

# Physique des particules

Master 2 de PSA 2011-2012

Université Joseph Fourier - Grenoble I

<http://lpsc.in2p3.fr/atlas/bclement/M2Particules>

Ingo Schienbein : [schien@lpsc.in2p3.fr](mailto:schien@lpsc.in2p3.fr)

Benoit Clément : [bclement@lpsc.in2p3.fr](mailto:bclement@lpsc.in2p3.fr)



"Particles, particles, particles."

# Introduction

# Plan du cours

**2x(16h de cours + 6h TD)**

**Cours d'introduction**

**Théorie des groupes  $SU(n)$**

**Groupes et spectroscopie hadronique**

**Symétries discrètes**

**Cinématique et section efficaces**

**Electrodynamique quantique**

**Interactions faibles : Glashow-Salam-Weinberg**

**Mécanisme de Higgs**

**Interaction forte et QCD**

**Diffusion profondément inélastiques**

# Bibliographie

## Les particules et leur symétries

Guy Chanfray et Gerard Smadja, Masson

<http://www.ipnl.in2p3.fr/cours/Smadja/partsym.html>

## Introduction to High Energy Physics

Donald H. Perkins, Addison-Wesley

## Quarks and Leptons

Francis Halzen et Alan D. Martin, Wiley

## Cours de Walter Greiner, Springer

W. Greiner, **Quantum Mechanics : Special Chapters**

W. Greiner et B. Muller, Quantum Mechanics : **Symmetries** (existe en français)

W. Greiner, **Relativistic Quantum Mechanics**

W. Greiner et J. Reinhardt, **Field Quantization**

W. Greiner et J. Reinhardt, **Quantum Electromagnetics**

W. Greiner, S Schramm er E. Stein, **Quantum Chromodynamics**

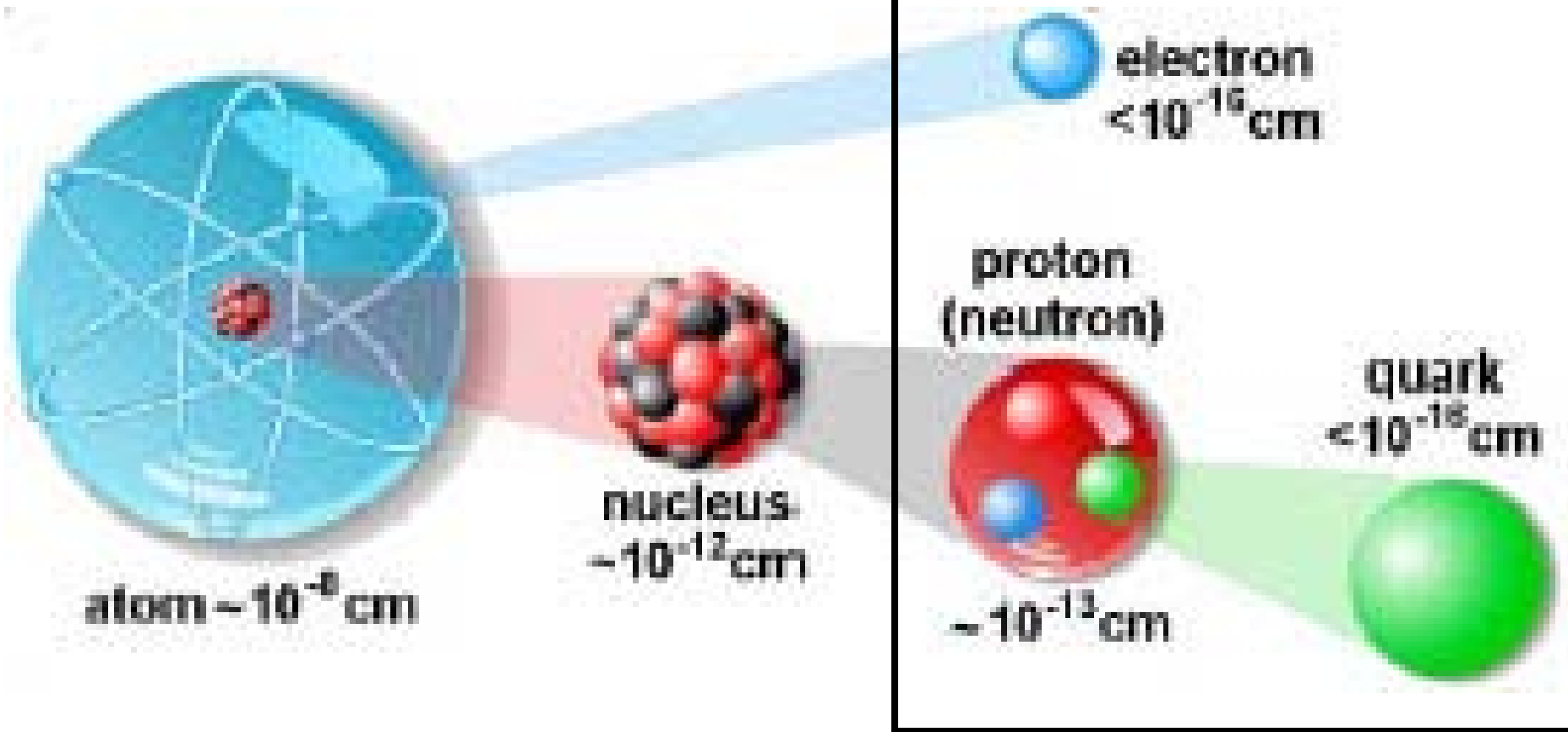
W. Greiner et B. Muller, **Gauge Theory of Weak Interactions**

## Review of Particles Physics

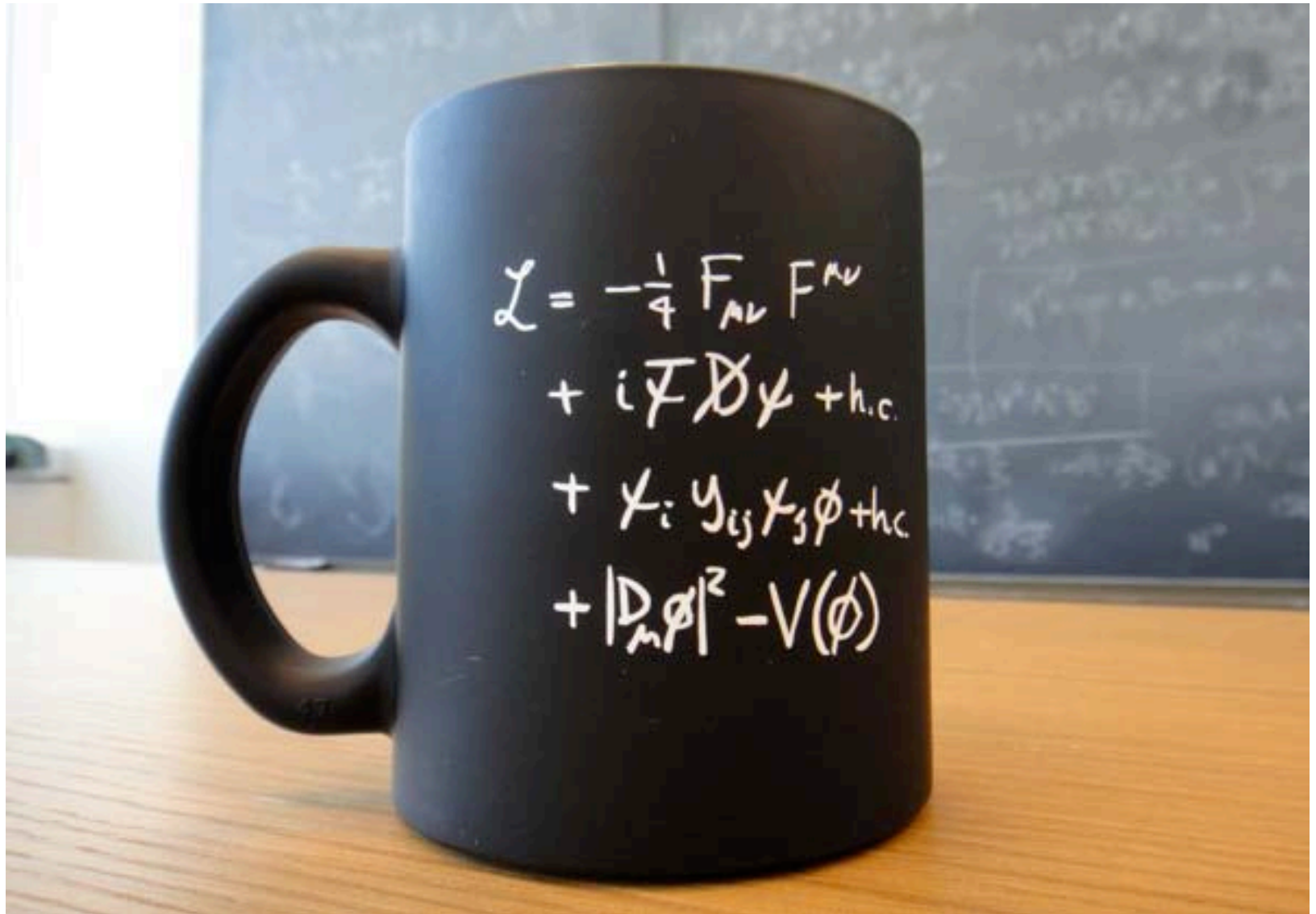
C. Amsler et al. (Particle Data Group), Physics Letters B667, 1 (2008)

