

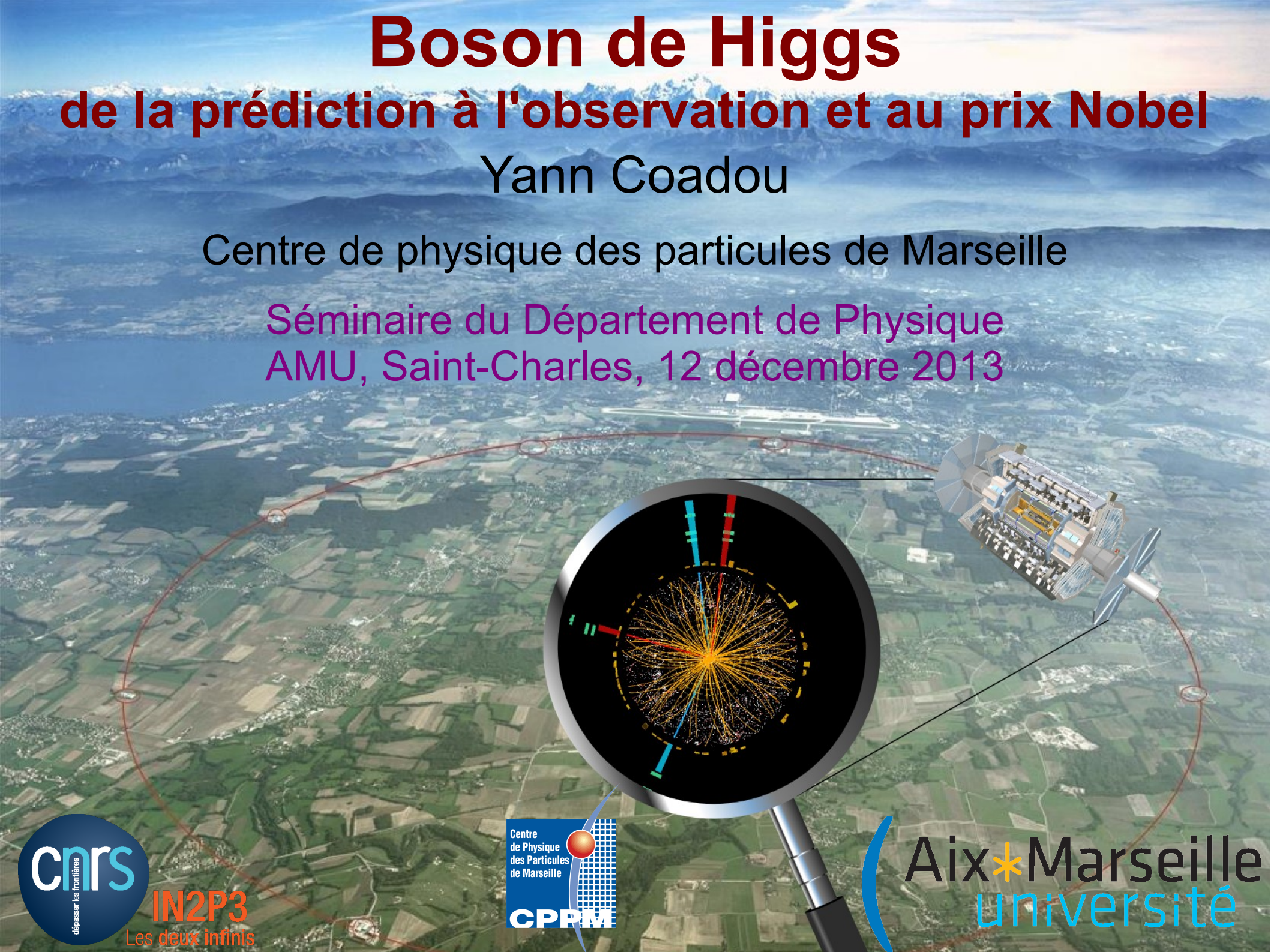
# Boson de Higgs

## de la prédiction à l'observation et au prix Nobel

Yann Coadou

Centre de physique des particules de Marseille

Séminaire du Département de Physique  
AMU, Saint-Charles, 12 décembre 2013



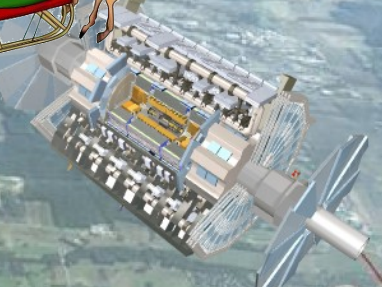
# Boson de Higgs

de la prédiction à l'observation et au prix Nobel

Yann Coadou

Centre de physique des particules de Marseille

Séminaire du Département de Physique  
AMU, Saint-Charles, 12 décembre 2013



# Boson de Higgs

de la prédiction à l'observation et au prix Nobel

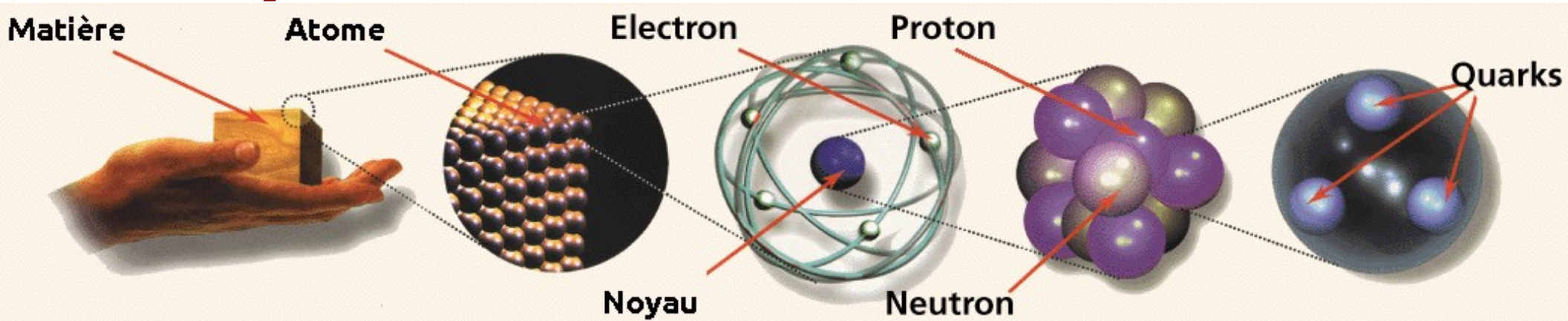
Yann Coadou

Centre de physique des particules de Marseille

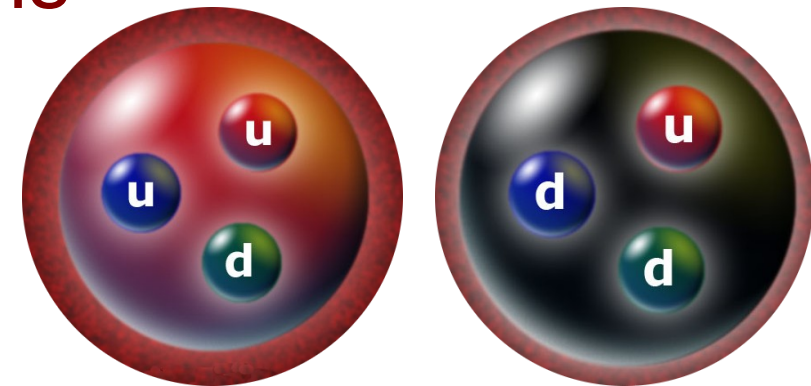
Séminaire du Département de Physique  
AMU, Saint-Charles, 12 décembre 2013



# De quoi est fait l'Univers visible ?



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



# Le positron

- Équation du mouvement d'un électron (Dirac 1928)
  - ▶ mécanique quantique
  - ▶ cas relativiste
  - ▶ équation de Dirac avec 2 solutions
    - électron
    - positron
- Observation (Anderson 1932)
  - ▶ naissance de l'anti-matière
  - ▶ positron = anti-électron
- Généralisation : à chaque particule correspond une anti-particule :
  - ▶ de même masse
  - ▶ de même *spin* (moment angulaire interne)
  - ▶ de charge(s) opposée(s)
- L'anti-matière se comporte comme la matière (vue dans un miroir)
  - ▶ mais pas exactement
    - il existe une petite asymétrie
    - sujet d'étude très actif

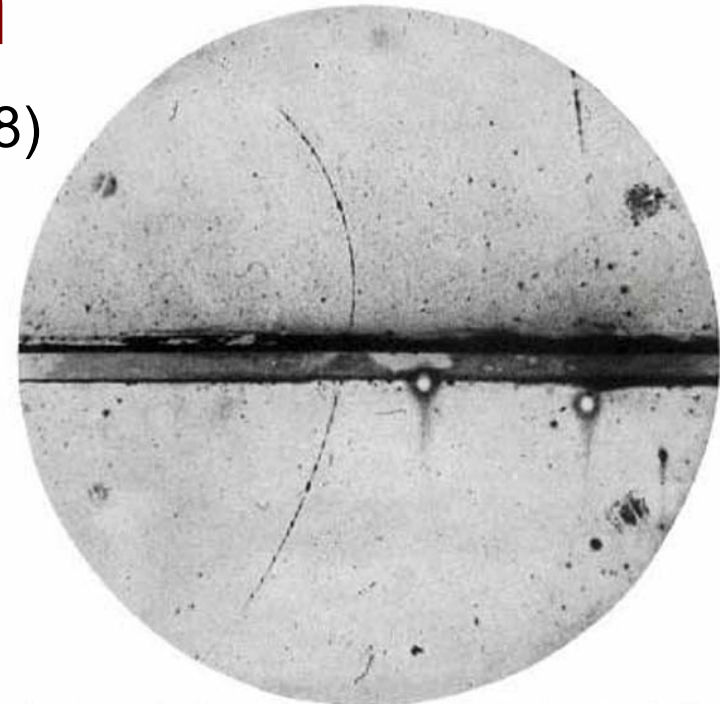
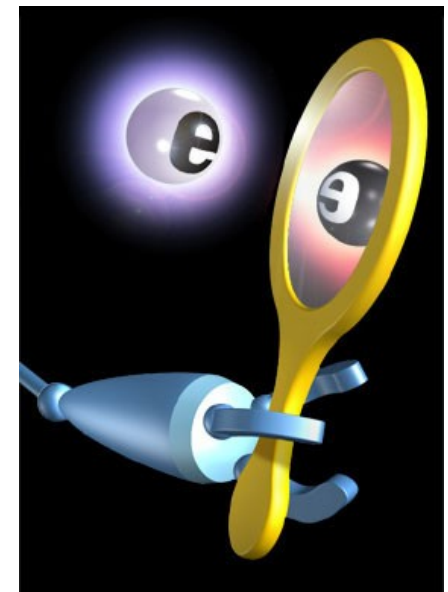
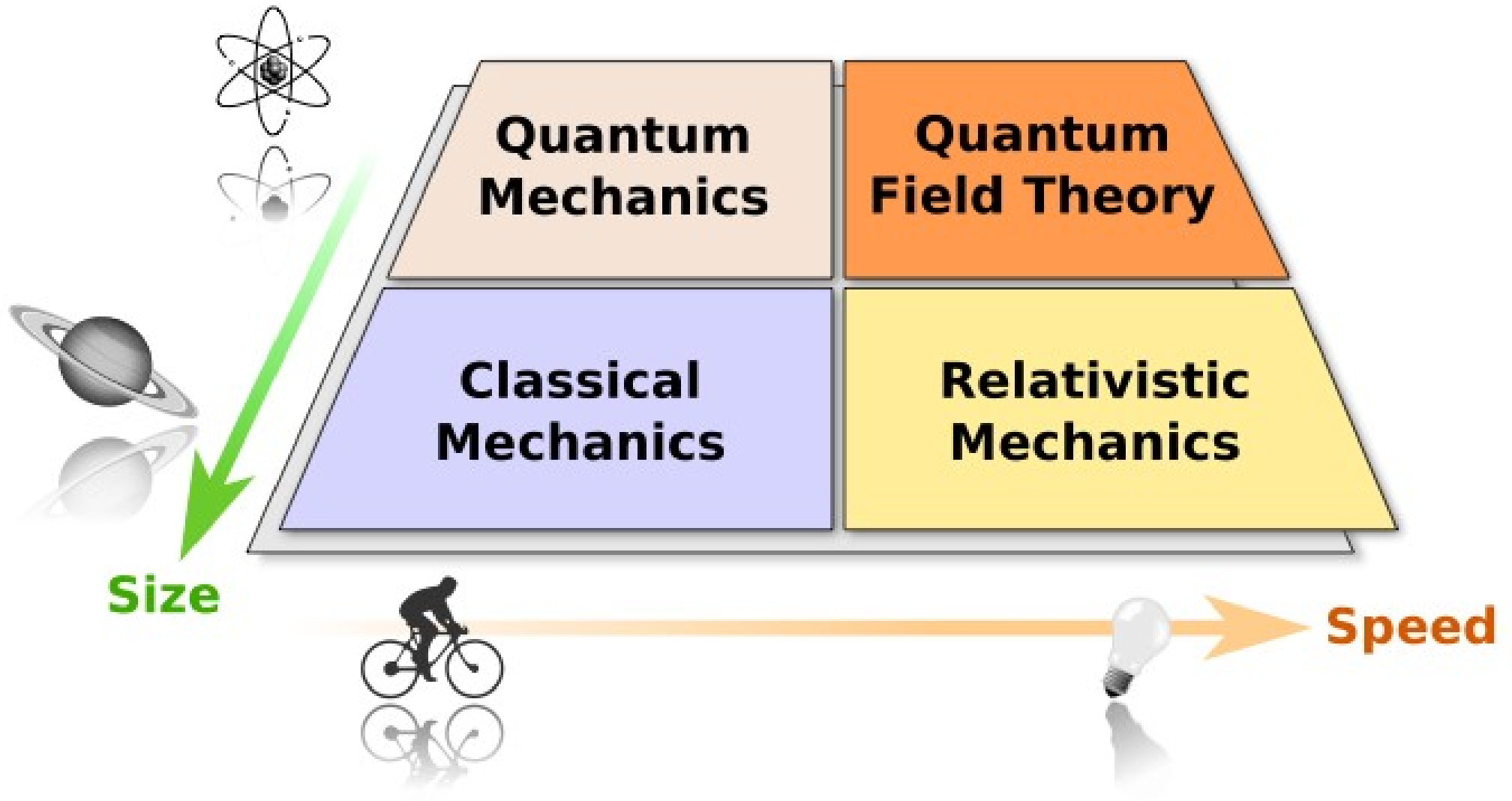


FIG. 1. A 65 million volt positron ( $H_0=2.1 \times 10^6$  gauss-cm) passing through a 6 mm lead plate and emerging as a 23 million volt positron ( $H_0=7.5 \times 10^4$  gauss-cm). The length of this latter path is at least ten times greater than the possible length of a proton path of this curvature.



# Mécanique quantique relativiste



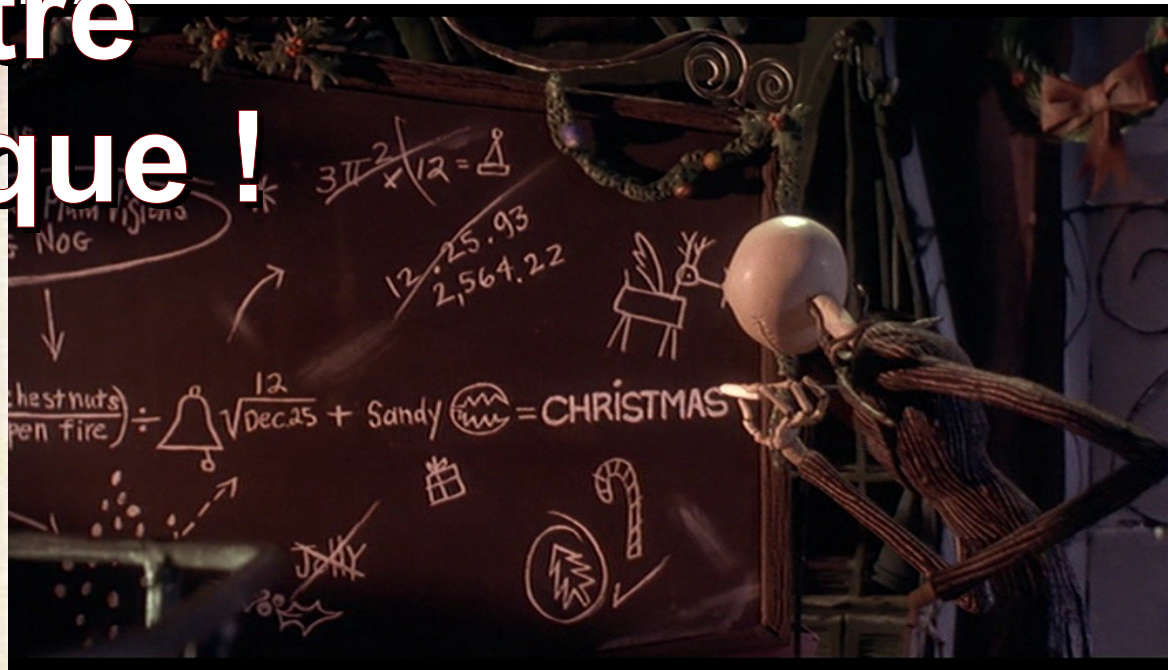
# Mécanique quantique relativiste

LES BRONZÉS JOUENT:  
**LE PÈRE NOËL EST  
UNE  
ORDURE**



À LA GAÏTÉ MONPARNASSE  
26 RUE DE LA GAÏTÉ 14<sup>e</sup> Tel 322.16.18  
ts les JOURS 22h. DIMANCHE 20h 30 RELÂCHE LUNDI

un être  
quantique !



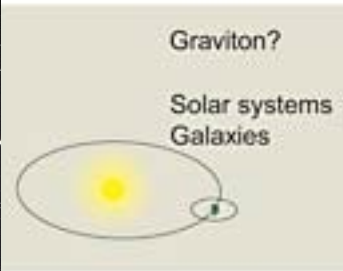
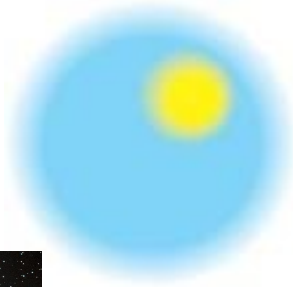
- Très léger car quantique ( $\lambda=h/mc$ ) :  
taille  $\sim 1$  m  $\rightarrow$  masse inférieure à  $10^{-42}$  kg
- Attention : toute observation détruit ses propriétés quantiques !

# Les forces



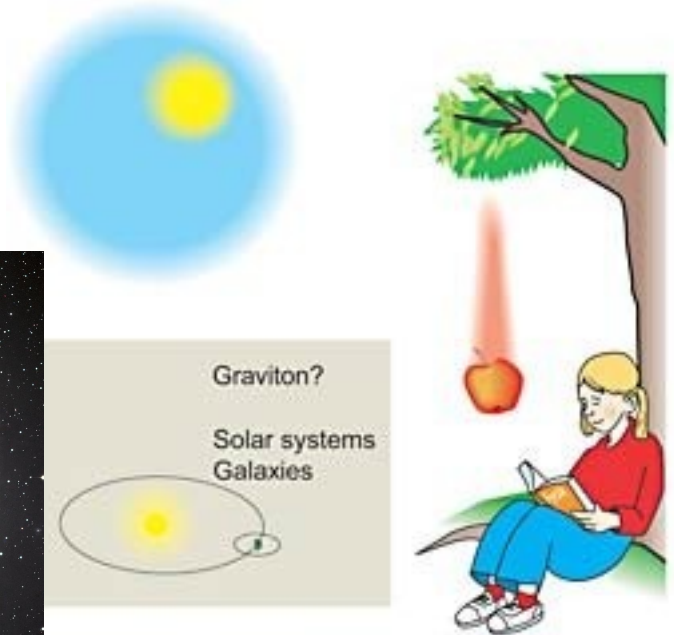


# Les forces

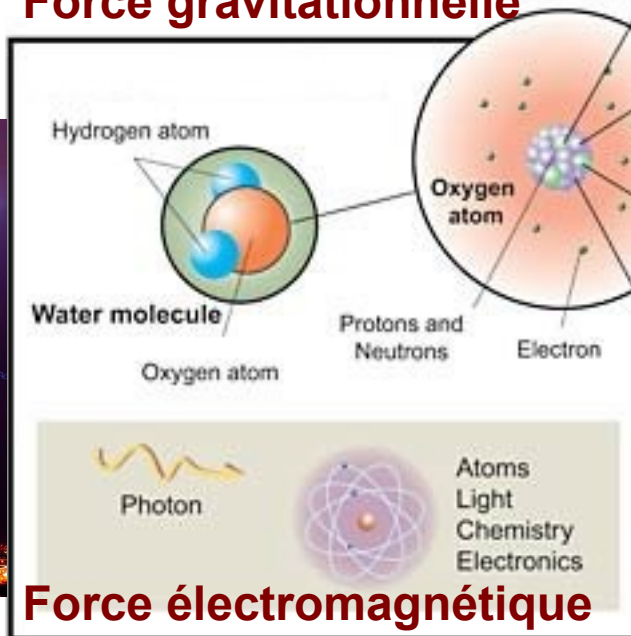


**Force gravitationnelle**

# Les forces



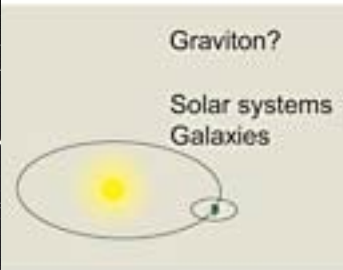
**Force gravitationnelle**



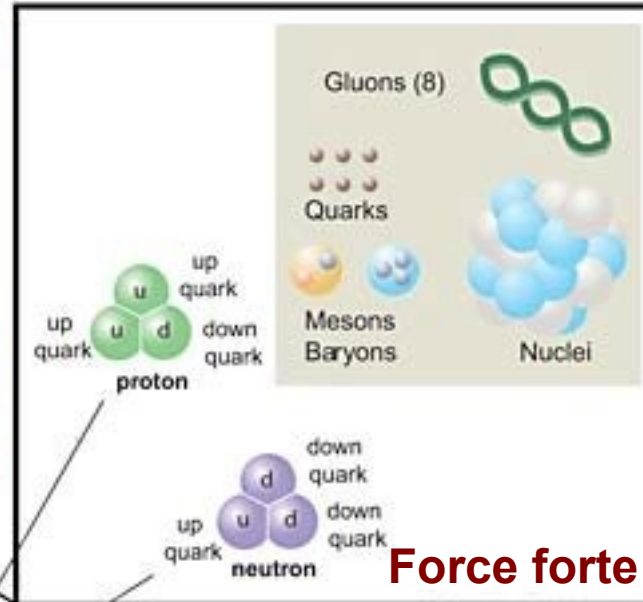
**Force électromagnétique**



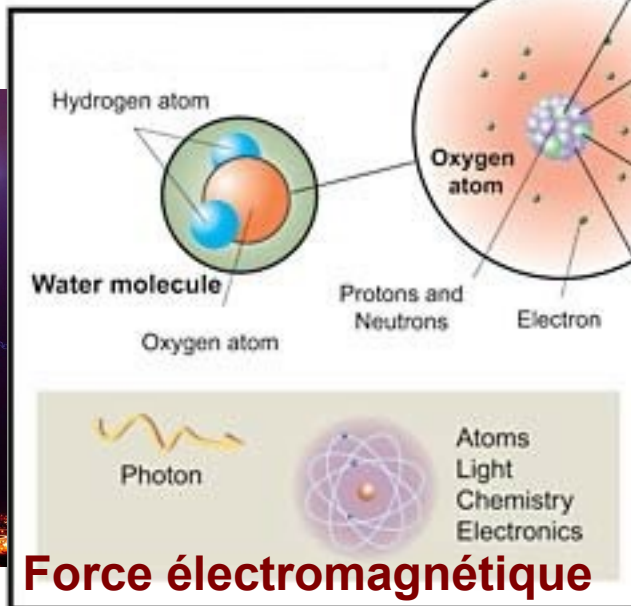
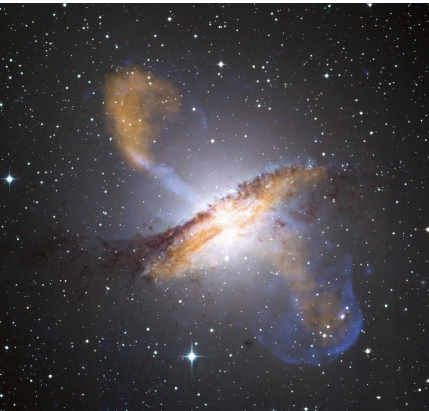
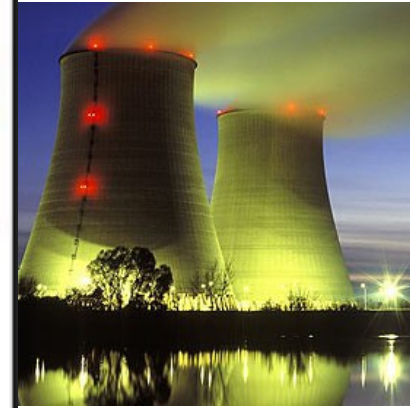
# Les forces



**Force gravitationnelle**



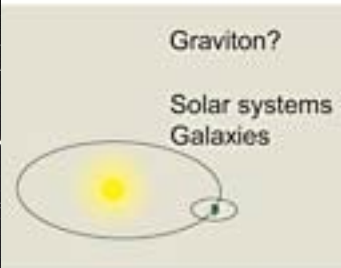
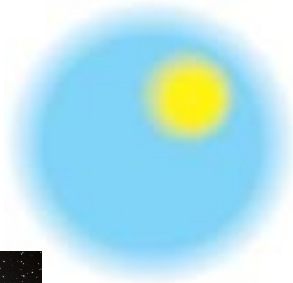
**Force forte**



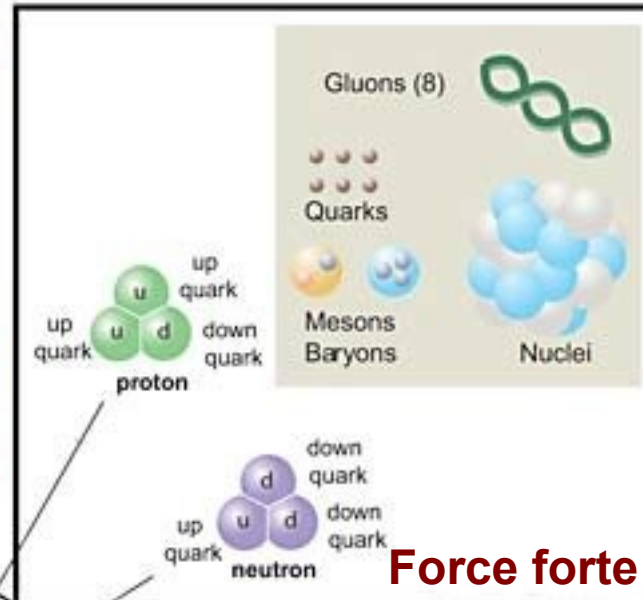
**Force électromagnétique**



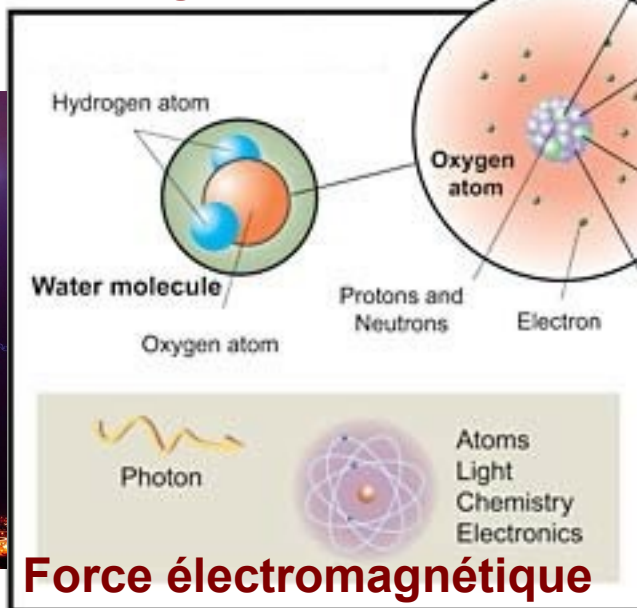
# Les forces



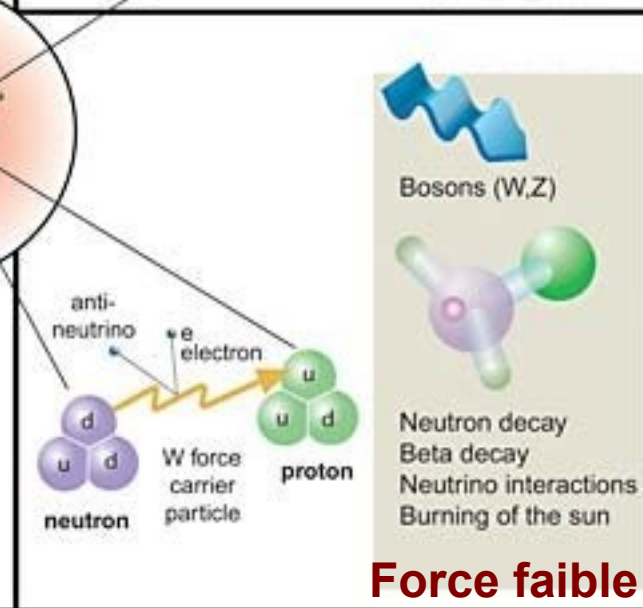
**Force gravitationnelle**



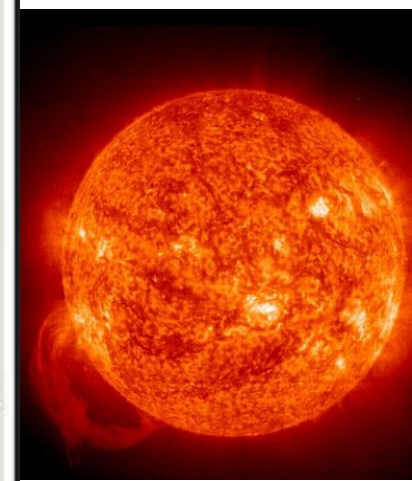
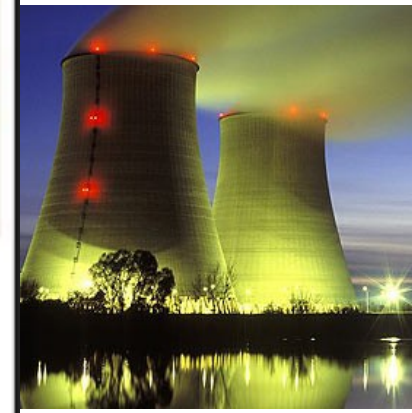
**Force forte**



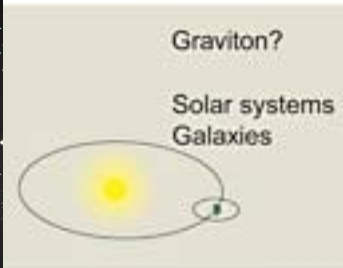
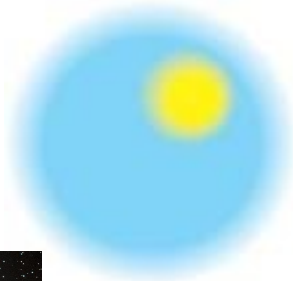
**Force électromagnétique**



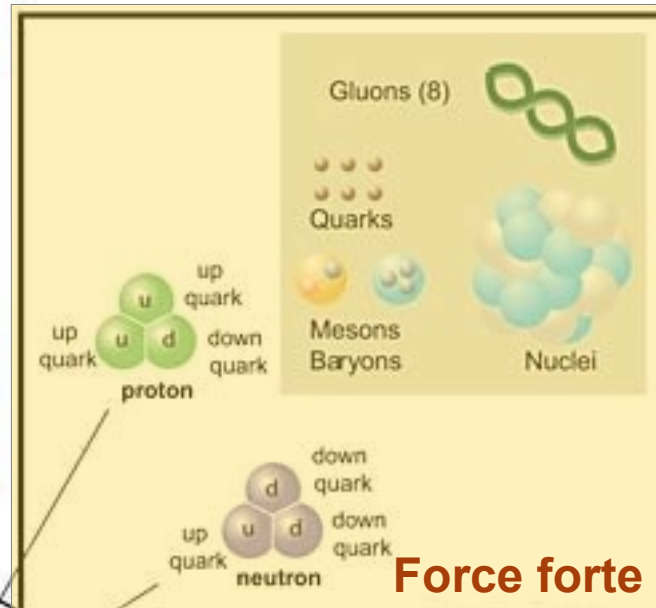
**Force faible**



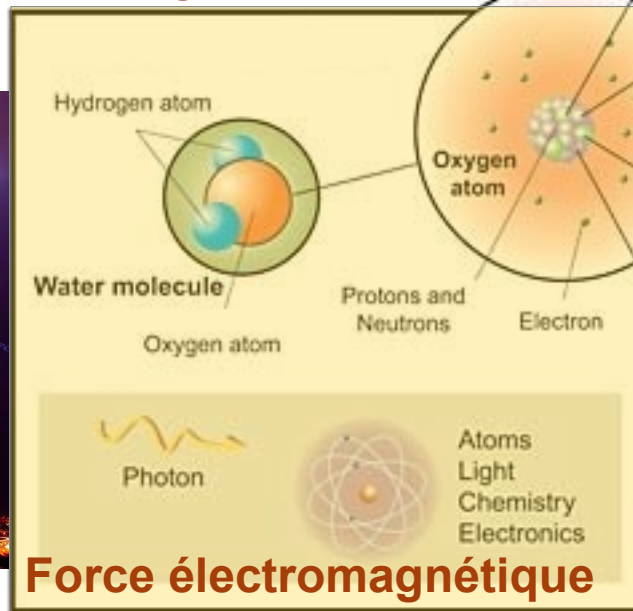
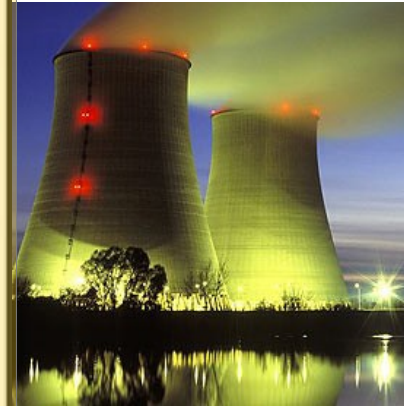
# Les forces



