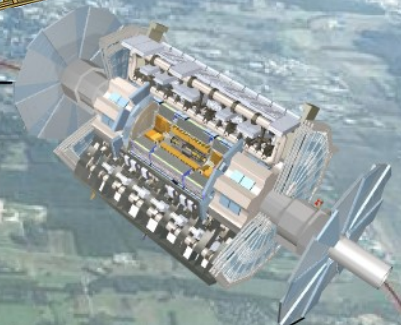


La quête du boson de Higgs

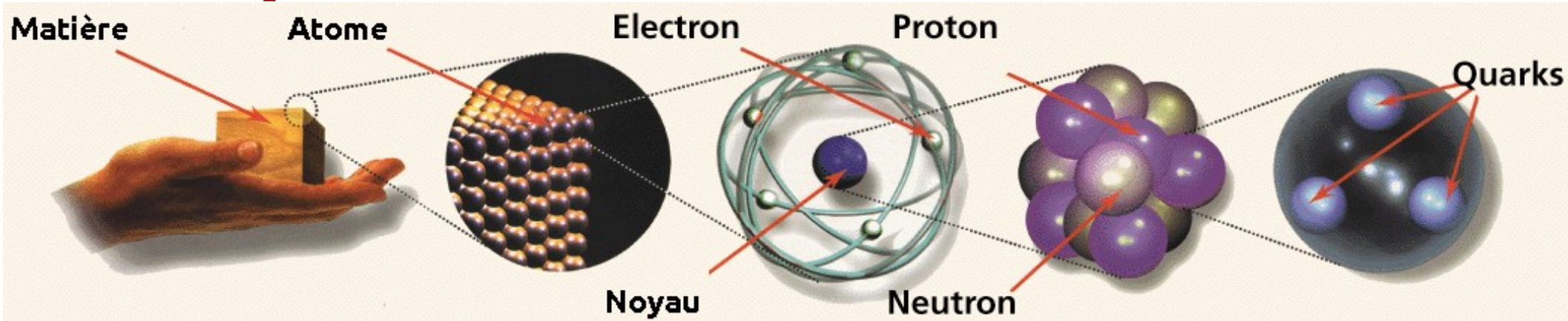
Yann Coadou

Centre de physique des particules de Marseille

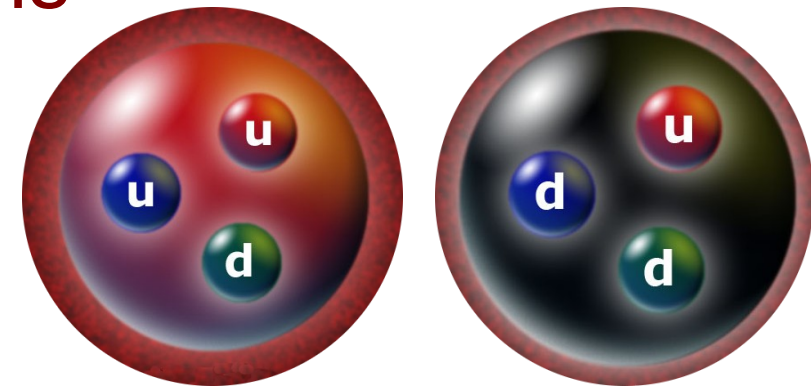
Fête de Noël du CPPM
21 décembre 2012



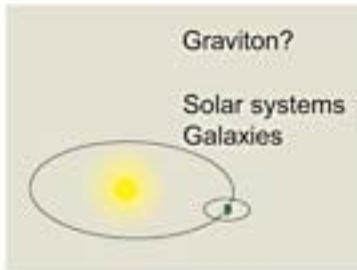
De quoi est fait l'Univers visible ?



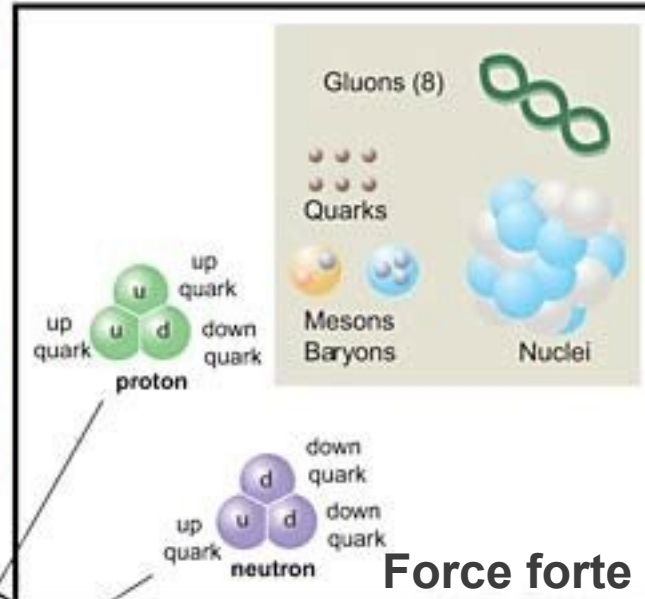
- Toute la matière visible, des galaxies aux virus en passant par les êtres humains, est faite de **quarks up** (*u*) et **down** (*d*) et d'**électrons**
- Protons et neutrons sont faits de 3 quarks
- Ils composent les noyaux
- Les électrons gravitent autour des noyaux
- Des **neutrinos** sont émis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