<http://pdg.lbl.gov>

# Physique des particules



# Le Modèle standard



# Le Modèle standard (version longue)

$$\begin{aligned}
 \mathcal{L}_{\text{SM}} = & -\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}ig_s^2 (\bar{q}_i^\sigma \gamma^\mu q_j^\sigma) g_\mu^a + \bar{G}^a \partial^2 G^a + g_s f^{abc} \partial_\mu \bar{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} + \frac{2M}{g} H + \frac{1}{2}(H^2 + \phi^0 \phi^0 + 2\phi^+ \phi^-) \right] + \frac{2M^4}{g^2} \alpha_h \\
 & -igc_w \left[ \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^+) \right] - ig s_w \left[ \partial_\nu A_\mu (W_\mu^+ W_\nu^- - W_\nu^+ W_\mu^-) - A_\nu (W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\mu^- \partial_\nu W_\mu^+) \right. \\
 & \left. + A_\mu (W_\nu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\nu^- \partial_\nu W_\mu^+) \right] - \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 \left( Z_\mu^0 W_\mu^+ Z_\nu^0 W_\nu^- - Z_\mu^0 Z_\nu^0 W_\mu^+ W_\nu^- \right) + g^2 s_w^2 \left( A_\mu W_\mu^+ A_\nu W_\nu^- - A_\mu A_\nu W_\mu^+ W_\nu^- \right) \\
 & + g^2 s_w c_w \left[ A_\mu Z_\nu^0 (W_\mu^+ W_\nu^- - W_\nu^+ W_\mu^-) - 2A_\mu Z_\mu^0 W_\nu^+ W_\nu^- \right] - g\alpha \left[ H^3 + H\phi^0 \phi^0 + 2H\phi^+ \phi^- \right] - \frac{1}{8}g^2 \alpha_h \left[ 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 \right] \\
 & - gM W_\mu^+ W_\mu^- H - \frac{1}{2}g \frac{M}{c_w^2} Z_\mu^0 Z_\mu^0 H - \frac{1}{2}ig \left[ W_\mu^+ (\phi^0 \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^0) - W_\mu^- (\phi^0 \partial_\mu \phi^+ - \phi^+ \partial_\mu \phi^0) \right] + \frac{1}{2}g \left[ W_\mu^+ (H \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu H) - W_\mu^- (H \partial_\mu \phi^+ - \phi^+ \partial_\mu H) \right] \\
 & + \frac{1}{2}g \frac{1}{c_w} Z_\mu^0 (H \partial_\mu \phi^0 - \phi^0 \partial_\mu H) - ig \frac{s_w^2}{c_w} M Z_\mu^0 (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) + ig s_w M A_\mu (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) - ig \frac{1-2c_w^2}{2c_w} Z_\mu^0 (\phi^+ \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^+) + ig s_w A_\mu (\phi^+ \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^+) \\
 & - \frac{1}{4}g^2 W_\mu^+ W_\mu^- \left[ H^2 + (\phi^0)^2 + 2\phi^+ \phi^- \right] - \frac{1}{4}g^2 \frac{1}{c_w^2} Z_\mu^0 Z_\mu^0 \left[ H^2 + (\phi^0)^2 + 2(2s_w^2 - 1)^2 \phi^+ \phi^- \right] - \frac{1}{2}g^2 \frac{s_w^2}{c_w} Z_\mu^0 \phi^0 (W_\mu^+ \phi^- + W_\mu^- \phi^+) - \frac{1}{2}ig^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}ig^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^1 s_w^2 A_\mu A_\mu \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 + ig s_w A_\mu \left[ -(\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) \right] + \frac{ig}{4c_w} Z_\mu^0 \left[ (\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{8}{3}s_w^2 - \gamma^5) d_j^\lambda) \right] \\
 & + \frac{ig}{2\sqrt{2}} W_\mu^+ \left[ (\bar{\nu}^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) e^\lambda) + (\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) C_{\lambda\kappa} d_j^\kappa) \right] + \frac{ig}{2\sqrt{2}} W_\mu^- \left[ (\bar{e}^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) \nu^\lambda) + (\bar{d}_j^\kappa C_{\lambda\kappa}^\dagger \gamma^\mu (1 + \gamma^5) u_j^\lambda) \right] + \frac{ig}{2\sqrt{2}} \frac{m_e^\lambda}{M} \left[ -\phi^+ (\bar{\nu}^\lambda (1 - \gamma^5) e^\lambda) + \phi^- (\bar{e}^\lambda (1 + \gamma^5) \nu^\lambda) \right] \\
 & - \frac{g}{2} \frac{m_e^\lambda}{M} \left[ H (\bar{e}^\lambda e^\lambda) + i\phi^0 (\bar{e}^\lambda \gamma^5 e^\lambda) \right] + \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^+ \left[ -m_d^\kappa (\bar{u}_j^\lambda C_{\lambda\kappa} (1 - \gamma^5) d_j^\kappa) + m_u^\lambda (\bar{u}_j^\lambda C_{\lambda\kappa} (1 + \gamma^5) d_j^\kappa) \right] + \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^- \left[ m_d^\lambda (\bar{d}_j^\lambda C_{\lambda\kappa}^\dagger (1 + \gamma^5) u_j^\kappa) - m_u^\kappa (\bar{d}_j^\lambda C_{\lambda\kappa}^\dagger (1 - \gamma^5) u_j^\kappa) \right] \\
 & - \frac{g}{2} \frac{m_u^\lambda}{M} H (\bar{u}_j^\lambda u_j^\lambda) - \frac{g}{2} \frac{m_d^\lambda}{M} H (\bar{d}_j^\lambda d_j^\lambda) + \frac{ig}{2} \frac{m_u^\lambda}{M} \phi^0 (\bar{u}_j^\lambda \gamma^5 u_j^\lambda) - \frac{ig}{2} \frac{m_d^\lambda}{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 \left( \partial^2 - \frac{M^2}{c_w^2} \right) X^0 + \bar{Y} \partial^2 Y + igc_w W_\mu^+ (\partial_\mu \bar{X}^0 X^- - \partial_\mu \bar{X}^+ X^0) \\
 & + ig s_w W_\mu^+ (\partial_\mu \bar{Y} X^- - \partial_\mu \bar{X}^+ Y) + igc_w W_\mu^- (\partial_\mu \bar{X}^- X^0 - \partial_\mu \bar{X}^0 X^+) + ig s_w W_\mu^- (\partial_\mu \bar{X}^- Y - \partial_\mu \bar{Y} X^+) + igc_w Z_\mu^0 (\partial_\mu \bar{X}^+ X^+ - \partial_\mu \bar{X}^- X^-) + ig s_w A_\mu (\partial_\mu \bar{X}^+ X^+ - \partial_\mu \bar{X}^- X^-) \\
 & - \frac{1}{2}gM [\bar{X}^+ X^+ H + \bar{X}^- X^- H + \frac{1}{c_w^2} \bar{X}^0 X^0 H] + \frac{1-2c_w^2}{2c_w} igM [\bar{X}^+ X^0 \phi^+ - \bar{X}^- X^0 \phi^-] + \frac{1}{2c_w} igM [\bar{X}^0 X^- \phi^+ - \bar{X}^0 X^+ \phi^-] + igM s_w [\bar{X}^0 X^- \phi^+ - \bar{X}^0 X^+ \phi^-] + \frac{1}{2}igM [\bar{X}^+ X^+ \phi^0 - \bar{X}^- X^- \phi^0]
 \end{aligned}$$

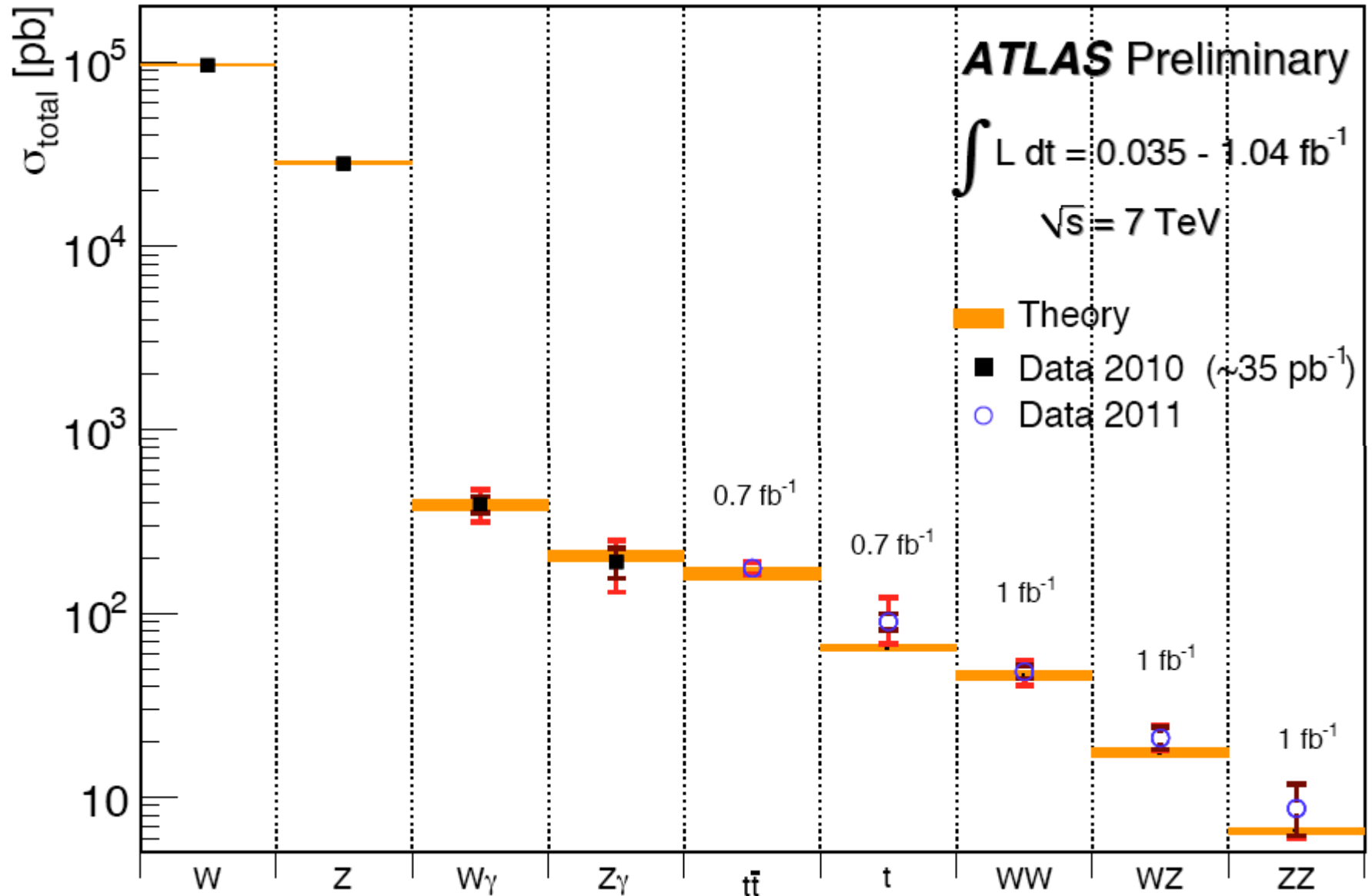
From Diagrammatica  
by M. Veltman

# Les particules de Modèle standard

		fermions (3 générations de la matière)			bosons (forces)	
		I	II	III		
masse →		2.4 MeV	1.27 GeV	171.2 GeV	0	électromagnétisme
charge →		$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0	
spin →		$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
nom →		<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top	<b>γ</b> photon	
	Quarks	4.8 MeV	104 MeV	4.2 GeV	0	interaction forte
		$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0	
		$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
		<b>d</b> down	<b>s</b> strange	<b>b</b> bottom	<b>g</b> gluon	
	Leptons	<2.2 eV	<0.17 MeV	<15.5 MeV	91.2 GeV	interaction faible
		0	0	0	0	
		$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
		<b>ν<sub>e</sub></b> neutrino électronique	<b>ν<sub>μ</sub></b> neutrino muonique	<b>ν<sub>τ</sub></b> neutrino tauique	<b>Z<sup>0</sup></b> boson Z <sup>0</sup>	
		0.511 MeV	105.7 MeV	1.777 GeV	80.4 GeV	interaction faible
		-1	-1	-1	±1	
		$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
		<b>e</b> électron	<b>μ</b> muon	<b>τ</b> tau	<b>W<sup>±</sup></b> boson W	
					~140GeV ???	
					0	Higgs
					0	



