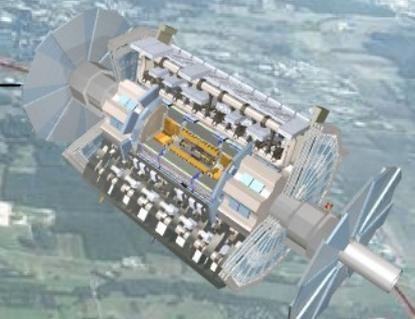


La quête du boson de Higgs

Yann Coadou

Centre de physique des particules de Marseille

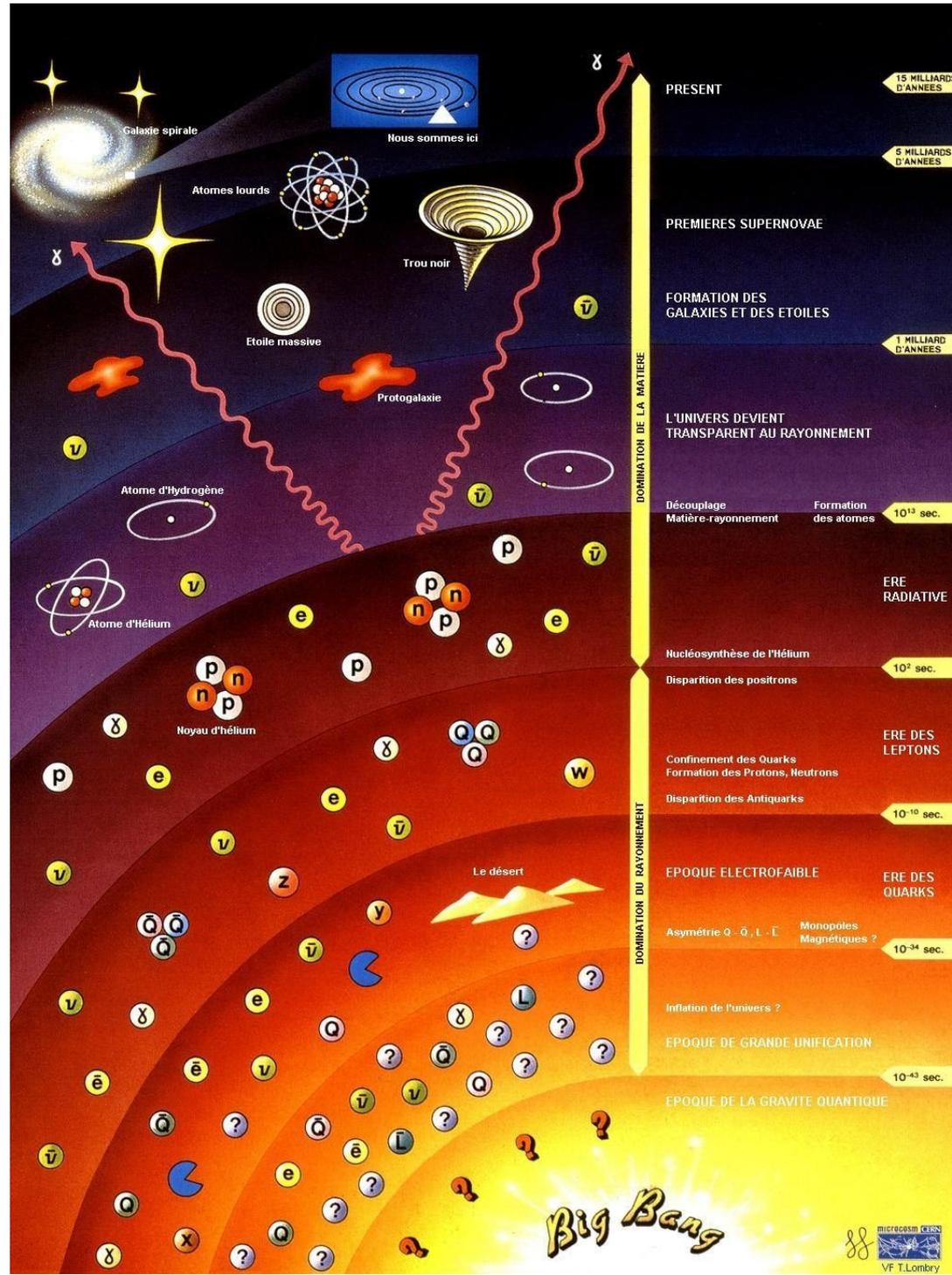
Lycée Marseilleveyre, Marseille
19 décembre 2012



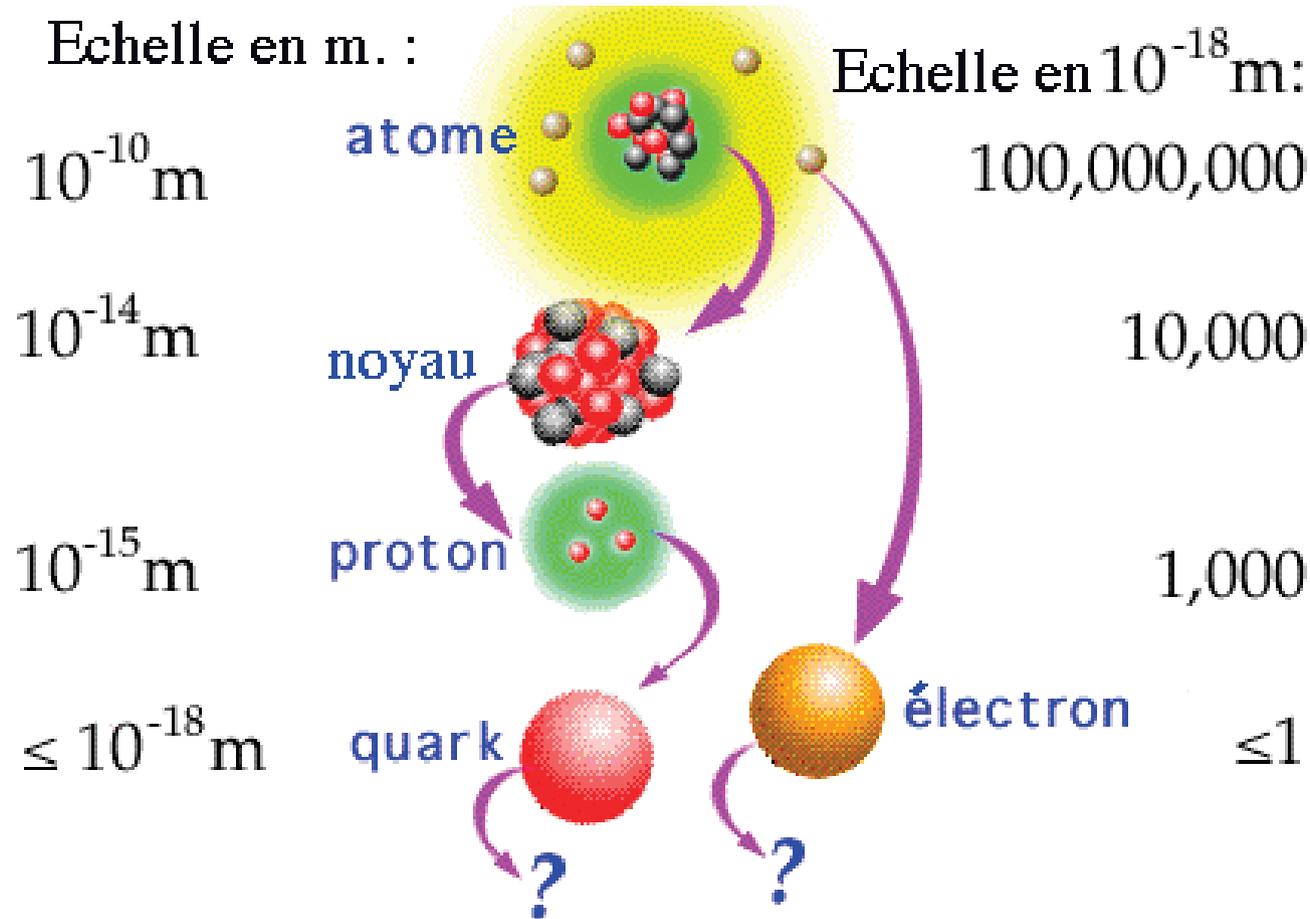
De l'infiniment grand vers l'infiniment petit



L'histoire de l'Univers

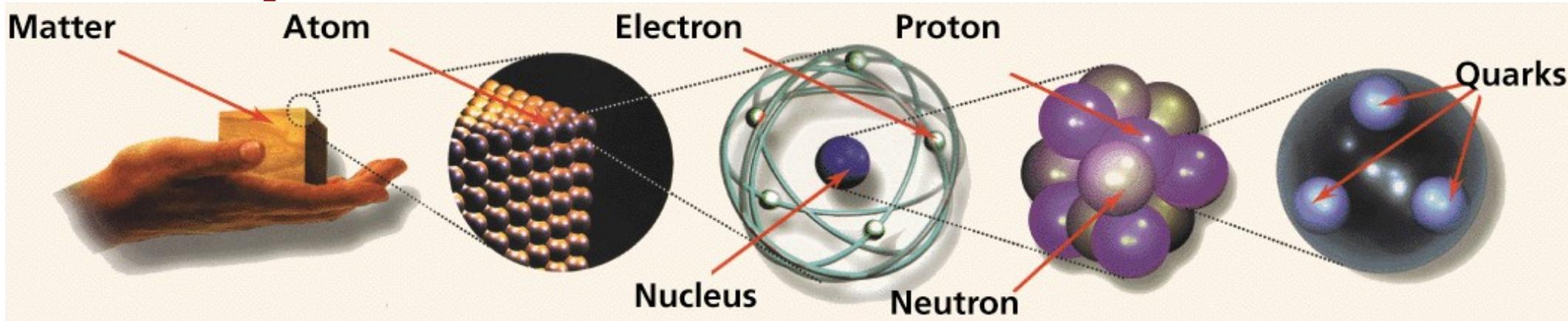


Echelle des distances en physique des particules

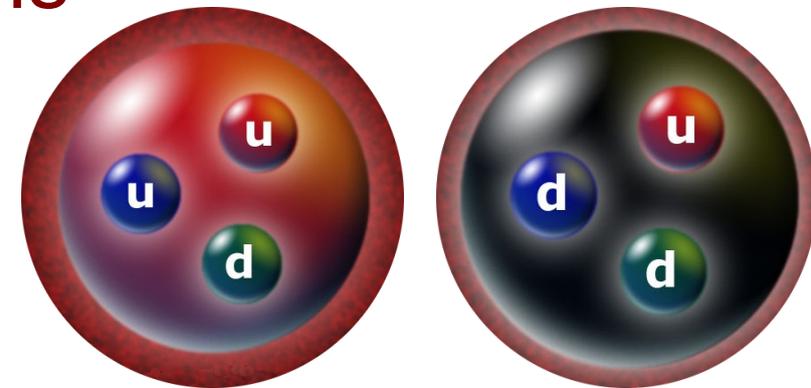


Si protons et neutrons étaient à **10 cm** l'un de l'autre, un quark ou un électron mesurerait **moins de 0,1 mm** et un atome environ **10 km**

De quoi est fait l'Univers visible ?

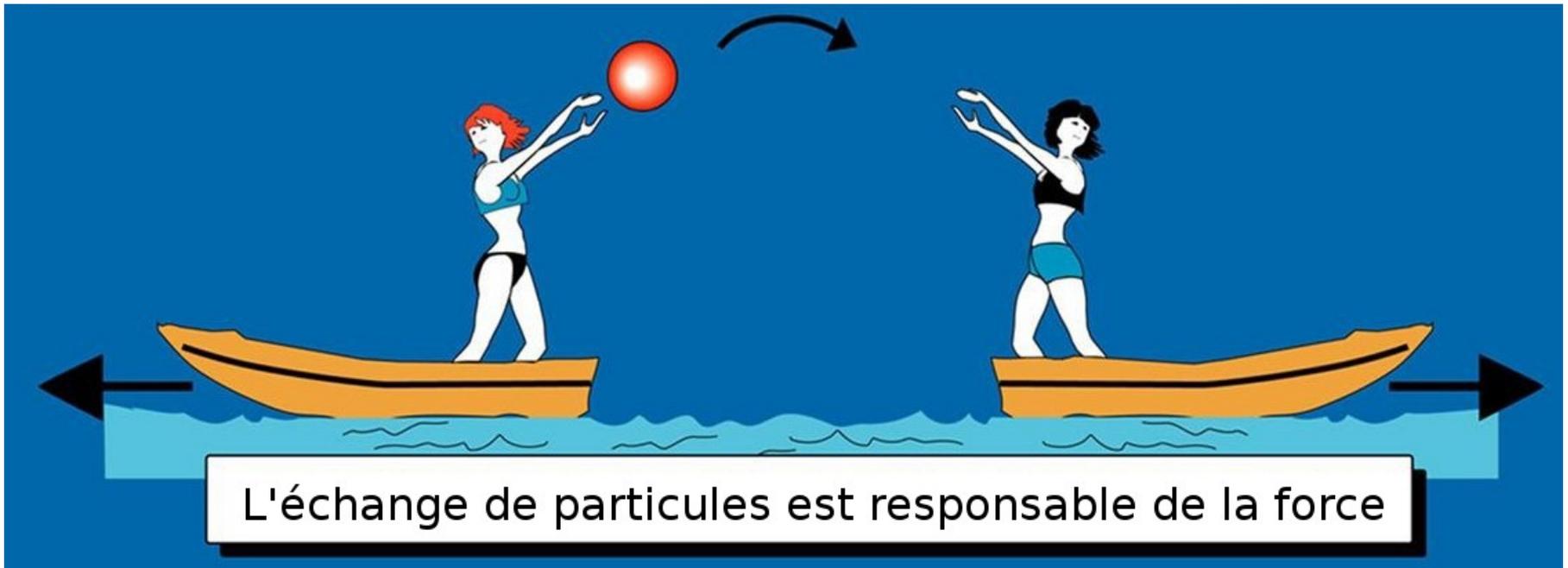


- Toute la matière visible, des galaxies aux virus en passant par les êtres humains, est faite de **quarks up** (*u*) et **down** (*d*) et d'**électrons**
- Protons et neutrons sont faits de 3 quarks
- Ils composent les noyaux
- Les électrons gravitent autour des noyaux
- Des **neutrinos** sont émis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



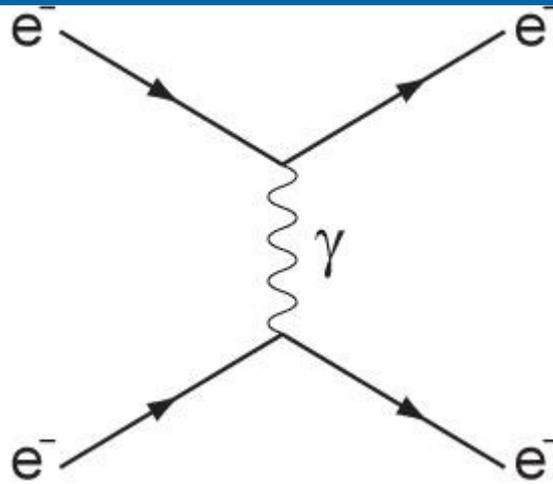
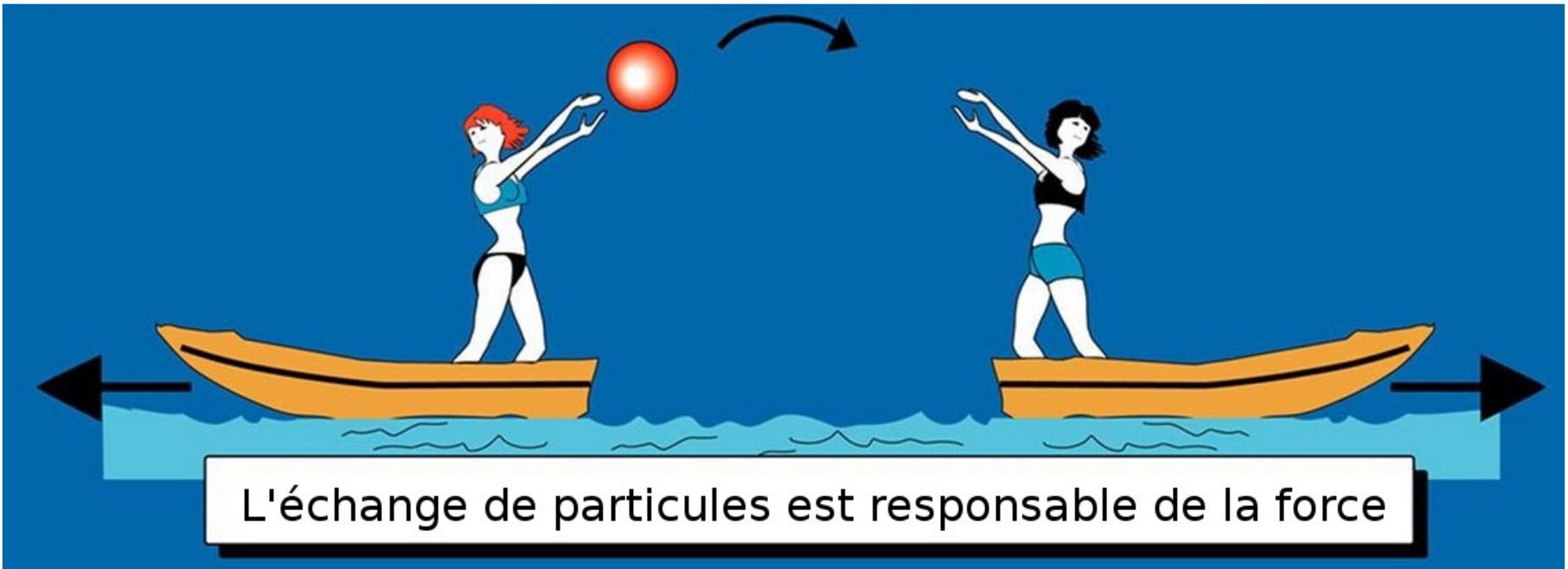
Interaction fondamentale

Echange de particules (bosons) entre particules de matière (fermions, comme les quarks ou les électrons)

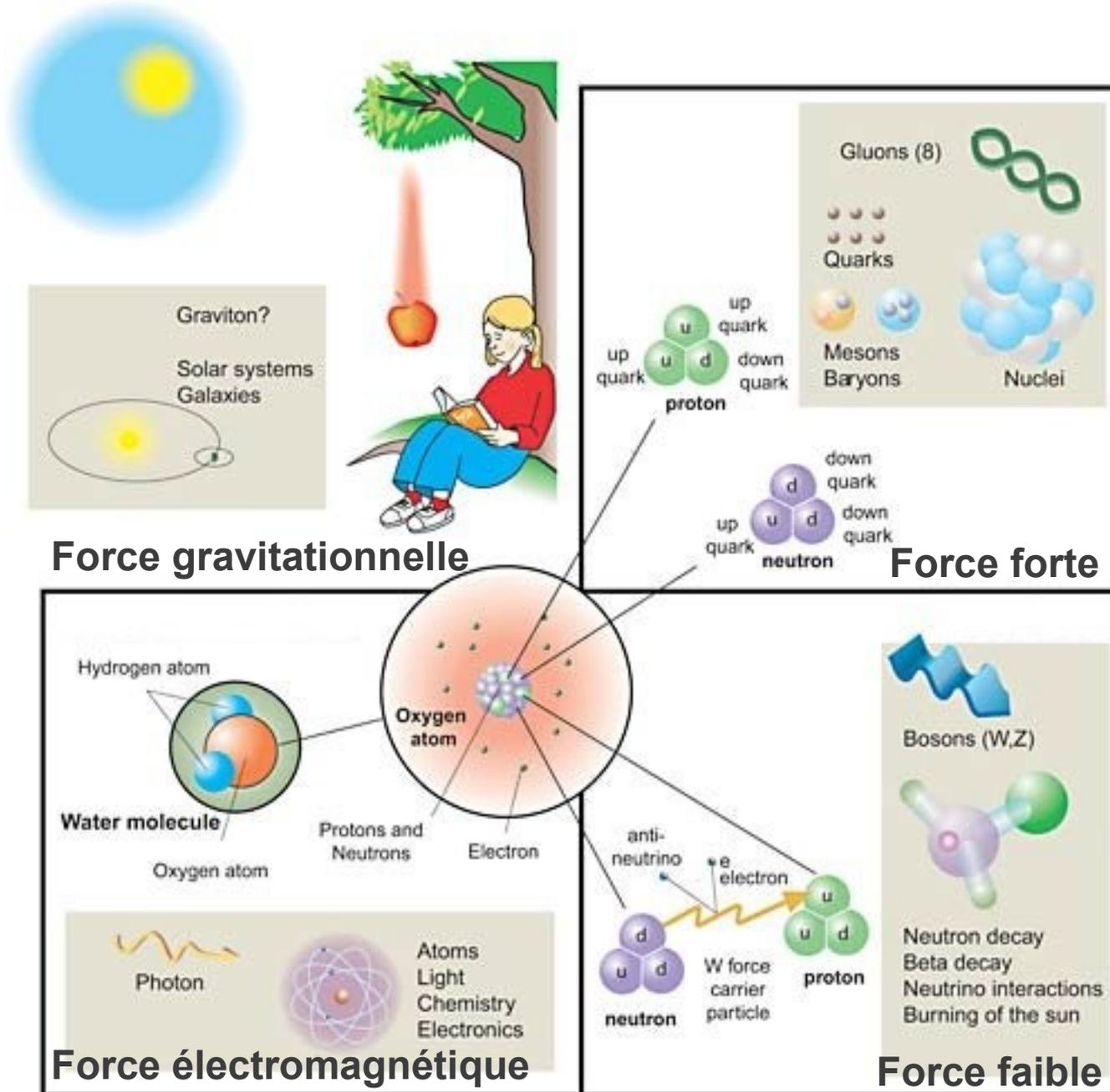


Interaction fondamentale

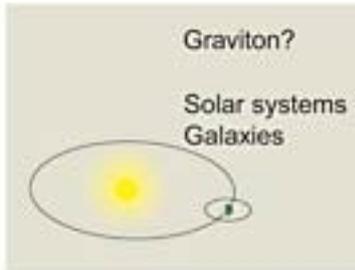
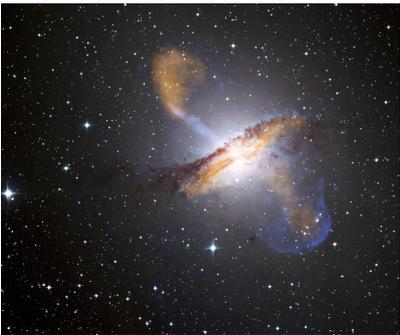
Echange de particules (bosons) entre particules de matière (fermions, comme les quarks ou les électrons)



