

Physique des particules

MASTER 1 PFN

Université Joseph Fourier – Grenoble I

<http://lpsc.in2p3.fr/atlas/bclement/M1Particules/>



"Particles, particles, particles."

Plan du cours

27h de cours = 18 x 1.5h

Cours d'introduction (~1 séances)

Approche théorique (~9 séances)

Seconde quantification, opérateurs de champs

Rappels : Relativité restreinte, Mécanique lagrangienne, Diffusion

Introduction à la théorie quantique des champs

Invariance de jauge et mécanisme de Higgs en QED

Diagrammes de Feynmann

Phénoménologie de l'interaction forte : états liés hadroniques

Approche expérimentale (~6 séances)

Production de particules, accélérateurs et collisionneurs

Technique de détection

Identification et reconstruction,

Analyse de données

Physique au delà du Modèle Standard (~2 séances)

Neutrinos et oscillations

Extensions du Modèle Standard

TD : 1 ou 2 exercice par semaine, corrigés en début de cours

Bibliographie

La Matière-Espace-Temps

Gilles Cohen-Tannoudji et Michel Spiro, Fayard

Les particules et leur symétries

Guy Chanfray et Gerard Smadja, Masson

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

Introduction à la physique des particules

Roger Nataf, Masson

Mécanique quantique relativiste

Michael Klasen, Dunod

Physique des particules

B.C., Dunod

Review of Particles Physics

J.Beringer et al. (Particle Data Group), Phys. Rev. D86 (2012)

<http://pdg.lbl.gov>

Bibliographie (avancée)

Théorie quantique des champs

Jean-Pierre Derendinger, Presses polytechniques et universitaires romandes

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

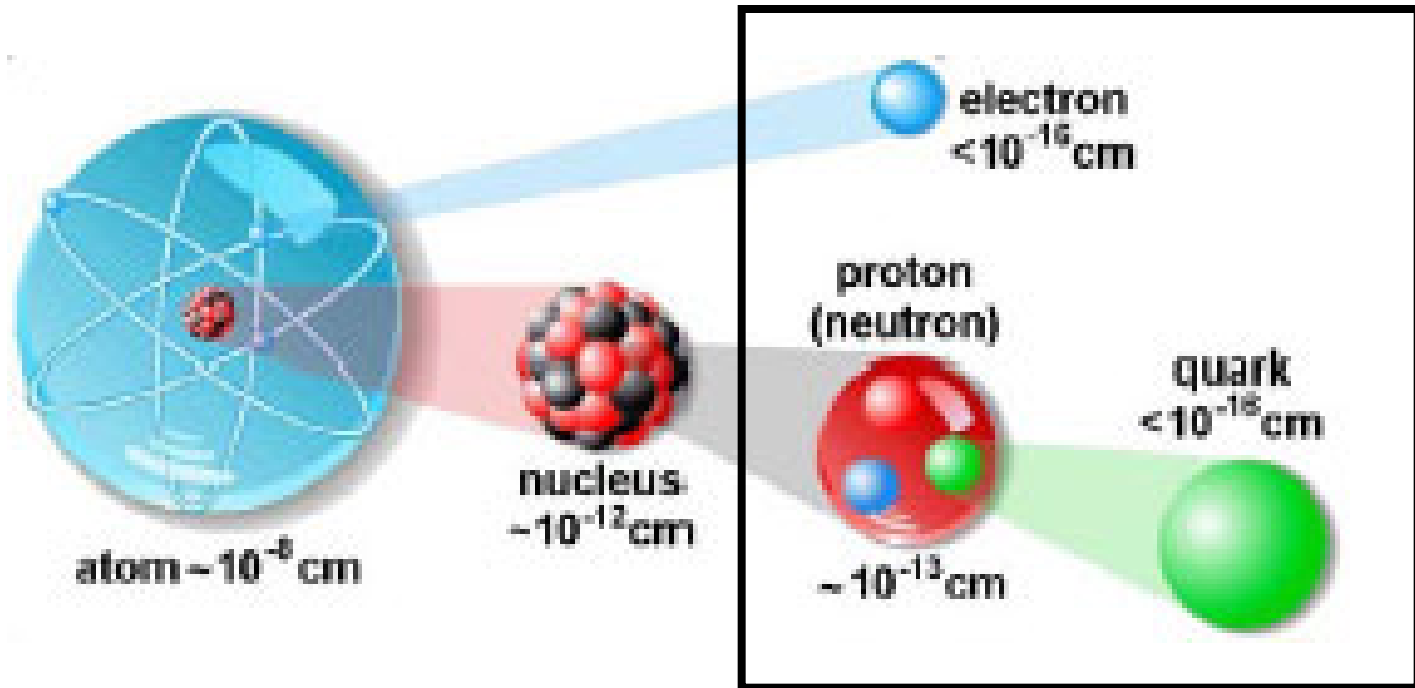
W. Greiner et J. Reinhardt, Field Quantization