# Modèle standard : Theorie vs Expérience

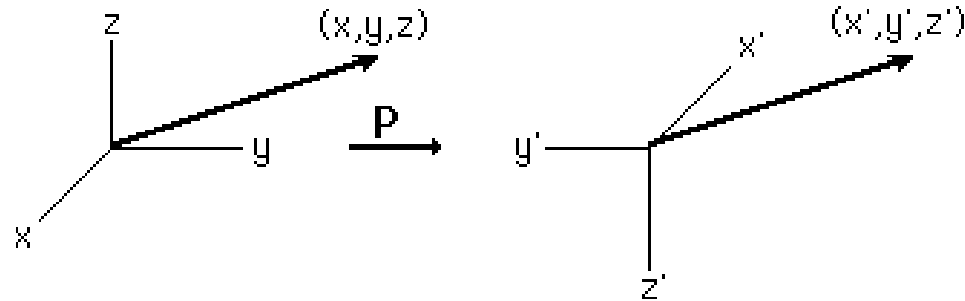


# Violation de parité

## Symétrie de parité :

inversion des coordonnées d'espace

$$\mathbf{x}' = -\mathbf{x}, \mathbf{y}' = -\mathbf{y}, \mathbf{z}' = -\mathbf{z}$$



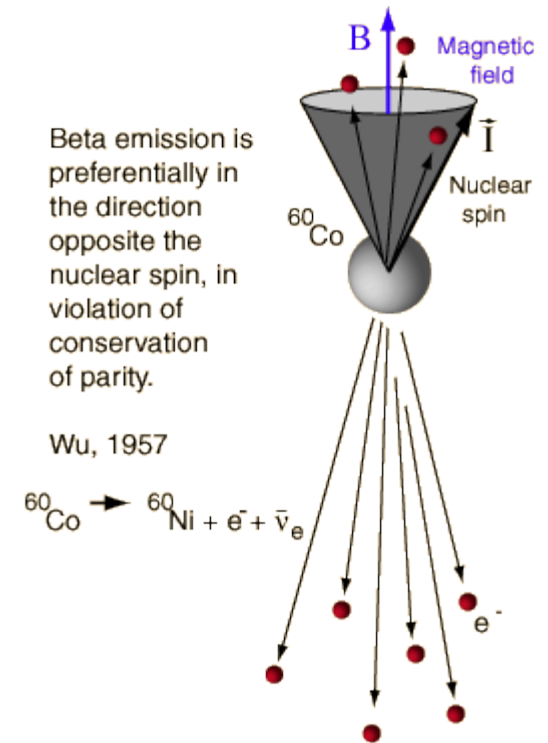
**1956 - Yang, Lee** : Hypothèse de la symétrie de parité respectée par les interaction forte et électromagnétique. Violation de parité pour l'interaction faible.

Pour une particule de masse nulle

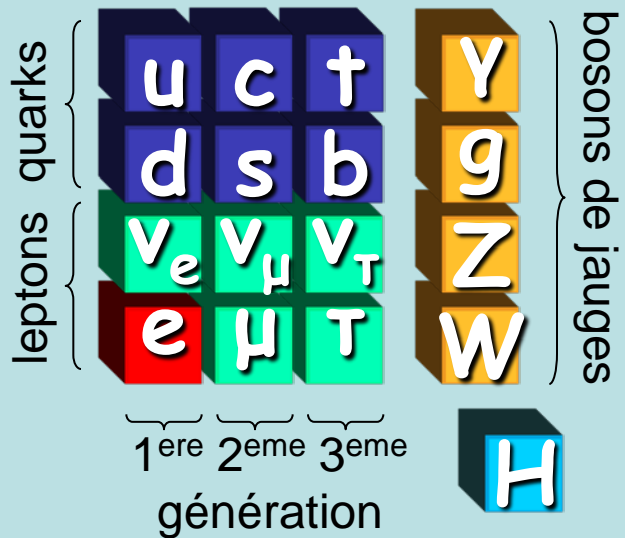
Parité = Hélicité = Projection du spin sur l'impulsion

**1957-1958 – Wu** : Vérification expérimentale de la violation de P dans la désintégration  $\beta^-$  de  $^{60}\text{Co}$

L'interaction faible chargée ne se couple qu'aux particules d'hélicité gauche (spin opposé à p)



# L'électron / positron



lepton chargé, 1<sup>ere</sup> génération

Découverte :

électron : Thomson 1897

positron : Andersden 1935  
(rayonnement cosmique)

Masse :  $m_e = 510.998918$  keV

Temps de vie : stable

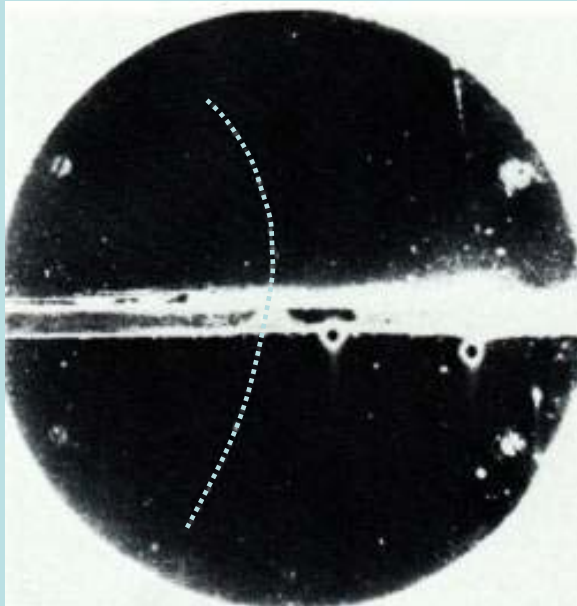
Spin :  $j = 1/2$

Charge EM :  $q_e = -1$  (+1 pour  $e^+$ )

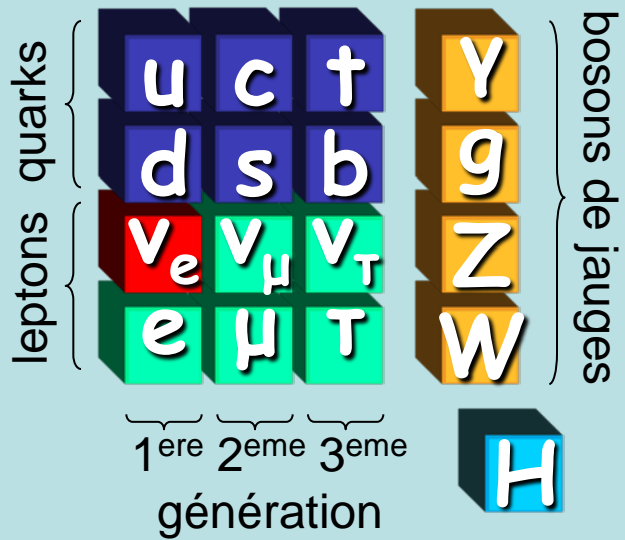
Charge de Couleur : non

Interaction faible : oui

$B=0$ ,  $L_e=1$ ,  $L_\mu=0$  et  $L_\tau=0$



# Le neutrino électronique



lepton neutre, 1<sup>ere</sup> génération

Découverte :

Postulé par Fermi en 1935

Observé par Reines et Cowan en 1954  
via  $\nu + p \rightarrow n + e^+$  (centrale nucléaire)

Masse :  $m_{\nu_e} < 2\text{eV}$

Temps de vie : stable

Spin :  $j = 1/2$

Charge EM :  $q_{\text{nu}} = 0$

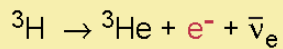
Charge de Couleur : non

Interaction faible : oui

$B=0$ ,  $L_e=1$ ,  $L_\mu=0$  et  $L_\tau=0$

Possibilité d'oscillation vers  $\nu_\mu$  et  $\nu_\tau$

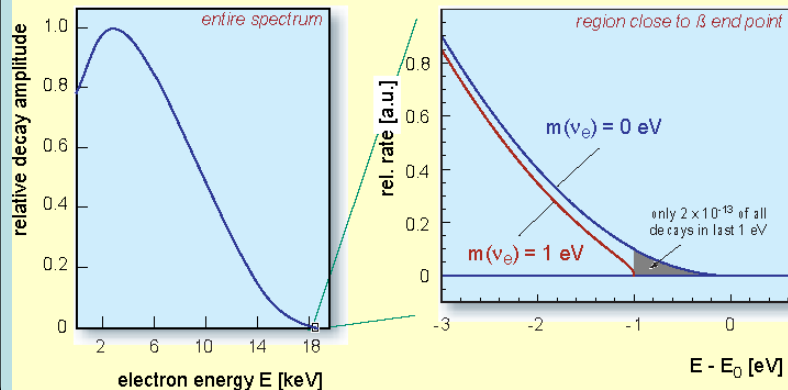
tritium  $\beta$ -decay and the neutrino rest mass



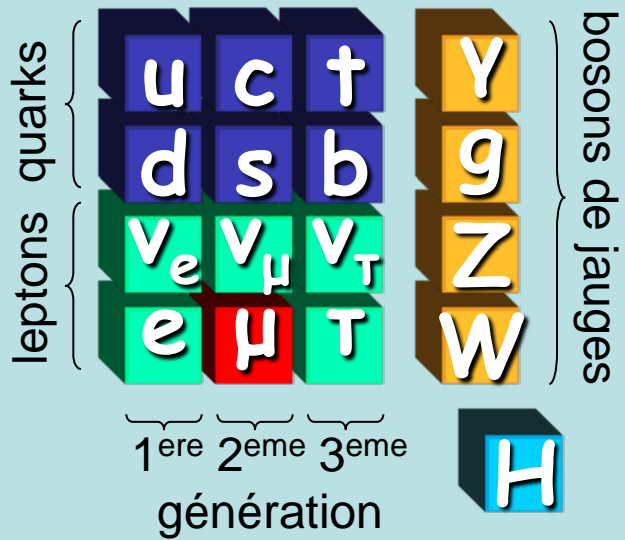
half life :  $t_{1/2} = 12.32 \text{ a}$

$\beta$  end point energy :  $E_0 = 18.57 \text{ keV}$

superallowed



# Le muon



## lepton chargé, 2<sup>eme</sup> génération

### Découverte :

Anderson and Needermyer en 37  
dans le rayonnement cosmique  
« électron lourd »

