

# Particules et Symétries: Partie I

P. Verdier (verdier@ipnl.in2p3.fr)  
et  
G. Grenier

Institut de Physique Nucléaire de Lyon

9 mars 2015

# Bibliographie

- ▶ Bibliographie :
  - ▶ “Quarks and Leptons,” Halzen et Martin
  - ▶ “Noyaux et Particules (Modèles et symétries),” Valentin
  - ▶ “Introduction to elementary particles,” Griffith
  - ▶ “Les particules et leurs symétries,” Chanfray et Smadja
- ▶ Notes de cours :  
[http ://www.ipnl.in2p3.fr/cours/verdier/SymetriesEtParticules2015/](http://www.ipnl.in2p3.fr/cours/verdier/SymetriesEtParticules2015/)

# Plan du cours

- ▶ Introduction Générale
- ▶ Modèle des quarks
- ▶ Symétries C, P, T
- ▶ Interaction faible
  - ▶ Théorie de Fermi
  - ▶ Courants neutres
  - ▶ Cabibbo
  - ▶ Matrice CKM
  - ▶ Modèle électrofaible
    - ▶ Brisure symétrie électrofaible
    - ▶ boson de higgs
- ▶ Introduction QCD et modèle des partons
- ▶ (Brève introduction de la supersymétrie)
- ▶ Première partie :  
Forme traditionnelle cours/TD
- ▶ Deuxième partie :  
Etude de papiers expérimentaux :  
Découverte du boson W à UA1  
Oscillation  $K^0 - \bar{K}^0$   
Découverte du  $J/\psi$   
Découverte du gluon  
Découverte du Higgs

# Agenda

- ▶ mardi 10/03 : 3h cours (P. Verdier)
- ▶ mercredi 11/03 : 3h cours (P. Verdier)
- ▶ mardi 17/03 : 3h TD (G. Grenier)
- ▶ mercredi 18/03 : 3h cours (P. Verdier)
- ▶ mardi 24/03 : 3h TD (G. Grenier)
- ▶ mercredi 25/03 : 3h TD (G. Grenier)
- ▶ mardi 31/03 : 3h TD (G. Grenier)
- ▶ mercredi 1/04 : 3h cours (P. Verdier)
- ▶ mardi 7/04 : 3h TD (G. Grenier), préparation analyse de papiers
- ▶ mercredi 8/04 : 3h cours (P. Verdier), préparation analyse de papiers
- ▶ mardi 21/04 : 3h TD (G. Grenier), présentation analyse de papiers
- ▶ mercredi 22/04 : 3h cours (P. Verdier), présentation analyse de papiers

# Plan

## Introduction

**Bref historique**

Unités

Particules et interactions

Ordres de grandeur

Les interactions fondamentales

Le modèle standard

## Historique : découverte des particules élémentaires

- ▶ **1895** : Thomson découvre l'électron à l'aide de tubes cathodiques
- ▶ **1919** : Rutherford prouve l'existence du proton
- ▶ **1931** : Découverte du positron par Anderson (rayon cosmiques)
- ▶ **1932** : Découverte du neutron par Chadwick
- ▶ **1937** : Découverte du muon ( $m=100 \text{ MeV}/c^2$ ), cousin de l'électron
- ▶ **1947** : Découverte du pion chargé  $\pi^\pm$  (méson)
- ▶ **1951** : Découverte de l'étrangeté (futur quark s)
- ▶ **1950-1960** : De nombreuses particules stables sont découvertes
- ▶ **1955** : Découverte de l'anti-proton
- ▶ **1956** : Mise en évidence du neutrino et de l'anti-neutrino (réacteur)
- ▶ **1962** : 2 types de neutrinos :  $\nu_e$  et  $\nu_\mu$
- ▶ **1967** : Sous-structure du proton (Bjorken) : les partons
- ▶ **1974** : Découverte du méson  $J/\psi$  : méson  $c\bar{c}$
- ▶ **1976** : Découverte d'un 3<sup>me</sup> lepton chargé : le tau
- ▶ **1978** : Découverte d'un 5<sup>eme</sup> quark : le bottom
- ▶ **1979** : Mise en évidence du gluon à PETRA
- ▶ **1983** : Découverte des bosons Z et W au SPS
- ▶ **1995** : Découverte d'un 6<sup>eme</sup> quark au Tevatron : le top
- ▶ **2000** : Observation du 3<sup>eme</sup> neutrino :  $\nu_\tau$
- ▶ **2012** : Découverte d'un boson scalaire de masse 126 GeV au LHC