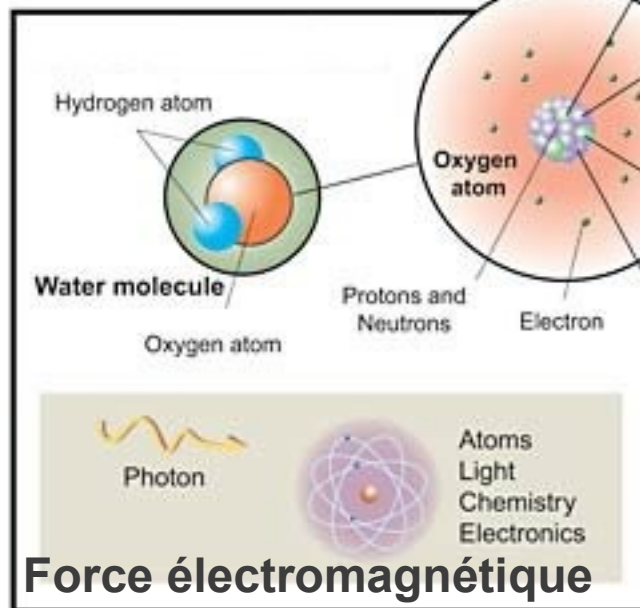
Les forces



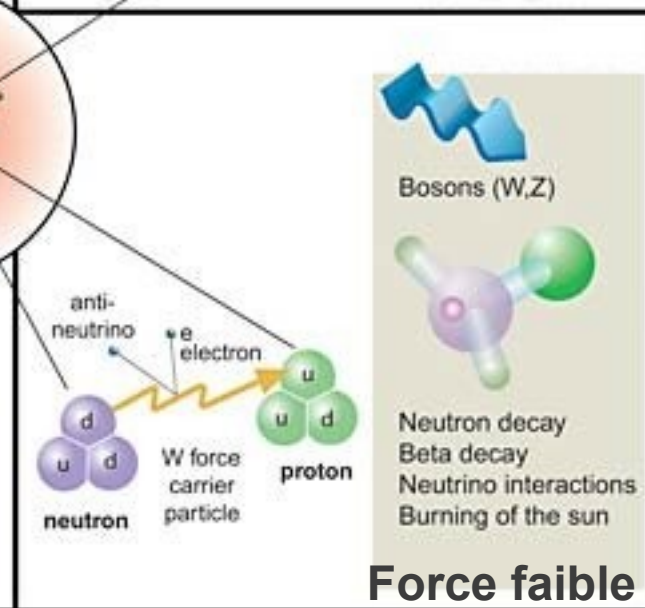
Force gravitationnelle



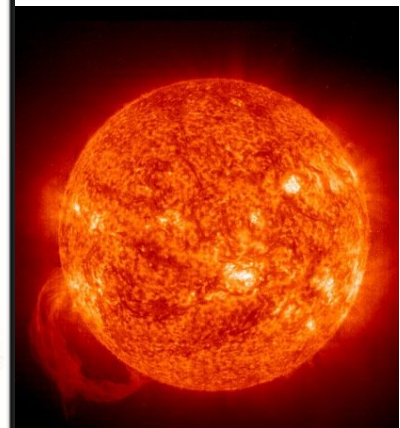
Force forte



Force électromagnétique

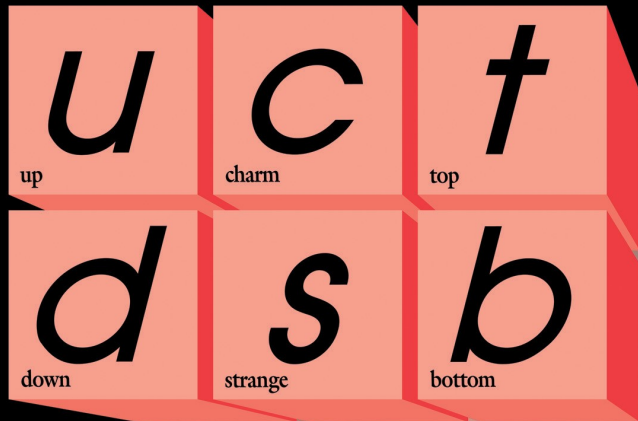


Force faible

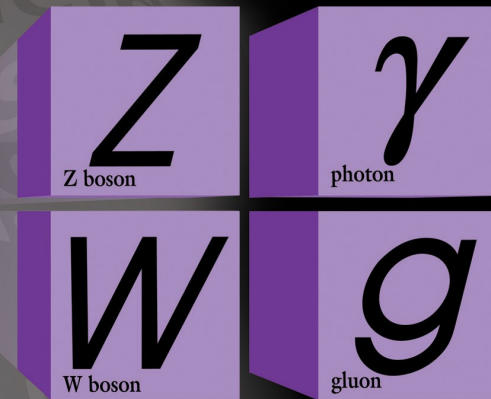


Le modèle standard

Quarks



Forces



Leptons

- Sans le boson de Higgs, toutes ces particules ont une masse nulle
- C'est contraire à l'expérience...

Le LHC

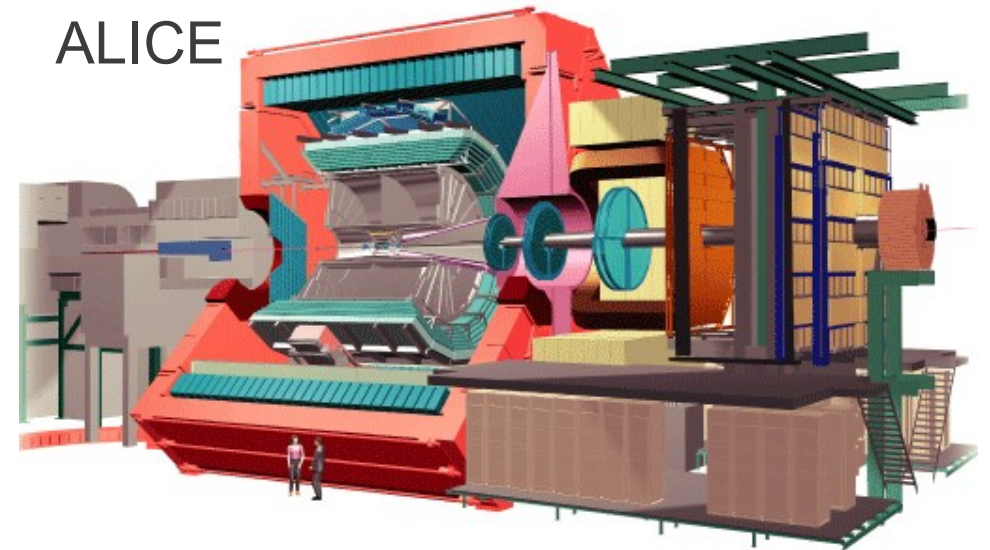
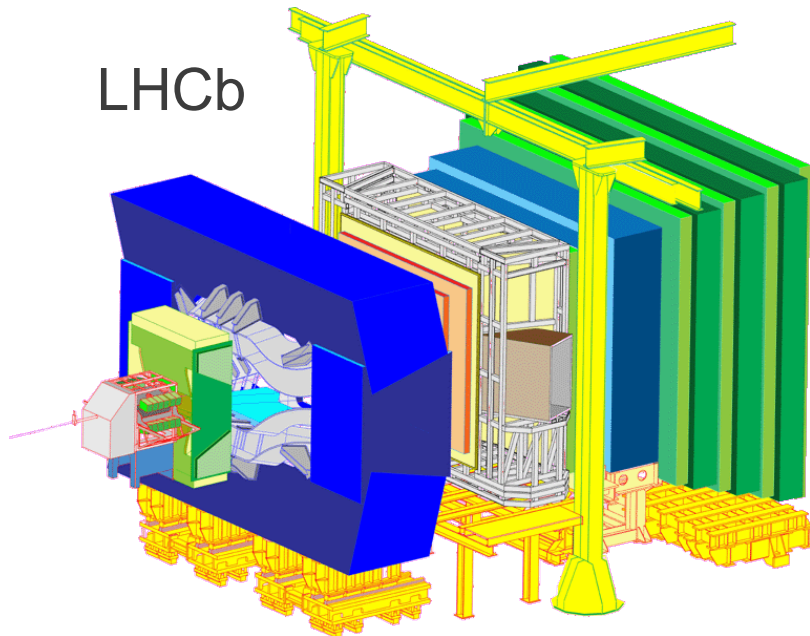
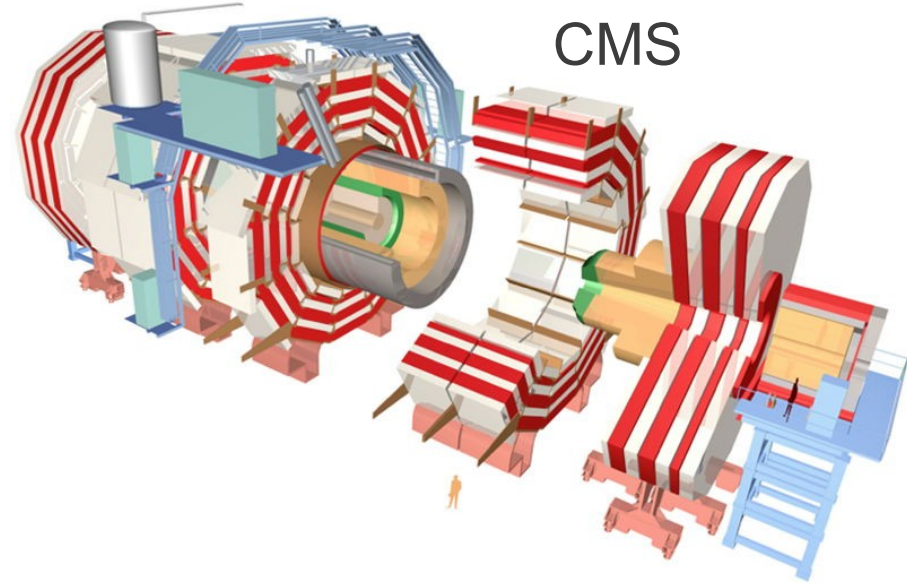
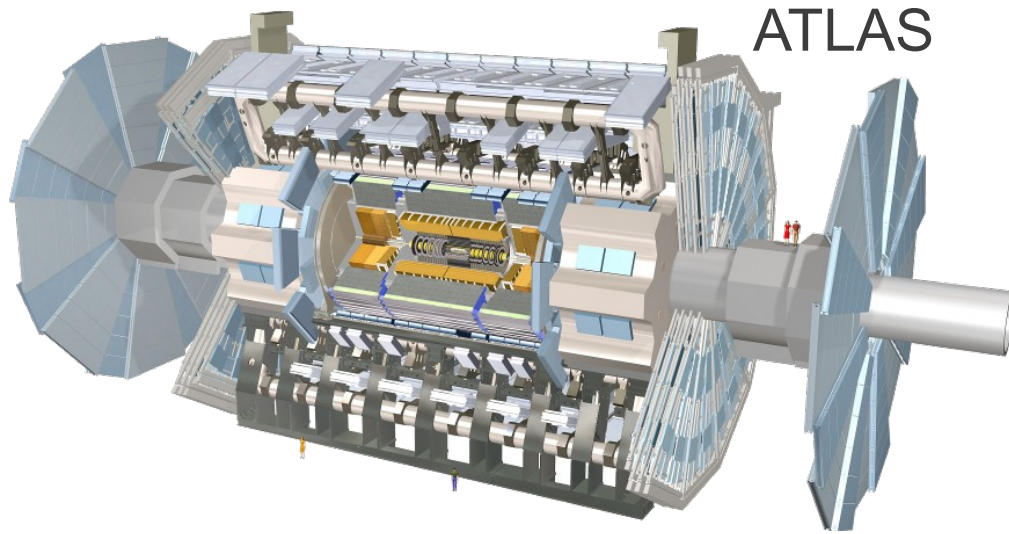
- La plus grande et la plus complexe machine scientifique jamais construite
- 27 km de circonférence, 100 m sous terre
- Protons voyageant à 99,99999991% de la vitesse de la lumière, soit 11000 tours par seconde
- Le plus grand congélateur : 1,9 K (-271 °C), plus froid que l'espace intersidéral (2,7 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 !

