

Chapitre I Objets de la Physique des Particules

D^r Steve Muanza: CPPM Marseille, CNRS-IN2P3 & AMU

Ecole IN2P3 sur les Techniques de Base des Détecteurs
IES, Cargèse

March 20, 2017

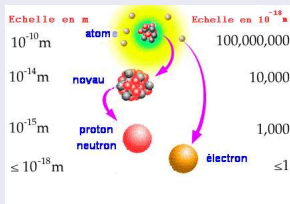


- 1 Unités et ordres de grandeur
- 2 Comportement des Particules
- 3 Plongée vers l'Infiniment Petit

Un Monde Extrême (1)

- Avant de plonger dans l'infiniment petit, il convient de fixer des échelles dans le temps et dans l'espace
- Il nous faut changer repères et habitudes

Longueurs



- Les dimensions des atomes sont de l'ordre de l'angström, soit 10^{-10} m ou un dixième de nanomètre ou un dix-millième de micron
 - Un milliard d'atomes = 10 cm

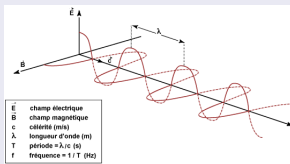


- La dimension d'un proton, composant du noyau, est de l'ordre du femtomètre ou fermi, soit 10^{-15} m
 - Un milliard de protons = $1 \mu\text{m}$



Les Vitesses

- Vitesse limite: la vitesse (ou célérité) de la lumière dans le vide
 - $c = 299\,792.458\text{ km/s}$
 - Rien ne peut aller plus vite
 - La lumière met 8 minutes pour nous parvenir du soleil



- A l'intérieur des protons, les vitesses des corpuscules comme les quarks s'approchent de la vitesse de la lumière ($0.1 < \beta = \frac{v}{c} < 1$)
 - Il en est de même pour toutes les particules produites dans les collisions de haute énergie
- Les électrons d'un atome sont loin d'être aussi rapides, mais leur vitesse reste très grande ($\beta \approx 0.01$)

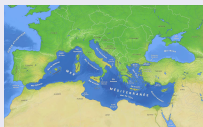


Les Echelles de Temps

- Pour traverser un minuscule atome, la lumière met une fraction de milliardième de milliardième de seconde (10^{-18} s)
- En une seconde, un électron animé d'une vitesse de 3000 km/s (le centième de la vitesse de la lumière) fait à peu près autant de tours de son atome qu'un milliard d'hommes auront de battements de coeur pendant un siècle
- Les fréquences des phénomènes qui agitent les quarks à l'intérieur de la matière nucléaire sont encore beaucoup plus élevées (10^{-23} s)

Du macroscopique au microscopique: le nombre d'Avogadro

- La contrepartie de l'extrême petitesse des atomes est leur très grand nombre
- Dans un centimètre cube d'eau, il y a autant d'atomes d'oxygène et d'hydrogène que de gouttelettes d'eau dans la Méditerranée. Visiter l'atome, c'est en quelque sorte passer de l'échelle de la Méditerranée à celle d'une goutte d'eau.



- Le **nombre d'Avogadro** définit une **mole**
 - Nombre d'atomes dans 12 g de carbone 12 (noté ^{12}C): $\mathcal{N}_A = 6.022 \times 10^{23}$



Les énergies

- Elles sont à la fois infimes, car elles concernent de minuscules corpuscules ...
- ... et très importantes à leur échelle,
 - car ces corpuscules circulent à des vitesses proches de celle de la lumière
 - Ex.: 1 TeV (Tevatron, LHC) = énergie cinétique d'un moustique en vol, concentrée dans un volume mille milliards de fois (10^{-12}) inférieur au moustique
- Les énergies en jeu deviennent énormes, dès qu'un grand nombre de corpuscules ou de noyaux sont impliqués :
 - explosions nucléaires
 - réacteurs nucléaires
- Fission d'un atome d'uranium 235 : réaction en chaîne
 - Energie libérée par une fission: $\Delta mc^2 = 3.2 \times 10^{-11}$ J
 - Dans 1 gramme d' ^{235}U , on a $N_A = 6.022 \times 10^{23}/235$ noyaux