# Historique

- ▶ **1905-1928** : Mécanique quantique
  - ▶ Naissance et développements
  - ▶ Equations de Klein Gordon, de Dirac ...
- ▶ **1950** : Théorie quantique de l'électromagnétisme (QED)
- ▶ **1954** : Yang et Mills proposent les théories de jauge non-abélienne
- ▶ **1964** : Modèle des quarks uds (Gell-Mann et Zweig), SU(3)
- ▶ **1964** : Mécanisme de Higgs
- ▶ **1967** : Glashow, Salam, Weinberg : unification des forces électromagnétiques et faibles : prédiction des bosons Z/W et du boson de Higgs.
- ▶ **1970** : Mécanisme de GIM
- ▶ **1972** 't Hooft et Veltman : les théories de jauge non-abélienne sont renormalisables
- ▶ **1973** : Théorie des interactions fortes (QCD)

# Plan

## Introduction

Bref historique

### **Unités**

Particules et interactions

Ordres de grandeur

Les interactions fondamentales

Le modèle standard

# Système d'unité

## ▶ Rappels

- ▶  $1 \text{ eV} = 1,602 \times 10^{-19} \text{ J}$
- ▶  $c = 2,998 \times 10^8 \text{ m/s}$
- ▶  $\hbar = h/2\pi = 1,055 \times 10^{-34} \text{ Js}$
- ▶  $k_B = 1,381 \times 10^{-23} \text{ J/K}$

## ▶ $c = \hbar = k_B = 1$ , et tout s'exprime en eV

## ▶ Unité de masse : $m = E/c^2$

- ▶  $1 \text{ kg} = 5,61 \times 10^{26} \text{ GeV} ( \text{GeV}/c^2 )$
- ▶ Masse du proton = 938 MeV
- ▶ Masse de l'électron = 511 keV

## ▶ Unité de distance :

- ▶  $1 \text{ m} = 5,07 \times 10^{15} \text{ GeV}^{-1} ( \hbar c/\text{GeV} )$
- ▶  $1 \text{ fm}^{-1} = 197 \text{ MeV}$

## ▶ Unité de temps :

- ▶  $1 \text{ s} = 1,52 \times 10^{24} \text{ GeV}^{-1} ( \hbar/\text{GeV} )$

## ▶ Unité de température : $E = k_B T$

- ▶  $1 \text{ K} = 8,617 \times 10^{-5} \text{ eV}$

# Plan

## Introduction

Bref historique

Unités

**Particules et interactions**

Ordres de grandeur

Les interactions fondamentales

Le modèle standard

# Les particules élémentaires

Les particules élémentaires peuvent être divisées en 2 catégories :

- ▶ **Les fermions** : Ils ont un spin 1/2  
Ce sont les constituants élémentaires de la matière. On distingue :
  - ▶ **Les leptons** : 3 familles  
électron, muon, tau et leur neutrino respectif :  $\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$
  - ▶ **Les quarks** : 3 familles aussi  
u, d, c, s, t, b

Et leur anti-particule

- ▶ **Les bosons** : Ils ont un spin entier  
Ce sont les particules médiatrices des interactions fondamentales :
  - ▶ **Force électrofaible** : (unifiées dans le modèle standard)  
 $\gamma, Z^0, W^+, W^-$
  - ▶ **Force forte** :  
8 gluons
  - ▶ **Gravité** :  
Graviton ? pas encore observé

Il faut rajouter le boson de Higgs, particule scalaire (S=0) responsable de la masse des autres particules.

# Les leptons

Les leptons sont les fermions insensibles à l'interaction forte.