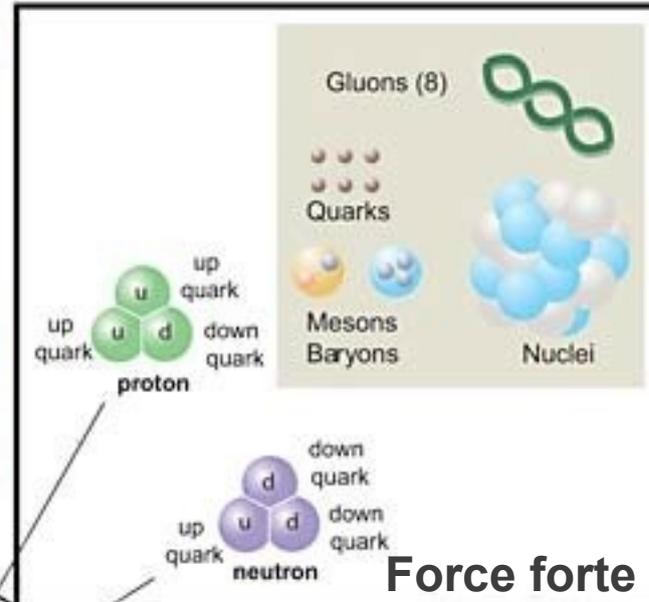
Les forces



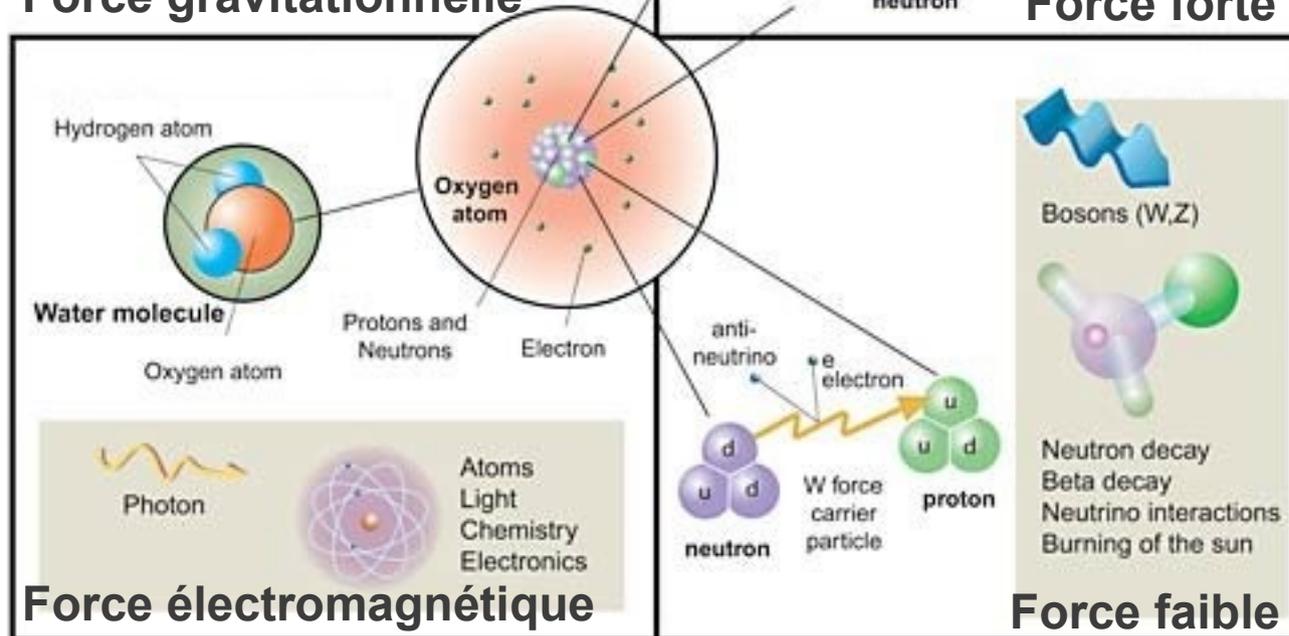
Les forces



Force gravitationnelle



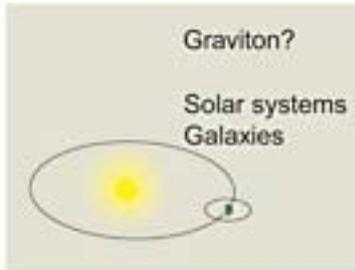
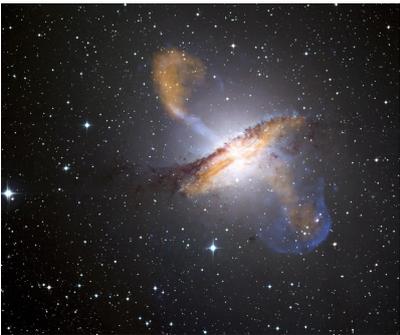
Force forte



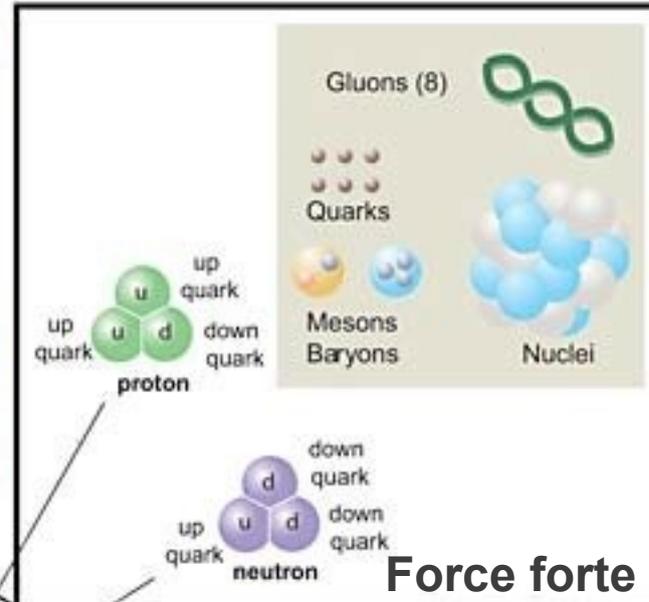
Force électromagnétique

Force faible

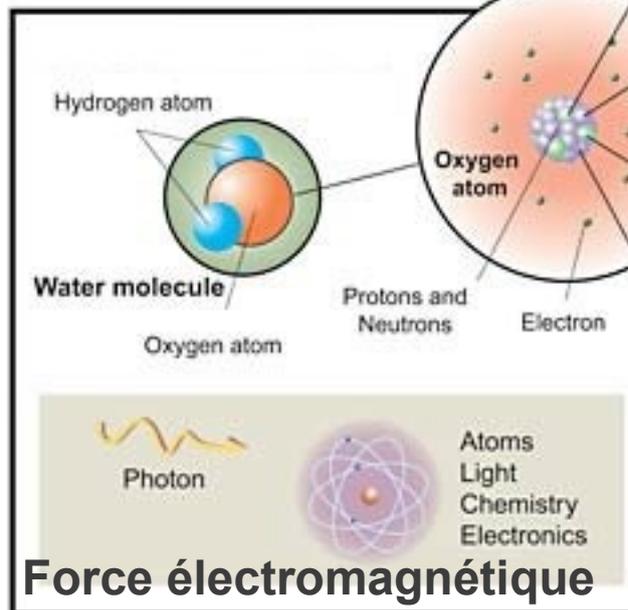
Les forces



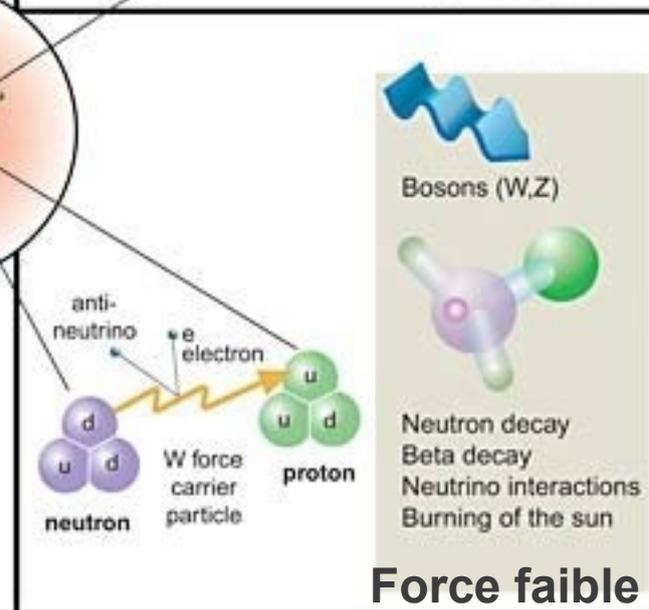
Force gravitationnelle



Force forte

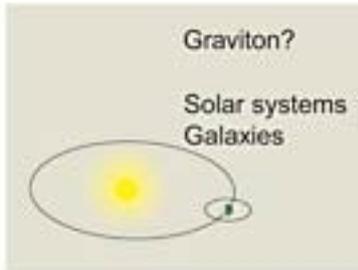
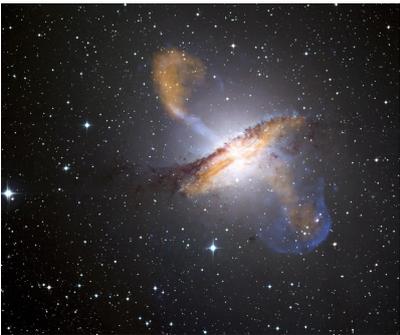


Force électromagnétique

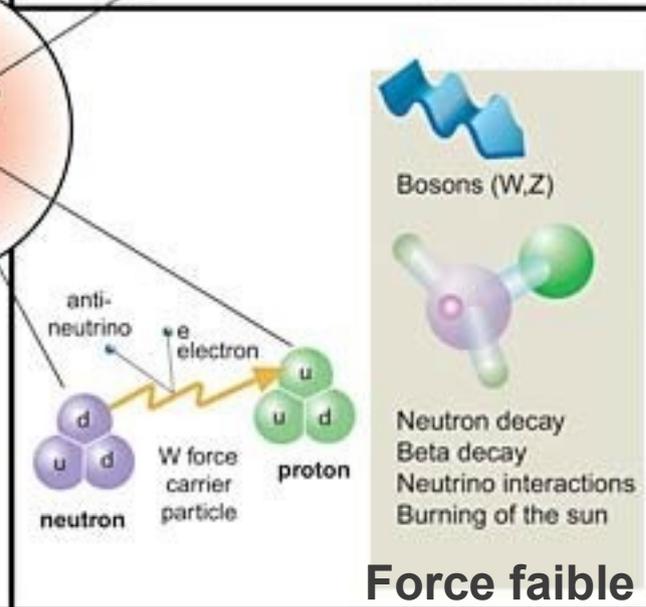
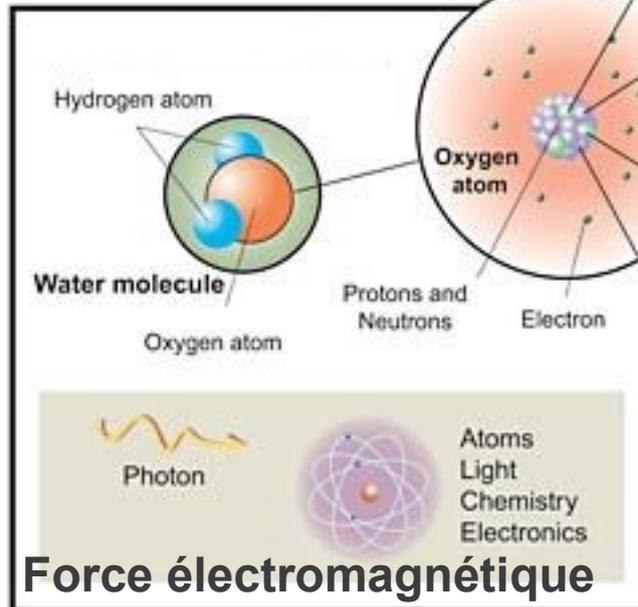
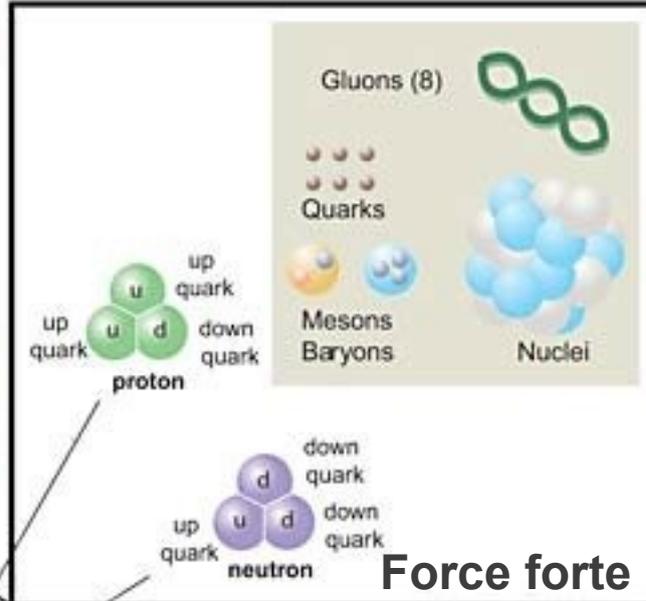


Force faible

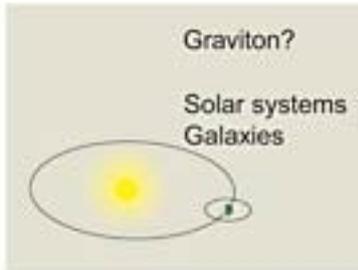
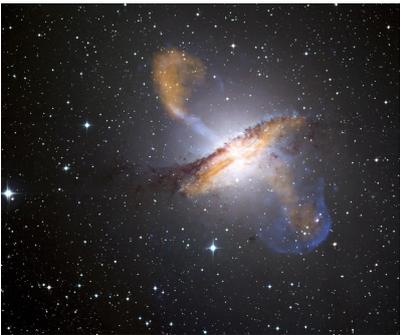
Les forces



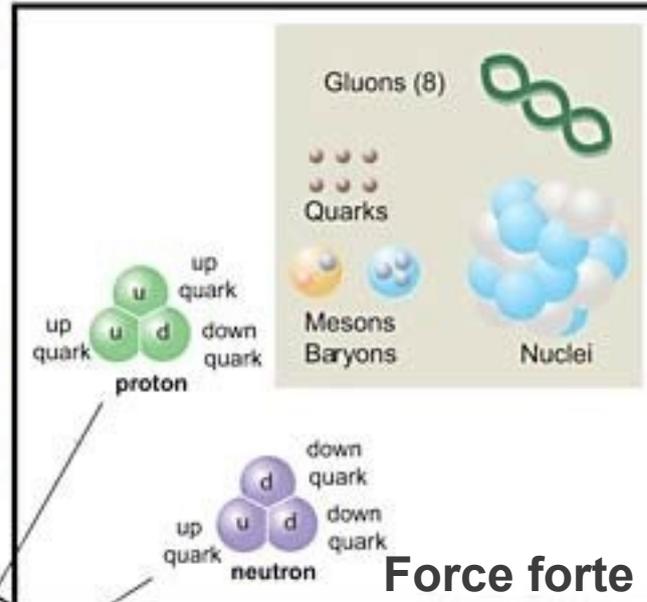
Force gravitationnelle



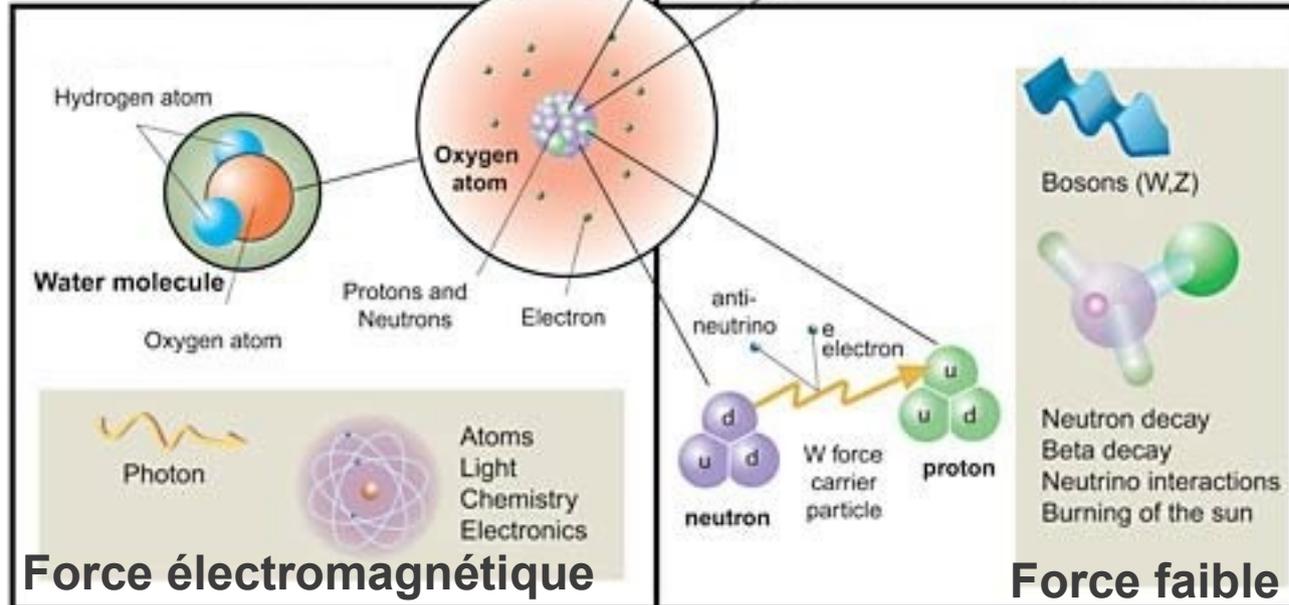
Les forces



Force gravitationnelle

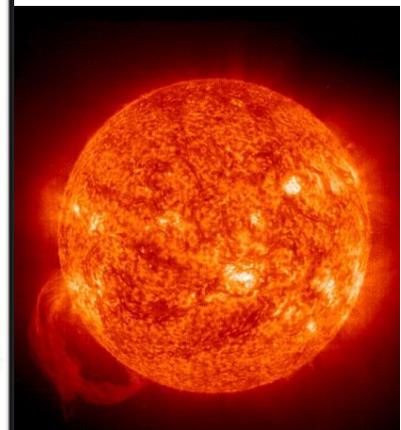


Force forte



Force électromagnétique

Force faible



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 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

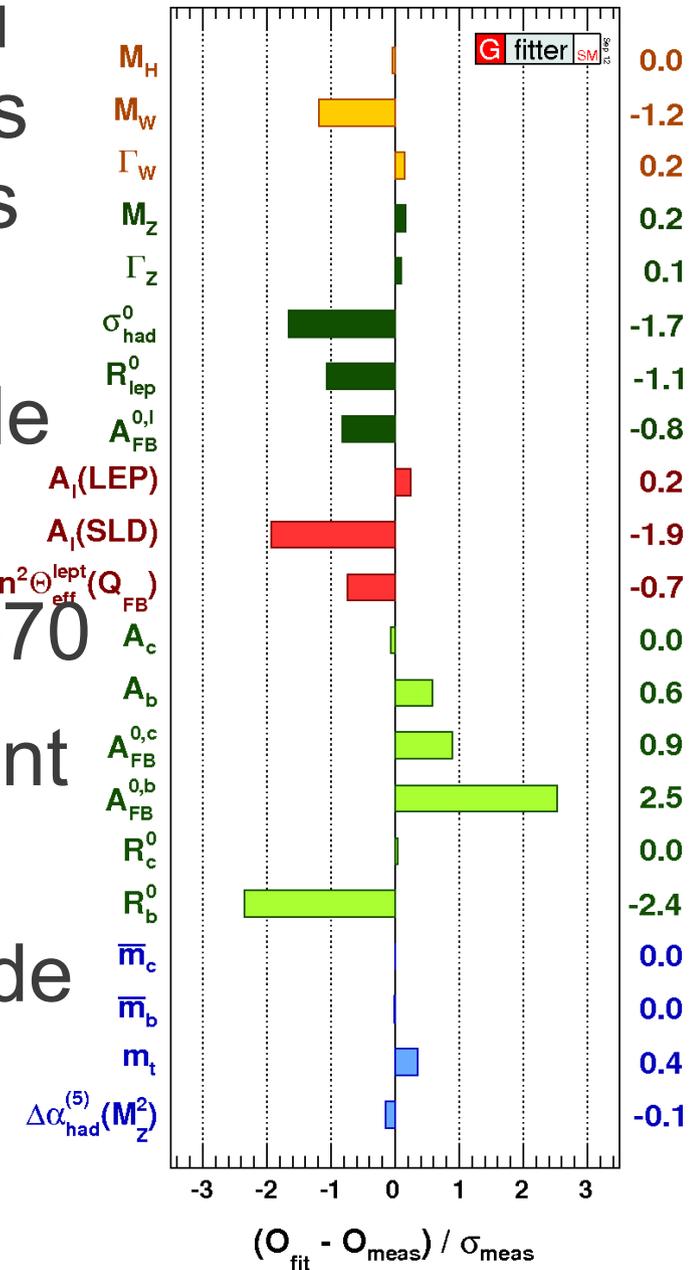
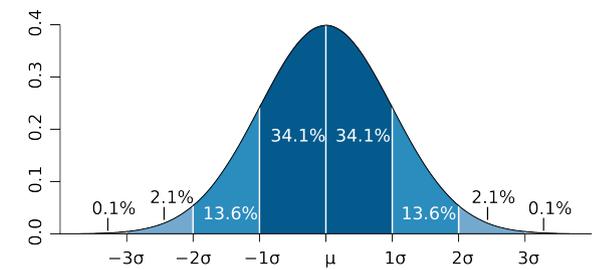
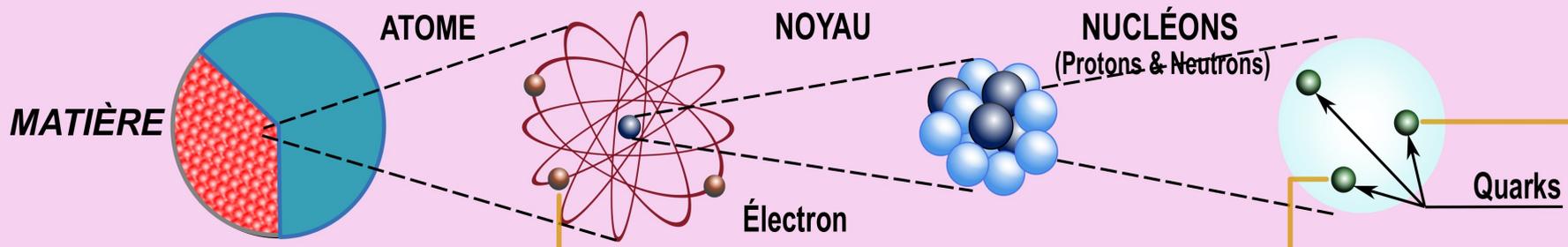


TABLEAU DES PARTICULES ÉLÉMENTAIRES DANS LE CADRE DU MODÈLE STANDARD



FERMIONS

La matière ordinaire est composée de particules de ce groupe.

Pour la plupart, ces particules étaient présentes juste après le Big Bang. Aujourd'hui on ne les trouve que dans les rayons cosmiques et auprès des accélérateurs.

ANTIMATIÈRE
A chaque particule correspond une antiparticule.

LEPTONS

peuvent se déplacer librement

QUARKS

prisonniers de particules plus grandes, ils ne sont pas observés individuellement.

Première famille	ÉLECTRON Responsable de l'électricité et des réactions chimiques. Sa charge est de -1.	NEUTRINO ÉLECTRON Sans charge électrique et interagissant rarement avec le milieu environnant.	DOWN Sa charge électrique est $-1/3e$. Le Proton en contient 1, le Neutron 2.	UP Sa charge électrique est $+2/3e$. Le Neutron en contient 1, le Proton 2.
Deuxième famille	MUON Un compagnon plus massif de l'électron.	NEUTRINO MUON Propriétés similaires à celles du neutrino électron.	ÉTRANGE (STRANGE) Un compagnon plus lourd du quark down.	CHARME (CHARM) Un compagnon plus lourd du quark up.
Troisième famille	TAU Un compagnon encore plus lourd que le muon.	NEUTRINO TAU Propriétés similaires à celles du neutrino électron.	BEAUTÉ (BEAUTY, BOTTOM) Un compagnon encore plus lourd du quark down.	TOP Hypothétique jusqu'en 1995, un compagnon encore plus lourd du quark up.