{ Energie libérée : 8.2×10^7 kJ/g d' ^{235}U ,
soit 22800 kWh/g
NB : kJ/g = "kilo Joule/gramme"

Unités d'énergie

- L'électronvolt (eV) est l'énergie cinétique acquise par un électron accéléré par une différence de potentiel de 1 Volt

- La charge de l'électron valant 1.6×10^{-19} Coulomb,

$$1\text{eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ Joule}$$

- Une unité qui marie l'infiniment petit (la charge de l'électron) et la physique usuelle (le Volt)
- Cette minuscule unité est adaptée aux phénomènes moléculaires et chimiques...
 - Les énergies de liaison des électrons externes des atomes sont de l'ordre de l'électronvolt
- ... mais pas aux énergies mises en jeu en physique des particules
- On utilise fréquemment le GeV, le milliard d'électron-Volt ou Giga électronvolt...

$$1\text{GeV} = 1.6 \times 10^{-10} \text{ Joule}$$

- ... ou le TeV (Tevatron, LHC) : Téra-électronvolt

Un Monde Extrême (2)

- Avant de plonger dans l'infiniment petit, il convient également d'intégrer les 2 révolutions qui fondent la Physique Moderne:
 - La Relativité d'Einstein
 - La Physique Quantique
- Il nous faut bouleverser nos conceptions:
 - De l'espace et du temps
 - De la nature des objets physiques et la notion de mesure

Physique Classique (Le Monde Usuel)

- Principales Branches:
 - Mécanique Classique (repère en temps et espace, rapport causal force % mouvement)
 - Electromagnétisme (synthèse des phénomènes électriques, magnétiques et optiques)
 - Physique Statistique (grand nombre de corpuscules, inclue la thermodynamique)
- Objets regroupés en 2 catégories distinctes:

Corpuscules

- Type: matière
- Apparence: discontinue
- Localisé dans l'espace (t donné)
- Paradigme: point matériel
- Trajectoire: solution du principe fondamental de la dynamique
- Superposition: linéaire

Ondes

- Type:
 - rayonnement
 - vibration dans un milieu matériel
- Apparence: continue
- Diffus dans l'espace
- Paradigme: onde plane monochromatique
- Trajectoire: solution des équations de Maxwell par ex.
- Superposition: non-linéaire, d'où
 - interférences
 - diffraction

Physique Moderne: La Double Révolution (1/2)

1. Relativité Restreinte

- Le temps et l'espace ne sont ni absolus, ni indépendants
- Aucune information physique ne peut se propager plus vite que la lumière c
- Notations:

$$\beta = \frac{v}{c} \quad (0 \leq \beta \leq 1)$$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} \quad (\gamma \geq 1)$$

- Observateur M.R.U.^a % phénomène:
 - Contraction des longueurs: $L = L_0/\gamma$
 - Dilatation du temps: $T = \gamma \times T_0$
- Equivalence Masse-Energie:

$$E^2 = p^2 c^2 + m^2 c^4 \quad (E_0 = mc^2)$$

- Expériences: explique l'expérience de Michelson-Morley,...
- N.B.: physique classique valable tant que $\beta \ll 1$

^amouvement rectiligne uniforme

Physique Moderne: La Double Révolution (2/2)

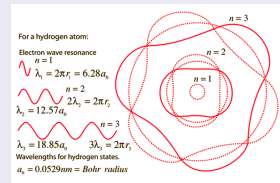
2. Physique Quantique

- Objet physique: à la fois onde et corpuscule
- Particule: onde associée $\lambda = \frac{h}{p}$

Physique Moderne: La Double Révolution (2/2)