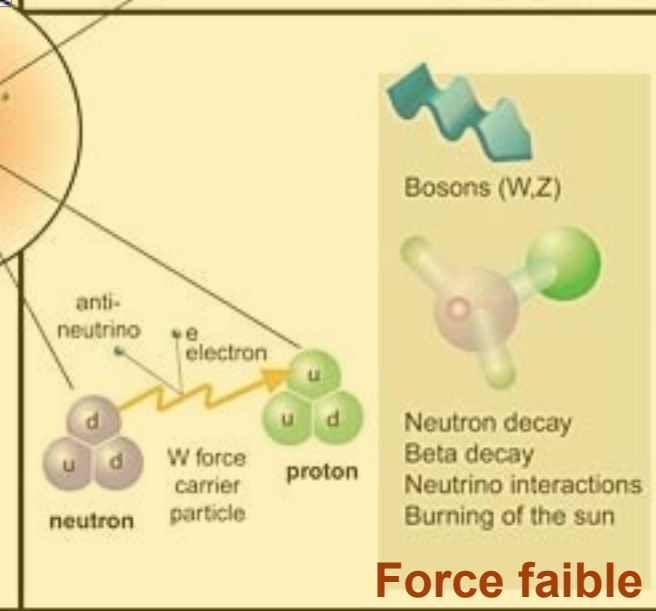
**Force gravitationnelle**



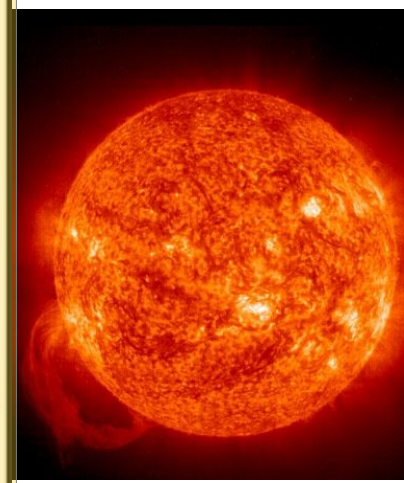
**Force forte**



**Force électromagnétique**



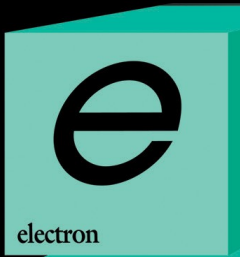
**Force faible**



# Quarks



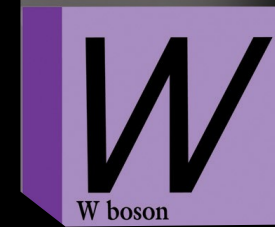
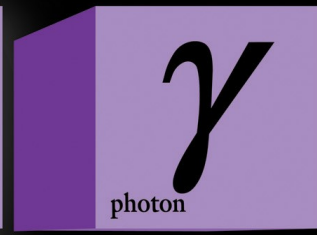
+ anti-matière



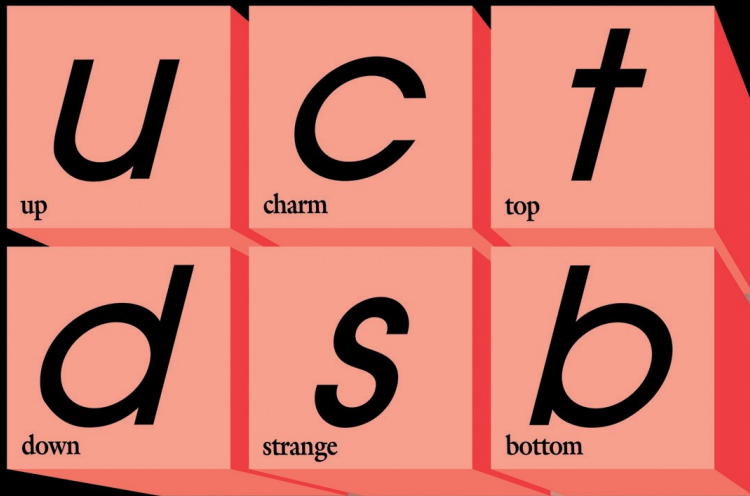
# Leptons

# Le modèle standard

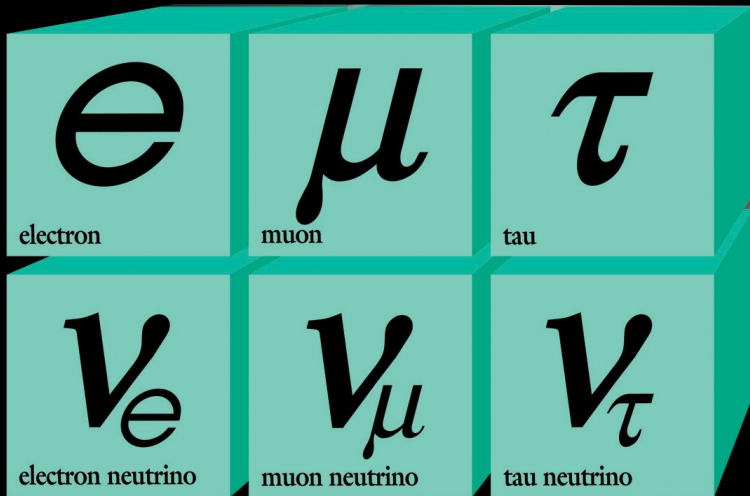
## Forces



# Quarks



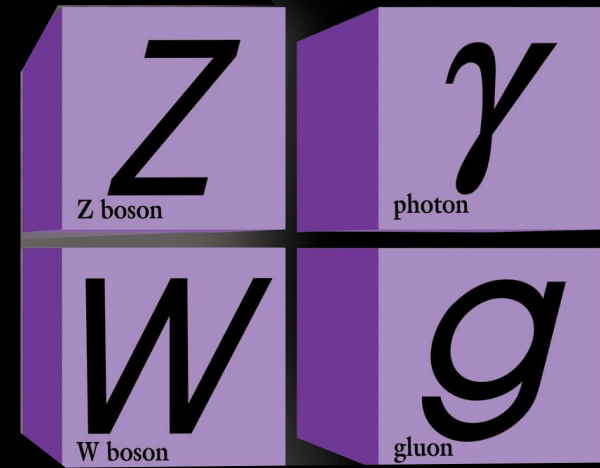
+ anti-matière



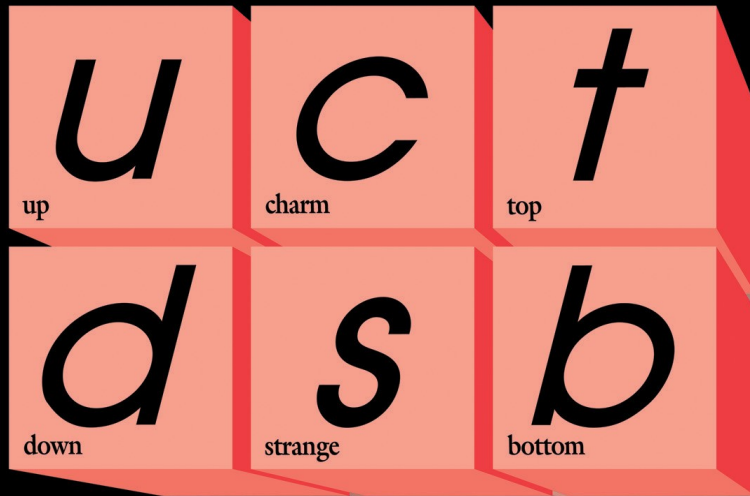
# Leptons

# Le modèle standard

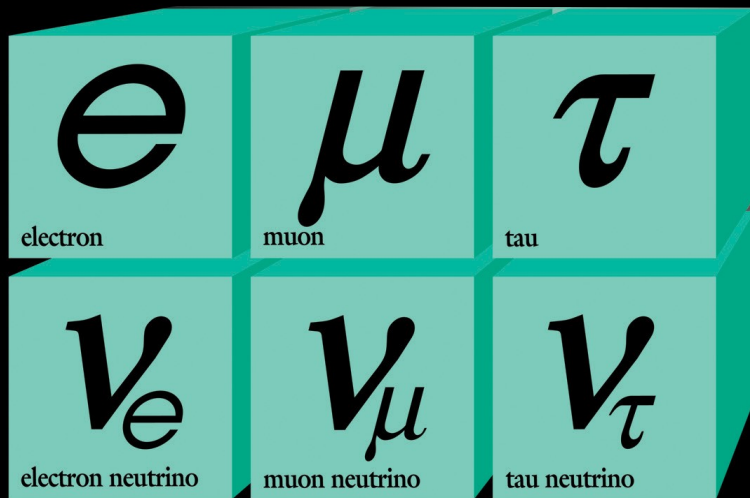
# Forces



# Quarks



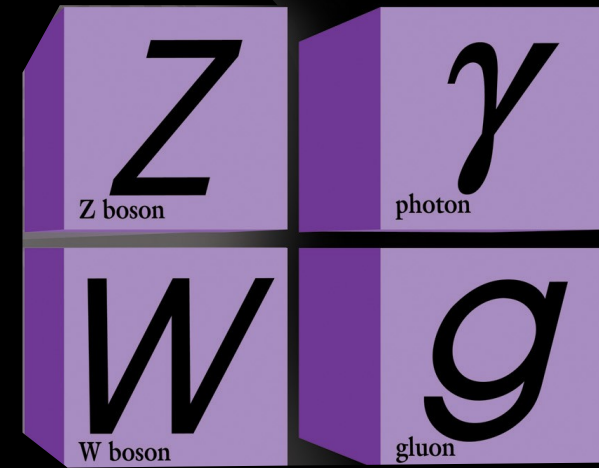
+ anti-matière



# Leptons

# Le modèle standard

# Forces

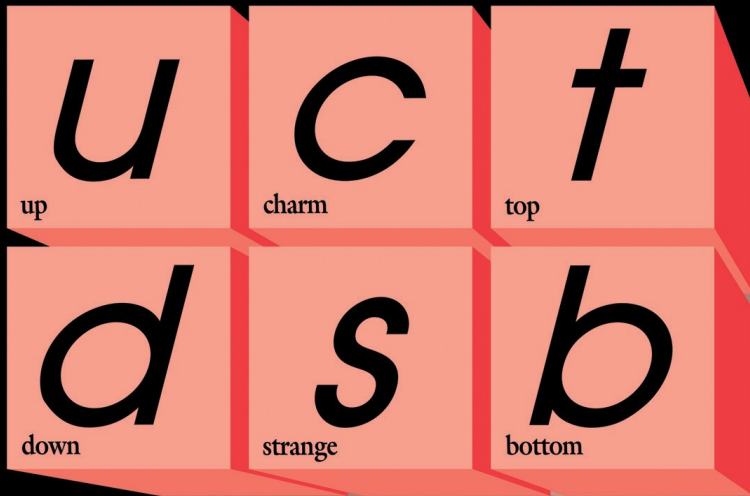


Toutes ces particules ont une masse nulle, c'est contraire à l'expérience...



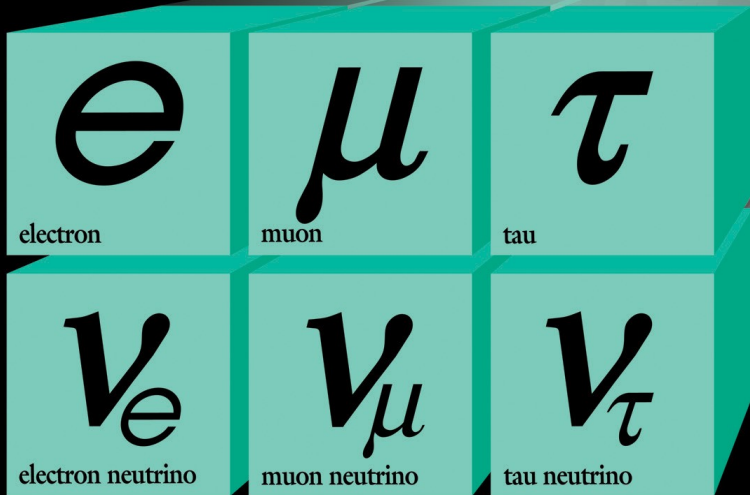
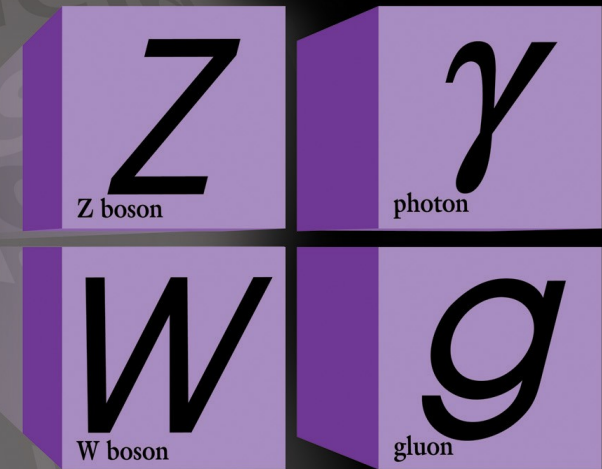
# Quarks

# Le modèle standard



+ anti-matière

# Forces

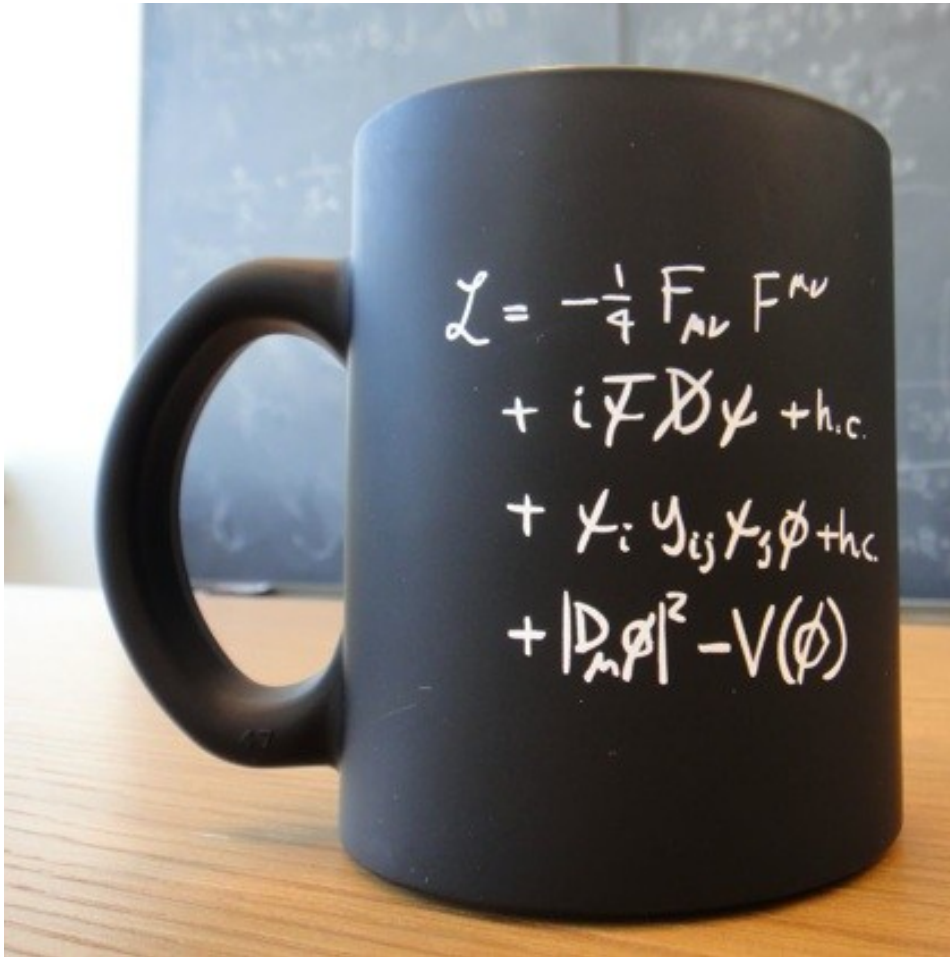


# Leptons

Solution : rajouter un champ de Higgs

# Le Modèle standard

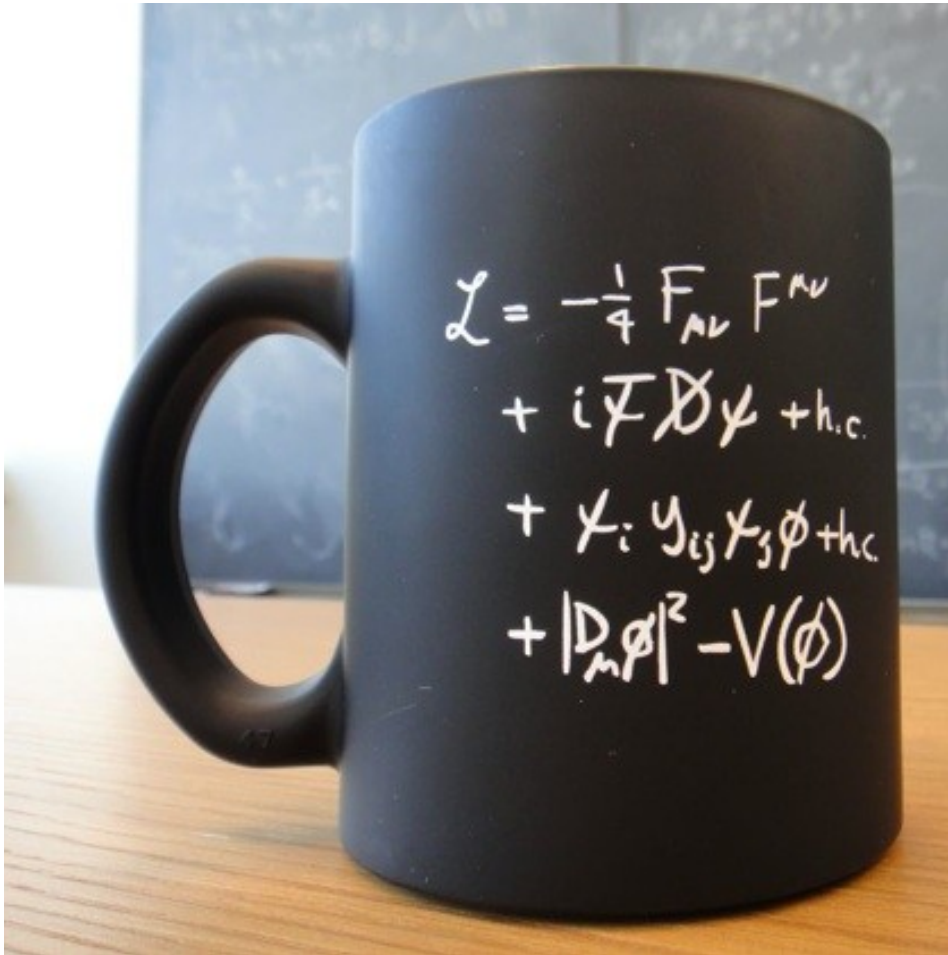
- Version synthétique



# 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^\alpha + 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_\nu^- \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_\kappa^\lambda)] + \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_\kappa^\lambda) + \\
 & m_\lambda^\lambda (\bar{u}_j^\lambda C_{\lambda\kappa} (1 + \gamma^5) d_\kappa^\lambda) + \frac{i g}{2M\sqrt{2}} \phi^- [m_\lambda^\lambda (\bar{d}_j^\lambda C_{\lambda\kappa}^\dagger (1 + \gamma^5) u_j^\lambda) - m_\lambda^\kappa (\bar{d}_j^\lambda C_{\lambda\kappa}^\dagger (1 - \\
 & \gamma^5) u_j^\lambda)] - \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} \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{Y}^+ Y^+ + \lambda^0 - \bar{Y}^- Y^- - \lambda^0]
 \end{aligned}$$

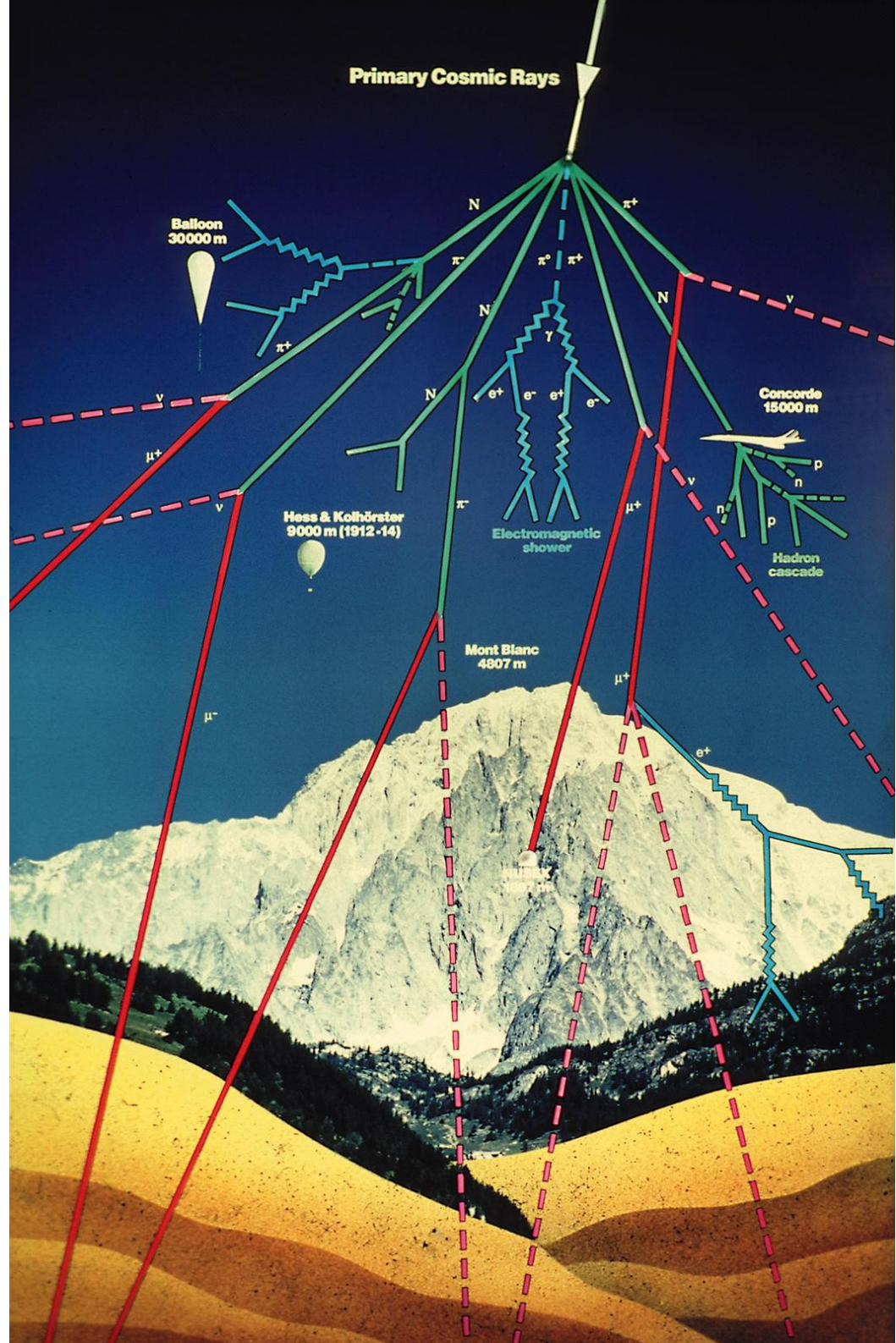
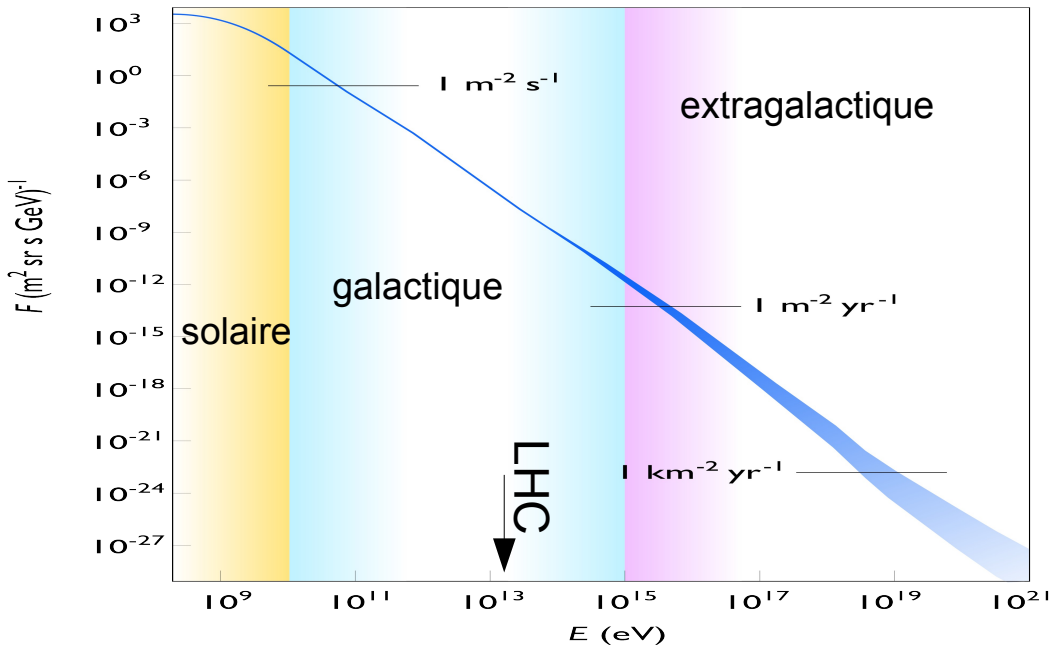
# Le modèle standard

- 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



# Accélérateur naturel

- Rayons cosmiques de très haute énergie
- Découverts par Hess en 1912
- Avantage : énergies faramineuses
- Problème : hasard

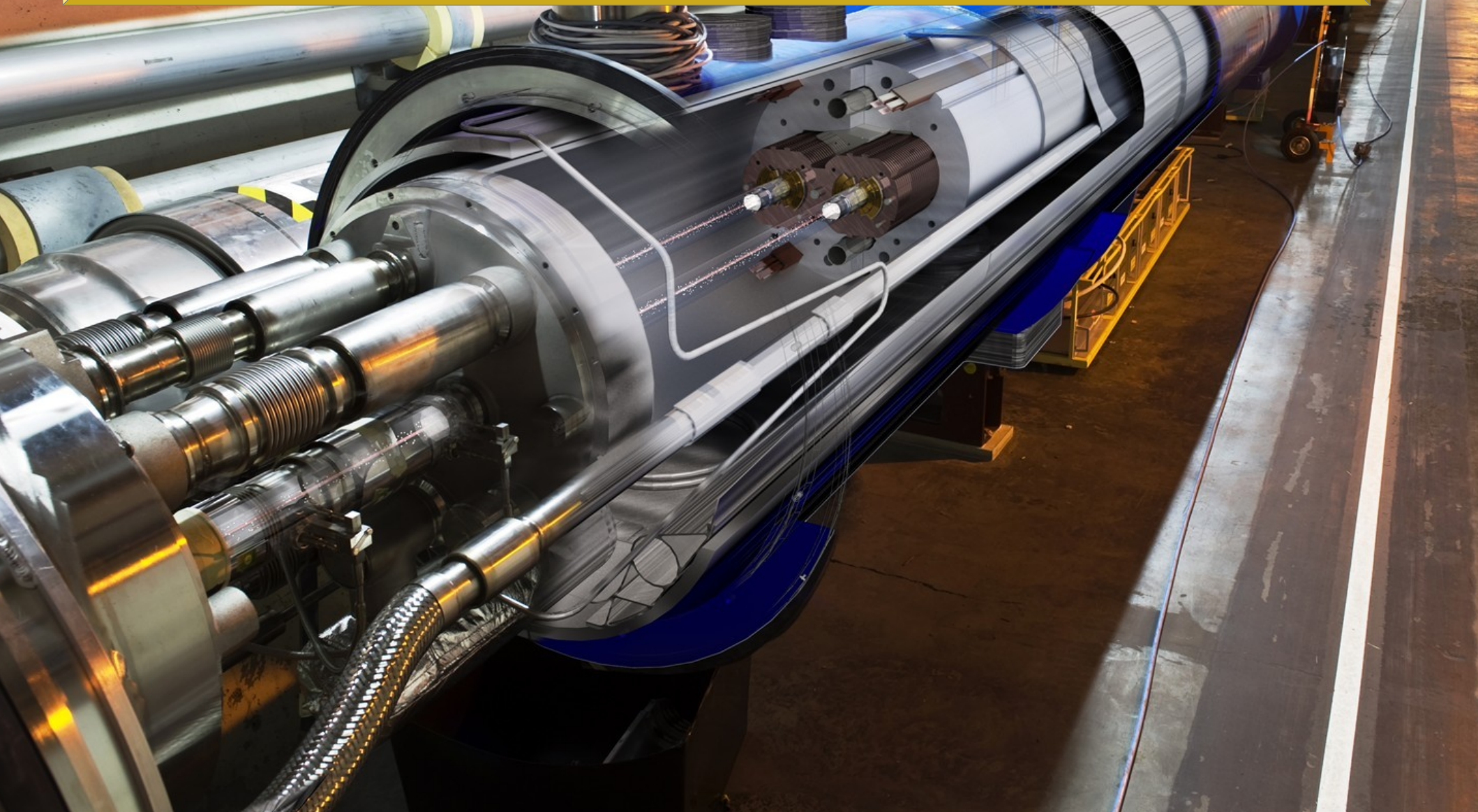


# Le LHC : la machine à superlatifs



# 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



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
Début 2015	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
Début 2015	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
Début 2015	Redémarrage à 13-14 TeV
2018-2020	Fin des collisions à luminosité nominale ?
2020-2030	Phase à haute luminosité ?



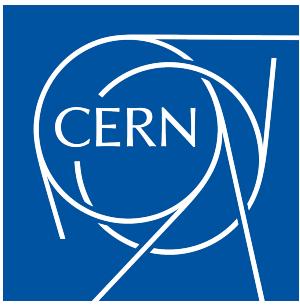
# Large Hadron Collider : un projet de longue haleine

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
Début 2015	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
Début 2015	Redémarrage à 13-14 TeV
2018-2020	Fin des collisions à luminosité nominale ?
2020-2030	Phase à haute luminosité ?