BOSONS VECTEURS

Particules fondamentales qui assurent la transmission des forces de la nature.

PHOTON

Grain élémentaire de la lumière porteur de la force électromagnétique.



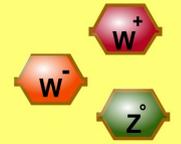
GLUON

Porteur de la force "forte" entre quarks.



BOSONS INTERMÉDIAIRES : W^+ , W^- et Z^0

Porteurs de la force "faible", responsable des désintégrations radioactives.



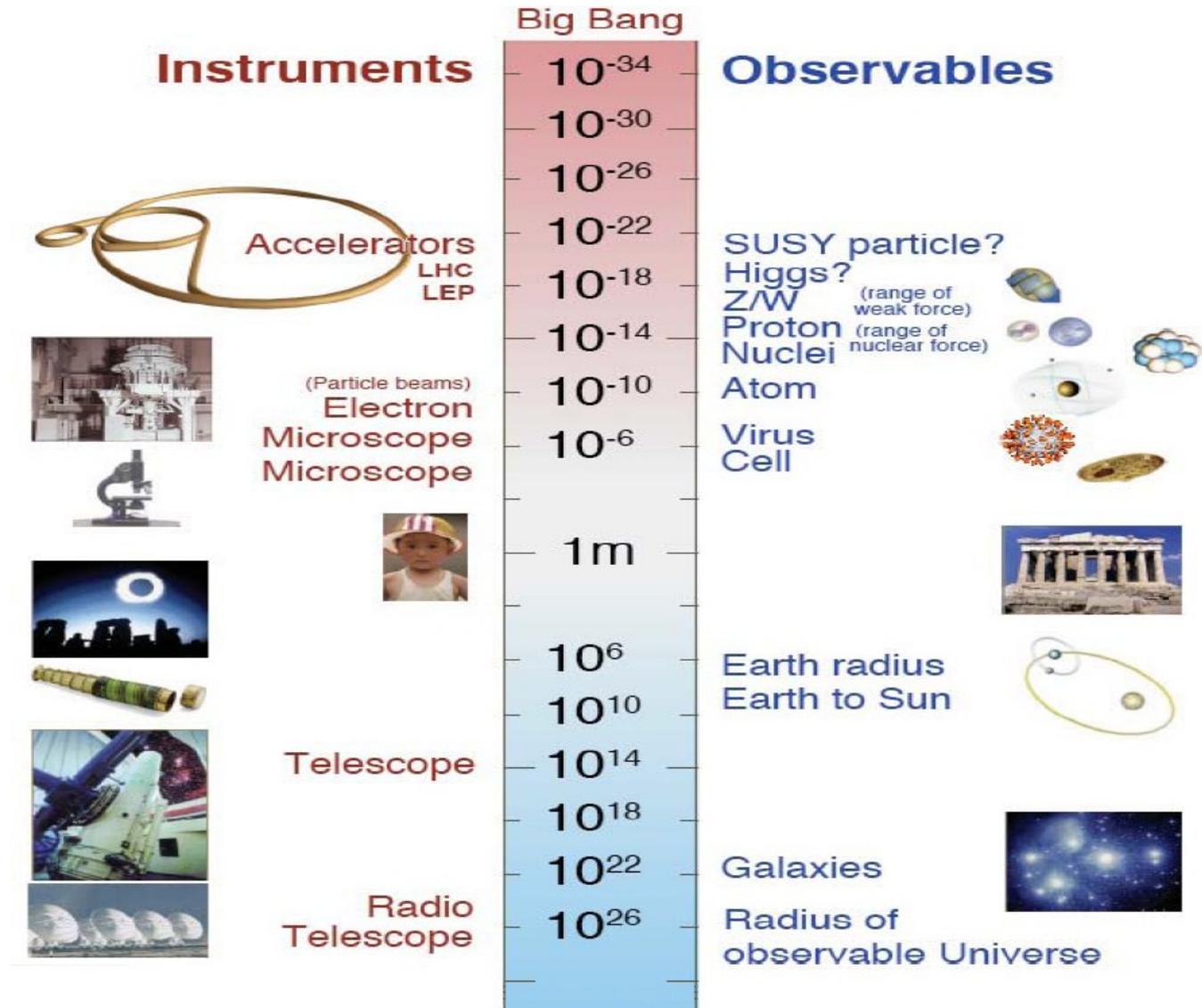
BOSON DE HIGGS

Responsable de la "brisure de symétrie électro-faible"
Été 2012 : particule compatible observée au LHC

GRAVITON ?
Hypothétique

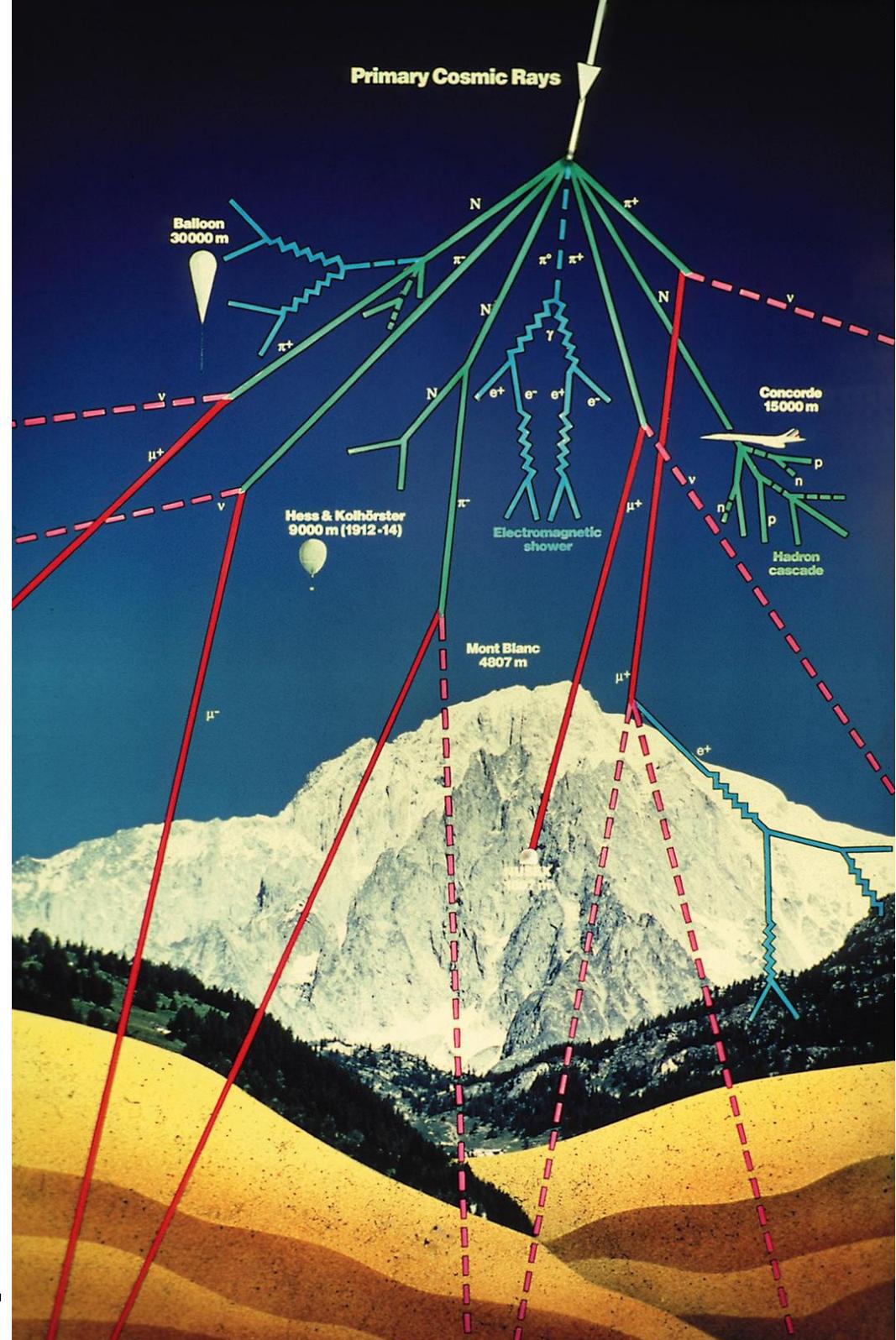
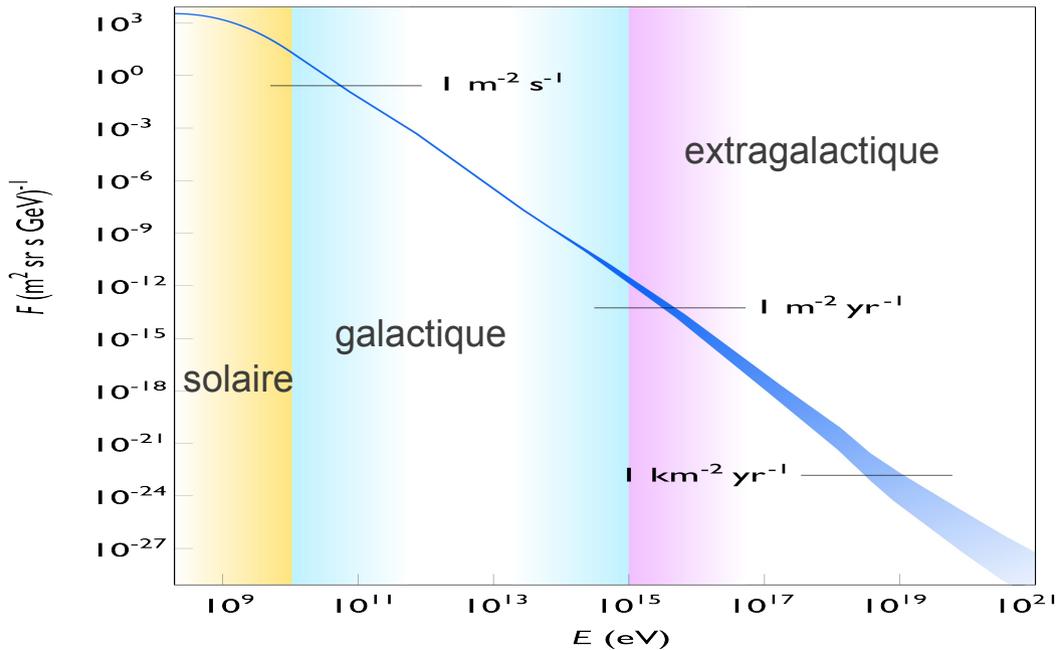
Pourquoi des accélérateurs de particules ?

- Pour voir des objets plus petits, il faut une énergie plus élevée :
 - longueur d'onde associée $\lambda = h/p$
- Pour créer des particules plus lourdes
 - $E = mc^2$



Accélérateur naturel

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



Quelques accélérateurs récents

- Le LEP

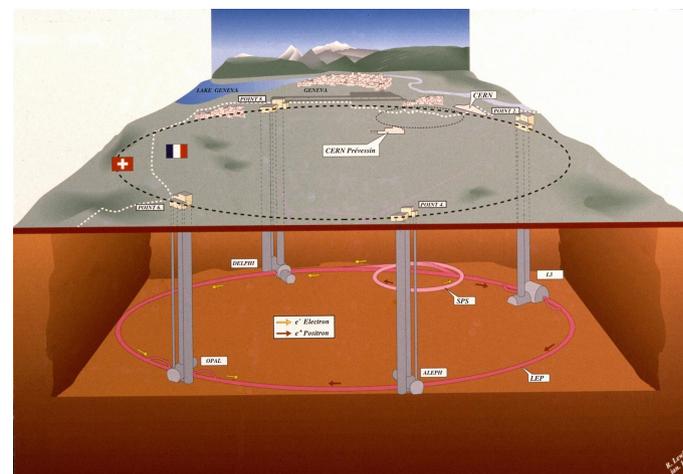
- Au CERN, Genève
- Collisions e^+e^-
- 1989-2000

- Le Tevatron

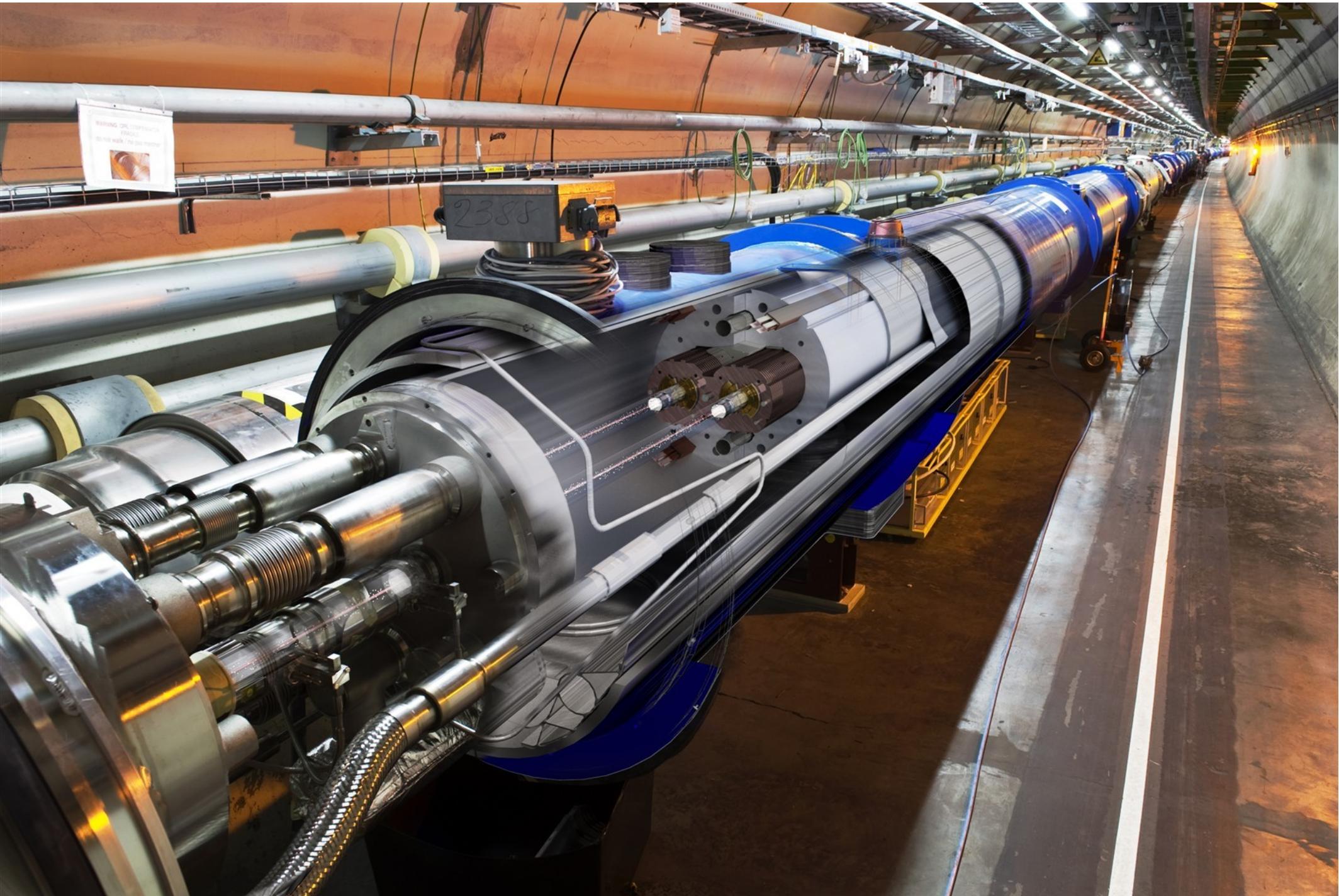
- Fermilab, Chicago
- Collisions proton-antiproton
- 1983-2011

- Le LHC

- Au CERN
- Collisions proton-proton
- Depuis 2009



Le LHC



LHC, le Grand collisionneur de hadrons



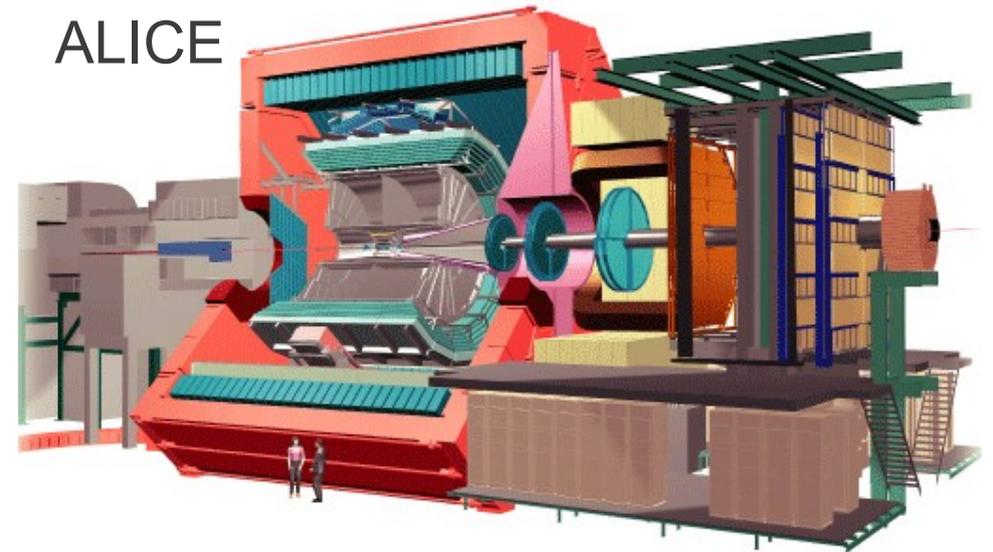
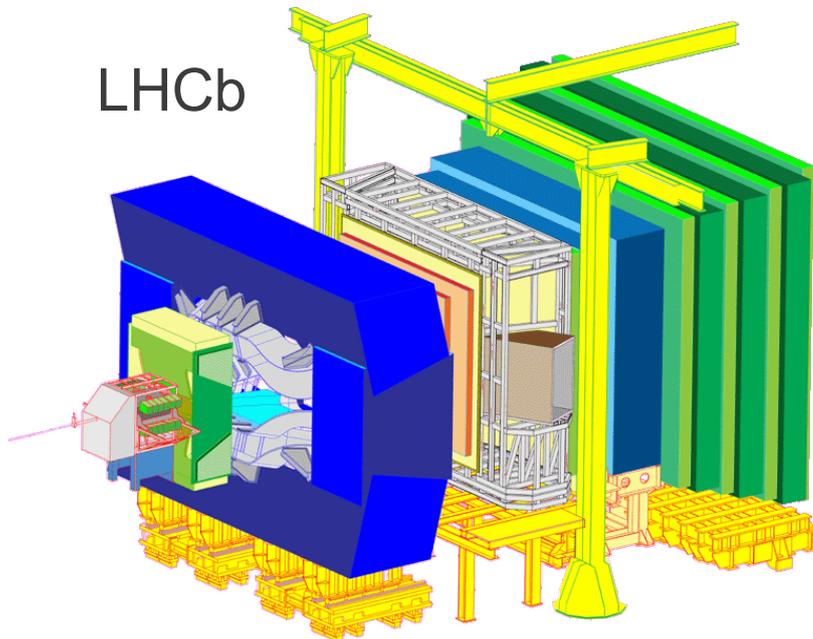
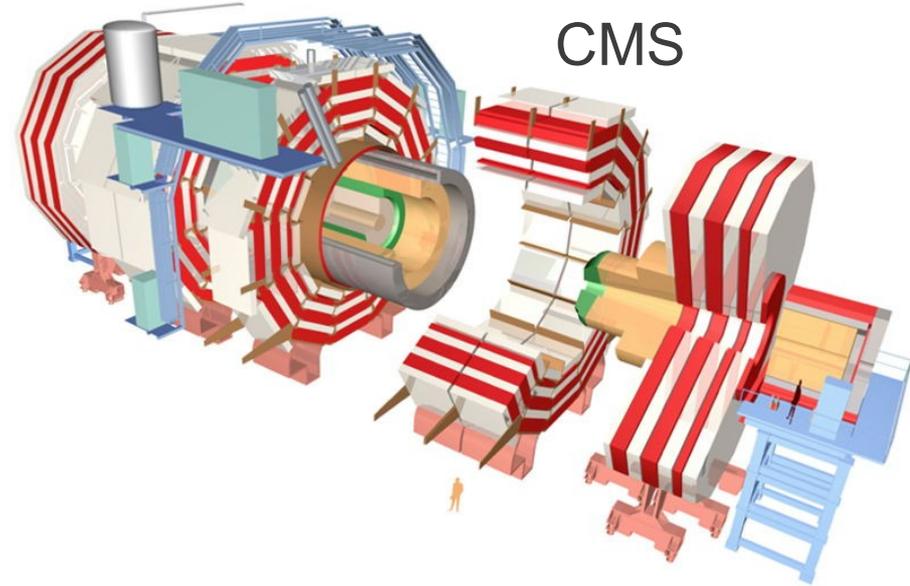
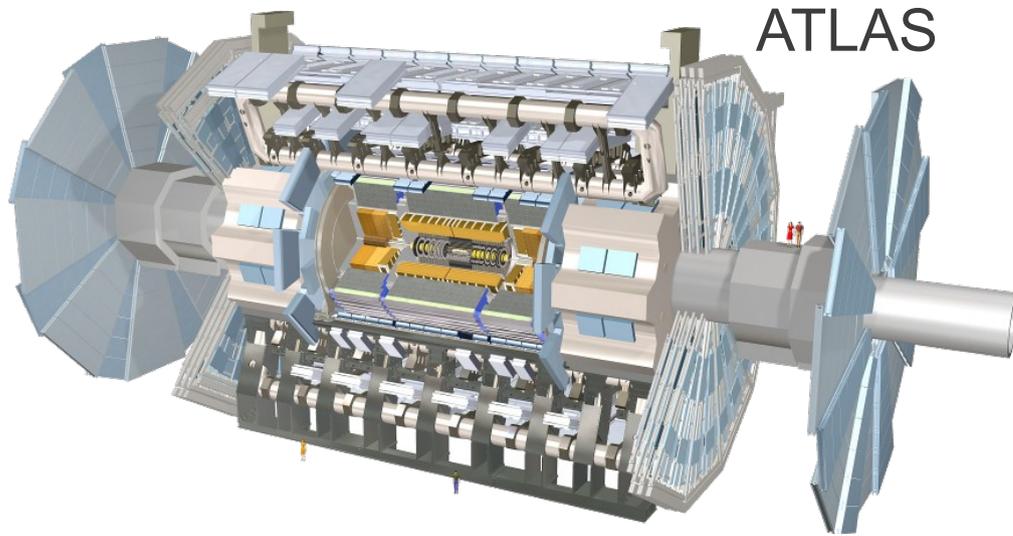
Un projet de longue haleine

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 ?

La machine à superlatifs

- La plus grande et la plus complexe machine scientifique jamais construite
- 27 km de circonférence
- Protons voyageant à 99,9999991% de la vitesse de la lumière, soit 11000 tours par seconde
- 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 8,4 T (200000 fois le champ magnétique terrestre)
- Longueur de câbles supraconducteurs : assez pour 5 aller-retours Terre-soleil
- Vide presque parfait (10^{-13} atm) : pression 10 fois plus faible que sur la Lune
- 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 !