2. Physique Quantique

- Objet physique: à la fois onde et corpuscule
- Particule: onde associée $\lambda = \frac{h}{p}$
- Décrite par une fonction d'onde Ψ (interférence, diffraction)



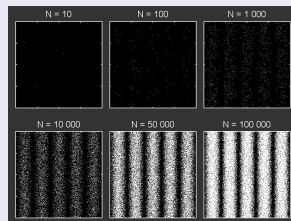
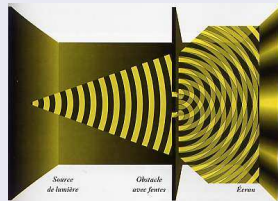
Physique Moderne: La Double Révolution (2/2)

2. Physique Quantique

- Objet physique: à la fois onde et corpuscule
- Particule: onde associée $\lambda = \frac{h}{p}$
- Décrite par une fonction d'onde Ψ (interférence, diffraction)
- Quantification: $E = n \cdot h\nu$
- Résultats d'expérience: probabilités ($|\Psi|^2$)
- Inégalités d'Heisenberg:

$$\Delta p_x \cdot \Delta x \geq \frac{h}{2\pi}$$

- Expériences: explique la stabilité atomique, l'expérience de Davisson-Germer,...
- N.B.: physique classique valable tant que $\mathcal{A} \gg \frac{h}{2\pi}$



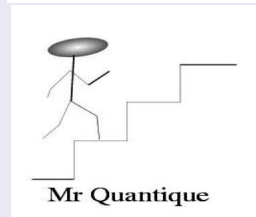
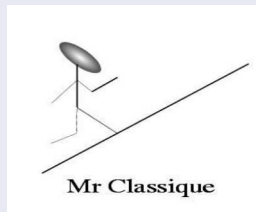
Physique Moderne: La Double Révolution (2/2)

2. Physique Quantique

- Objet physique: à la fois onde et corpuscule
- Particule: onde associée $\lambda = \frac{h}{p}$
- Décrite par une fonction d'onde Ψ (interférence, diffraction)
- Quantification: $E = n \cdot h\nu$
- Résultats d'expérience: probabilités ($|\Psi|^2$)
- Inégalités d'Heisenberg:

$$\Delta p_x \cdot \Delta x \geq \frac{h}{2\pi}$$

- Expériences: explique la stabilité atomique, l'expérience de Davisson-Germer,...
- N.B.: physique classique valable tant que $\mathcal{A} \gg \frac{h}{2\pi}$



Conséquences sur le Monde des Particules

1. Relativité Restreinte

- Production d'une particule de masse m
 - Collision de 2 particules d'énergie E : $E + E > mc^2$



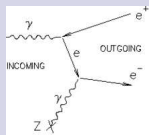
- Production d'une paire: $E + E > 2mc^2$
 - \Rightarrow Hautes énergies pour les particules massives

- Désintégration d'une particule de masse m

- $part \rightarrow part_1 + part_2$, si $m > m_1 + m_2$
- $m^2 = [E_1 + E_2]^2 - [\vec{p}_1 + \vec{p}_2]^2$
 $\Rightarrow m^2 = m_1^2 + m_2^2 + 2E_1E_2(1 - \cos\alpha_{1,2})$

- Matérialisation d'un photon:

- $\gamma^* \rightarrow e^+e^-$
- en traversant de la matière
- si $E_{\gamma^*} > 2m_e c^2$ ($m_e c^2 = 0.511 \text{ MeV}$)



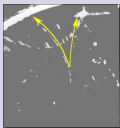
Conséquences sur le Monde des Particules

1. Relativité Restreinte

- Production d'une particule de masse m
 - Collision de 2 particules d'énergie E : $E + E > mc^2$