# Le CERN

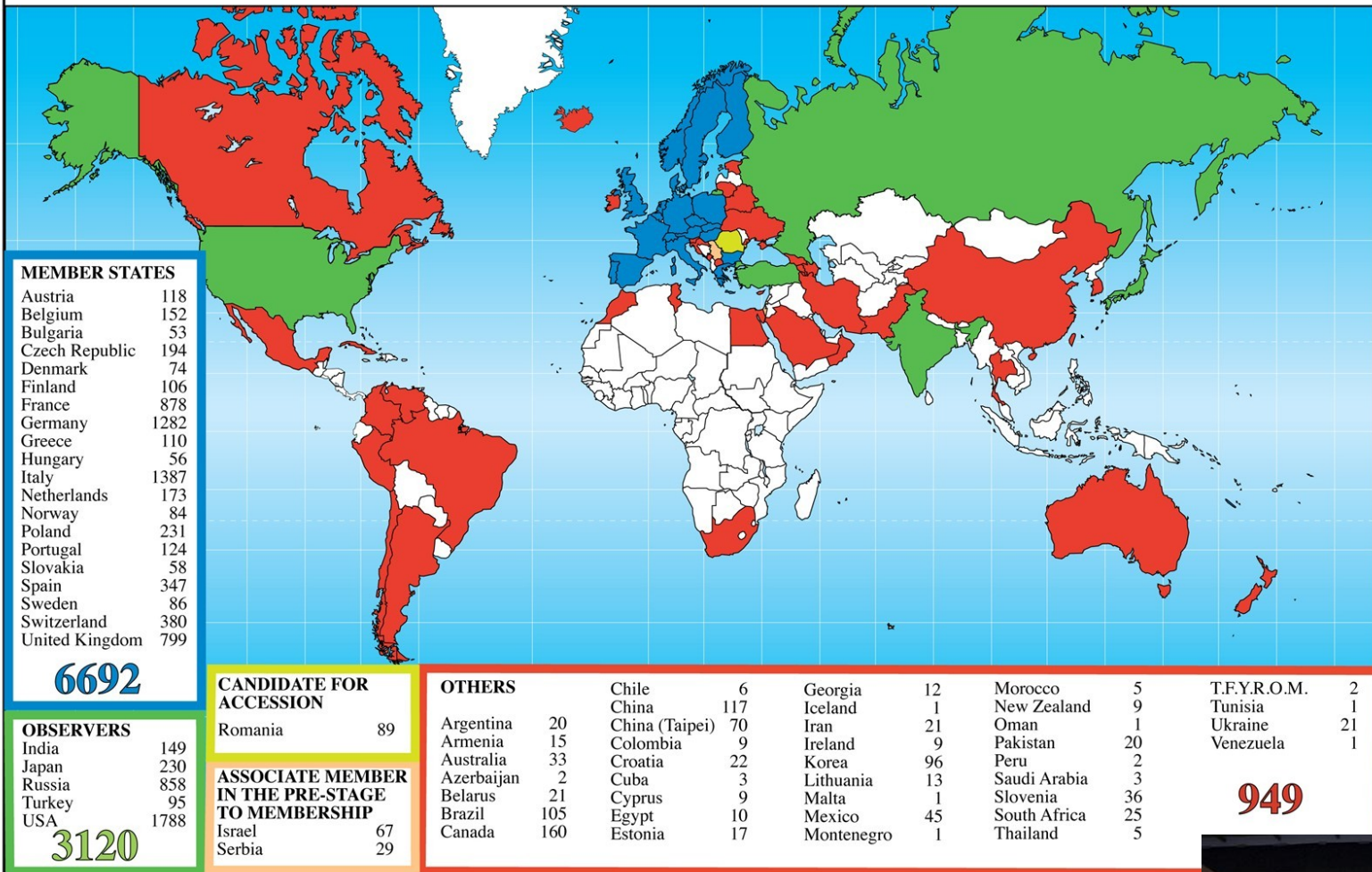


- Organisation européenne pour la recherche nucléaire
- Fondé en 1954
- Basé à Genève (Suisse), sites également en France
- Organisation internationale (les employés sont fonctionnaires internationaux)
- Nombreuses découvertes scientifiques et techniques
- Plusieurs prix Nobel
- Festivités des 60 ans l'an prochain



# Le CERN : laboratoire mondial

Distribution of All CERN Users by Nation of Institute on 3 September 2012



- 20 États membres
- Une centaine de nationalités, tout le monde coopère
- 10000 scientifiques



# A quoi sert la recherche fondamentale du CERN ?

- Raison d'être : curiosité humaine pour comprendre le monde qui nous entoure

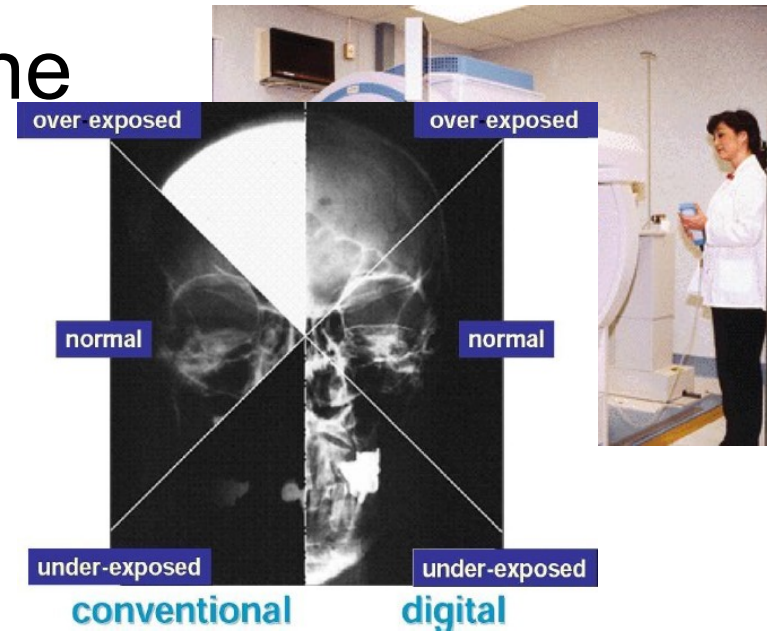
# A quoi sert la recherche fondamentale du CERN ?

- Raison d'être : curiosité humaine pour comprendre le monde qui nous entoure
- Applications :
  - ▶ Concepts théoriques comme l'antimatière utilisés dans les scanners TEP
  - ▶ Technologie des détecteurs utilisée en médecine
  - ▶ Faisceaux utilisés en hadronthérapie



# A quoi sert la recherche fondamentale du CERN ?

- Raison d'être : curiosité humaine pour comprendre le monde qui nous entoure
- Applications :
  - ▶ Concepts théoriques comme l'antimatière utilisés dans les scanners TEP
  - ▶ Technologie des détecteurs utilisée en médecine
  - ▶ Faisceaux utilisés en hadronthérapie



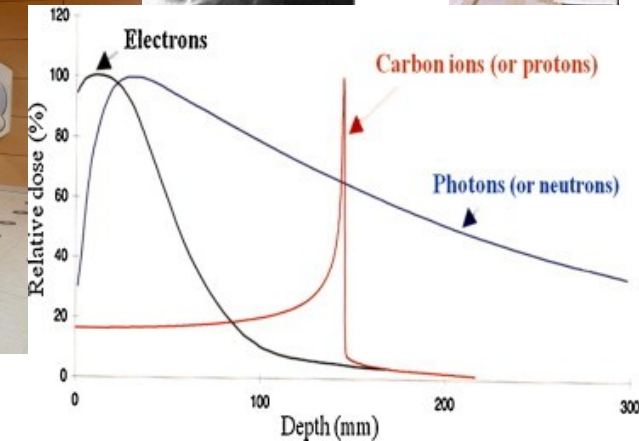
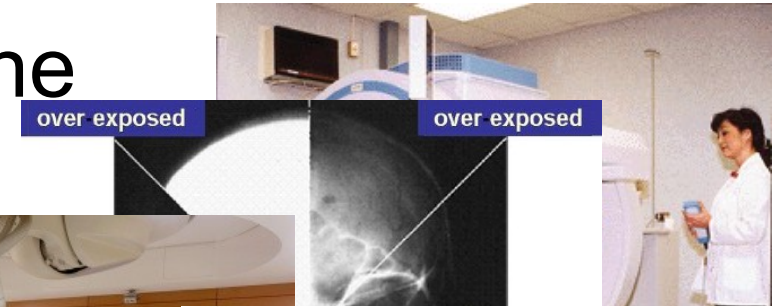


# A quoi sert la recherche fondamentale du CERN ?

- Raison d'être : curiosité humaine pour comprendre le monde qui nous entoure

- Applications :

- ▶ Concepts théoriques comme l'antimatière utilisés dans les scanners TEP
- ▶ Technologie des détecteurs utilisée en médecine
- ▶ Faisceaux utilisés en hadronthérapie



# A quoi sert la recherche fondamentale du CERN ?

- Raison d'être : curiosité humaine pour comprendre le monde qui nous entoure

- Applications :

- ▶ Concepts théoriques comme l'antimatière utilisés dans les scanners TEP
- ▶ Technologie des détecteurs utilisée en médecine
- ▶ Faisceaux utilisés en hadronthérapie

- Plus inattendu :

- ▶ Grille de calcul
- ▶ Isolation des panneaux solaires de l'aéroport de Genève



# A quoi sert la recherche fondamentale du CERN ?

- Raison d'être : curiosité humaine pour comprendre le monde qui nous entoure

- Applications :

- ▶ Concepts théoriques comme l'antimatière utilisés dans les scanners TEP
- ▶ Technologie des détecteurs utilisée en médecine
- ▶ Faisceaux utilisés en hadronthérapie

- Plus inattendu :

- ▶ Grille de calcul
- ▶ Isolation des panneaux solaires de l'aéroport de Genève



# A quoi sert la recherche fondamentale du CERN ?

- Raison d'être : curiosité humaine pour comprendre le monde qui nous entoure

- Applications :

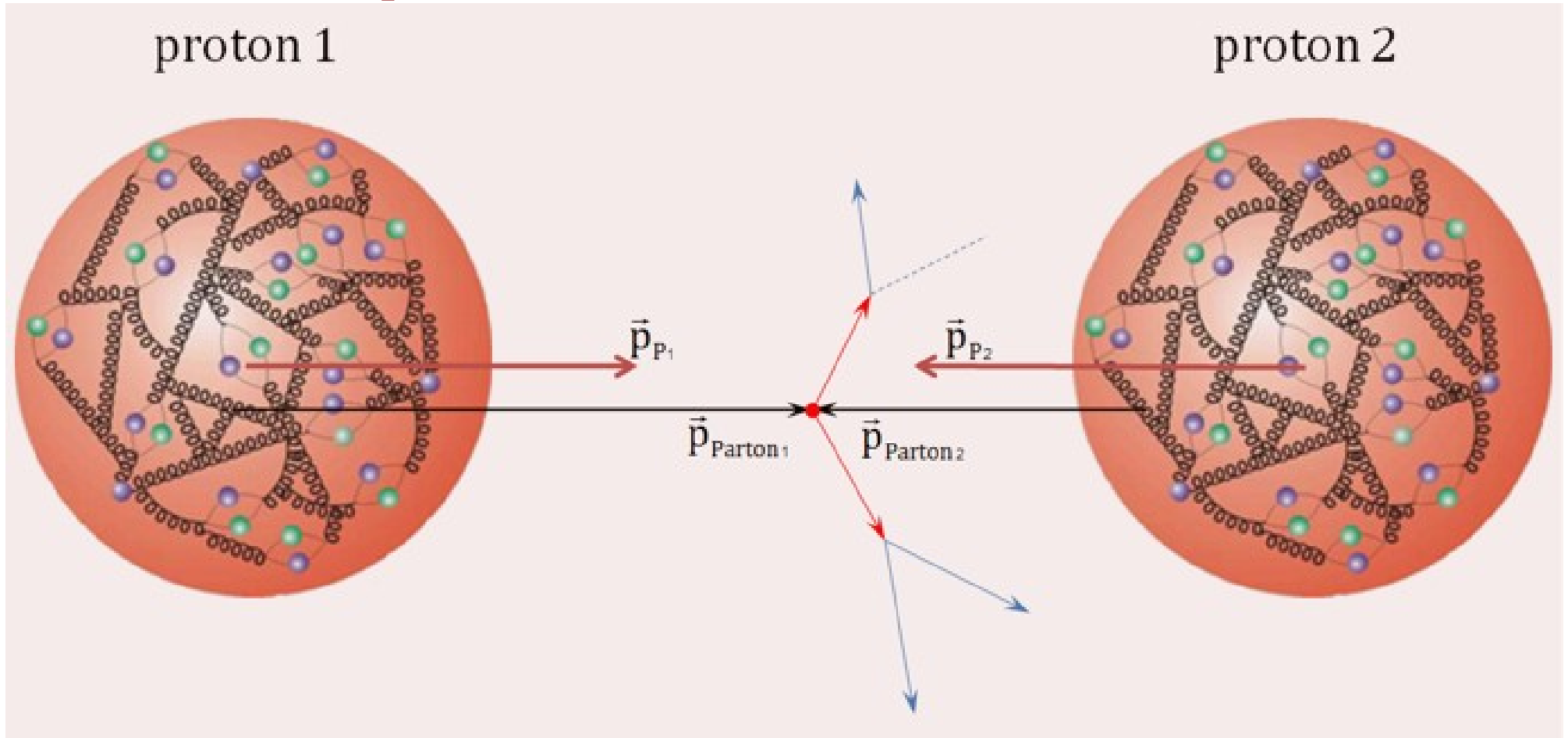
- ▶ Concepts théoriques comme l'antimatière utilisés dans les scanners TEP
- ▶ Technologie des détecteurs utilisée en médecine
- ▶ Faisceaux utilisés en hadronthérapie

- Plus inattendu :

- ▶ Grille de calcul
- ▶ Isolation des panneaux solaires de l'aéroport de Genève
- ▶ **Le Web a été inventé au CERN !**

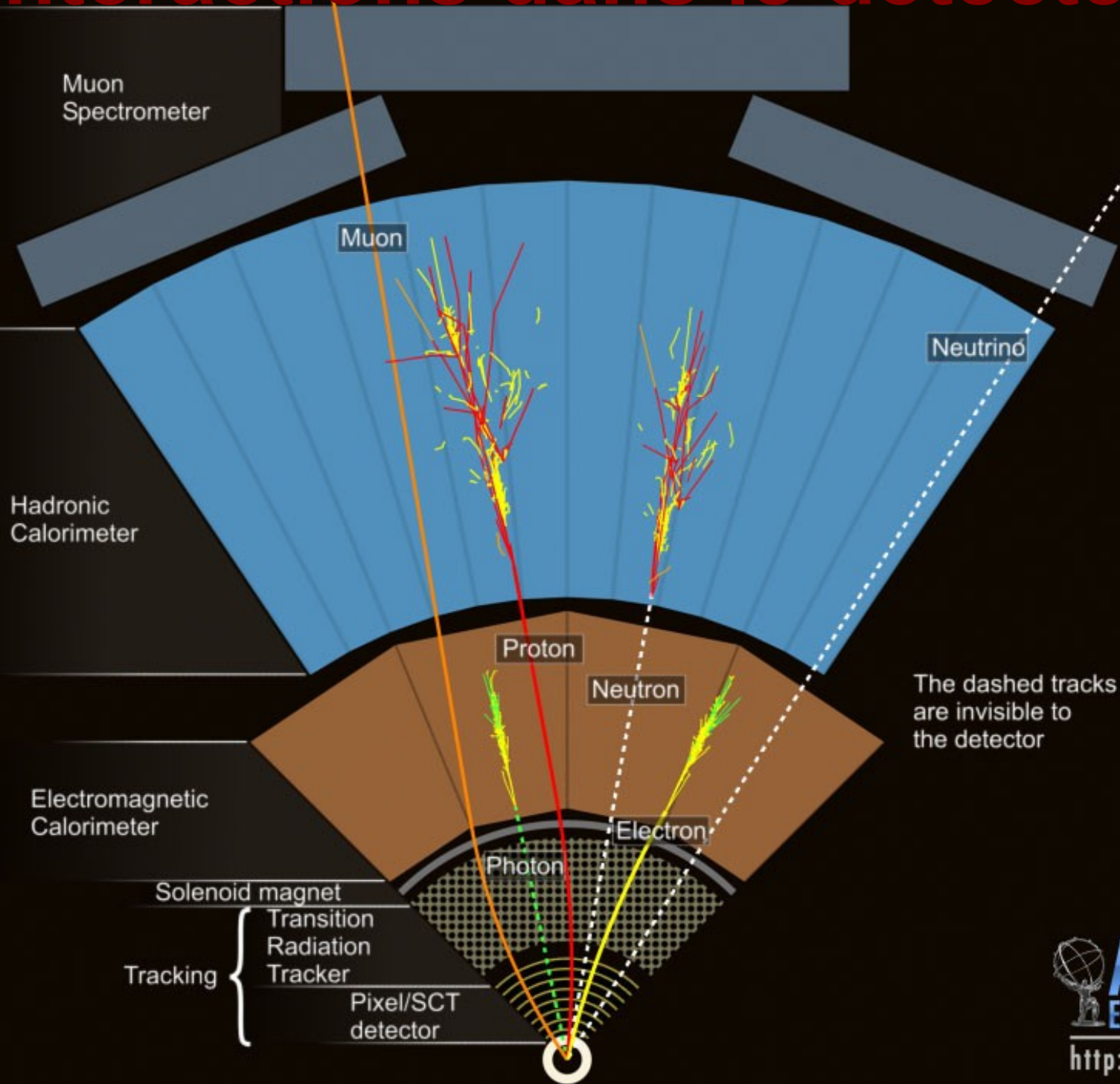


# Deux protons se rencontrent...



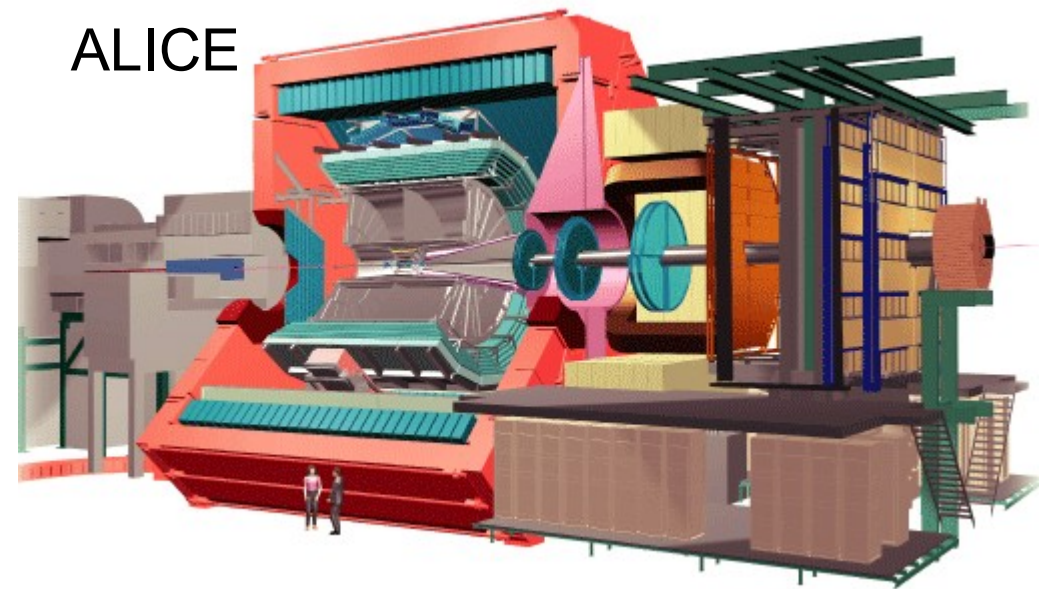
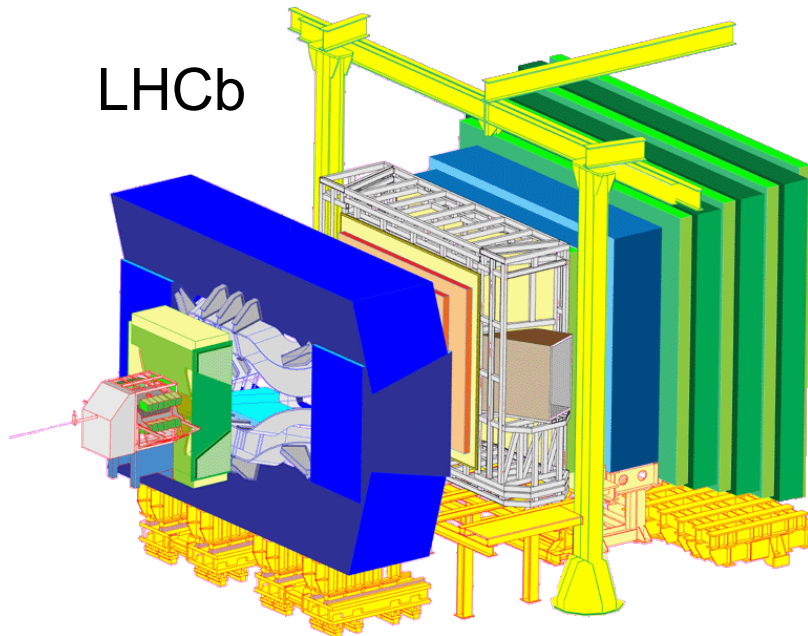
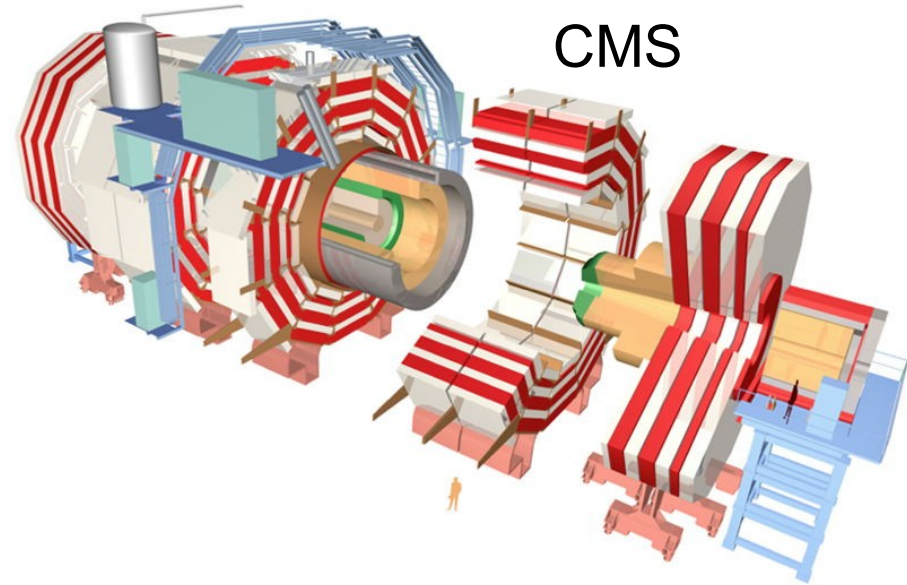
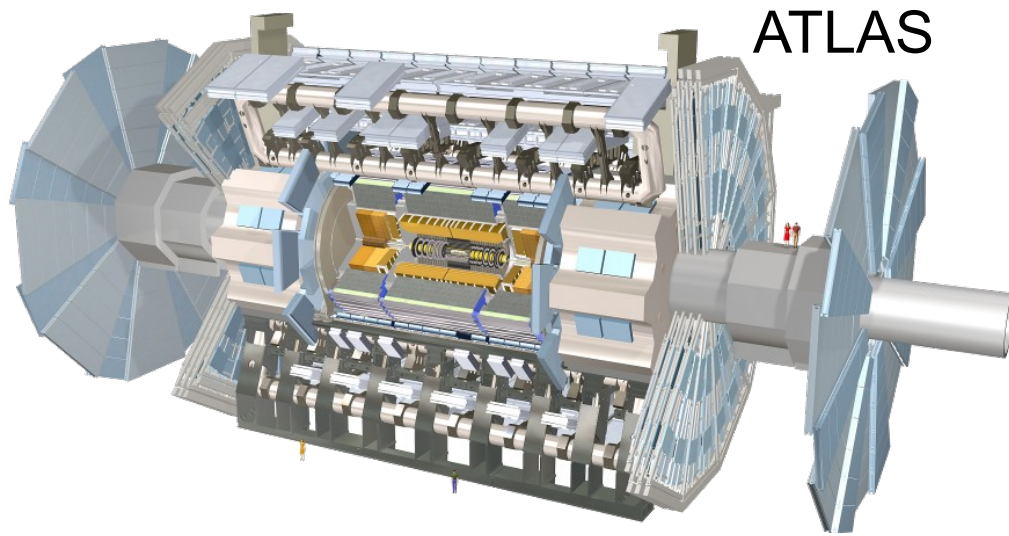
- Collision proton-proton = collision entre constituants (quarks et/ou gluons)
- Jamais deux fois la même collision → mesures statistiques
- Traces de la collision mesurées dans des détecteurs autour du point d'interaction

# Interactions dans le détecteur



The dashed tracks are invisible to the detector

# Les détecteurs géants du LHC



# La collaboration ATLAS

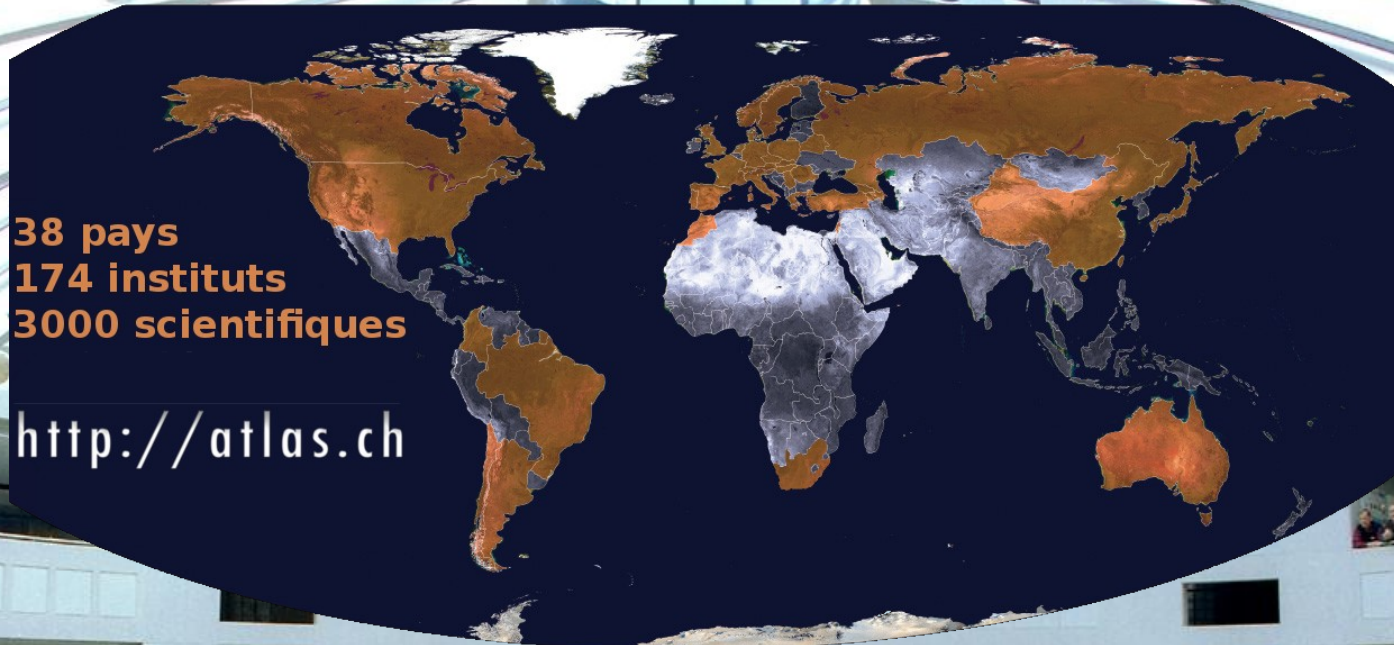




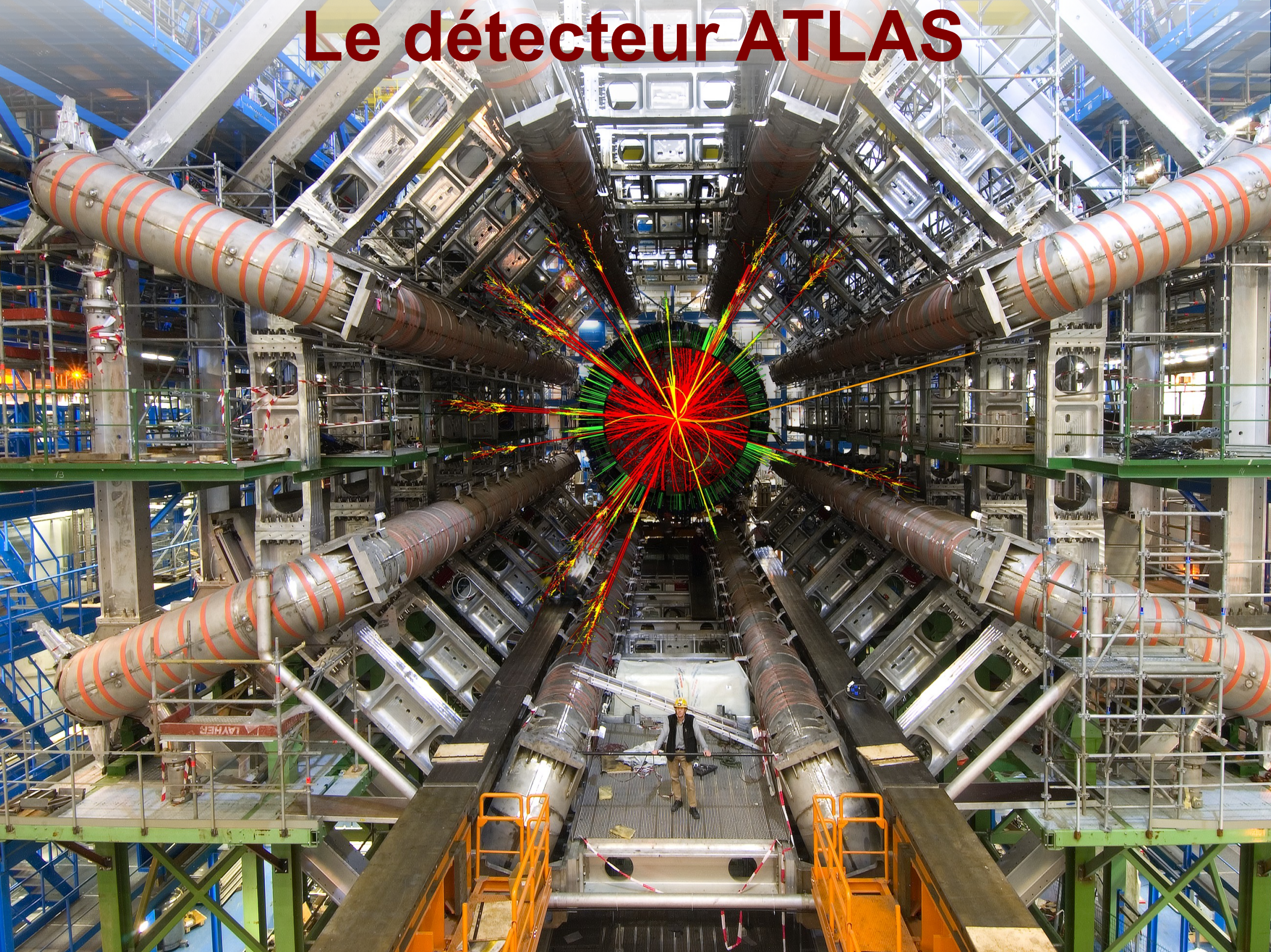
# La collaboration ATLAS

38 pays  
174 instituts  
3000 scientifiques

<http://atlas.ch>

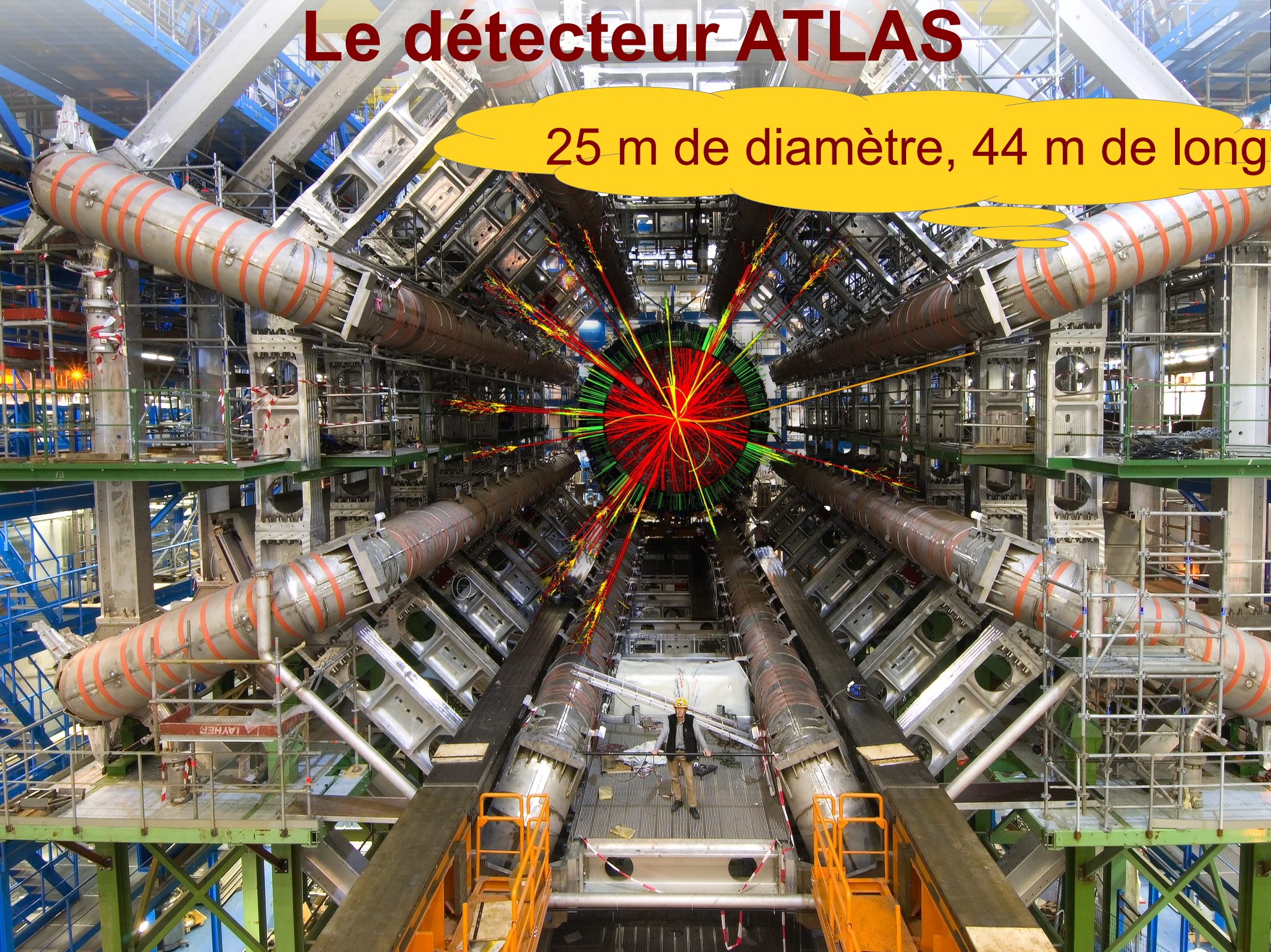


# Le détecteur ATLAS



# Le détecteur ATLAS

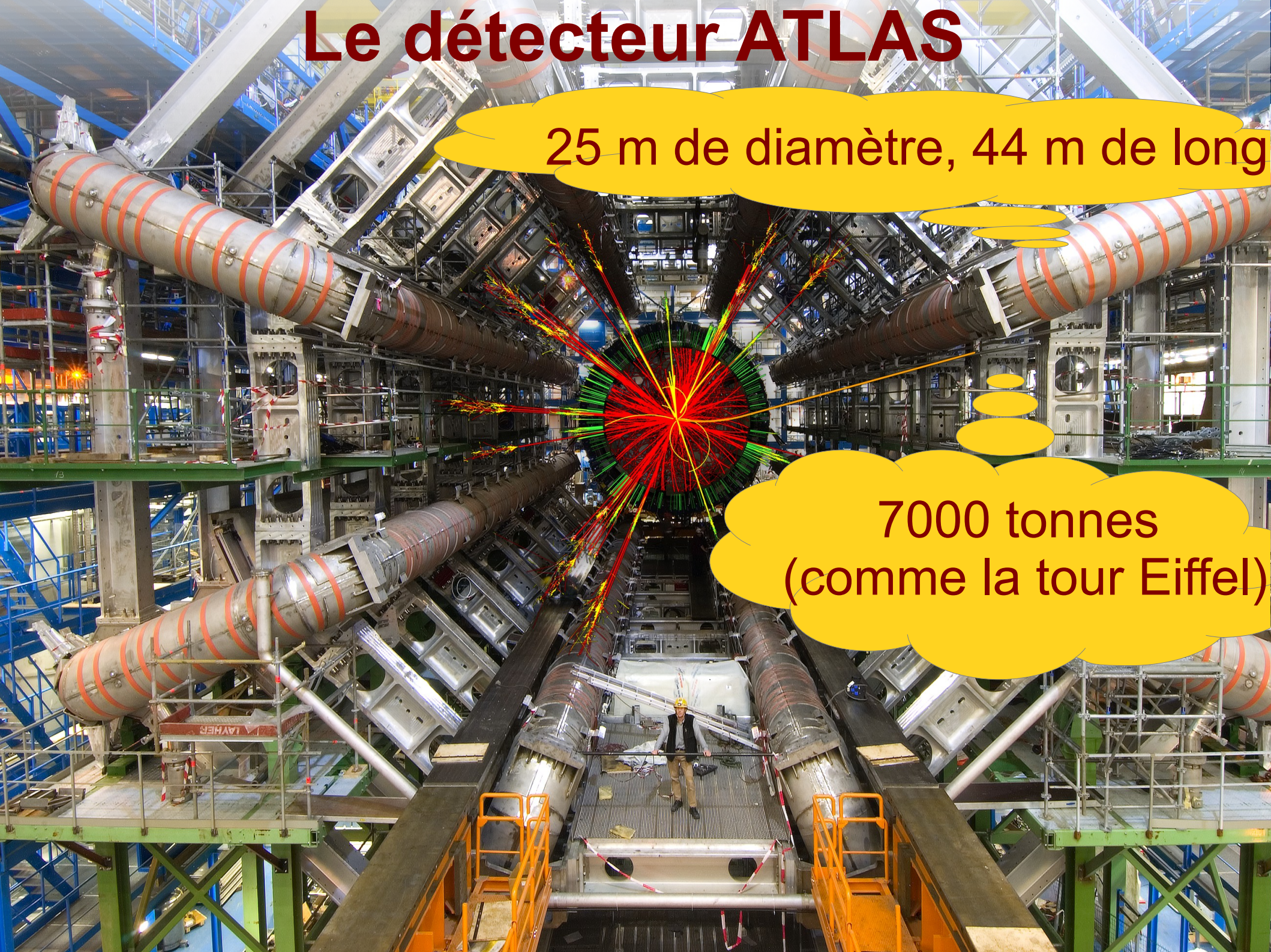
25 m de diamètre, 44 m de long



# Le détecteur ATLAS

25 m de diamètre, 44 m de long

7000 tonnes  
(comme la tour Eiffel)