Des détecteurs géants



Démarrage du LHC en 2008

- Événement planétaire
- ... et délire mondial : le LHC pourrait produire un trou noir qui détruirait la planète !
- En fait, tout s'est bien passé... pendant une semaine
- Un incident avec les aimants a retardé le programme de physique d'un an
- Depuis octobre 2009, la machine fonctionne au-delà des espérances, bien qu'à la moitié de son énergie nominale (faisceaux de 3,5 puis 4 TeV au lieu de 7 TeV)





Le CERN

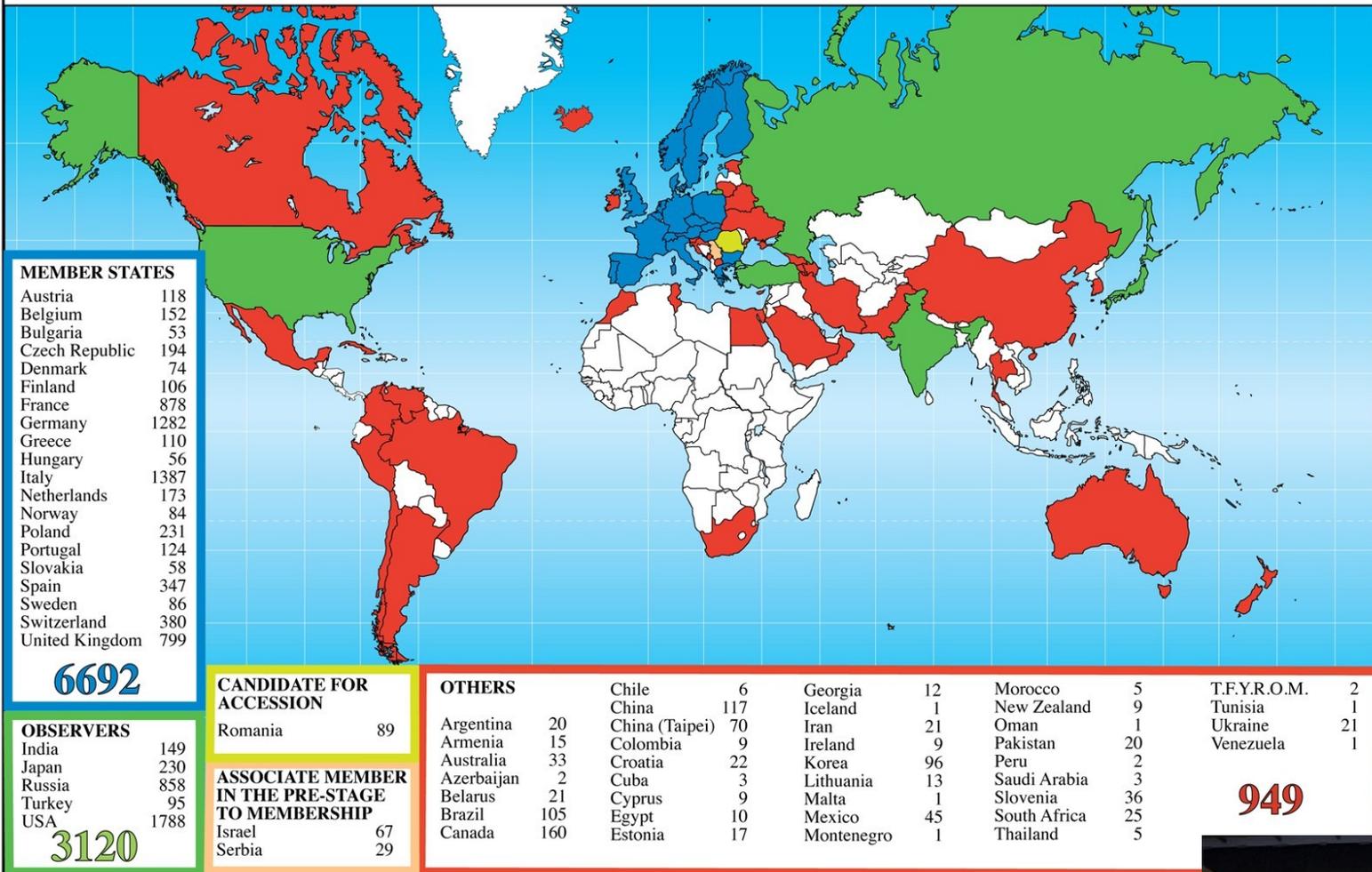


- Organisation européenne pour la recherche nucléaire
- Fondé en 1954
- Basé à Genève (Suisse), sites également en France
- Organisation internationale (les employés sont fonctionnaires internationaux)
- Nombreuses découvertes scientifiques et techniques
- Plusieurs prix Nobel
- Programme d'étudiant d'été



Le CERN : laboratoire mondial

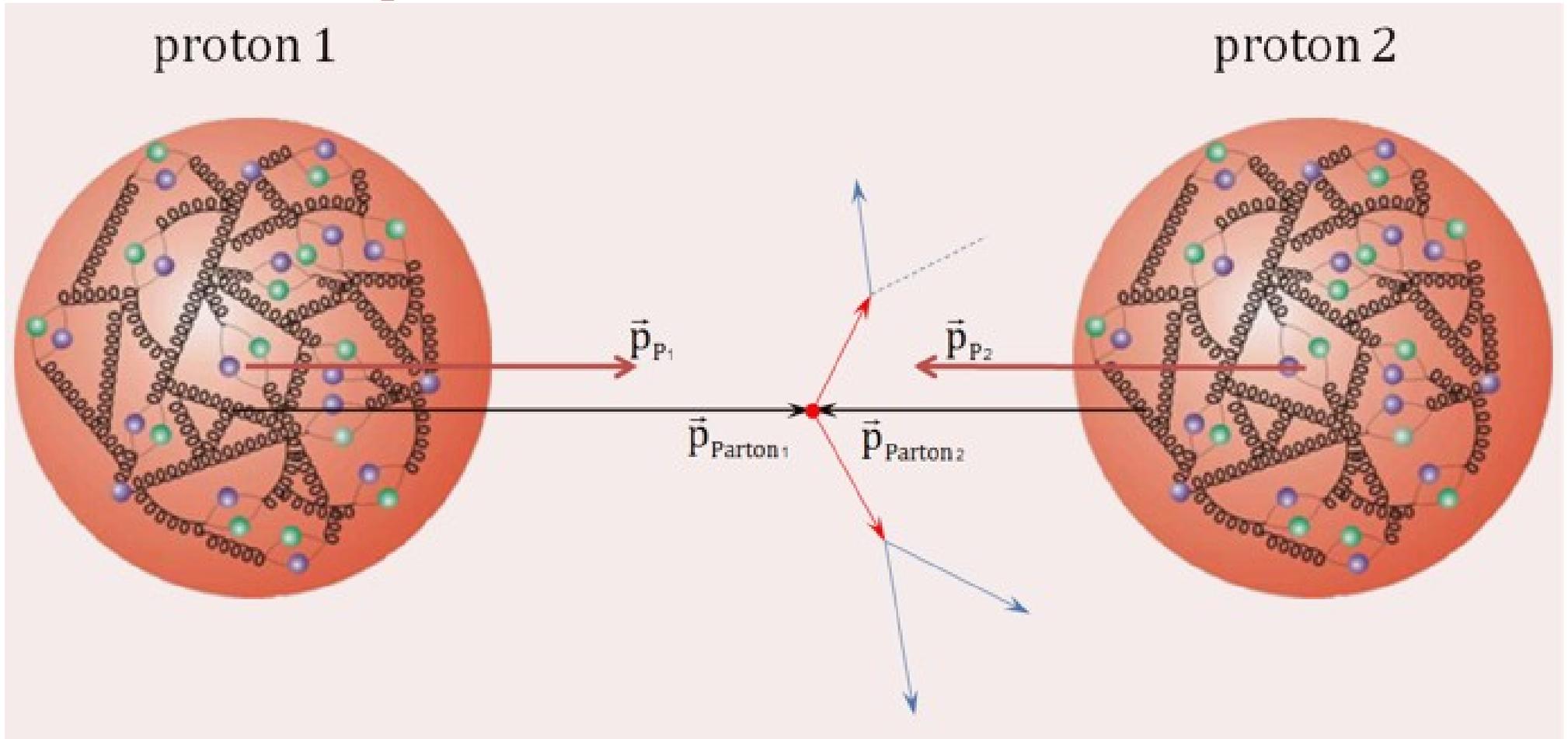
Distribution of All CERN Users by Nation of Institute on 3 September 2012



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



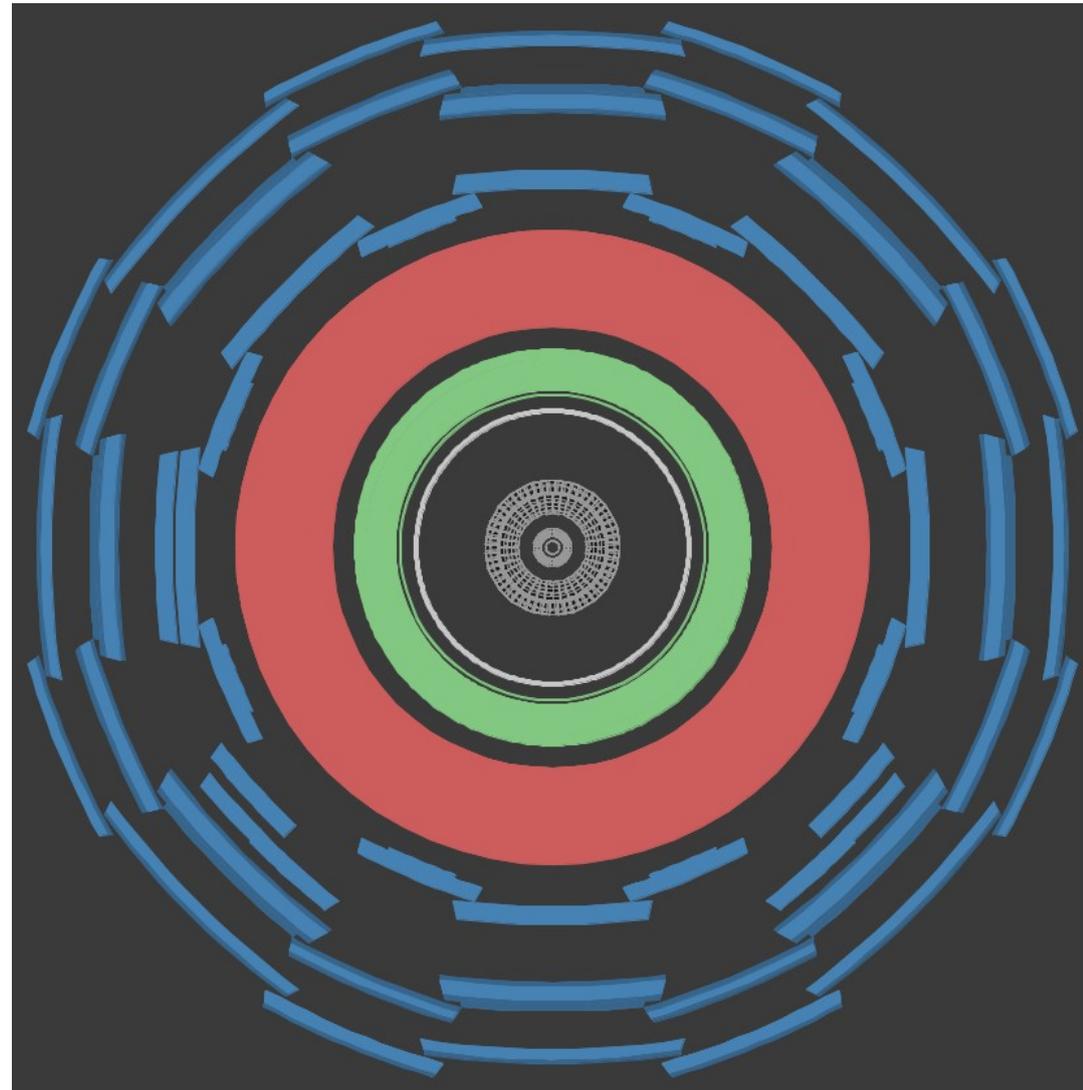
Deux protons se rencontrent...



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

Un détecteur, qu'est-ce que c'est ?

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



Interaction des particules avec le détecteur



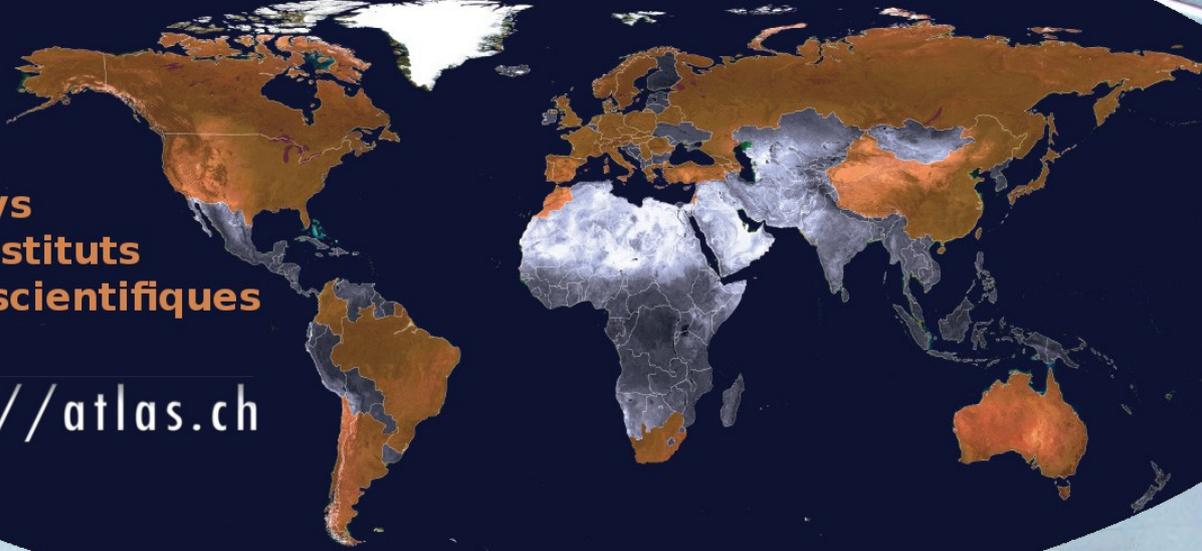
La collaboration ATLAS



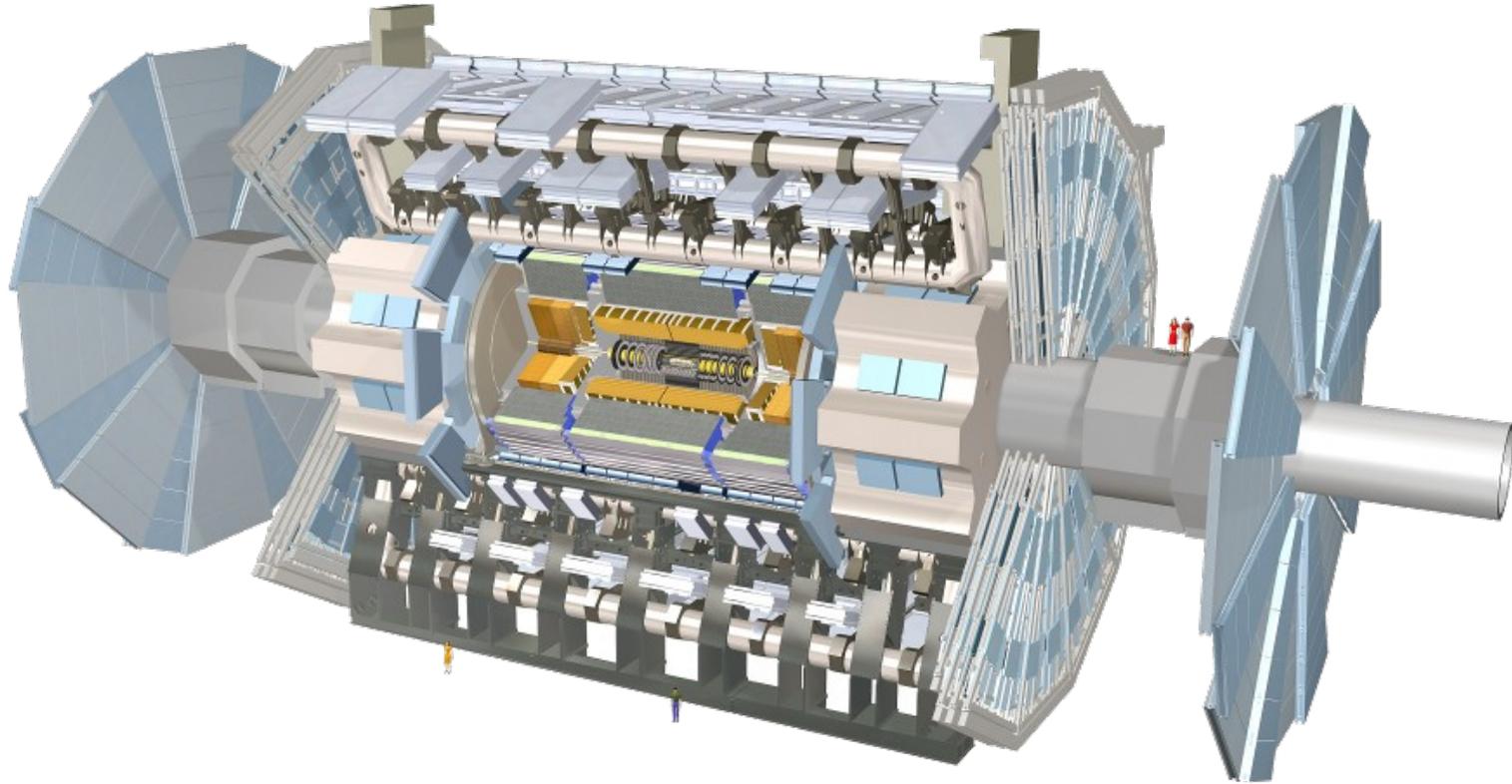
La collaboration ATLAS

38 pays
174 instituts
3000 scientifiques

<http://atlas.ch>



Le détecteur ATLAS

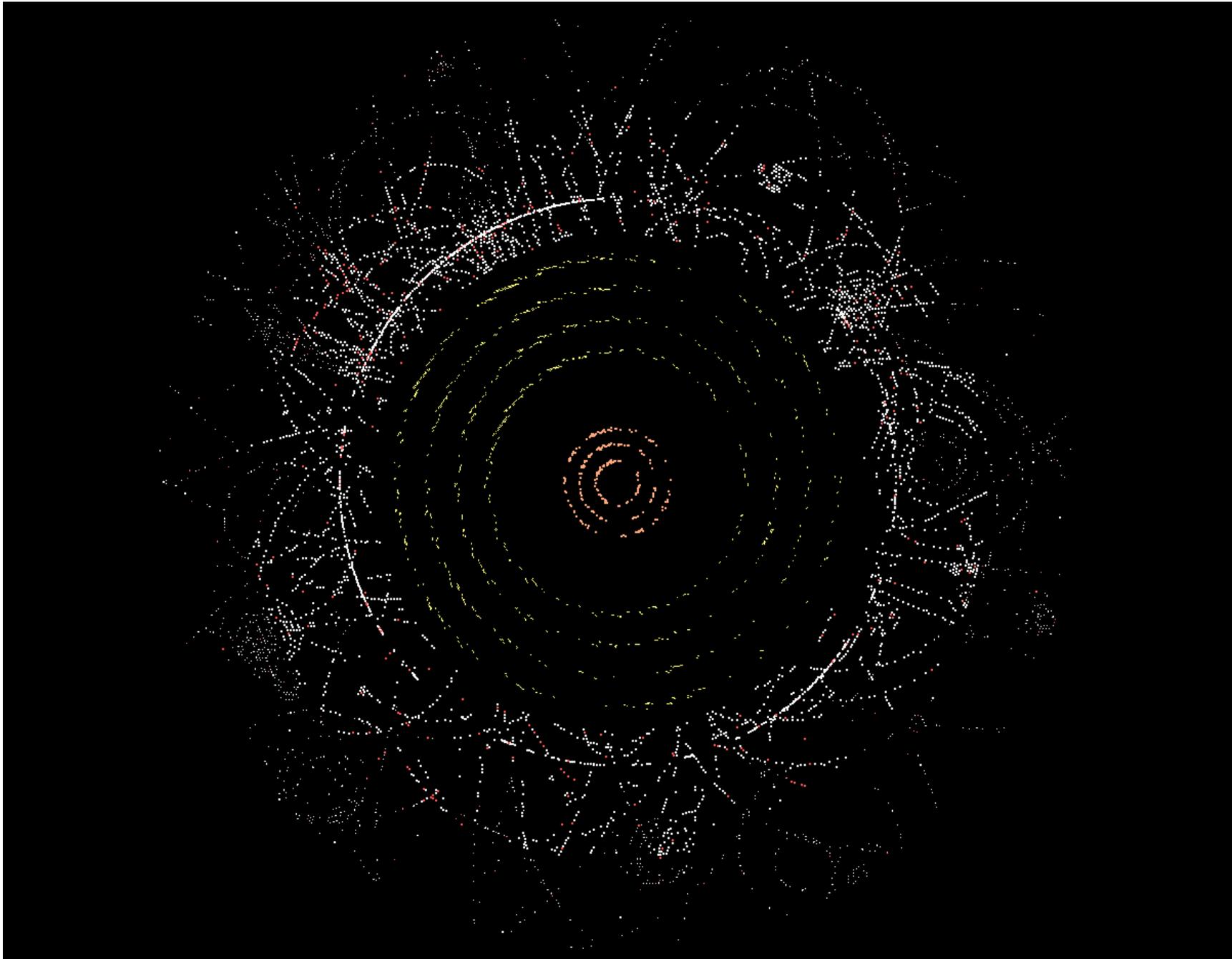


- 25 m de diamètre, 44 m de long
- 7000 tonnes (comme la tour Eiffel)
- 3000 km de câbles
- 100 millions de canaux
- En France : 6 laboratoires CNRS/IN2P3/Université et 1 CEA, 400 personnes (physiciens, ingénieurs, étudiants)

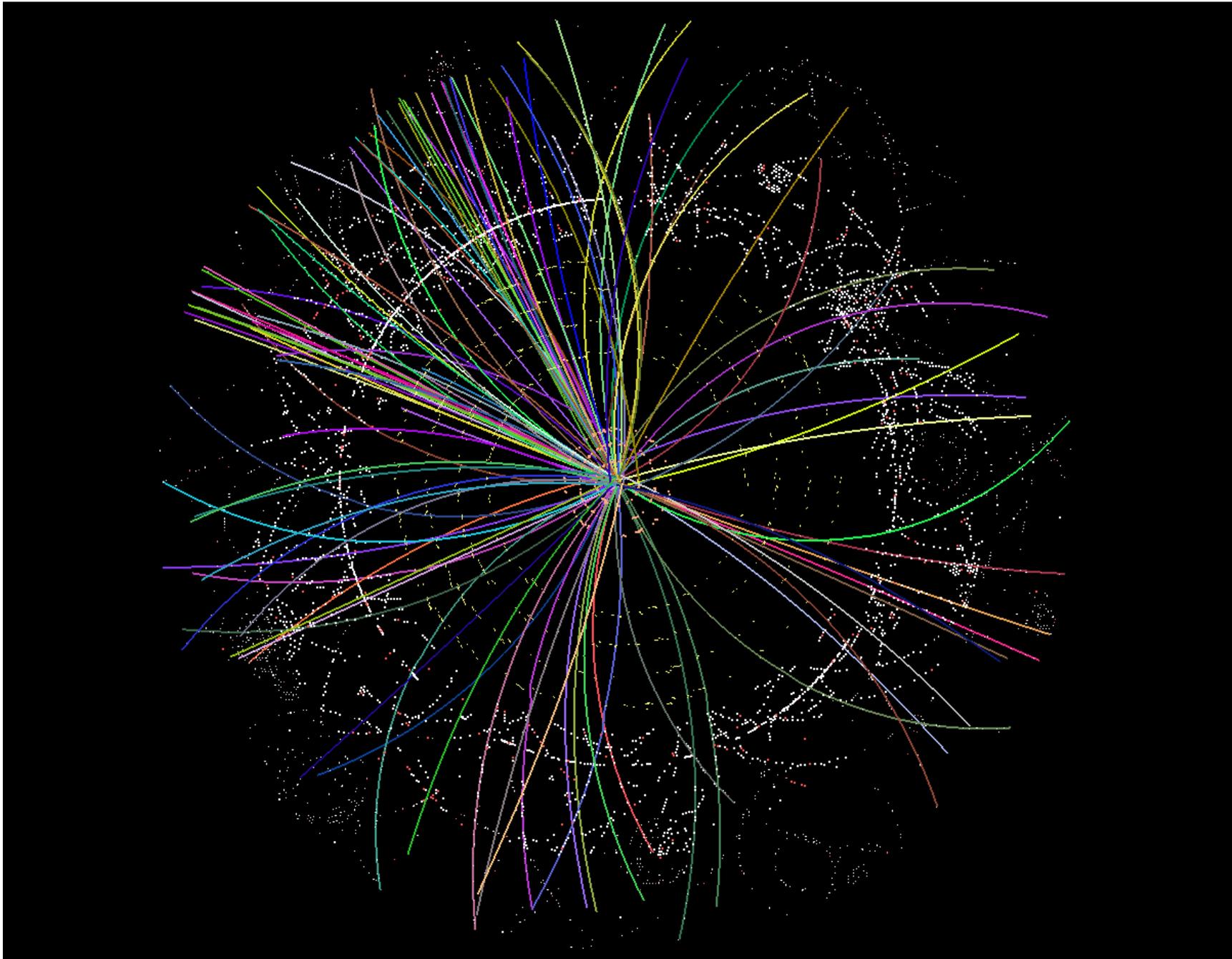
Le détecteur ATLAS construit en 1 minute