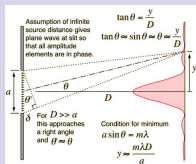
- Production d'une paire: $E + E > 2mc^2$
 - \Rightarrow Hautes énergies pour les particules massives
- Désintégration d'une particule de masse m
 - $part \rightarrow part_1 + part_2$, si $m > m_1 + m_2$
 - $m^2 = [E_1 + E_2]^2 - [\vec{p}_1 + \vec{p}_2]^2$
 $\Rightarrow m^2 = m_1^2 + m_2^2 + 2E_1E_2(1 - \cos\alpha_{1,2})$
- Matérialisation d'un photon:
 - $\gamma^* \rightarrow e^+e^-$
 - en traversant de la matière
 - si $E_{\gamma^*} > 2m_e c^2$ ($m_e c^2 = 0.511 \text{ MeV}$)



Conséquences sur le Monde des Particules

2. Physique Quantique

- Explorer le microcosme requiert 2 types de "loupe"
- Loupe "diffractive": $\lambda = \frac{h}{p}$
 - $\lambda \ll 1 \Rightarrow$ hautes énergies
 - Diffraction:
 - $\sin\theta = \frac{\lambda}{a}$ (1^{er} min.)

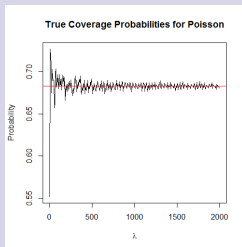


- Loupe "statistique":
 - **accumulation des données** pour voir émerger les phénomènes
 - condition pour que le signal ressorte des **fluctuations statistiques du bruit**

Conséquences sur le Monde des Particules

2. Physique Quantique

- Explorer le microcosme requiert 2 types de "loupe"
- Loupe "diffractive": $\lambda = \frac{h}{p}$
 - $\lambda \ll 1 \Rightarrow$ hautes énergies
 - Diffraction:
 - $\sin\theta = \frac{\lambda}{a}$ (1^{er} min.)
- Loupe "statistique":
 - accumulation des données pour voir émerger les phénomènes
 - condition pour que le signal ressorte des **fluctuations statistiques du bruit**



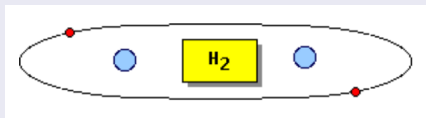
En route vers l'infiniment petit



Le Royaume de la Chimie (1)

- Molécules

- Assemblages très divers d'atomes
- La plus simple: di-hydrogène (H_2)



- Une des plus connues: eau (H_2O)

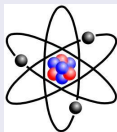


- Les atomes "tiennent ensemble" en partageant leurs électrons
- Dimensions: qlqs dixièmes de nm à 1 m (1nm: diamètre de l'ADN)

Le Royaume de la Chimie (2)

• Atomes

- Atome: insécable (grec "atomos")



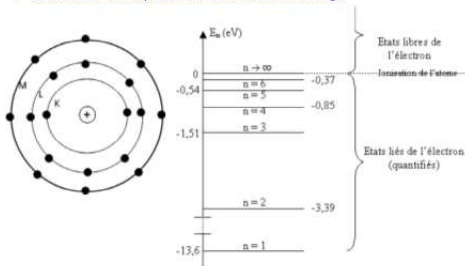
- Dimensions: (1 Angström = 10^{-10} m)
- Très faible densité:
 - "L'atome, c'est comme un pépin de mandarine sur l'obélisque de la Concorde avec des poussières tournant autour de la place" (F. Joliot-Curie)
 - Toute la matière, ou presque, se retrouve concentrée dans un minuscule **noyau**, cent mille fois plus petit, mais très dense (**99.97% de la masse de l'atome**)
 - Un nuage d'électrons, chargés négativement, gravite autour du **noyau** qui est chargé positivement
 - L'atome est électriquement neutre
- Notation: ${}^A_Z X$ (X: élt chimique, A: nbre de masse, Z: nbre d'électrons)

Le Royaume de la Chimie (3)

• Modèle atomique de Bohr:

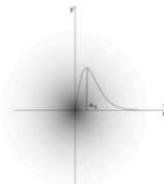
■ Modèle de Bohr

- ▶ seules certaines « orbites » sont permises
- ▶ ces orbites correspondent à des niveaux d'énergie



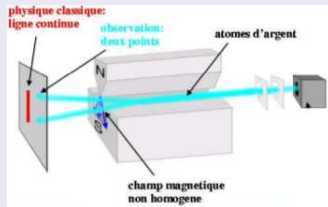
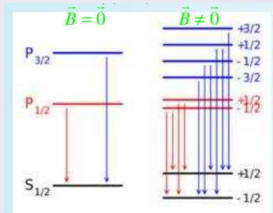
■ Les électrons sont des objets quantiques

- ▶ à la fois ondes et corpuscules
- ▶ décrit par des fonctions d'onde
- ▶ il ne peuvent pas être localisés infiniment précisément



Le Royaume de la Chimie (4)

- Spin:

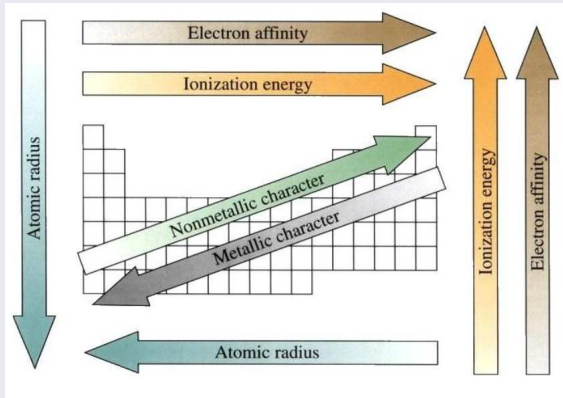


- Principe d'exclusion de Pauli:

- Deux électrons ne peuvent occuper le même état quantique
- Valable pour toutes les particules de S 1/2-entier (FERMIONS)

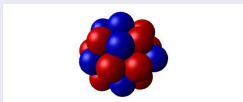
Le Royaume de la Chimie (5)

- Diversités des atomes
- Classification (Mendeleev)



Le Royaume Nucléaire et Hadronique (1)

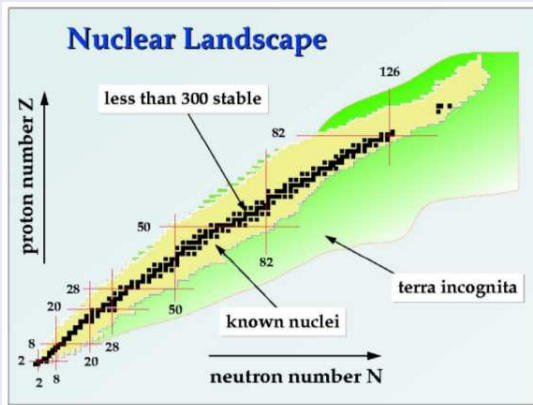
- Noyau



- Constitué de **protons** et de **neutrons** (**nucléons**)
 - Proton: charge électrique positive $Q(p) = -Q(e^-)$
 - Neutron: charge électrique nulle $Q(n) = 0$
- Dimensions: environ 1 fermi ou femtomètre (fm), soit 10^{-15} m
- Stabilité: à la répulsion coulombienne intense, s'oppose une **interaction forte** plus intense!
- Les noyaux varient de 1 à 238 nucléons:
 - Noyau le plus simple : ${}^1_1\text{H}$ = 1 proton, 0 neutron
 - Noyau léger : ${}^{16}_8\text{O}$ = 8 protons, 8 neutrons
 - Noyau lourd : ${}^{238}_{92}\text{U}$ = 92 protons, 136 neutrons
- Isotopes:
 - noyau avec le même nombre de protons (et donc d'électrons)
 - mêmes propriétés chimiques
 - nombre de neutrons différents
 - Exemples: ${}^{14}_6\text{C}$: isotope radioactif du ${}^{12}_6\text{C}$
 - ${}^2_1\text{H}$: 1 proton + 1 neutron (eau lourde)