Masse :  $m_{\mu} = 105.7 \text{ MeV}$

Temps de vie : stable

Spin :  $j = 1/2$

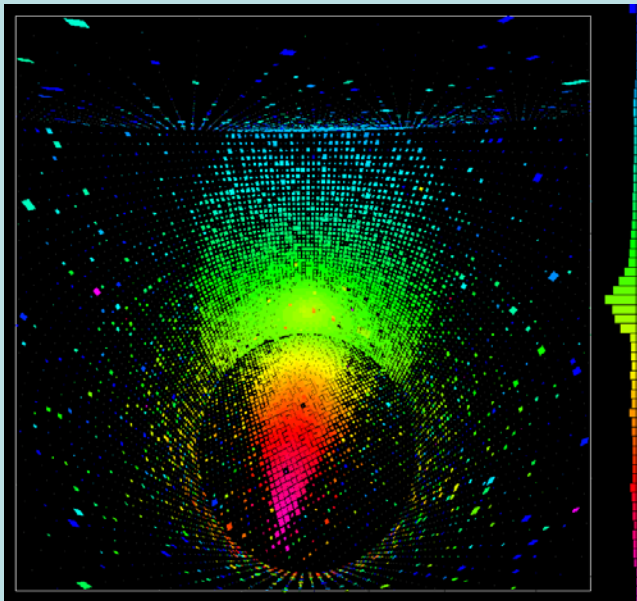
Charge EM :  $q_{\mu} = -1$

Charge de Couleur : non

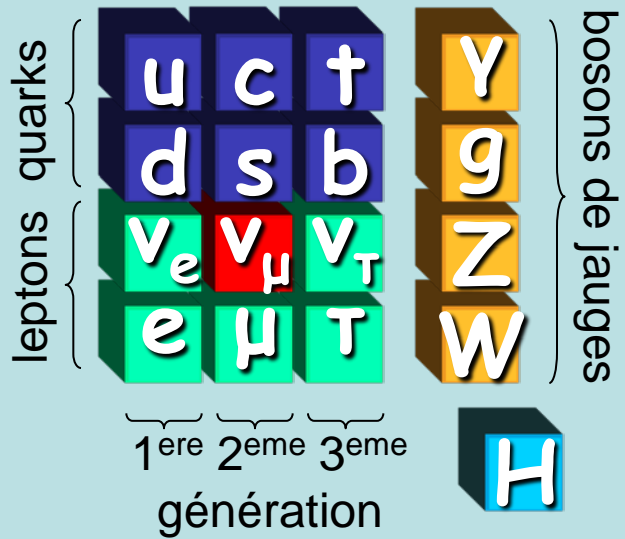
Interaction faible : oui

$B=0$ ,  $L_e=0$ ,  $L_{\mu}=1$  et  $L_{\tau}=0$

Confondu au début avec le pion



# Le neutrino muonique



## lepton neutre, 2<sup>eme</sup> génération

**Découverte** : en 1962 par Schwartz, LederMan, Steinberg et Gaillard en étudiant la désintégration du pion.

**Masse** :  $m_{\nu\mu} < 2\text{eV}$

**Temps de vie** : stable

**Spin** :  $j = 1/2$

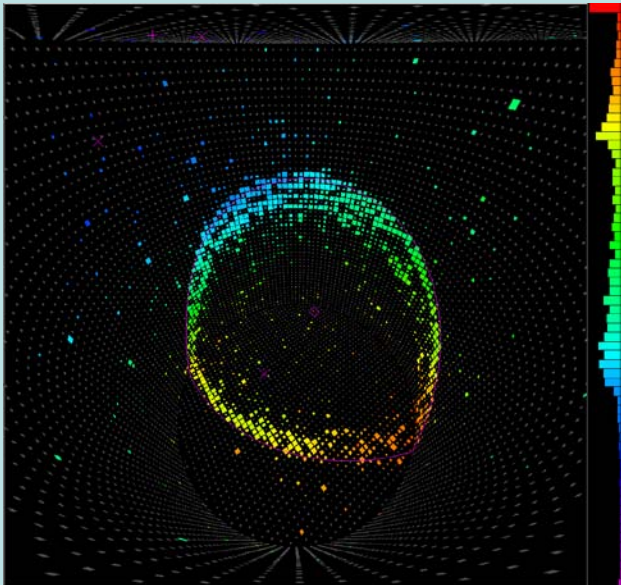
**Charge EM** :  $q_{\nu\mu} = 0$

**Charge de Couleur** : non

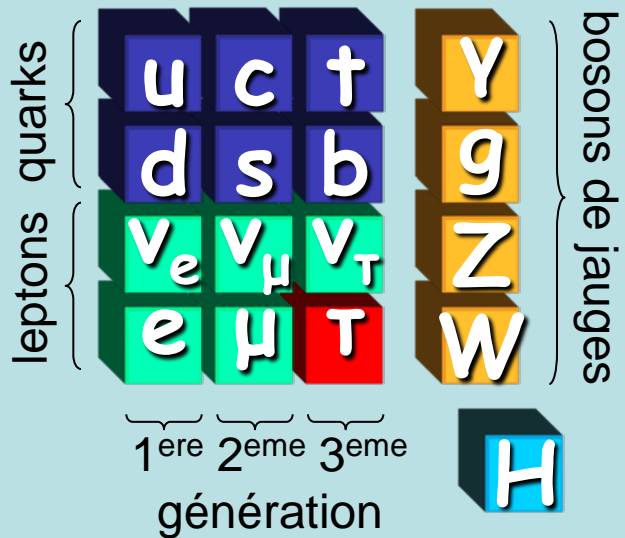
**Interaction faible** : oui

$B=0$ ,  $L_e=0$ ,  $L_\mu=1$  et  $L_\tau=0$

**Possibilité d'oscillation** vers  $\nu_e$  et  $\nu_\tau$



# Le lepton tau



lepton chargé, 3<sup>eme</sup> génération

Découverte :

Découvert par Pearl en 1974

Masse :  $m_\tau = 1.777 \text{ GeV}$

Temps de vie : stable

Spin :  $j = 1/2$

Charge EM :  $q_\tau = -1$

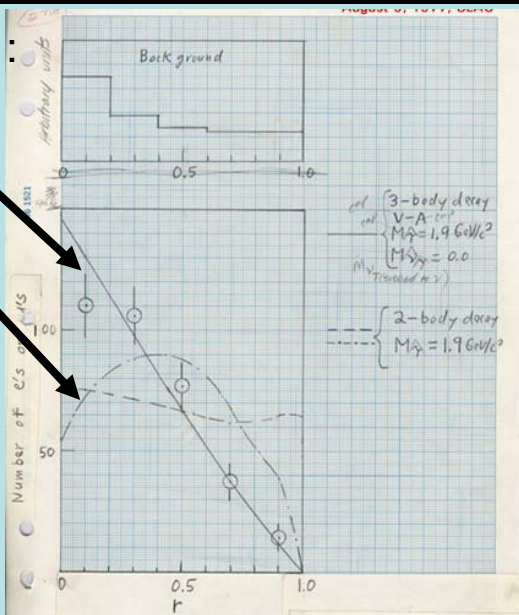
Charge de Couleur : non

Interaction faible : oui

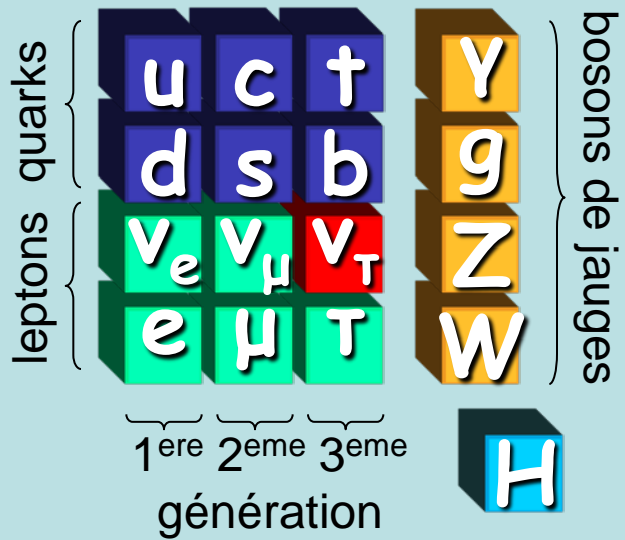
$B=0, L_e=0, L_\mu=0$  et  $L_\tau=1$

Désintégration à :

- 3 corps
- 2 corps



# Le neutrino tauique



lepton neutre, 3<sup>eme</sup> génération

Découverte :

Expérience DONUT, Fermilab en 2000

Masse :  $m_{\nu\tau} < 2\text{eV}$

Temps de vie : stable

Spin :  $j = 1/2$

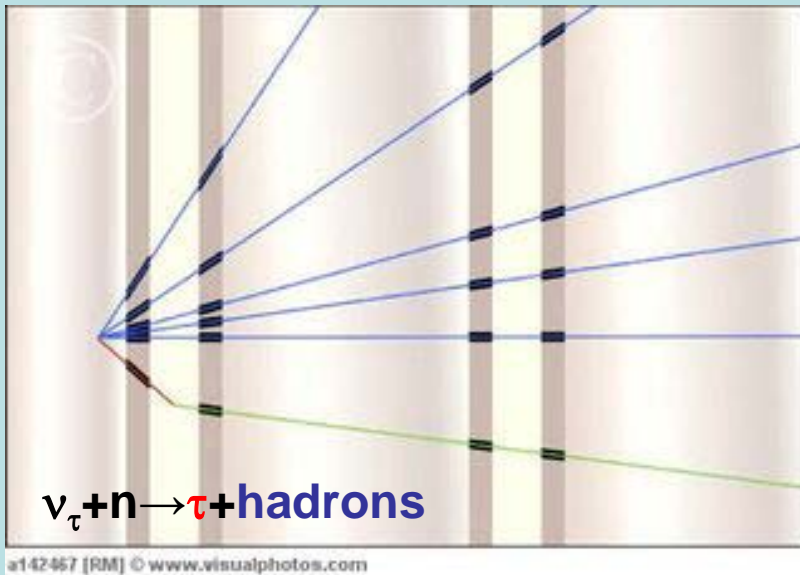
Charge EM :  $q_{\nu\tau} = 0$

Charge de Couleur : non

Interaction faible : oui

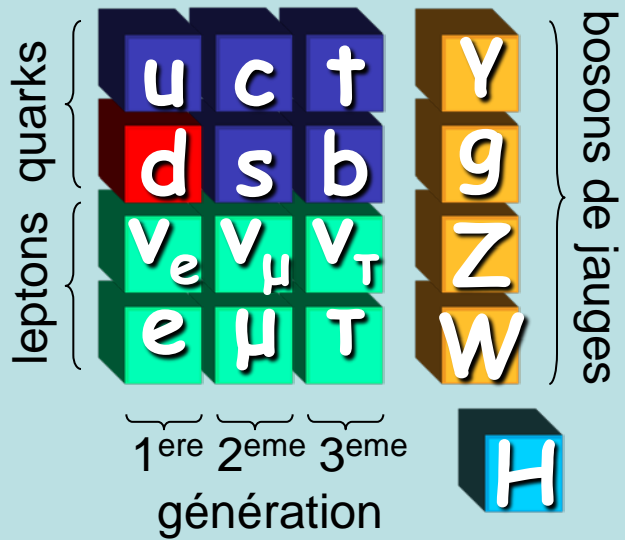
$B=0$ ,  $L_e=0$ ,  $L_\mu=0$  et  $L_\tau=1$