Passage des particules



Reconstruction des trajectoires

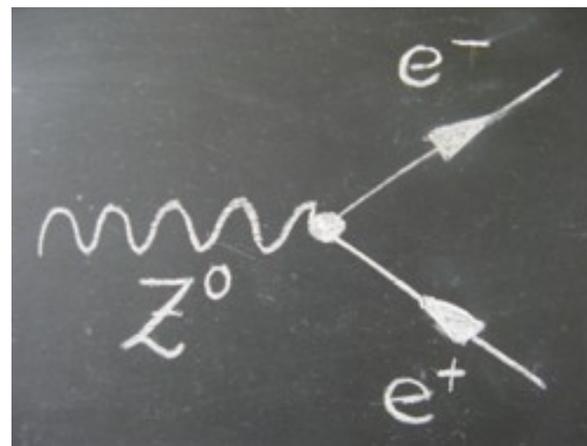
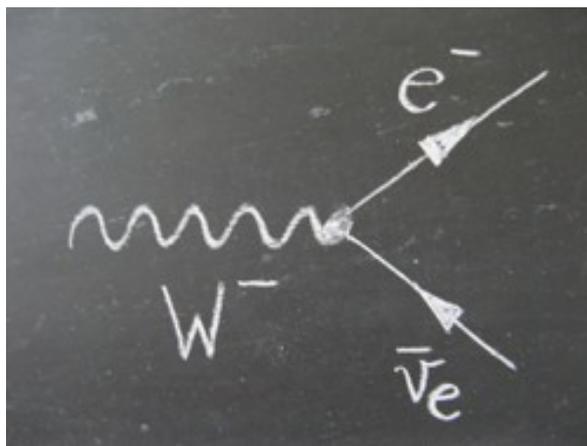
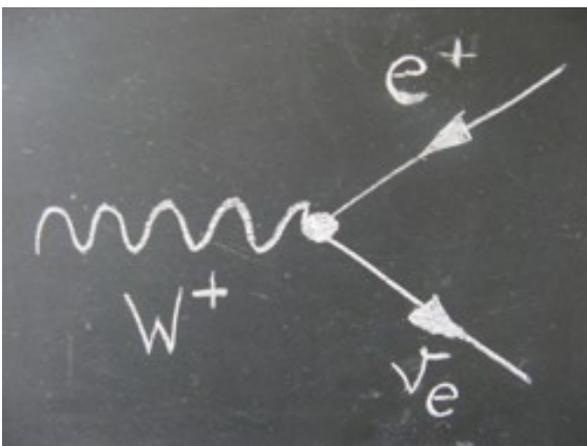


Difficulté : le bruit de fond

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

Exemple de signal et bruit de fond

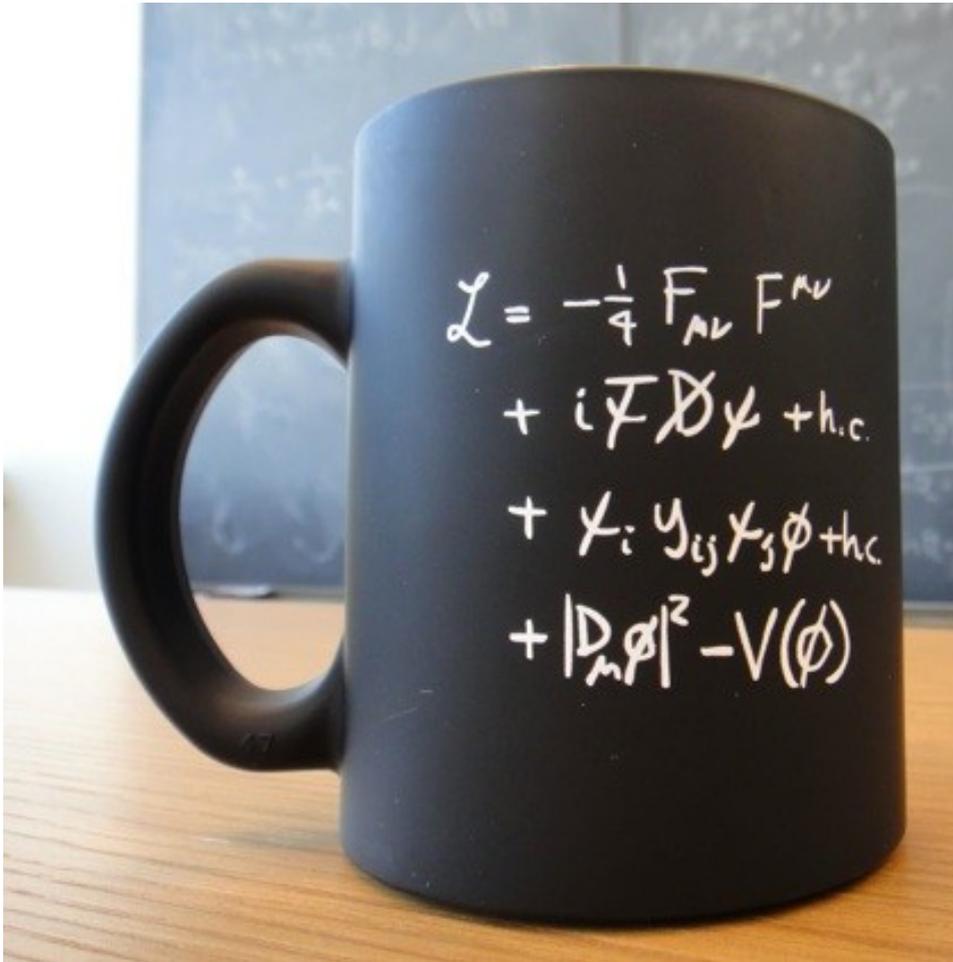
- Signal : désintégration de bosons $W \rightarrow ev$
- Bruit de fond : $Z \rightarrow ee$
- Un des e n'est pas reconstruit



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

Le Modèle standard

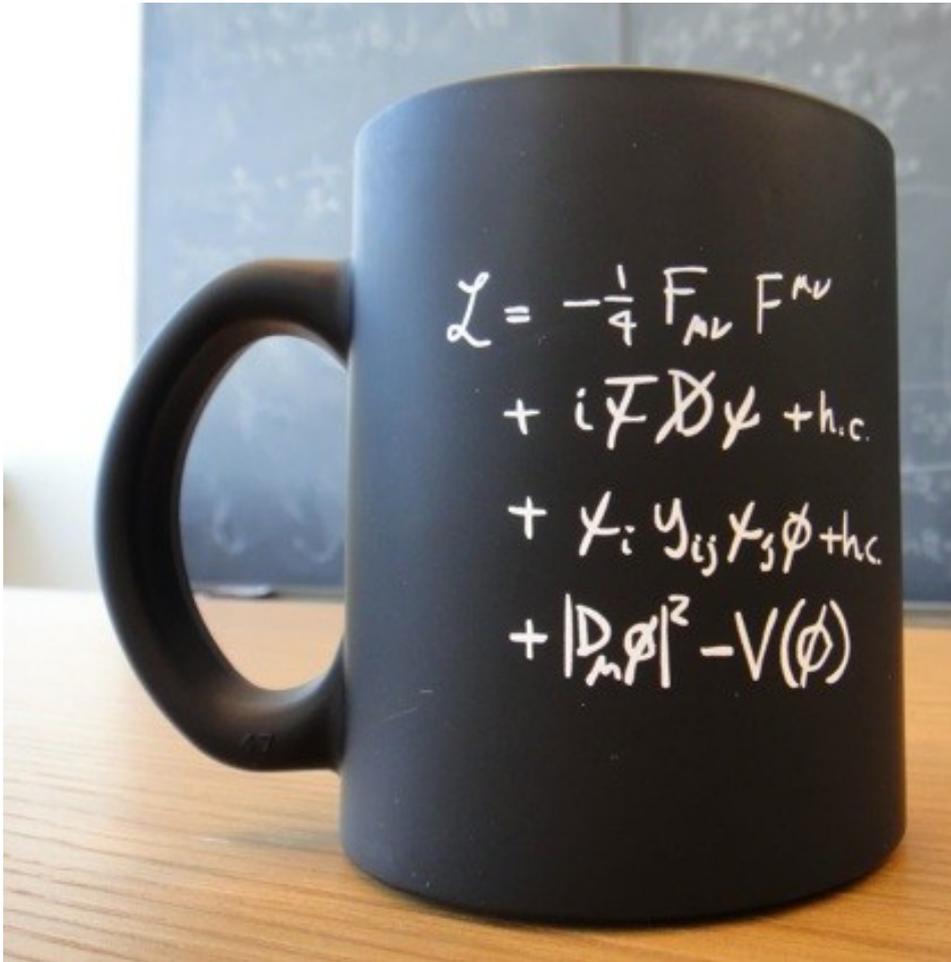
- Version synthétique



Le Modèle standard

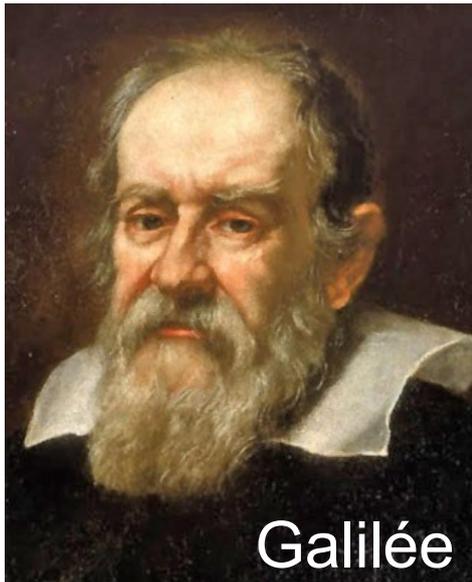
- Version synthétique

- Version développée...



$$\begin{aligned}
 & -\frac{1}{2} \partial_\nu g_\mu^a \partial_\nu g_\mu^a - g_s f^{abc} \partial_\mu g_\nu^a g_\mu^b g_\nu^c - \frac{1}{4} g_s^2 f^{abc} f^{ade} g_\mu^b g_\nu^c g_\mu^d g_\nu^e + \\
 & \frac{1}{2} i g_s^2 (\bar{q}_i^\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 \left[\frac{2M^2}{g^2} + \right. \\
 & \left. \frac{2M}{g} H + \frac{1}{2} (H^2 + \phi^0 \phi^0 + 2\phi^+ \phi^-) \right] + \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^2} 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} \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{X}^+ X^+ \phi^0 - \bar{X}^- X^- \phi^0]
 \end{aligned}$$

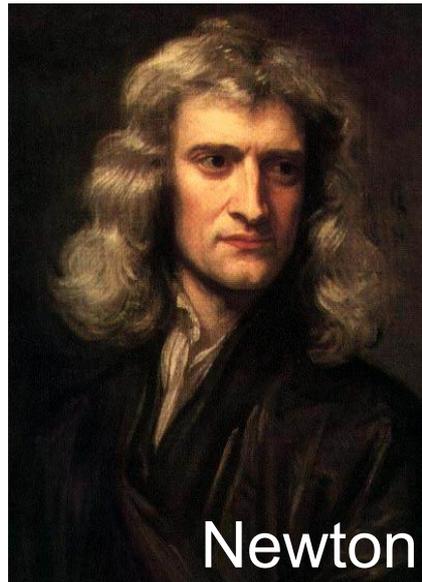
La masse



Galilée

- Masse gravitationnelle

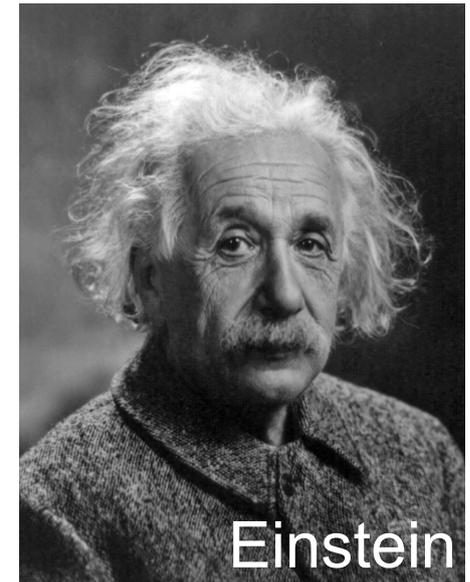
$$P = mg$$



Newton

- Masse inertielle

$$\Sigma F = ma$$



Einstein

- Equivalence masse/énergie

$$E = mc^2$$

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

Velouté d'Univers avec un soupçon de boson de Higgs

PRENDRE UN SALADIER,
LE REMPLIR DE PARTICULES
ÉLÉMENTAIRES :



CHAUFFER A FEU VIF
(TEMPÉRATURE DE L'UNIVERS
À SA CRÉATION)



GOÛTER .



ÇA A TOUTES LES SAVEURS
DE L'UNIVERS !!!!



ÇA A TOUTES LES
COULEURS DE L'UNIVERS !!!!

MAIS ÇA N'EST PAS L'UNIVERS :
C'EST UNE MÉLASSE SANS FORME, SANS MASSE !



EN FAIT, SANS MASSE
LES ÉLECTRONS NE
TOURNENT PLUS AUTOUR
DES NOYAUX ATOMIQUES,
PAS DE CHIMIE, PAS DE VIE
TELLE QUE NOUS LA CONNAISSONS...

RECOMMENCER ALORS LE COCKTAIL :

AJOUTE CETTE BONNE
DOSE DE THÉORICIENS !



CHAUFFER A FEU VIF
(TEMPÉRATURE DE L'UNIVERS
À SA CRÉATION)

ALORS?



QUEL BON GOÛT
DE MASSE !



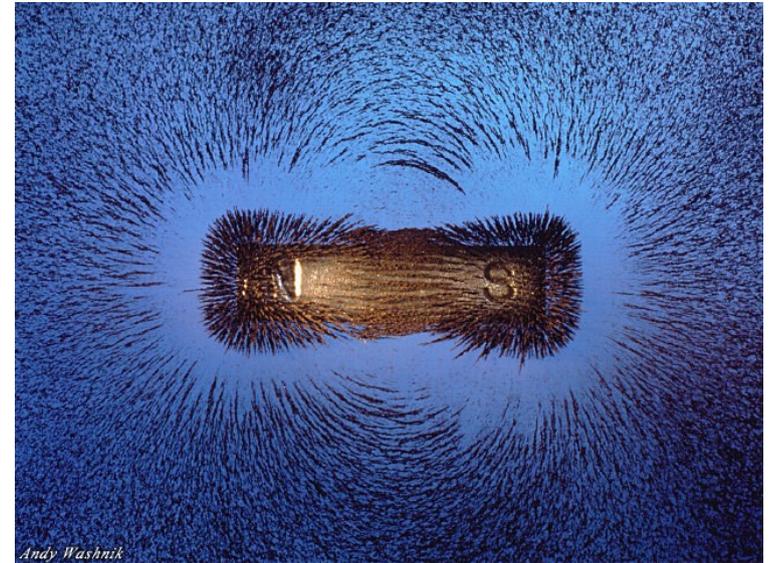
MAIS QU'EST-CE QUE LES
THÉORICIENS ONT AJOUTÉ?

HO! Un boson
Higgs !!!

BRUIT ENGLERT HIGGS

Notion de champ

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



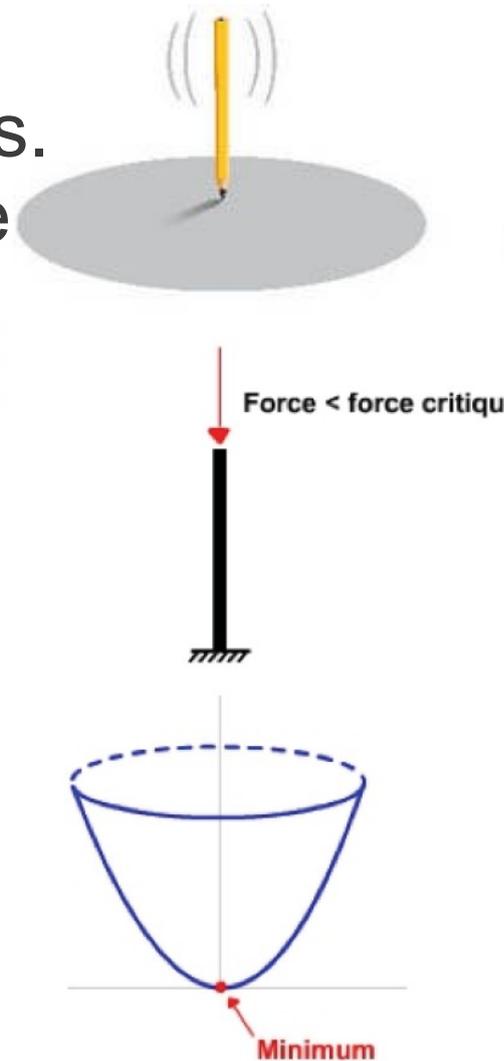
- Champ non-orienté : scalaire
 - Carte des températures
 - Champ de Higgs !

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

Brisure spontanée de symétrie

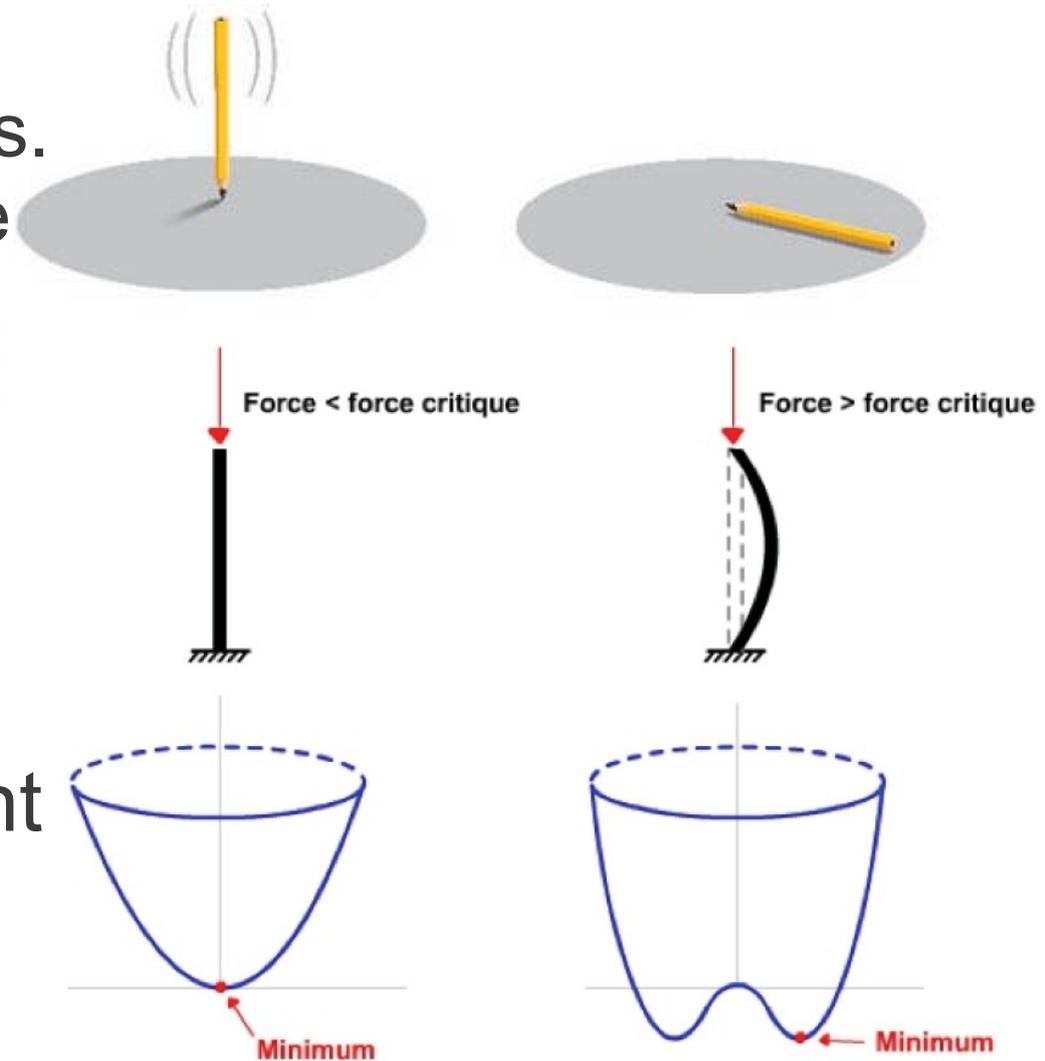
- Certains phénomènes physiques sont symétriques. Par exemple la symétrie de rotation :