		Masse			Masse
électron	$e^-$	0,511 MeV	neutrino électronique	$\nu_e$	< 2,5 eV
muon	$\mu^-$	105,7 MeV	neutrino muonique	$\nu_\mu$	< 170 keV
tau	$\tau^-$	1777 MeV	neutrino tau	$\nu_\tau$	< 18 MeV

- ▶  $e^-$ ,  $\mu^-$  et  $\tau^-$  ont une charge électrique  $Q=-1$
- ▶ les neutrinos ont une charge électrique  $Q=0$

Chaque famille possède un nombre quantique additif qui se conserve dans toutes les interactions, sauf dans le phénomène d'interaction de neutrinos :

- ▶  $L_e(e^-) = L_e(\nu_e) = -L_e(e^+) = -L_e(\bar{\nu}_e) = 1$ , et 0 pour autres fermions
- ▶  $L_\mu(\mu^-) = L_\mu(\nu_\mu) = -L_\mu(\mu^+) = -L_\mu(\bar{\nu}_\mu) = 1$ , et 0 pour autres fermions
- ▶  $L_\tau(\tau^-) = L_\tau(\nu_\tau) = -L_\tau(\tau^+) = -L_\tau(\bar{\nu}_\tau) = 1$ , et 0 pour autres fermions

Toute réaction doit alors conserver simultanément ces 3 nombres quantiques.

Le nombre leptonique total,  $L = L_e + L_\mu + L_\tau$  est lui conservé dans toutes les processus, y compris les oscillations de neutrinos.

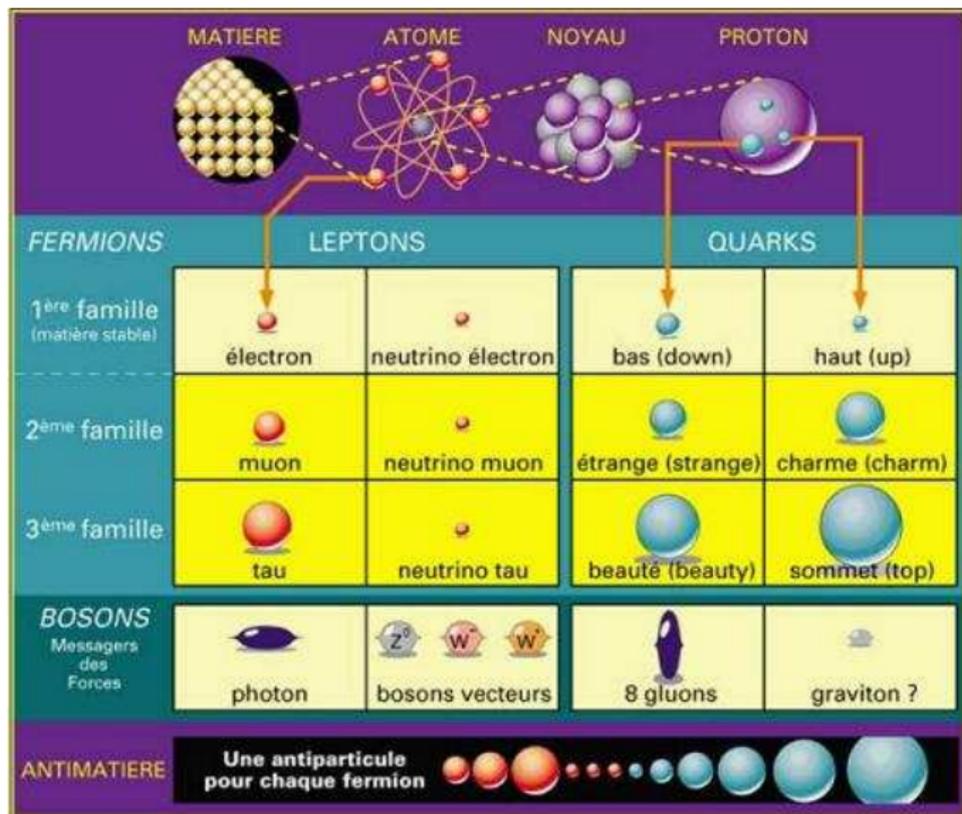
# Les quarks

- ▶ Les quarks portent une charge électrique fractionnaire.
- ▶ Ils sont sensibles à toutes les interactions, et en particulier à l'interaction forte.
- ▶ Il existe 6 espèces de quarks que l'on différencie par une propriété appelée **la saveur**.

