

La quête du boson de Higgs

Elisabeth Petit
CPPM



Ecole IN2P3 d'instrumentation
"Techniques de base des détecteurs"
Cargèse, 1-6 avril 2019



La masse

Le mécanisme de Higgs

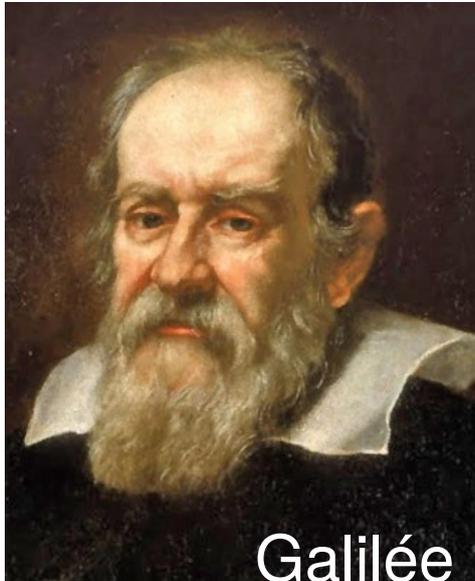
La recherche du boson de Higgs

La suite



La notion de masse à travers l'histoire

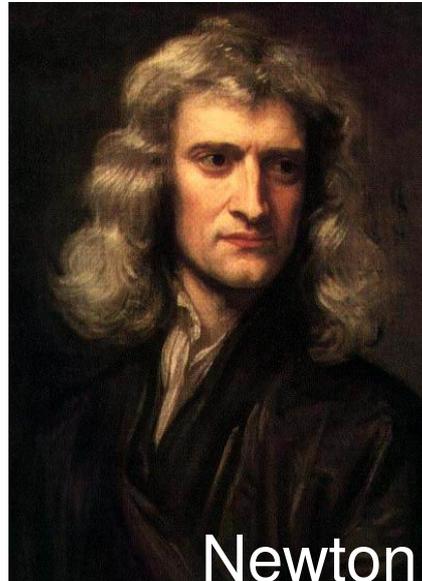
- ◆ Diverses interprétations de la notion de masse, toutes équivalentes :



Galilée

- ◆ Masse gravitationnelle

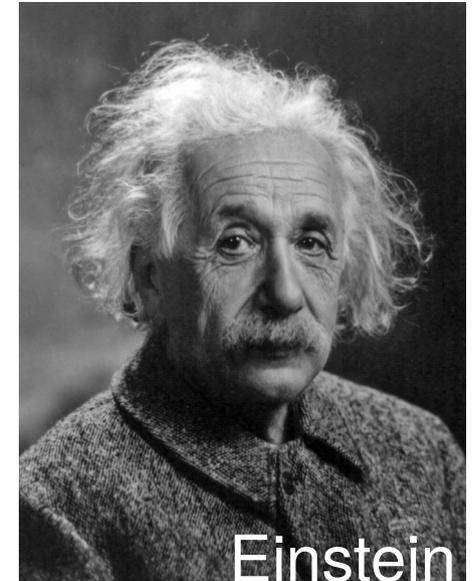
$$P = mg$$



Newton

- ◆ Masse inertielle

$$\Sigma F = ma$$



Einstein

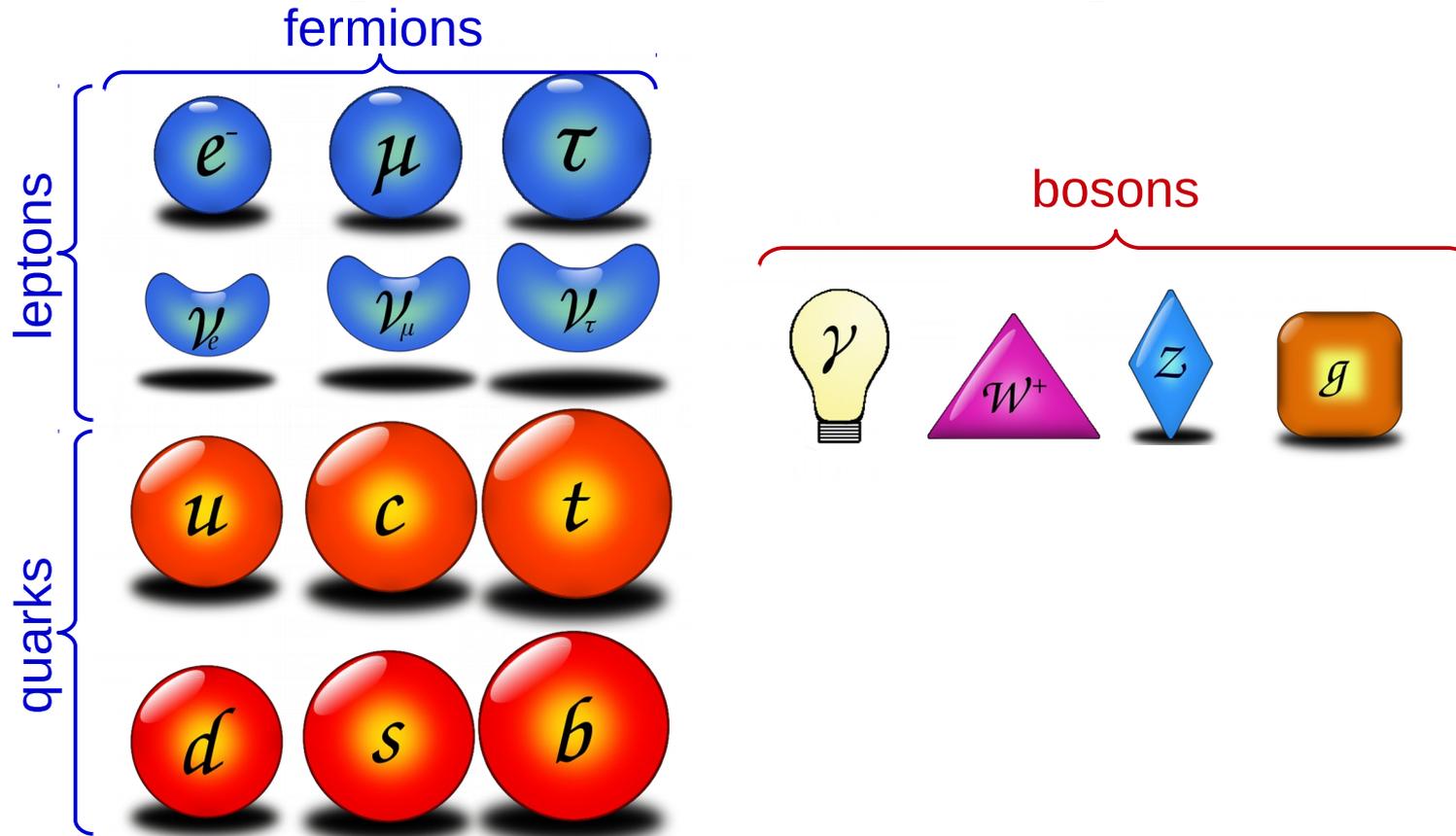
- ◆ Équivalence masse/énergie

$$E = mc^2$$



La masse des particules élémentaires

- ◆ D'après la théorie les particules élémentaires ont une masse nulle donc elles vont toutes à la vitesse de la lumière
⇒ L'Univers tel que nous le connaissons n'existe pas...

