

مقياس فزياء
الجسيمات

Physique des Particules:

(1) مدخل إلى فيزياء الجسيمات

(1) Introduction à la physique des particules

M1 Physique Théorique, Département de Physique, Université de Jijel
Année universitaire 2020/2021

Mohamed Sadek ZIDI

mohamed.sadek.zidi@gmail.com

(1) Introduction à la physique des particules

- **Matières et particules élémentaires**
- **Évolution de la physique des Particules**
- **Interactions fondamentales**
- **Systeme d'unités naturelles**
- **Rappel de relativité et formalisme quadridimensionnel**
- **Rappel de physique quantique**
- **Rappel de théorie des groupes**
- **Dynamique des particules fondamentales**

(2) Cinématiques relativistes: collision et désintégration des particules

- **Collisions relativistes**
- **Désintégrations**
- **Variables dynamiques**
- **Section efficace**
- **Taux de désintégration**

(3) Interactions fondamentales, symétries et lois de conservation

- Interactions fondamentales et diagrammes de Feynman
- Symétries et Lois de conservation
- Symétries externes (espace-temps)
 - **Symétries externes: parité, renversement du temps,**
- Symétries internes et hadrons
 - **Symétries internes: Isospin, Étrangeté ...**

(4) Physique des particules et théories de jauge

- **Électrodynamique des leptons, quarks et hadrons**
 - **Électrodynamique quantique**
 - **Amplitude de diffusion et diagrammes de Feynman**
 - **Applications: (1) Interaction entre leptons, (2) Interactions électron-quark et (3) Diffusion électron-proton**
- **Interaction forte et chromodynamique quantique**
 - **Quarks et hadrons**
 - **Règle de Feynman de QCD**
 - **Interaction quark-quark**
 - **Annihilation de paire en QCD**
 - **Liberté asymptotique et confinement**
- **Interaction électrofaible et modèle standard**
 - **Interaction à courant chargé**
 - **Désintégration de: muon, neutron et pion**
 - **Interaction à courant chargé**
 - **Unification électrofaible**

(5) Modèle des quarks

- **Groupes de Lie et Algèbre de Lie**
- **Représentation du groupe $SU(N)$**
- **Isospin et groupe $SU(2)$**
- **Couleur et groupe $SU(3)$**
- **Diagrammes de poids et Classification des hadrons**

(6) Tests expérimentaux et échec du modèle standard

- **Expérience de Wu: violation de parité**
- **Découverte des bosons W et Z**
- **Découverte du boson de Higgs**
- **Problème du modèle standard**

Références

- **A. Bettini, Introduction to elementary particle physics**
- **D. Griffiths, Introduction to elementary particles**
- **L. Marleau, Introduction à la physique des particules (cours)**
<http://feynman.phy.ulaval.ca/marleau/intl/fr/>
- **Problems and solutions of atomic, nuclear, and particle physics. Yung-Kuo Lim.**
- **Selected Excerices in Particle and Nuclear Physics, L. Bianchini**

Références: cours et exercices

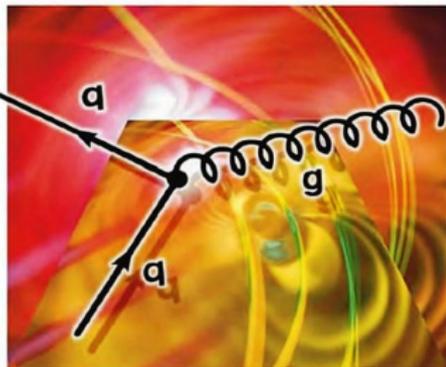
PHYSICS TEXTBOOK

David Griffiths

WILEY-VCH

Introduction to Elementary Particles

Second, Revised Edition



Copyrighted material

Introduction to

Elementary Particle Physics

Alessandro Bettini

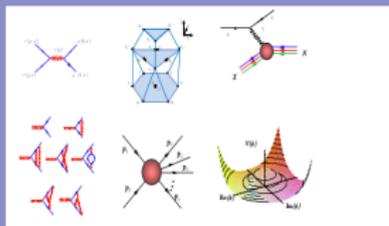
CAMBRIDGE

CAMBRIDGE

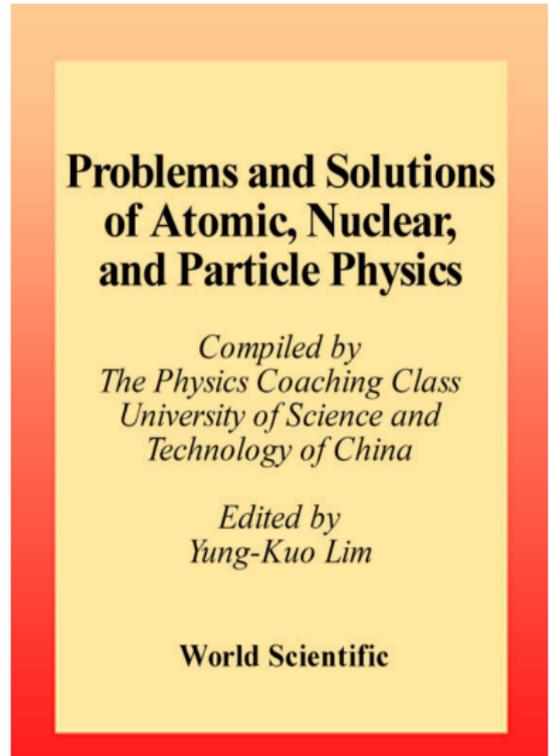
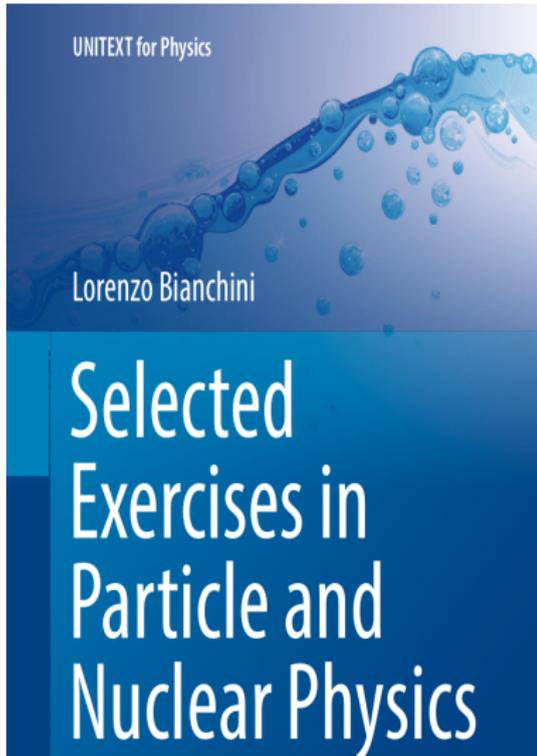
www.cambridge.org/9780521880213

