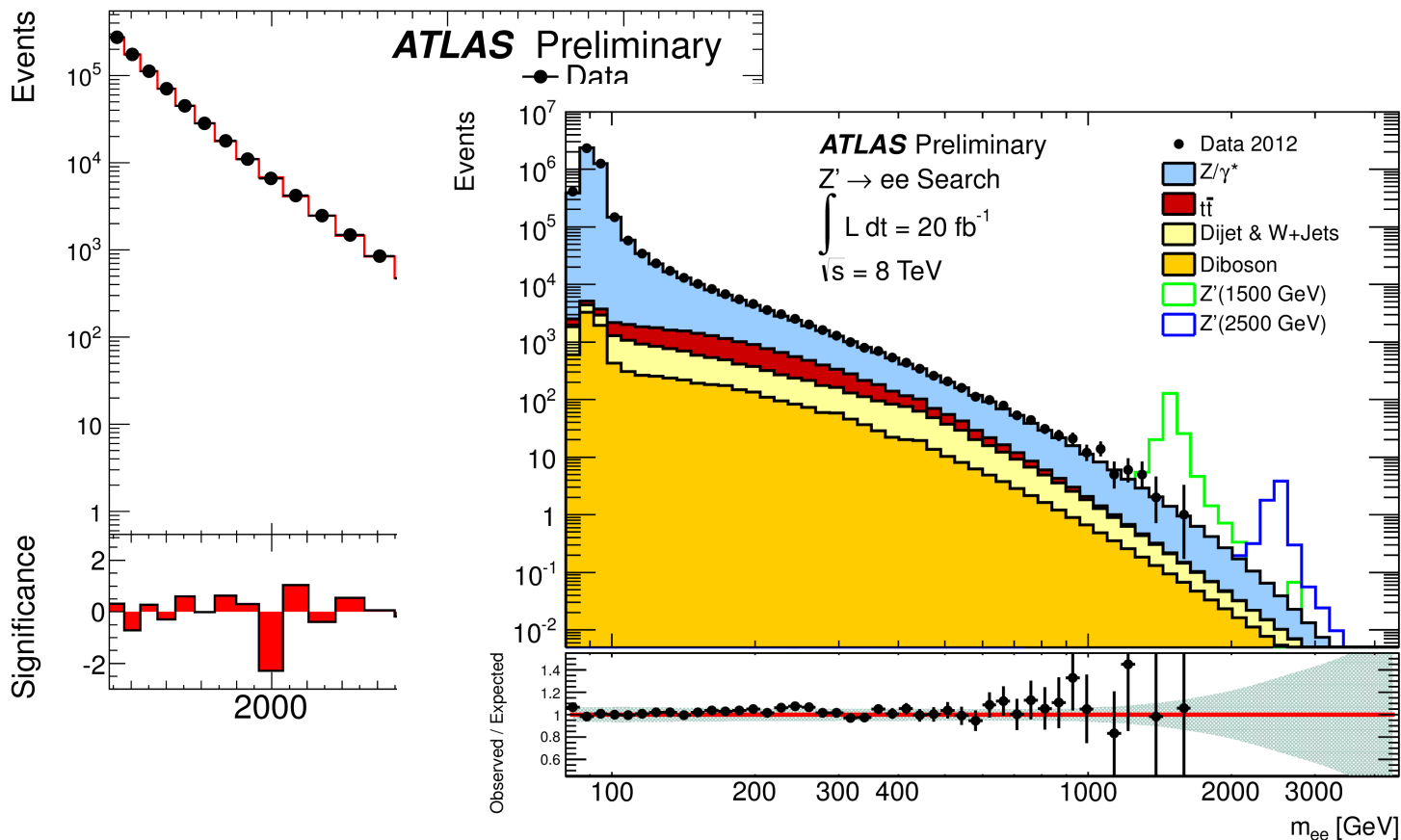
Exotiques

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