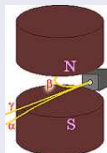
Le Royaume Nucléaire et Hadronique (2)

- Stabilité de la matière nucléaire:
 - Noyaux stables:
 - comportent à peu près autant de neutrons que de protons
 - Noyaux instables:
 - se désintègrent spontanément



Le Royaume Nucléaire et Hadronique (3)

- Radioactivité:



- Alpha: α

- Emission de noyau d'hélium
- ${}^A_Z X \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2} Y + \alpha$
- Ex: ${}^{238}_{92} U \rightarrow {}^{234}_{90} Th + \alpha$
- Arrêtés par une feuille de papier

- Beta: β^\pm (beta plus ou beta moins)

- Emission d'électron (β^-) ou d'anti-électron (β^+)
- ${}^A_Z X \rightarrow {}^A_{Z\mp 1} Y + \beta^\pm$
- Ex: $n^0 \rightarrow p^+ + e^- + \bar{\nu}$
- Arrêtés par une feuille d'aluminium

- Gamma: γ

- Emission de photon
- ${}^A_Z X^* \rightarrow {}^A_Z X + \gamma$
- Ex: ${}^{30}_{15} P \rightarrow {}^{30}_{14} Si^* (\rightarrow {}^{30}_{14} Si + \gamma) + \beta^+ + \nu$
- Arrêtés par 4m de béton

Le Royaume Nucléaire et Hadronique (4)

• Nucléons

- Dimensions: moins d' 1 fm
- Globalement protons et neutrons se ressemblent beaucoup
- Ils se distinguent notamment par leur charge électrique (+1 et 0, resp.)
- Durées de vie:
 - Proton: quasi-stable $\tau_p > 10^{34}$ années
 - Neutron: instable, à l'état libre, $\tau_n \approx 15$ min. dû à la désintégration beta: $n^0 \rightarrow p^+ + e^{-1} + \bar{\nu}_e$.
Par contre, dans le noyau le neutron est beaucoup plus stable
- Propriétés:
 - Proton: $Q_p = -Q_e = 1.60 \times 10^{-19} C$, $m_p = 1.67 \times 10^{-27} kg = 938 MeV$
 - Neutron: $Q_n = 0$, $m_n = 1.68 \times 10^{-27} kg = 940 MeV$
 - Identiques par rapport à l'interaction forte

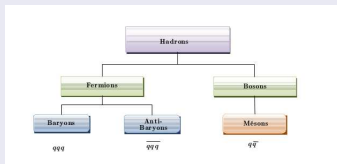
• Pléthore de Hadrons

- Définition: particules (composites) sensibles à l'interaction forte
- Dans les années 1960, on a découvert toutes sortes de hadrons
- Ex: π^0 , π^\pm , ρ^0 , ρ^\pm , K^0 , \bar{K}^0 , K^\pm , Λ^0 , ...

Le Royaume des Particules Élémentaires (1)

• Fermions

- **Quarks**: particules élémentaires de $S=1/2$ composant les hadrons, donc sensibles à l'interaction forte
- Hadron particulier: Δ^{++} fermion de $S=3/2$ formé de 3 quarks up (chacun de $S=1/2$), MAIS
d'après le principe d'exclusion de Pauli: il ne devrait pas exister!
- Charge de couleur: nouveau nombre quantique permettant de distinguer les 3 quarks u (de spins parallèles) formant le Δ^{++}
- Saveurs: il existe 6 saveurs de quarks
 - Up: u (up), c (charm), t (top). $Q(U_p)=+2/3$.
 - Down: d (down), s (strange), b (bottom). $Q(D_p)=-1/3$.
 - En raison de leur $Q \neq 0$, les quarks sont sensibles aux interactions EM (électromagnétiques)
 - Chaque quark a un anti-quark
 - Chaque quark peut avoir 3 charges de couleur différentes (R, V, B)
 - Chaque hadron a une charge de couleur nulle:
méson: $\text{couleur}_i + \overline{\text{couleur}}_i$
baryon: $R+V+B = \bar{R}+\bar{V}+\bar{B} = 0$ (ou neutre de couleur)