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



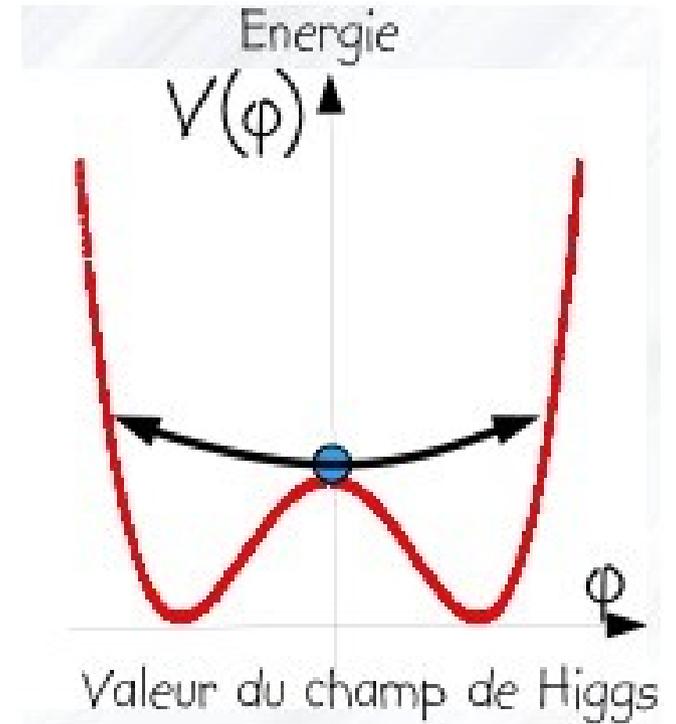
Brisure spontanée de symétrie

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



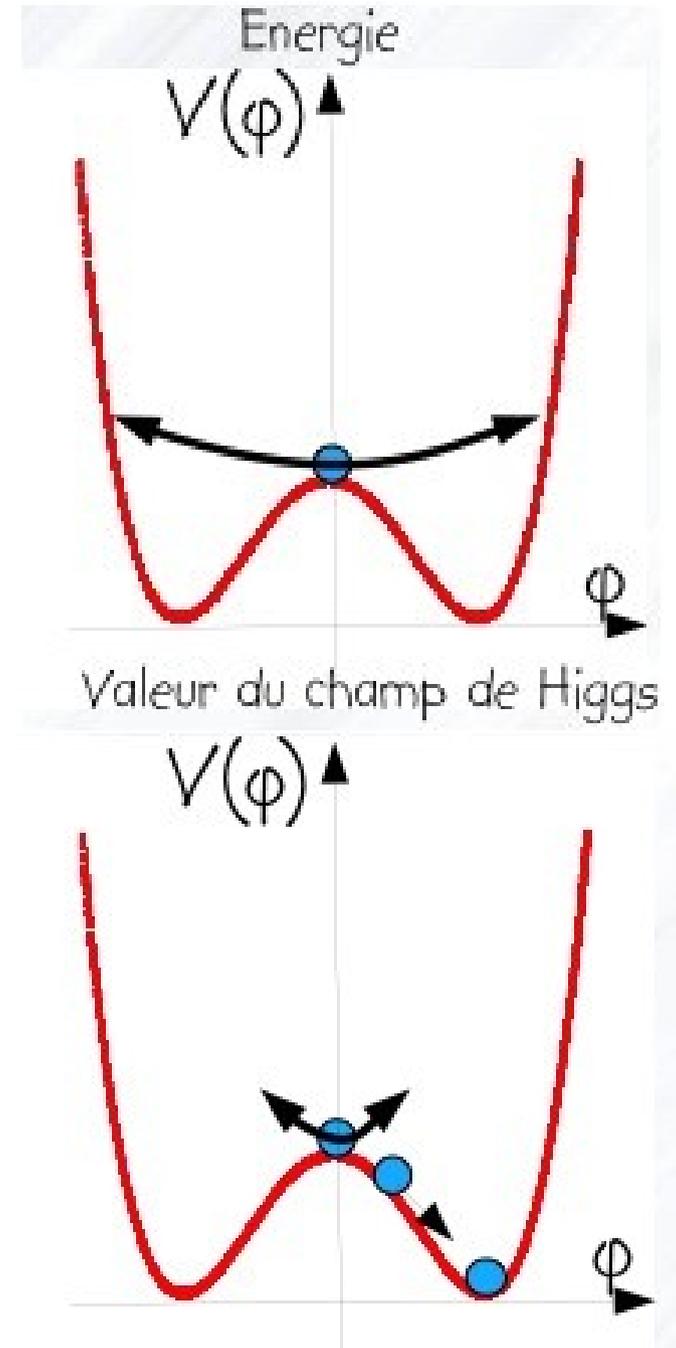
Brisure de la symétrie électrofaible

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

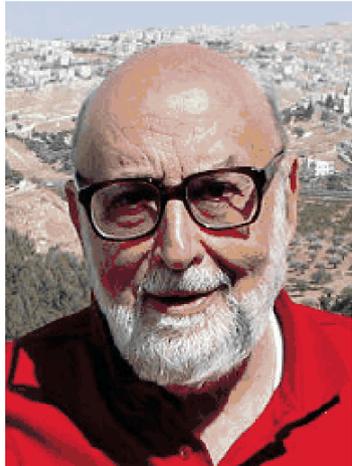


Brisure de la symétrie électrofaible

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



1964 : Le mécanisme de Higgs



BROKEN SYMMETRY AND THE MASS OF GAUGE VECTOR MESONS*

F. Englert and R. Brout

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

(Received 26 June 1964)

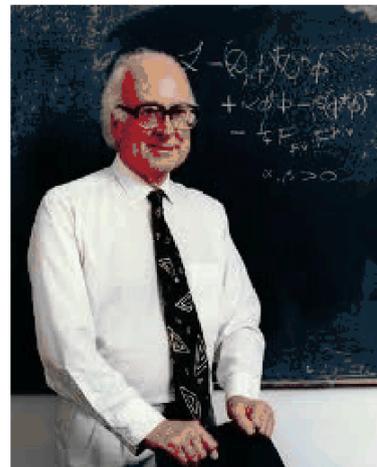
It is of interest to inquire whether gauge vector mesons acquire mass through interaction¹; by a gauge vector meson we mean a Yang-Mills field² associated with the extension of a Lie group from global to local symmetry. The importance of this problem resides in the possibility that strong-interaction physics originates from massive gauge fields related to a system of conserved currents.³ 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.⁴⁻⁶ 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 γ_5 -phase transformations. In this model the gauge fields themselves may break the γ_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 note¹ it was shown that the Goldstone theorem,² 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



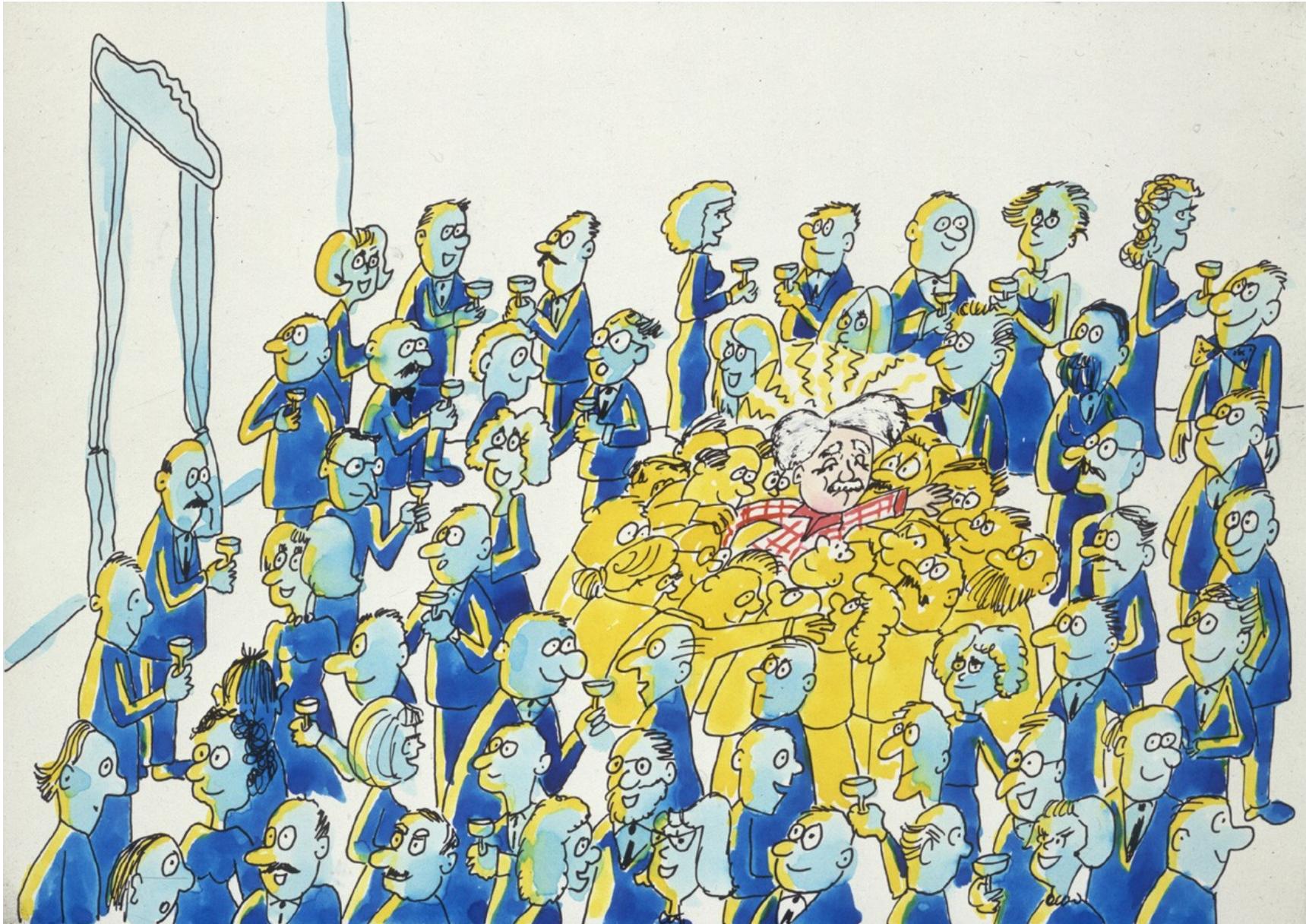
Imaginons qu'une salle pleine de physiciens conversant calmement est comme l'espace occupé seulement par le champ de Higgs...

Mécanisme de Higgs en images



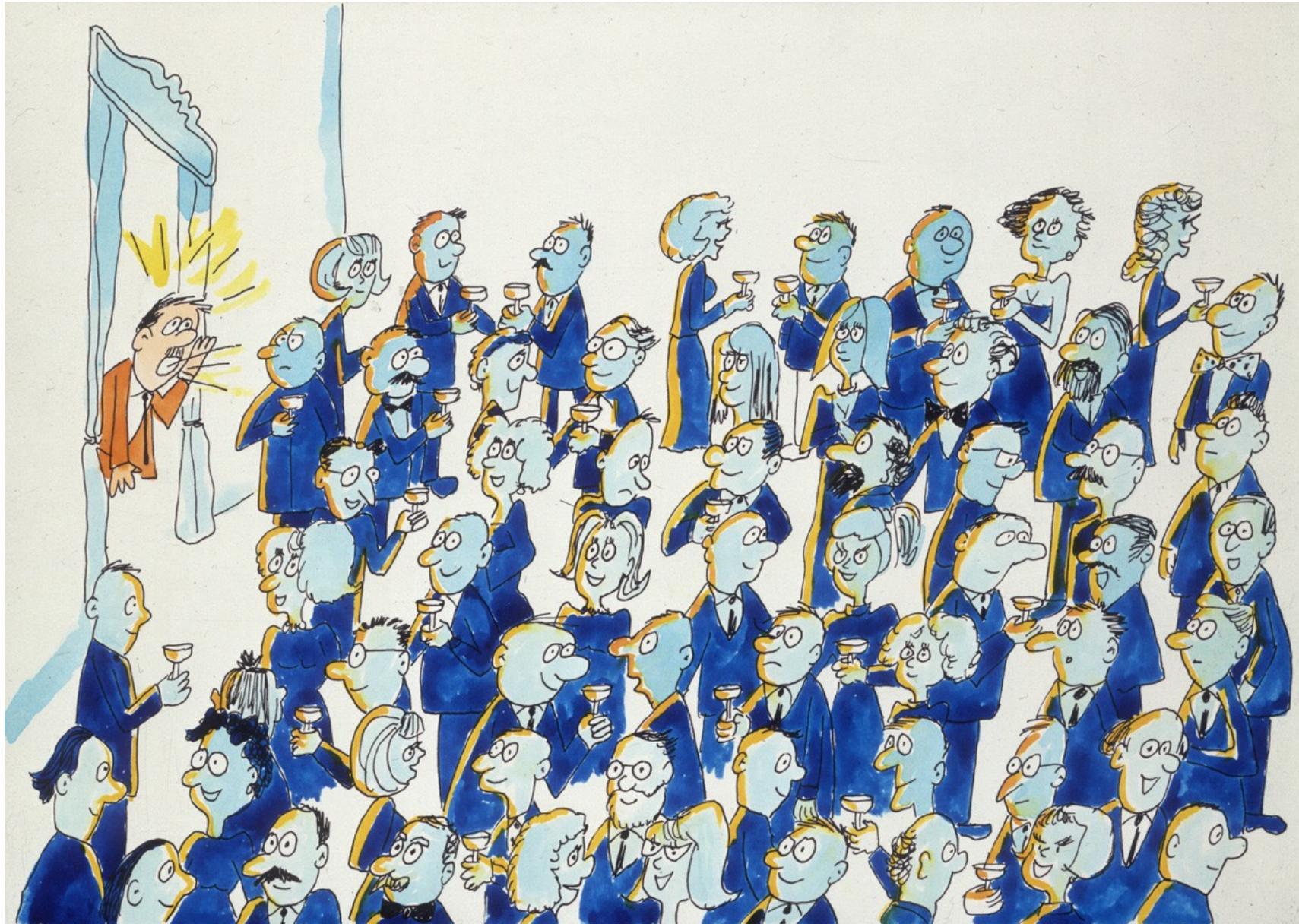
... Albert Einstein entre, créant une perturbation sur son passage et attirant un essaim d'admirateurs à chaque pas ...

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



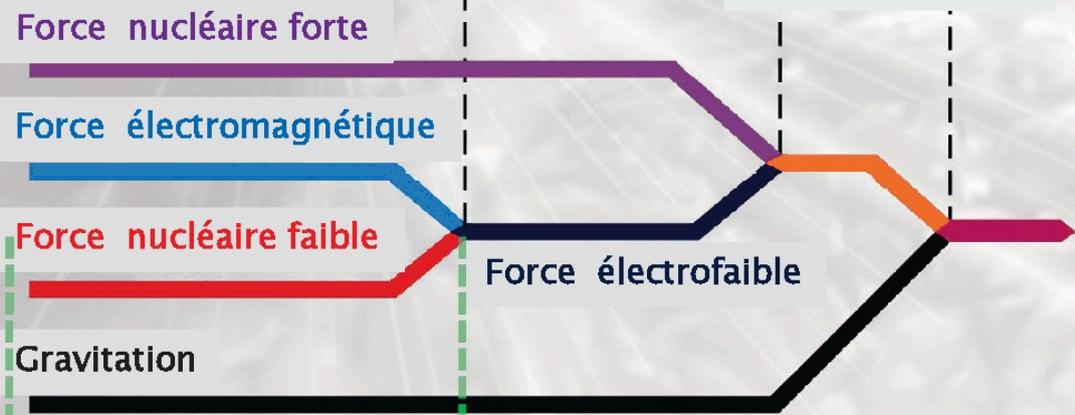
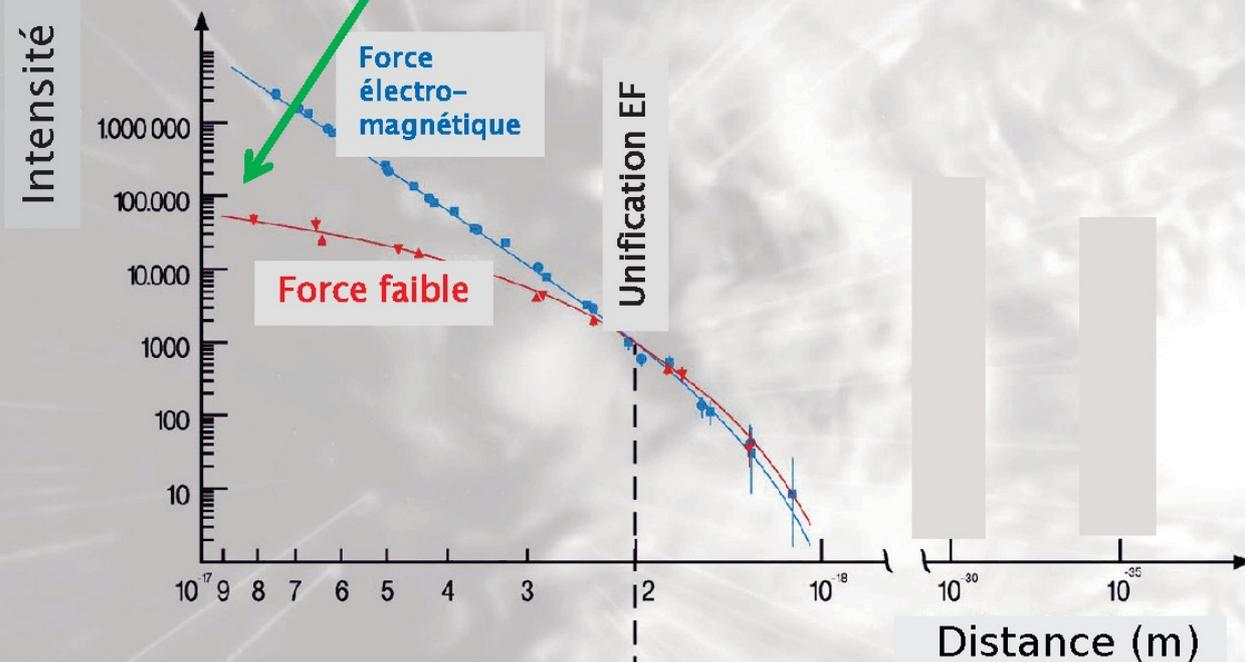
... elle donne naissance à un essaim de même type, composé cette fois des seuls physiciens. Cet essaim représente la particule de Higgs.

Interactions avec le boson de Higgs

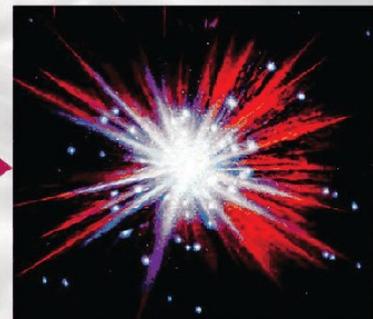


Unification électrofaible

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



Big-Bang

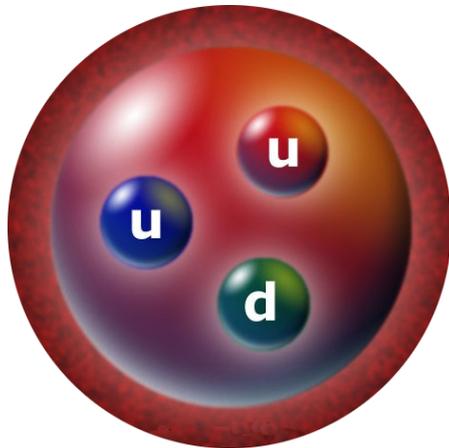


13,7 milliards d'années (2,7 K)

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

La masse

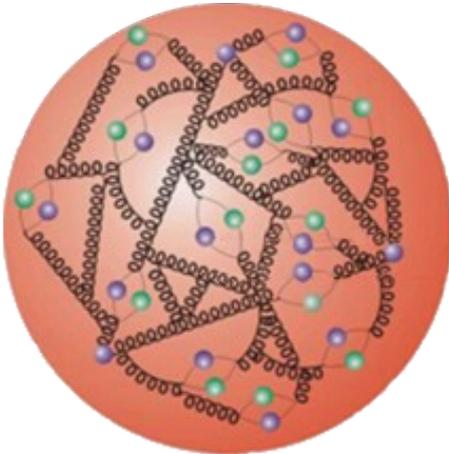
- Notre masse : celle de nos atomes
- Masse des atomes : presque uniquement celle des noyaux, faits de protons et neutrons de masse ~ 1 GeV



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

La masse

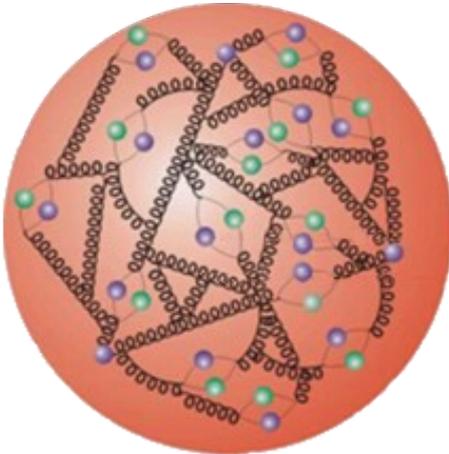
- Notre masse : celle de nos atomes
- Masse des atomes : presque uniquement celle des noyaux, faits de protons et neutrons de masse ~ 1 GeV



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

La masse

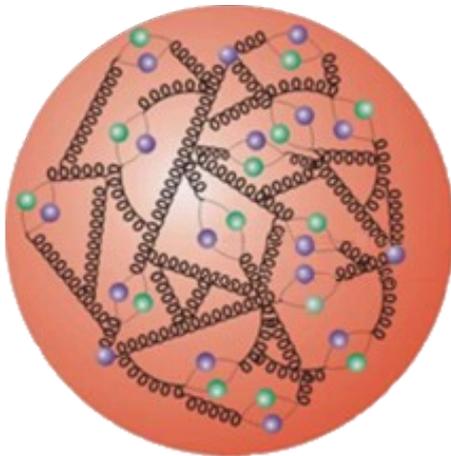
- Notre masse : celle de nos atomes
- Masse des atomes : presque uniquement celle des noyaux, faits de protons et neutrons de masse ~ 1 GeV



- 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

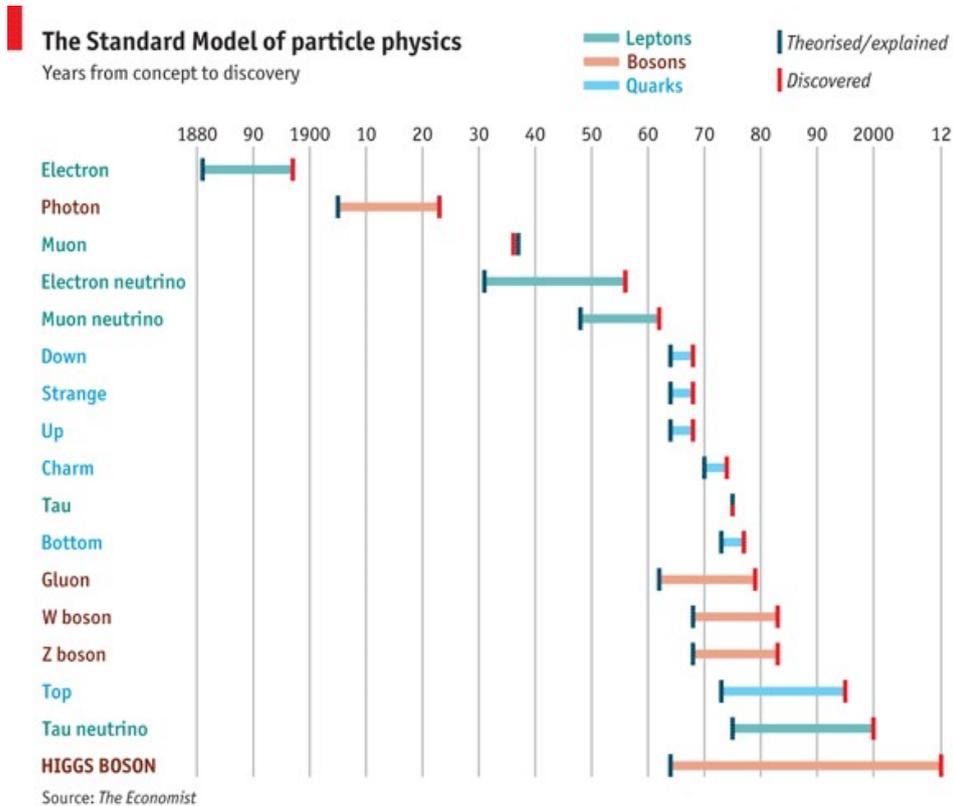
La masse

- 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

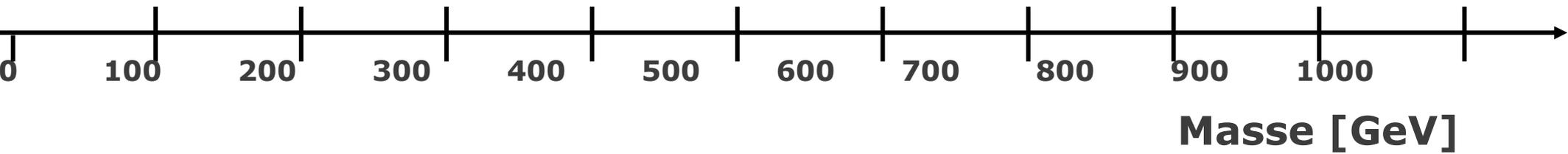


© The Economist

- 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...