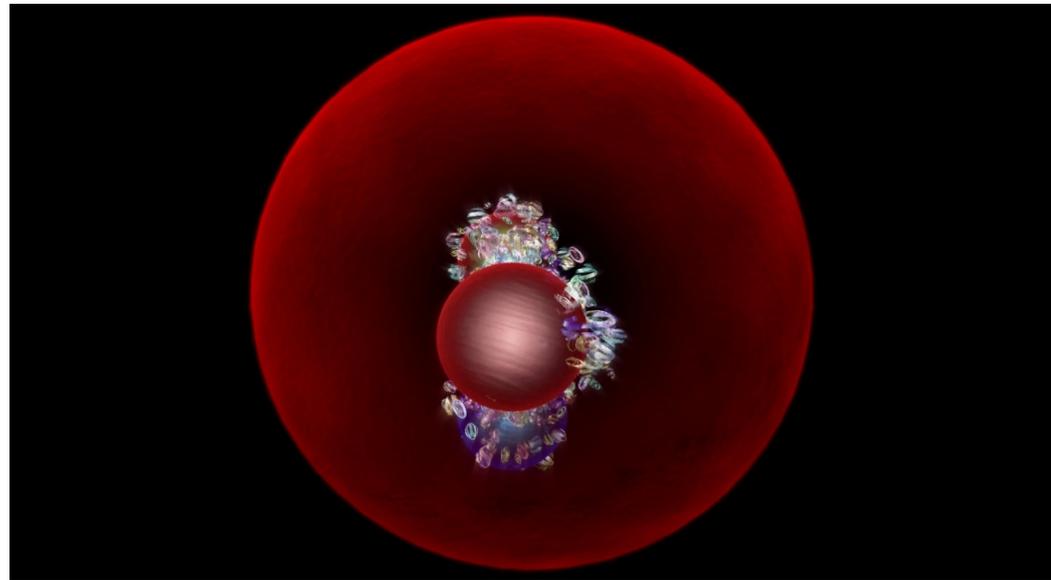
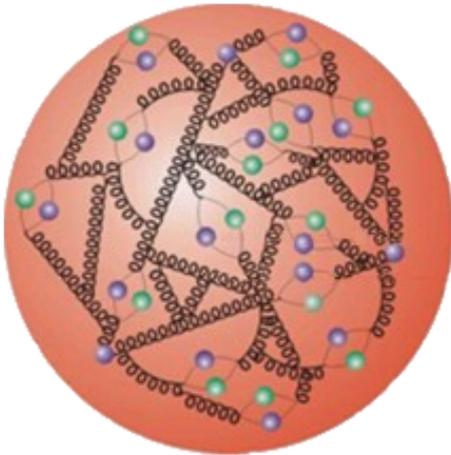


- ◆ Contraire à l'expérience
⇒ introduction d'un mécanisme pour générer la masse



La masse des particules PAS élémentaires

- ◆ La masse de la matière ordinaire : atomes
 - leur masse provient presque entièrement des **noyaux** (protons et neutrons)
- ◆ Les protons et neutrons
 - ont une masse de ~ 1 GeV
 - sont constitués de quarks up et down qui ont une masse de \sim qqs MeV
 - ils contiennent aussi des gluons qui servent à les lier entre eux
 \Rightarrow beaucoup d'**énergie de liaison** \Rightarrow masse ($E=mc^2$)



version pdf : [lien](#)

- ◆ Le boson de Higgs n'explique **que** la masse des particules **élémentaires**

La masse

Le mécanisme de Higgs

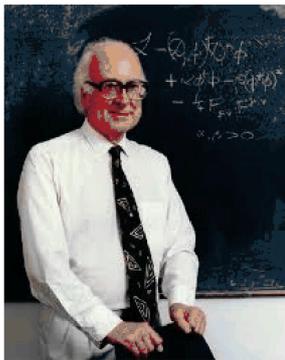
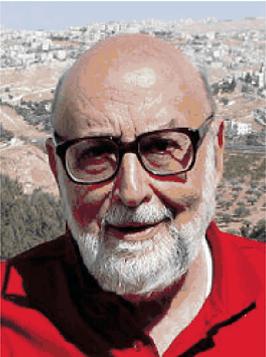
La recherche du boson de Higgs

La suite



Mécanisme de Higgs

- ◆ Proposé en 1964 par plusieurs scientifiques : Englert, Brout, Higgs, Guralnik, Hagen, Kibble



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 $\varphi_1(x) = 0$, $\varphi_2(x) = \varphi_0$:

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

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

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

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

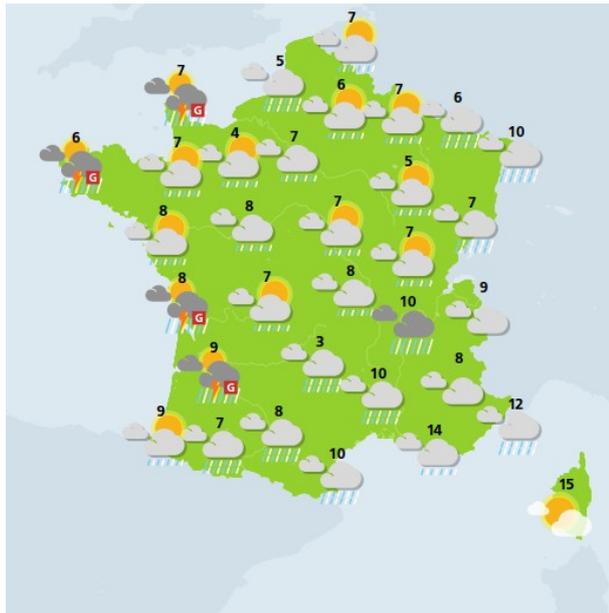
$$B_\mu = A_\mu - (e\varphi_0)^{-1} \partial_\mu (\Delta\varphi_1),$$

- ◆ Prédiction : existence du **champ de Higgs**, manifestation sous forme d'une nouvelle particule, le **boson de Higgs**

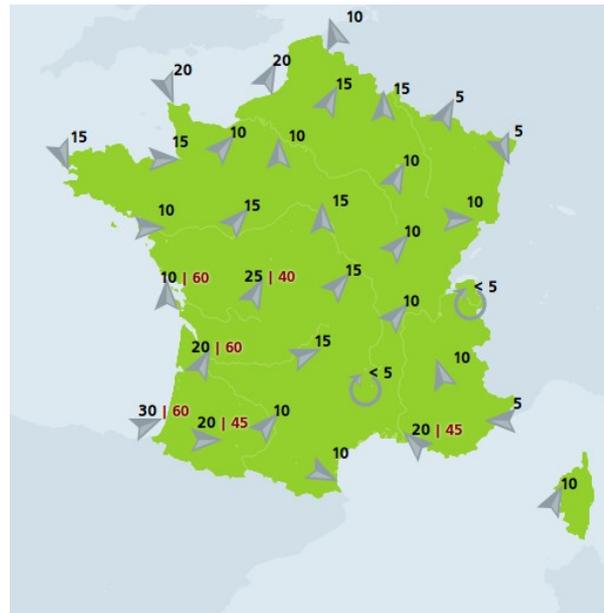


Le champ de Higgs (1)

- ◆ Champ : ensemble de valeurs prises par une grandeur physique en tout point de l'espace
- ◆ Le champ de Higgs est scalaire