Introduction à la physique des particules

L. Marleau

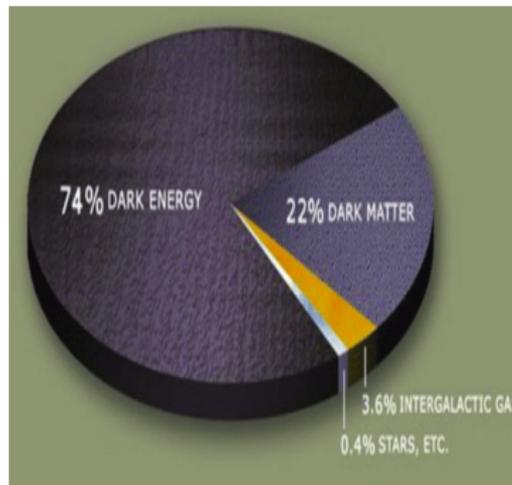


Références: exercices et problèmes



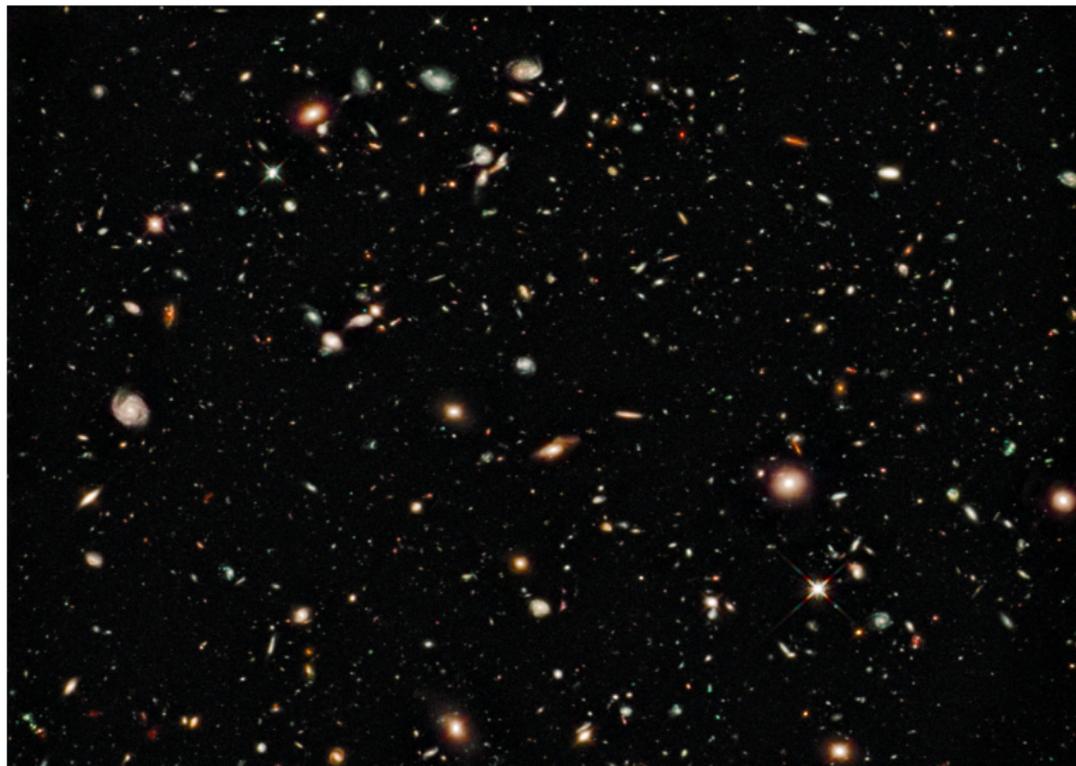
Matière et matière noire

- **Énergie noire 74%:**
C'est une énergie de nature inconnue, elle est introduite pour expliquer plusieurs observations astronomiques.
- **Matière noire 22%:** On ne peut pas l'observer car elle n'émet aucun rayonnement (trou noir par exemple).
- **Gaz intergalactique 3.6%:**
Matière situé en dehors des galaxies
- **Matière ordinaire 0.4%:**
Matière observable (atomes, particules, galaxies, ... etc).



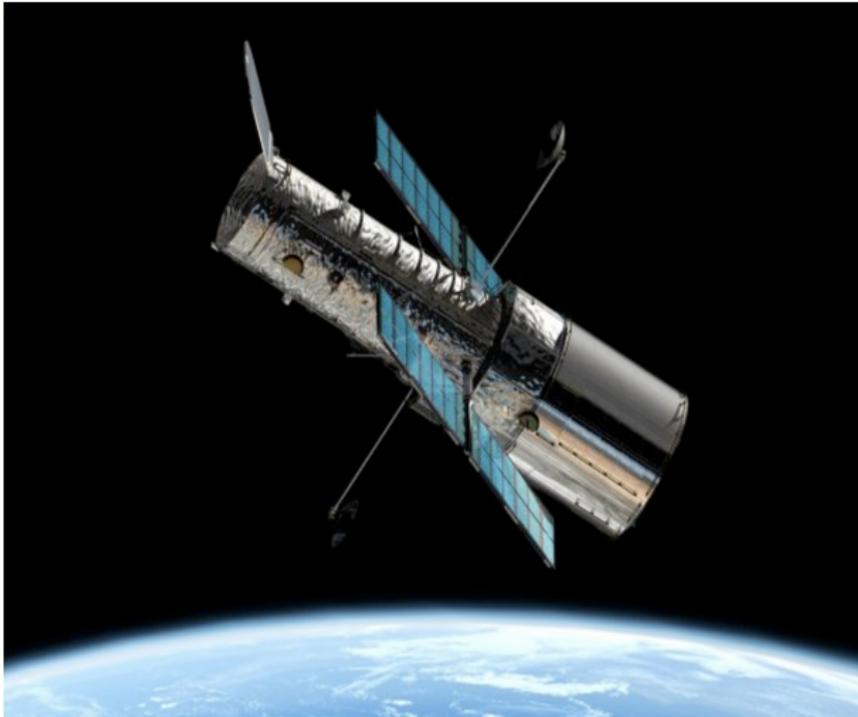
Univers

Une image de l'Univers lointain prise par Hubble en 2009.