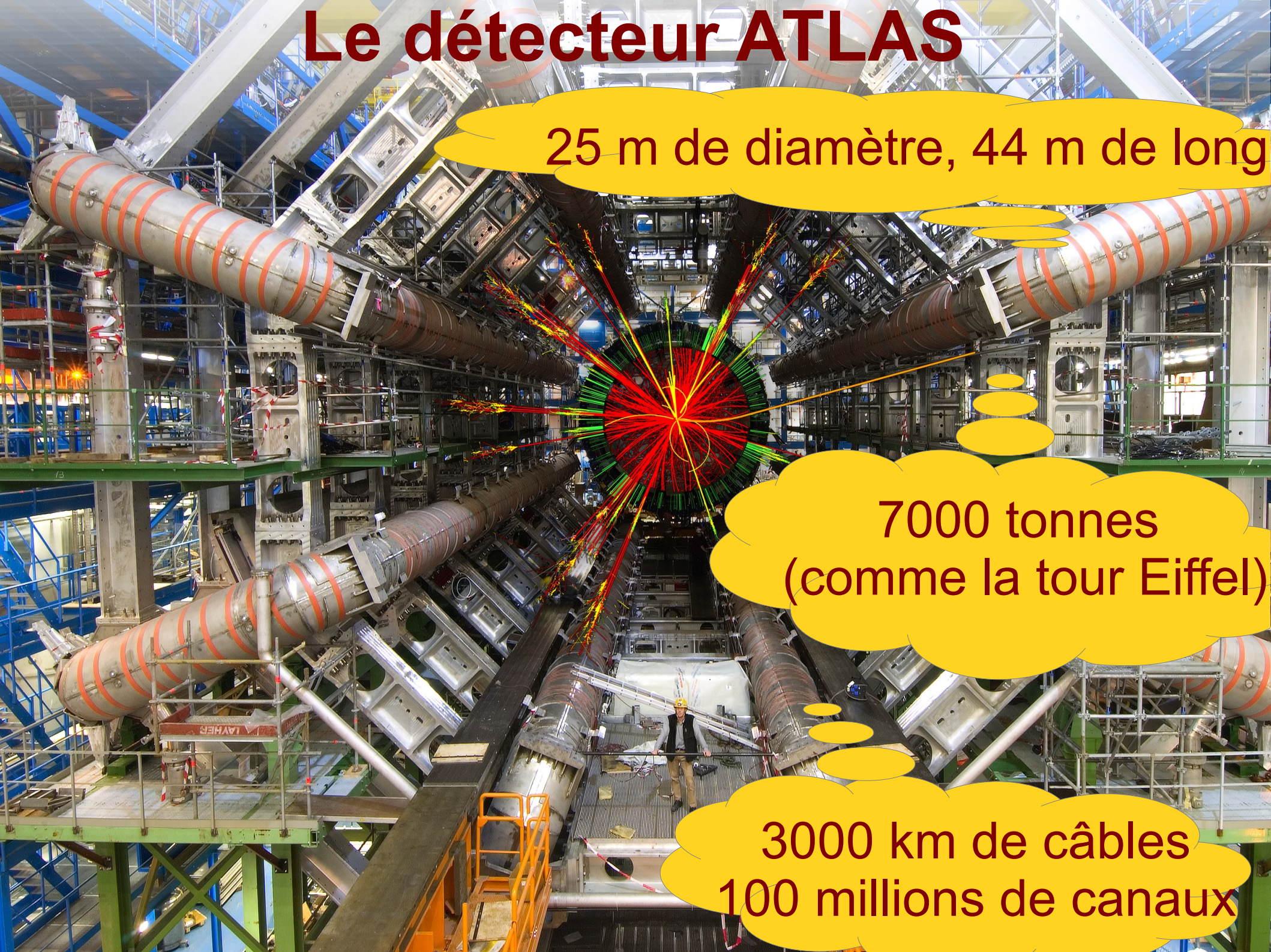


# Le détecteur ATLAS

25 m de diamètre, 44 m de long

7000 tonnes  
(comme la tour Eiffel)

3000 km de câbles  
100 millions de canaux



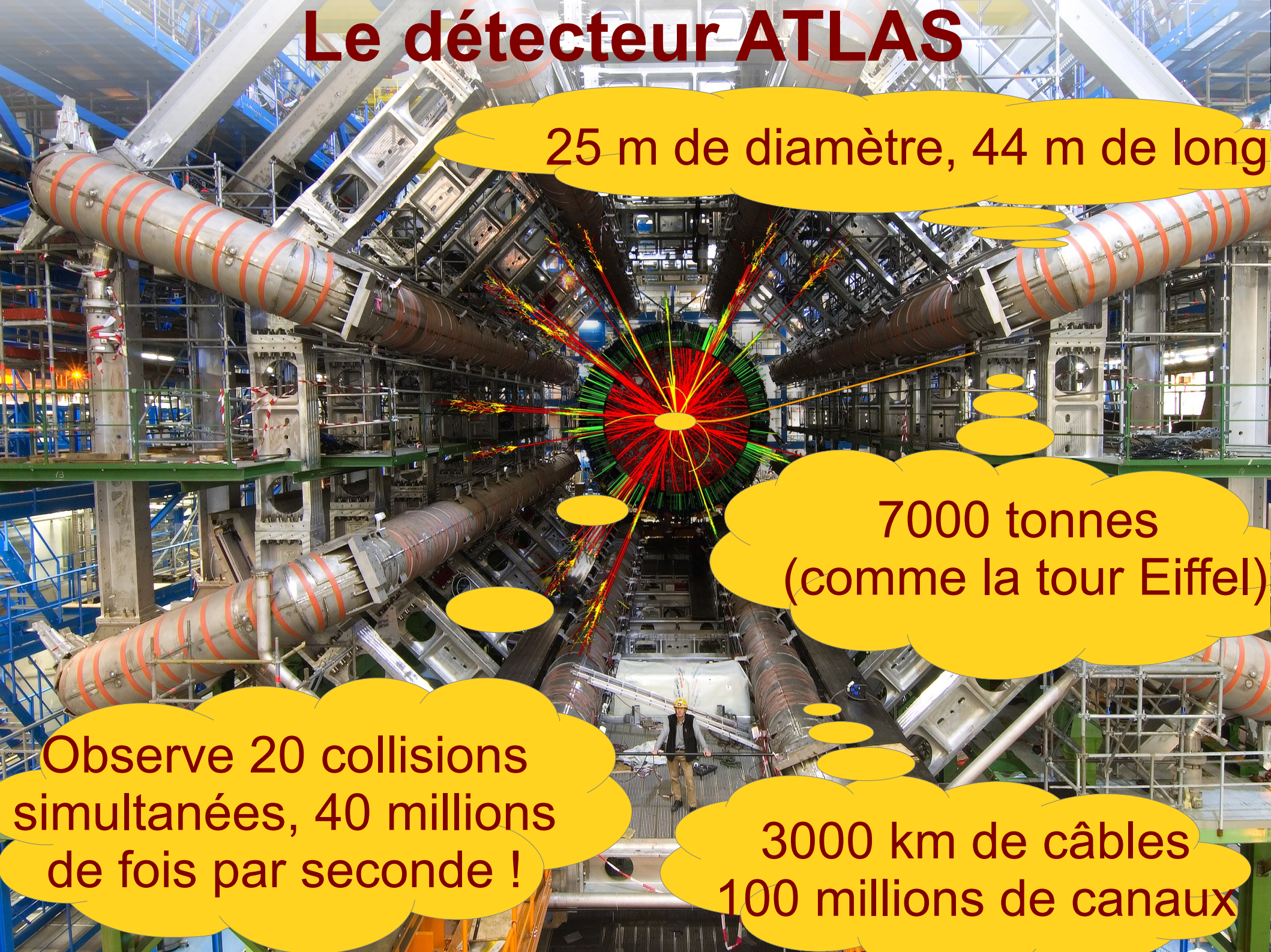
# Le détecteur ATLAS

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

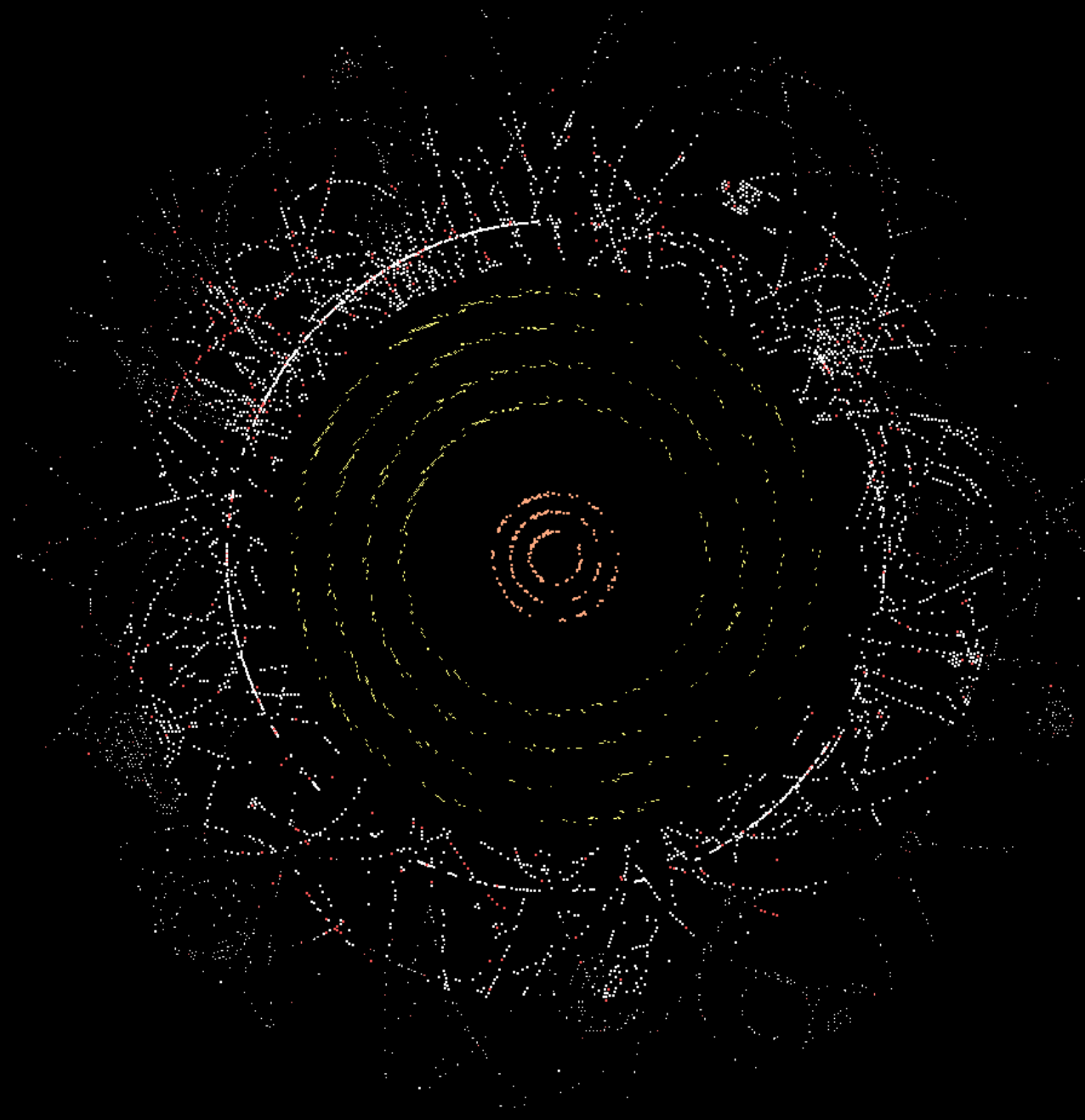
En France :  
6 laboratoires CNRS,  
1 CEA, 400 personnes  
(physiciens, ingénieurs,  
étudiants)

7000 tonnes  
(comme la tour Eiffel)

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

3000 km de câbles  
100 millions de canaux

# Passage des particules





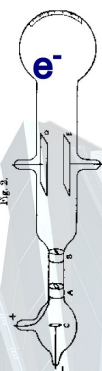
# Reconstruction des trajectoires



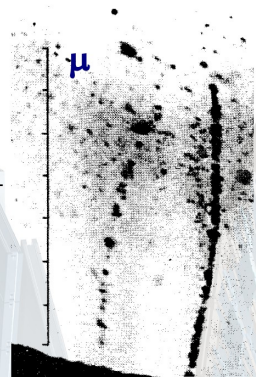
# Le modèle standard redécouvert

## LHC 2010 : un siècle en un an

Découverte historique



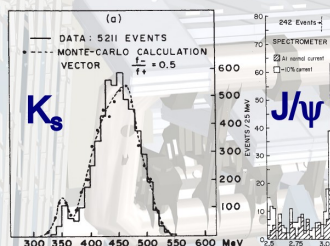
1897



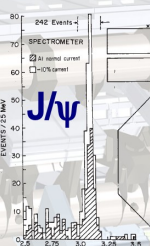
1937



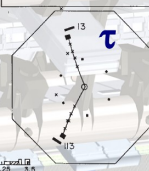
1947



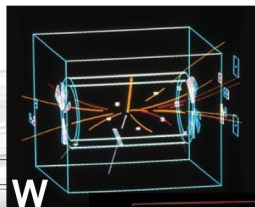
1964



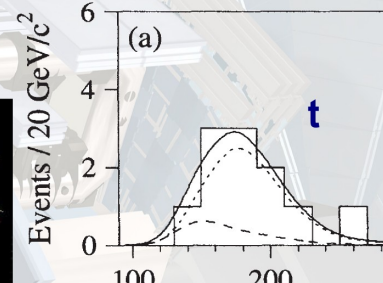
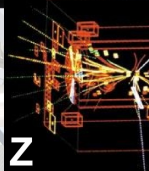
1974



1976



1983

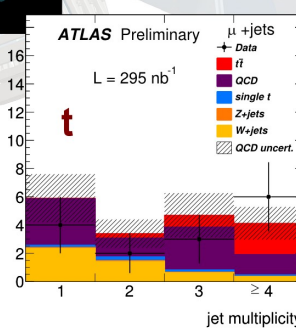
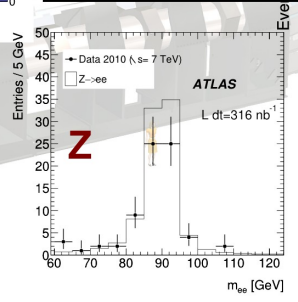
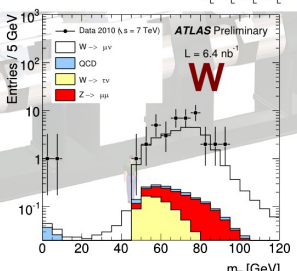
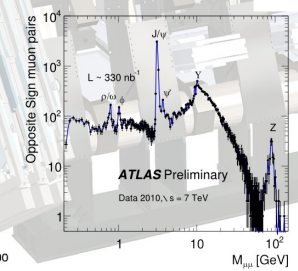
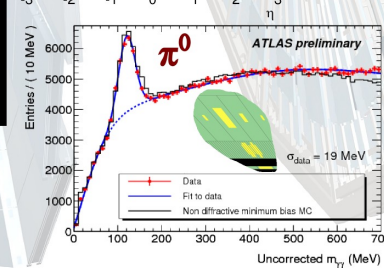
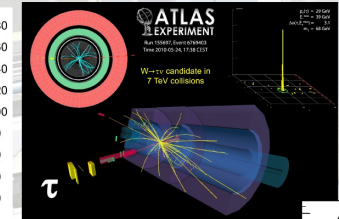
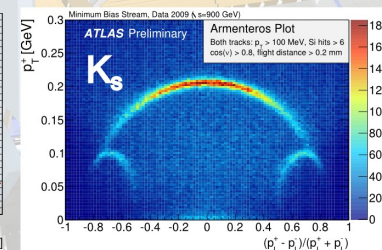
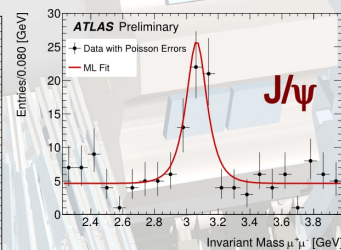
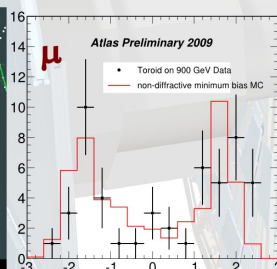
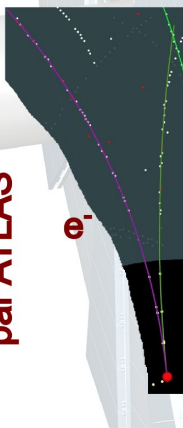


1995

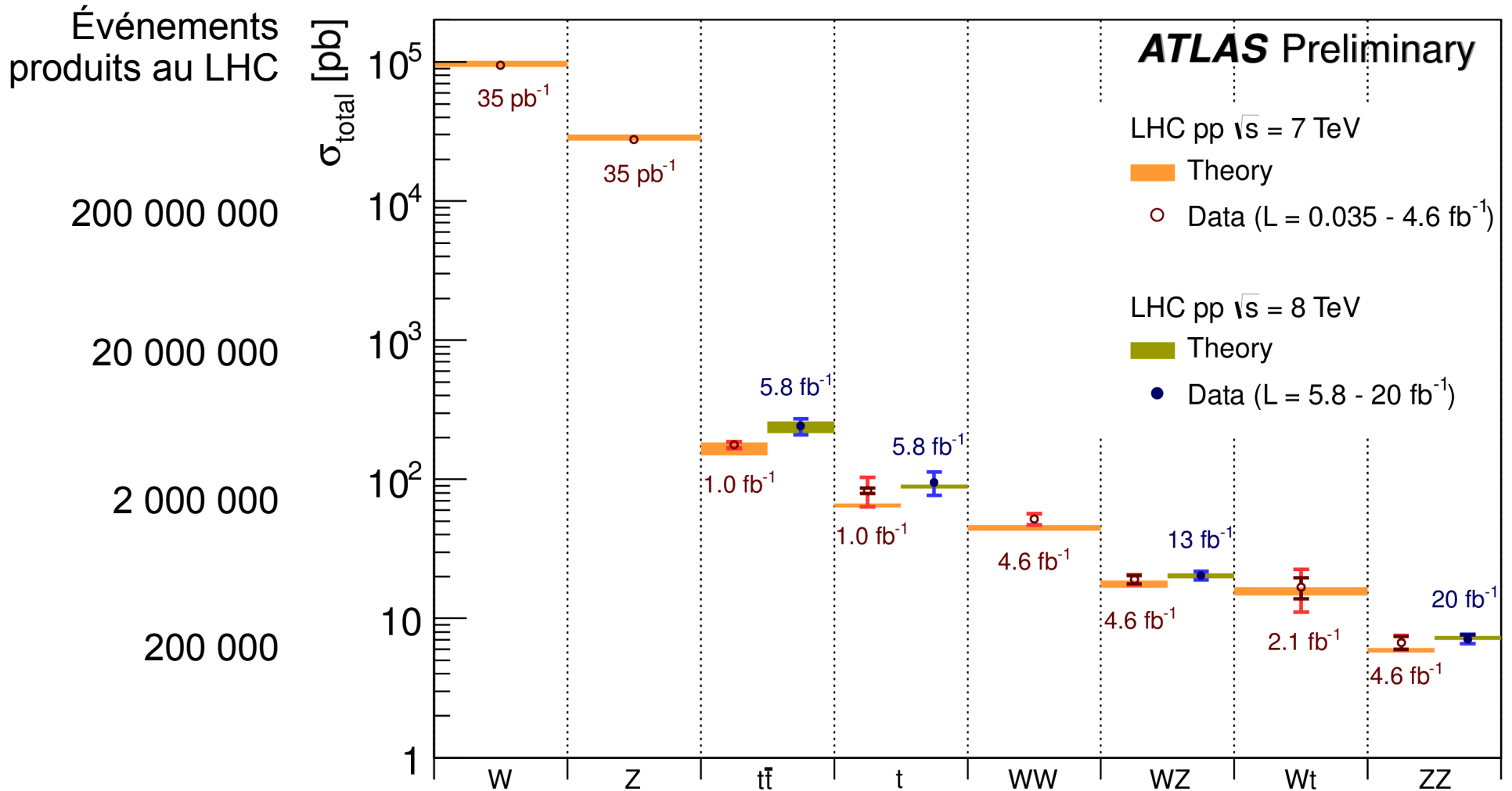
déc 2009

août 2010

Redécouverte par ATLAS

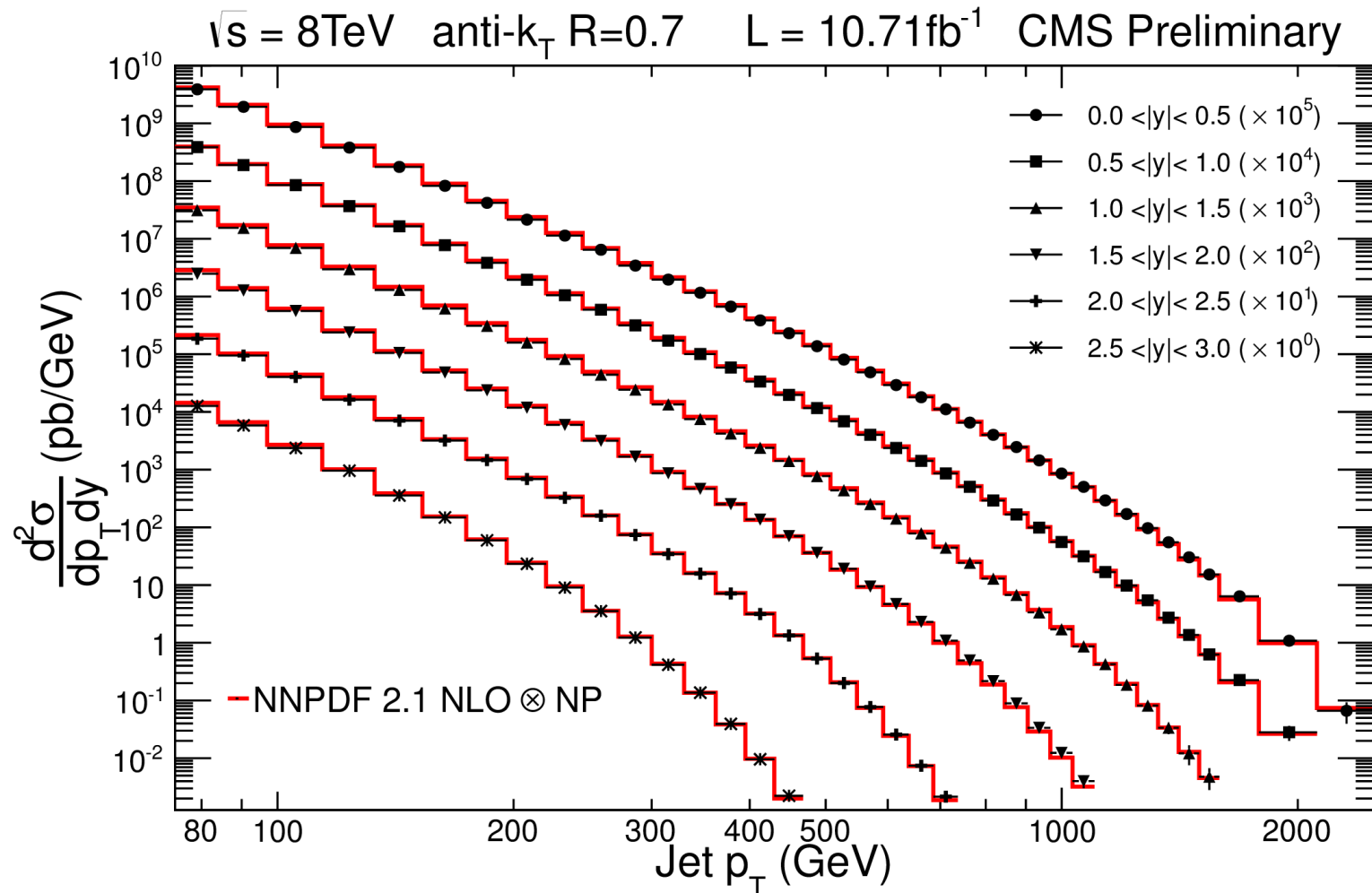


# Mesures du Modèle standard



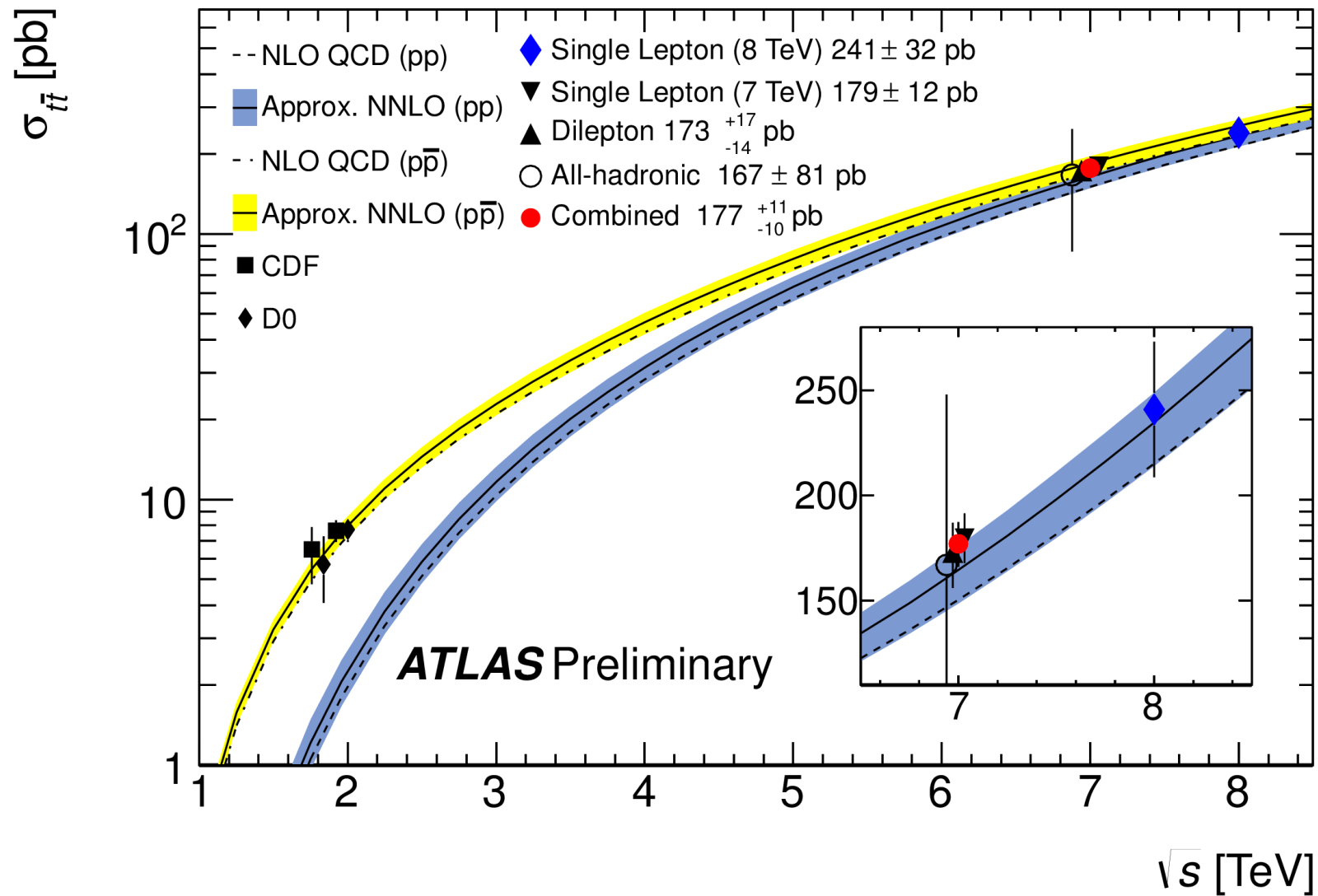
- Processus de plus en plus rares
- Mesures compatibles avec prédictions théoriques