La chasse au boson de Higgs

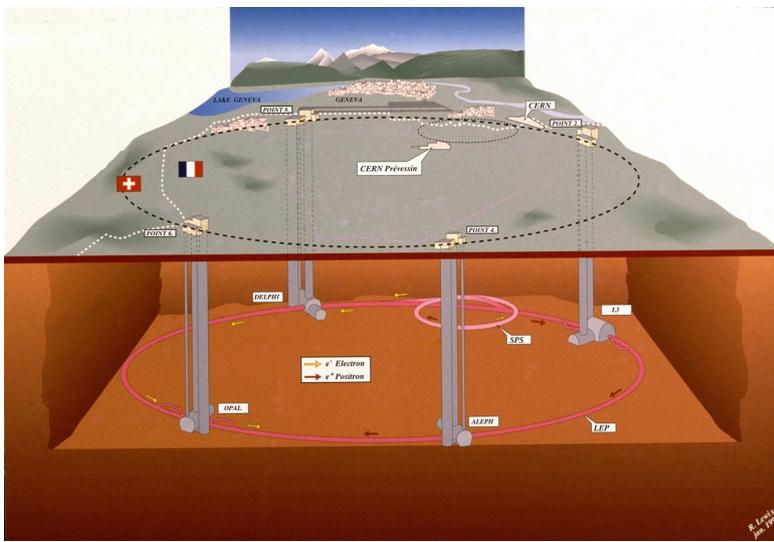
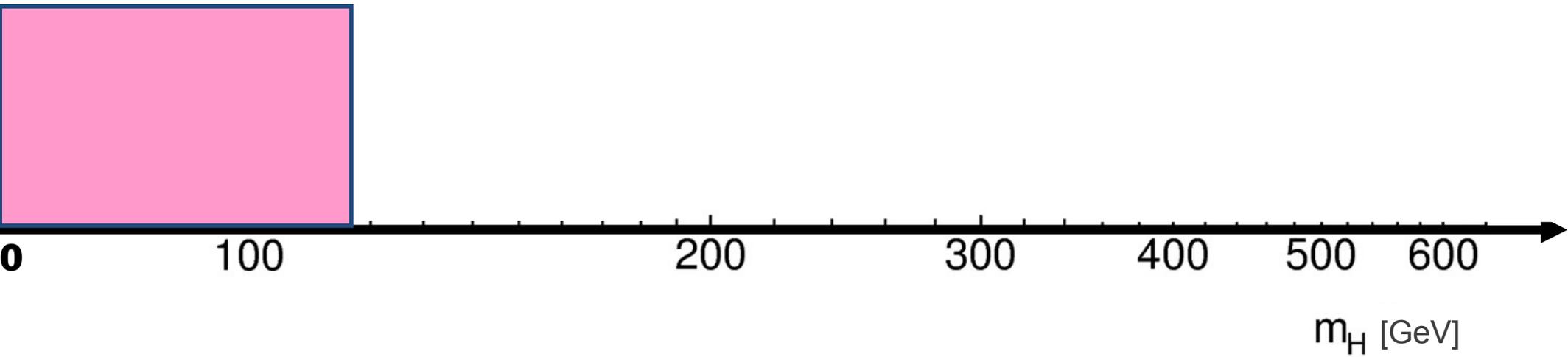
?



- Seule contrainte théorique : masse < 1000 GeV

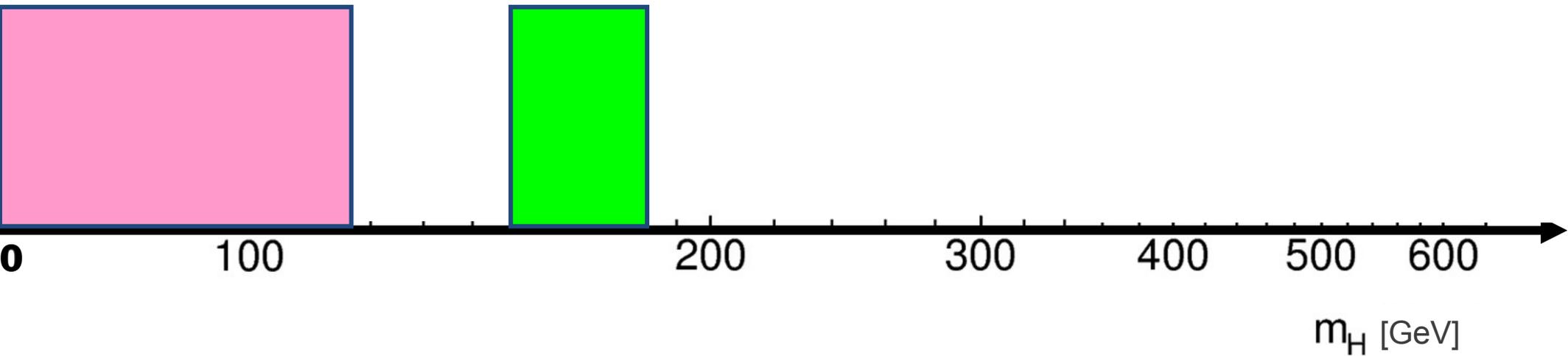
La chasse au boson de Higgs

LEP
1989-2000



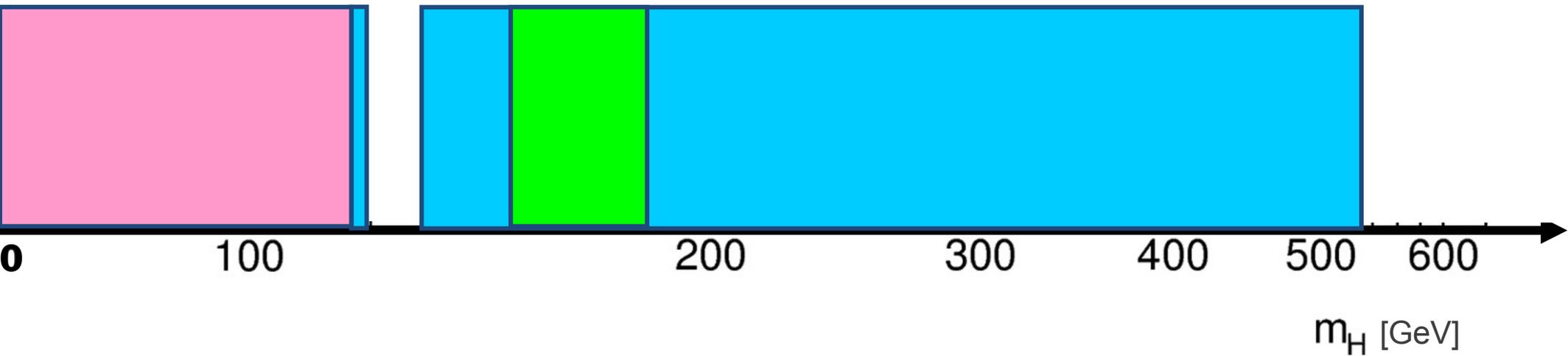
La chasse au boson de Higgs

Tevatron
1983-2011

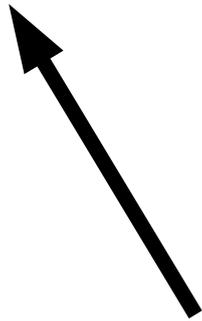
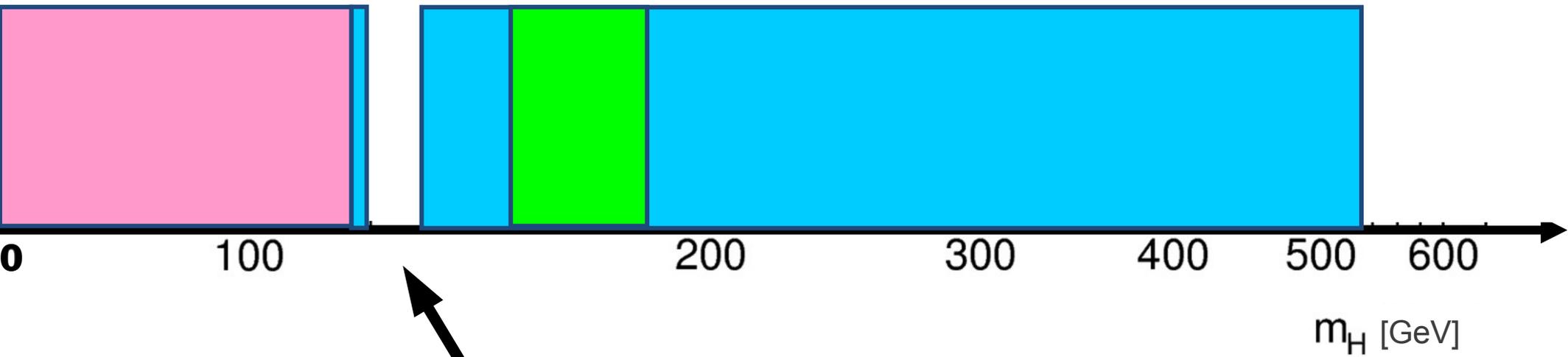


La chasse au boson de Higgs

LHC
depuis 2009



La chasse au boson de Higgs



?

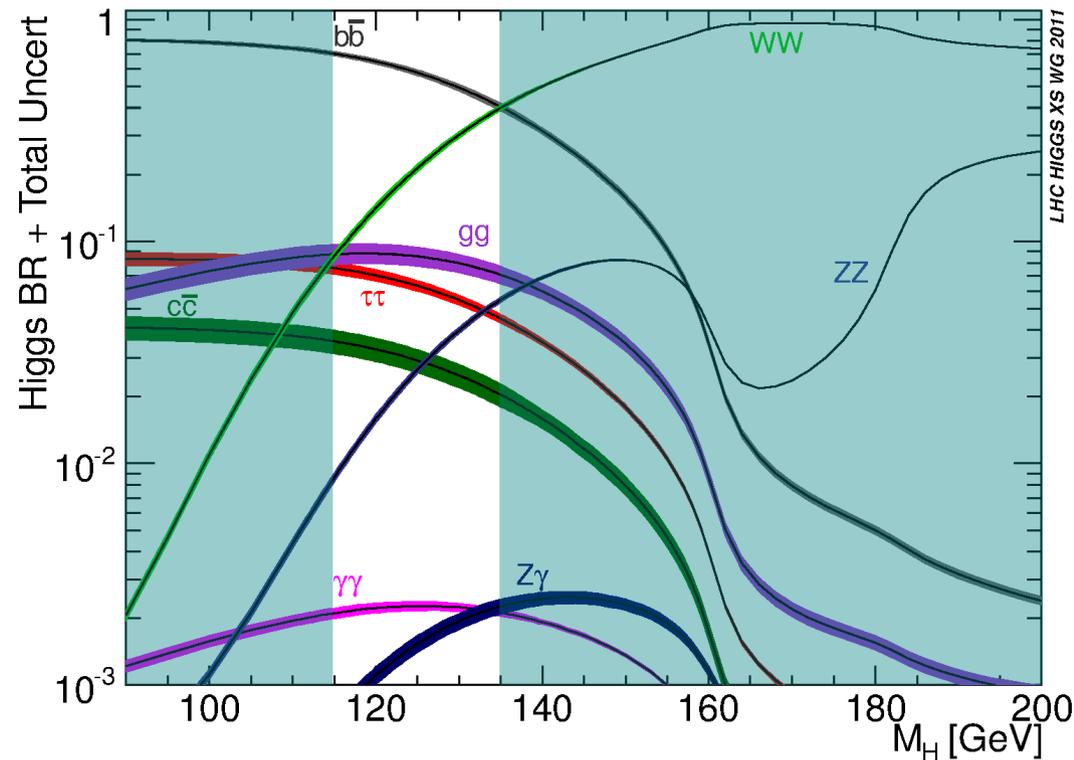


Comment s'y prend-on ?

- Collision de protons $\rightarrow (E = mc^2) \rightarrow$ création d'un boson de Higgs, une fois sur 10 milliards

- Ensuite il se désintègre, différemment suivant sa masse. Exemple à 126 GeV :

- 56 fois sur 100 en $b\bar{b}$
- 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

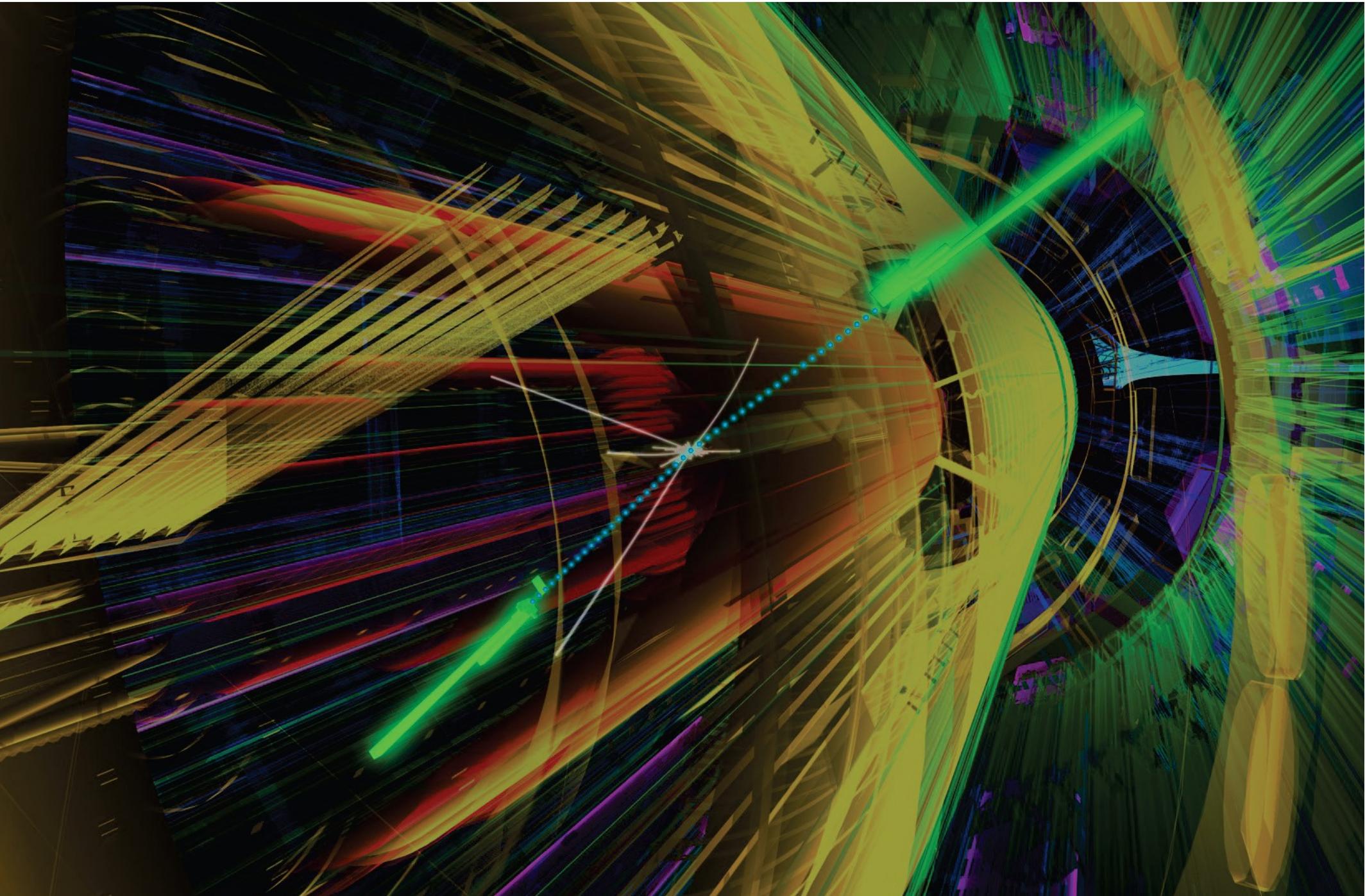
- Le boson de Higgs n'est pas produit très souvent, il faut donc analyser énormément de collisions
- La trace de sa désintégration dans le détecteur peut être imitée par d'autres processus, c'est le bruit de fond