Télescope Hubble

**Le télescope spatial Hubble en orbite à environ 600 km d'altitude
(lancé par la NASA en 1990)**



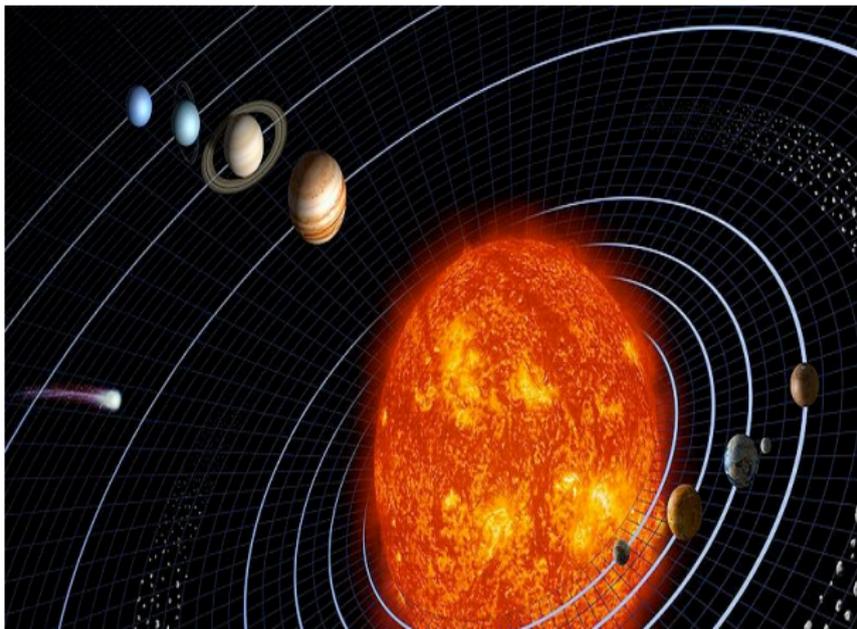
Galaxie

Une galaxie est un assemblage d'étoiles, de gaz, de poussières et de matière noire, contenant parfois un trou noir supermassif en son centre. Tous tourne autour du centre la gravitation



Système solaire

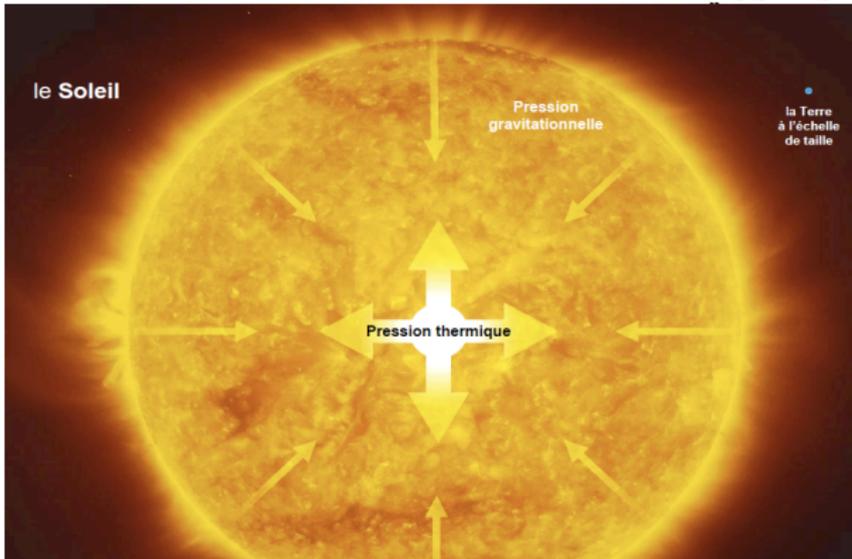
Le système solaire est un système planétaire composé d'une étoile, le Soleil, et des objets célestes gravitant autour de lui (les 8 planètes (ou 9 si on compte Pluton), leurs 175 satellites naturels (lunes)....).



Équilibre hydrostatique des étoiles

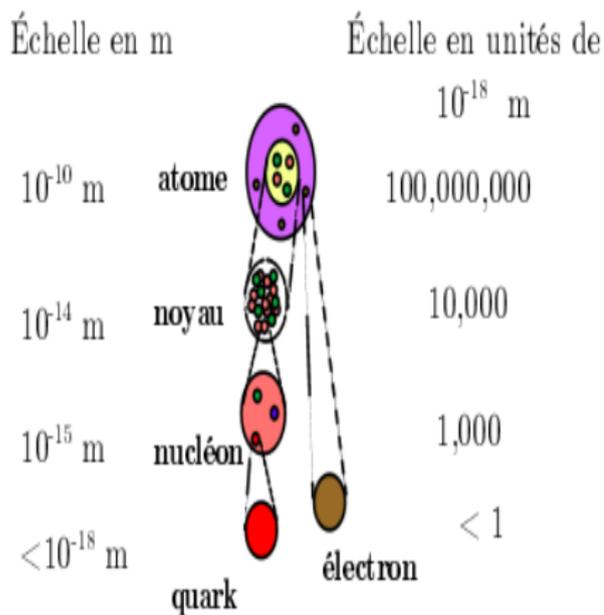
Une étoile est une boule de plasma (غاز متأين) en rotation:

- ▶ L'équilibre hydrostatique (التوازن الهيدروليكي) est maintenu par deux forces:
 - Pression gravitationnelle: force gravitationnelle (الجاذبيّة)
 - Pression thermique: fusion nucléaire (الانصهار النووي)



Matière ordinaire

La matière ordinaire est composée de particules fondamentales:



Unités de mesures

Quantité	Unité	Abrév
Longueur	Mètre	m
Temps	Seconde	s
Energie	Electron-Volt	eV
Masse		eV/c^2
Masse		eV/c^2

- 1 eV est l'énergie acquise par un électron accéléré par une différence de potentiel de 1 V, alors

$$1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C} \times 1 \text{ V} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$$

- L'énergie, la masse est la quantité de mouvement sont liées par (relativité restreinte):