# Accord sur de nombreux ordres de grandeur



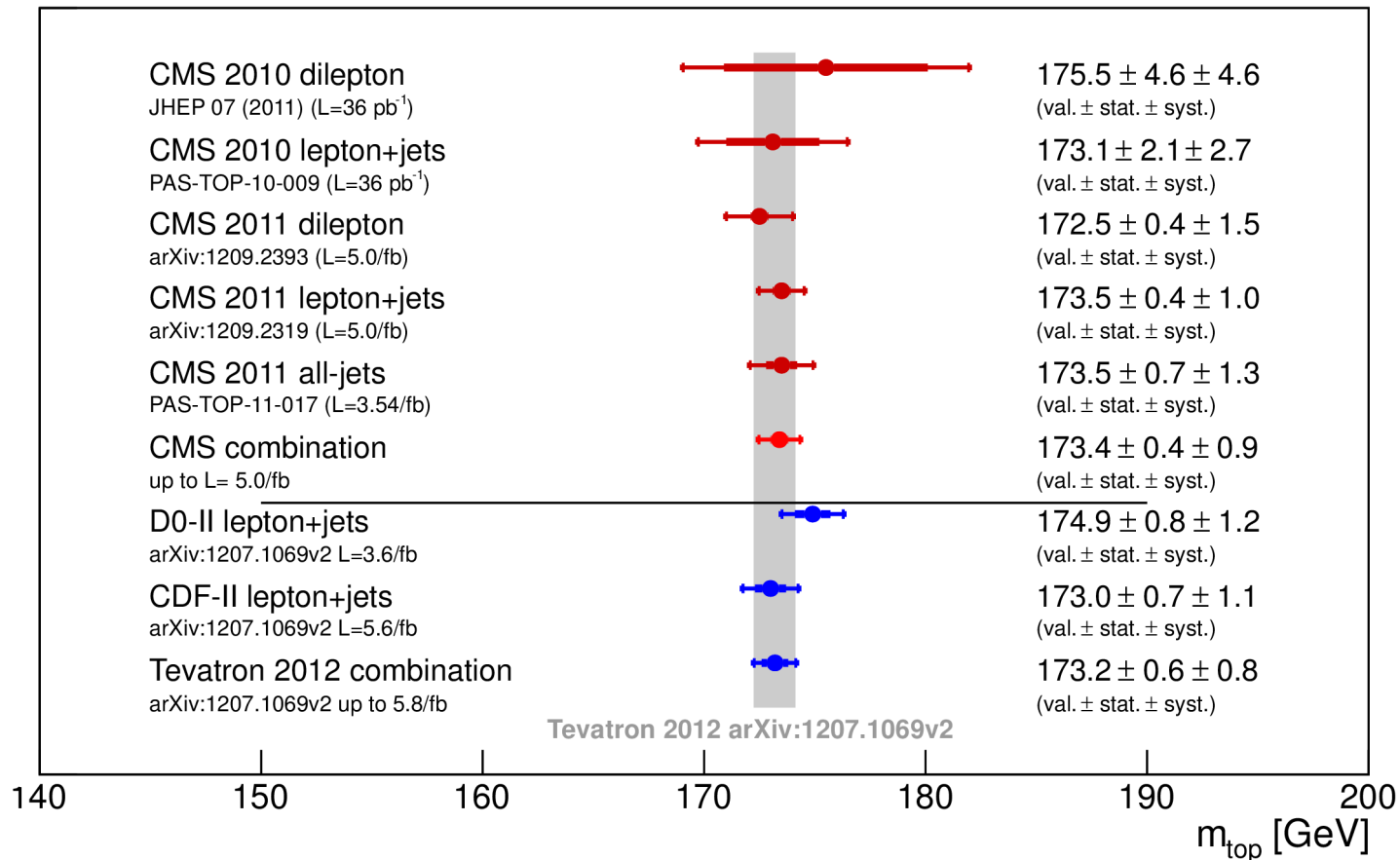
- Quantité de mouvement dans le plan transverse de jets de particules

# Production de quarks top



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

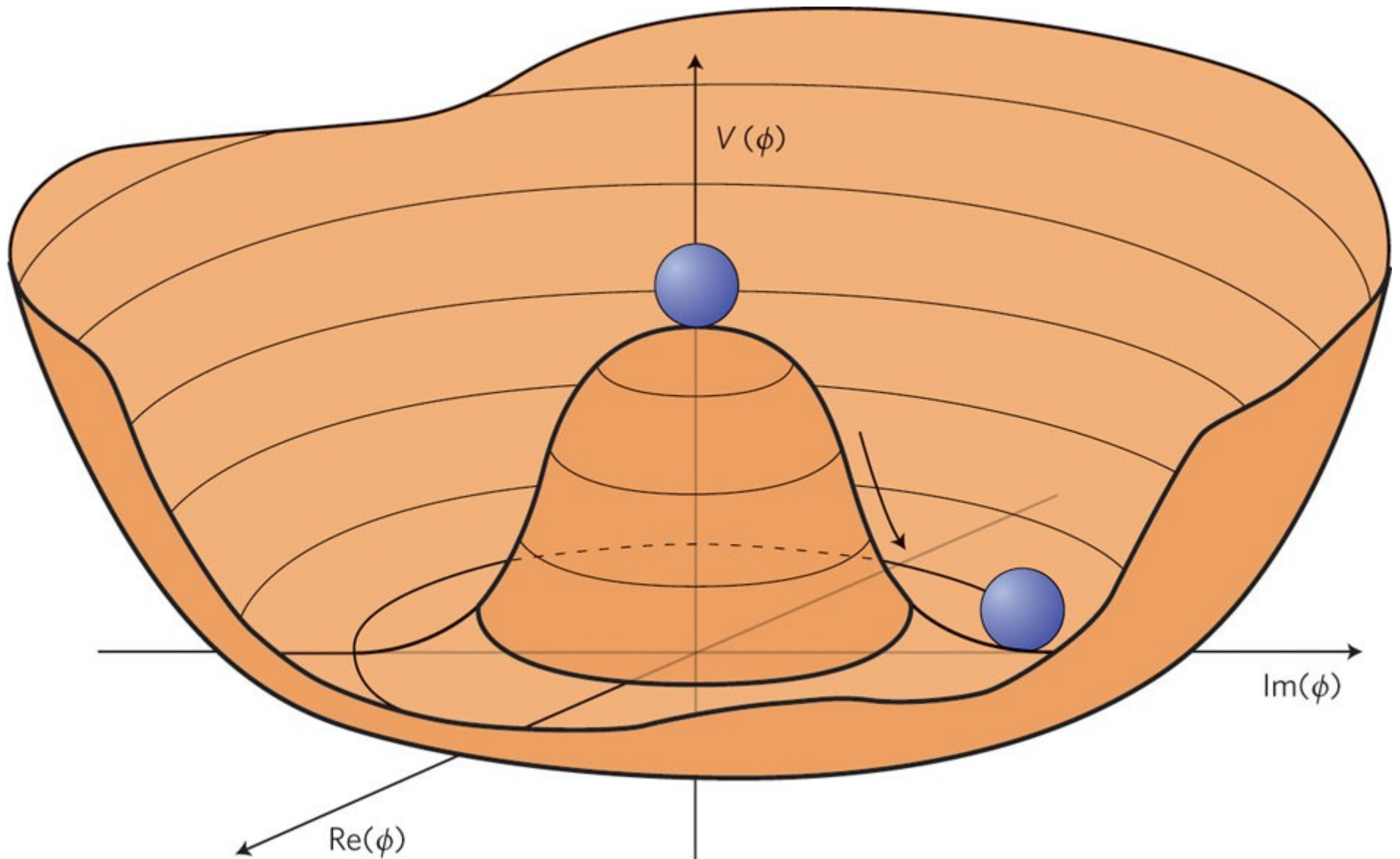
# Masse du quark top



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

# Brisure spontanée de la symétrie électrofaible

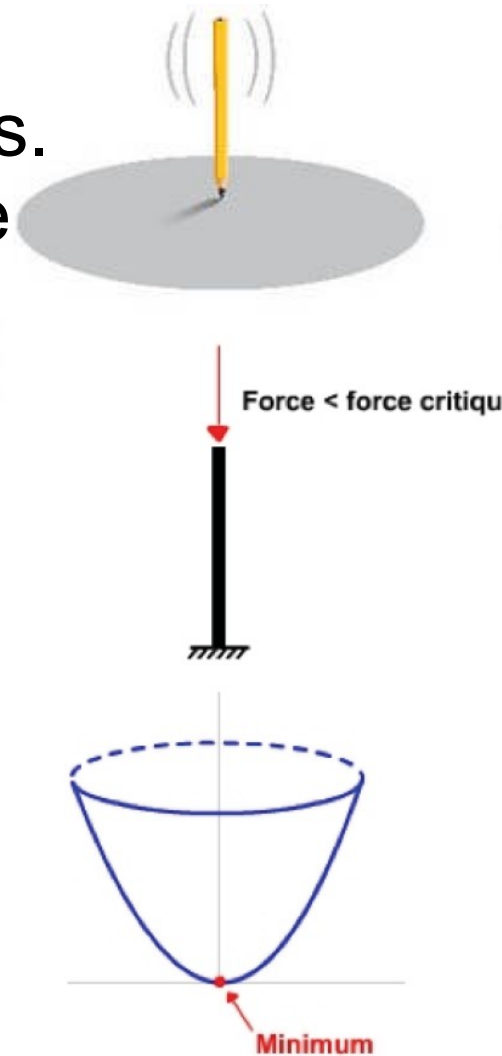
Le potentiel de Higgs : le « chapeau mexicain »



# Brisure spontanée de symétrie

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

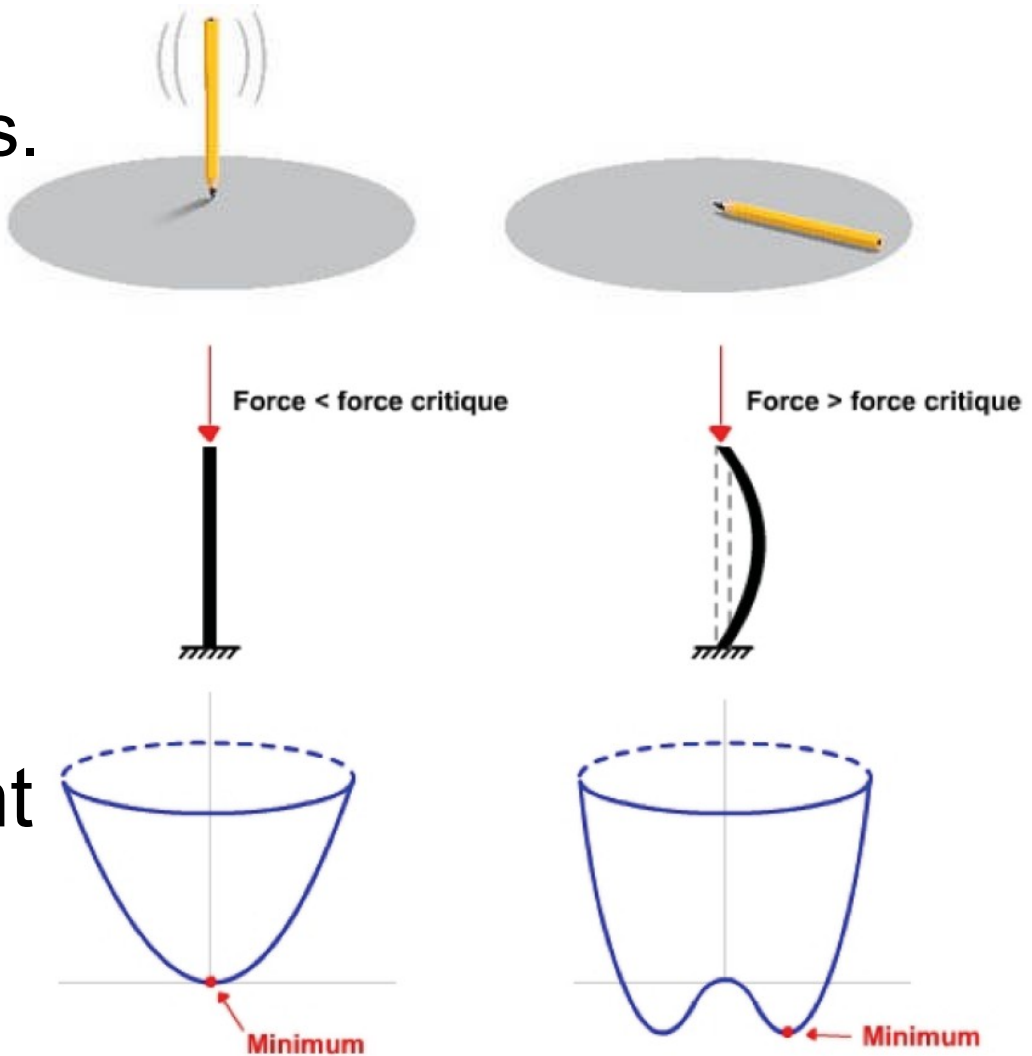
- ▶ du crayon qui tourne sur lui-même
- ▶ d'une barre en compression





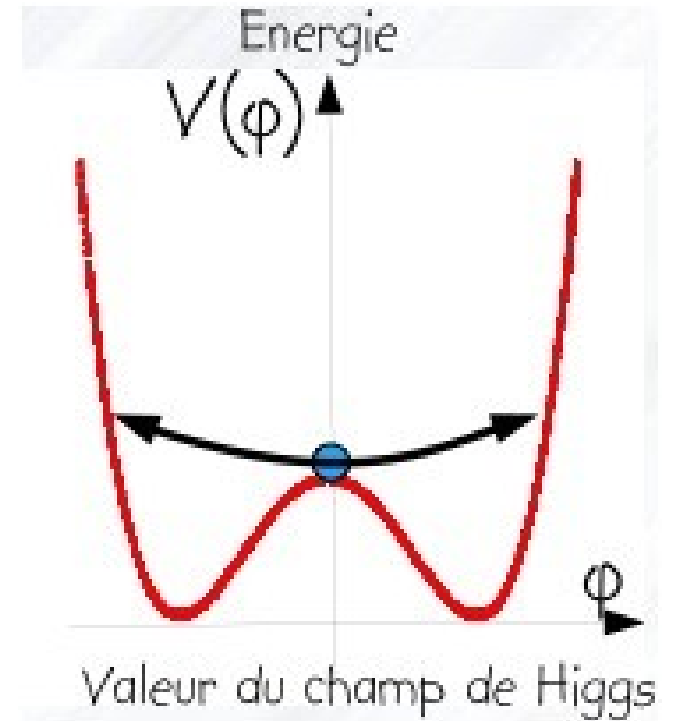
# Brisure spontanée de symétrie

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



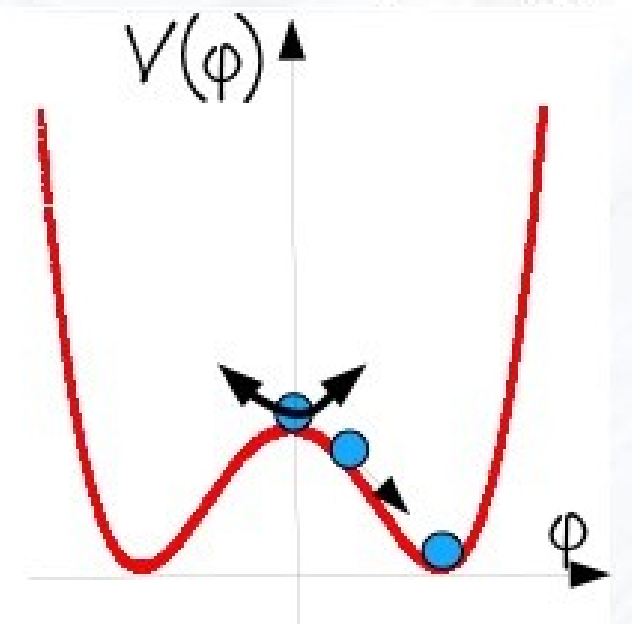
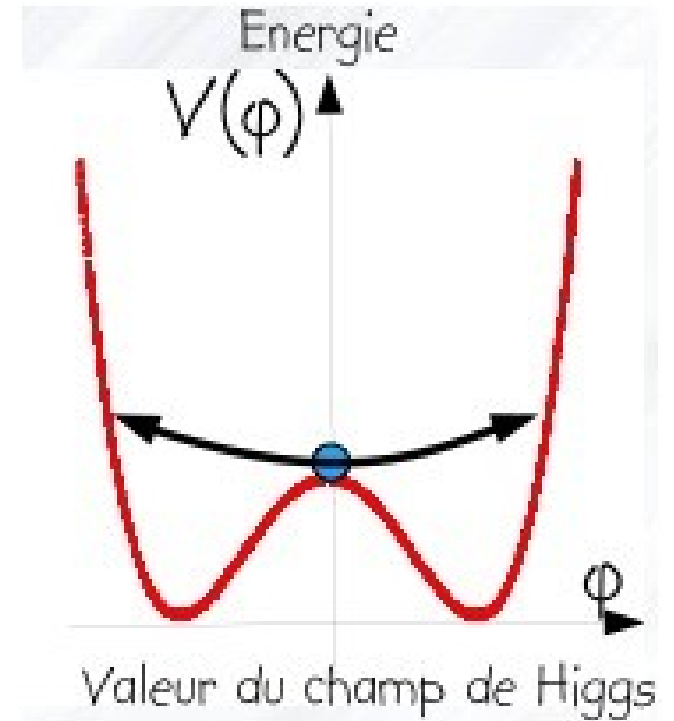
# Brisure de la symétrie électrofaible

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



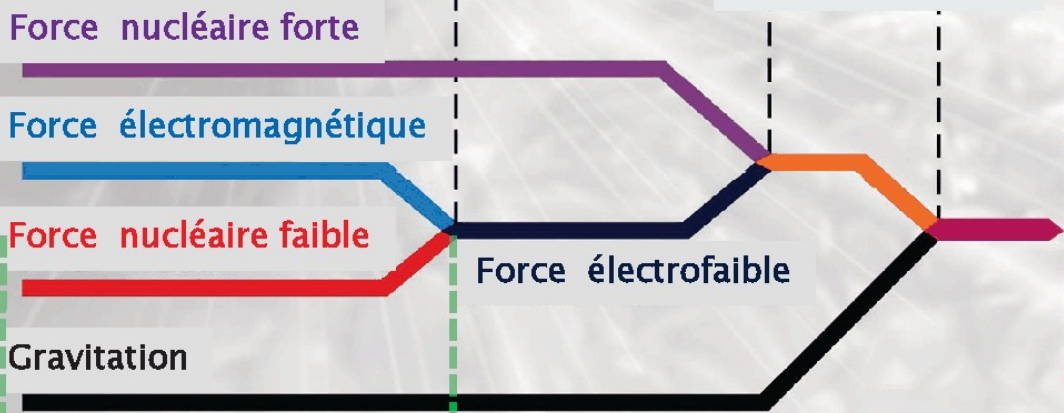
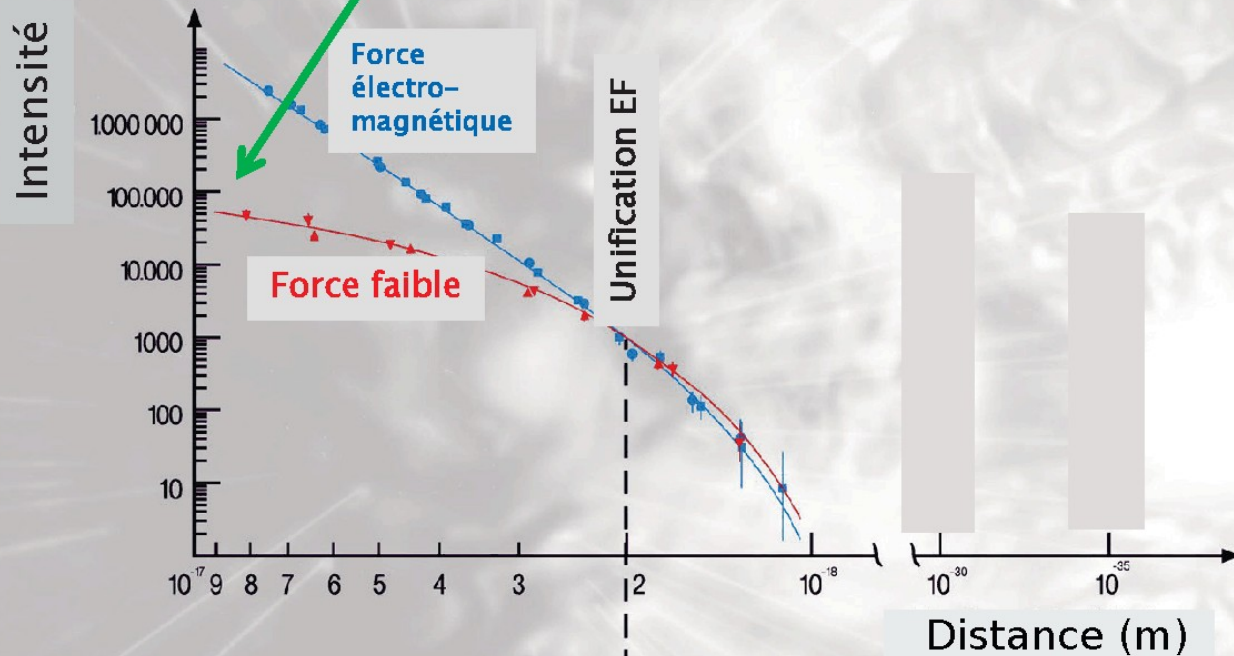
# Brisure de la symétrie électrofaible

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



# Unification électrofaible

basse énergie: différences entre  $\gamma$  et  $W/Z$   
pas de différence dans le formalisme mathématique !



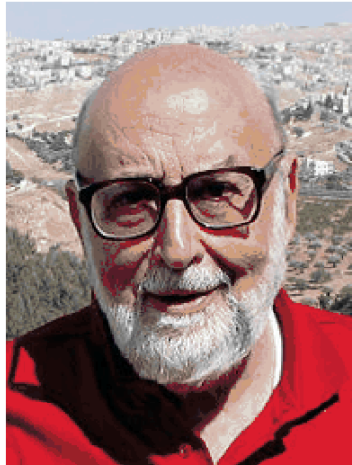
Big-Bang



13,7 milliards d'années (2,7 K)

$10^{-12}$  s ( $10^{15}$  K)

# 1964 : Le mécanisme de Higgs



## BROKEN SYMMETRY AND THE MASS OF GAUGE VECTOR MESONS\*

F. Englert and R. Brout

Faculté des Sciences, Université Libre de Bruxelles, Bruxelles, Belgium

(Received 26 June 1964)

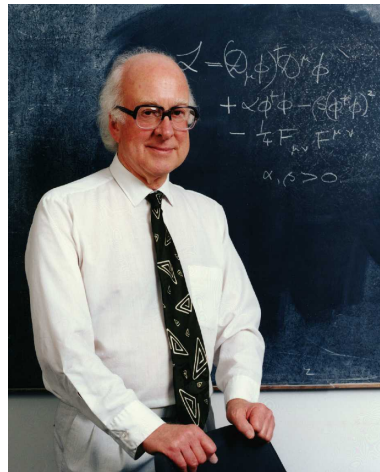
It is of interest to inquire whether gauge vector mesons acquire mass through interaction<sup>1</sup>; by a gauge vector meson we mean a Yang-Mills field<sup>2</sup> associated with the extension of a Lie group from global to local symmetry. The importance of this problem resides in the possibility that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

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

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

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

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



VOLUME 13, NUMBER 16

PHYSICAL REVIEW LETTERS

19 OCTOBER 1964

## BROKEN SYMMETRIES AND THE MASSES OF GAUGE BOSONS

Peter W. Higgs

Tait Institute of Mathematical Physics, University of Edinburgh, Edinburgh, Scotland

(Received 31 August 1964)

In a recent note<sup>1</sup> it was shown that the Goldstone theorem,<sup>2</sup> that Lorentz-covariant field theories in which spontaneous breakdown of symmetry under an internal Lie group occurs contain zero-mass particles, fails if and only if the conserved currents associated with the internal group are coupled to gauge fields. The purpose of the present note is to report that, as a consequence of this coupling, the spin-one quanta of some of the gauge fields acquire mass; the longitudinal degrees of freedom of these particles (which would be absent if their mass were zero) go over into the Goldstone bosons when the coupling tends to zero. This phenomenon is just the relativistic analog of the plasmon phenom-

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

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

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

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

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

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

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

# Mécanisme de Higgs en images



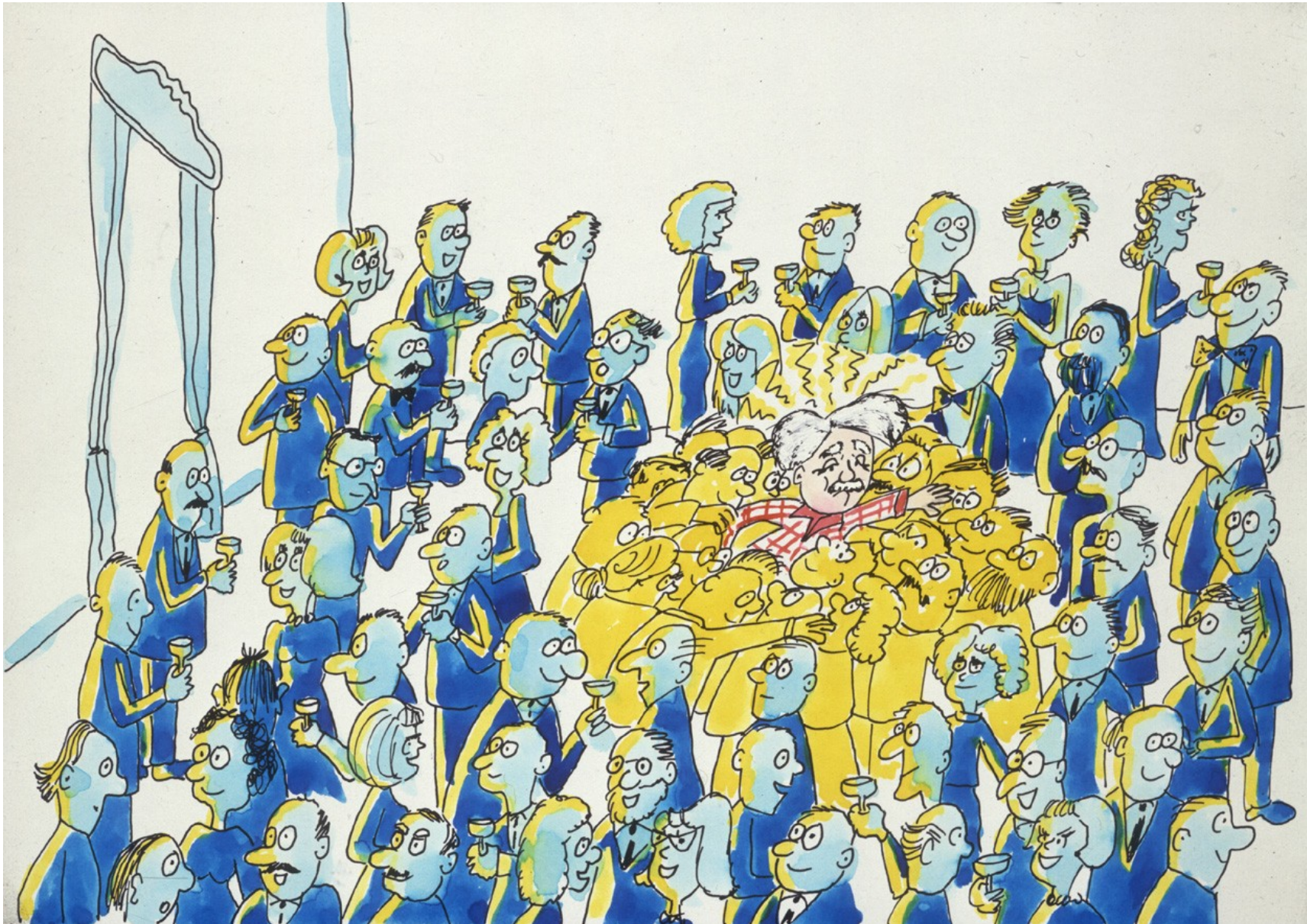
Imaginons qu'une salle pleine de physiciens conversant calmement est comme l'espace occupé seulement par le champ de Higgs...

# Mécanisme de Higgs en images



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

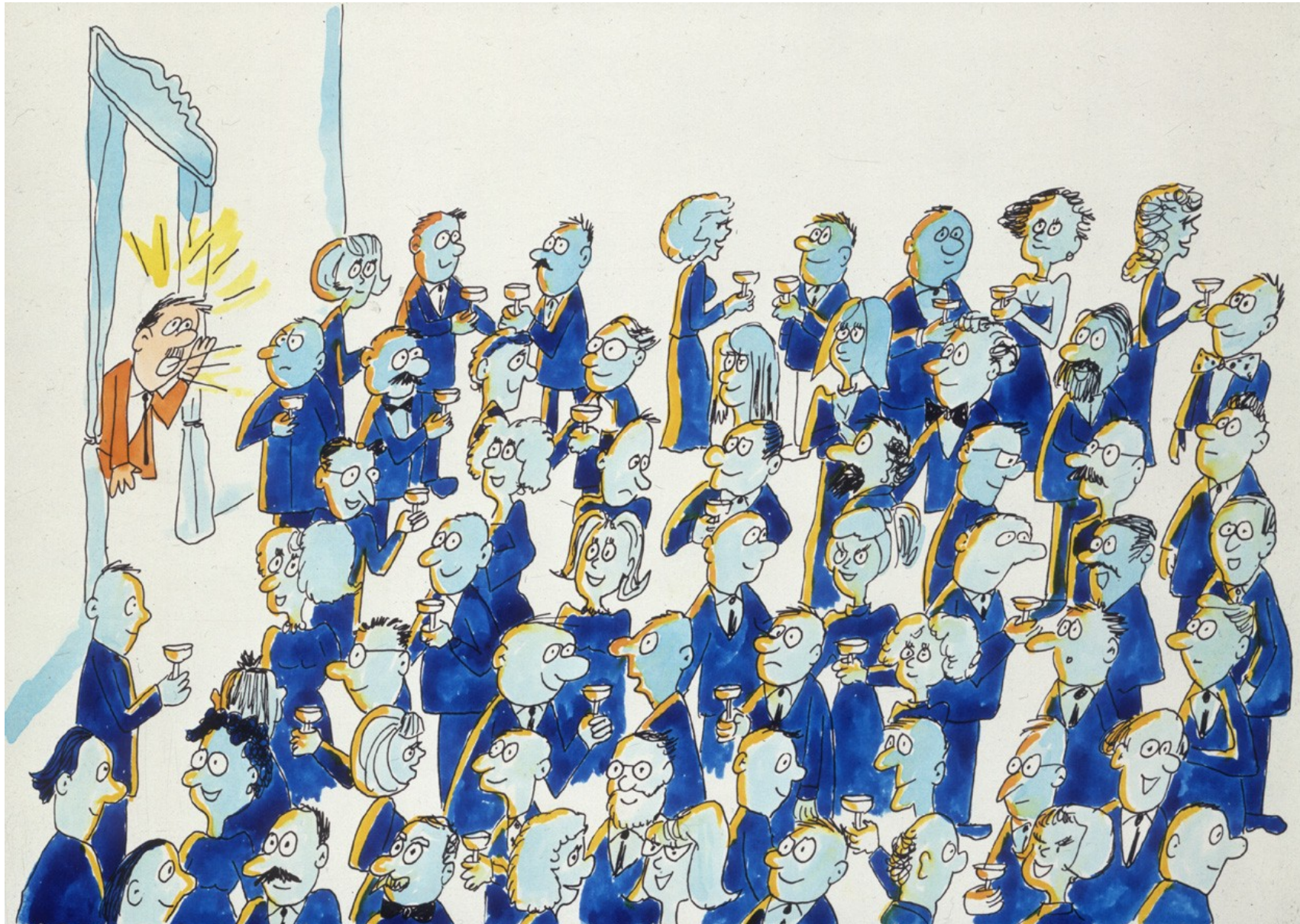
# Mécanisme de Higgs en images



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



# Mécanisme de Higgs en images



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

# Mécanisme de Higgs en images



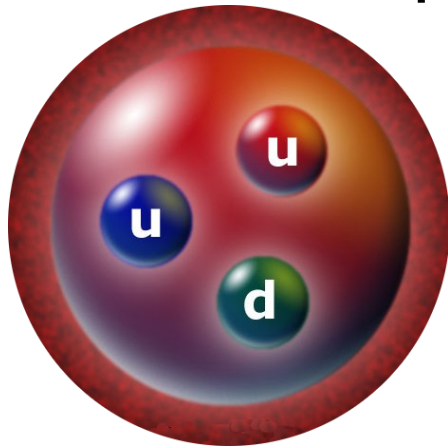
... elle donne naissance à un essaim de même type, composé cette fois des seuls physiciens. Cet essaim représente la particule de Higgs.