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

Les particules



Physique atomique : atome $\sim 10^{-10}$ m

Physique nucléaire : noyau $\sim 10^{-14}$ m

Physique des particules: tout ce qui est plus petit

Longueur, énergie...

$$\begin{array}{ccc} \text{Energy, } E & \begin{array}{c} \xleftrightarrow{\hbar} \\ E = \hbar\omega \end{array} & \text{Pulsation, } \omega \sim \frac{1}{T} \\ c \updownarrow E = pc & & c \updownarrow \lambda = \frac{c}{\omega} \\ \text{Momentum, } p & \begin{array}{c} \xleftrightarrow{\hbar} \\ p = \frac{\hbar}{\lambda} \end{array} & \text{Wave length, } \lambda \end{array}$$

Mécanique quantique : **Energie** et **1/Temps** sont équivalents

Relativité restreinte : **Temps** et **Espace** sont équivalents

c et **ħ** ne sont que des facteurs de conversion dépendant de notre définition des unités dans le système international (Joule, metre, seconde,...)

... et élémentarité

Longueur d'onde Compton : $E = \frac{hc}{\lambda}$

Echelle de longueur \leftrightarrow Echelle d'énergie

Pour sonder un système de taille **L**,

si $\lambda \gg L$: système semble ponctuel = **élémentaire**

si $\lambda \ll L$: on peut être sensible à une sous-structure

Petites longueurs \leftrightarrow Grandes énergies

Rayon du proton : $\lambda \sim \text{fm} (10^{-15}\text{m}) \rightarrow E \sim 100 \text{ MeV}$ (QCD scale)

Tevatron/LHC : $E \sim 1-10 \text{ TeV} \rightarrow \lambda \sim 10^{-18} - 10^{-19} \text{ m}$

Unités naturelles

On utilise généralement un système d'unités particulier, tel que

$$\hbar = c = 1 \quad \text{sans dimension}$$

Dans ce système d'unités toutes les grandeurs ont comme dimension une puissance de l'énergie.

Exemple :

$$[\text{longueur}] = [\text{temps}] = [\text{énergie}]^{-1}$$

$$[\text{masse}] = [\text{impulsion}] = [\text{énergie}]$$

$$[\text{action}] = [\text{vitesse}] = 1$$

Unité d'énergie : électron-volt $1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$