$$E^2 = |\vec{p}|c^2 + m^2c^4$$

- **Multiple de eV:**

$$1 \text{ KeV} = 10^3 \text{ eV}$$

$$1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$$

$$1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV}$$

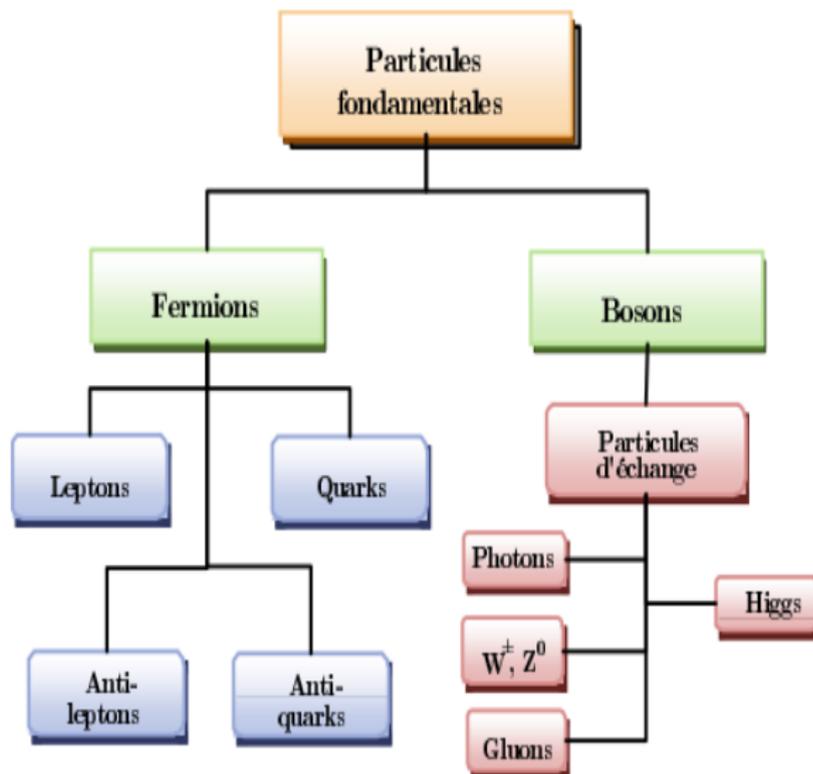
$$1 \text{ TeV} = 10^{12} \text{ eV}$$

Distances typique dans la nature

Rang des énergies dans la nature

Rang des densités dans la nature

Particules fondamentales ou élémentaires



Bosons et Fermions

● Fermions:

- **Spin demi entier** $1/2\hbar, 3/2\hbar \dots$
- **Statistique de Fermi-Dirac.**
- **Fonction d'onde anti-symétrique:** $\psi_{1,2} = -\psi_{2,1}$.
- **Constituent la matière.**
- **Exemple: électron, proton, neutron, ... etc.**

● Bosons:

- **Spin entier** $0\hbar, 1\hbar, 2\hbar \dots$
- **Statistique de Bose-Einstein.**
- **Fonction d'onde symétrique:** $\psi_{1,2} = \psi_{2,1}$.
- **Médiateurs des interactions fondamentales.**
- **Exemple: photon, graviton, ... etc.**

Particules élémentaires du modèle standard

THE STANDARD MODEL					
	Fermions			Bosons	
Quarks	u up	c charm	t top	γ photon	Force carriers
	d down	s strange	b bottom	Z Z boson	
Leptons	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	W W boson	
	e electron	μ muon	τ tau	g gluon	

Bosons et bosons de jauge

Particules d'échange (interactions)		
électromagnétique	photon (spin 1)	γ
faible	3 bosons faibles (spin 1)	Z^0, W^\pm
forte	8 gluons (spin 1)	g
gravitationnelle	graviton (spin 2)	$h_{\mu\nu}$
	boson de Higgs (spin 0)	H

Leptons

Leptons (spin $\frac{1}{2}$)			
$Q = 0$	$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \end{pmatrix}$
$Q = -1$	$\begin{pmatrix} e \\ \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \mu \\ \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \tau \\ \end{pmatrix}$

- Interagissent via l'interaction électrofaible.
- Possèdent des charges électriques entières (ou nulles).
- Possèdent une charge *faible*
- Regroupés en paires appelées *doublets* d'interaction faible.
- Obéissent à la statistique de Fermi-Dirac (fermions)
- Possèdent des masses relativement faibles.
- Ils existent en trois familles ou générations.
- e électron, μ muon, τ tau et les neutrinos (ν_e, ν_μ, ν_τ).

Quarks

Quarks			
$Q = \frac{2}{3}$	$\begin{pmatrix} u(\text{up}) \\ d(\text{down}) \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} c(\text{charme}) \\ s(\text{étrange}) \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} t(\text{top}) \\ b(\text{bottom}) \end{pmatrix}$
$Q = -\frac{1}{3}$			

- **Particules fondamentales qui forment la matière nucléaire.**
- **Soumises à l'interaction forte et électrofaible.**
- **Charges électriques fractionnaires ($2/3 e$ et $-1/3 e$).**
- **Possèdent une charge faible et forment des doublets d'interaction faible.**
- **Possède une charge de couleur et forment des triplets d'interaction forte.**
- **Existents six types de quarks (saveurs) u, d, c, s, t, b .**

Propriétés des particules élémentaires

Gauge bosons

		Mass	Width	Main decays
photon	γ	$< 6 \times 10^{-17}$ eV	stable	
gluon	g	0 (assumed)	stable	
weak boson	Z^0	91.1876 ± 0.0021 GeV	2.4952 ± 0.0023 GeV	$l^+ l^-$, $\nu \bar{\nu}$, $q \bar{q}$
weak boson	W^\pm	80.403 ± 0.029 GeV	2.141 ± 0.041 GeV	$l \bar{\nu}_l$, $q \bar{q}$

Leptons

	Mass		Lifetime	Main decays
e	$0.51099892(4)$ MeV		$> 4.6 \times 10^{26}$ yr	
μ	$105.658369(9)$ MeV		$2.19703(4)$ μ s	$e^- \bar{\nu}_e \nu_\mu$
τ	1776.99 ± 0.28 MeV		290.6 ± 1 fs	$\mu^- \bar{\nu}_\mu \nu_\tau$, $e^- \bar{\nu}_e \nu_\tau$, $h^- \nu_\tau$
ν_1	$0 \leq m_1 < 200$ meV	if $m_3 > m_2$	stable	
	$50 \text{ meV} < m_1 < 200 \text{ meV}$	if $m_3 < m_2$		
ν_2	$9 \text{ meV} < m_2 < 200 \text{ meV}$	if $m_3 > m_2$	stable	
	$50 \text{ meV} < m_2 < 200 \text{ meV}$	if $m_3 < m_2$		
ν_3	$50 \text{ meV} < m_3 < 200 \text{ meV}$	if $m_3 > m_2$	stable	
	$0 \leq m_3 < 200$ meV	if $m_3 < m_2$		