Possibilité d'oscillation vers  $\nu_\mu$  et  $\nu_e$





# Le quark down



## Quark down, 1<sup>ère</sup> génération

Découverte :

Introduit par Gell-Mann et Zweig en 1964 comme sous structure des hadrons

Masse :  $m_d \sim 5 \text{ MeV}$

Temps de vie : stable

Spin :  $j = 1/2$

Charge EM :  $q_{\text{top}} = -1/3$

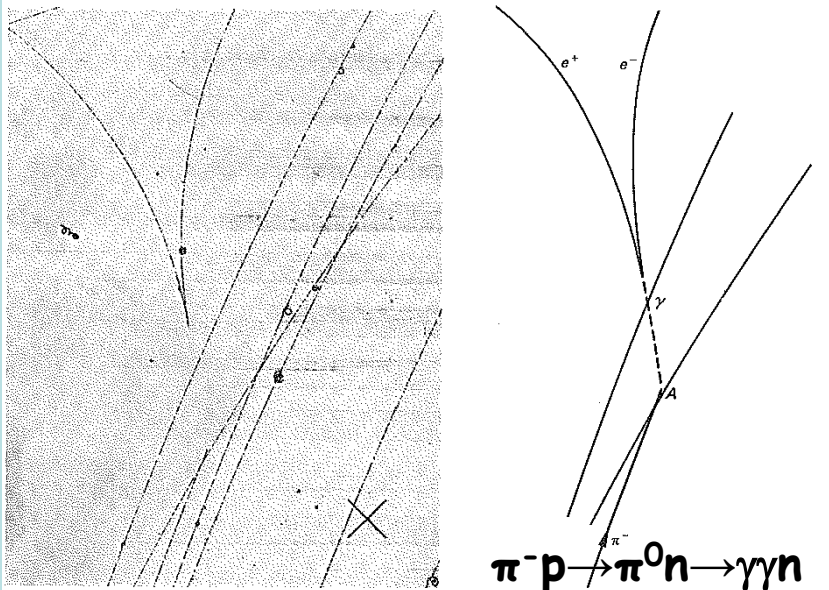
Charge de Couleur : non

Interaction faible : oui

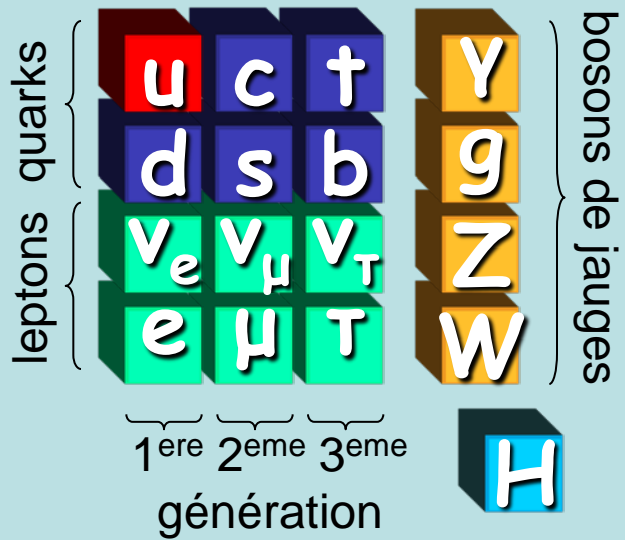
$B=1/3$ ,  $L_e=0$ ,  $L_\mu=0$  et  $L_\tau=0$

Baryons:  $n=ddu$ ,  $p=uud$

Mésons :  $\pi^+ = \bar{d}u$   $\pi^- = \bar{u}d$   $\pi^0 = u\bar{u} + d\bar{d}$



# Le quark up : u



## Quark up, 1<sup>ère</sup> génération

Découverte :

Introduit par Gell-Mann et Zweig en 1964 comme sous structure des hadrons

Masse :  $m_u \sim 2\text{MeV}$

Temps de vie : stable

Spin :  $j = 1/2$

Charge EM :  $q_u = 2/3$

Charge de Couleur : r/v/b

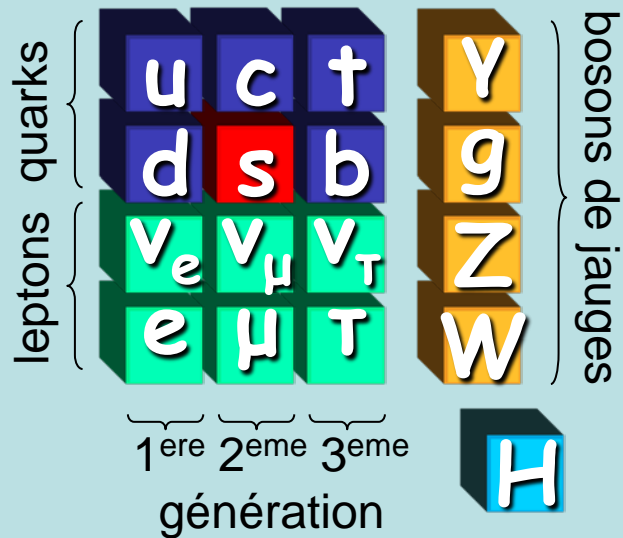
Interaction faible : oui

$B=1/3$ ,  $L_e=0$ ,  $L_\mu=0$  et  $L_\tau=0$

$\pi^\pm \rightarrow \mu \nu_\mu$   $\pi \rightarrow e \nu_e \nu_\mu$



# Le quark étrange : s



## Quark down, 2<sup>eme</sup> génération

**Découverte :** L'observation de hadrons avec des durées de vies étrangement longue nécessite d'abord un nombre quantique supplémentaire, puis un nouveau quark.

**Masse :**  $m_s \sim 100\text{MeV}$

**Temps de vie :** stable

**Spin :**  $j = 1/2$

**Charge EM :**  $q_s = -1/3$

**Charge de Couleur :** r/v/b

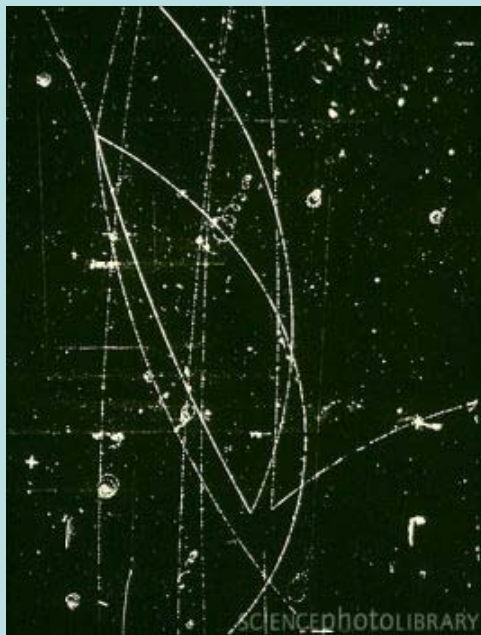
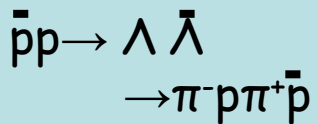
**Interaction faible :** oui

$B=1/3, L_e=0, L_\mu=0$  et  $L_\tau=0$

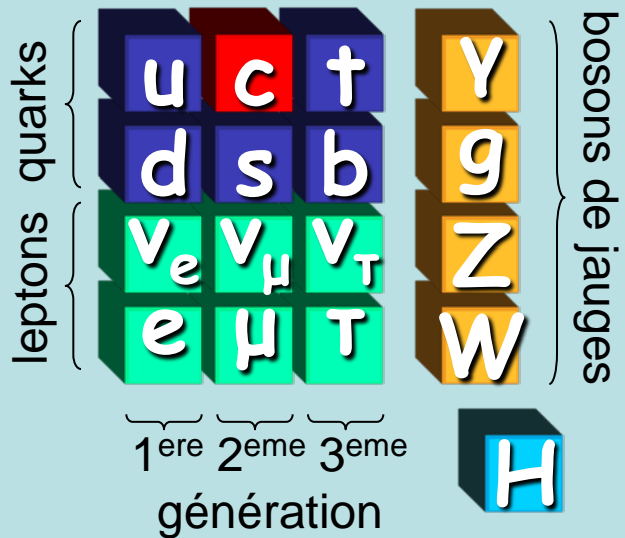
**Baryons:**  $\Lambda = sud, \Sigma^{\pm 0} = suu, sdd, sud$

$\Xi^{-0} = ssu, ssd$  et  $\Omega = sss$

**Mésons :**  $K^+ = u\bar{s}, K^- = \bar{u}s, K^0 = d\bar{s}, \bar{K}^0 = s\bar{d}$



# Le quark charmé : c



## Quark up, 2<sup>eme</sup> génération

**Découverte :** Observation d'une résonance de masse  $m=3\text{GeV}$  par Burton Richter (SLAC  $\rightarrow \Psi$ ) et Samuel Ting (BNL  $\rightarrow J$ )

Prédit précédement par Glashow, Illiopoulos et Maiani (mécanisme GIM)