Un projet de longue haleine

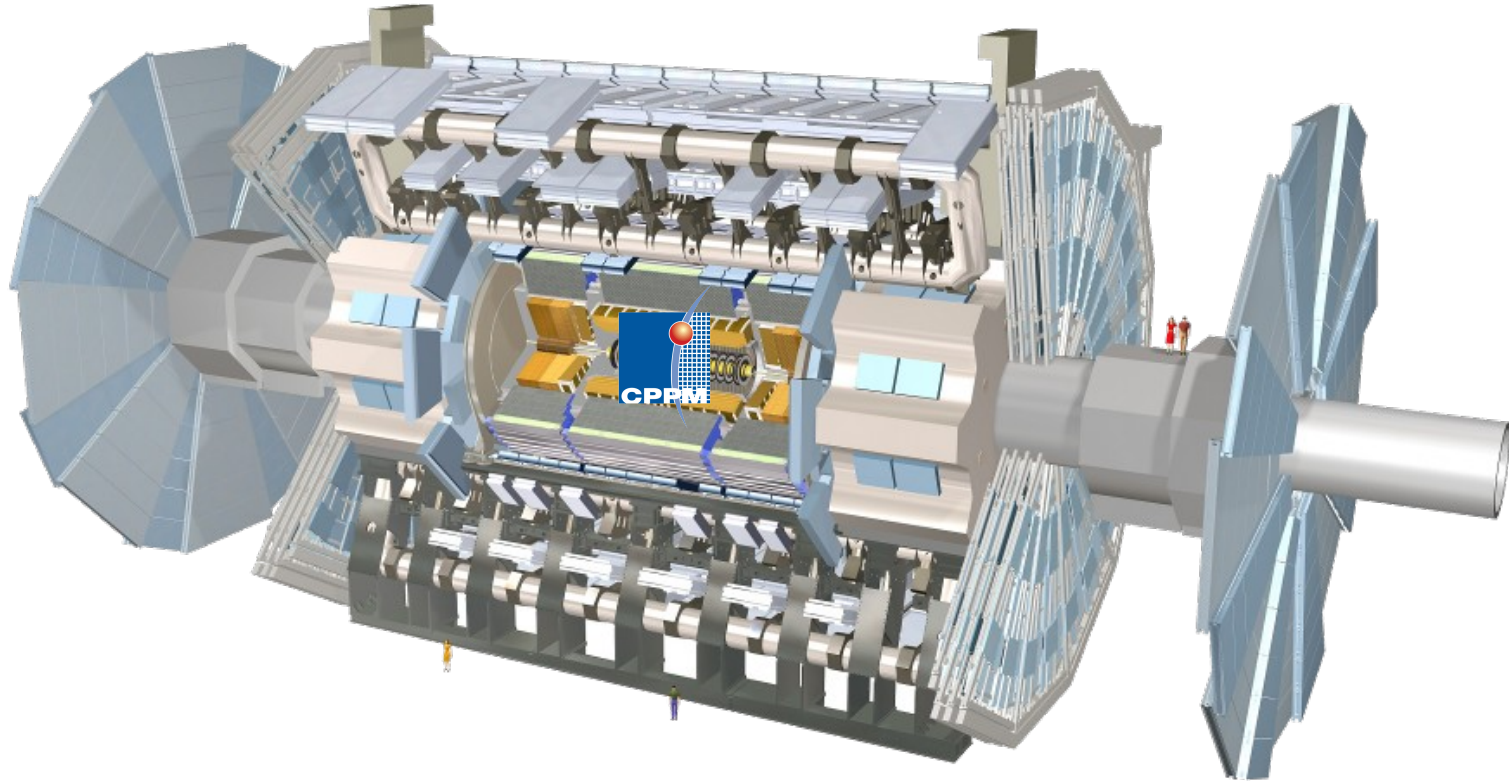
1984	Études préliminaires
1992	Création de la collaboration ATLAS
1994	Approbation par le conseil du CERN
1996-1998	Approbation des quatre grandes expériences
1998-2008	Construction du LHC et des détecteurs
Septembre 2008	Mise en service, panne cryogénique
Octobre 2009	Redémarrage
Mars 2010	Premières 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 ?



Des détecteurs géants



Le détecteur ATLAS

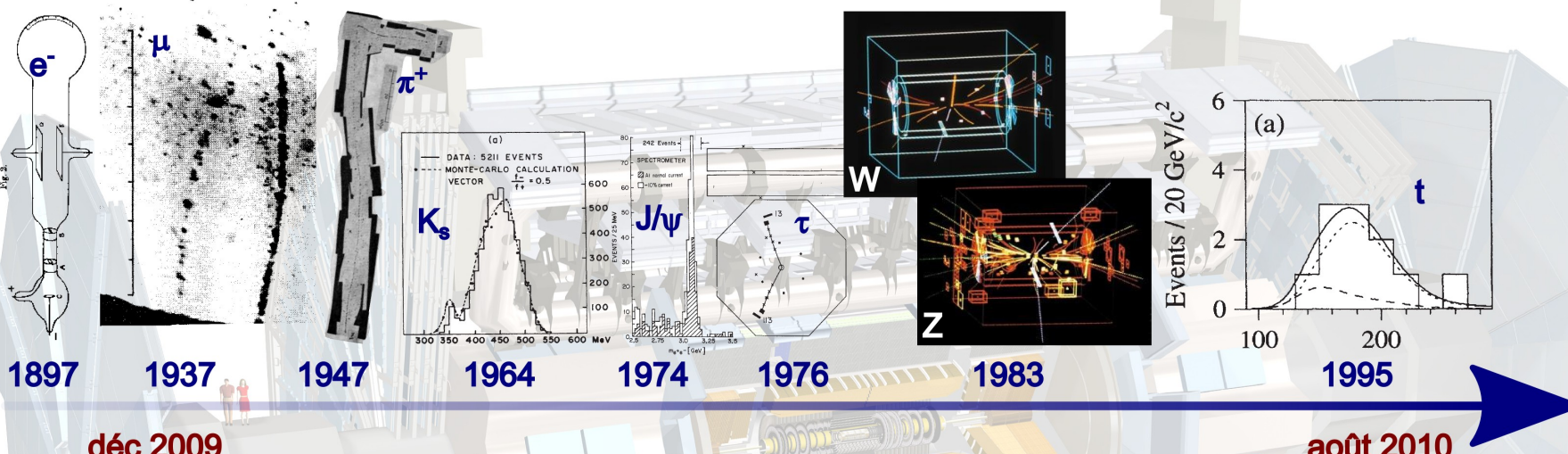


- 25 m de diamètre, 44 m de long, 7000 tonnes (comme la tour Eiffel)
- 3000 km de câbles, 100 millions de canaux
- >3000 personnes, 174 instituts, 38 pays
- En France : 6 laboratoires CNRS/IN2P3/Université et 1 CEA, 400 personnes (physiciens, ingénieurs, étudiants)