Température :
champ scalaire

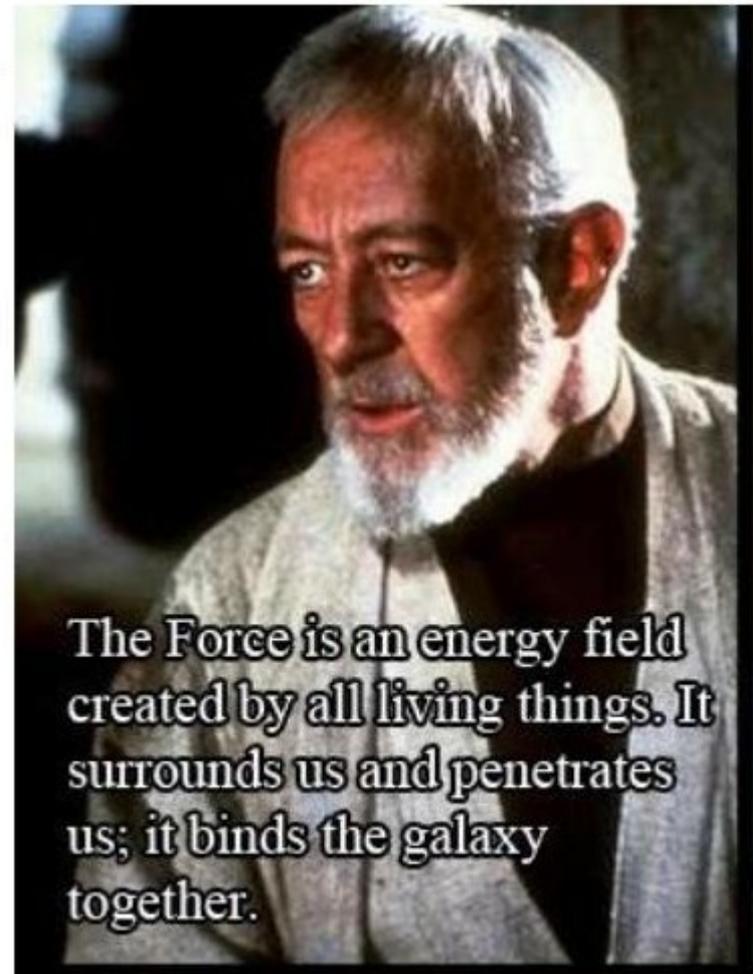
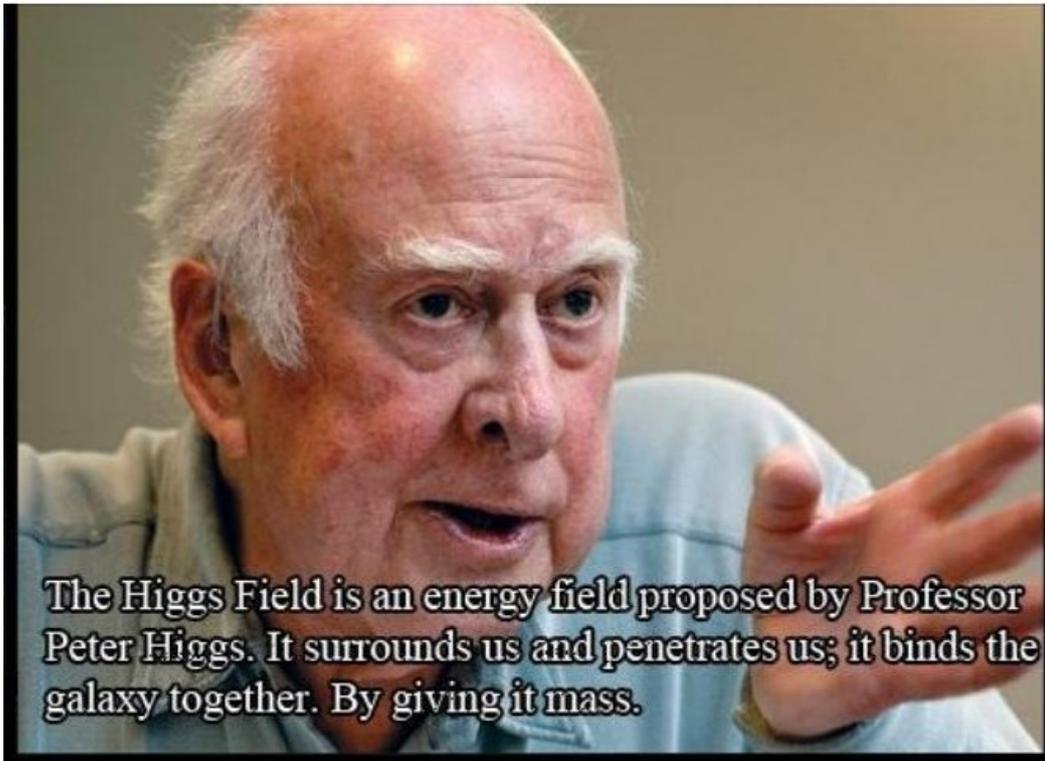


Vent, champ magnétique :
champs vectoriels



Le champ de Higgs (2)

- ◆ Le champ de Higgs est **uniforme** dans l'univers
- ◆ C'est l'**interaction** des particules avec le champ de Higgs qui vont leur donner leur masse
 - plus l'interaction est forte, plus la masse est grande





Interaction avec le champ de Higgs (1)

- ◆ Imaginons le champ de Higgs comme un champ de neige



Particules lourdes : W, Z, top



Particules légères : leptons, quarks



Particules sans masse :
photon, gluon

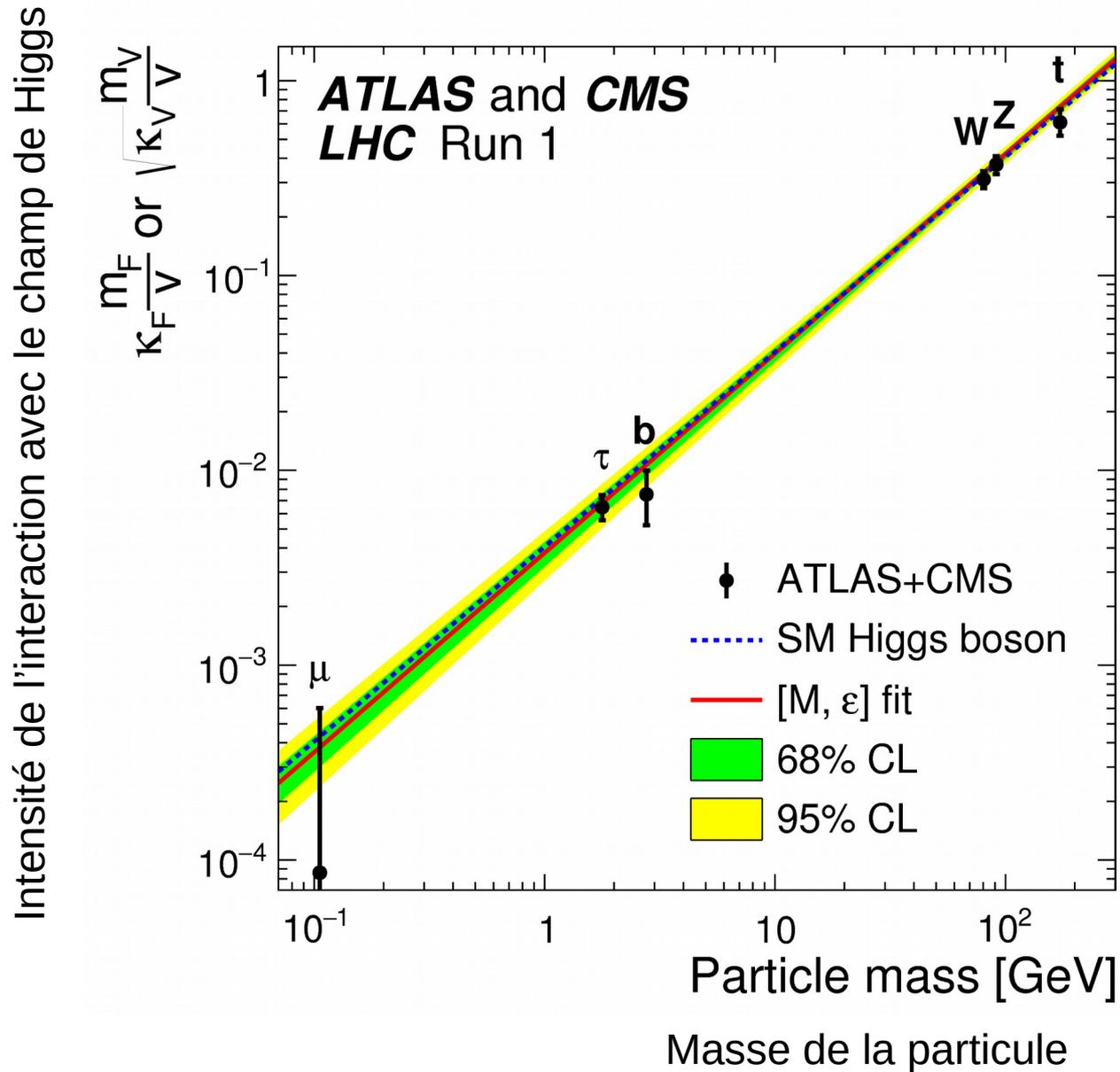


Le boson de Higgs interagit
avec lui-même \Rightarrow il se donne
sa propre masse



Interaction avec le champ de Higgs (2)

◆ Et ça marche !