	1ere famille	2eme famille	3eme famille
Q=2/3	up $1,7 \text{ MeV} < m < 3,1 \text{ MeV}$	charm $1,18 < m < 1,34 \text{ GeV}$	top $m = 173,2 \text{ GeV}$
Q=-1/3	down $4,1 \text{ MeV} < m < 5,7 \text{ MeV}$	strange $80 \text{ MeV} < m < 130 \text{ MeV}$	bottom $4,13 < m < 4,37 \text{ GeV}$

- ▶ A l'exception du quark top (plus lourd que le boson W, donc  $t \rightarrow bW^+$ ), aucun quark n'a jamais été observé à l'état libre.
- ▶ Les particules que l'on observe sont des hadrons : les mésons (états  $q\bar{q}$ ) et les baryons (états  $qqq$ )

# Particules élémentaires : résumé



# Plan

## Introduction

Bref historique

Unités

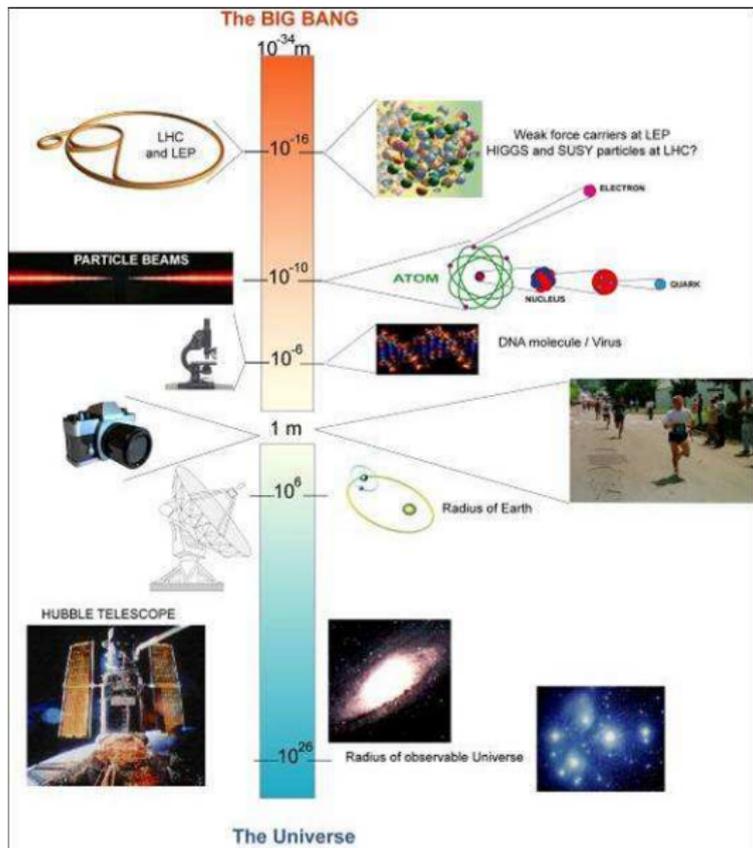
Particules et interactions

**Ordres de grandeur**

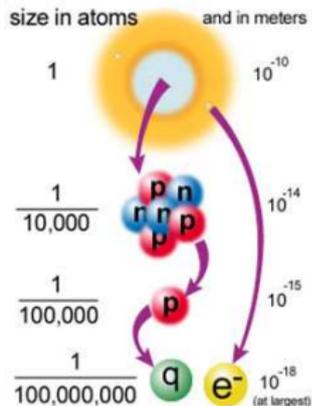
Les interactions fondamentales

Le modèle standard

# Ordres de grandeur



- ▶ De Broglie :  $P = h/\lambda_D$
- ▶ Plus on augmente l'énergie de la sonde, plus faible est la distance sondée