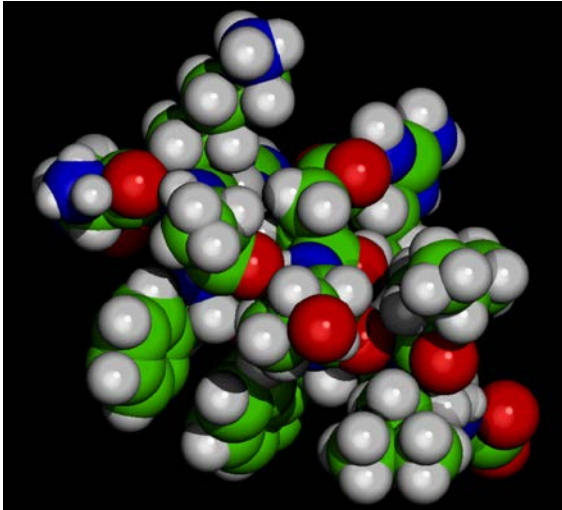
Quelques valeurs numériques :

En SI $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$ $\hbar = 1.054 \cdot 10^{-34} \text{ J.s} = 6.58 \cdot 10^{-22} \text{ MeV.s}$

$\hbar c = 197 \text{ MeV.fm}$ (utile pour les conversions SI \leftrightarrow Unités naturelles)

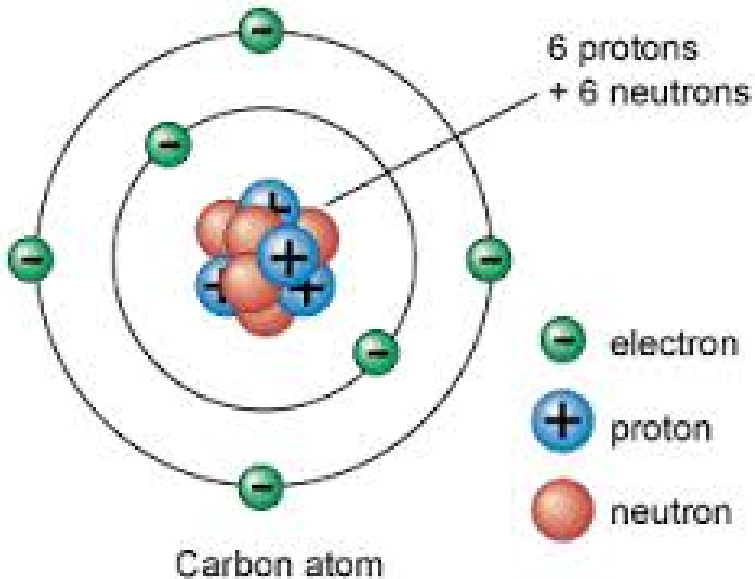
$m_e = 511 \text{ keV}$ ou keV/c^2 $m_{\text{nucléon}} = 940 \text{ MeV}$

Matière ordinaires



Electrons
Noyaux

Electromagnetisme : photons



**Physique de la matière
condensée, thermodynamique
macro- et microscopique,
chimie, ...**

+gravitation

Forces nucléaires

Un noyau est composé de :

protons (charge EM = +1)

neutrons (neutres)

Electrostatiquement instable (repulsion coulombienne)

Il faut une **autre interaction pour “coller” les nucléons ensemble**

Interaction forte

Les nucléons peuvent se **changer l'un en l'autre** :

désintégration beta $n \rightarrow p e^- \bar{\nu}_e$ et $p \rightarrow n e^+ \nu_e$

Ce qui nécessite par ailleurs un nouveau fermion : le neutrino

Interaction faible

PAS D'EFFET A GRANDE ECHELLE : INTERACTION DE COURTE PORTEE

Outils théoriques

- Objets de petite taille, plus petit que le noyau

→ **Mécanique quantique**

- Désintégration du neutron :



Bilan de la réaction : $\Delta m = 1,3 \text{ MeV}$

énergie cinétique de l'électron \sim énergie de masse
neutrino sans masse : ultrarelativiste

→ **Relativité restreinte**

- Théorie incluant l'électromagnétisme :

→ **Relativité restreinte**

- Système où le nombre et la nature des particules varie:
désintégration du neutron, création de paire : $\gamma \rightarrow e^+ + e^-$