**Masse :**  $m_c \sim 1.3 \text{ GeV}$

**Désintégration:**  $c \rightarrow W^*s$ ,  $c \rightarrow W^*d$

**Spin :**  $j = 1/2$

**Charge EM :**  $q_c = 2/3$

**Charge de Couleur :** r/v/b

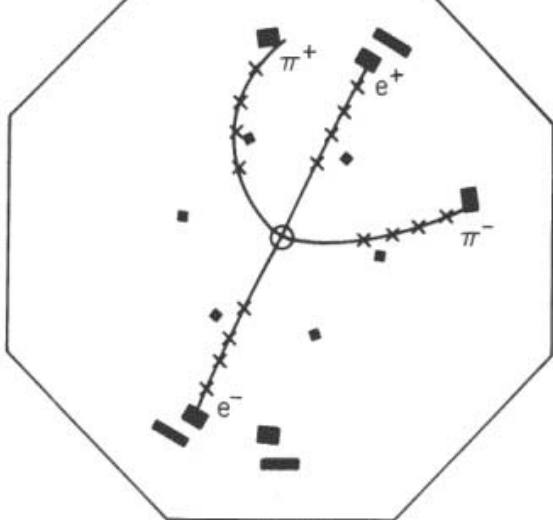
**Interaction faible :** oui

**B=1/3,  $L_e=0$ ,  $L_\mu=0$  et  $L_\tau=0$**

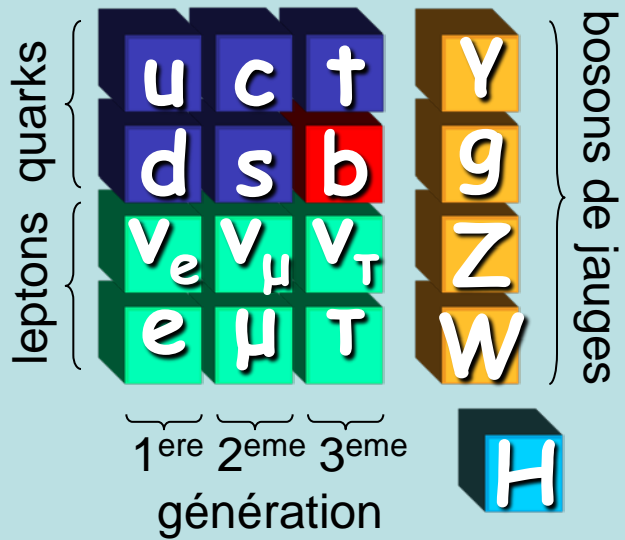
**Mésons :**  $D^{\pm 0} = uc, dc$ ,  $D_s = cs$

$J/\Psi, \Psi, \Psi' \dots = cc$

$$\Psi' \rightarrow J/\Psi \pi^+ \pi^- \rightarrow e^+ e^- \pi^+ \pi^-$$



# Le quark beau/bottom : b



## Quark down, 3<sup>eme</sup> génération

### Découverte :

Observation par Lederman d'une résonance de 9.5 GeV dans le spectre  $\mu^+\mu^-$  (Fermilab, 1978)

Masse :  $m_b \sim 4.5 \text{ GeV}$

Spin :  $j = 1/2$

Désintégration :  $b \rightarrow W^* + c/u$

Charge EM :  $q_b = -1/3$

Charge de Couleur :  $r/v/b$

Interaction faible : oui

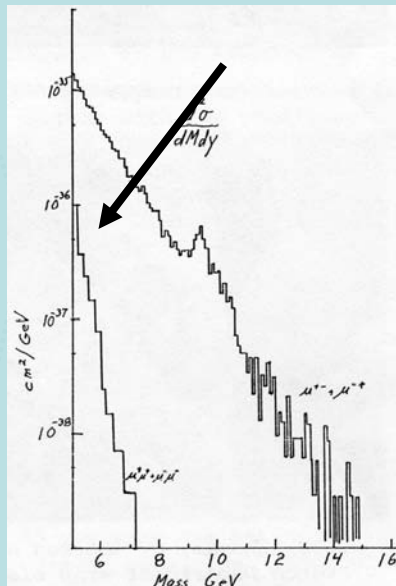
$B = 1/3$ ,  $L_e = 1$ ,  $L_\mu = 0$  et  $L_\tau = 0$

Mésons :  $B^{\pm 0} = ub, db$ ,  $B_s = cb$ , ...

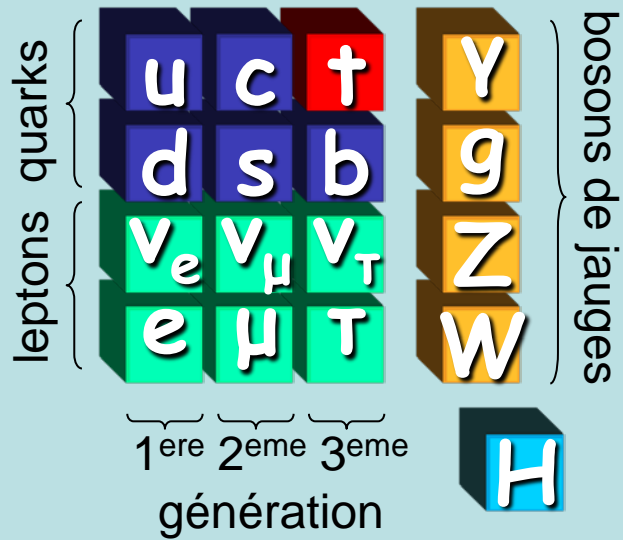
$\Upsilon, \Upsilon' \dots = bb$

Résonance  $\Upsilon$   
dans le spectre

$pp \rightarrow \mu^+\mu^-$



# Le quark top : t



## Quark up, 3<sup>eme</sup> génération

Découverte :

Postulé dès les années 1980

Découvert en 94 au Tevatron (D0/CDF)

Masse :  $m_{\text{top}} = 172.0 \pm 1.5 \text{ GeV}$

Temps de vie :  $10^{-25} \text{ s}$

Désintégration :  $t \rightarrow Wb$

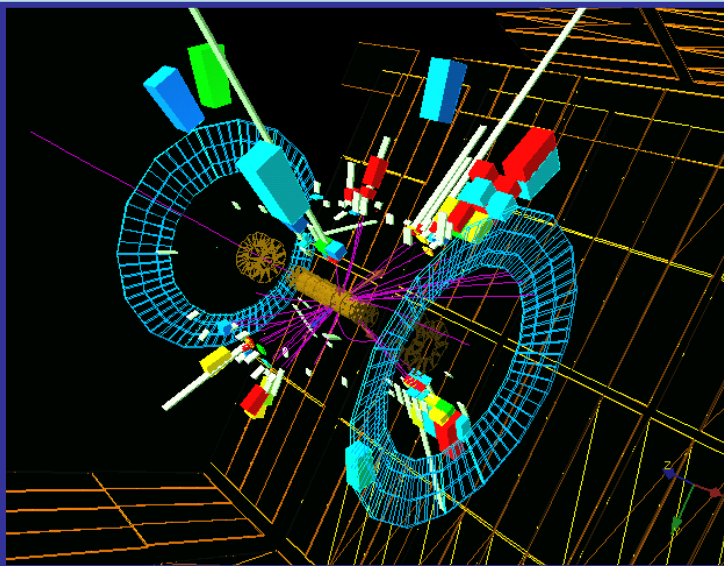
Spin :  $j = 1/2$

Charge EM :  $q_t = 2/3$

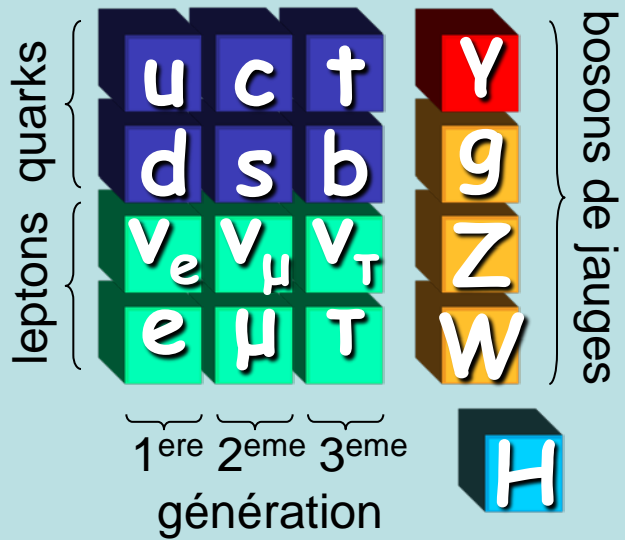
Charge de Couleur : r/v/b

Interaction faible : oui

$B = 1/3$ ,  $L_e = 0$ ,  $L_\mu = 0$  et  $L_\tau = 0$



# Le photon : $\gamma$



## Boson de jauge, interaction EM

### Découverte :

Observé il y longtemps

En tant que particule : proposé par Einstein pour expliquer l'effet photoélectrique (1905)

Masse :  $m_\gamma = 0$

Temps de vie : stable

Spin :  $j = 1$

Charge EM :  $q_\gamma = 0$

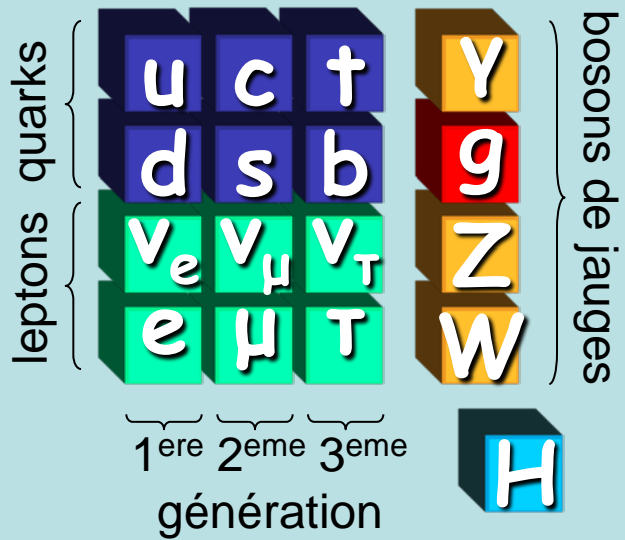
Charge de Couleur : non

Interaction faible : non

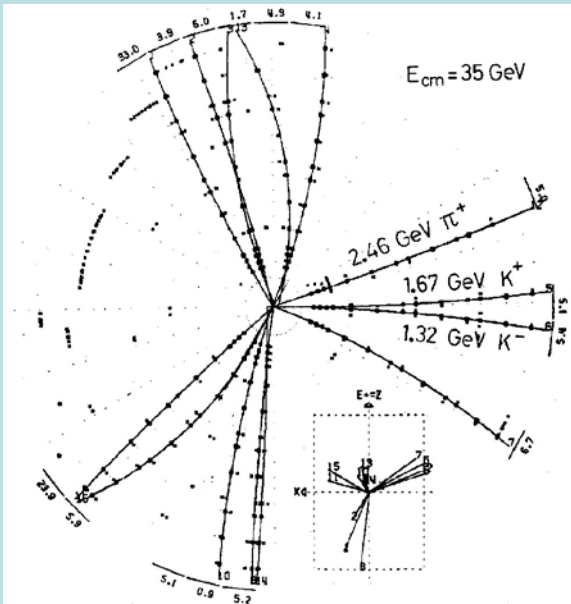
Décrit aujourd'hui dans le cadre de la théorie électrofaible avec W et Z.