Quarks

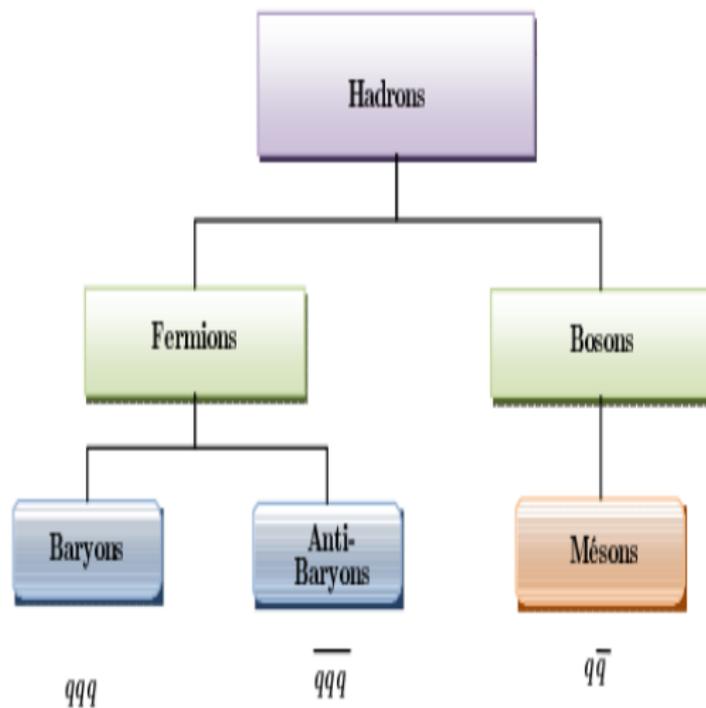
	Q	I	I_z	S	C	B	T	\mathcal{B}	Y	Mass
d	$-1/3$	$1/2$	$-1/2$	0	0	0	0	$1/3$	$1/3$	$3-7$ MeV
u	$+2/3$	$1/2$	$+1/2$	0	0	0	0	$1/3$	$1/3$	$1.5-3.0$ MeV
s	$-1/3$	0	0	-1	0	0	0	$1/3$	$-2/3$	95 ± 25 MeV
c	$+2/3$	0	0	0	$+1$	0	0	$1/3$	$4/3$	1.25 ± 0.09 GeV
b	$-1/3$	0	0	0	0	-1	0	$1/3$	$-2/3$	4.20 ± 0.07 GeV
t	$+2/3$	0	0	0	0	0	$+1$	$1/3$	$4/3$	173 ± 3 GeV

Hadrons

Hadrons	
p	proton
n	neutron
π^+, π^0, π^-	pions
ρ^+, ρ^0, ρ^-	mésons ρ
Λ	lambda
K^+, K^0, \bar{K}^0, K^-	mésons K

- Ce sont des états liés de quarks et anti-quarks (formés de quarks).
- Ne sont pas des particules fondamentales (composées).
- Interagissent fortement (interaction forte).
- Ils ont des interactions faibles.
- Ont des charges électriques entière
- Fermions, ils sont appelés baryons (proton et neutron, ... etc).
- Bosons, ils sont appelés mésons (pion π et kaon K , ... etc).
- Expérimentalement, on observe plus de 200 hadrons.

Classification des hadrons



Particules et anti-particules

- Les anti-particules sont proposées pour la première fois par Dirac (équation de Dirac).
- Ont des charges opposées à celles des particules (charge électrique, faible, ...etc)
- masse et vie moyenne égales à celles des particules.
- Exemple:

e (électron)	\leftrightarrow	\bar{e} (positron)
ν (neutrino)	\leftrightarrow	$\bar{\nu}$ (antineutrino)
p (proton)	\leftrightarrow	\bar{p} (antiproton)
Σ (sigma)	\leftrightarrow	$\bar{\Sigma}$ (antisigma)

Évolution de la physique des Particules

- **1880 Découverte de la nature particulaire des rayons cathodiques:**

William Crookes montre que les rayons cathodiques ne sont pas constitués d'ondes électromagnétiques mais d'un flux de particules électriquement chargées.

- **1897 Détermination de la masse de l'électron:**

Joseph John Thomson détermine la masse de l'électron.

- **1899 Détermination de la charge de l'électron:**

Joseph John Thomson détermine la charge électrique de l'électron. Il soutient que l'ionisation correspond à la séparation d'électrons de leur atome.

- **1904 Modèle atomique de Thomson:**

Joseph Thomson propose un modèle atomique où les électrons sont dispersés dans de la matière positive...

- **1906 Détermination du nombre d'électrons dans l'atome d'hydrogène:**

Joseph John Thomson montre que l'atome d'hydrogène ne possède qu'un électron.

- **1908 Découverte de la série de raies de Paschen:**

Louis Paschen découvre une série de raies d'émissions de l'hydrogène située dans le proche infrarouge et baptisée série de Paschen.

- **1910 Découverte de l'isotopie:**

Joseph John Thomson identifie plusieurs isotopes du néon et obtient ainsi confirmation qu'un atome peut présenter différentes formes isotopiques.

- **1911 Modèle atomique de Rutherford:**

Ernest Rutherford élabore un nouveau modèle de l'atome. Ce dernier serait constitué d'un noyau positif concentrant l'essentiel de la masse et d'électrons orbitant à ses confins.

- **1913 Modèle atomique de Bohr:**

Niels Bohr utilise la théorie quantique pour décrire les orbites électroniques, les excitations et désexcitation des électrons.

- **1914 Définition du numéro atomique**

Henry Gwyn Jeffreys Moseley définit la notion de numéro atomique: il correspond au nombre de charges positives du noyau atomique.

- **1914 Invention du mot proton:**

Ernest Rutherford utilise pour la première fois le mot proton pour désigner la particule positive qui constitue le noyau de l'atome d'hydrogène.

- **1914 Confirmation expérimentale du modèle de Bohr:**

James Franck et Gustave Hertz confirment expérimentalement les orbites électroniques prévues par le modèle de Bohr.

- **1923 Association onde-particule de De Broglie**

Louis de Broglie suggère que chaque particule pourrait être associé à une onde.

- **1926 Modèle atomique de Schrödinger:**

Ernest Schrödinger établit un modèle ondulatoire de l'atome dans lequel les électrons sont décrits sous forme d'onde. Ce modèle inclut l'équation d'onde de Schrödinger.

- **1927 Découverte de la désintégration β**

- **1928 P.A. Dirac propose son équation d'onde relativiste pour l'électron.**

- **1931 Hypothèse de l'existence du neutrino:**

Wolfgang Pauli suppose l'existence d'une particule neutre, sans masse correspondant à l'énergie manquante lors de la désintégration β . Enrico Fermi baptisera cette particule neutrino.

- **1932 Découverte du neutron:**

James Chadwick découvre l'existence d'une particule neutre composant le noyau atomique: le neutron.

- **1932 Modèle de Heisenberg du noyau atomique:**

Werner Heisenberg propose un modèle de noyau atomique composé à la fois de protons et de neutrons, il fait l'hypothèse qu'il s'exerce entre eux une force attractive permettant d'expliquer la stabilité des noyaux.

- **1932 Découverte du positron:**

Carl David Anderson découvre, en étudiant les rayons cosmiques, l'antiparticule de l'électron qu'il nomme positron (il est aussi appelé positon).

- **1933 Théorie de Fermi de la désintégration β (interaction faible)**

- **1934 Détermination de la masse du neutron:**

James Chadwick et Maurice Goldhaber détermine la masse du neutron.

- **1937 Découverte du muon:**

Carl David Anderson découvre une particule qui a d'abord été supposée être un pion mais qui s'est ensuite avéré être un muon.

- **1938 Énoncé de la loi de conservation du nombre baryonique.**

- **1939 Détermination du moment magnétique du neutron:**

Felix Bloch détermine le moment magnétique du neutron et en déduit que ceux-ci sont neutres mais constitués de particules plus petites électriquement chargées (qui s'avéreront plus tard être des quarks).