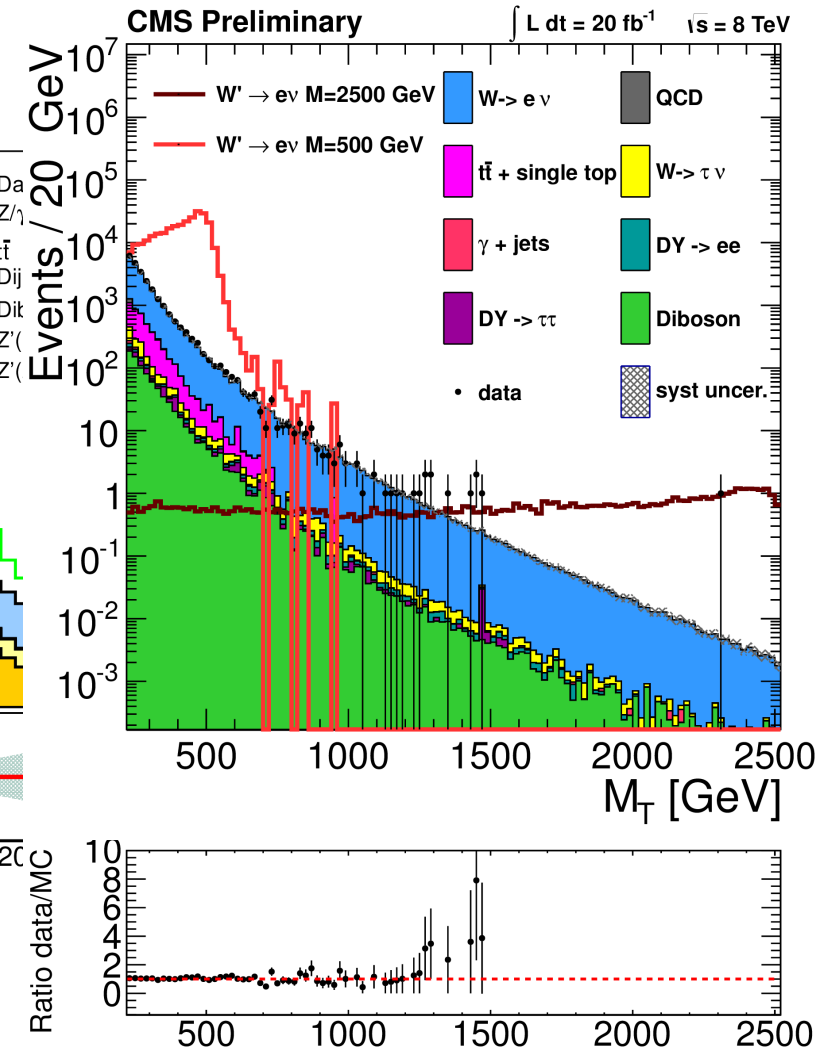
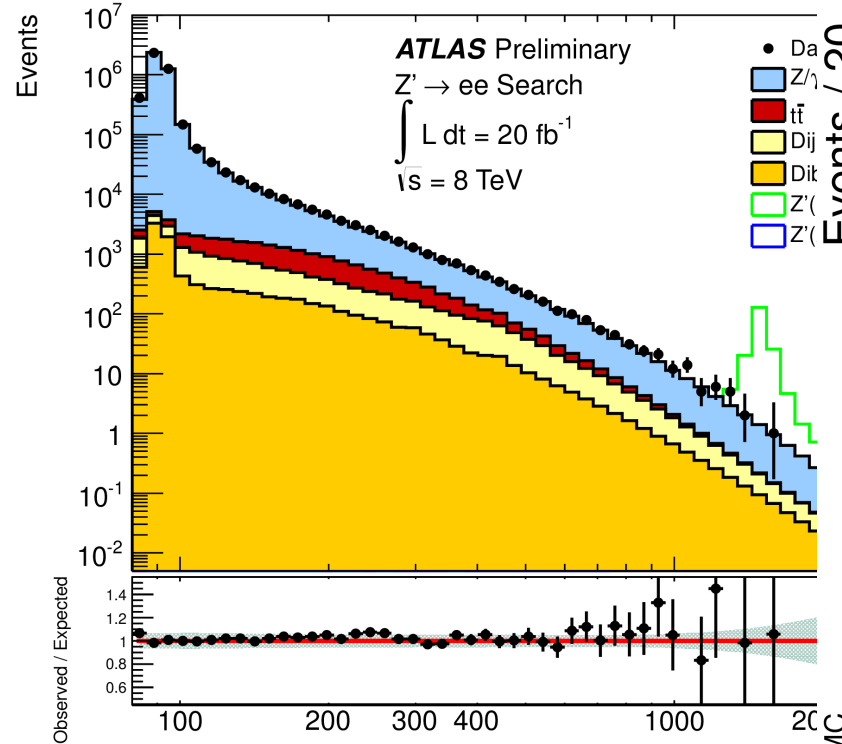
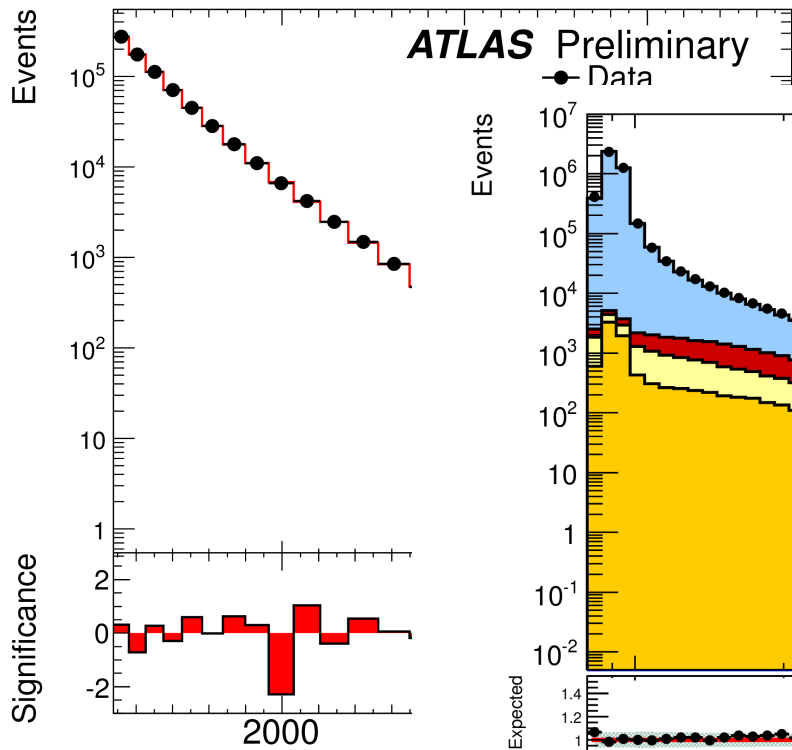
Exotiques