Le modèle standard redécouvert

LHC 2010 : un siècle en un an

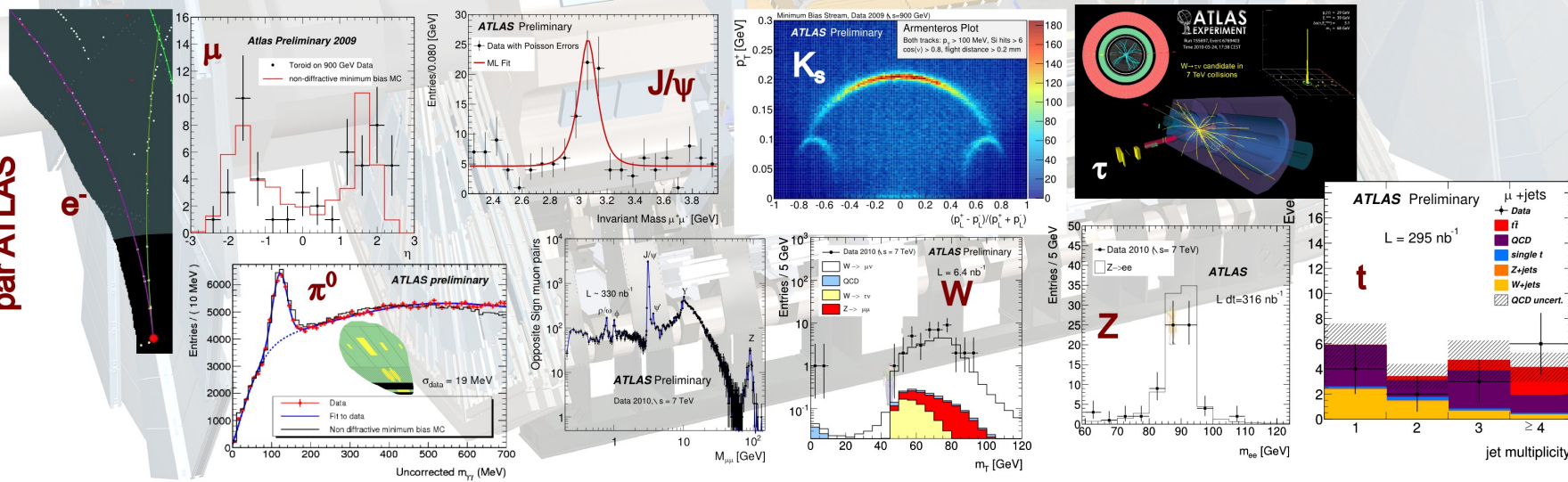
Découverte historique



déc 2009

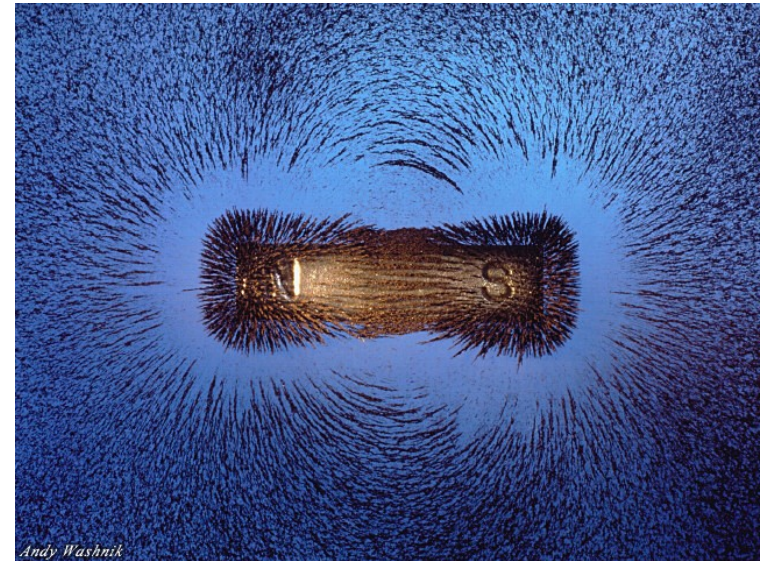
août 2010

Redécouverte par ATLAS



Notion de champ

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



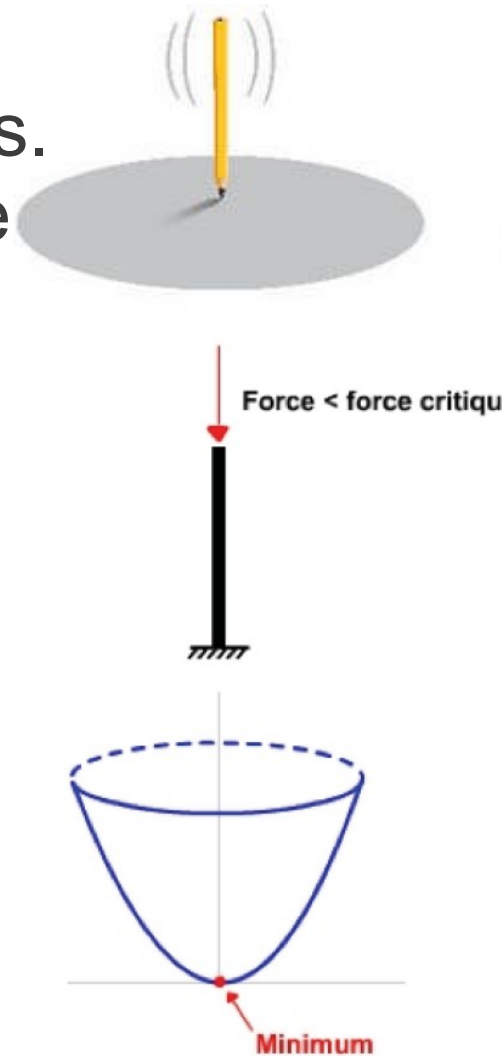
- Champ non-orienté : scalaire
 - Carte des températures
 - Champ de Higgs !

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

Brisure spontanée de symétrie

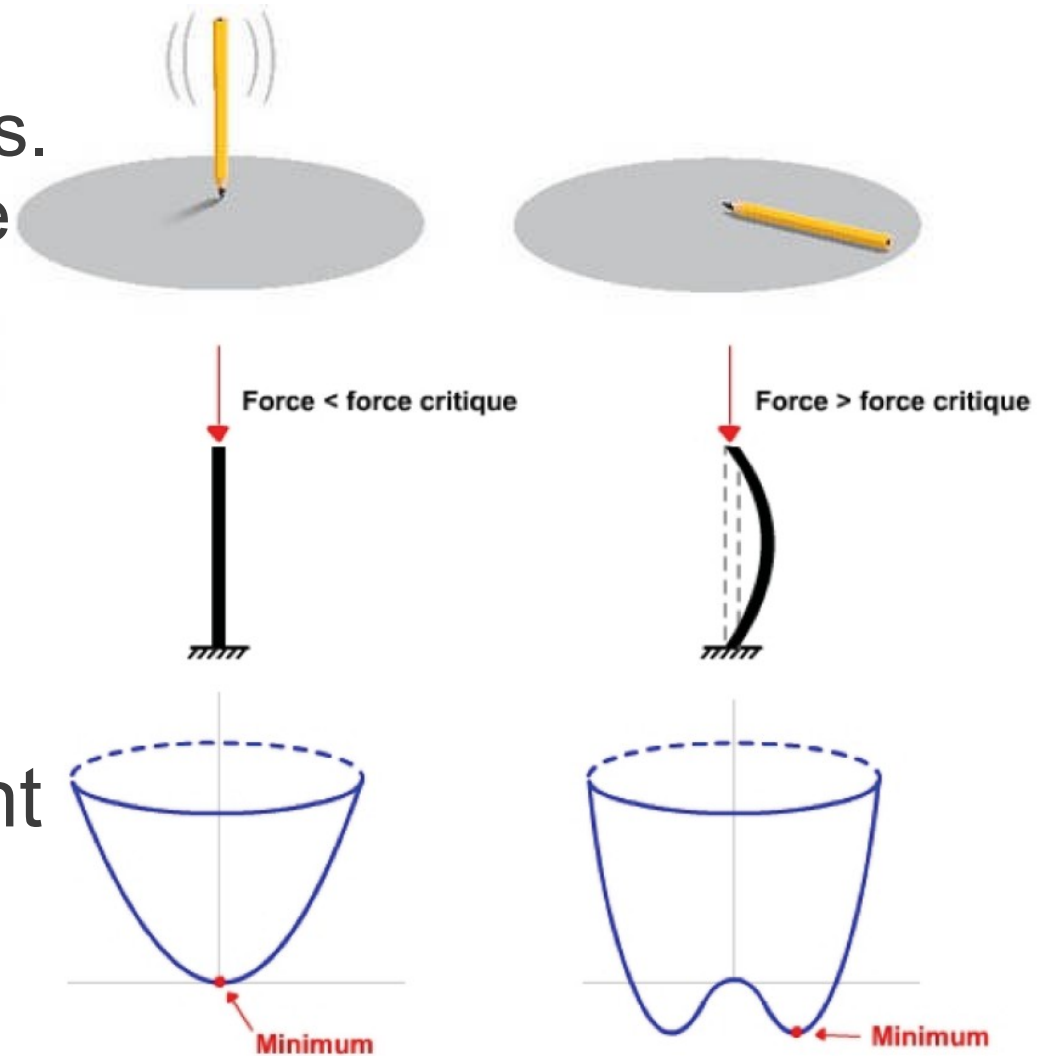
- Certains phénomènes physiques sont symétriques. Par exemple la symétrie de rotation :