# Interactions avec le boson de Higgs



# La masse

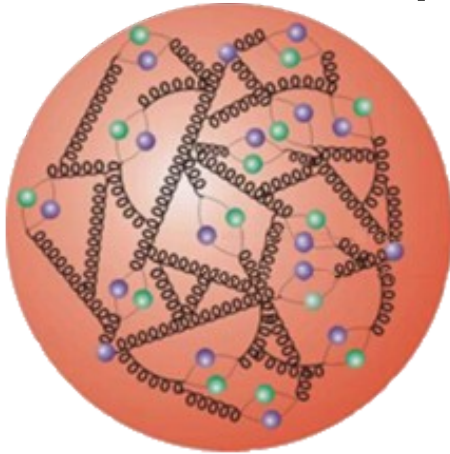
- Notre masse : celle de nos atomes
- Masse des atomes : presque uniquement celle des noyaux, faits de protons et neutrons de masse  $\sim 1$  GeV



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

# La masse

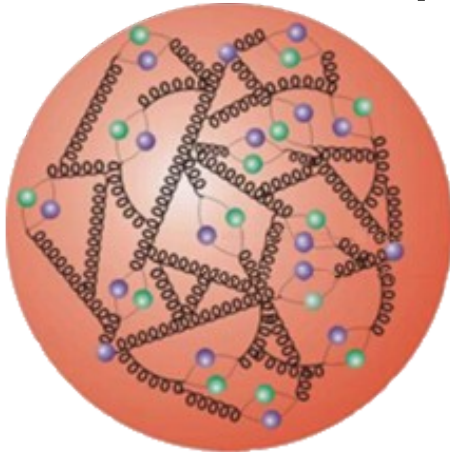
- Notre masse : celle de nos atomes
- Masse des atomes : presque uniquement celle des noyaux, faits de protons et neutrons de masse  $\sim 1$  GeV



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

# La masse

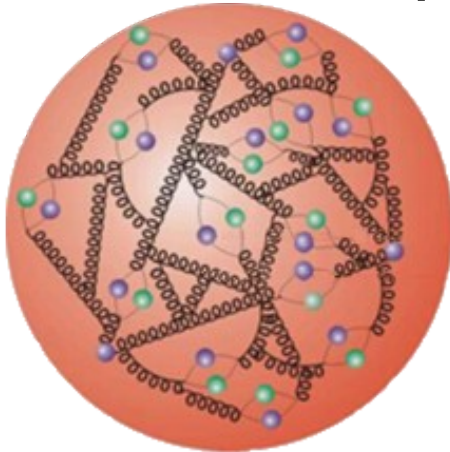
- Notre masse : celle de nos atomes
- Masse des atomes : presque uniquement celle des noyaux, faits de protons et neutrons de masse  $\sim 1$  GeV



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

# La masse

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



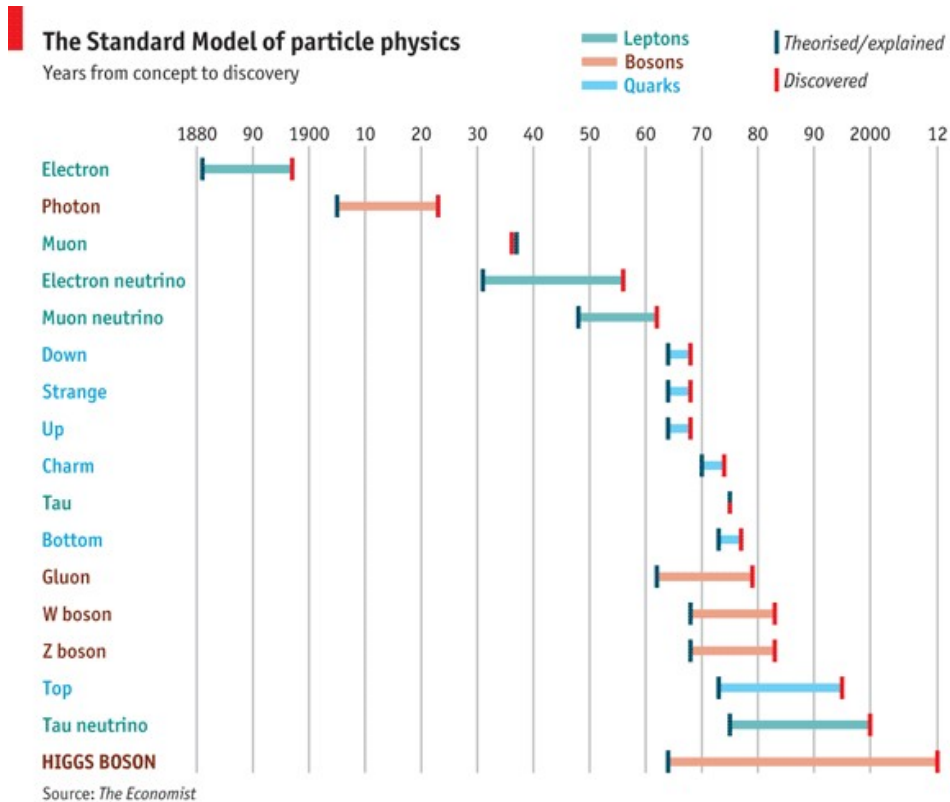
- En réalité, plein de gluons, dont l'énergie donne 99% de leur masse au proton et au neutron ( $E=mc^2$ )
- Boson de Higgs : explique « seulement » la masse des particules élémentaires (quarks, électron [leptons], bosons Z et  $W^\pm$ ) et la sienne
- Pas grand chose ? Sans lui, pas d'atomes, pas de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

# Pourquoi ce battage médiatique le 4 juillet 2012 ?





# Une longue quête



© The Economist

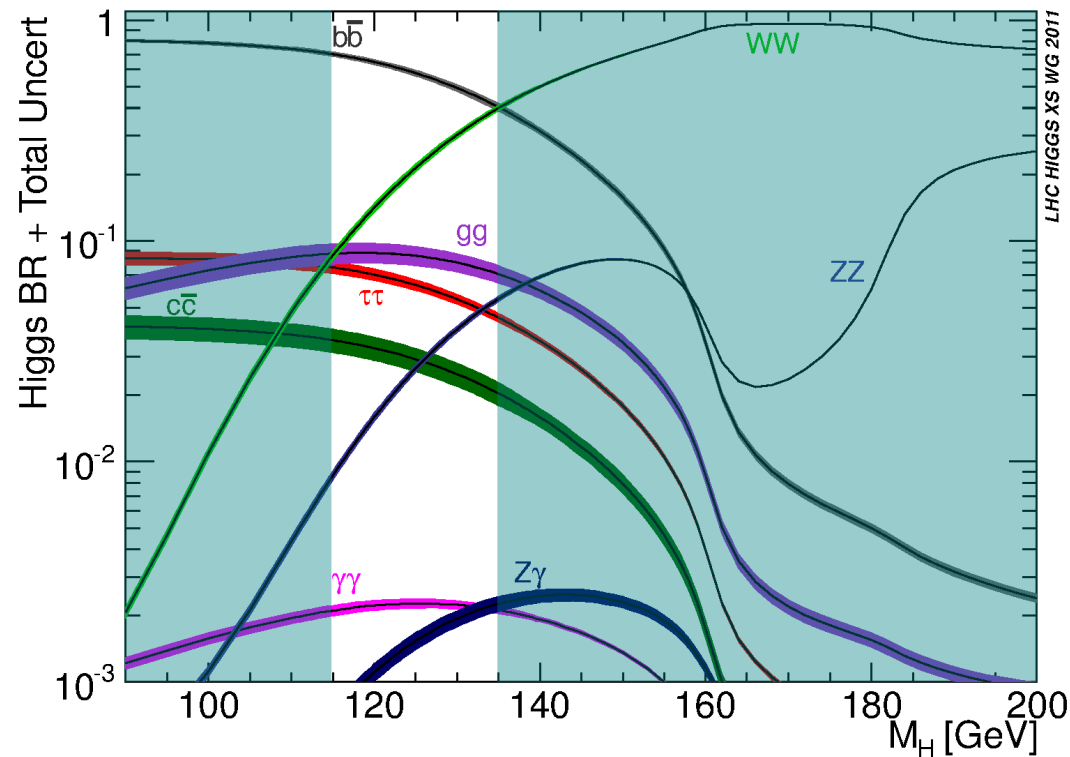
- Modèle standard : énorme succès, sauf que les particules n'ont pas de masse...
- Boson de Higgs : pièce essentielle pour accorder théorie et expérience
- 48 ans entre la prédiction théorique et la découverte expérimentale !
- Pourquoi ? La théorie prédit tout sur le boson de Higgs, sauf sa masse !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

# 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  $\gamma\gamma$

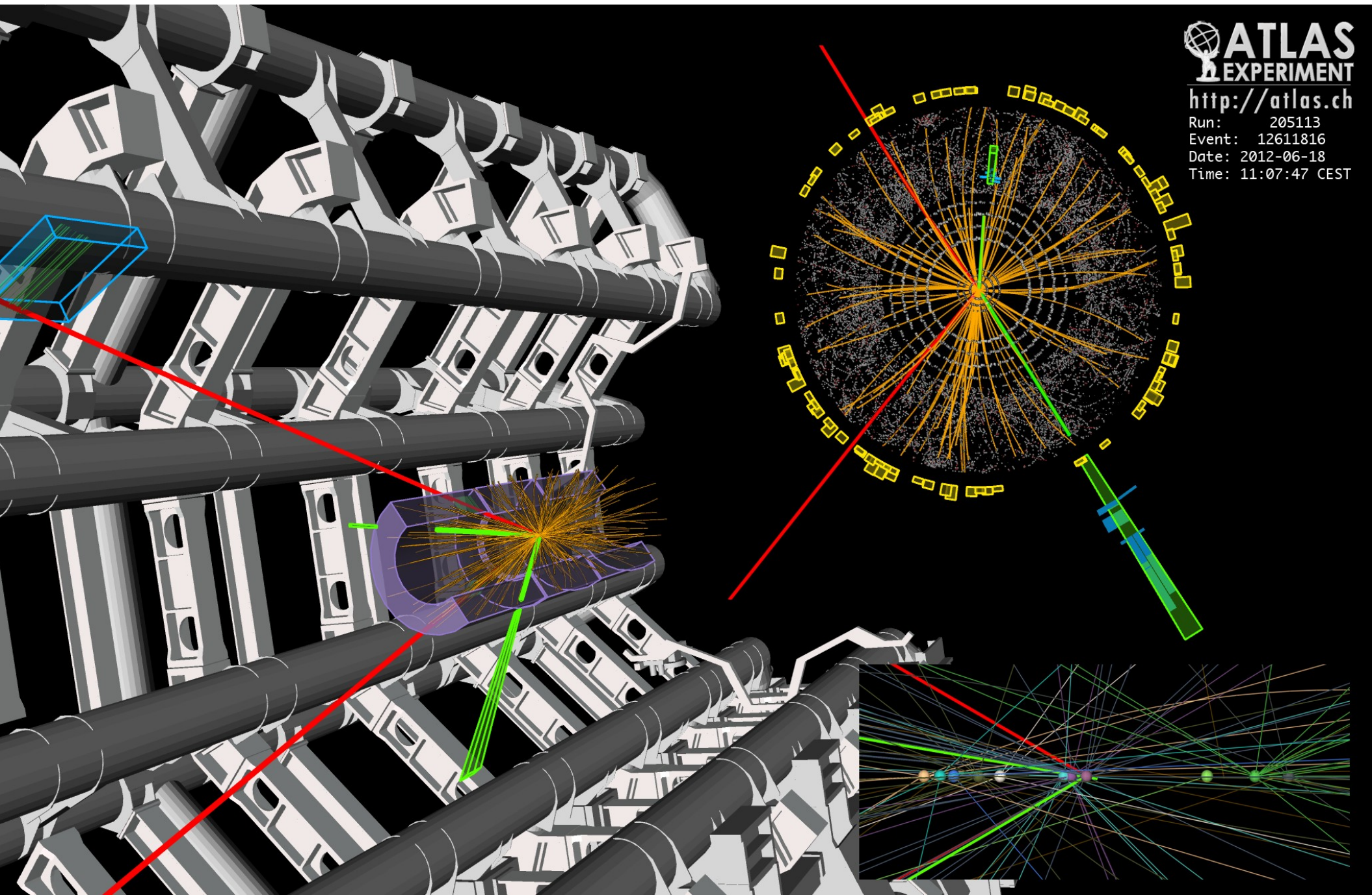


- Note : le plus fréquent n'est pas forcément le plus facile à observer

# Boson de Higgs dans ATLAS



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



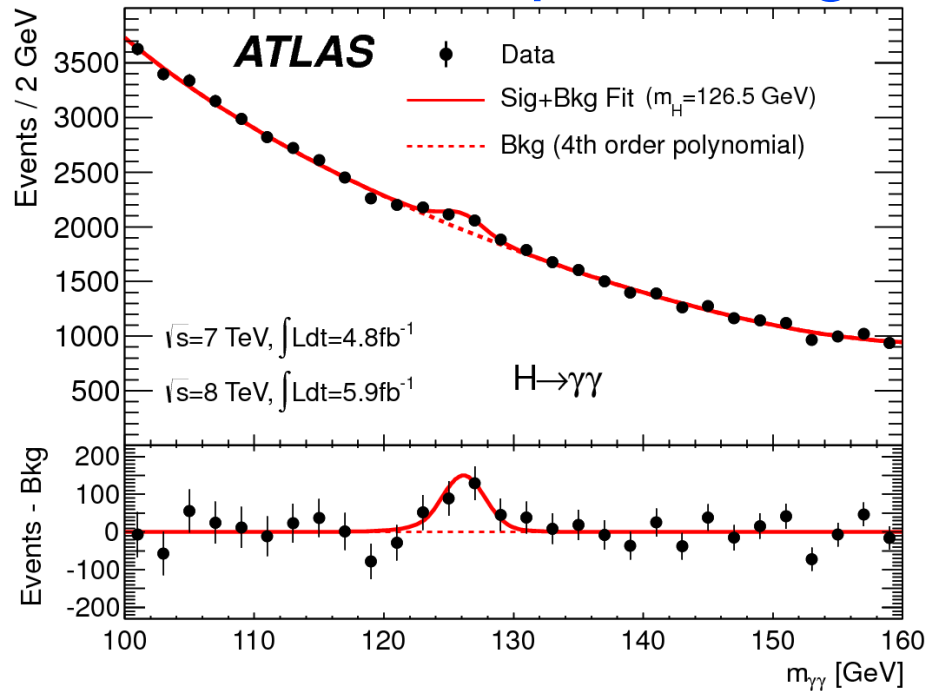
**ATLAS**  
EXPERIMENT

<http://atlas.ch>

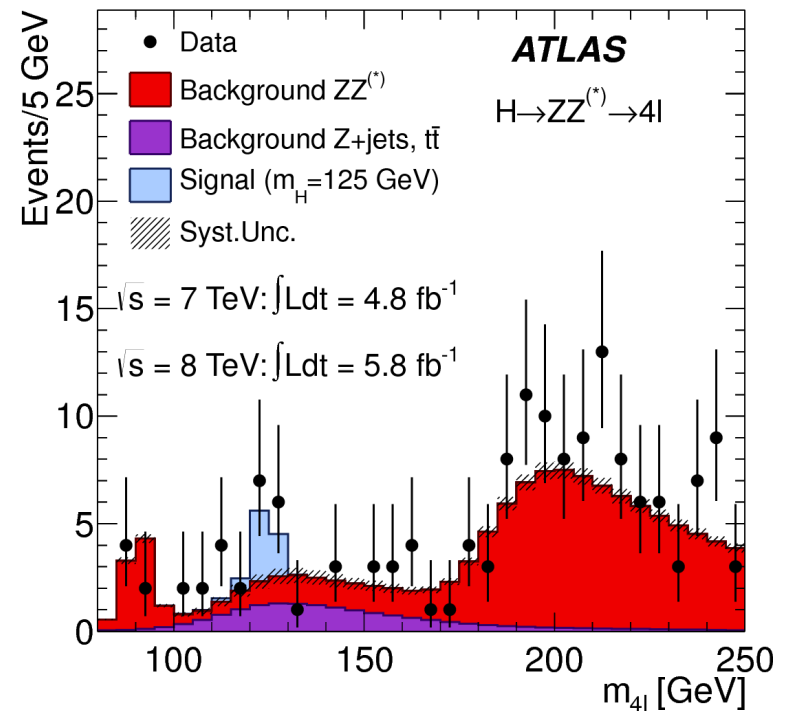
Run: 205113  
Event: 12611816  
Date: 2012-06-18  
Time: 11:07:47 CEST

# 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

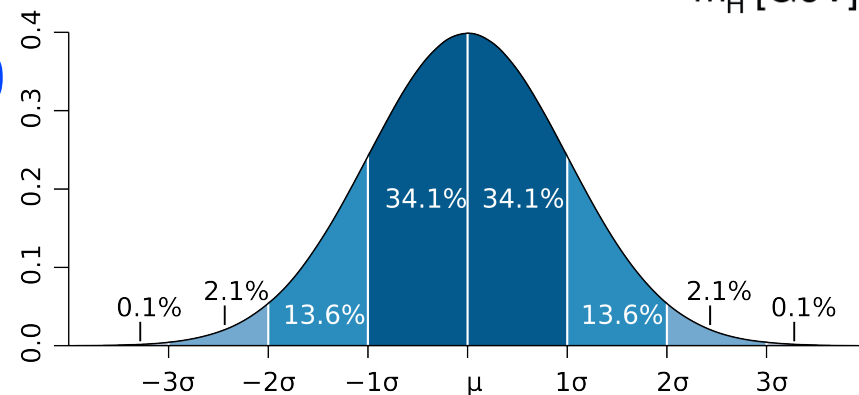
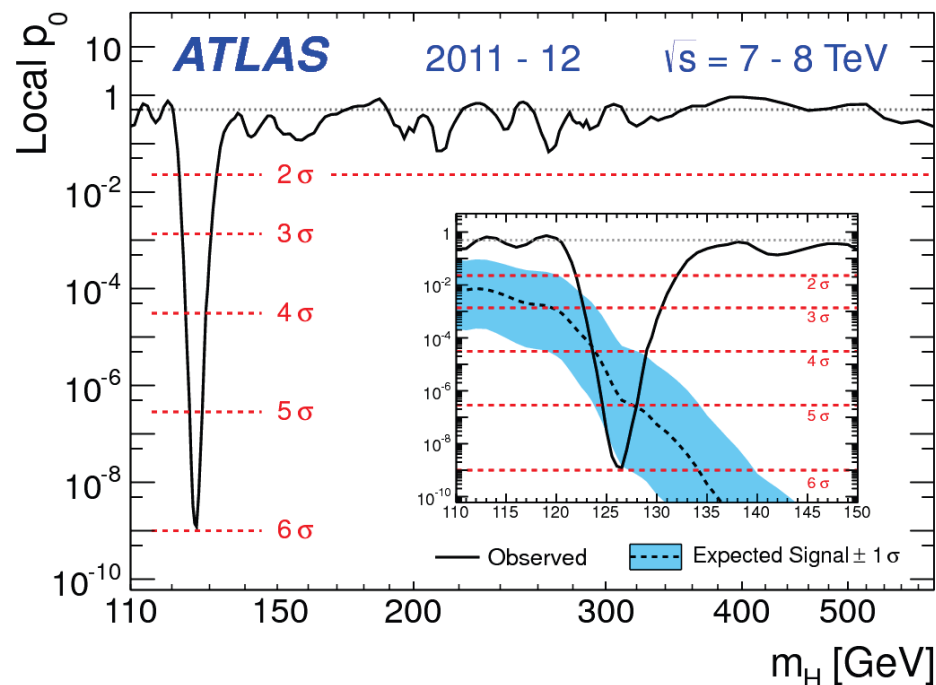
# Significance statistique

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

- Quantifié en nombre de déviations standard :

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

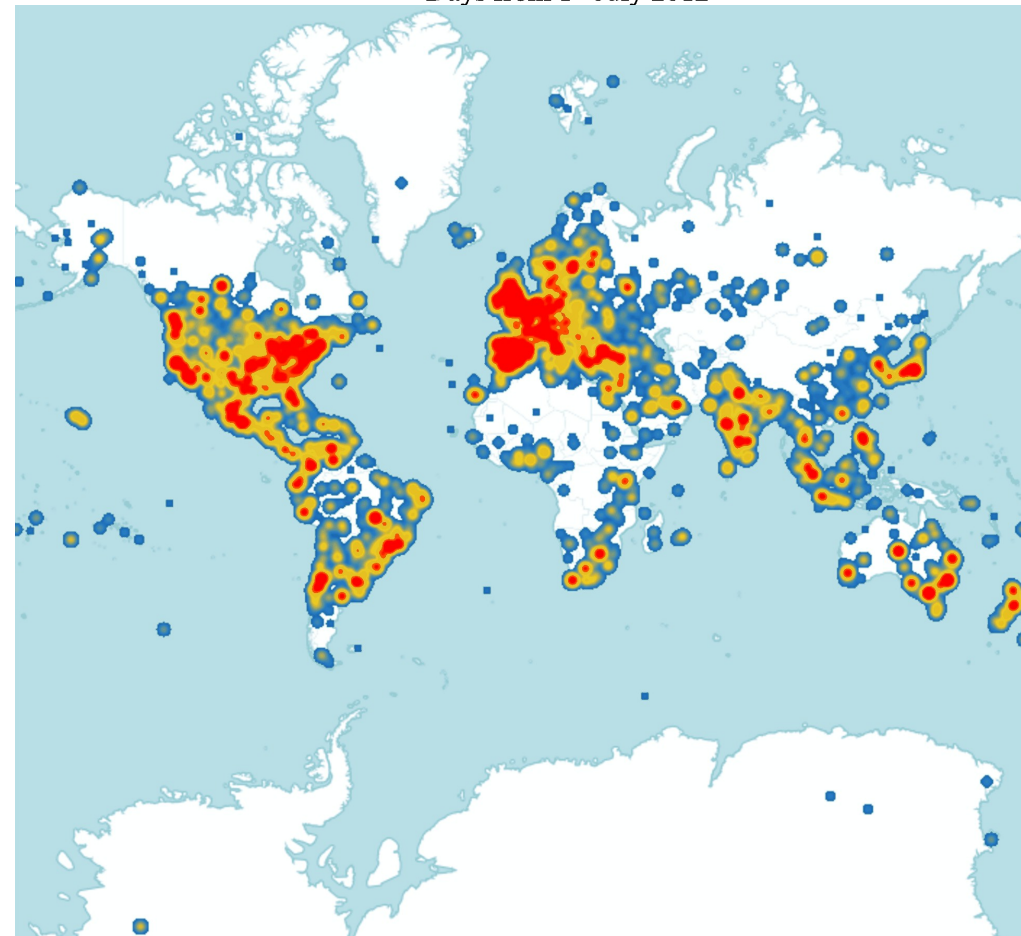
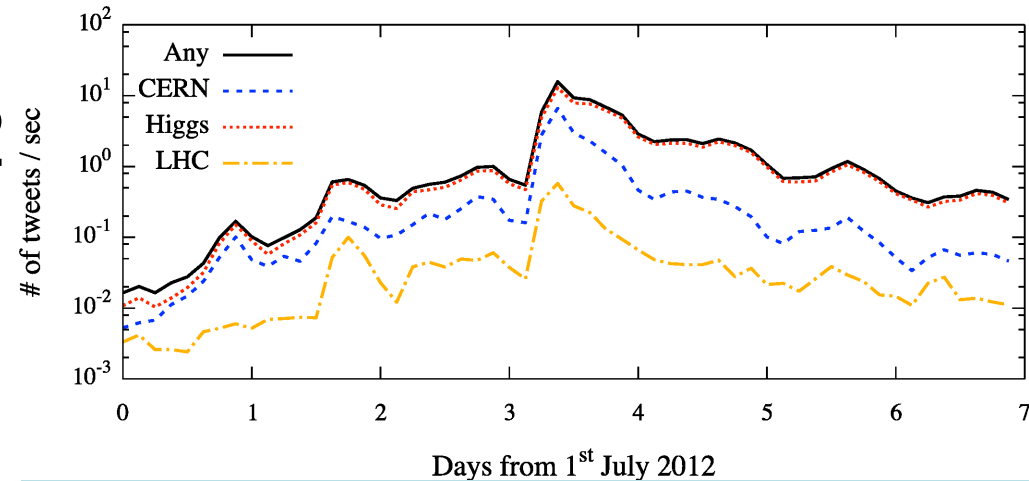
- Donc nous sommes sûrs d'avoir trouvé quelque chose



# Résultats

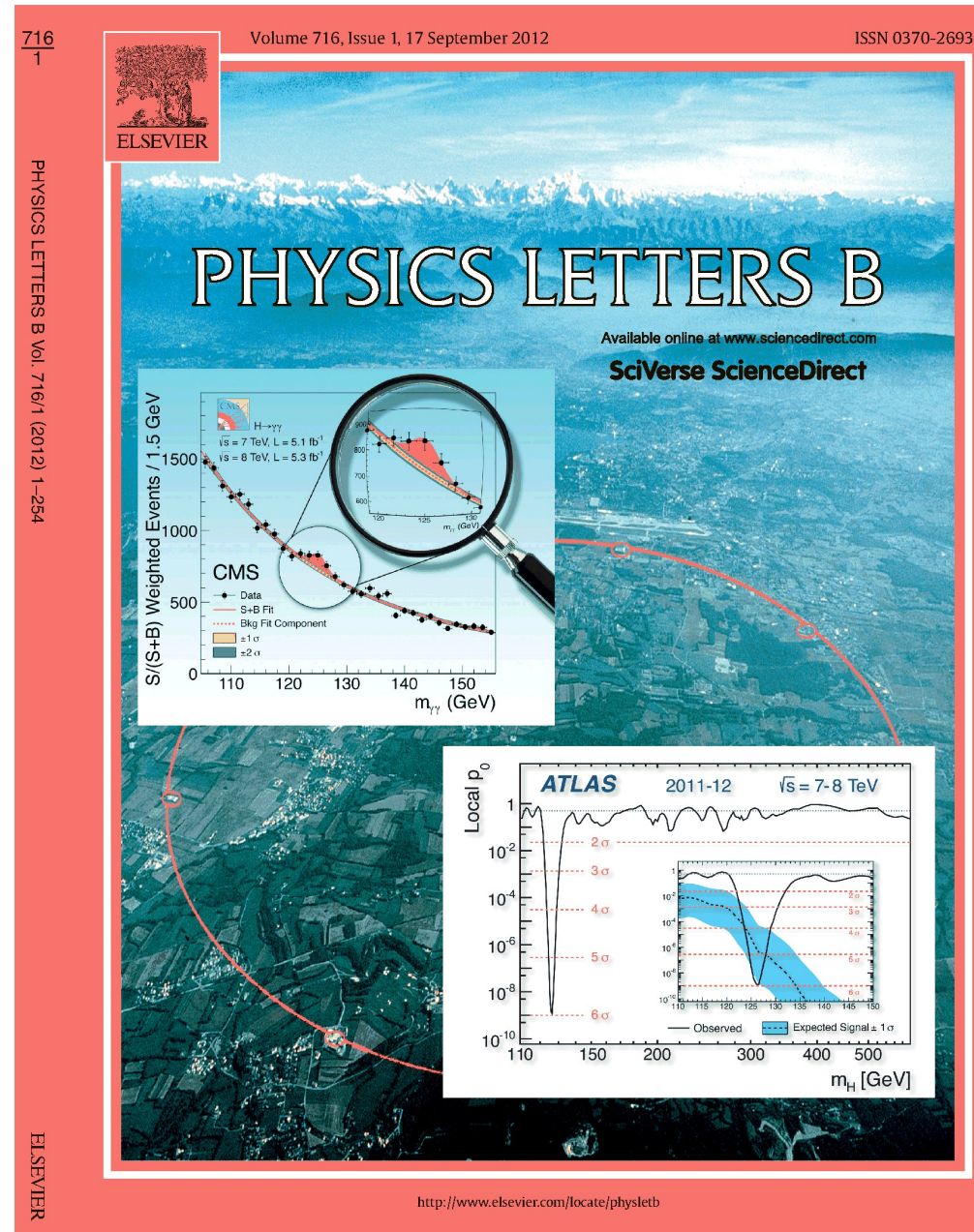
- Annoncés le 4 juillet 2012 lors d'un séminaire au CERN

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



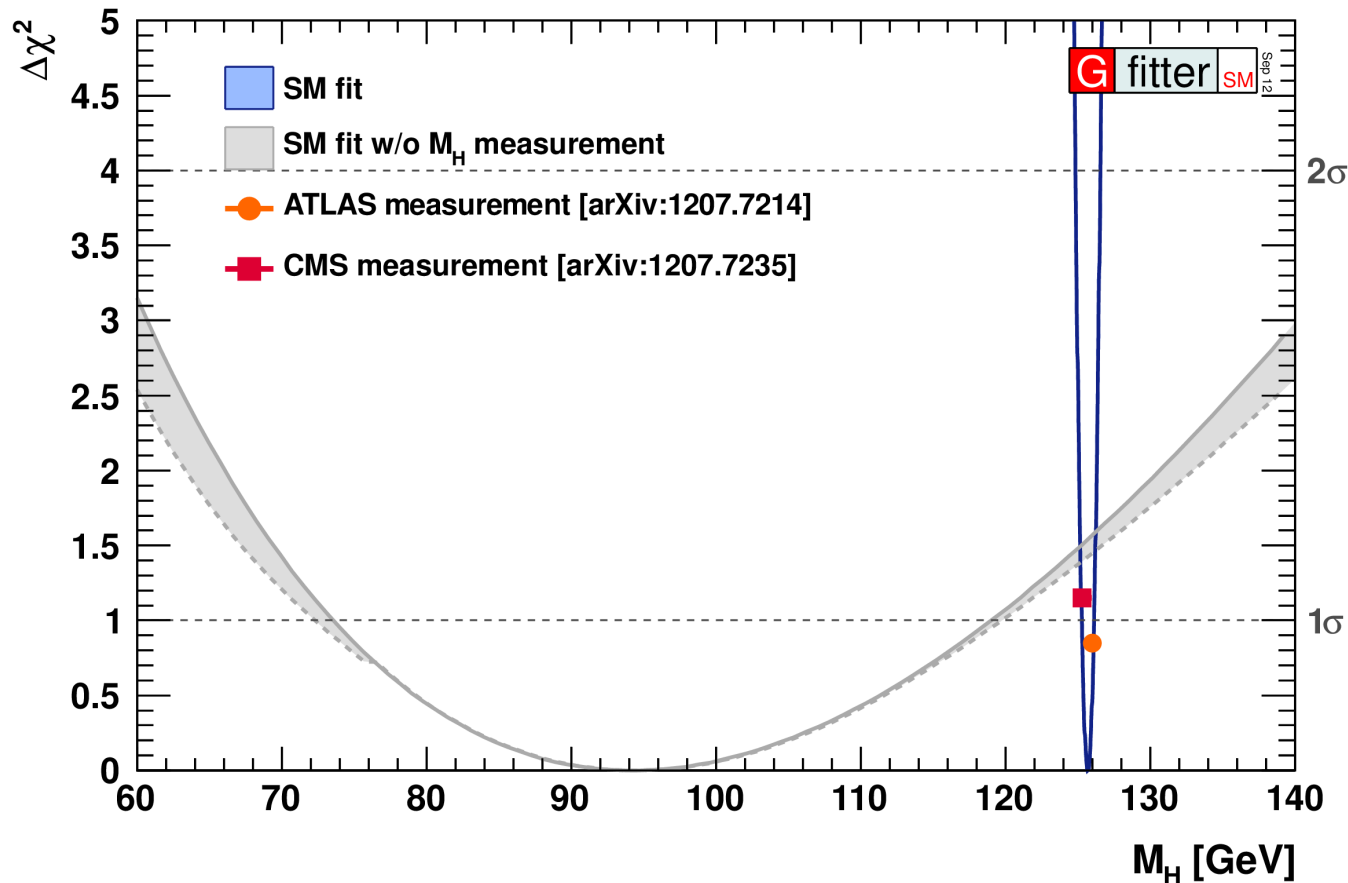
# Résultats

- 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 ?