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

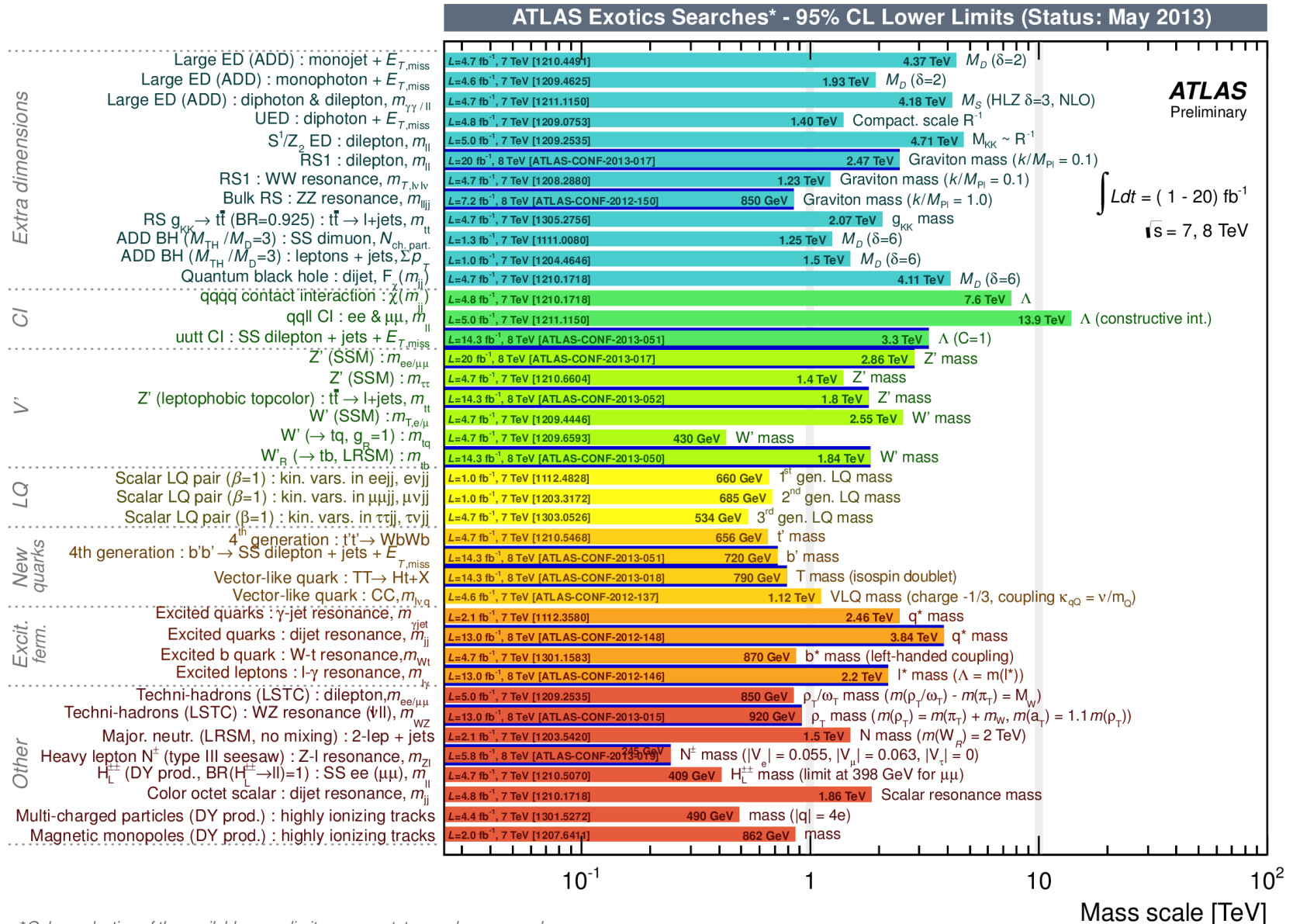


Exotiques

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



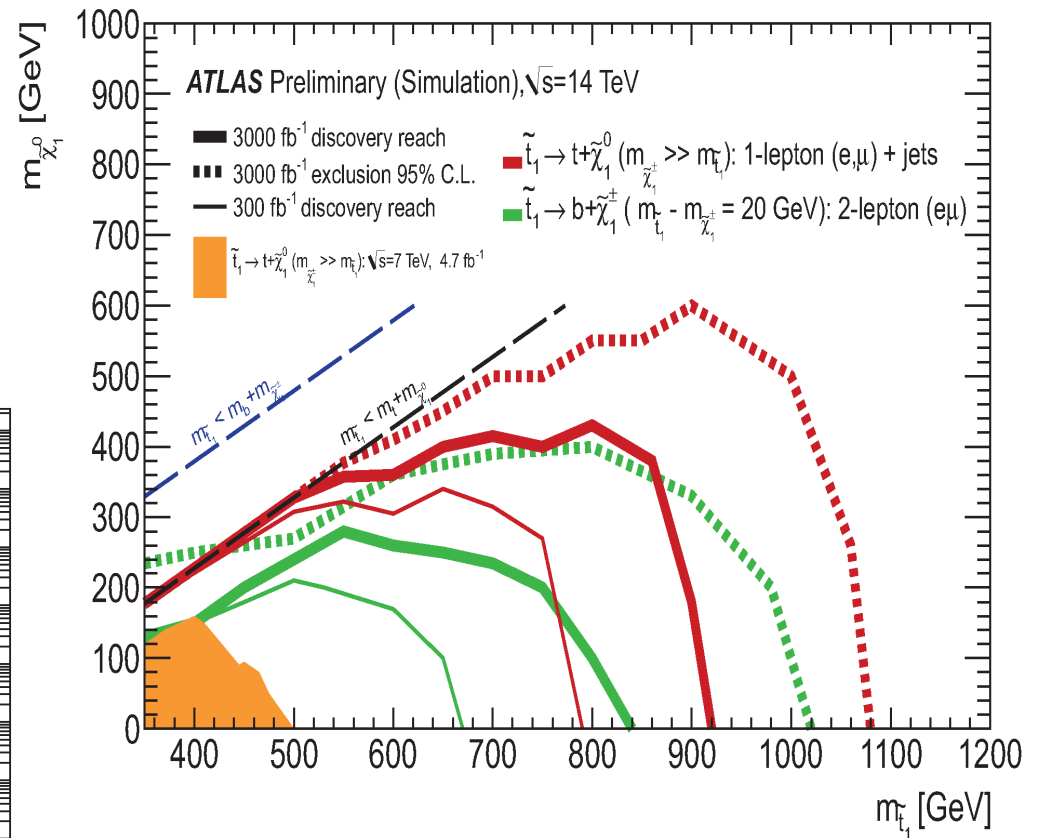
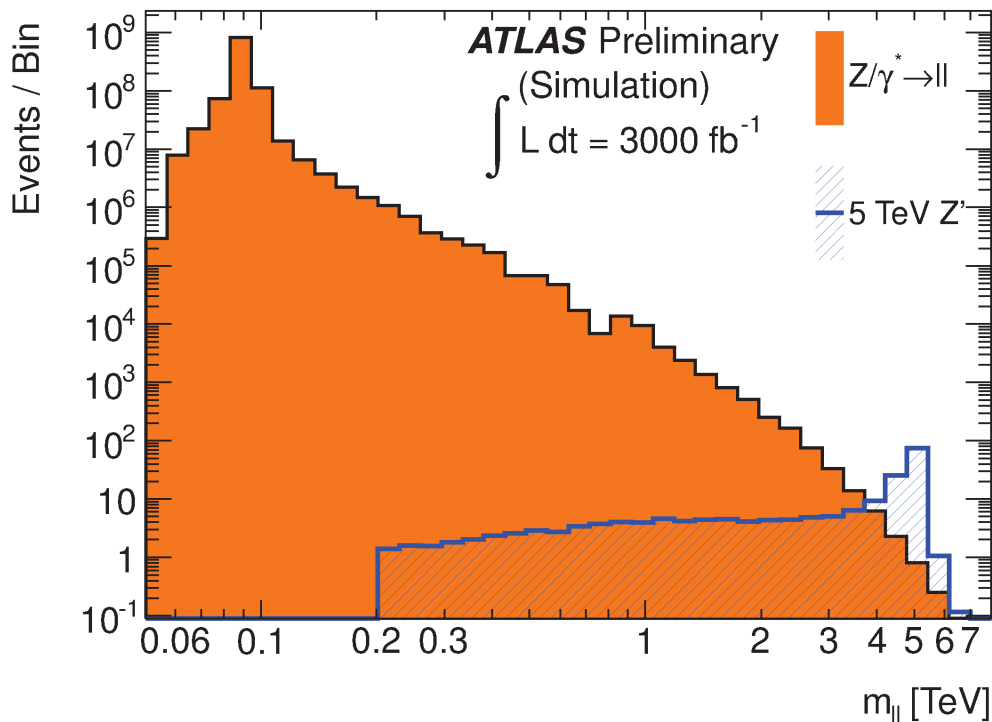
Exotiques : état des lieux