# Le gluon



PETRA  
(DESY)  
 $e^+e^- \rightarrow q\bar{q}g$



Boson de jauge de l'interaction forte

Découverte :

Postulé en QCD (Politzer, Wilcek, Gross)

Observé en 1979 a PERTA (DESY)

Masse :  $m_g = 0$

Temps de vie : stable

Spin :  $j = 1$

Charge EM :  $q_{\text{gluon}} = 0$

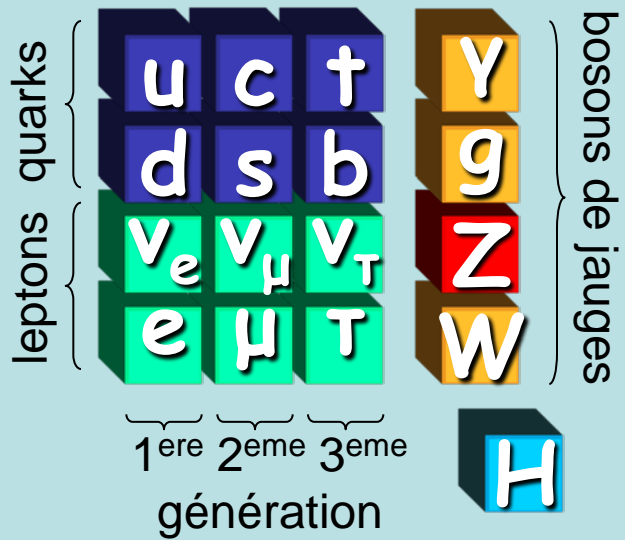
Charge de Couleur : oui (couleur + anticouleur, soit 8 gluons différents)

Interaction faible : non

$B=0$ ,  $L_e=0$ ,  $L_\mu=0$  et  $L_\tau=0$



# Le boson Z



Boson de jauge, interaction faible (courants neutres)

Découverte :

Prédit par la théorie de Glashow-Salam-Weinberg,

Observation des courants neutres au CERN (Garamelle) en 1973. puis observation directe à UA(1) et UA(2) (Cern) en 1984.

Masse :  $m_Z = 91.1878 \pm 0.0021 \text{ GeV}$

Désintégration :  $Z \rightarrow \nu\bar{\nu}$ ,  $Z \rightarrow q\bar{q}$ ,  $Z \rightarrow l^+l^-$

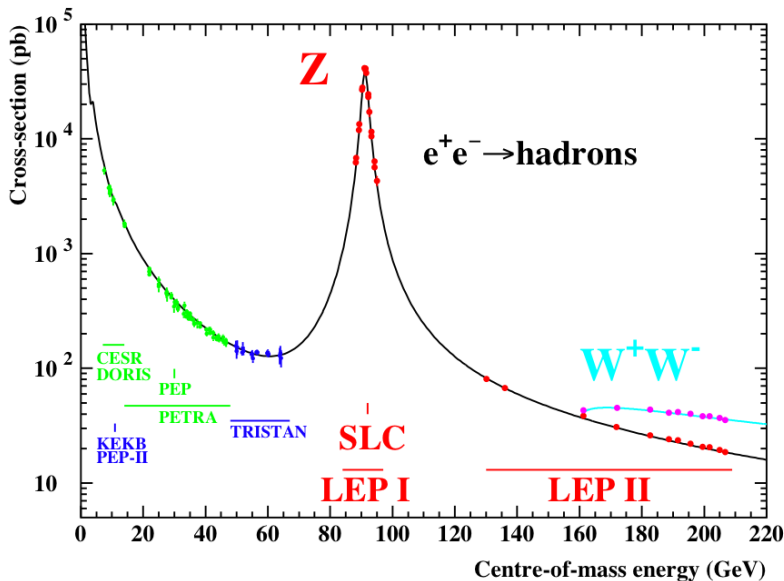
Spin :  $j = 1$

Charge EM :  $q_{\text{top}} = 0$

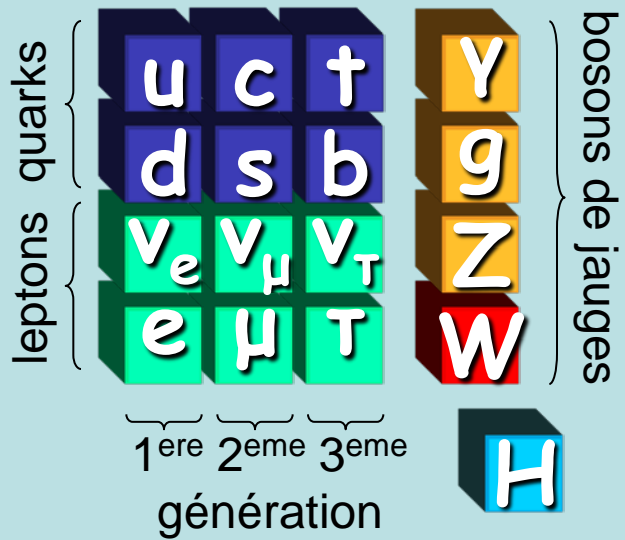
Charge de Couleur : non

Interaction faible : oui

Ne se couple qu'avec des particules de même saveur.



# Le boson W



Boson de jauge, interaction faible  
(courants chargés)

Découverte :

Prédit par la théorie de Glashow-Salam-Weinberg,

Observé indirectement dans les désintégration beta. Découvert à UA(1) et UA(2) (Cern) en 1984

Masse :  $m_W = 80.399 \pm 0.023 \text{ GeV}$

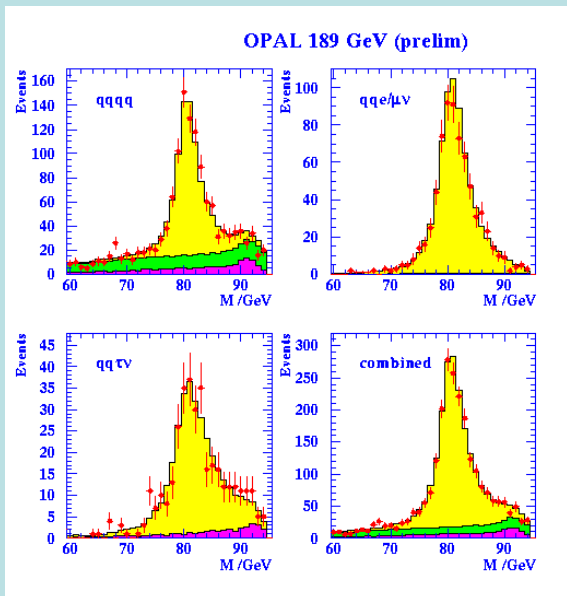
Spin :  $j = 1$

Charge EM :  $q_W = \pm 1$

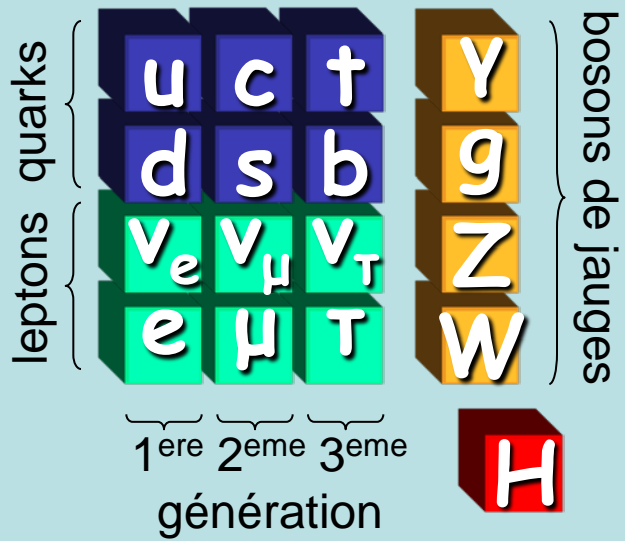
Charge de Couleur : non

Interaction faible : oui

Désintégration :  $W^- \rightarrow q_d \bar{q}_u, l^- \bar{\nu}$



# Le boson de Higgs



## Brisure de la symétries électrofaible

**Découverte** : en 2012 au LHC, peut-être

**Masse** :  $m_H$  inconnue !

probablement  $114 < m_H < 145 \text{ GeV}$

**Désintégration** :  $H \rightarrow bb$ ,  $H \rightarrow \gamma\gamma$ ,  $H \rightarrow WW$ ,  $ZZ$  (si la cinématique l'autorise)...