- **1940 Mise au point du béatatron:**

Donald William Kerst met au point le betatron, un accélérateur de particules qui permet de conférer aux électrons une vitesse proche de celle de la lumière.

- **1946 Invention du mot lepton:**

Abraham Pais et Christian Moller inventent le terme de lepton pour désigner des particules telles les électrons et les muons qui ne sont pas sensibles à l'interaction forte.

- **1947 Découverte du pion:**

Cecil Frank Powell découvre la particule subatomique nommée pi-meson ou pion.

- **1952 Découverte du méson K:**

Marian Danysz et Jerzy Pniewski découvrent le méson K (ou kaon) une particule dont la masse et la moitié de celle du proton.

- **1953 Invention de la chambre à bulles:**

Donald Arthur Glaser invente la chambre à bulles qui permet de suivre le mouvement des particules chargées: sur leur trajectoire se forme une série de bulles.

- **Yang et Mills proposent les théories de jauge non-abéliennes**

- **1954 Mise au point du bevatron:**

Les scientifiques de l'université de Californie mettent au point le bevatron. Il s'agit d'un accélérateur de particules qui permet de fournir à des protons une énergie allant de 5 à 6 milliards d'électron-volt.

- **1954 Invention du mot baryon:**

Abraham Pais invente le terme "baryon" pour désigner la classe de particules élémentaires sensibles à l'interaction forte.

- **1955 Découverte de l'antiproton:**

Emilio Segré et Owen Chamberlain découvrent l'antiproton, une particule de même masse que le proton mais de charge électrique négative.

- **1956 Découverte des antineutrinos:**

Frederick Reines et Clyde Lorrain Cowan découvre les antineutrinos.

- **1961 Formulation du théorème de Goldstone:**

Jeffrey Goldstone formule le théorème de Goldstone et prévoit l'existence d'une particule de spin 0, de masse nulle appelée Boson de Goldstone.

- **1964 Prédiction de l'existence du boson de Higgs:**

Peter Higgs prévoit l'existence d'une particule de spin 0 mais de masse non nulle appelée par la suite boson de Higgs.

- **1972 Formulation de la théorie de la chromodynamique quantique:**

Murray Gell-mann élabore la théorie de la chromodynamique quantique qui décrit le comportement des quarks.

- **1974 Découverte du J-psi:**

Samuel Ting et Burton Richter découvrent une nouvelle particule subatomique appelée particule J-psi. Cette découverte sera récompensée par le prix nobel en 1976.

- **1977 Découverte de la particule upsilon:**

Leon Max Lederman découvre la particule upsilon.

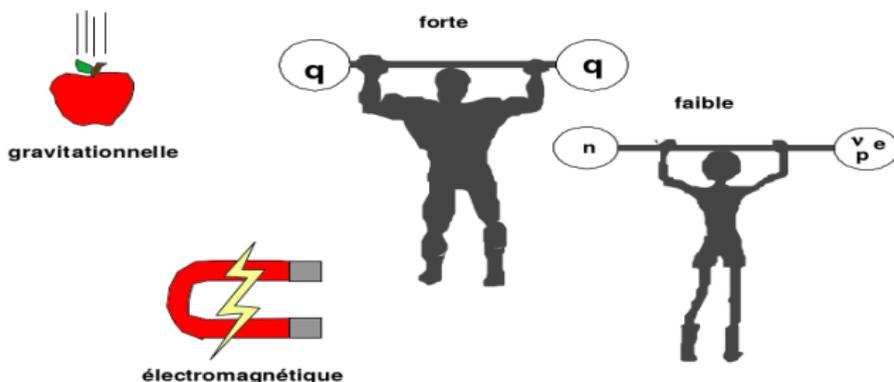
- **1979 Découverte des gluons:**

Preuve de l'existence des gluons, particules par l'intermédiaire desquelles les quarks interagissent.

- 1983 Découverte du Z_0 et du W^\pm au CERN.
- 1990 Mesure au LEP (CERN) impliquant que le nombre de neutrinos légers ($m < 45\text{GeV}$) est limité à 3.
- 1995 Découverte d'un sixième quark, le top t , à Fermilab, USA.
- 1998 Évidence de neutrinos massifs à Super-Kamiokande, Japon.
- 2012 Évidence du Higgs au LHC, CERN.

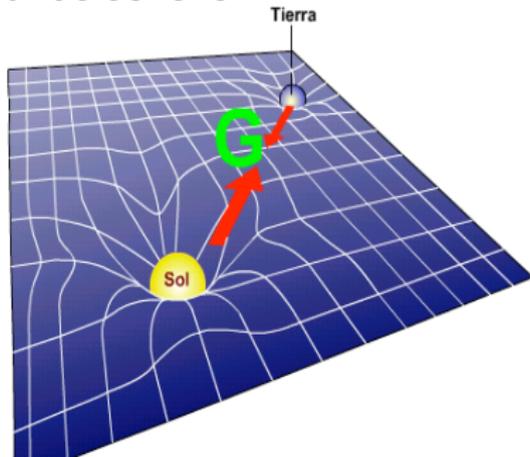
Interactions (forces) fondamentales

- (1) Interaction gravitationnelle.
- (2) Interaction électromagnétique.
- (3) Interaction forte (nucléaire).
- (4) Interaction faible



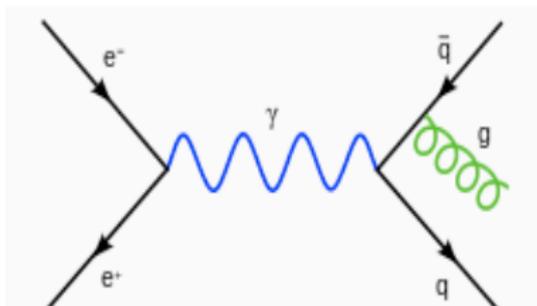
Interaction Gravitationnelle (الجاذبيّة)

- Portée infinie (مدي غير متهبي) et agit sur tous les corps massifs
- Négligeable (مهملة) à l'échelle atomique par rapport à l'interaction électromagnétique
- Responsable de nous lié à la terre
- Responsable de la cohésion (تماسك) du système solaire et de l'univers à grande échelle!!!