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

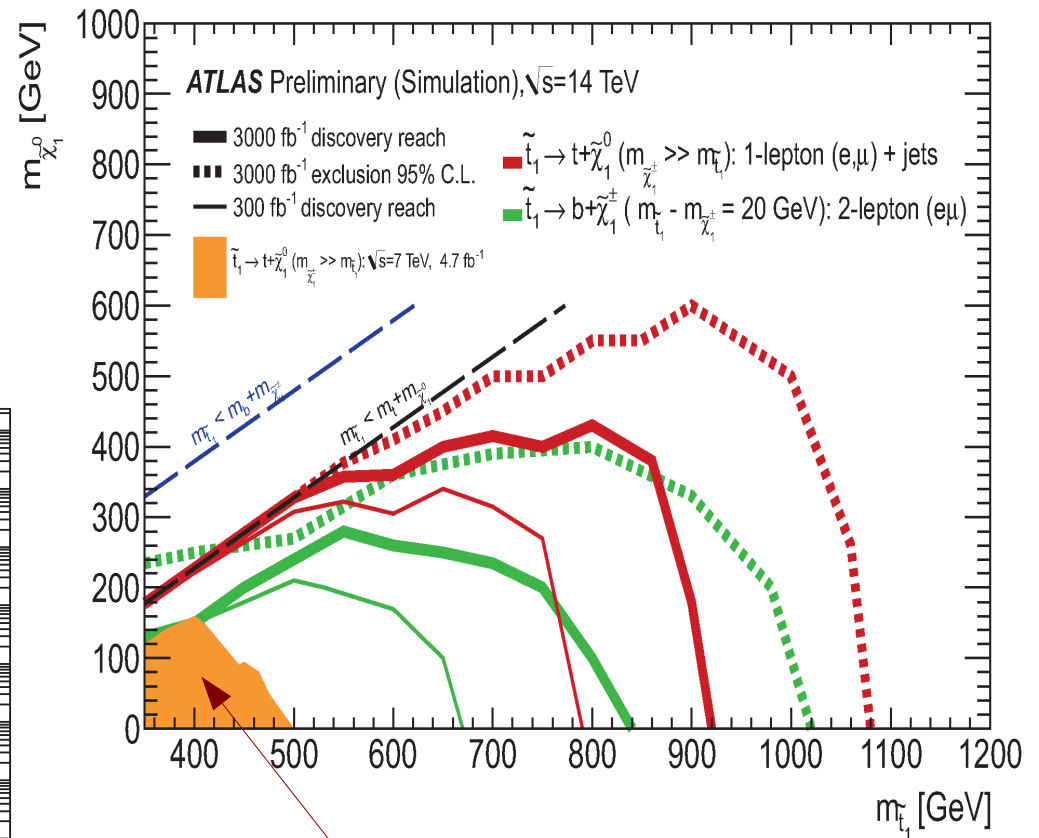
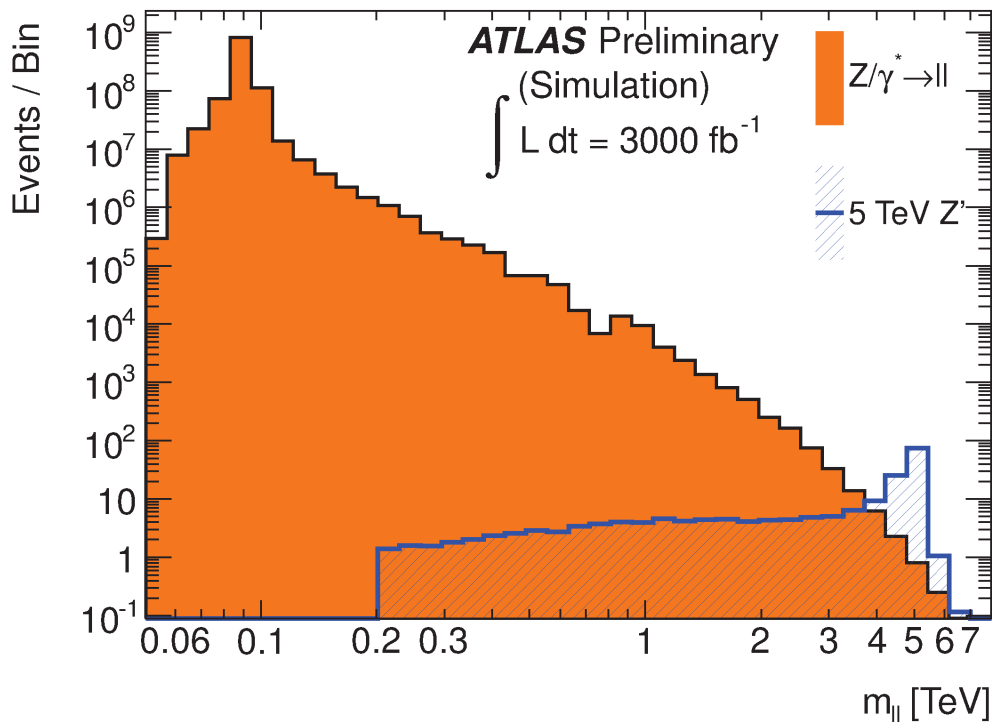
SUSY et exotiques : le futur

- Pour l'instant, 25 fb⁻¹ collectés
- On envisage 300 fb⁻¹ d'ici 2020
- puis 3000 fb⁻¹ pour 2030