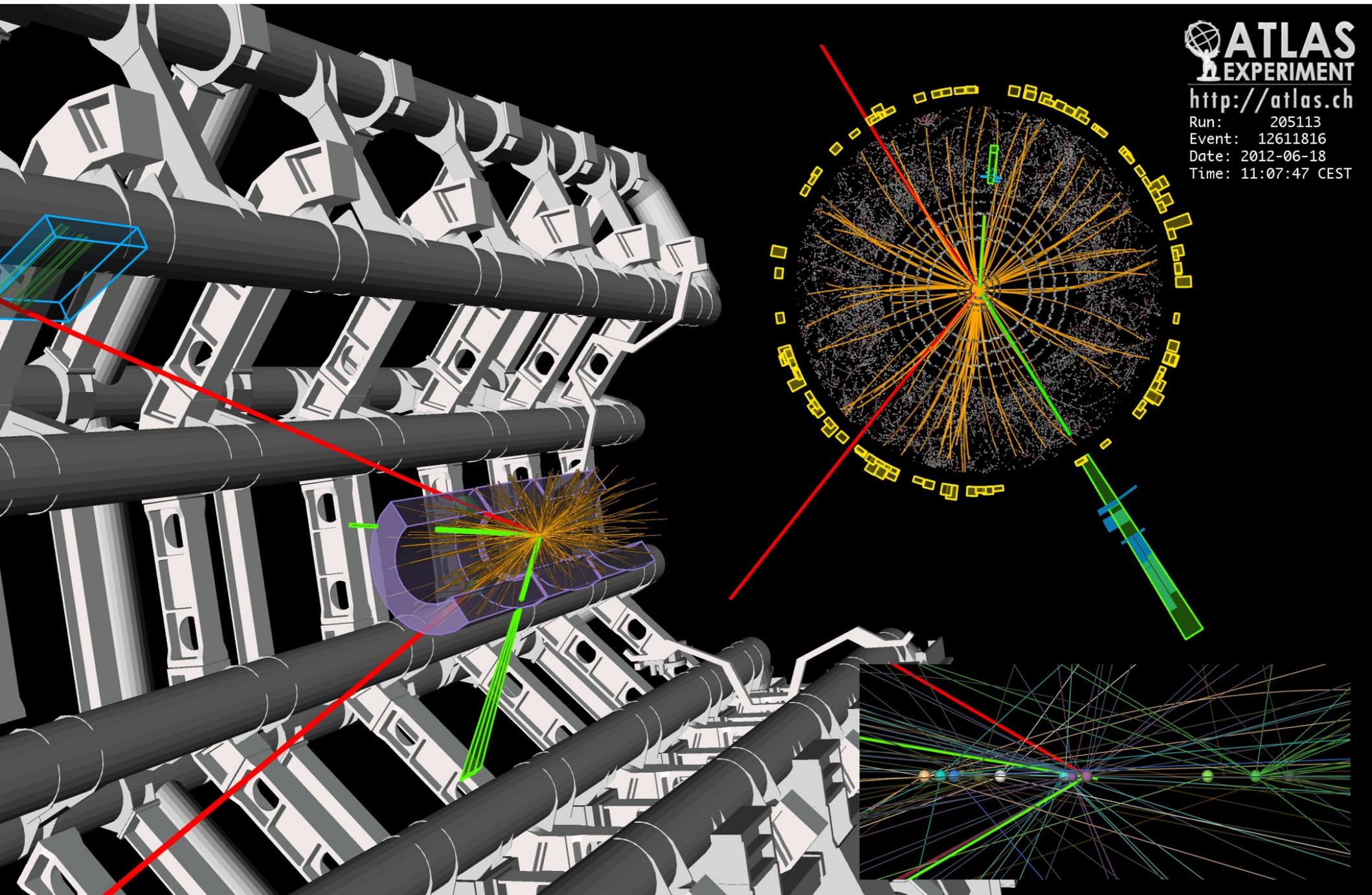
Boson de Higgs dans ATLAS



Candidat $H \rightarrow \gamma\gamma$

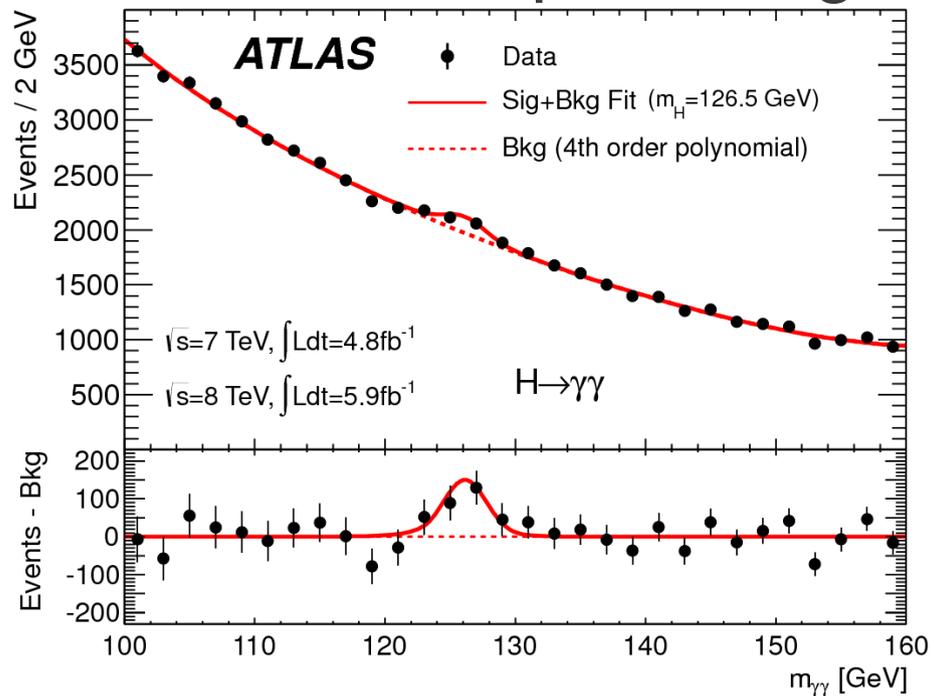


Candidat $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow e e \mu \mu$

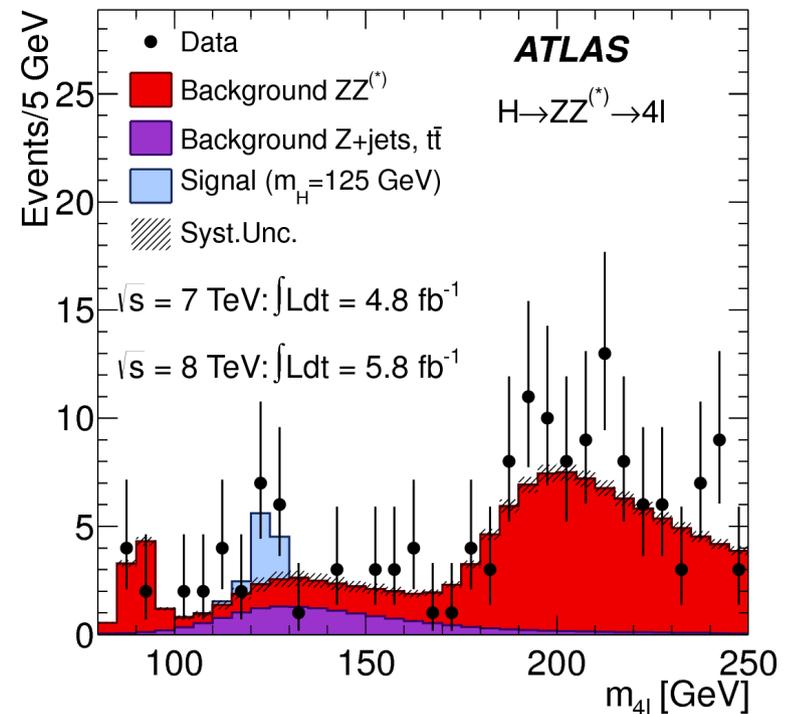


Mesure

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



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



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

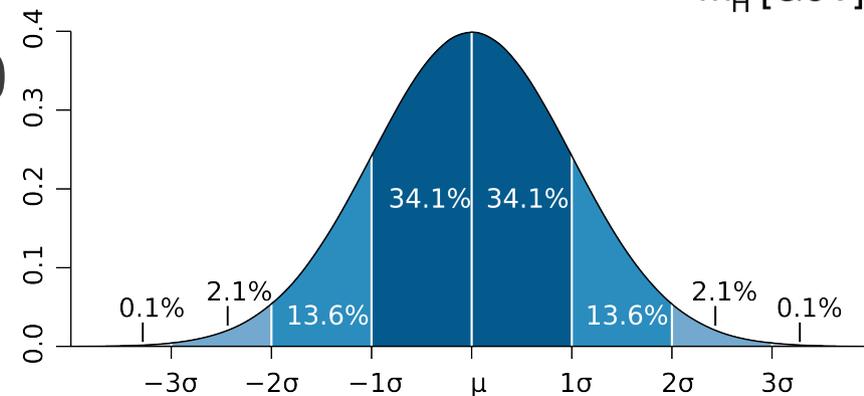
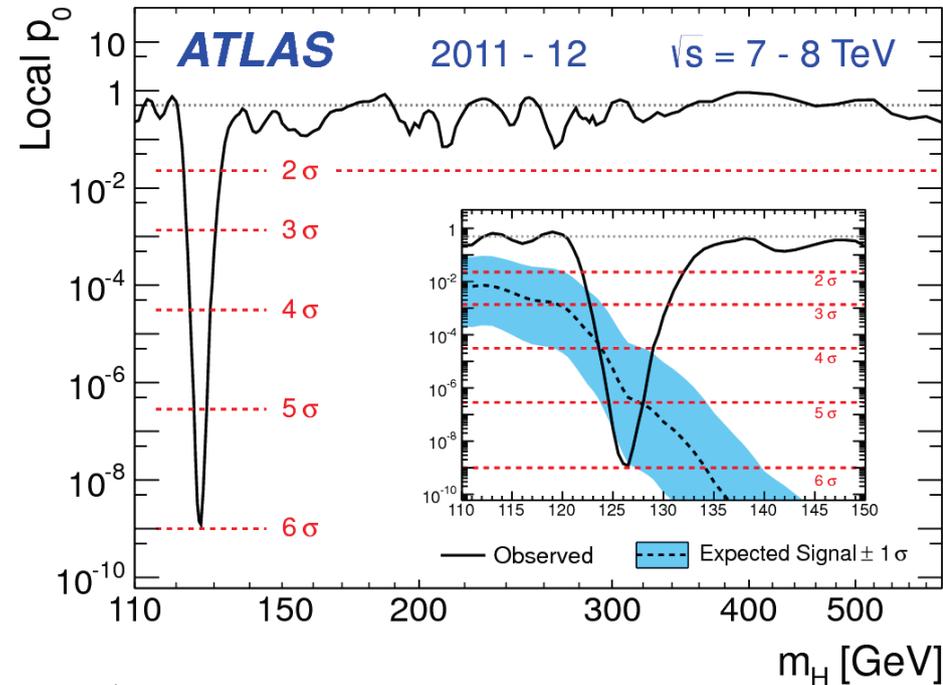
Significance statistique

- 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 :

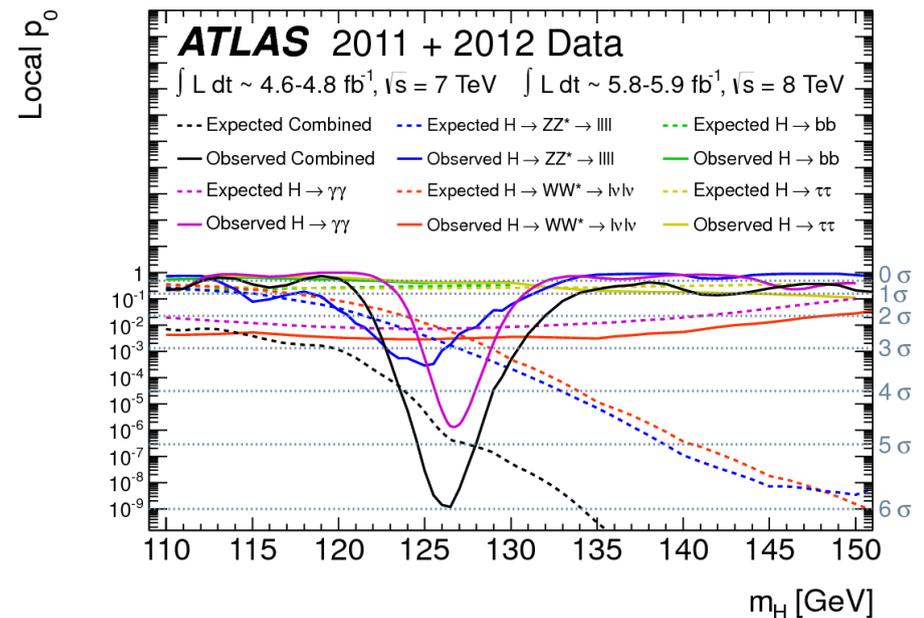
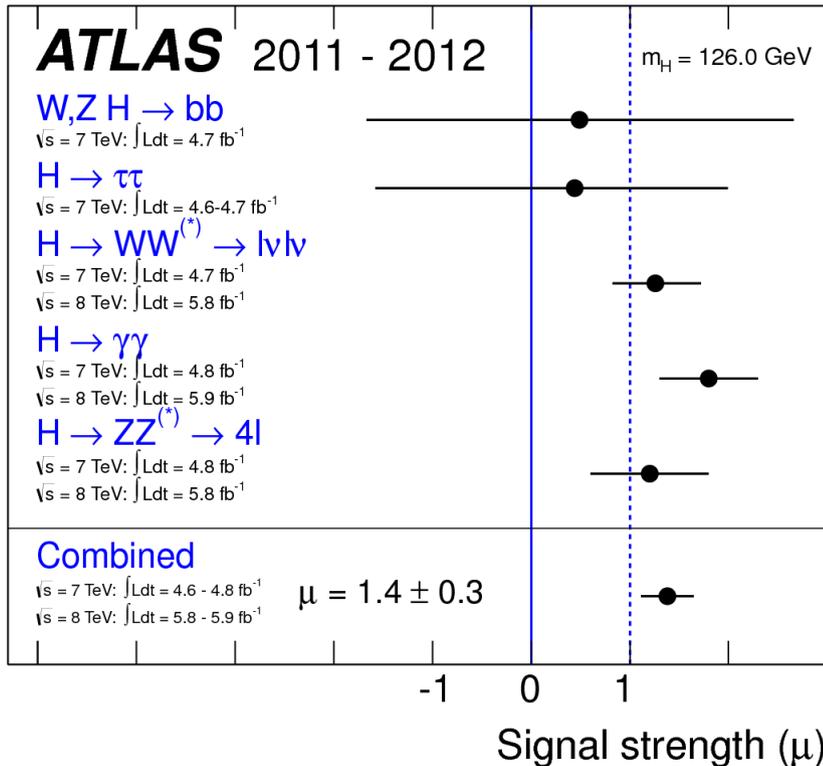
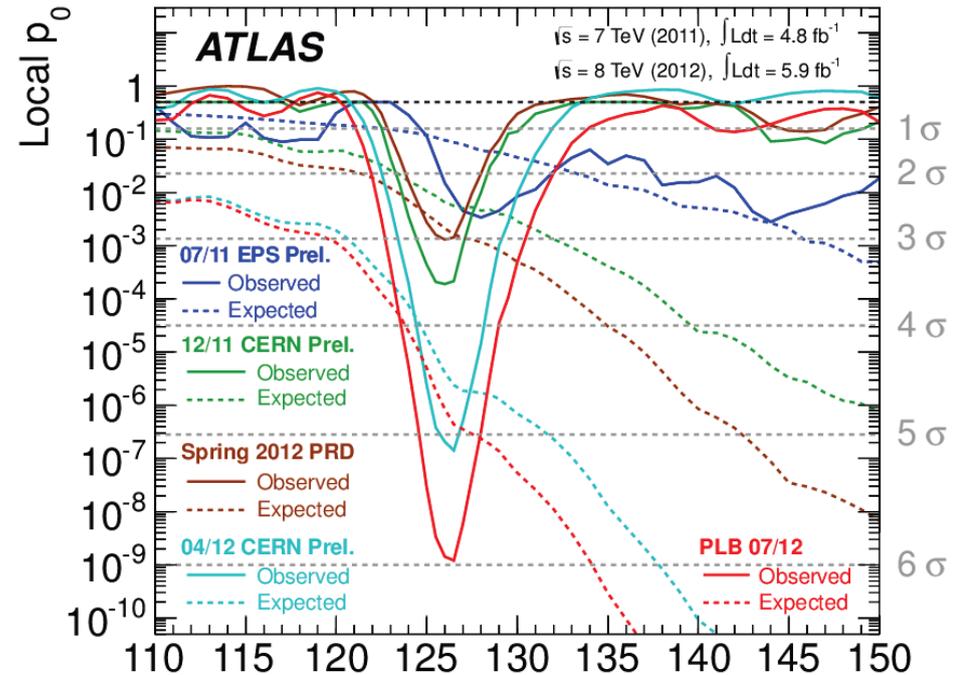
- 1σ : 1 chance sur 3
- 3σ (évidence) : 3 chances sur 1000
- 5σ (observation) : 1 chance sur 2 millions
- $5,9\sigma$: 3 chances sur 1 milliard

- Donc nous sommes sûrs d'avoir trouvé quelque chose



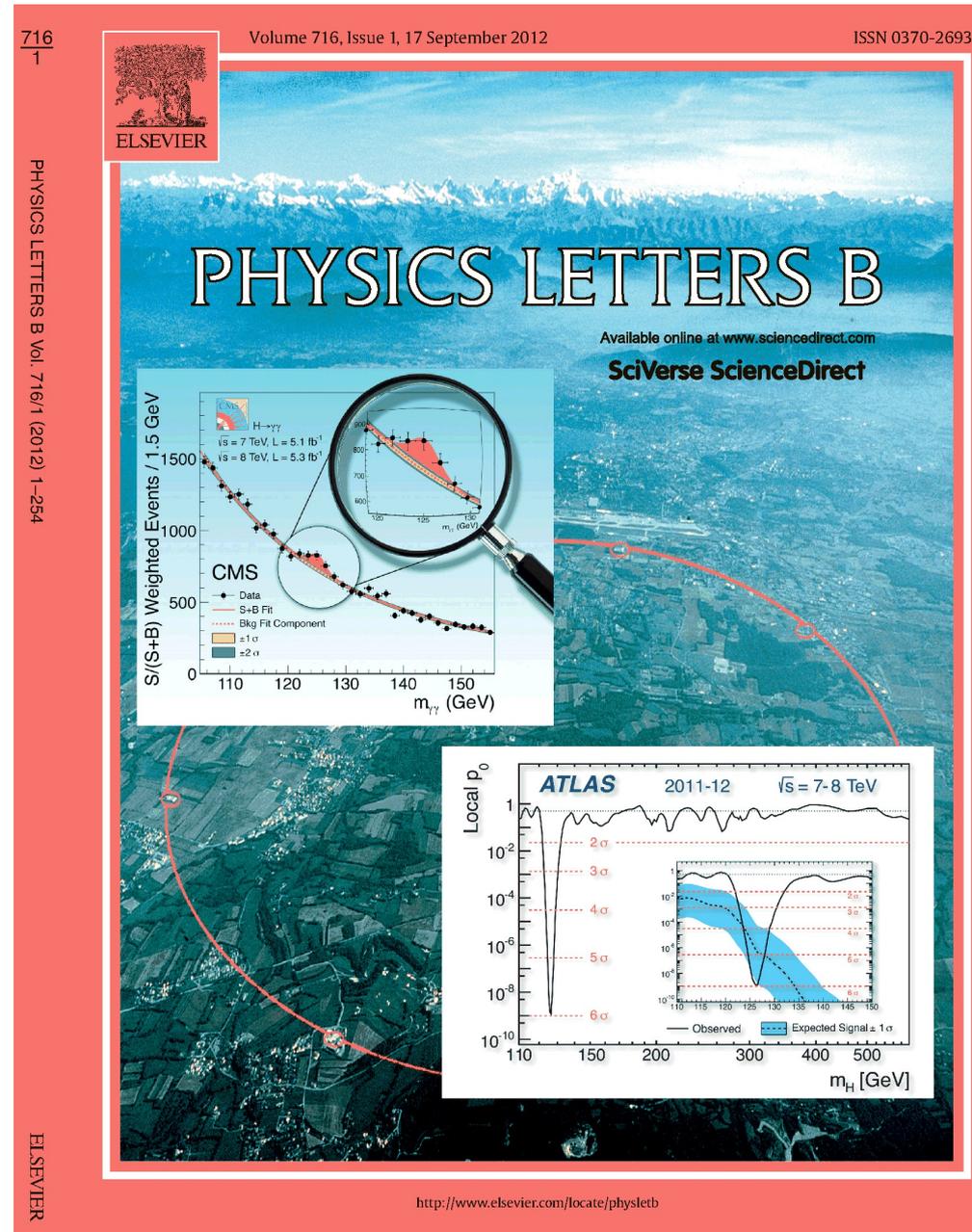
Est-ce consistant ?

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



Résultats

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



Est-ce le Higgs du modèle standard ?

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

Est-ce le Higgs du modèle standard ?

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

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

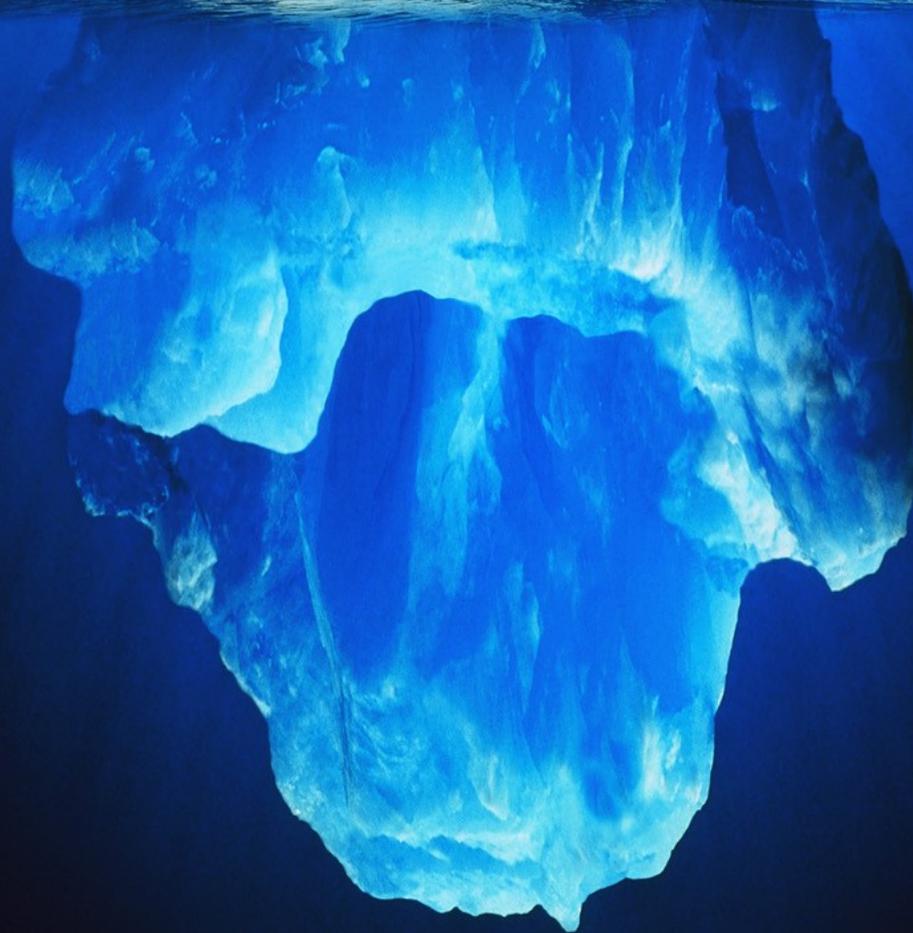
Les nouvelles données à partir de 2015 devraient permettre de tout mesurer avec une bien meilleure précision, modèle standard ou au-delà

C'est tout ?

Nous et l'Univers visible



4% Modèle standard



C'est tout ?

Nous et l'Univers visible

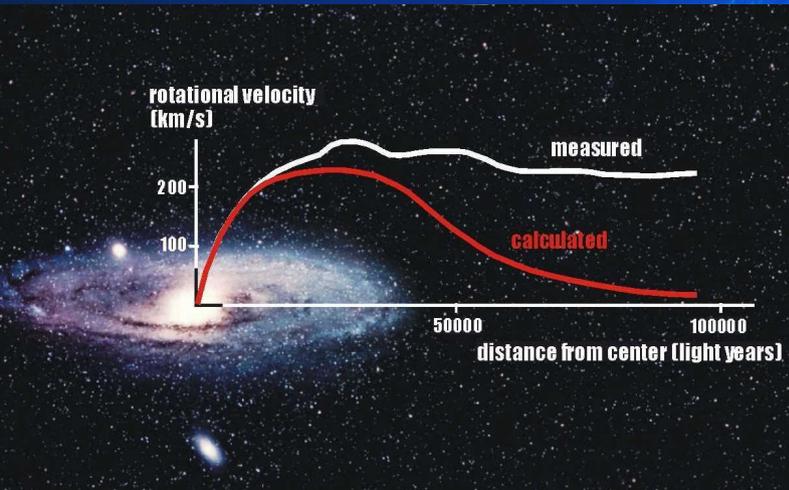


4% Modèle standard

22% Matière noire



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



C'est tout ?

Nous et l'Univers visible

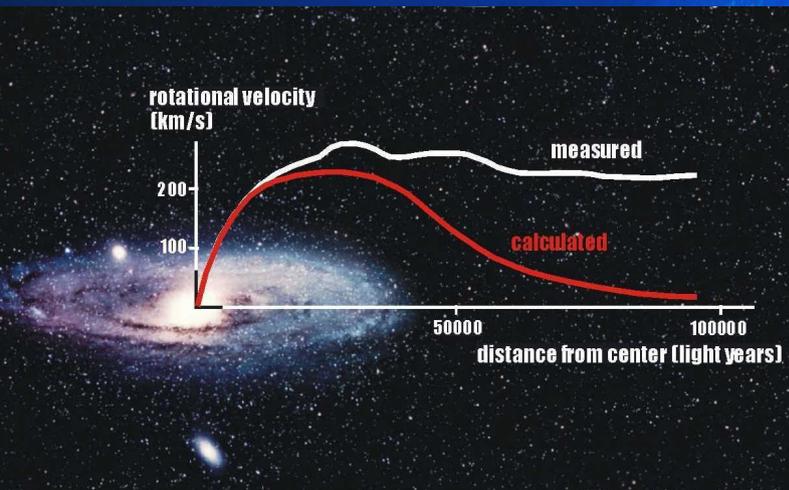


4% Modèle standard

22% Matière noire



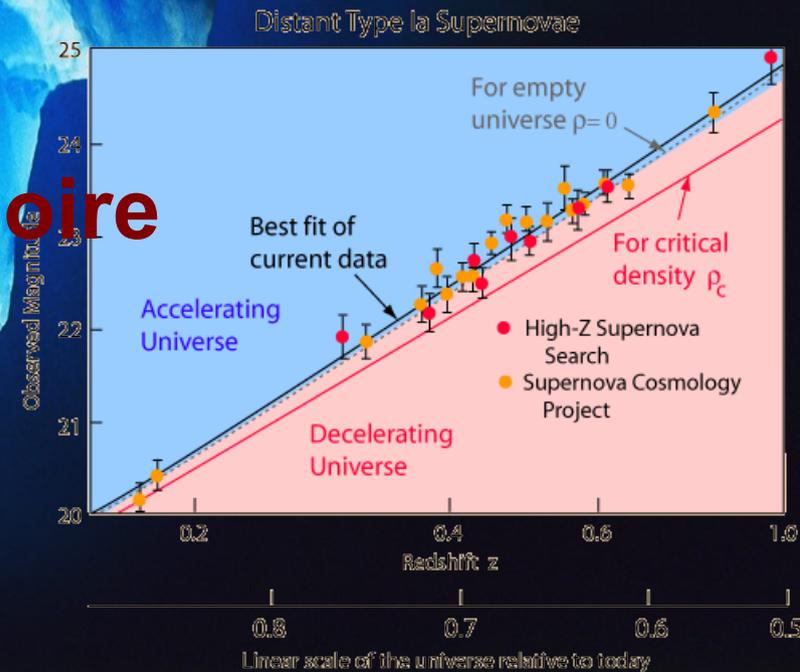
- On ne sait pas ce que c'est mais on croit savoir que c'est là
- Candidats observables au LHC (supersymétrie, ...) ?



74% Énergie noire



Pas la moindre idée de son origine !



Distant Type Ia Supernovae

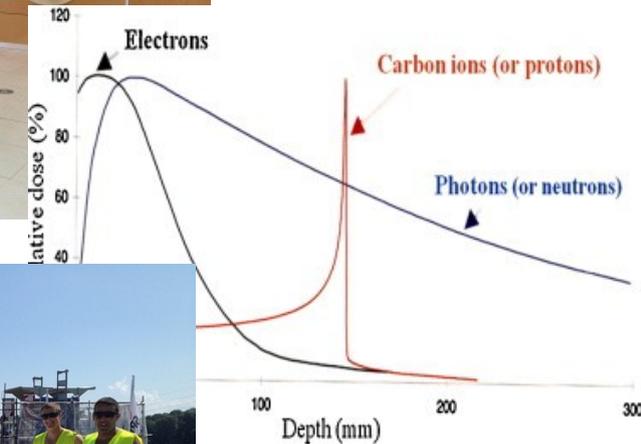
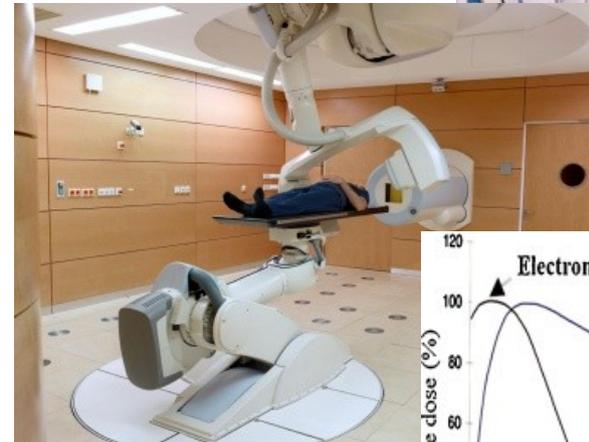
Lien entre l'infiniment grand et l'infiniment petit



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

A quoi sert cette recherche ?

- Première raison d'être : curiosité humaine pour comprendre le monde qui nous entoure
- Applications :
 - Technologie des détecteurs utilisée en médecine
 - Faisceaux utilisés en hadronthérapie
 - Concepts théoriques comme l'antimatière utilisé dans les PET scans
- Plus inattendu :
 - Isolation des panneaux solaires de l'aéroport de Genève
 - Le Web a été inventé au CERN



Conclusion