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



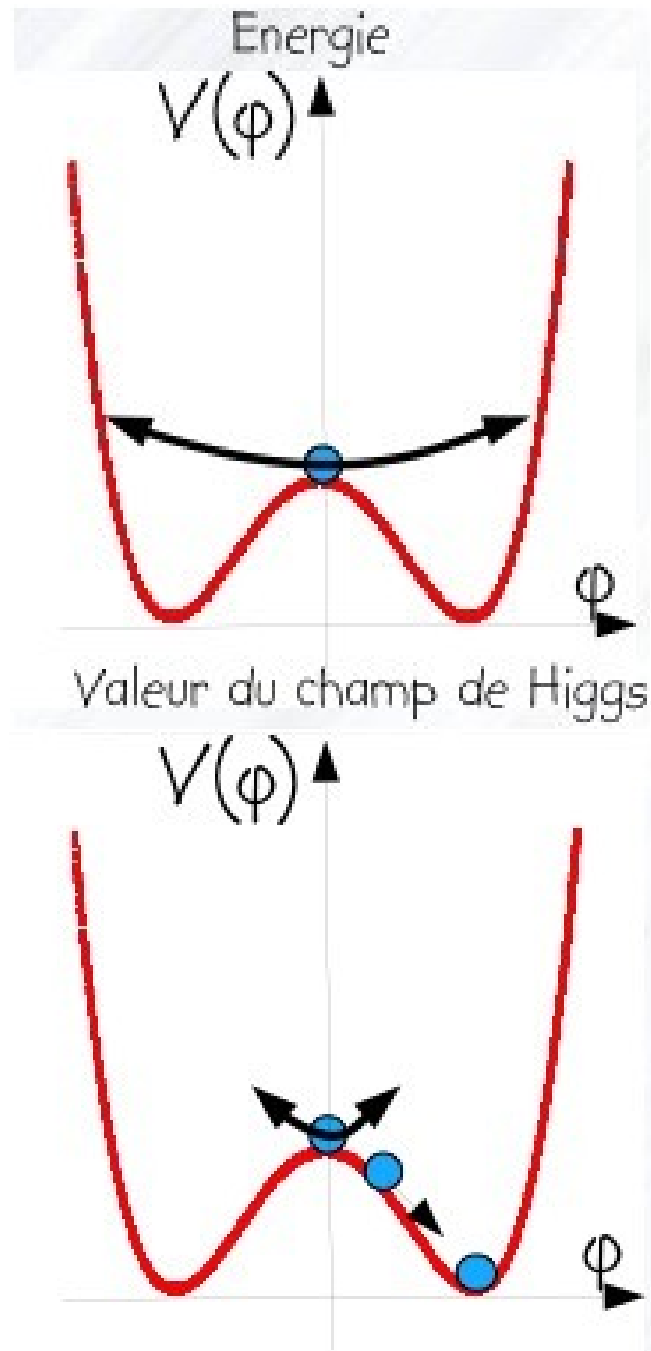
Brisure spontanée de symétrie

- 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

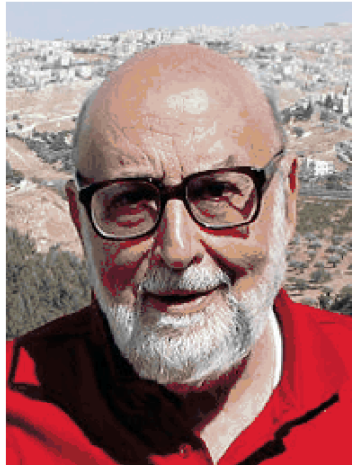


Brisure de la symétrie électrofaible

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

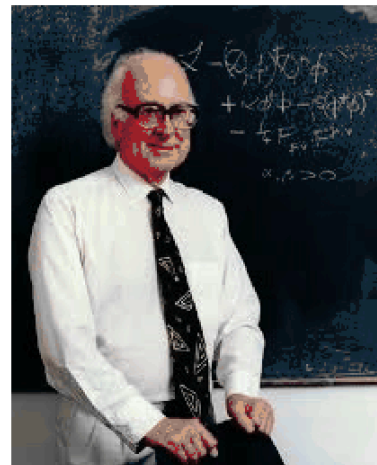
It is of interest to inquire whether gauge vector mesons acquire mass through interaction¹; by a gauge vector meson we mean a Yang-Mills field² associated with the extension of a Lie group from global to local symmetry. The importance of this problem resides in the possibility that strong-interaction 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 phe-

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



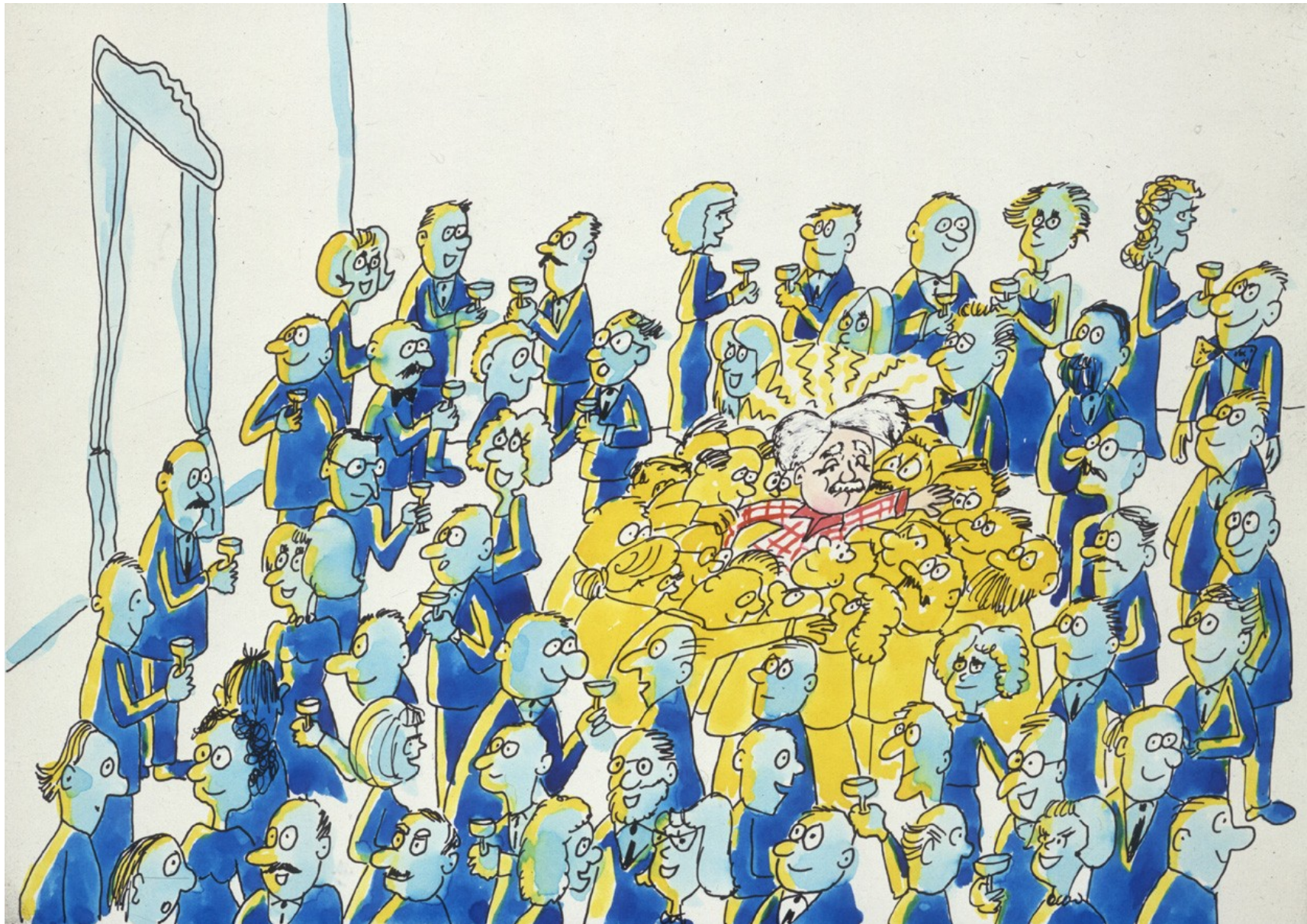
Imaginons qu'une salle pleine de physiciens conversant calmement est comme l'espace occupé seulement par le champ de Higgs...