SUSY et exotiques : le futur

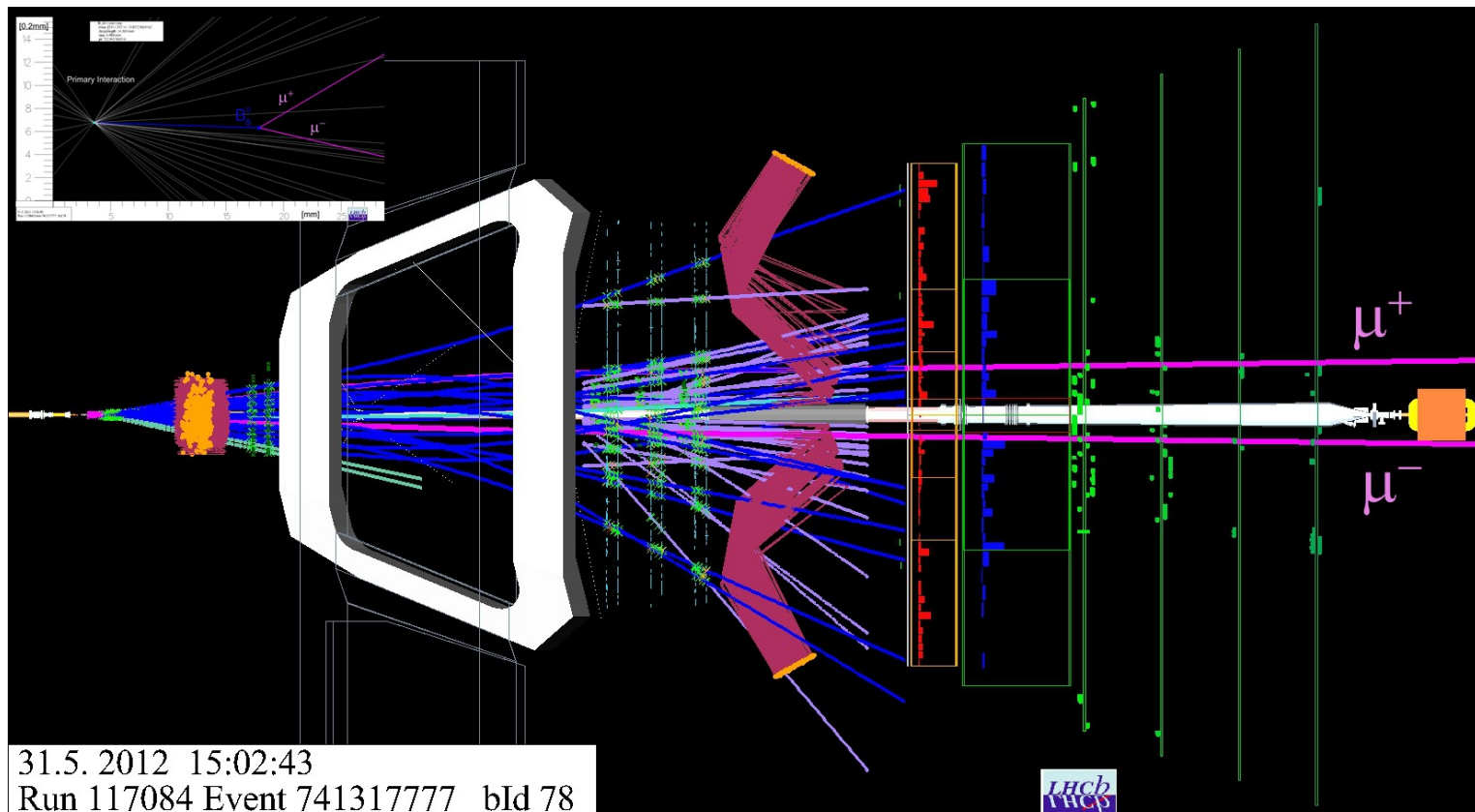
- Pour l'instant, 25 fb⁻¹ collectés
- On envisage 300 fb⁻¹ d'ici 2020
- puis 3000 fb⁻¹ pour 2030



Stop de tout à l'heure !

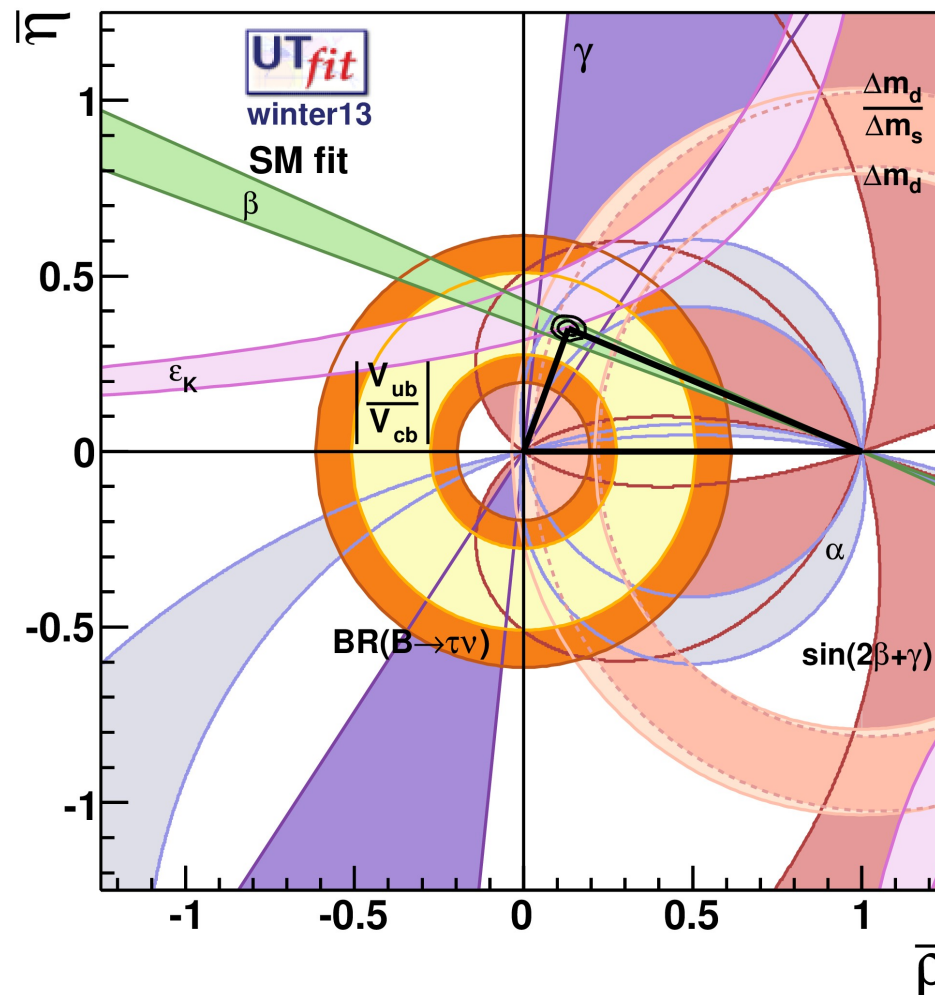
Nouvelle physique indirectement

- 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

- LHCb fait des mesures de précision
- Toutes les mesures sont compatibles avec les prédictions du modèle standard, comme d'hab...