# Plan

## Introduction

Bref historique

Unités

Particules et interactions

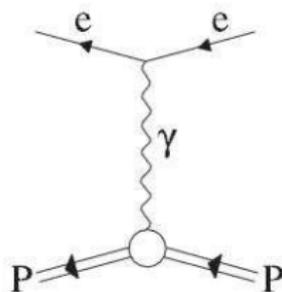
Ordres de grandeur

**Les interactions fondamentales**

Le modèle standard

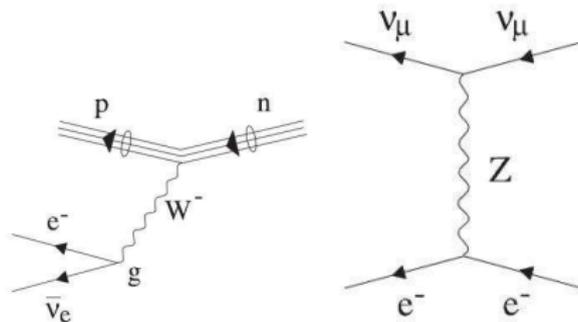
# Electromagnétisme

- ▶ Interaction entre particules chargées
- ▶ Force véhiculée par un boson de spin 1 et de masse nulle : **le photon**
- ▶ Portée infinie
- ▶ Intensité caractérisée par la constante de structure fine :  
 $\alpha = e^2/4\pi\epsilon_0\hbar c = 1/137$
- ▶ Temps d'interaction et vie moyenne typique :  $\sim 10^{-20}$  s



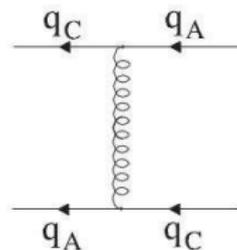
## Interaction faible

- ▶ Interaction de très courte portée qui met en jeu des courants d'échange neutre ou chargé
- ▶ 2 bosons massifs :  $W^\pm$  ( $m=80,4$  GeV) et  $Z^0$  ( $m=91$  GeV)
- ▶ Intervient dans la désintégration du neutron :  $n \rightarrow pe^- \bar{\nu}$
- ▶ Constante de couplage :  $g^2/4\pi = \alpha/\sin^2\theta_W$ , où  $\theta_W$  est l'angle de Weinberg et  $\sin^2\theta_W = 0,231$ . Cette constante de couplage est plus grande que la constante électromagnétique, mais amplitudes de transition proportionnelles à  $g^2/M_{W,Z}^2$



## Interaction forte

- ▶ L'interaction forte ne concerne que les quarks et les hadrons
- ▶ **8 gluons de masse nulle** qui se couplent à une charge de couleur spécifique des quarks et des gluons
- ▶ constante de couplage très forte :  $\alpha_s \simeq 1$
- ▶ Temps d'interaction et vie moyenne typique :  $\sim 10^{-23}$  s
- ▶ Force de très courte portée ( $10^{-15}$  m) : confinement



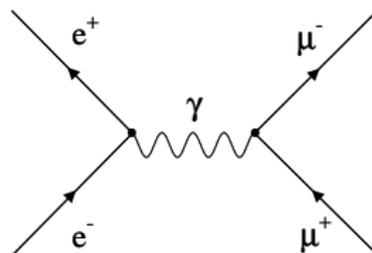
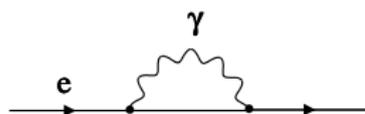
## Particules virtuelles

- ▶ En théorie quantique des champs, un électron peut émettre un photon puis le réabsorber
- ▶ Le temps de vie de ce photon est donné par la relation d'incertitude d'Heisenberg :

$$\Delta t \Delta E \geq 1$$

La durée de vie de ce photon doit satisfaire  $\tau \simeq \Delta t \leq 1/\Delta E$  pour garantir la conservation de l'énergie pour des temps supérieurs à  $1/\Delta E$