La masse

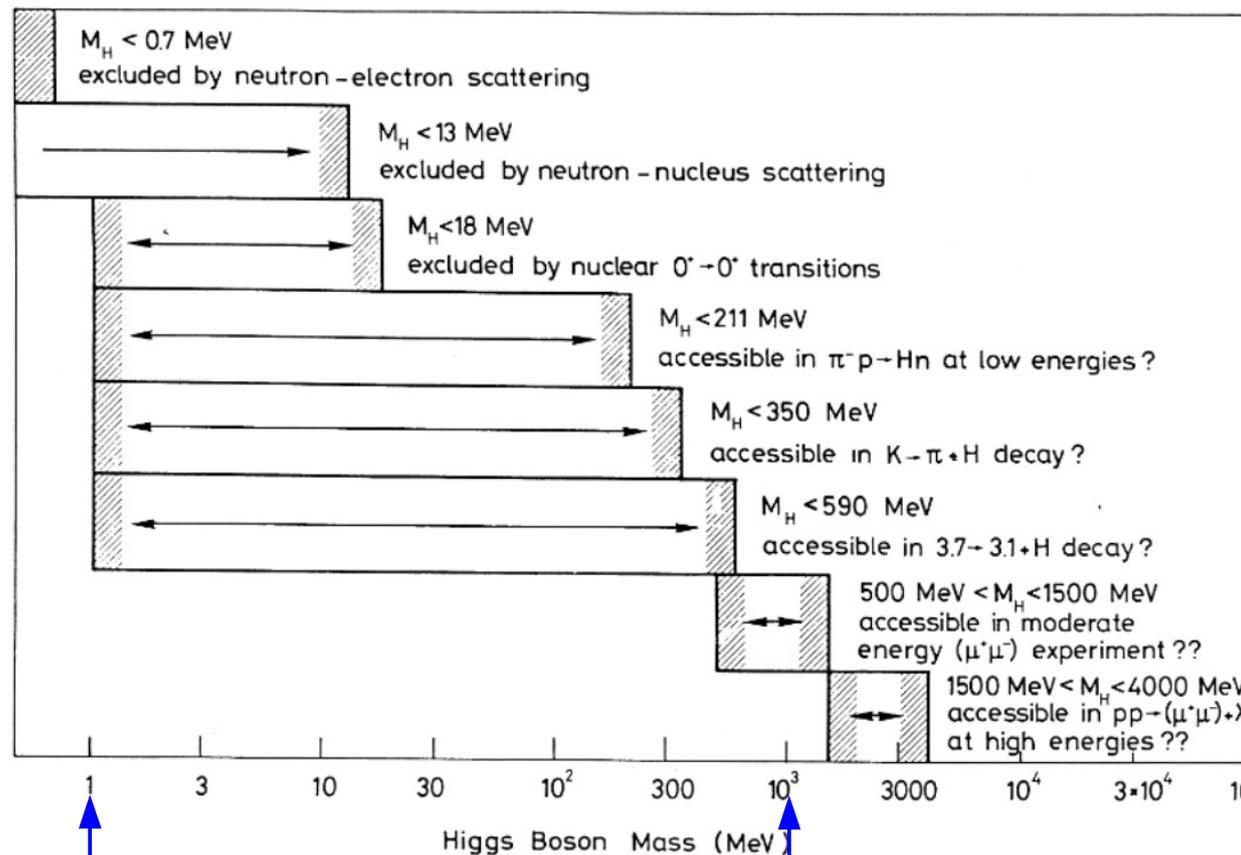
Le mécanisme de Higgs

La recherche du boson de Higgs

La suite

Chercher le boson de Higgs

- ◆ On sait que le boson de Higgs crée sa propre masse, mais on ne sait **pas laquelle !**
- ◆ Article “A phenomenological profile of the Higgs boson”, 1975:
 - “Nous nous excusons auprès des expérimentalistes de n’avoir aucune idée de la masse du boson de Higgs [...]. Pour ces raisons nous ne voulons pas encourager de grosses recherches expérimentales du boson de Higgs.”



1 MeV

1 GeV

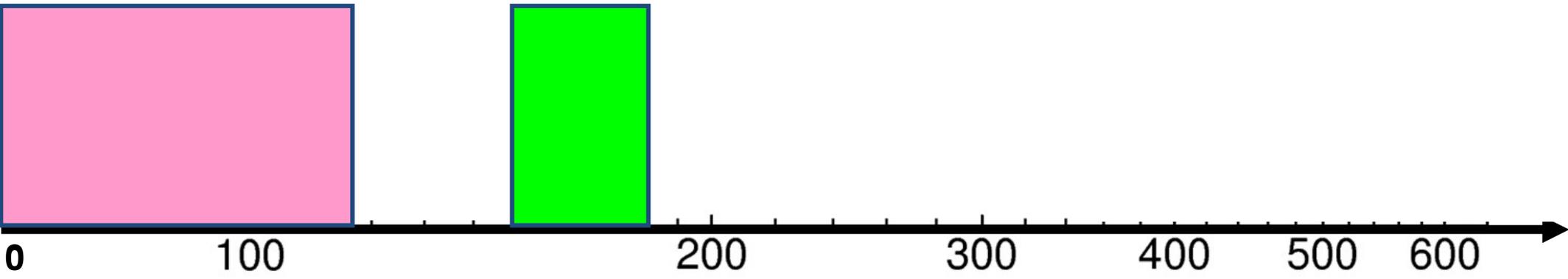
FIG. 3 100 GeV

Recherches avant le LHC

- ◆ Contraintes expérimentales + théorie : $m_H < 1000 \text{ GeV}$
⇒ s'il existe, accessible au LHC