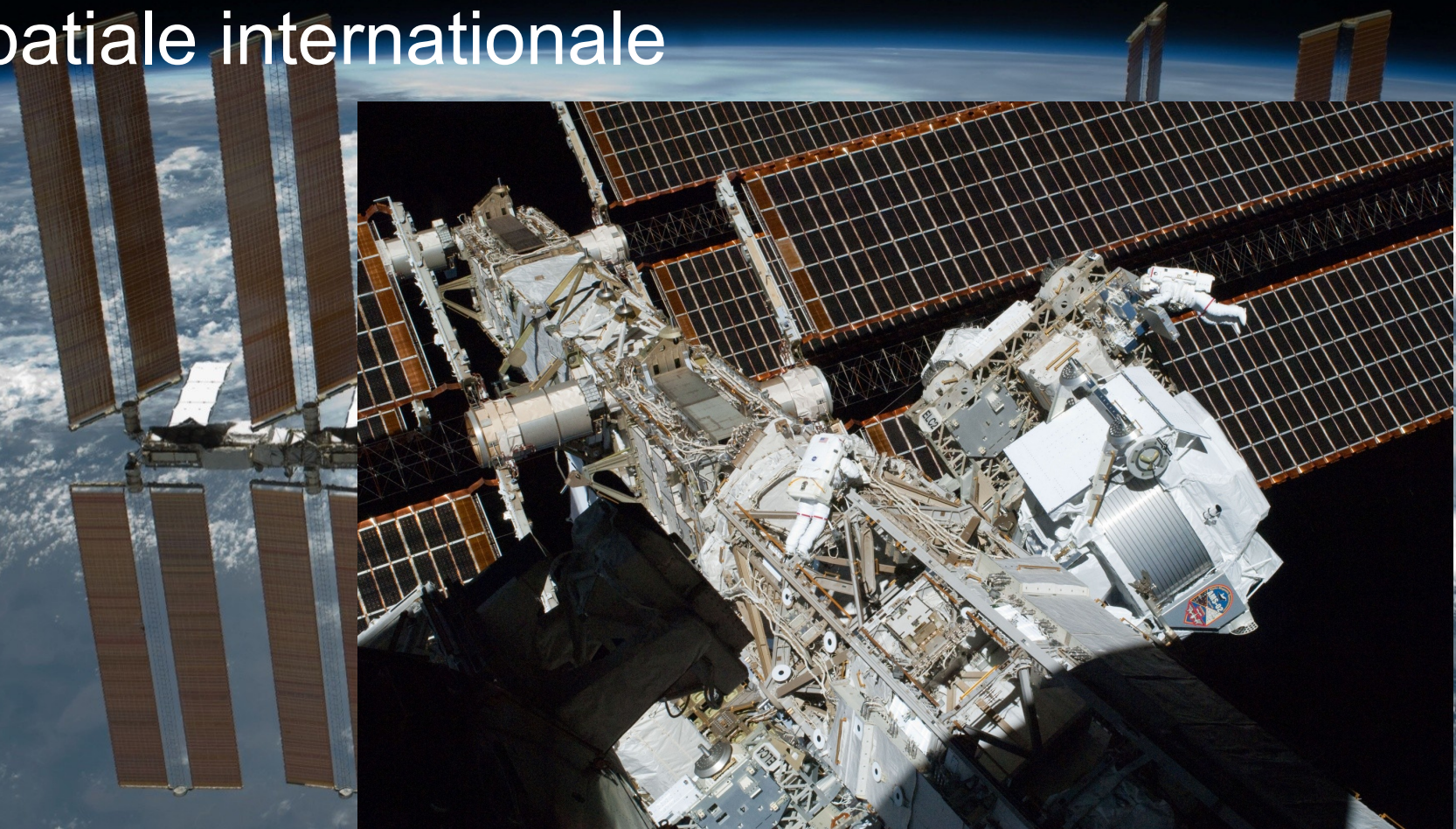
Asymétrie matière-antimatière dans l'espace : AMS

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



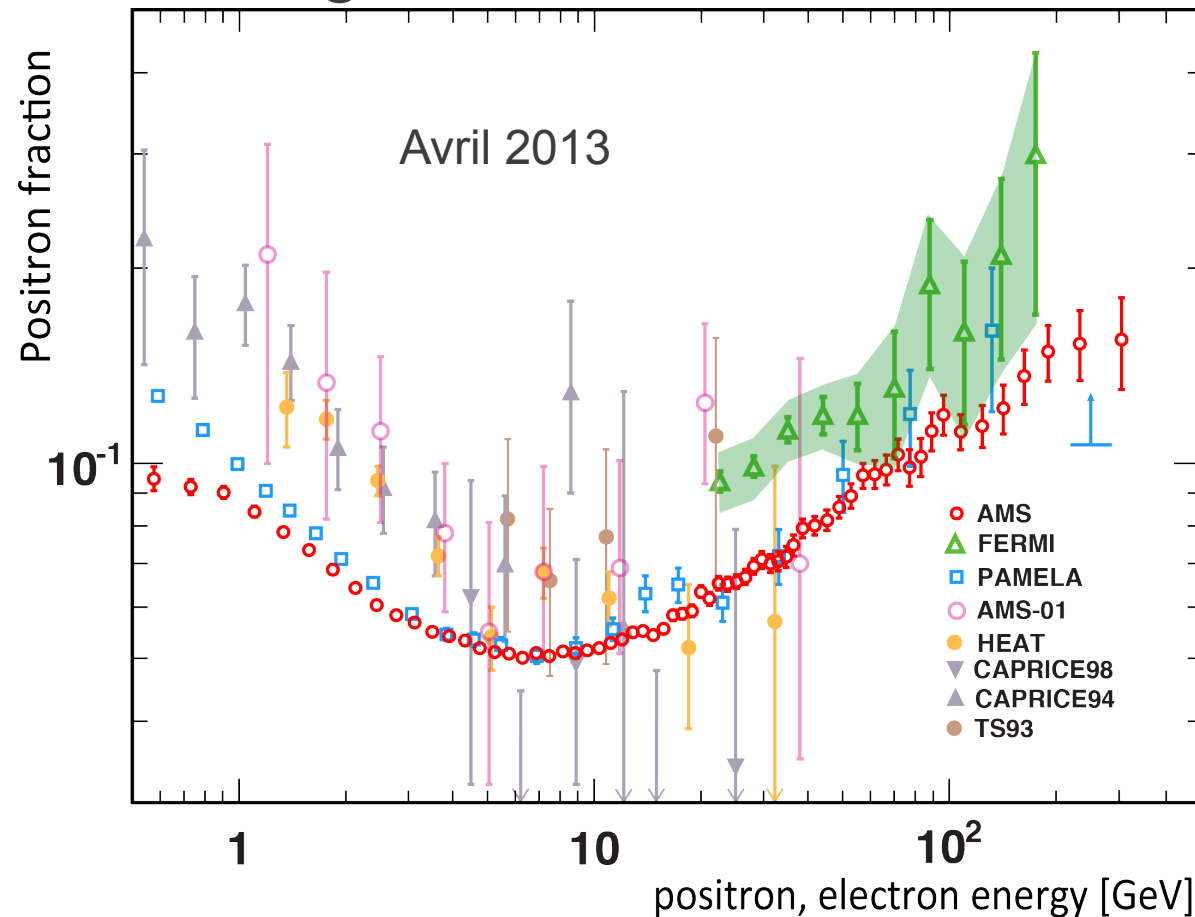
Asymétrie matière-antimatière dans l'espace : AMS

- 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
- Bientôt des résultats à plus haute énergie, susceptibles d'indiquer la désintégration de matière noire