→ **Seconde quantification**

Formalisme qui regroupe tout cela : **Théorie Quantique des Champs**

QFT in a nutshell

Classical mechanics

Euler-Lagrange equations

Time evolution of discrete coordinate $\mathbf{x}(t)$

Poisson brackets $\{x_i, x_j\} = \{p_i, p_j\} = 0, \quad \{x_i, p_j\} = \delta_{ij}$

Quantum physics

Special relativity+Field theory (Maxwell EM)

Schrödinger equation

Time evolution of wavefunction $\psi(\mathbf{x}, t)$

$|\psi(\mathbf{x})|^2$: presence probability

Observables become operators

Canonical commutation relations

$$[\hat{x}_i, \hat{x}_j] = [\hat{p}_i, \hat{p}_j] = 0, \quad [\hat{x}_i, \hat{p}_j] = i\hbar\delta_{ij}$$

Space-time evolution of a field
(continuous coordinates) $\varphi(\mathbf{x}, t)$

$$\{\varphi(x, t), \varphi(x', t)\} = \{\pi(x, t), \pi(x', t)\} = 0$$

$$\{\varphi(x, t), \pi(x', t)\} = \delta(x - x')$$

Quantum field theory

Field become operators $\hat{\phi}(\mathbf{x}, t)$, $\hat{\phi}^+\hat{\phi}$: particle density operator

Observables becomes functionals

Canonical commutation $[\hat{\phi}(x, t), \hat{\phi}(x', t)] = [\hat{\pi}(x, t), \hat{\pi}(x', t)] = 0$

$$[\hat{\phi}(x, t), \hat{\pi}(x', t)] = i\delta(x - x')$$

Le modèle standard

Description des interactions entre les particules de matière au moyen de la théorie quantique des champs

Particules de matière :

nucléon, quarks, électron, neutrino → **fermion, spin 1/2**

Interactions :

Echange d'une particule associée au champ → **boson, spin entier**
(généralement 1 : boson vecteur)

électromagnétisme : photon

interaction faible : bosons W et Z

interaction forte : gluons

gravitation : négligeable ($\lambda_{\text{planck}} = \sqrt{hc/c^3} = 1.6 \times 10^{-35} \text{m}$)

Objectif : **décrire quantitativement**

les désintégration : $A \rightarrow X$

les interaction de 2 particules : $A + B \rightarrow X$

- Possibilité de l'interaction : couplage, cinématique
- Probabilité de l'interaction → sections efficaces

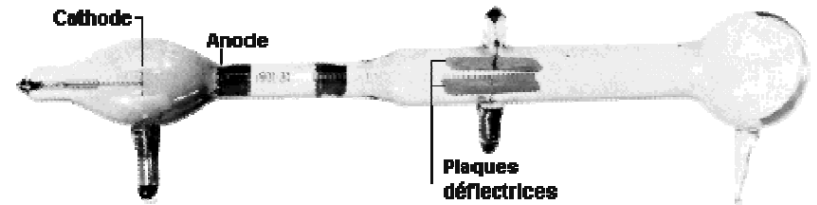
Les premières particules

Théorique

Expérimental

1897 – Thompson : Découverte de l'électron (particule de charge électrique négative)

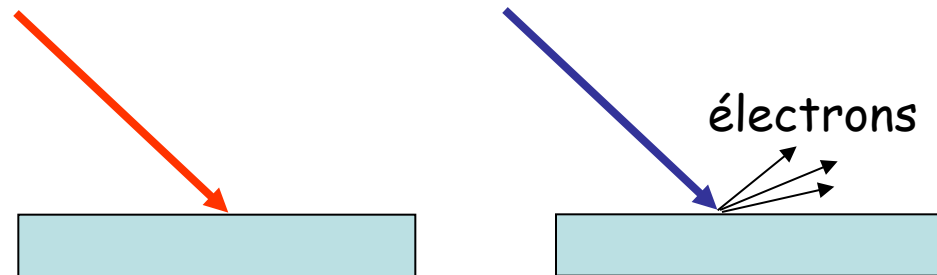
- mesure du rapport q/m
- 1^{er} accélérateur de particules