Mécanisme de Higgs en images



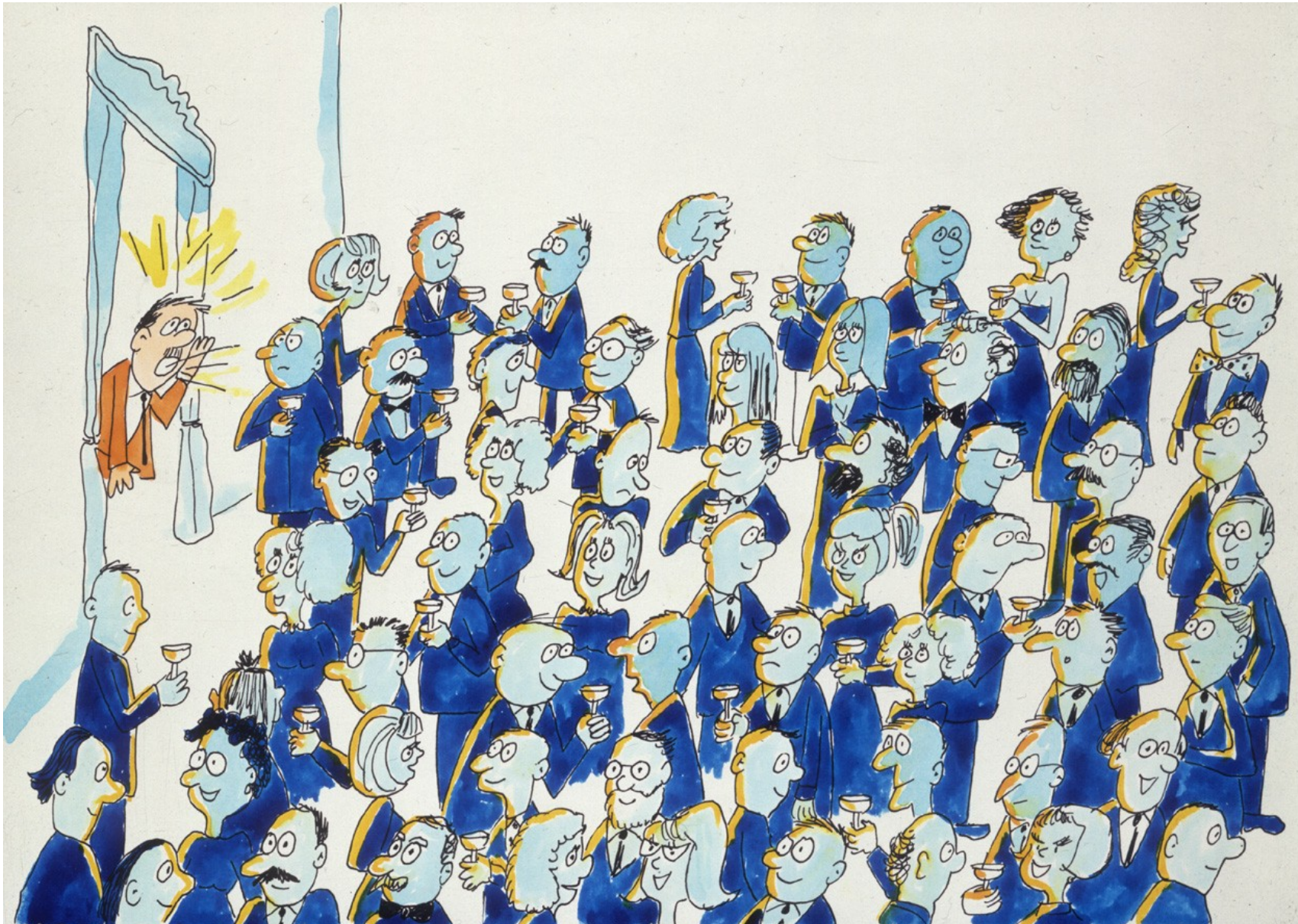
... Albert Einstein entre, créant une perturbation sur son passage et attirant un essaim d'admirateurs à chaque pas ...

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



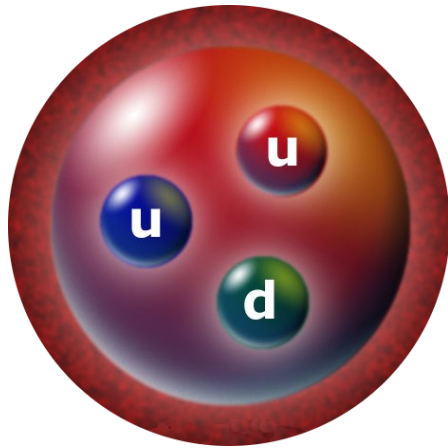
... elle donne naissance à un essaim de même type, composé cette fois des seuls physiciens. Cet essaim représente la particule de Higgs.

Interactions avec le boson de Higgs



La masse

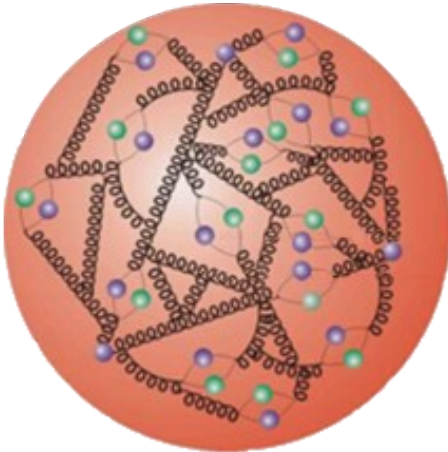
- Notre masse : celle de nos atomes
- Masse des atomes : presque uniquement celle des noyaux, faits de protons et neutrons de masse ~ 1 GeV



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

La masse

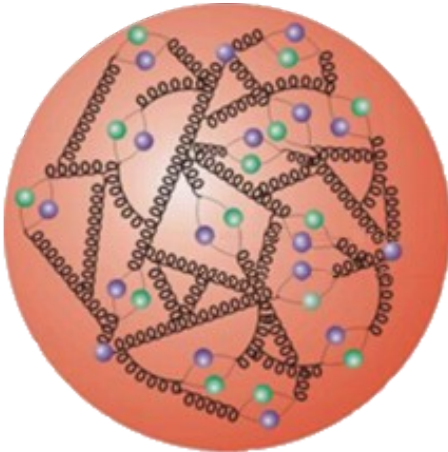
- Notre masse : celle de nos atomes
- Masse des atomes : presque uniquement celle des noyaux, faits de protons et neutrons de masse ~ 1 GeV



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

La masse

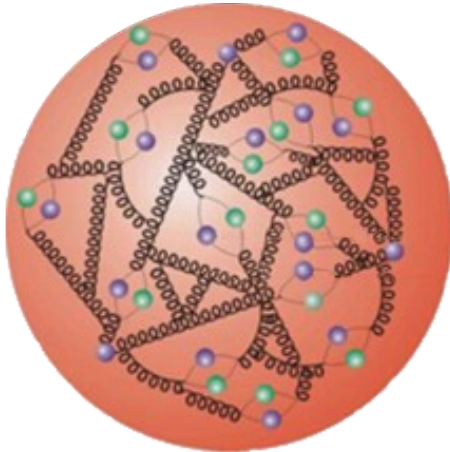
- Notre masse : celle de nos atomes
- Masse des atomes : presque uniquement celle des noyaux, faits de protons et neutrons de masse ~ 1 GeV



- 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

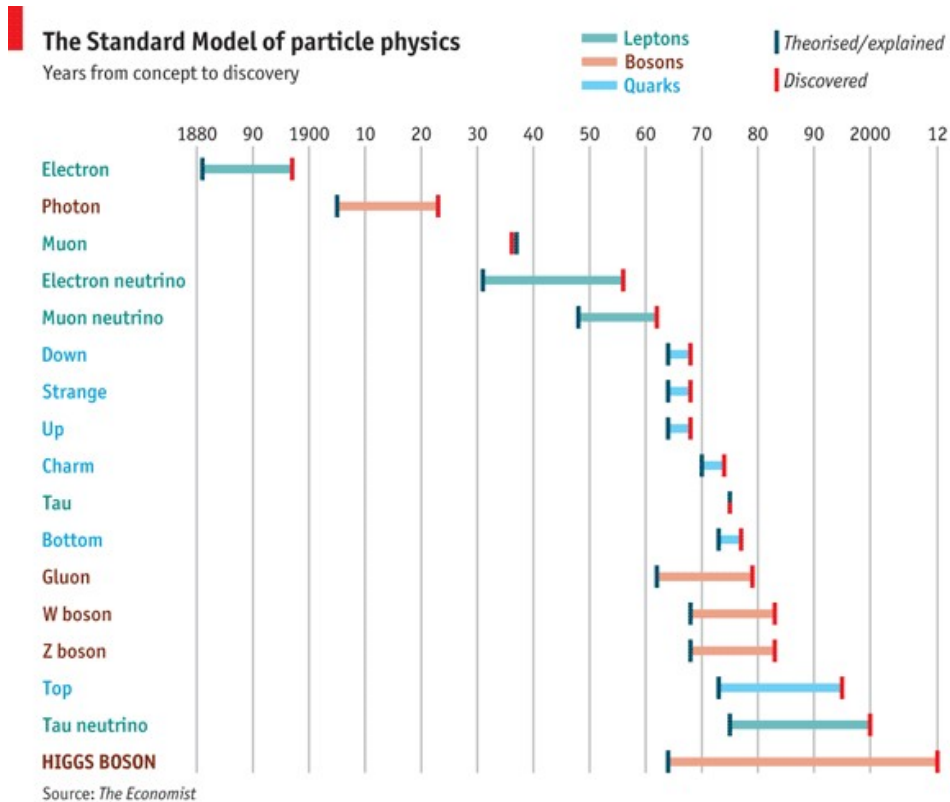


- En réalité, plein de gluons, dont l'énergie donne 99% de leur masse au proton et au neutron ($E=mc^2$)
- Boson de Higgs : explique « seulement » la masse des particules élémentaires (quarks, électron [leptons], bosons Z et W^\pm) et la sienne
- Pas grand chose ? Sans lui, pas d'atomes, pas de chimie,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

Pourquoi ce battage médiatique le 4 juillet 2012 ?