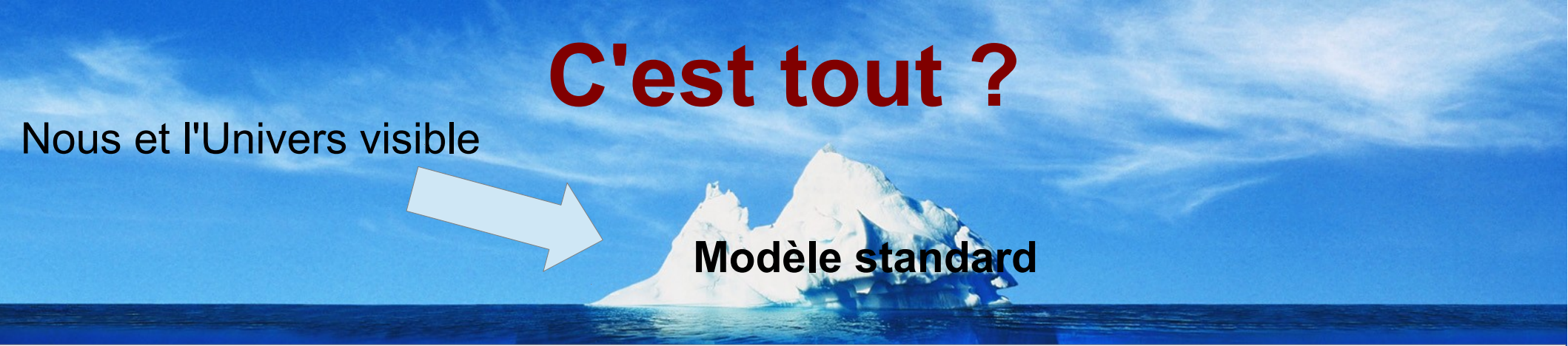


C'est tout ?

Nous et l'Univers visible



Modèle standard

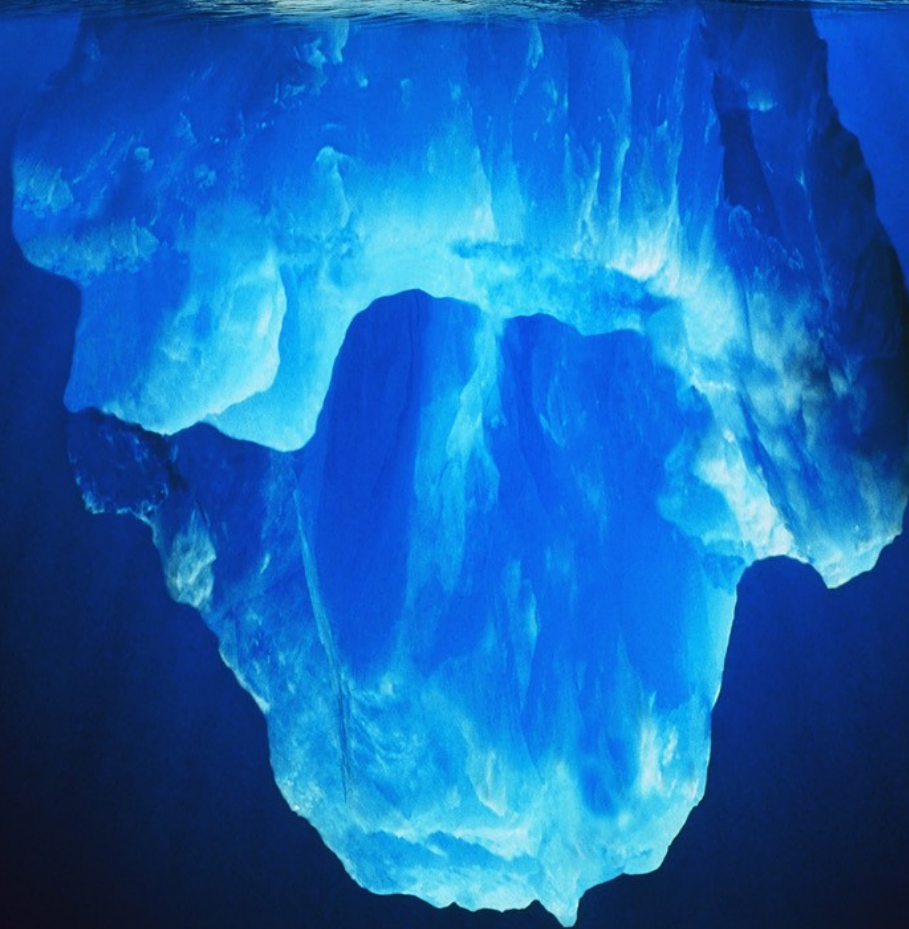


C'est tout ?

Nous et l'Univers visible



5% Modèle standard



C'est tout ?