1901 – Planck : Quantum d'action

1905 – Einstein : Hypothèse du photon pour expliquer l'effet photoélectrique + Relativité restreinte

Faisceau rouge intense Faisceau UV peu intense



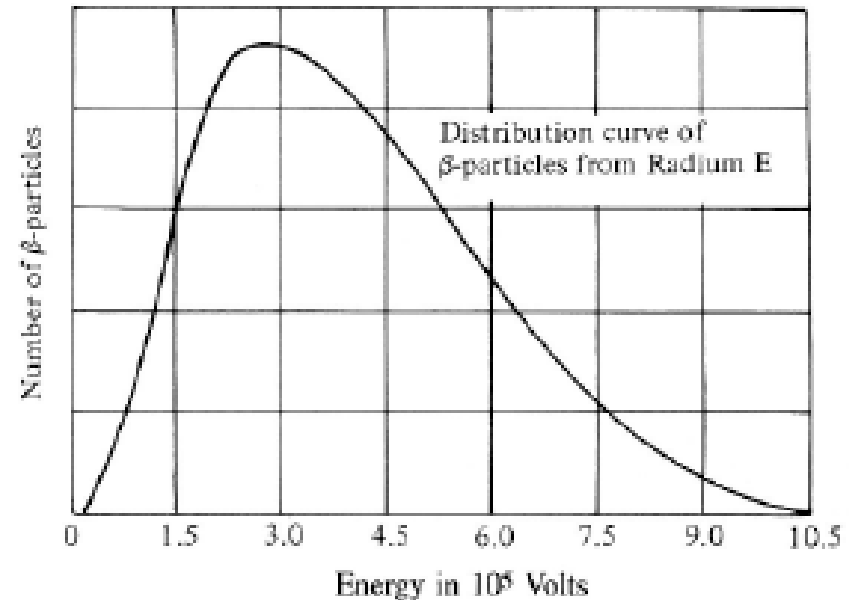
métal

Premiers résultats expérimentaux

1912 – Hess : Découverte d'un rayonnement ionisant de source extraterrestre : rayons cosmiques.

1919 – Rutherford : Découverte du proton

1914 – Chadwick : Spectre continu des électrons β



1923 – Compton : Mise en évidence de la diffusion photon-électron, confirmation expérimentale de la nature corpusculaire du photon



Antiparticules

1928 – Dirac : équation relativiste pour l'électron (équivalent de l'équation de Schrödinger) $(\hat{p} - m)\Psi = 0$

Cette équation admet des solutions d'énergie négative qui n'ont pas d'interprétation physique

1932 – Dirac interprète ces solutions comme :

- un électron d'énergie positive remontant le temps
- une particule identique à l'électron, de charge opposée avançant dans le temps

-> ANTIPARTICULE

1932 – Anderson : Observation avec une chambre à brouillard de rayons cosmiques identiques à l'électron (masse, spin) mais de charge positive : positron

Neutrino et interaction faible

1930 – Pauli introduit une nouvelle particule pour expliquer le spectre continu des électrons β (conservation énergie/qté de mvt).

Cette particule n'étant pas détectée elle doit :

- être électriquement neutre.
- interagir très faiblement -> interaction faible
- masse = 0, spin = 1/2

1932 – Chadwick : Découverte du neutron (un temps confondu avec le neutrino de Pauli).

Structure de noyau connue.