Le Royaume des Particules Élémentaires (2)

• Fermions

- **Leptons**: particules élémentaires de $S=1/2$ non sensibles à l'interaction forte
- Exemple: électrons
- Saveurs: il existe aussi 6 saveurs de leptons
 - Chargés: e^- , μ^- , τ^- . $Q(\ell) = -1$.
 - Neutres: ν_e , ν_μ , ν_τ . $Q(\nu) = 0$.
 - Les neutrinos ν_e apparaissent notamment dans les désintégrations beta
 - Les leptons chargés sont sensibles aux interactions EM (électromagnétiques)
 - Chaque lepton a un anti-lepton (ℓ^+ et $\bar{\nu}_\ell$)

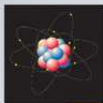
Leptons (spin $\frac{1}{2}$)			
$Q = 0$	$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau \end{pmatrix}$
$Q = -1$			

Le Royaume des Particules Élémentaires (3)

- Bosons: particules de spin entier ($S=0,1,2,\dots$)
 - Bosons de Jauge ($S=1$)
 - Dans les théories quantiques relativistes, les interactions fondamentales sont "transportées" des bosons (médiateurs)
 - EM (porteur: le **photon** γ , cohésion de la matière: atomique et moléculaire)
 - Forte (porteurs: les **gluons** g , cohésion de la matière: hadrons, noyau)
 - Faible (porteurs: W^\pm , Z^0 , instabilité de la matière: élémentaire, habillé (hadrons, noyau))
 - Boson Scalaire ($S=0$)
 - **Boson de Higgs** H^0
 - Explique la masse de toutes les particules élémentaires (cas particuliers des neutrinos)
 - Explique sa propre masse
 - Boson Tenseur ($S=2$)
 - Médiateur: l'hypothétique **graviton** qui correspondrait à la quantification des ondes gravitationnelles
 - La gravité a une intensité négligeable aux énergies accessibles pour les collisions de particules, mais doit jouer un rôle crucial à très haute énergie
 - A ce jour, il n'existe pas de théorie expliquant la gravité par des échanges quantiques
 - Pistes: théories de super-cordes et théorie-M, ou, gravité quantique à boucles
- Symétries discrètes
 - Les théories quantiques relativistes respectent le produit des symétries: $C \cdot P \cdot T$
 - C: conjugaison de charge (transforme une particule en son anti-particule)
 - P: renversement de l'espace ($(x, y, z) \leftrightarrow (-x, -y, -z)$)
 - T: renversement du temps ($(t) \leftrightarrow (-t)$)
 - Violation de la parité P: prédite dans les interactions faibles (1956), découverte dans les désintégrations du ^{60}Co (1957)
 - Violation de CP: observable dans le système des kaons ou des hadrons beaux (LHCb)

Le Royaume des Particules Élémentaires (4)

les particules de matière



les particules élémentaires se désintègrent en des particules élémentaires plus légères



matière plus lourde produite dans des collisions à haute énergie

la matière ordinaire

quarks	+2/3	u up (1968) M-2.3 MeV	c charm (1974) M-1.3 GeV	t top (1995) M-175 GeV
	-1/3	d down (1968) M-5 MeV	s strange (1968) M-0.95 GeV	b beauty (1977) M-4.5 GeV
leptons	0	ν_e neutrino "e" (1956)	ν_μ neutrino "μ" (1962)	ν_τ neutrino "τ" (2000)
	-1	e⁻ électron (1897) M-0.5 MeV	μ^- muon (1936) M-113 MeV	τ^- tau (1974) M-1.8 GeV
charge électrique		1^{ère} famille	2^{ème} famille	3^{ème} famille

Le Royaume des Particules Élémentaires (4)