LEP
1989-2000

Tevatron
1983-2011



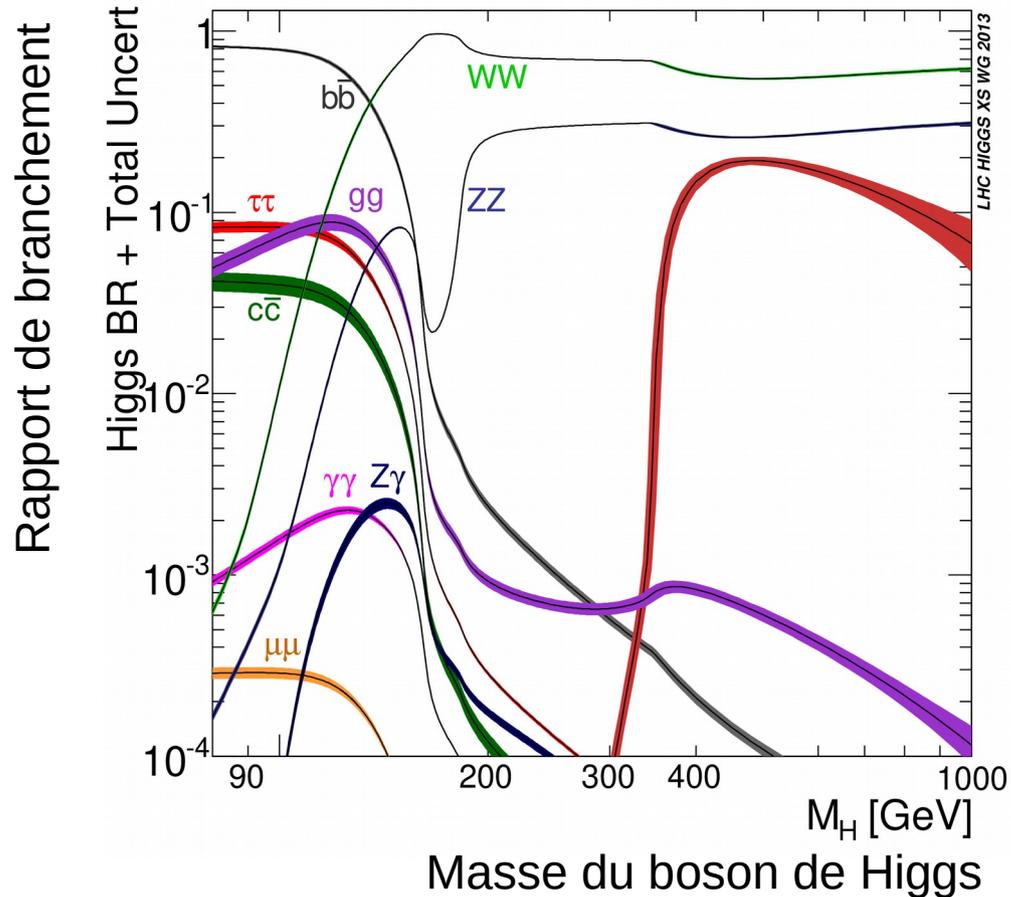
m_H [GeV]





Recherche du boson de Higgs au LHC (1)

- ◆ Il peut se désintégrer en **beaucoup** de particules différentes
 - dépend de sa masse

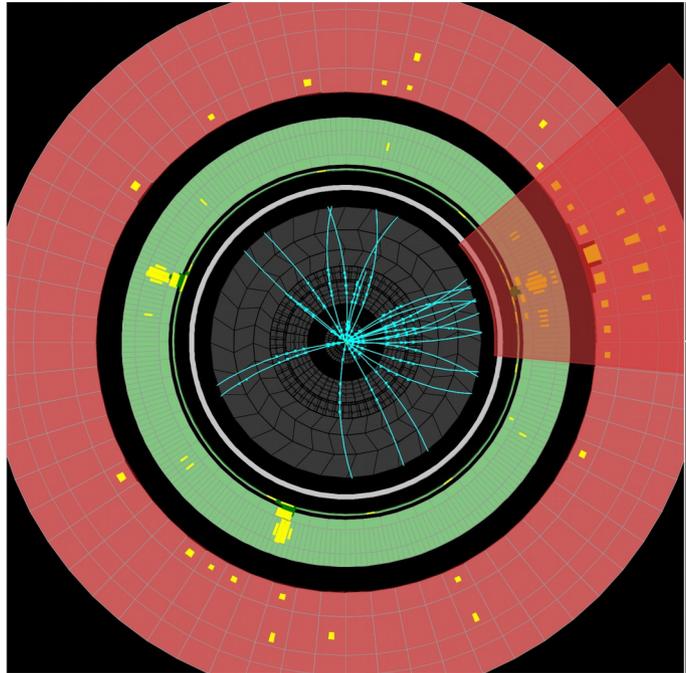
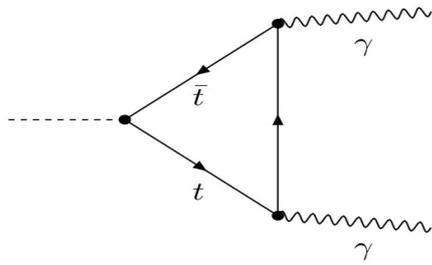


- ◆ Il fallait être capable de découvrir le boson de Higgs quelle que soit sa masse
- ◆ Il a servi de référence pour le design des expériences ATLAS et CMS



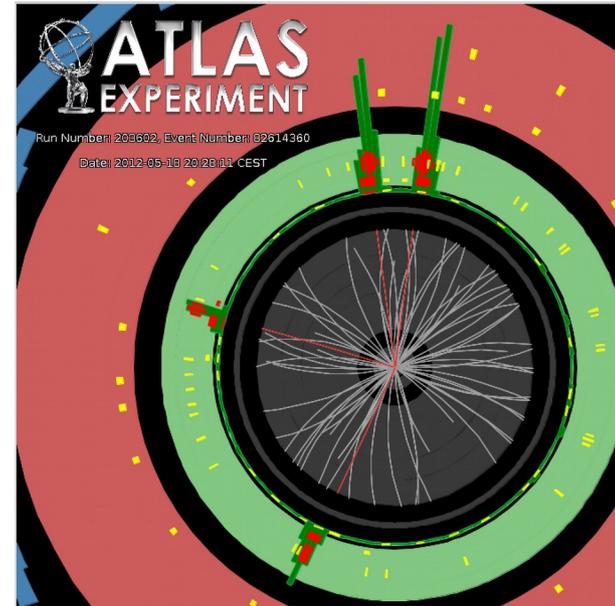
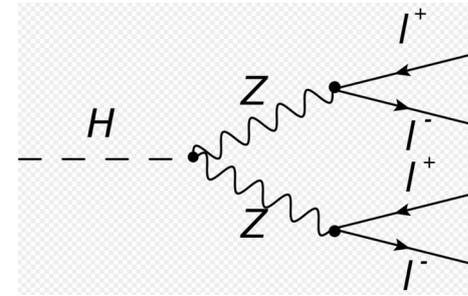
Les canaux en or

◆ $H \rightarrow \gamma\gamma$



- ◆ Avantage : signal clair
- ◆ Désavantage :
 - assez rare : 1/h

◆ $HH \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$ ($l = e$ ou μ)