1934 – Fermi : Première théorie de la radioactivité β et de l'interaction nucléaire faible

1959 – Cowan, Reines : Découverte de du neutrino

Bilan au début des années 1930

Particules connues :

Matière:

proton
(électromagnétisme)

neutron

électron + positron

Interactions :

photon

Particules supposées :

antiproton, antineutron

neutrino, antineutrino

Toute la matière connue s'explique avec ces particules

Apparition de nouvelles particules

1935 – Yukawa : 1^{ère} théorie de jauge : description de l'interaction nucléaire forte entre nucléons:

- Electromagnétisme : champ EM \leftrightarrow Photon
- Interaction Forte : Nouvelle particule : méson π (pion)

Début de la description d'interaction entre fermions de spin $\frac{1}{2}$ (matière) par échange de bosons de spin 1 (interaction)

1937 – Nedermayer et Anderson : Découverte de particules analogues à l'électron et au positron mais plus lourdes (105 MeV) dans les rayons cosmiques

- hypothèse 1 : pion de Yukawa mais probabilité d'interaction trop faible
- hypothèse 2 : nouvelle particule \rightarrow le muon

1947 – Lattes, Occhialini, Powell : Découverte du pion et de sa désintégration : $\pi^- \rightarrow \mu^- + \nu$

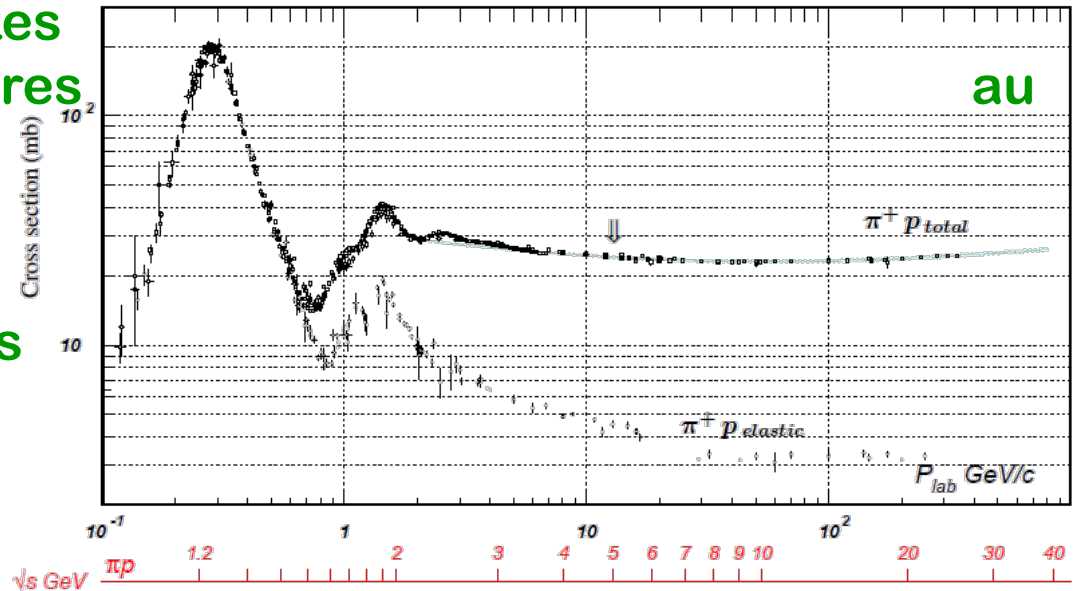
Résonnances hadroniques

Début des années 50 : Observation de pics dans la section efficace totale nucléons-nucléons et pion-nucléon.

Nouvelles particules produites par interaction forte similaires proton (resonances Δ)

durée de vie : $\sim 10^{-23}$ s

->résonance hadroniques



Observation de deux particules de grande durée de vie (10^{-12} s) et de faible probabilité de production Λ et K^0

- nouveau nombre quantique : étrangeté $S(K)=1$, $S(\Lambda)=-1$
- étrangeté conservé par l'interaction forte
- production/désintégration par interaction faible.