Une longue quête

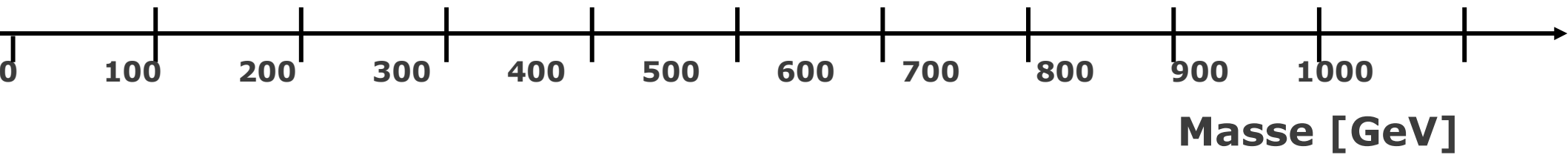


© The Economist

- 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...

La chasse au boson de Higgs

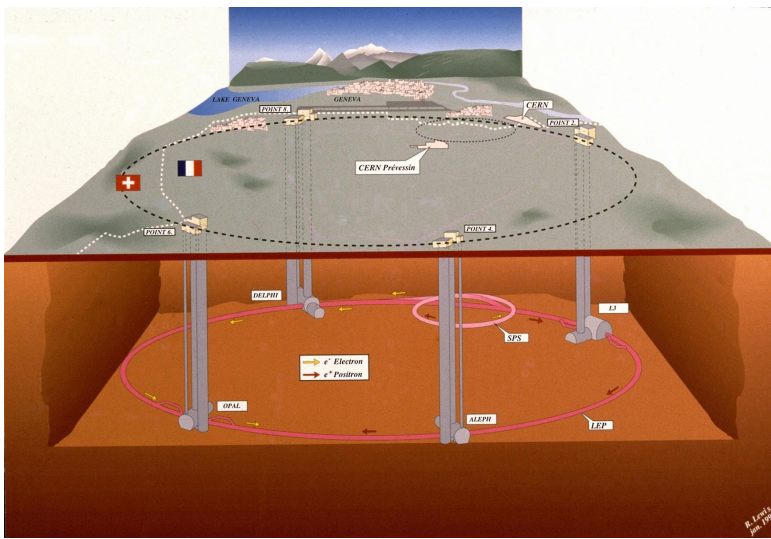
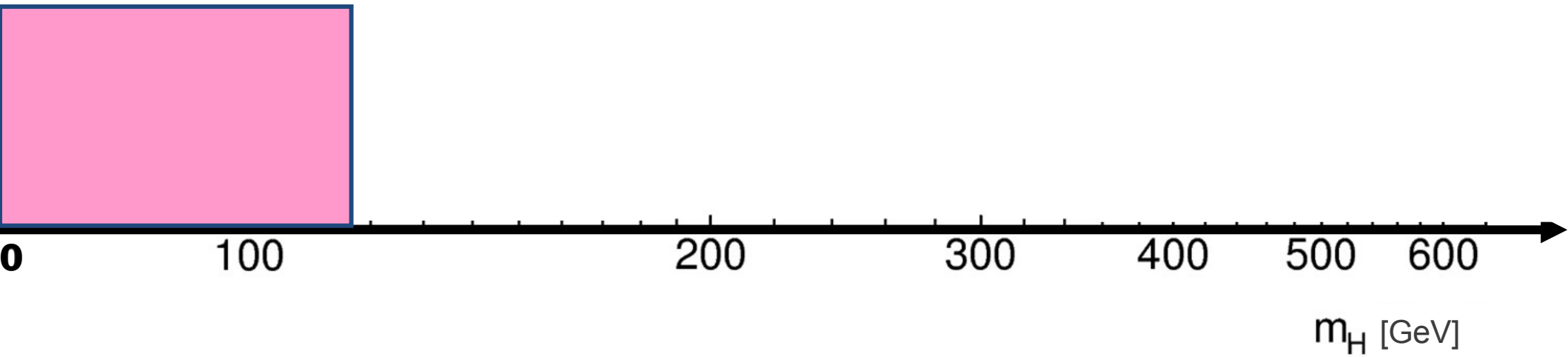
?



- Seule contrainte théorique : masse < 1000 GeV

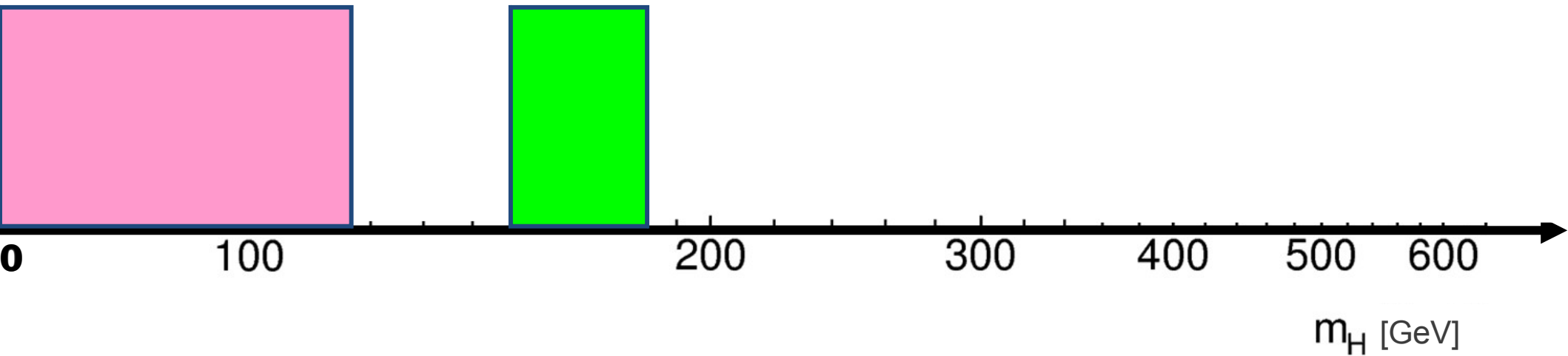
La chasse au boson de Higgs

LEP
1989-2000



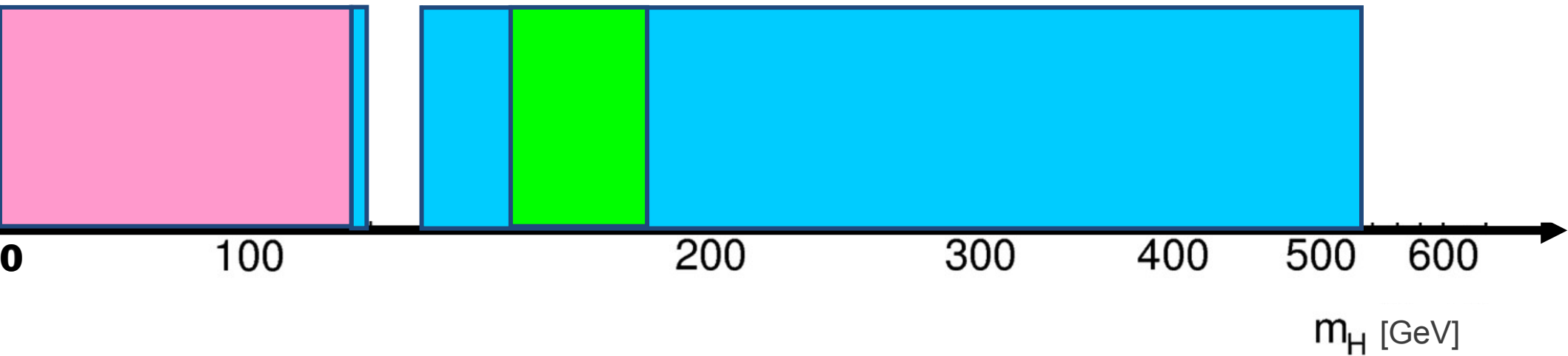
La chasse au boson de Higgs

Tevatron
1983-2011

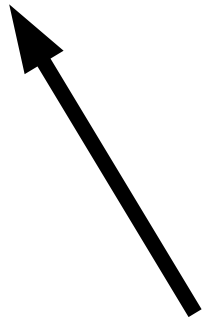
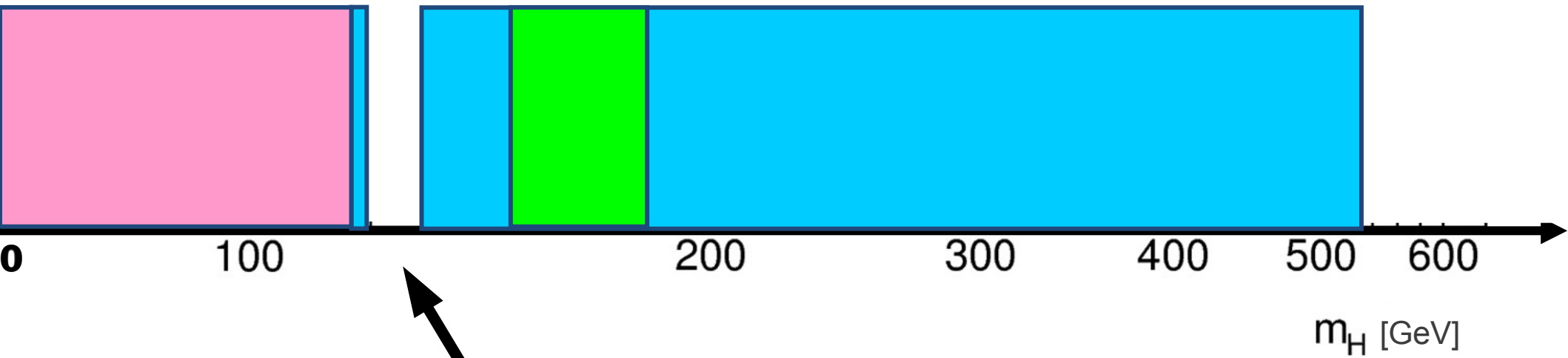