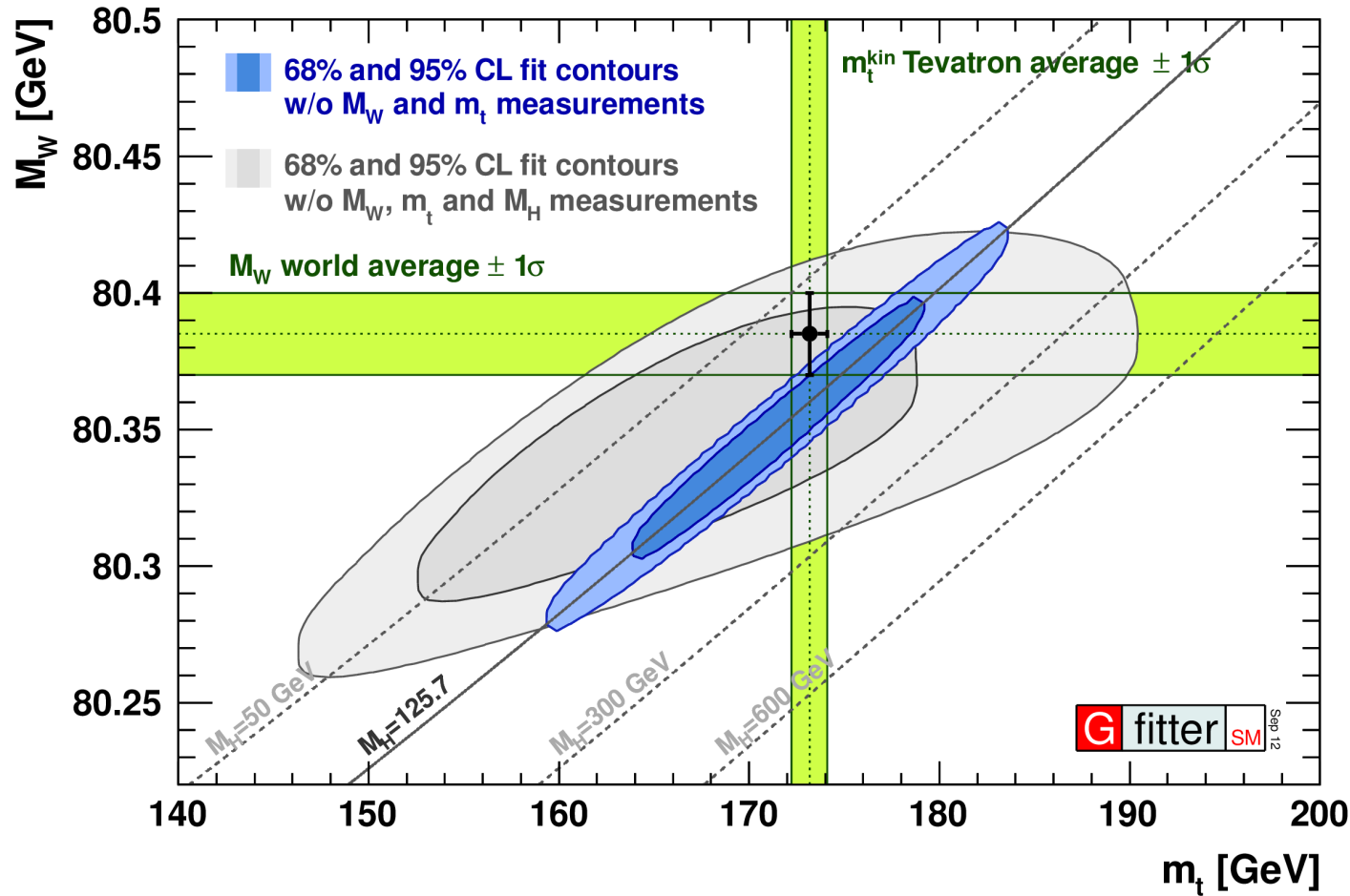


# Consistent avec les autres mesures du modèle standard ?



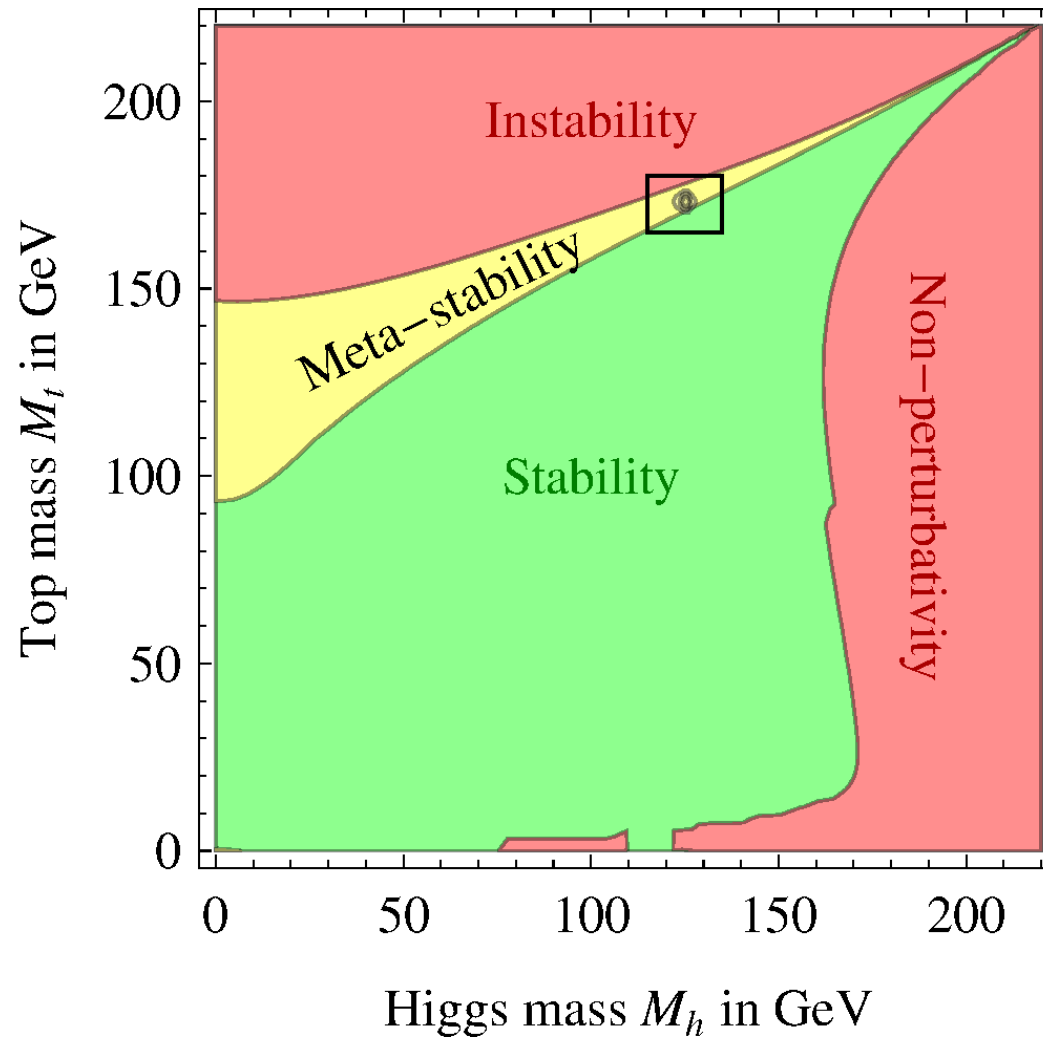
- Pas très éloigné de l'endroit que les autres mesures indiquaient
- Pas de « tension » avec le modèle standard

# Consistent avec les autres mesures du modèle standard ?



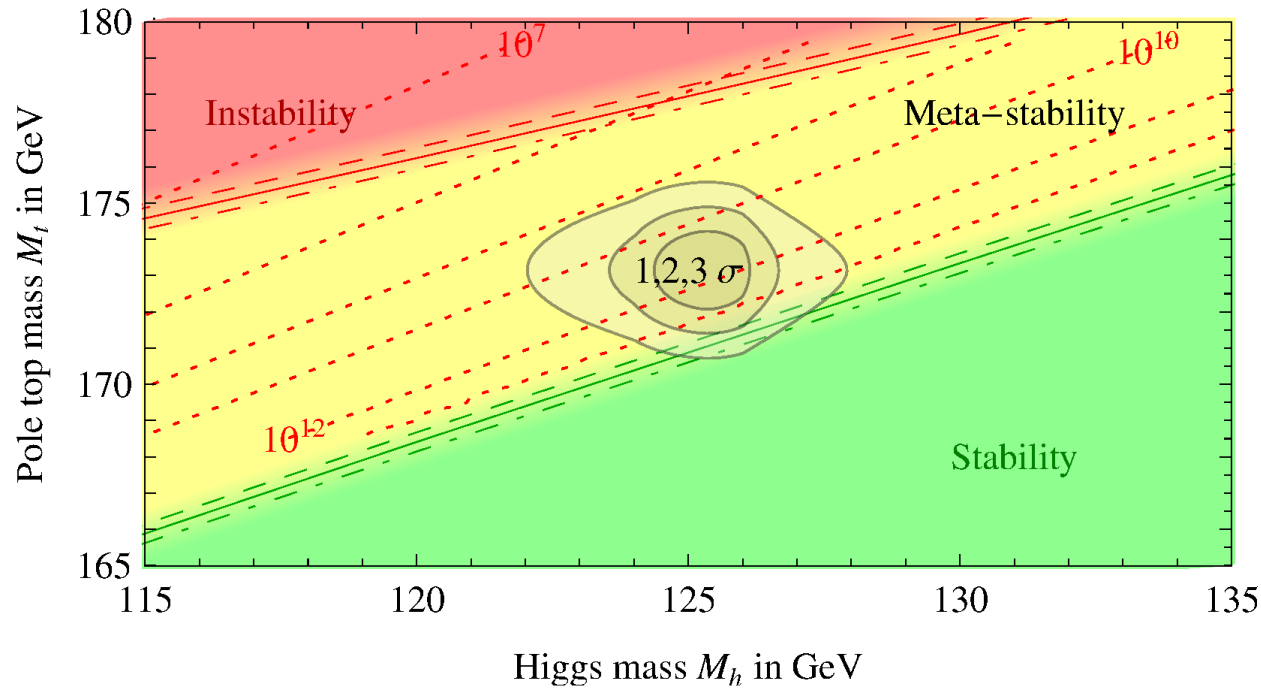
- Pas très éloigné de l'endroit que les autres mesures indiquaient
- Pas de « tension » avec le modèle standard

# Un univers instable ?



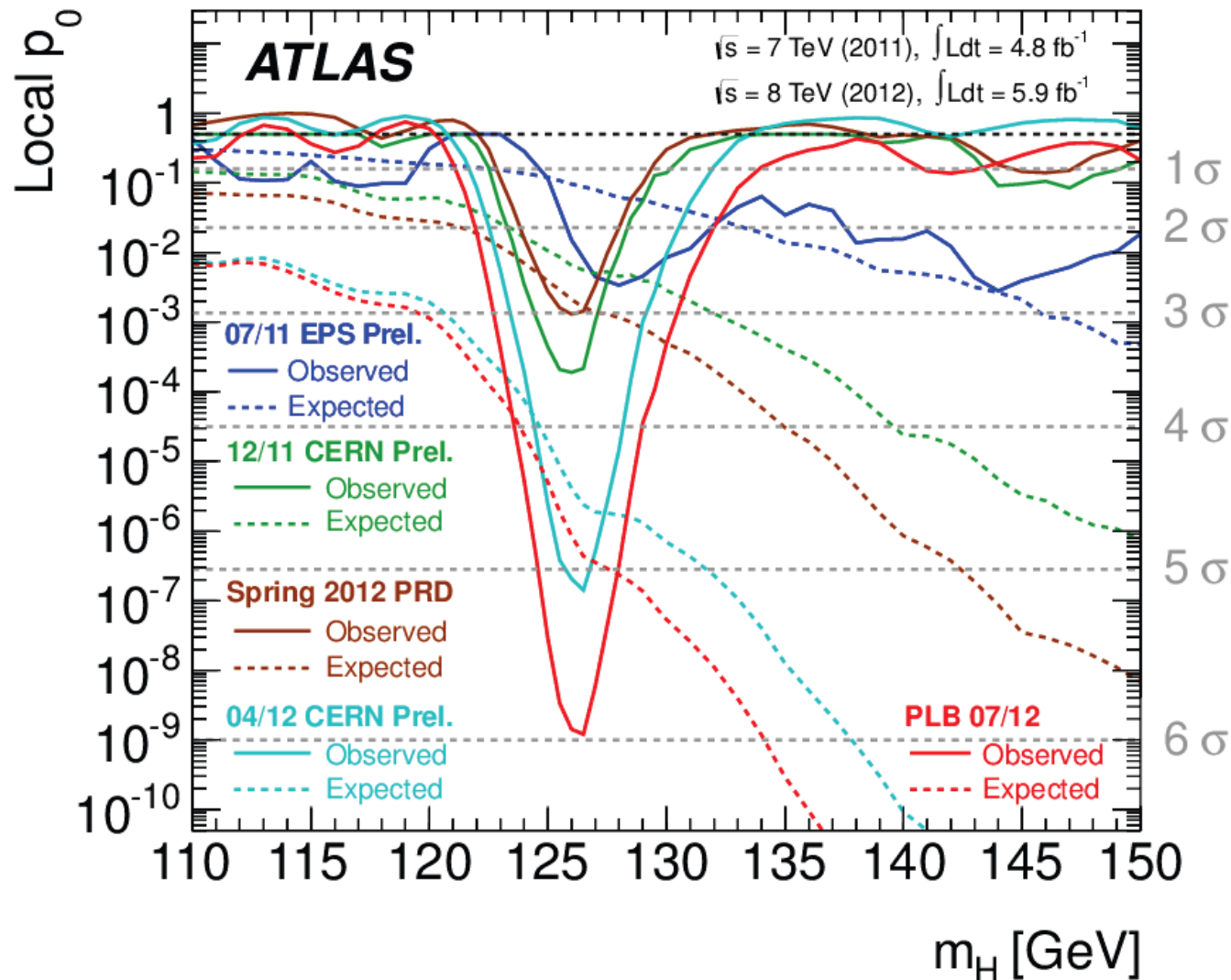
- Plutôt méta-stable, stable à l'échelle de l'âge de l'Univers. Ouf !
- Besoin d'améliorer la précision de  $m_t$  pour en savoir plus

# 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

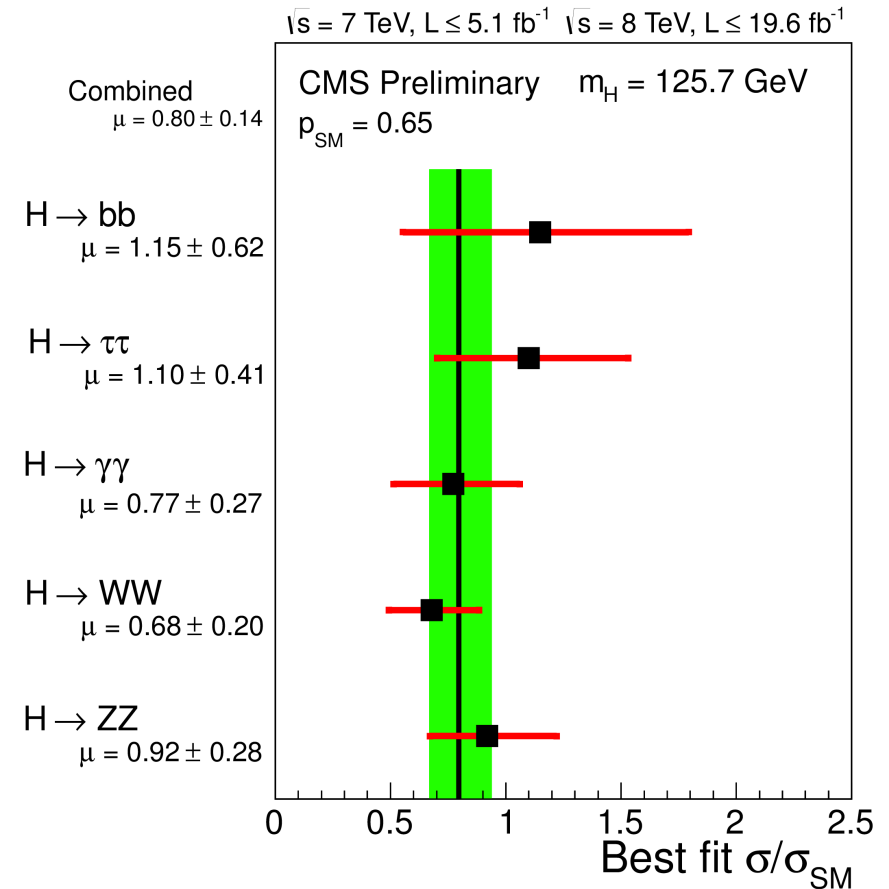
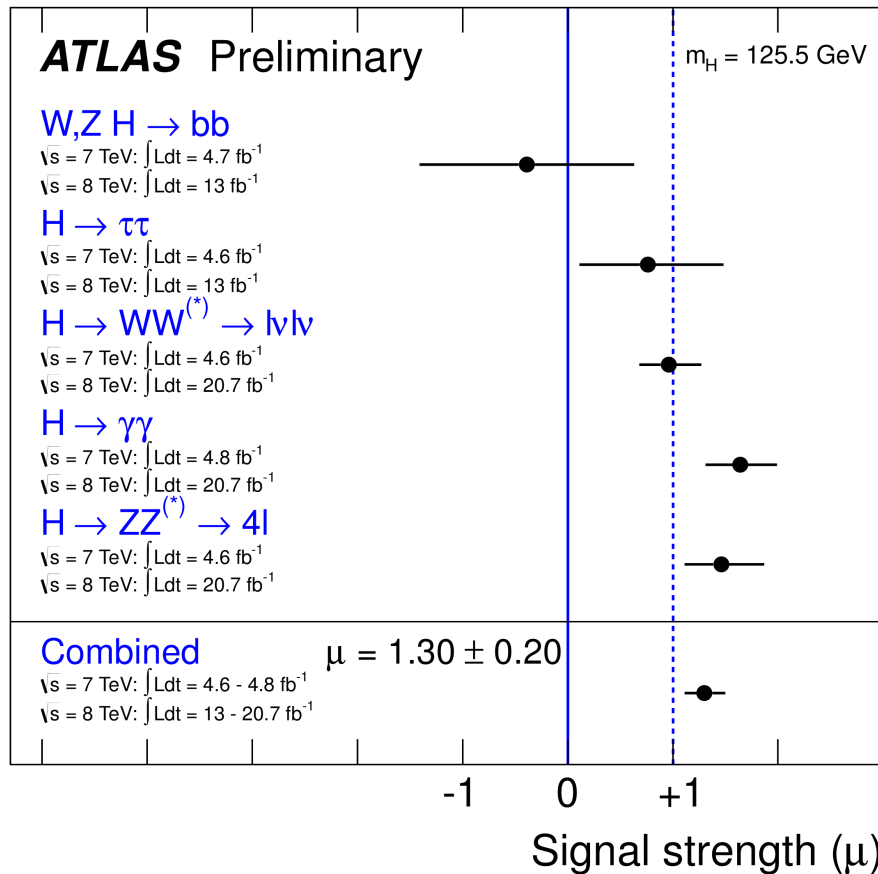
$$H \rightarrow \gamma\gamma$$



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

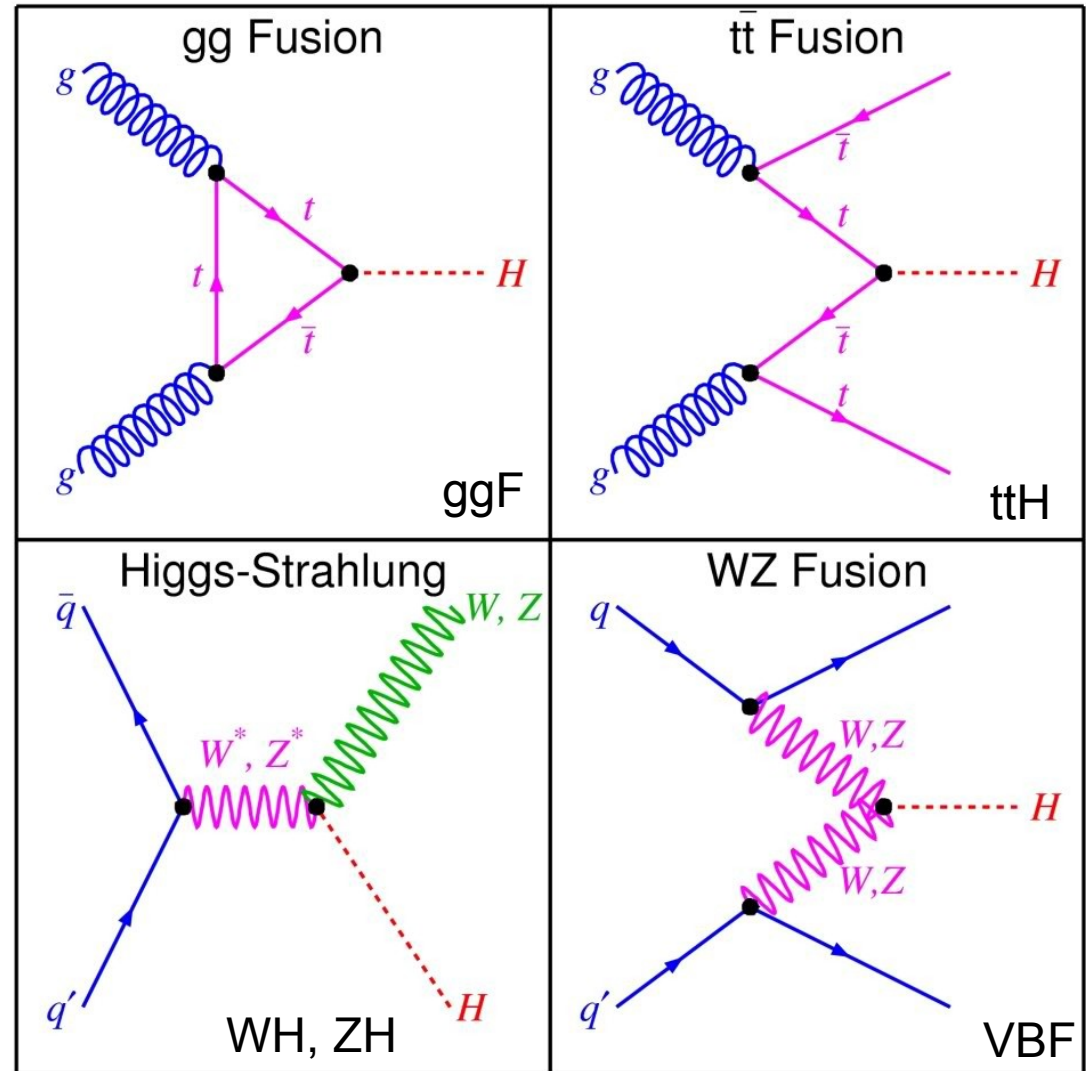
# Est-ce le Higgs du modèle standard ?

- 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

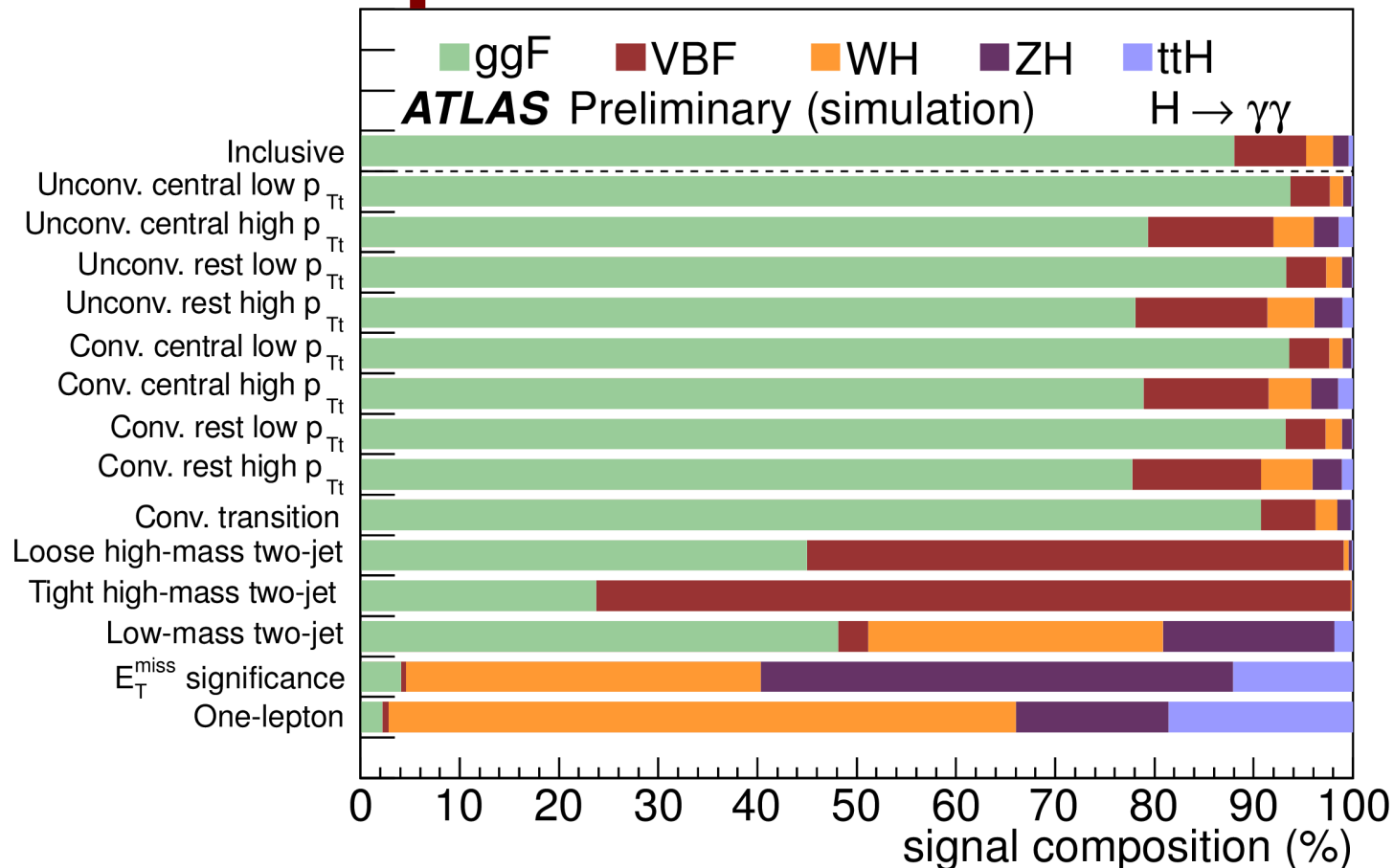


# Production du boson de Higgs

- 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...

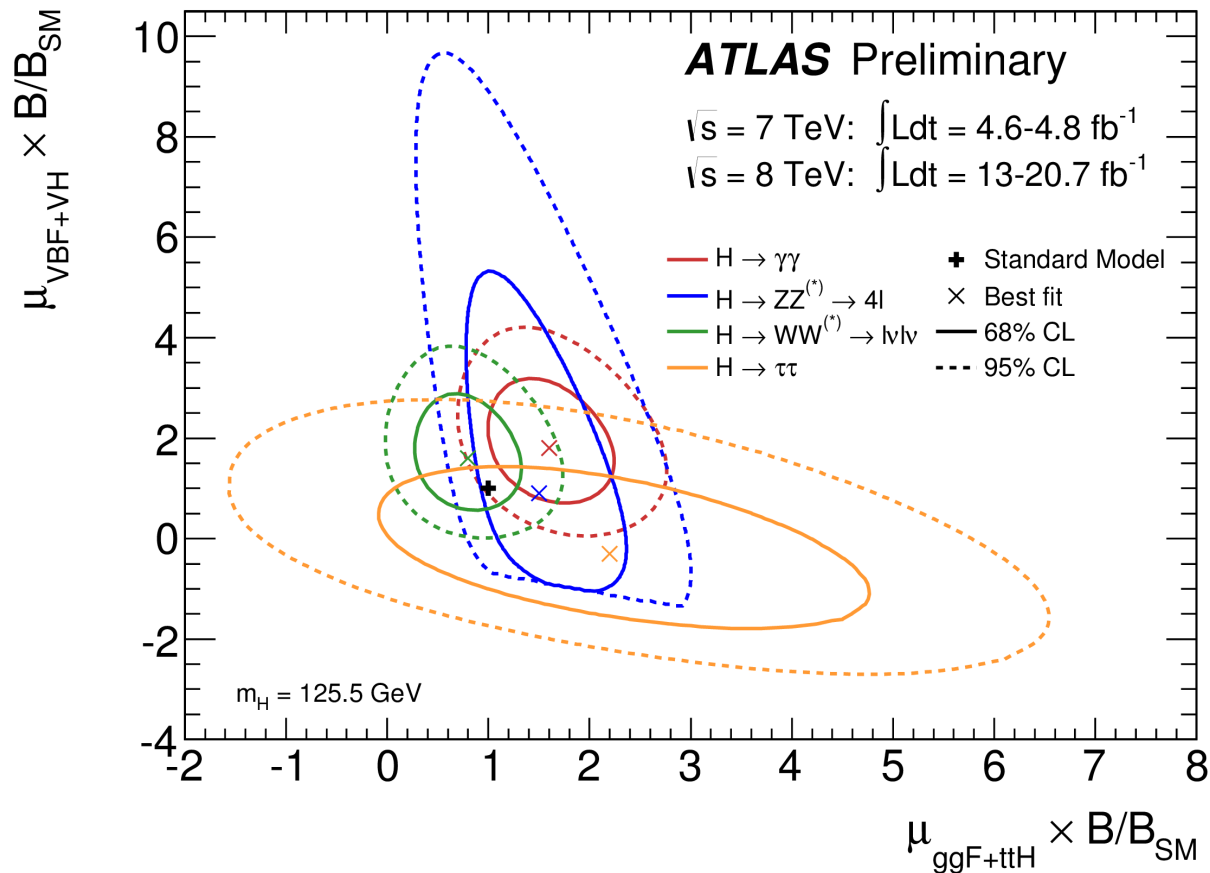


# Séparation des canaux de production



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

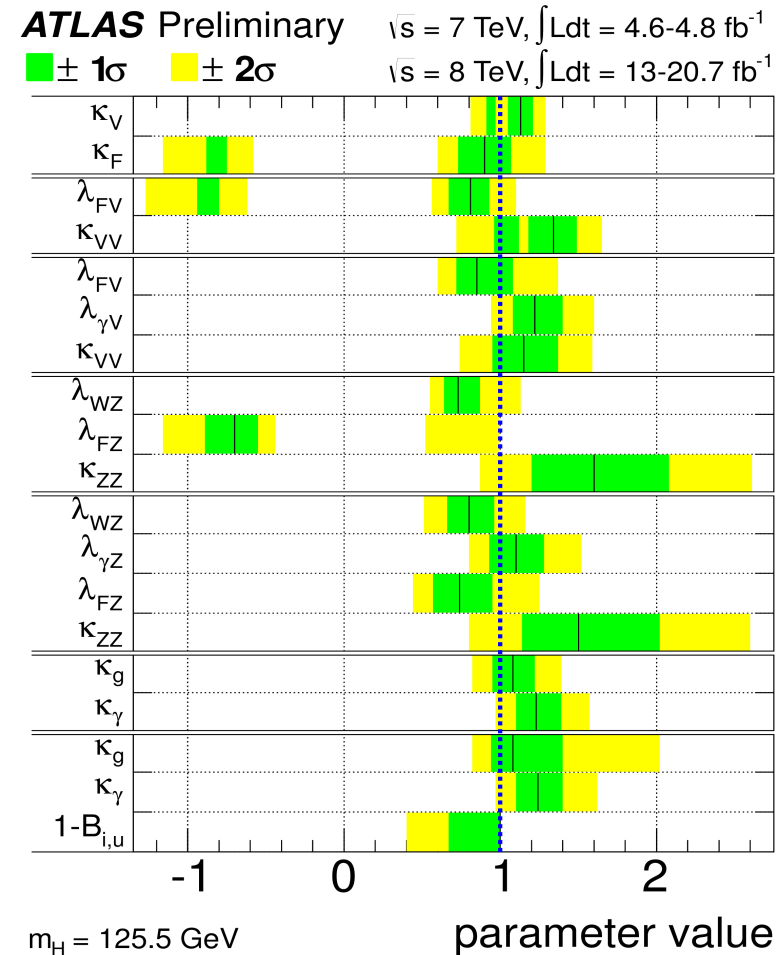
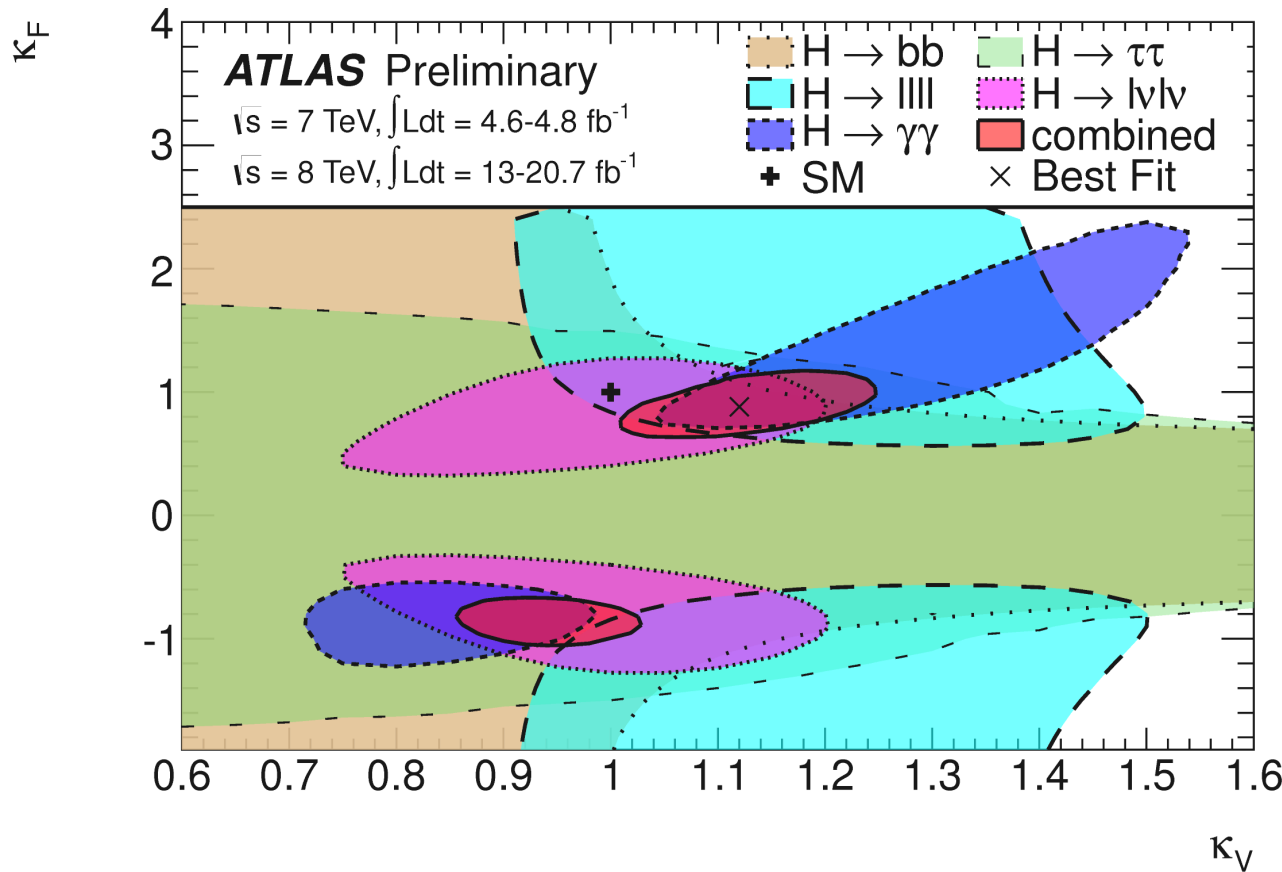
# Plutôt « VBF » ou « ggF » ?