1955 : Production d'antiprotons via $p+p \rightarrow p+p+p+\text{anti-}p$

Le modèle des quarks

Grande quantité de résonance hadroniques

Classification à partir de leur propriétés de symétrie

-> hadrons sont des particules composites

1964 - Gell-Mann, Zweig : Modèle des quarks composant les hadrons

- nucléon = 3 quarks, mésons = quark-antiquark
- charge électrique fractionnaire : $2/3$ et $-1/3$
- Trois quarks suffisent : up, down et strange ($S=-1$)

1964 – Observation de la particule Ω^- : $|sss\rangle$

- Désintégration faible : 3 sauts d'étrangeté
- conservation du spin : nouvelle charge "de couleur" : théorie de jauge de l'interaction forte : chromodynamique quantique

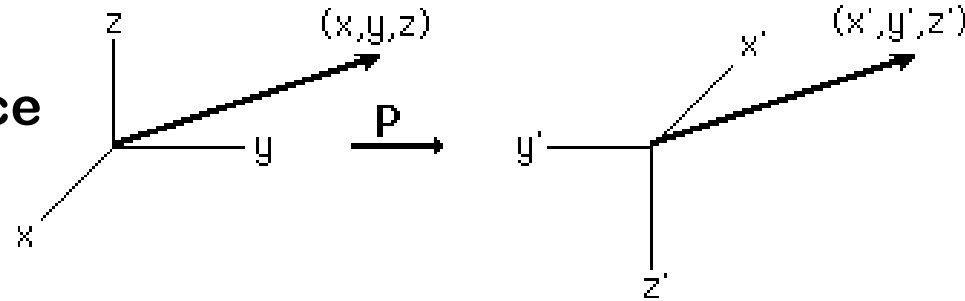
Boson de jauge (\sim photon) : 8 gluons

Violation de parité

Symétrie de parité :

inversion des coordonnées d'espace

$$x' = -x, \quad y' = -y, \quad z' = -z$$



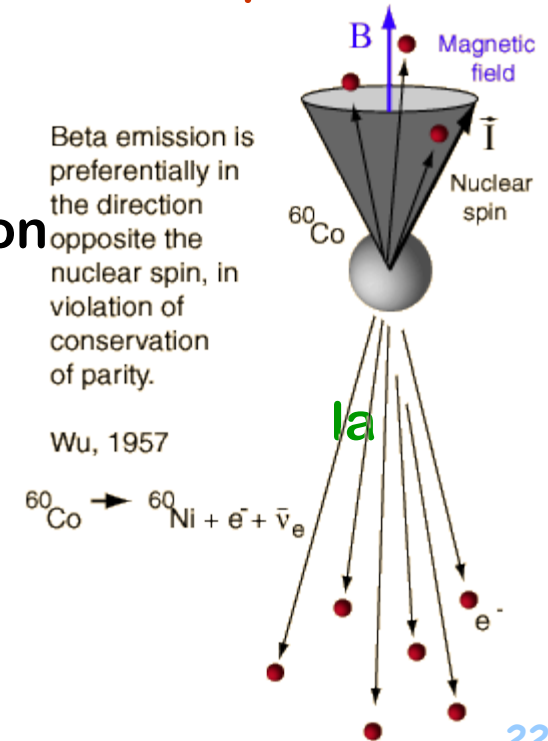
1956 - Yang, Lee : Hypothèse de la symétrie de parité respectée par les interaction forte et électromagnétique. Violation de parité pour l'interaction faible.

Pour une particule de masse nulle

Parité = Hélicité = Projection du spin sur l'impulsion

1957-1958 – Wu : Vérification expérimentale de violation de P dans la désintégration β^- de ^{60}Co

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



L'unification électrofaible

Années 1960 - Glashow, Salam, Weinberg : Théorie de jauge décrivant simultanément les interactions EM et faible.