Nous et l'Univers visible

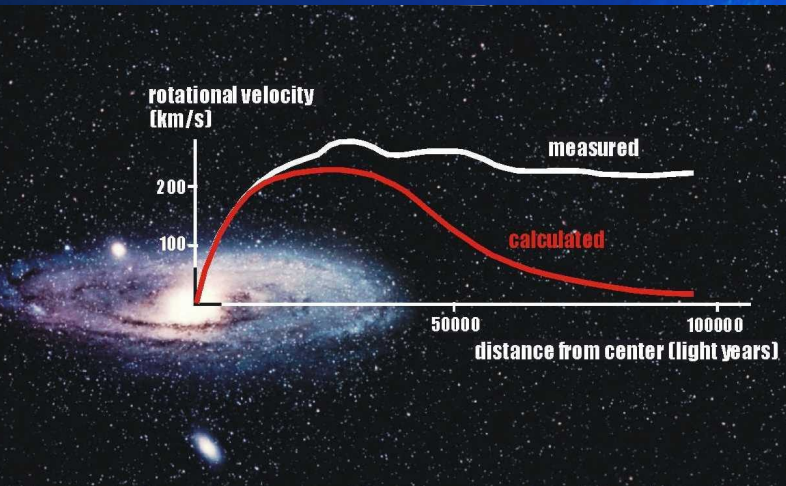


5% Modèle standard

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

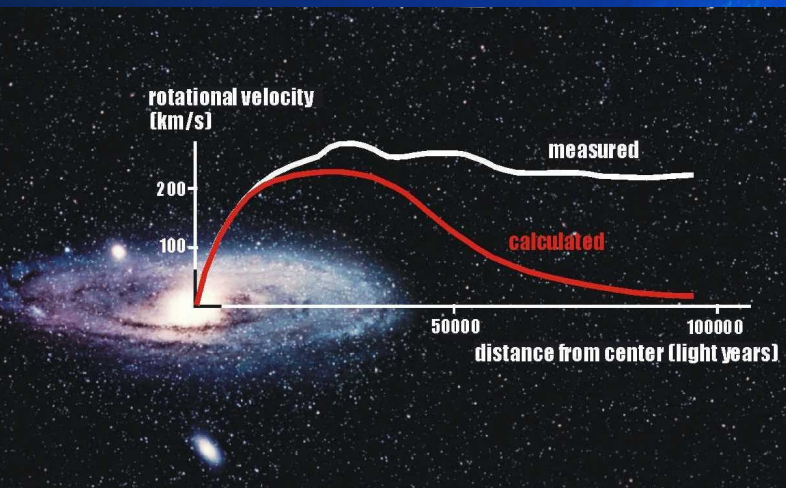


5% Modèle standard

27% Matière noire



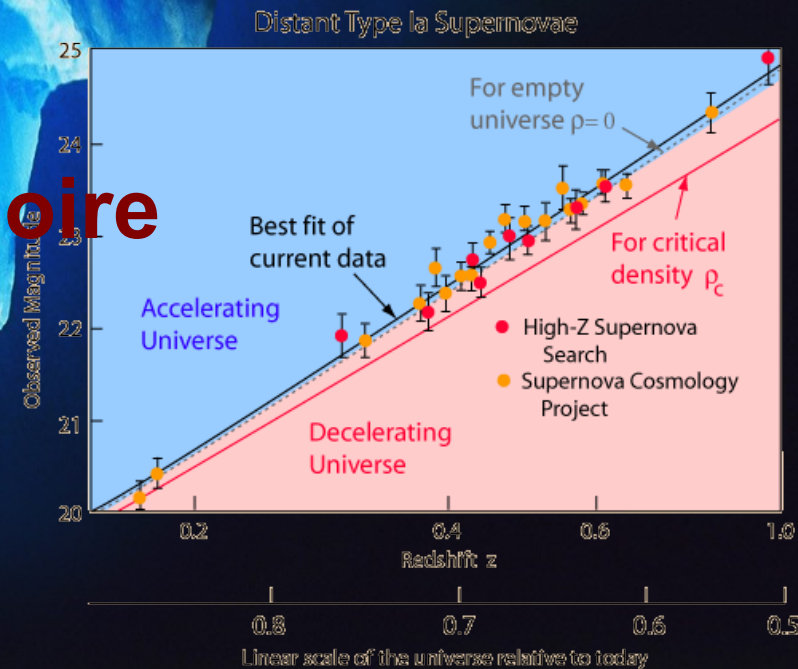
- On ne sait pas ce que c'est mais on croit savoir que c'est là
- Candidats observables au LHC (supersymétrie, ...) ?



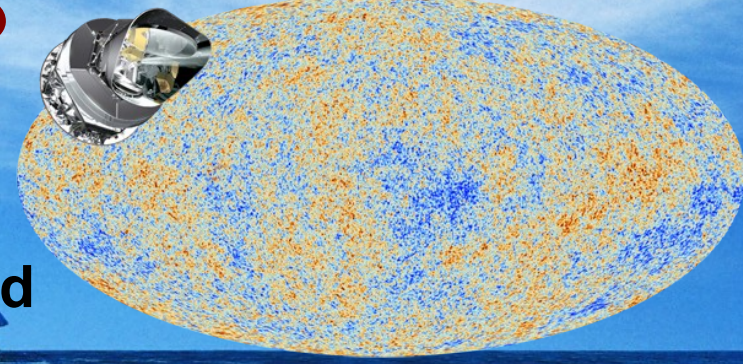
68% Énergie noire



Pas la moindre idée de son origine !



C'est tout ?



Nous et l'Univers visible

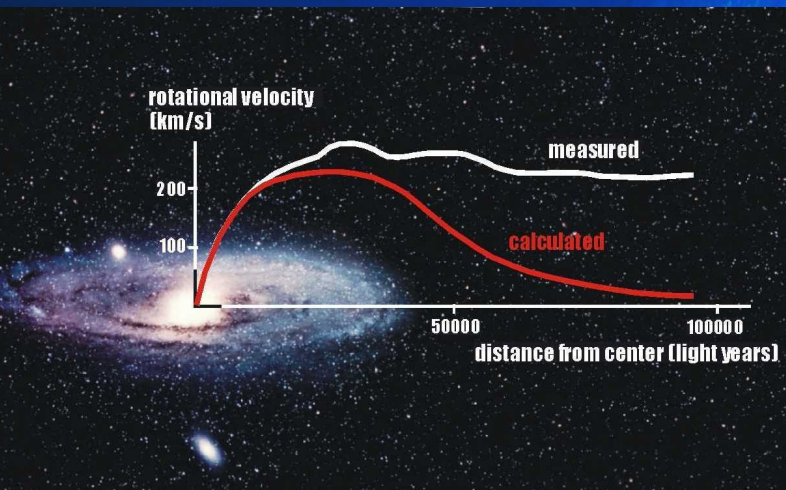


5% Modèle standard

27% Matière noire



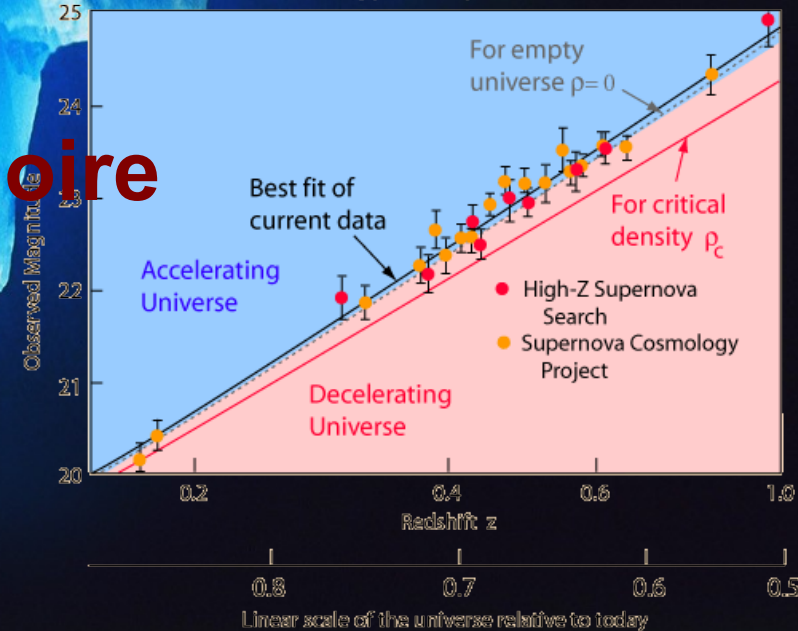
- On ne sait pas ce que c'est mais on croit savoir que c'est là
- Candidats observables au LHC (supersymétrie, ...) ?



68% Énergie noire



Distant Type Ia Supernovae



Pas la moindre idée de son origine !

Lien entre l'infiniment grand et l'infiniment petit

A Cosmic Microwave Background (CMB) fluctuation map showing temperature variations across the sky. The map is overlaid with a network of colored lines (red, orange, yellow, green, blue) that represent particle tracks or paths. The tracks are most concentrated in the central region and spread out towards the edges. The background is a dark blue with lighter blue and white spots representing fluctuations in the CMB. The map is framed by a white border with small rectangular markers.

Lien entre le boson de Higgs et l'inflation de l'Univers ?

Lien entre l'infiniment grand et l'infiniment petit



Au LHC :

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

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