- ▶ Autre exemple :  $e^+ e^- \rightarrow \gamma \rightarrow \mu^+ \mu^-$
- ▶  $E_\gamma = E_{e^+} + E_{e^-}$  et  $\vec{p}_\gamma = \vec{p}_{e^+} + \vec{p}_{e^-}$
- ▶ Il est impossible de satisfaire  $E_\gamma^2 - \vec{p}_\gamma^2 = m_\gamma^2 = 0$
- ▶ le photon est hors couche de masse :  
**Particule virtuelle**
- ▶ Avec  $E_{cm} = 200 \text{ MeV}$ ,  $\tau \leq 10^{-24} \text{ s}$  : le photon ne peut être observé



# Constante de couplage de QED

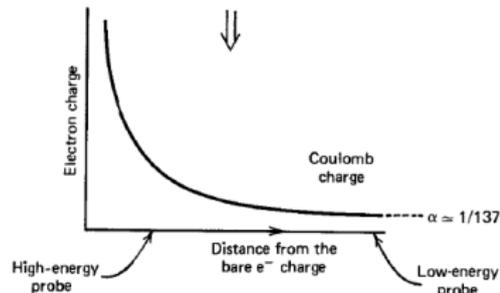
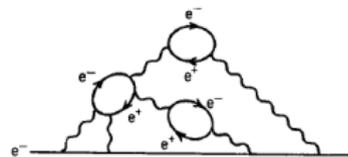
La constante de structure fine est le paramètre physique caractérisant la force des interactions électromagnétiques :

$$\alpha_e = \frac{e^2}{4\pi} = \frac{1}{137}$$

A faible distance (grande énergie de la sonde), le phénomène d'écrantage de la charge est dû à la polarisation du vide (paires  $e^+e^-$  virtuelles).

Le photon, médiateur de la force électromagnétique, a une charge électrique nulle.

Plus la distance est faible, plus la charge mesurée est importante.



(a)

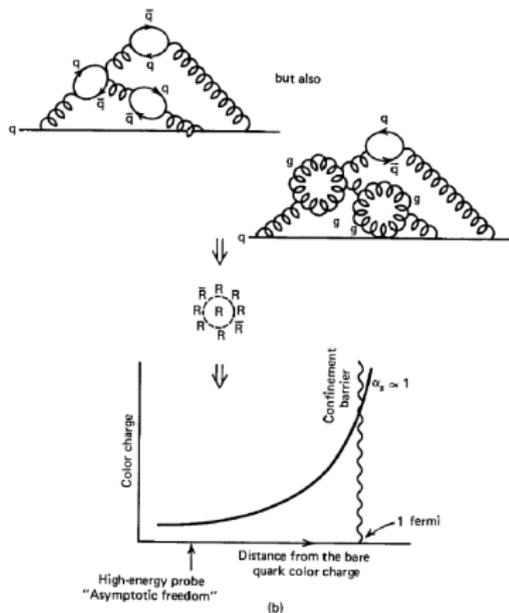
# Constante de couplage de QCD

Pour l'interaction forte, la situation est différente :

$$\alpha_s(Q^2) = \frac{g^2(Q)}{4\pi}$$

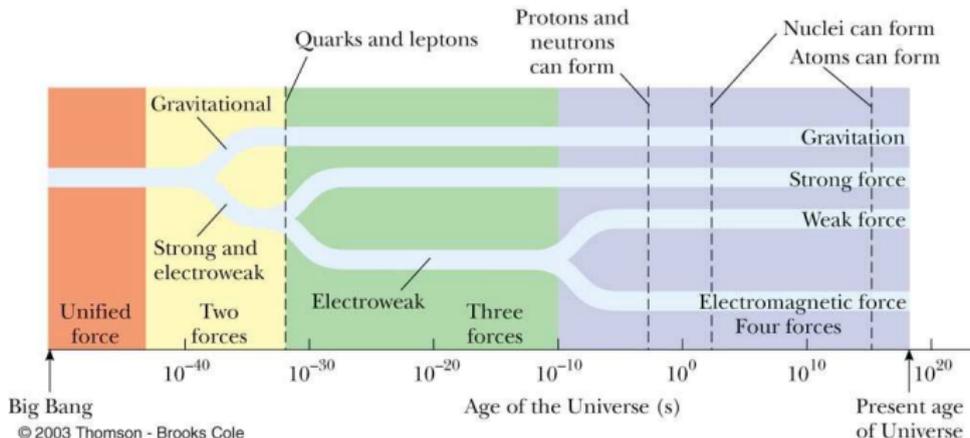
Le gluon, médiateur de la force forte, porte une charge de couleur. Le gluon peut se coupler à d'autres gluons. Ceci conduit au phénomène d'anti-écrantage.