L'interaction est véhiculée par 4 bosons

- le **photon** de l'électromagnétisme, respecte la symétrie de parité
- les bosons **W^+ et W^-** : courant faible chargé, couplé uniquement à la chiralité gauche.
- le boson **Z** : courant faible neutre, couplé différemment à droite et à gauche

Problème des masses : Modèle GSW ne marche que pour des particules sans masse or :

- les fermions sont massifs (électrons, quarks,...)
- $\alpha_{\text{faible}} \ll \alpha_{\text{EM}}$: W et Z doivent être très massifs $m \sim 100\text{GeV}$

1963 – Higgs, Brout, Englert : Mécanisme de brisure spontanée de symétrie pour créer des masses

-> Nouvelle particule : boson de Higgs

Confirmations du modèle standard

1969 - mesures de diffusion inélastique $e+p$: structure interne du proton (quarks)

1973 - Découverte expérimentale des courant neutre faibles (diffusion de neutrino)

1974 - nouvelle résonnance lourde J/Ψ (3.1 GeV) \rightarrow quark charmé, deuxième famille de quark.

1975 - Découverte d'un 3^{ème} lepton, le τ ($e^+e^- \rightarrow e^+\mu + \text{énergie manquante}$)

1978 - Troisième famille de quarks : quark beau ou bottom

1979 – Evénements à 3 jets dans les collisions e^+e^- : découverte du gluon et confirmation de la chromodynamique quantique

1984 – Production directe des bosons W et Z , mesure de leur masse

$$m_Z = 91 \text{ GeV}$$

$$m_W = 80,4 \text{ GeV}$$

1994 – Sixième quark : le top. $m_{\text{top}^+} = 174 \text{ GeV} = m_{\text{Au}}$

2000 – Observation directe du neutrino τ

2012 – Découverte du boson de Higgs au LHC : $m_h = 126 \text{ GeV}$

Les fermions (matière) du modèle standard

Nom		Masse (GeV)	Charges			Nombres	
			Forte	Faible	EM	B	L
Leptons							
Électron	e^-	511×10^{-6}	non	oui	oui	0	1
Neutrino e	ν_e	0	non	non	oui	0	1
Muon	μ^-	0,105	non	oui	oui	0	1
Neutrino μ	ν_μ	0	non	non	oui	0	1
Tau	τ^-	1,777	non	oui	oui	0	1
Neutrino τ	ν_τ	0	non	non	oui	0	1
Quarks							
Down	d	$\sim 0,005$	oui	oui	oui	$\frac{1}{3}$	0
Up	u	$\sim 0,002$	oui	oui	oui	$\frac{2}{3}$	0
Strange (étrange)	s	$\sim 0,1$	oui	oui	oui	$\frac{1}{3}$	0
Charm (charmé)	c	$\sim 1,5$	oui	oui	oui	$\frac{2}{3}$	0
Bottom (beau)	b	$\sim 4,7$	oui	oui	oui	$\frac{1}{3}$	0
Top	t	173,5	oui	oui	oui	$\frac{2}{3}$	0

Masse des quarks : masse = propriété associée à la propagation libre
quarks n'existent que dans états liés
→ masse impossible à mesurer exactement (sauf quark top)

Les bosons (interactions) du modèle standard

Interaction entre fermion = échange de **bosons de jauge**.

L'intensité de l'interaction

est proportionnel à la « charge »

à la constante de couplage (ex : $\alpha_{EM} = 1/137$)

inversement proportionnelle au carré de la masse du boson (à basse énergie)

Nom		Masse (GeV)	Interaction transmise	Charge		
				Forte	Faible	EM
Photon	γ	0	EM	non	non	non
Boson faible W	W^+, W^-	80,4	Faible	non	oui	oui
Boson faible Z	Z	90,2	Faible	non	oui	non
Gluon	g	0	Forte	oui	non	non
Boson de Higgs	h	~ 125	aucune	non	oui	non

Le mécanisme de Higgs donne une masse aux bosons faibles et aux fermions et prédit un dernier boson dit « boson de Higgs » actuellement étudié au LHC.