- $\mu = 1$  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

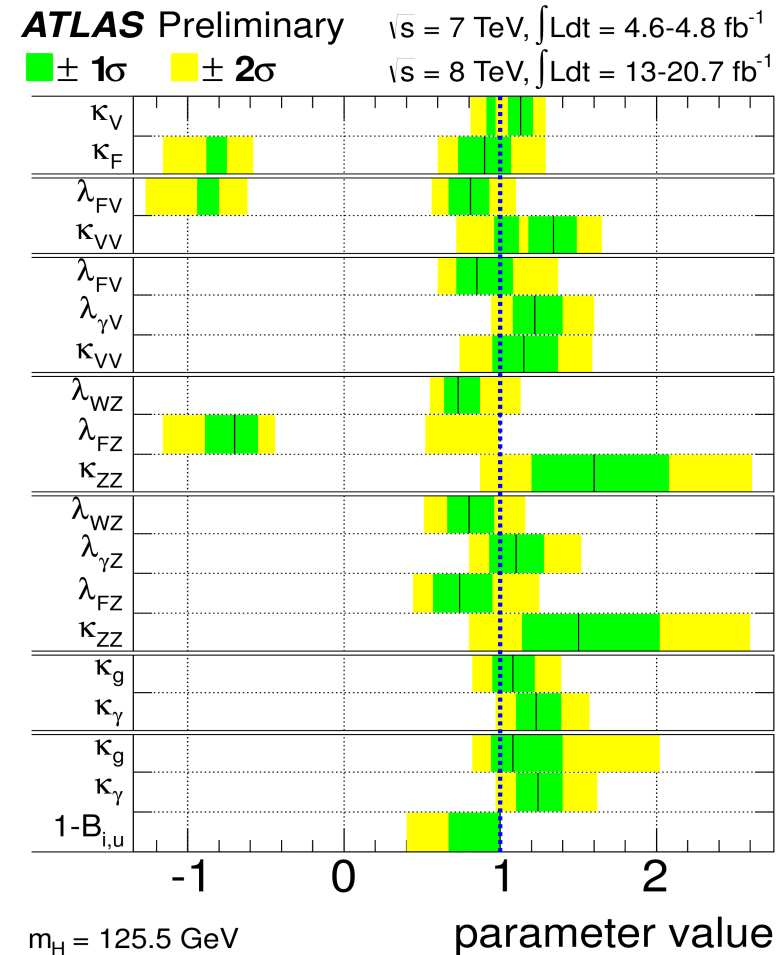
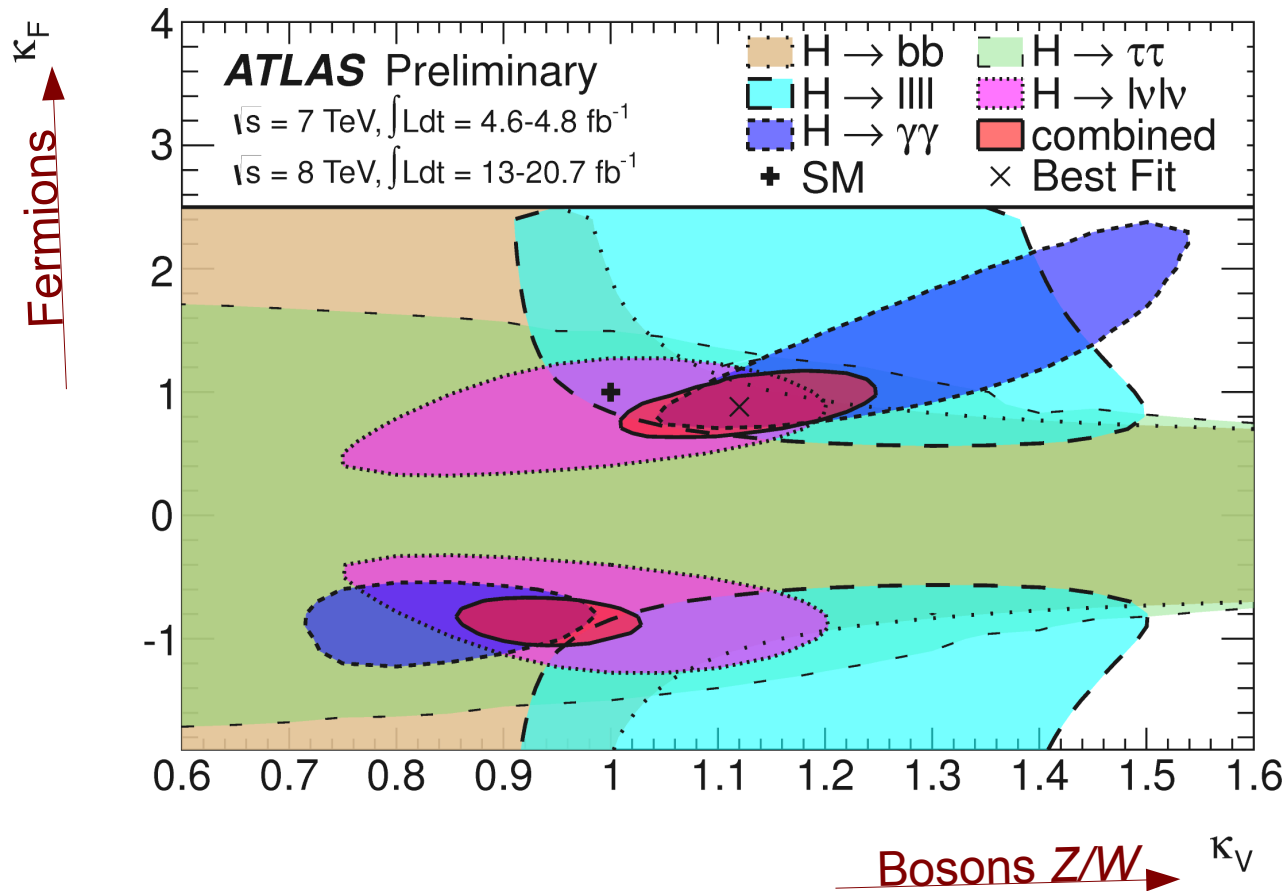
# Couplage aux fermions et bosons

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



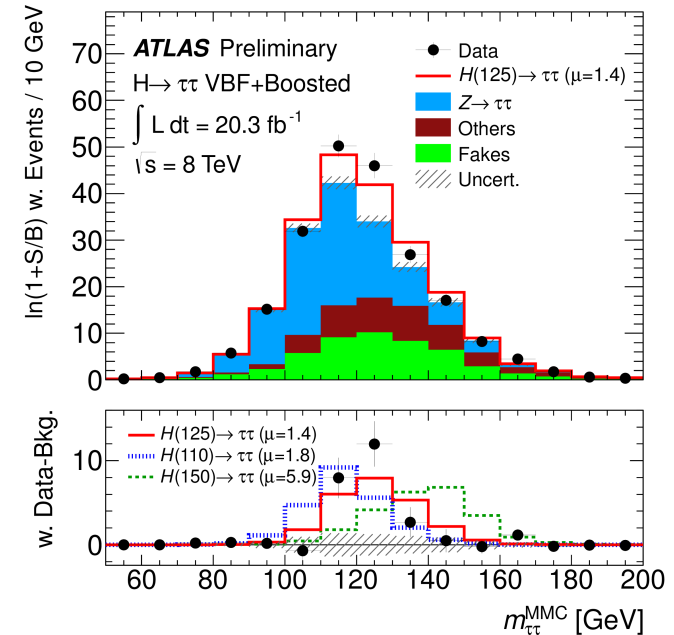
# Couplage aux fermions et bosons

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

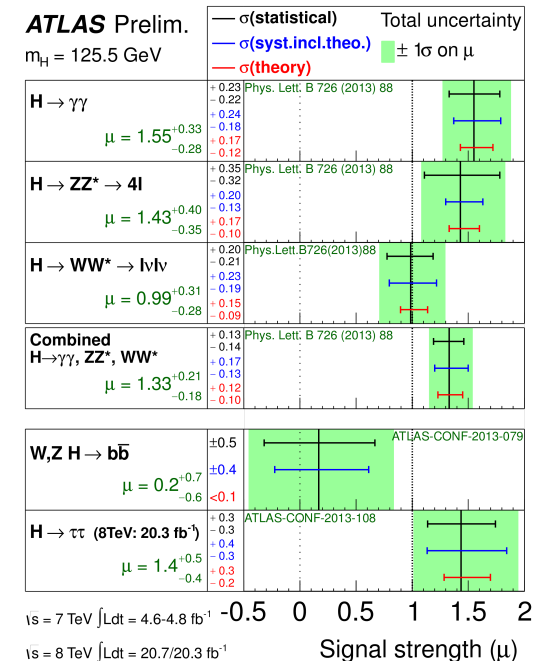
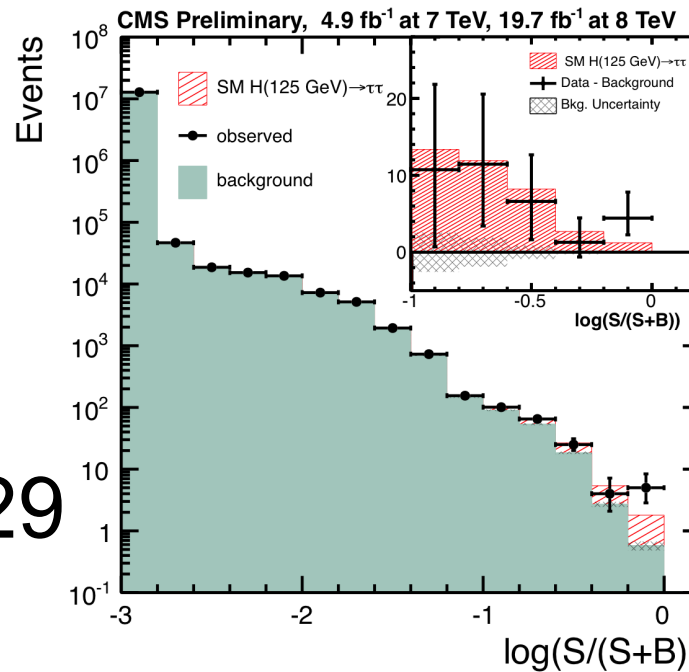


# Nouveau : couplage aux leptons $\tau$

- Découverte et premières mesures basées sur les bosons ( $W, Z, \gamma$ )
- Il y a deux semaines, ATLAS et CMS ont annoncé une évidence pour le canal  $H \rightarrow \tau\tau$

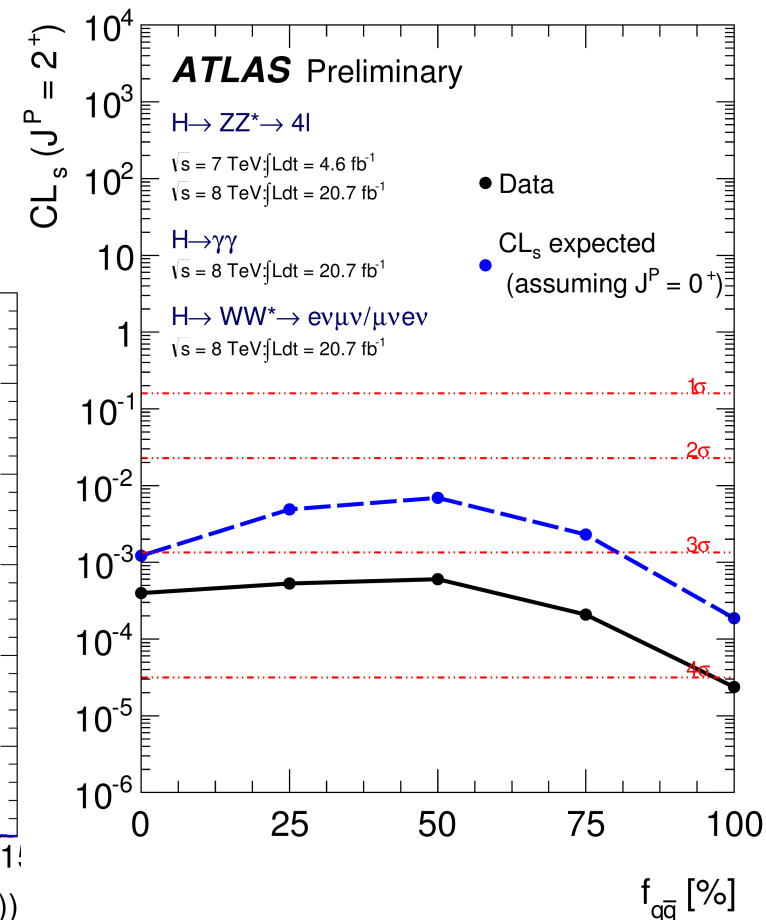
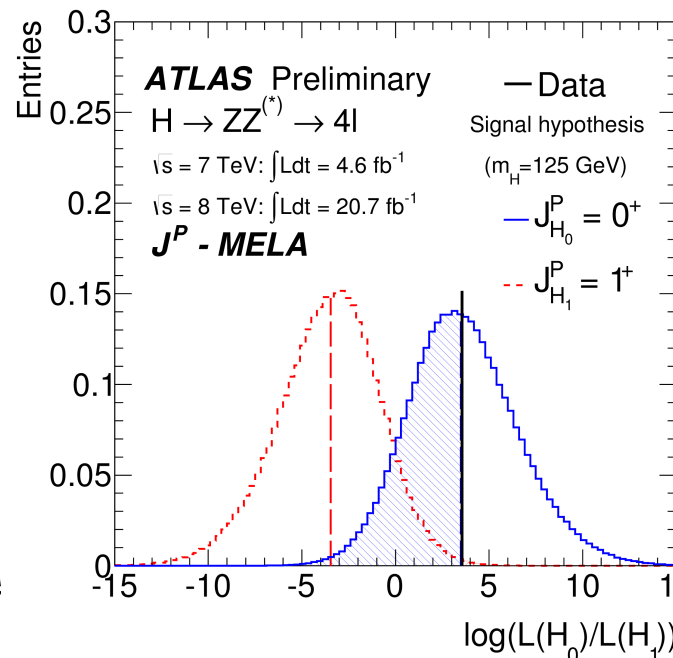
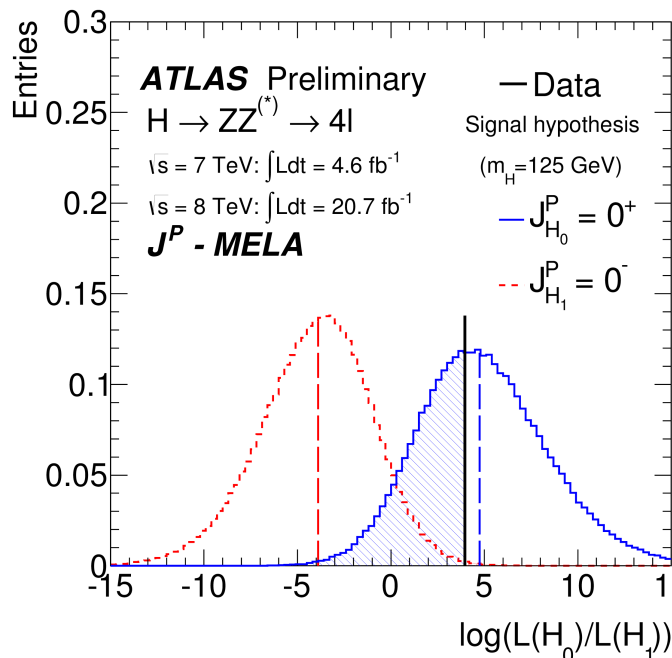


- ATLAS :  
 $4.1\sigma, \mu = 1.4^{+0.5}_{-0.4}$
- CMS :  
 $3.4\sigma, \mu = 0.87 \pm 0.29$

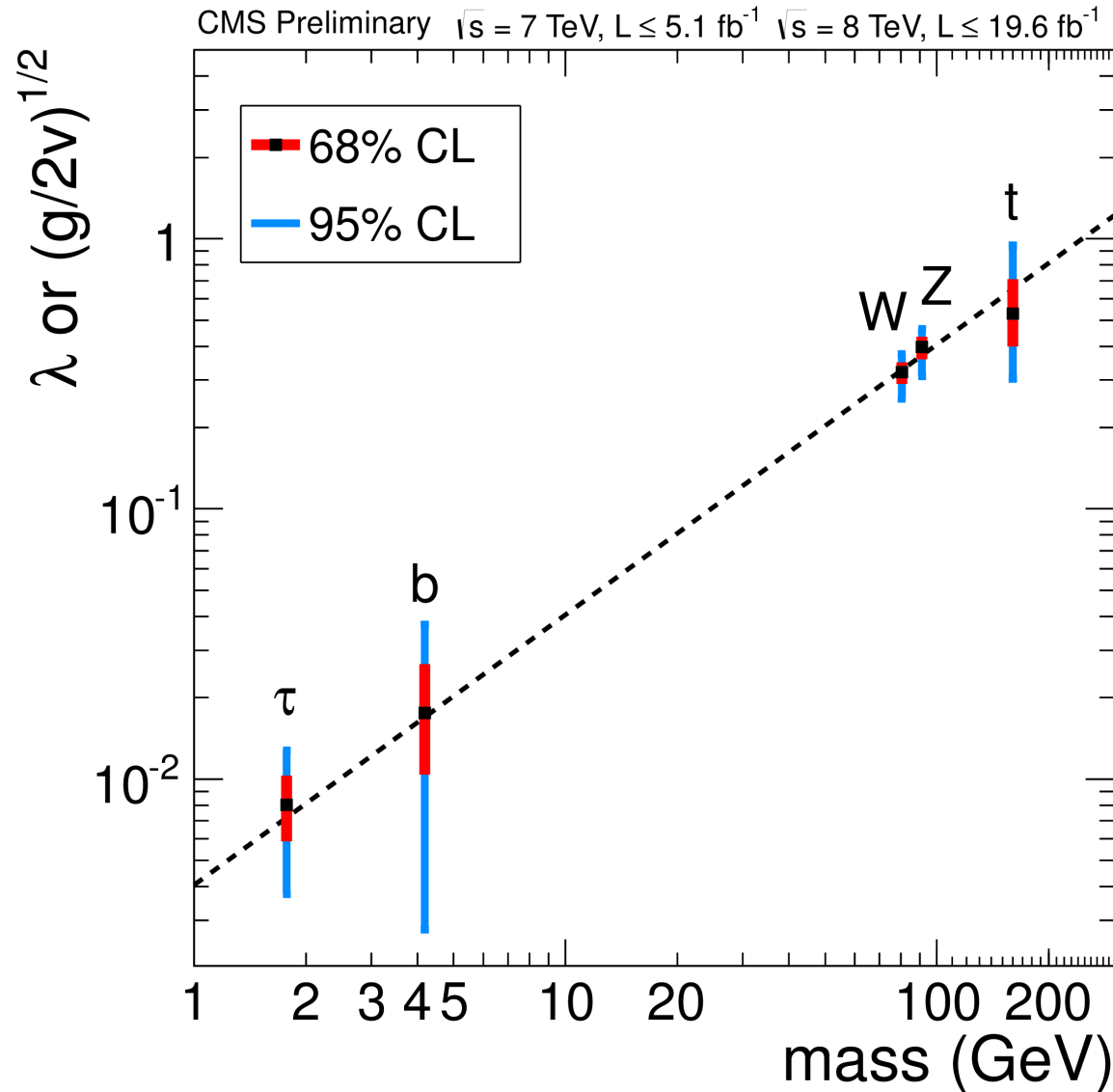


# Spin et parité

- 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



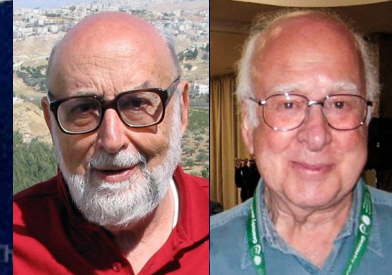
**Pour le moment, cette particule ressemble beaucoup au boson de Higgs du modèle standard.**

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

# Prix Nobel de physique 2013

2013 NOBEL PRIZE IN PHYSICS

François Englert  
Peter W. Higgs



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

# Prix Nobel de physique 2013

2013 NOBEL PRIZE IN PHYSICS

François Englert

Peter W. Higgs



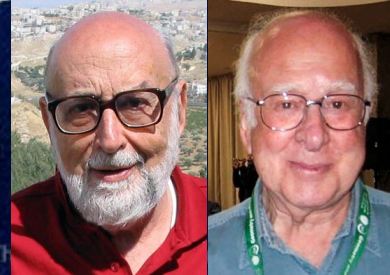
# Félicitations !

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

# Prix Nobel de physique 2013

2013 NOBEL PRIZE IN PHYSICS

François Englert  
Peter W. Higgs

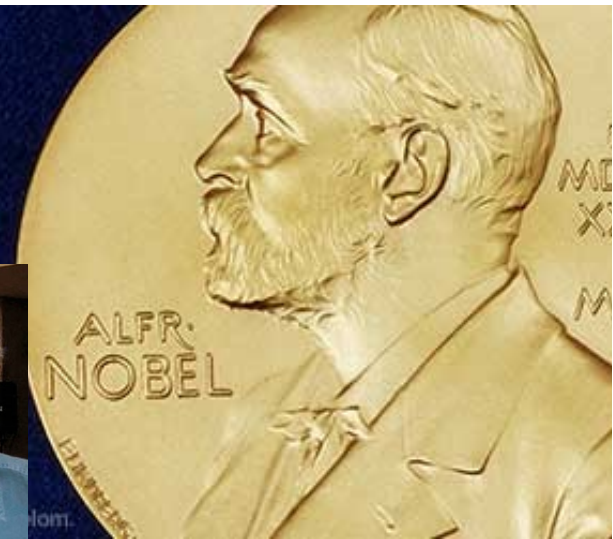
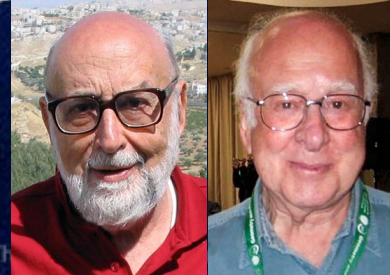


« pour la découverte théorique d'un mécanisme qui nous aide à comprendre l'origine de la masse des particules subatomiques, et qui a été récemment confirmé par la découverte de la particule fondamentale prédite, par les expériences ATLAS et CMS du grand collisionneur de hadrons (LHC) du CERN »

# Prix Nobel de physique 2013

2013 NOBEL PRIZE IN PHYSICS

François Englert  
Peter W. Higgs



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



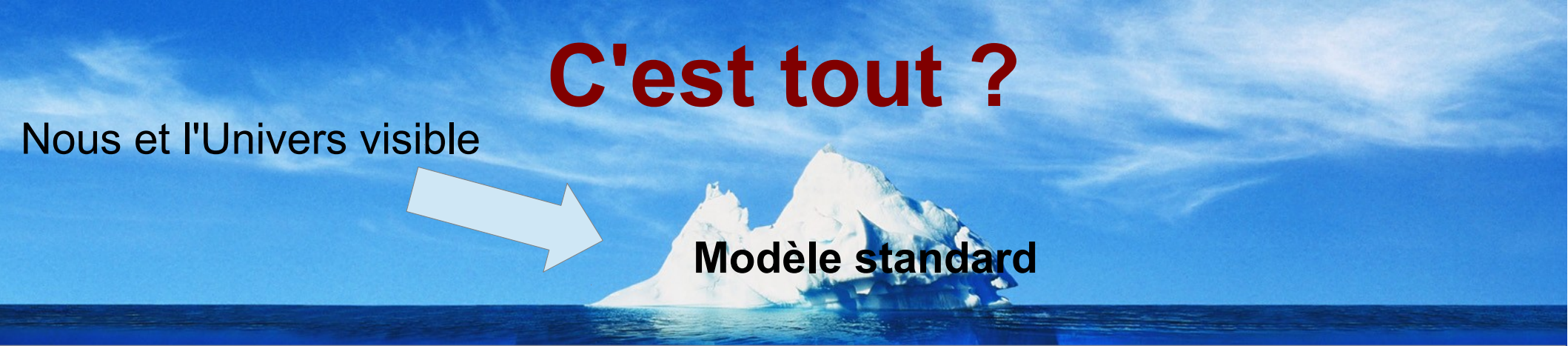
**Le CERN et les expériences ATLAS & CMS**

# C'est tout ?

Nous et l'Univers visible



**Modèle standard**

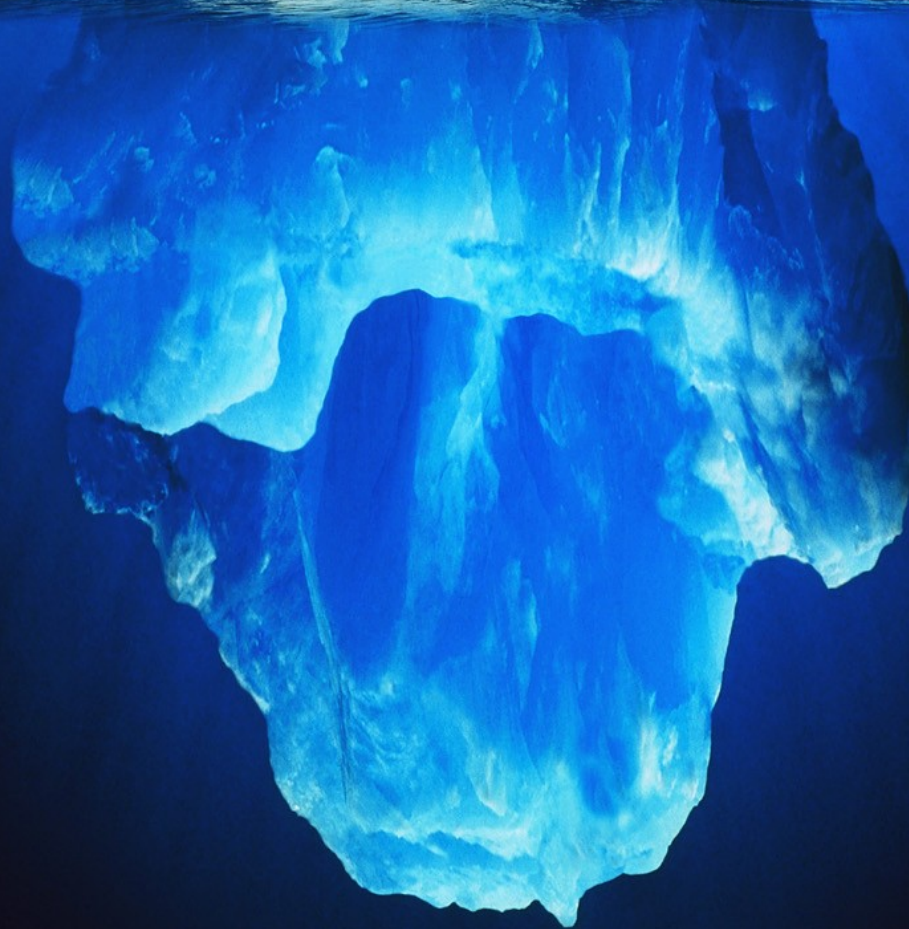


# C'est tout ?

Nous et l'Univers visible



**5% Modèle standard**



# C'est tout ?

Nous et l'Univers visible

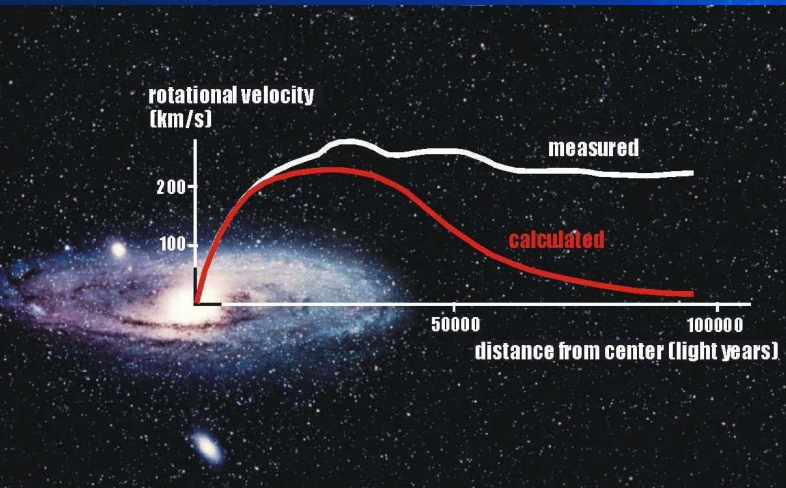


5% Modèle standard

27% Matière noire

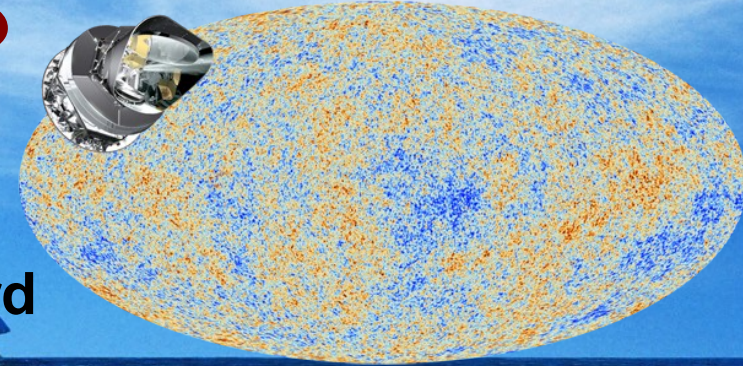


- On ne sait pas ce que c'est mais on croit savoir que c'est là
- Candidats observables au LHC (supersymétrie, ...) ?





# C'est tout ?



Nous et l'Univers visible

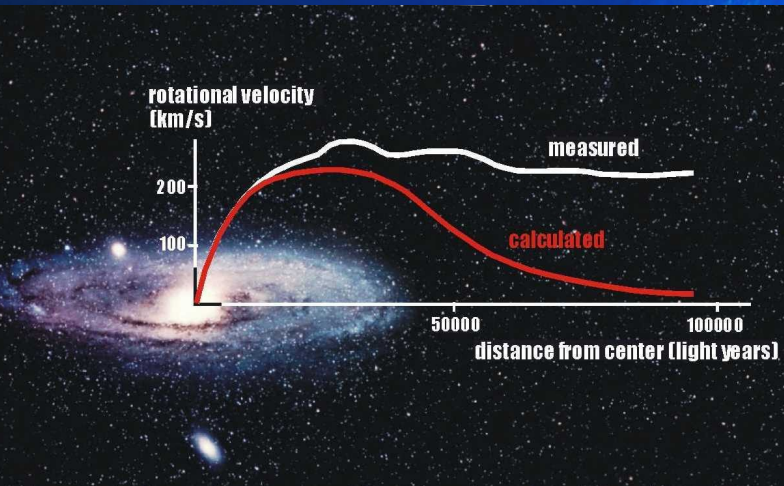


5% Modèle standard

27% Matière noire



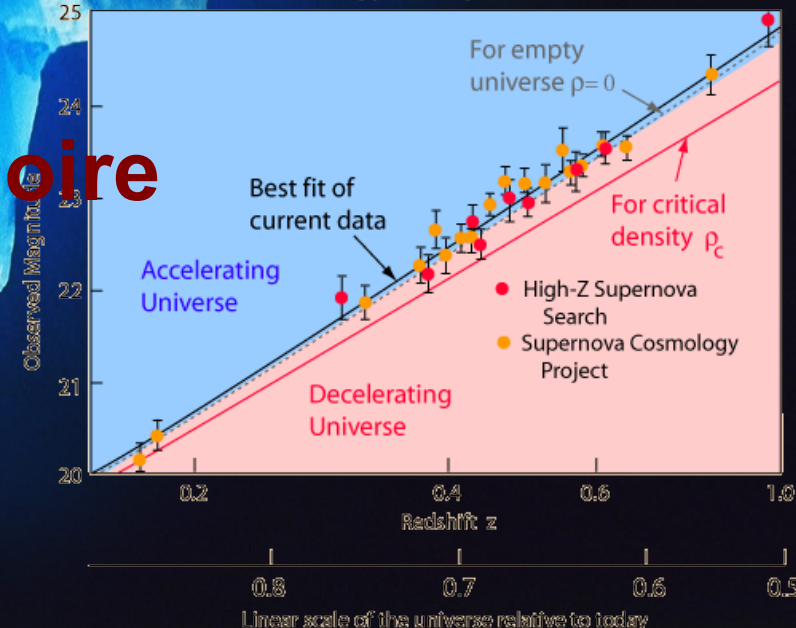
- On ne sait pas ce que c'est mais on croit savoir que c'est là
- Candidats observables au LHC (supersymétrie, ... ) ?



68% Énergie noire



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 particle tracks, primarily in orange and red, that converge towards a central point, illustrating the connection between large-scale cosmological structures and small-scale particle physics.

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

Cette présentation

[indico.in2p3.fr/event/YannCoadou\\_BosonDeHiggs\\_AMUphysique2013](http://indico.in2p3.fr/event/YannCoadou_BosonDeHiggs_AMUphysique2013)

ATLAS grand public



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

ATLAS en direct

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

ATLAS sur



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

ATLAS sur



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

ATLAS sur



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

ATLAS sur



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

Site français du



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

Le CPPM



[marwww.in2p3.fr](http://marwww.in2p3.fr)

Le CERN



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

Le CERN sur



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

Les Masterclasses



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