- ▶ A grand  $Q^2$  : liberté asymptotique et QCD perturbative.
- ▶ A petit  $Q^2$  :  $\alpha_s(Q^2)$  augmente, physique non-perturbative, confinement des quarks et des gluons dans les hadrons.

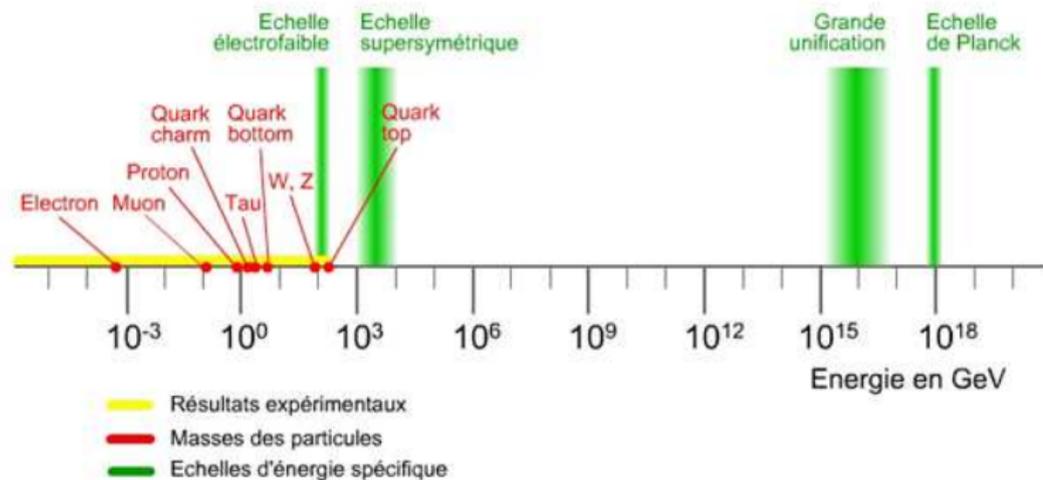


# Les interactions fondamentales

Interaction	Théorie	Méiateur	Masse	Portée	Puissance relative
<b>Forte</b>	QCD	8 gluons	0	$\sim 10^{-15}$	1
<b>Electromagnétique</b>	QED	photon	0	$\infty$	$10^{-2}$
<b>Faible</b>	Electrofaible	$W^+$ , $W^-$ , $Z^0$	80/91 GeV	$\sim 10^{-18}$	$10^{-7}$
<b>Gravitation</b>	Relativité générale	graviton ?	0	$\infty$	$10^{-38}$



# Echelle d'énergie



© 3xplus.com

# Plan

## Introduction

Bref historique

Unités

Particules et interactions

Ordres de grandeur

Les interactions fondamentales

**Le modèle standard**

## Le modèle standard

Le modèle standard représente notre connaissance actuelle du monde des particules :