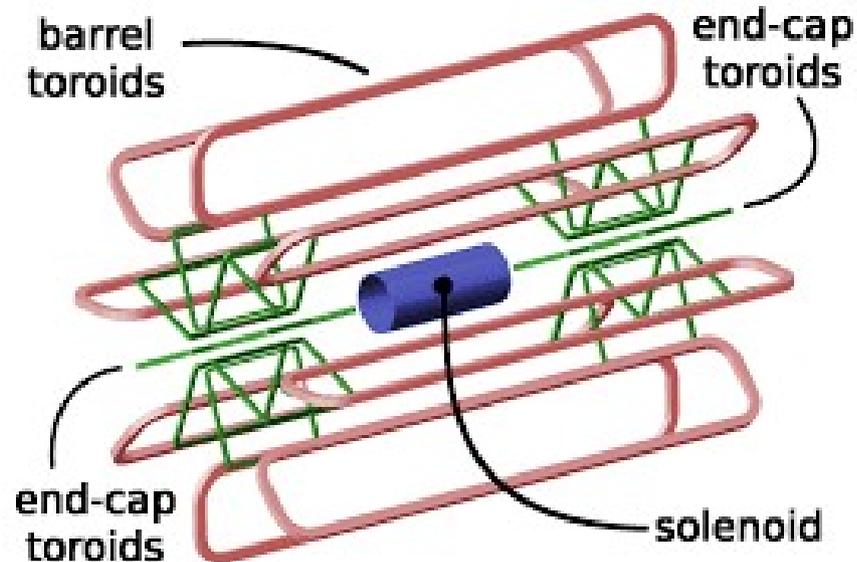
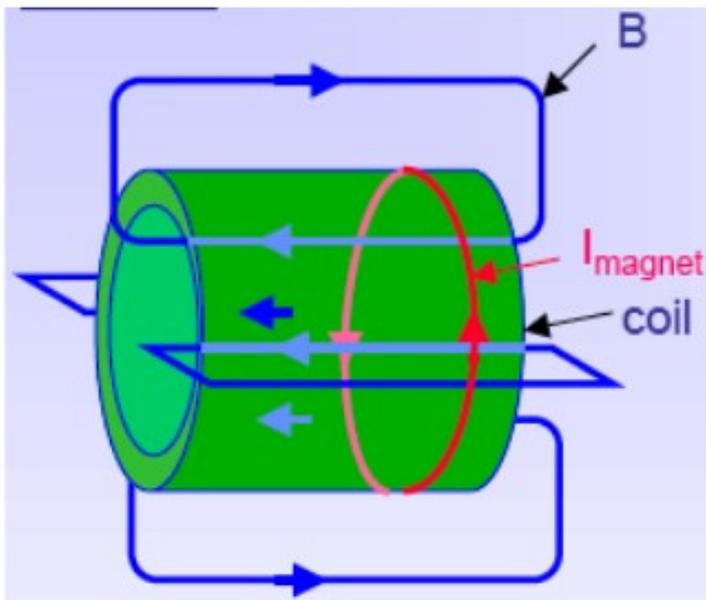


- ◆ Avantage : très peu de bruit de fond (ie événements semblables au signal qu'on cherche)
- ◆ Désavantage : rare
 - 0.3/h



Le boson de Higgs comme référence (1)

- ◆ Premier séminaire sur la possibilité d'un LHC en 1984 :
 - “Avec des collisionneurs hadroniques opérant à une énergie dans le centre de masse de plusieurs TeV, les muons seront les seuls leptons qui pourront être détectés sur une grande gamme d'énergie.”
- ⇒ chercher le boson de Higgs se désintégrant en **4 muons**
- ◆ Deux choix d'aimants pour ATLAS et CMS :
 - **toroïdal**
 - champ moins fort (2T) mais moins de matière
 - ou **solénoïdal**
 - champ plus fort mais plus de matière

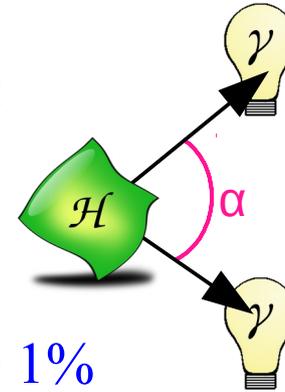




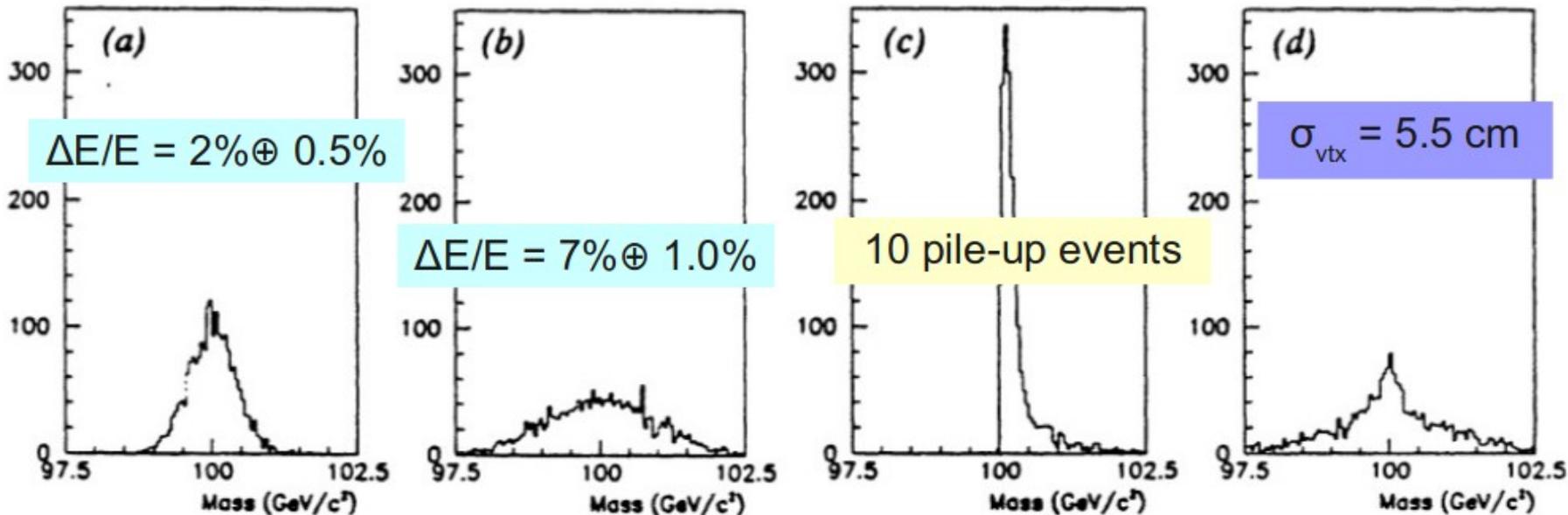
Le boson de Higgs comme référence (2)

- ◆ Recherche en deux photons, masse invariante :

$$m_{\gamma\gamma} = \sqrt{2 \cdot E_T^{\gamma 1} \cdot E_T^{\gamma 2} \cdot \cos \Delta \alpha}$$



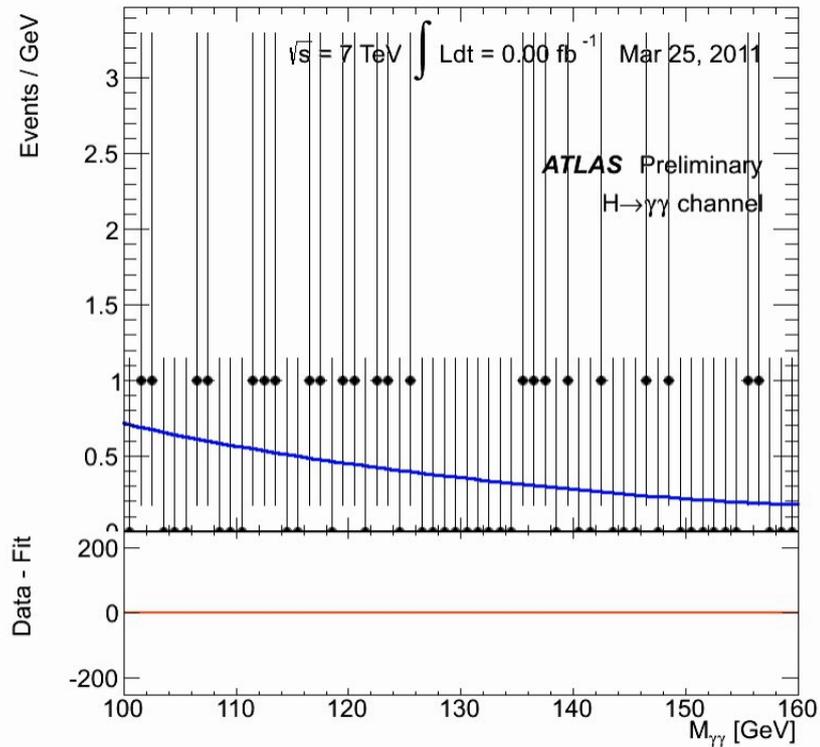
- ◆ Mesure de l'énergie des photons meilleure que 1%
⇒ résolution en énergie du calorimètre électromagnétique < 1%
- ◆ Séparation angulaire α meilleure que 5 mrad
⇒ précision sur le vertex des deux photons meilleure que 1.5 cm
- ◆ Exemple de la masse invariante reconstruite pour différentes hypothèses :