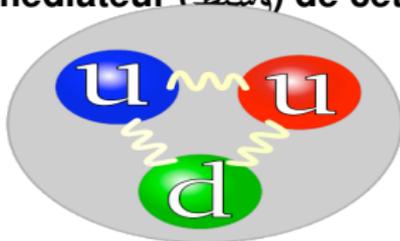
Interaction Electromagnétique (الكهر ومغناطيسية)

- Responsable de la cohésion (تماسك) des atomes (الذرات) (noyau positif et électrons négatifs)
- Responsable de la cohésion (تماسك) des molécules (الجزيئات) (force de Van der Waals), et la matière macroscopique (المادة العيانية)
- Portée infinie (مدي غير متهبي) et agit sur toutes les particules chargées
- Le photon est le médiateur (وسيط) de la force électromagnétique



Interaction Forte (التفاعلات القويّة)

- Responsable de cohésion (تماسك) entre les nucléons (proton et neutron) dans le noyau atomique
- Empêche (يمنع) les protons de se séparer sous l'effet de la répulsion électrostatique (التنافر الالكتروستاتيكي)
- Agit sur des distances très courtes (مسافة قريبة) de l'ordre de la taille du proton ($10^{-15} m$) (portée finie متهي)
- L'interaction forte lie les quarks dans les nucléons (proton et neutron)
- Le gluon est le médiateur (وسيط) de cette force

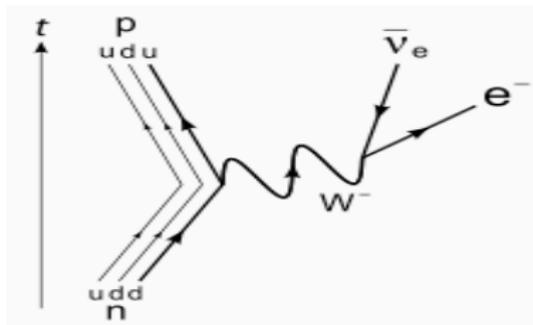


Interaction Faible (التفاعلات الضعيفة)

- Responsable de la radioactivité β :



- Sa portée est mille fois plus faible que celle de l'interaction forte (مدي ضعيف)
- Les bosons $Z - 0$, W^{+} et W^{-} sont les médiateur (وسائيط) de cette force



Comparaison entre ces forces (مقارنة)

L'effet (تأثير) de chacune de ces interactions est décrit par l'énergie potentielle (الطاقة الكامنة):

$$V(r) = \hbar c \alpha \frac{e^{-r\lambda}}{r} \quad (2)$$

- $\hbar = h/(2\pi) = 1.054 \cdot 10^{-34} \text{ kg.m}^2.\text{s}^{-1}$, $c = 299792458 \text{ m.s}^{-1}$
- α : constante de structure (sans dimension) ou la force!
- λ : la portée (مدى) de la force, $\lambda = \hbar/(mc)$.

	Forte	Faible	Electromag.	Gravitation
Boson int.	Π	W^\pm, Z^0	Photon	Graviton (?)
Masse	$\simeq 140 \text{ MeV}$	$\simeq 100 \text{ GeV}$	0 (?)	0 (?)
λ	$\simeq 1.4 \cdot 10^{-15} \text{ m}$	$\simeq 2 \cdot 10^{-18} \text{ m}$	∞	∞
α	10	10^{-5}	$\frac{1}{137}$	$\simeq 6 \cdot 10^{-39}$
Rôle	Cohésion nucléaire	Radioactivité β	Cohérence de la matière, chimie	Cohérence de l'Univers

Portée des interactions

D'après le principe d'incertitude d'Heisenberg:

$$\Delta t \approx \frac{\hbar}{\Delta E} \approx \frac{\hbar}{m} \quad (3)$$

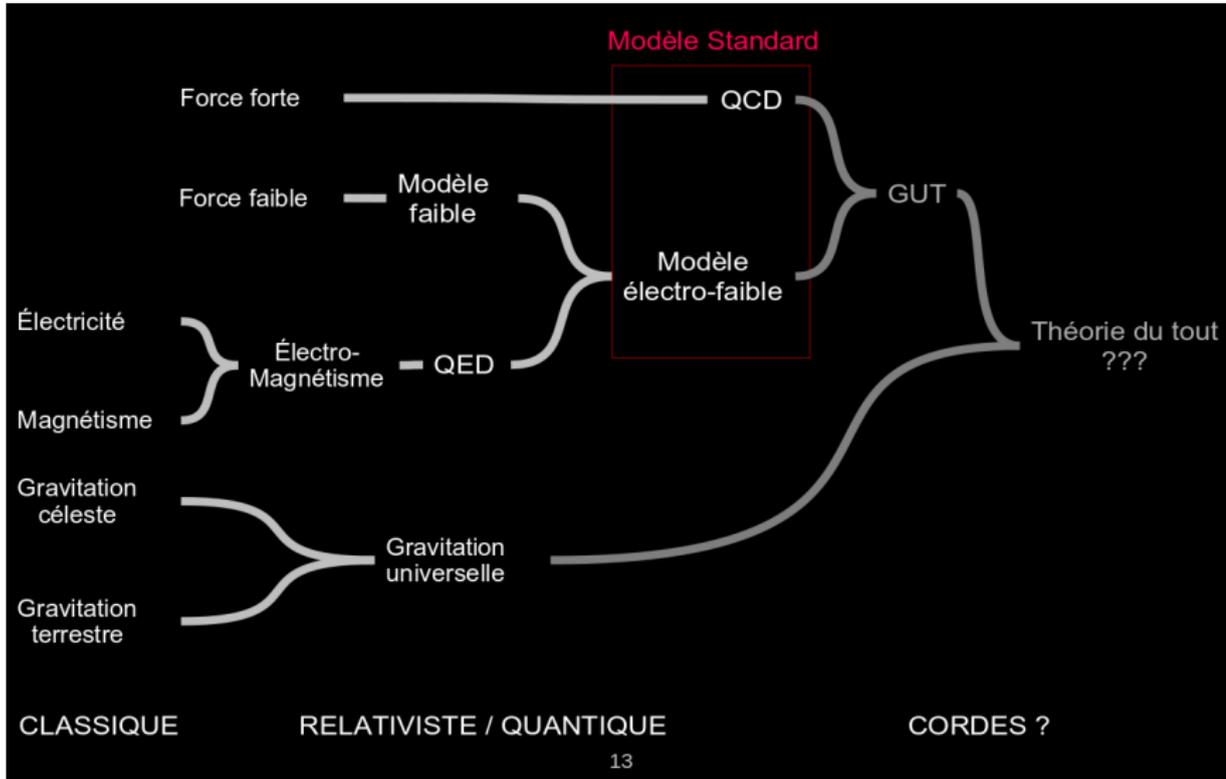
La portée d'une réaction est donc (pour $\hbar = 1$ et $c = 1$):

$$R = c\Delta t \approx \frac{1}{m} \quad (4)$$

où m est la masse du boson de jauge (médiateur de l'interaction)

- **Électromagnétisme:** $R = 1/(m_\gamma = 0) \rightarrow \infty$ portée infinie
- **Int gravitationnelle:** $R = 1/(m_G = 0) \rightarrow \infty$ portée infinie
- **Int faible:** $R = 1/(m_{W,Z} \neq 0) \rightarrow$ finie portée finie
- **Int forte:** $m_g = 0$ mais $R \rightarrow$ finie portée finie (à cause de la liberté asymptotique)