La chasse au boson de Higgs

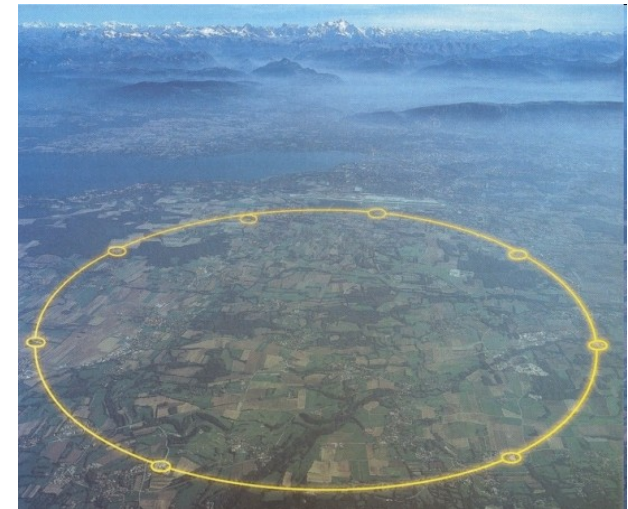
LHC
depuis 2009



La chasse au boson de Higgs



?

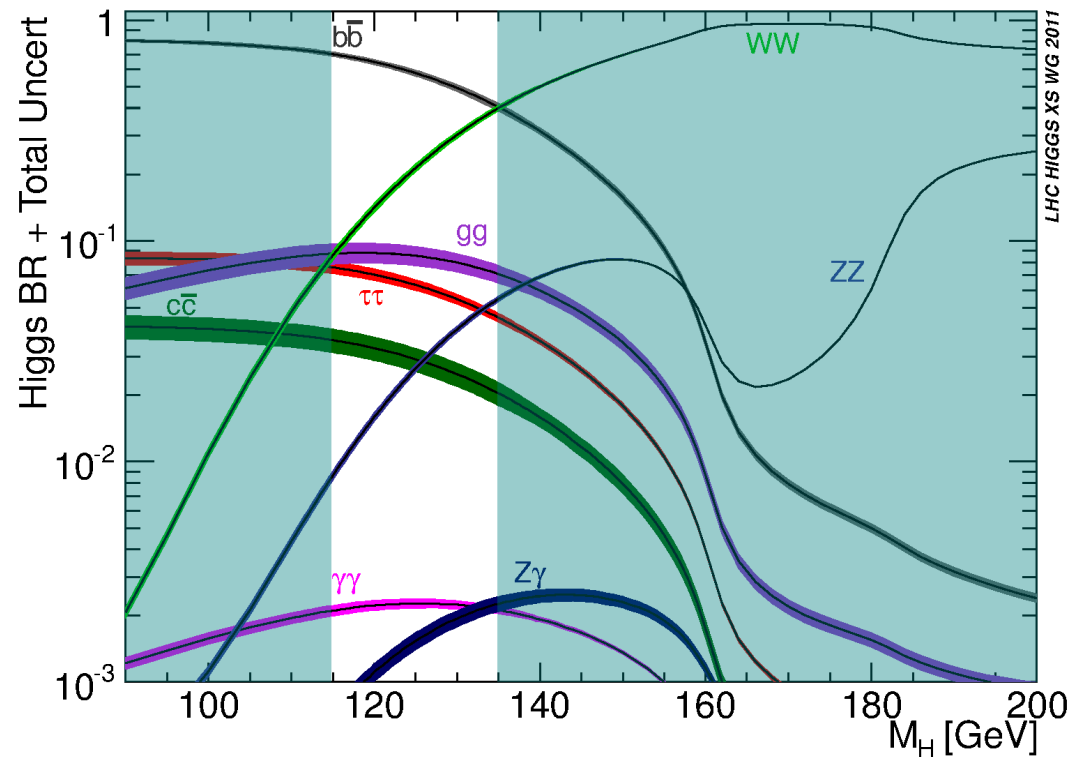


Comment s'y prend-on ?

- 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 :

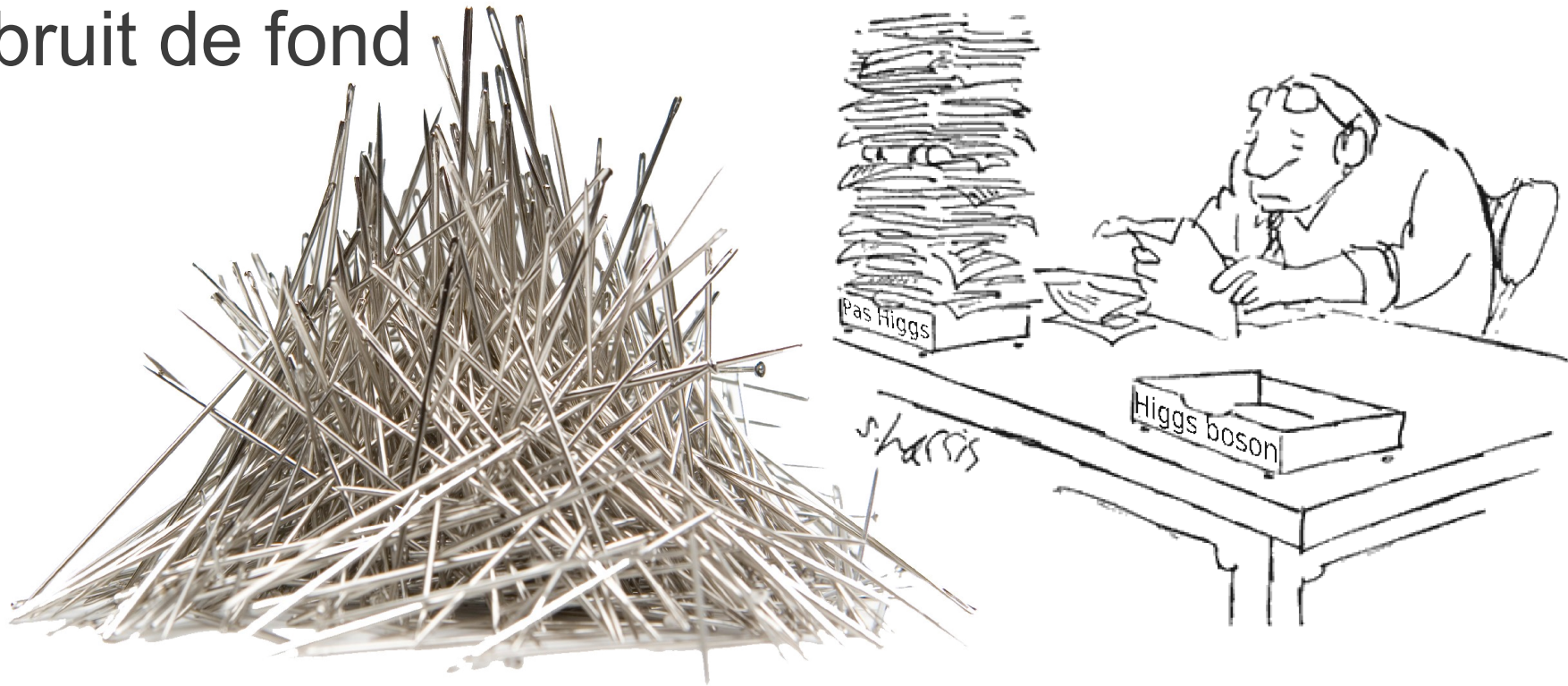
- 56 fois sur 100 en $b\bar{b}$
- 3 fois sur 100 en ZZ
- 2 fois sur 1000 en $\gamma\gamma$



- 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 → système de déclenchement et grille de calcul
- 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



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 ?