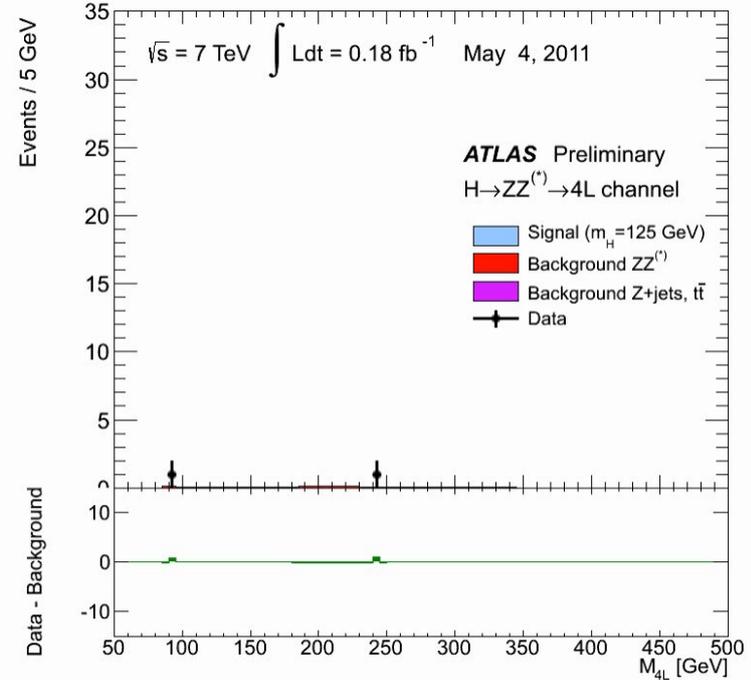


Accumulation du signal avec le temps

◆ Masse invariante deux photons :



◆ Masse invariante 4 leptons :





Annonce de la découverte : 4 juillet 2012



CCNY [Higgs boson science](#)
Latest update in the search for the Higgs boson





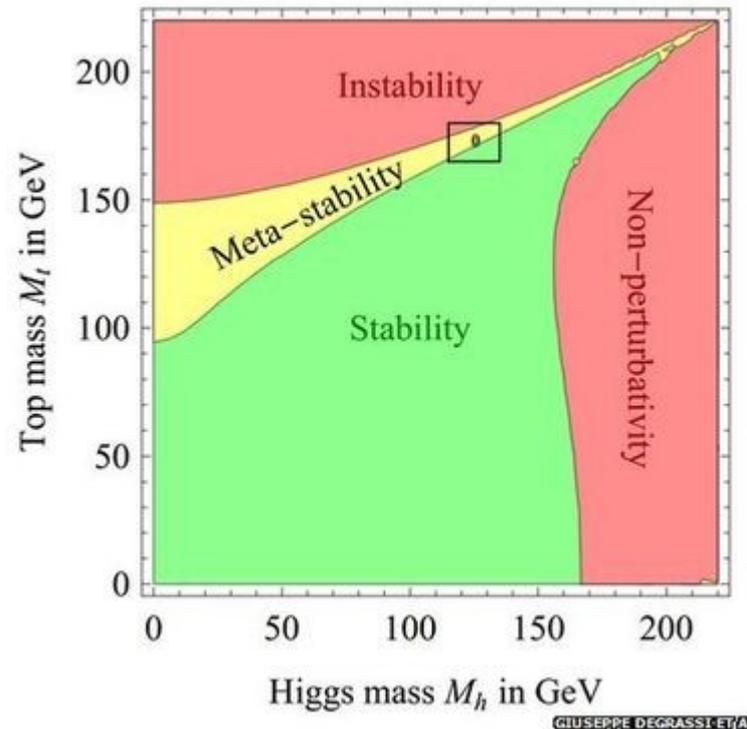
Et après ?





Et après ?

- ◆ On ne veut pas se contenter de découvrir une particule, on peut aussi mesurer toutes ses **propriétés** : masse, charge, modes de décroissance, etc
- ◆ Il faudra avoir toutes les données jusqu'en **2035** pour mesurer les propriétés du boson de Higgs avec une précision de **quelques %**
 - nécessaire pour vérifier que ce boson de Higgs est bien celui prévu par le Modèle Standard
- ◆ Exemple : stabilité de l'univers liée à la masse du boson de Higgs :



La masse

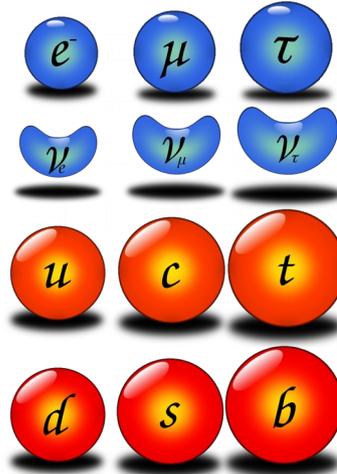
Le mécanisme de Higgs

La recherche du boson de Higgs

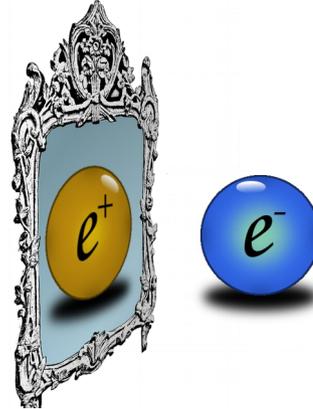
La suite

Limitations du Modèle Standard

◆ Pourquoi trois familles ?

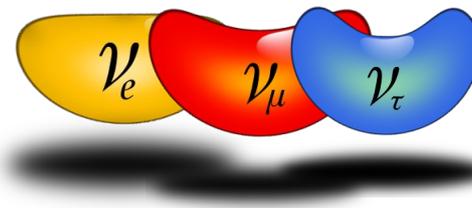


◆ Pourquoi y a-t-il une petite différence entre la matière et l'antimatière ?