**Spin** :  $j = 0$  (seul scalaire du MS)

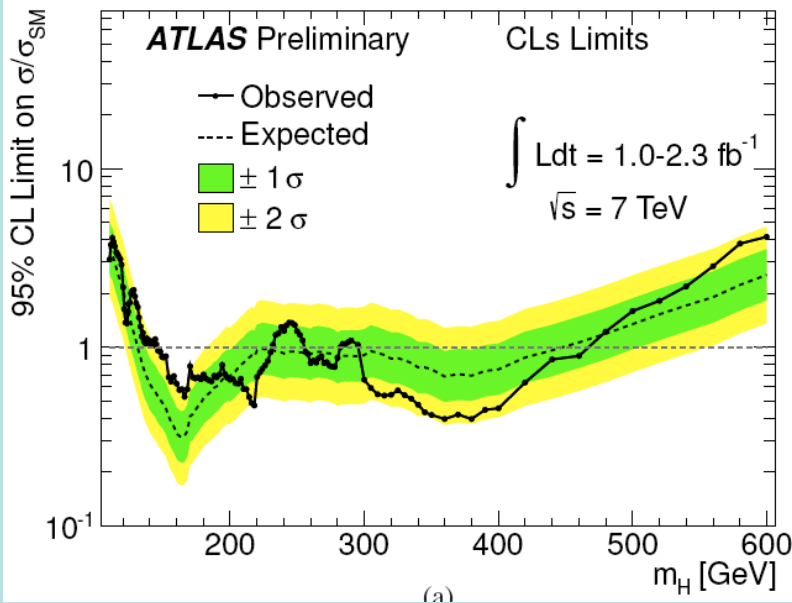
**Charge EM** :  $q_h = 0$

**Charge de Couleur** : non

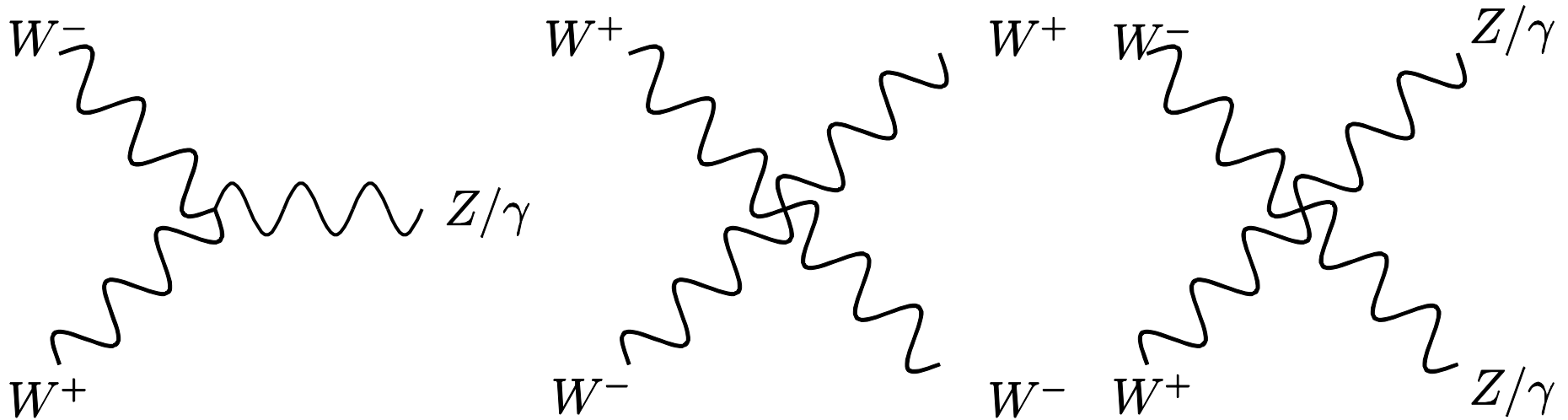
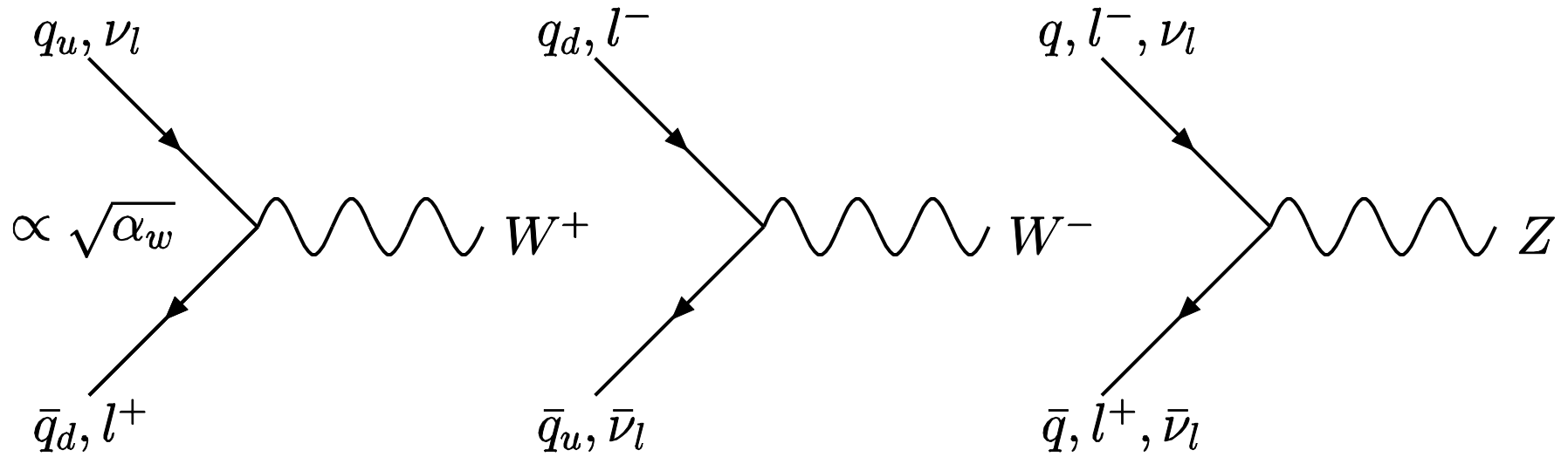
**Interaction faible** : oui

**Seule particule manquante de MS**

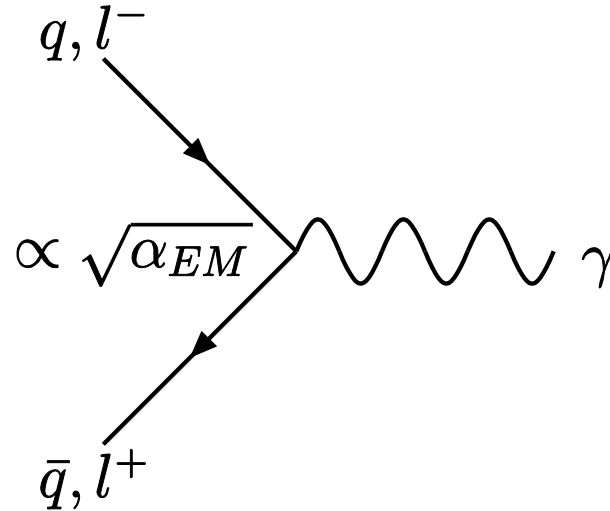
**Particule liée à la brisure de la symétrie électrofaible et à la masse des particules**



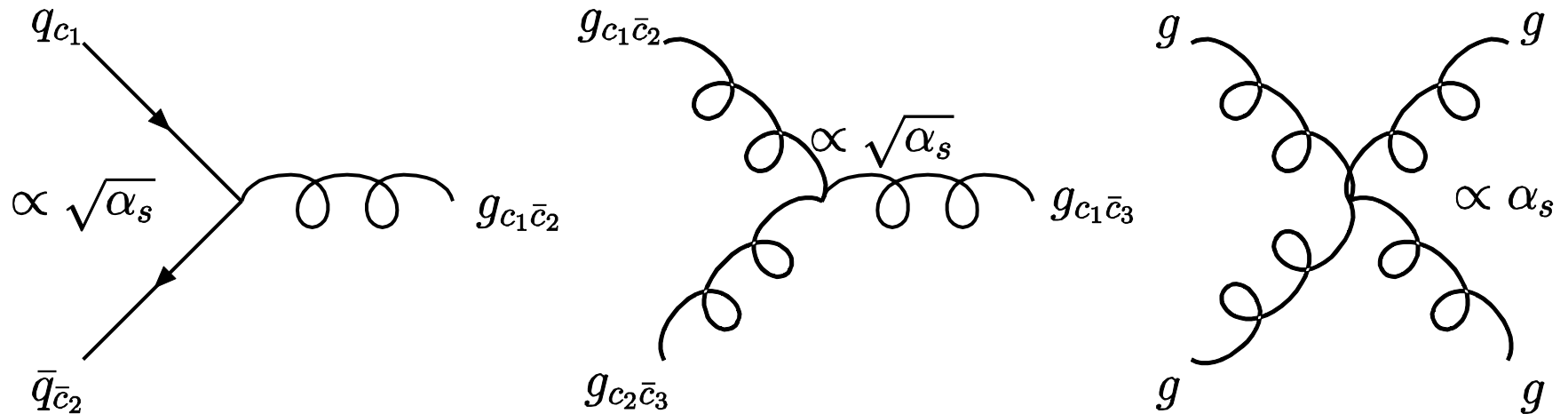
# Vertex : interaction (électro)faible



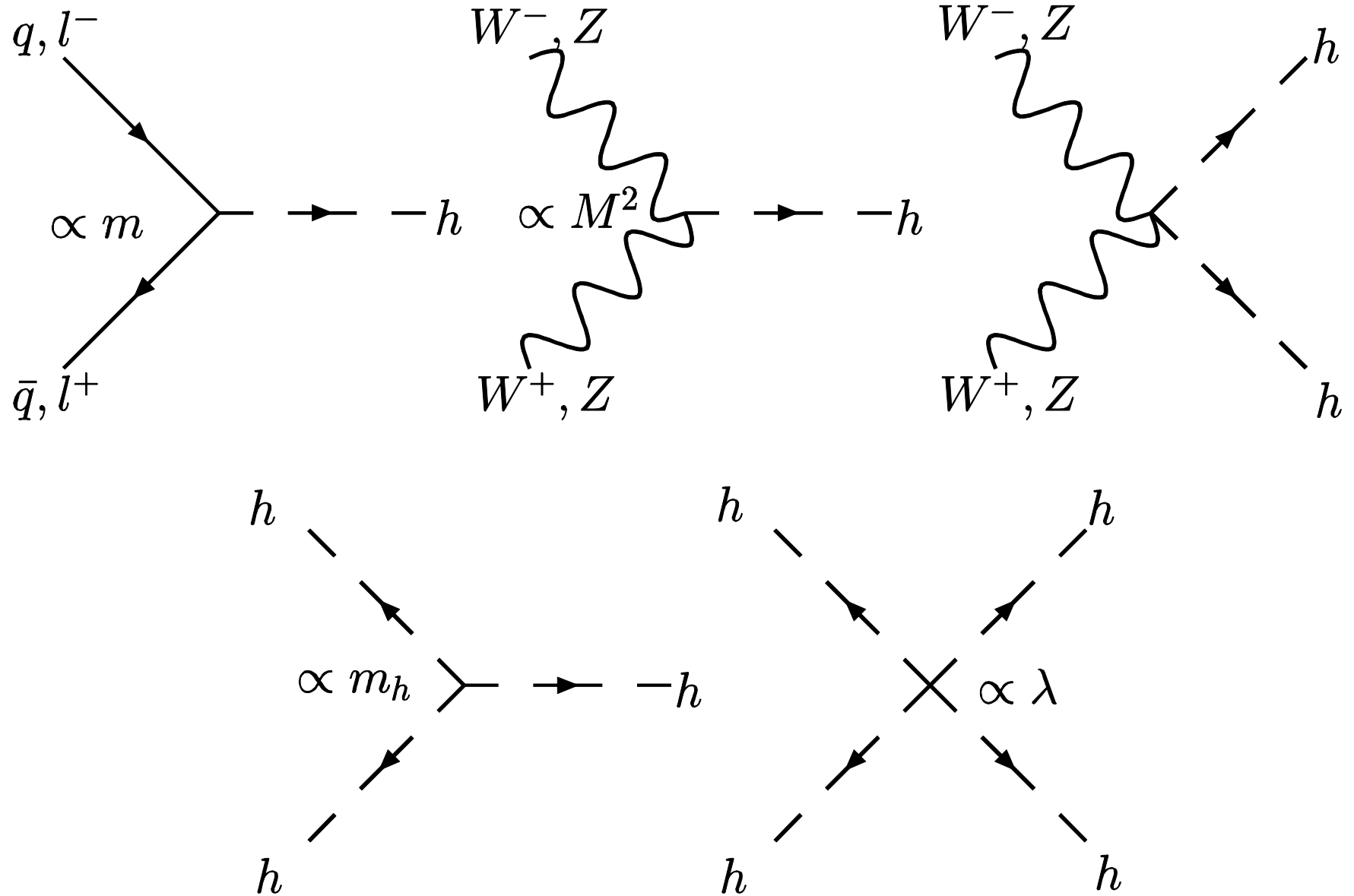
# Vertex : interaction électromagnétique



# Vertex : interaction forte



# Vertex : boson de Higgs



# Evolutions des constantes de couplages

$$\alpha(\mu) = F(\alpha(\mu_0), \mu, \mu_0)$$