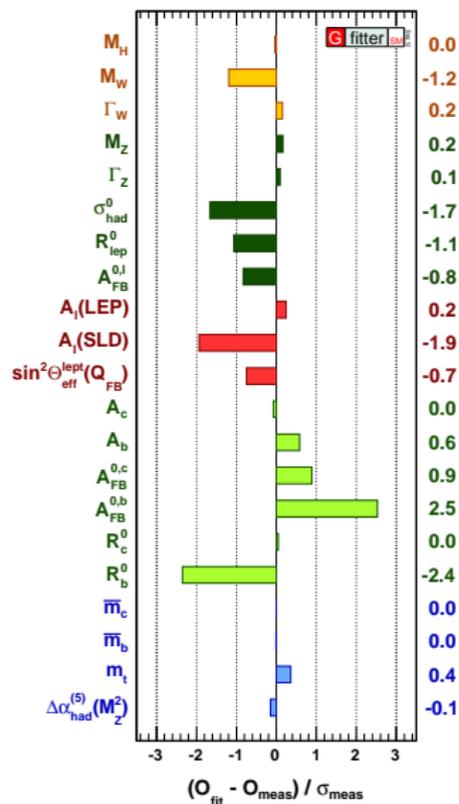
- Théorie qui explique les interactions entre les particules à l'aide des symétries de jauge :  $SU(3)_C \times SU(2)_L \times U(1)_Y$

multiplets	particules	Y	I	$I_3$	Q
<i>doublets gauches</i>	$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e^- \end{pmatrix}_L \begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu^- \end{pmatrix}_L \begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau^- \end{pmatrix}_L$	-1	1/2	$\begin{pmatrix} 1/2 \\ -1/2 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0 \\ -1 \end{pmatrix}$
<i>singlets droits</i>	$(e^-)_R (\mu^-)_R (\tau^-)_R$	-2	0	0	-1
<i>doublets gauches</i>	$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}_L \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix}_L \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}_L$	1/3	1/2	$\begin{pmatrix} 1/2 \\ -1/2 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 2/3 \\ -1/3 \end{pmatrix}$
<i>singlets droits</i>	$(u)_R (c)_R (t)_R$ $(d)_R (s)_R (b)_R$	4/3 -2/3	0 0	0 0	2/3 -1/3

- Brisure spontanée de la symétrie électrofaible et mécanisme de Higgs pour expliquer la masse des particules

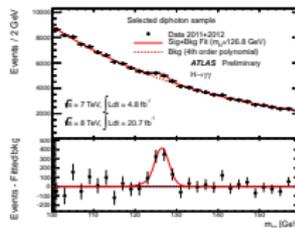
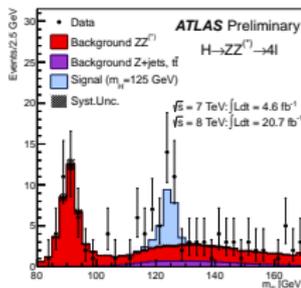
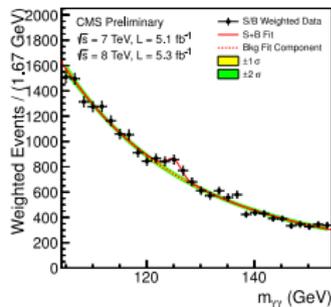
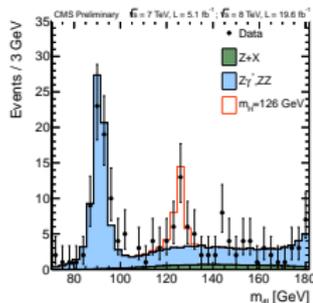
# Les succès du modèle standard

- ▶ Les paramètres du modèle standard ont été mesurés avec une très grande précision



# Découverte du boson de Higgs au LHC en 2012 ?

- Après 2 ans de prise de données à  $\sqrt{s} = 7$  et 8 TeV au LHC, les expériences CMS et ATLAS annoncent la découverte d'un boson scalaire de masse 126 GeV compatible avec le boson de Higgs du modèle standard.



## Au delà du modèle standard

- ▶ Dans le MS, les neutrinos ont une masse nulle, or on vient de découvrir que ce n'est pas le cas
- ▶ Le boson de Higgs découvert au LHC est il exactement celui du modèle standard ?
- ▶ Les constantes de couplages des 3 interactions ne s'unifient pas à haute énergie dans le MS. On aimerait une théorie plus large permettant l'unification de toutes les interactions, y compris la gravité : supersymétrie, théorie des super-cordes...
- ▶ Origine de l'asymétrie matière-antimatière ?
- ▶ Quelle est la nature de la matière noire et de l'énergie noire qui représentent 95% de la masse de l'univers ?