◆ Physique du **neutrino**

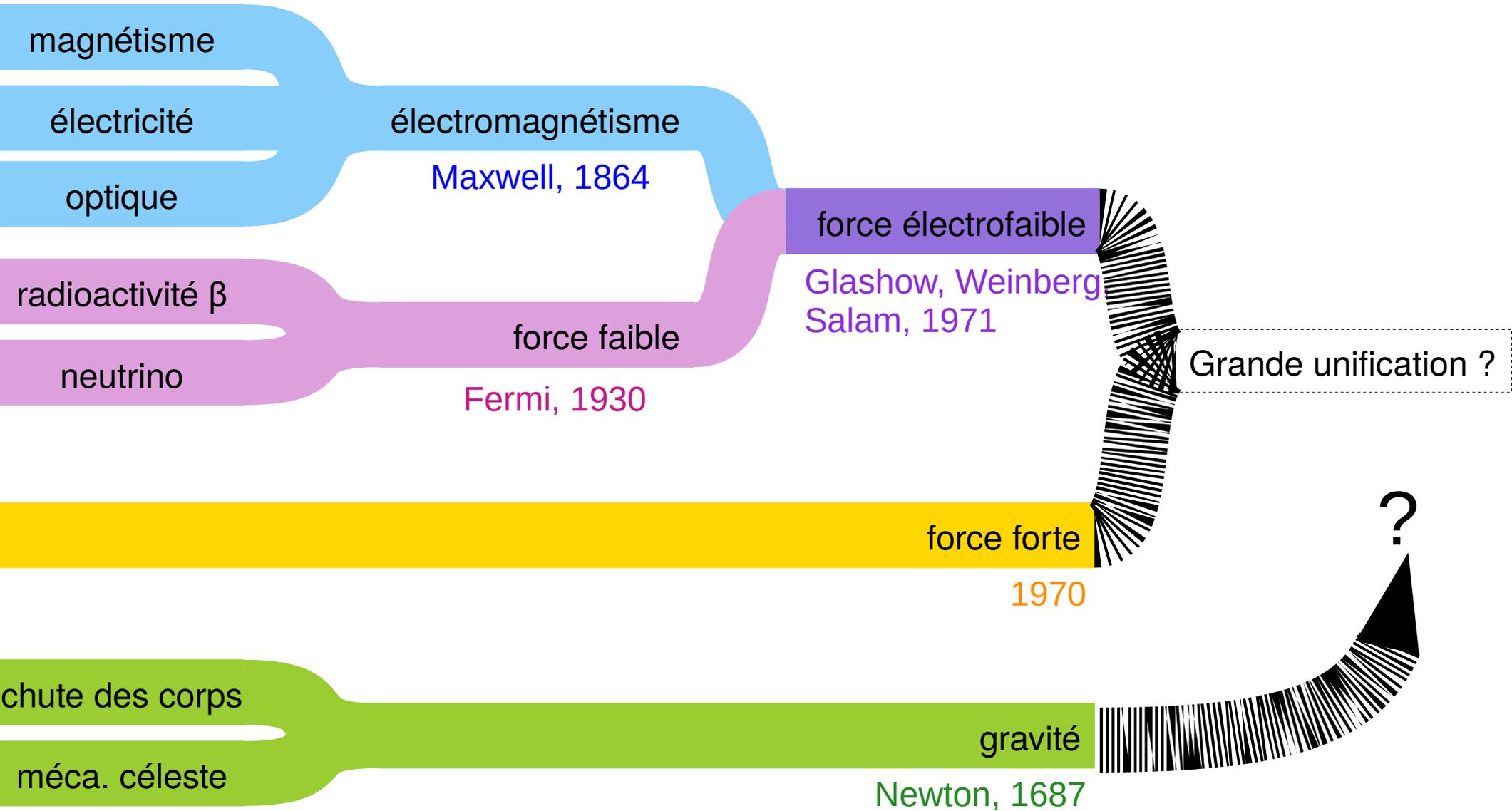
- est-il sa propre anti-particule ?
- pourquoi a-t-il une masse ?
- pourquoi oscille-t-il ?

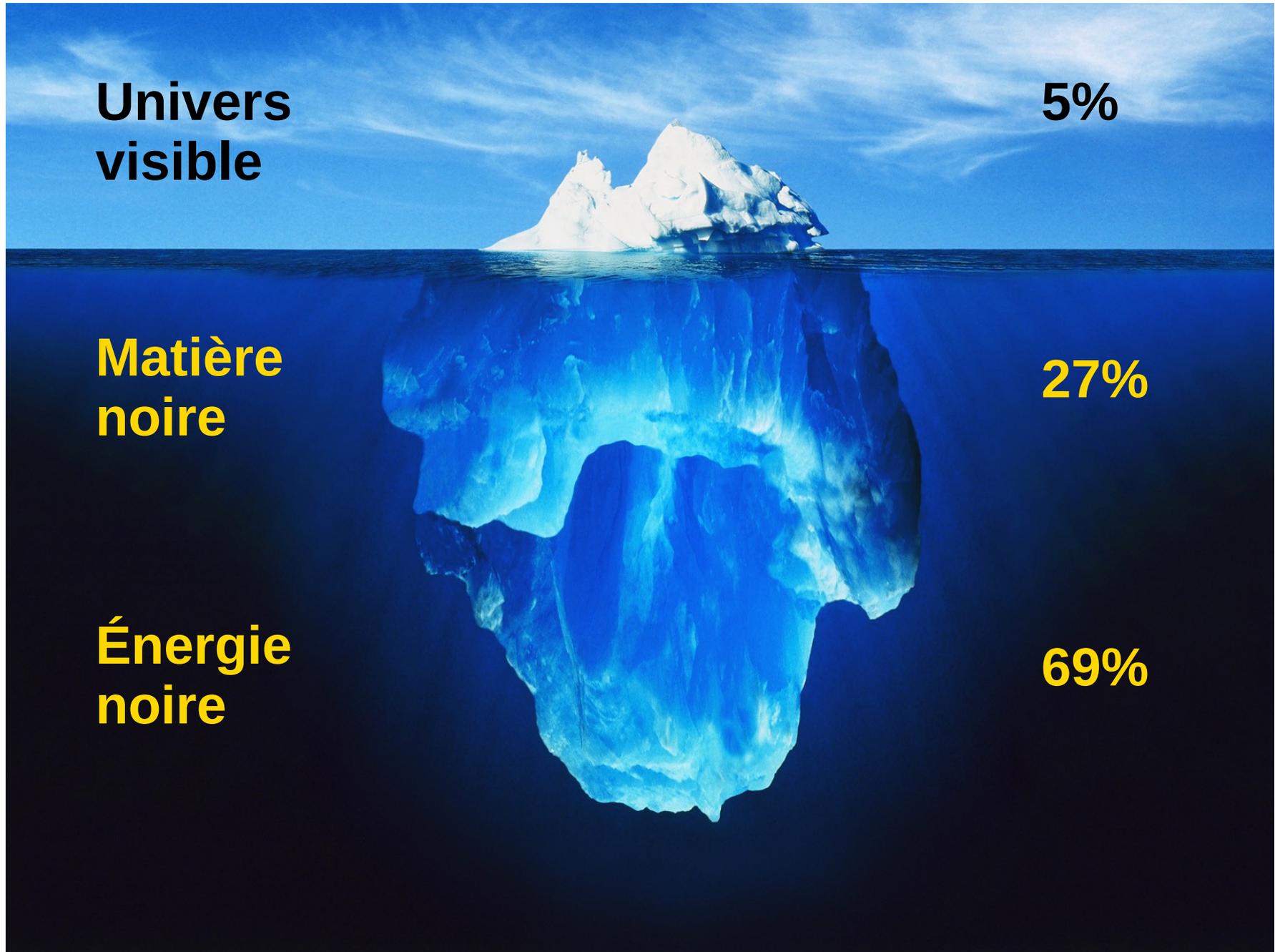




Au-delà du Modèle Standard (1)

◆ Pourra-t-on unifier toutes les interactions ?





- ◆ Le **Modèle Standard** de la physique des particules a mis plus de 100 ans à se construire
 - dont 48 ans entre la prédiction et la découverte du boson de Higgs !
- ◆ Dernière particule du Modèle Standard qui n'avait pas encore été découverte ⇒ ce Modèle est maintenant complet
 - mais ce n'est pas la fin de l'histoire, encore beaucoup de choses à comprendre



Back-up



Emprunts à d'autres cours 😊

- ◆ Cours de Steve Muanza à l'École "Techniques de base des détecteurs" 2017
- ◆ "Physique des particules aux collisionneurs", F. Ledroit, Bénodet 2017
- ◆ "Conception de détecteurs pour la physique des hautes énergies", P. Puzo, Bénodet 2017
- ◆ "Cours de master classes au CPPM", Y. Caodou et al
- ◆ Cours de I. Wingerter aux CERN Summer Students 2018
- ◆ "Un siècle d'étude des rayons cosmiques", D. Décamp, 2012

- ◆ Autre source importante : "The Review of Particle Physics (2018)", Particle Data Group