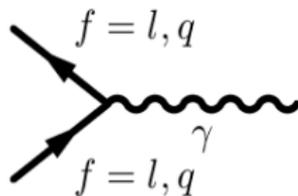
Interaction fondamentales et théories de jauge



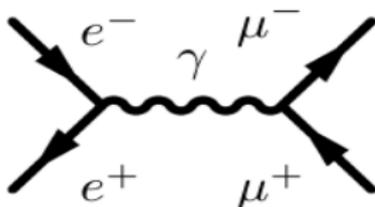
Dynamique des particules fondamentales

Electrodynamique quantique (QED)

- QED: \equiv Eqs Maxwell+MQR (RR+MQ)+Théories quantiques des champs
- QED: est une théorie quantique des champs basée sur le groupe $U(1)$, elle décrit l'interaction de toutes les fermions chargés électriquement avec le photon.
- En QED, tout phénomène électromagnétique est décrite par le processus suivant:

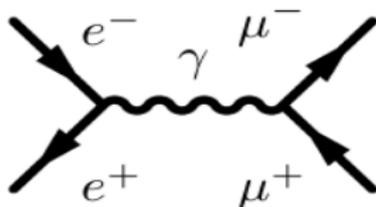


- Exemple: $e^- + e^+ \rightarrow \mu^- + \mu^+$



Exemples

- **Exemple:** $e^- + e^+ \rightarrow \mu^- + \mu^+$



- **Diffusion Bhabha:** $e^- + e^+ \rightarrow e^- + e^+$
- **Diffusion Compton:** $e^- + \gamma \rightarrow e^- + \gamma$
- $\gamma + \gamma \rightarrow e^- + e^+$
- $e^- + e^+ \rightarrow \gamma + \gamma$

Remarques (diagramme de Feynman)

- Les propagateurs internes représentent des particules virtuelles (non-physiques)
- Les propagateurs externes représentent des particules réelles (physiques)
- Les diagrammes de Feynman sont purement symboliques, ils ne représentent pas les trajectoires des particules.
- Chaque diagramme de Feynman représente une amplitude en fonction des matrices de Dirac γ_μ , les spineurs u et v , masses des particules, ...
- Voici quelque règles de Feynman en QED:
- ...
- A chaque vertex les quantité suivantes doivent être conservées:
 - Énergie-impulsion
 - charge électrique
 - nombres quantiques

Exercice

Montrer que les processus suivant ne sont pas permis cinématiquement

$$e^- \rightarrow e^- + \gamma$$

$$e^- + e^+ \rightarrow \gamma$$

Nombres leptoniques

	L_e	L_μ	L_τ
$e^- (e^+)$	1 (-1)	0 (0)	0 (0)
$\nu_e (\bar{\nu}_e)$	1 (-1)	0 (0)	0 (0)
$\mu^- (e^+)$	0 (0)	1 (-1)	0 (0)
$\nu_\mu (\bar{\nu}_e)$	0 (0)	1 (-1)	0 (0)
$\tau^- (e^+)$	0 (0)	0 (0)	1 (-1)
$\nu_\tau (\bar{\nu}_e)$	0 (0)	0 (0)	1 (-1)

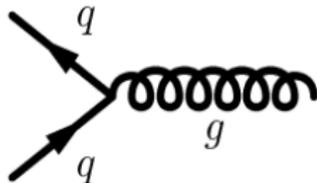
avec

- L_e : Nombre électronique
- L_μ : Nombre muonique
- L_τ : nombre tauique

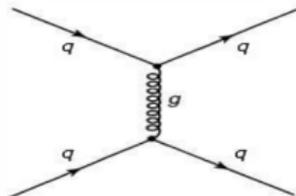
Chromodynamique quantique (QCD)

En QCD, la couleur joue le rôle de la charge électrique en QED. La couleur ou la charge de couleur est une autre type de charge quantique (de 3 état) responsable de l'interaction entre les quarks et les gluons.

- L'interaction entre les quarks et le gluon est décrite par le vertex suivant



- Les leptons n'interagissent pas fortement (avec le gluon)
- Exemple: $q + q \rightarrow q + q$

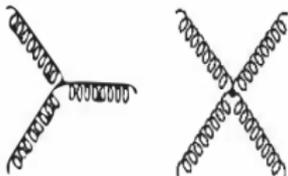


Exemple QCD:

Tracer les diagrammes de Feynman des réactions suivantes:

- $q + q \rightarrow q + q$
- $q + \bar{q} \rightarrow q + \bar{q}$
- $q + q \rightarrow q' + q'$
- $q + \bar{q} \rightarrow q' + \bar{q}'$

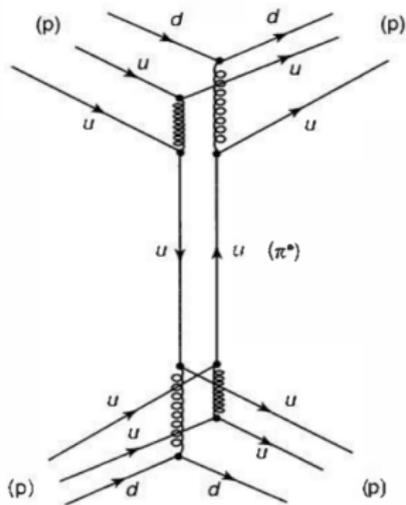
Remarque: Pas comme le photon, le gluon peut interagir avec le gluon car il porte une charge de couleur. Alors, on



Tracer les diagrammes de Feynman des réactions suivantes:

- $q + g \rightarrow q + g$
- $q + \bar{q} \rightarrow g + g$

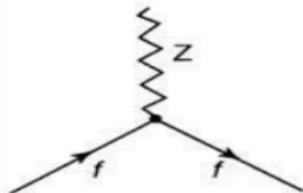
Diagramme de Feynman et la réaction $p + p \rightarrow p + p$



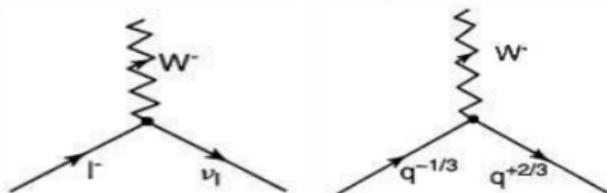
Interaction faible (EW)

Il existe deux modes d'interaction faible:

- Interaction faible à courant neutre:



- Interaction faible à courant chargé:



Exemples

- $\mu^- + \nu_e \rightarrow e^- + \nu_\mu$
- $\mu^- \rightarrow e^- + \nu_\mu + \bar{\nu}_e$
- $\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu \rightarrow e^- + e^+$
- $\nu_\mu + e^- \rightarrow \nu_\mu + e^-$
- $d + \nu_e \rightarrow u + e$
- $\pi^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e$
- $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$
- $\nu_\mu + p \rightarrow \nu_\mu + p$

Couplage faible et électromagnétique des boson de jauge

