

# PHYS-H-200 Physique quantique et statistique

## Chapitre 1: Introduction

Jean-Marc Sparenberg  
Université Libre de Bruxelles

2011-2012

- 1 Fondements microscopiques de la physique
- 2 Espace-temps et relativité restreinte
- 3 Particules élémentaires et composites
- 4 Les quatre interactions fondamentales
- 5 Lois de conservation

# But de la physique

- Description **mathématique** de **tous** les phénomènes observables
  - microscopiques (particules élémentaires)
  - macroscopiques (l'univers)
- À partir d'un **petit nombre** de principes fondamentaux, lois ou **postulats**
- Physique quantique : étude du monde **microscopique** : particules élémentaires, noyaux atomiques, atomes, molécules. . .
- Physique statistique : passage à l'échelle **macroscopique** par moyennes des propriétés microscopiques
  - gaz (atomiques, moléculaires, électroniques. . .) : **interactions** entre particules microscopiques **peu importantes** (cf ce cours)
  - liquides et solides (matière condensée) : interactions importantes

# Principes fondamentaux de la physique

- ❶ Univers = **espace-temps** à 3+1 dimensions  
(**relativité restreinte**, Einstein, 1905)
- ❷ Tout ce qui existe est constitué d'entités élémentaires = **particules**
  - ▶ petit nombre de types de particules
  - ▶ particules d'un même type : identiques
  - ▶ propriétés bien définies : **masse**, **charge**...
- ❸ Tous les phénomènes observés résultent d'**interactions** entre ces particules
  - ▶ petit nombre de types d'interactions
  - ▶ propriétés bien définies : **portée**, **intensité**...
- ❹ Au cours de ces interactions, certaines grandeurs mesurables sont **conservées**
  - ▶ petit nombre de **lois de conservation**
  - ▶ reliées à certains principes de **symétrie**

- 1 Fondements microscopiques de la physique
- 2 Espace-temps et relativité restreinte**
- 3 Particules élémentaires et composites
- 4 Les quatre interactions fondamentales
- 5 Lois de conservation

# Référentiels inertiels et quadrivecteurs

- Référentiel = réseau 3D d'horloges synchrones
- Pour une particule, **évènement**  $(ct, x, y, z) = (ct, \vec{r})$
- Référentiel **inertiel**  $\iff$  MRU pour toute particule libre
- Transformation de Lorentz : entre deux référentiels inertiels (en MRU relatif)  $(ct, x, y, z) \leftrightarrow (ct', x', y', z')$
- Généralisation : **quadrivecteur**  $A = (A_t, A_x, A_y, A_z) = (A_t, \vec{A})$
- Produit scalaire **invariant**  $A \circ B = A_t B_t - \vec{A} \cdot \vec{B}$
- Norme **pseudo-euclidienne**

$$A^2 = A_t^2 - A_x^2 - A_y^2 - A_z^2 = A_t^2 - \vec{A}^2$$

- ▶  $A^2 > 0$  : type **temps**, cf  $(ct, 0, 0, 0)$
  - ▶  $A^2 < 0$  : type **espace**, cf  $(0, x, y, z)$
  - ▶  $A^2 = 0$  : type **lumière**.
- Exemple : propagation onde lumineuse émise en  $t = t' = \vec{r} = \vec{r}' = 0$  :

$$c^2 t^2 - r^2 = c^2 t'^2 - r'^2 = 0$$

$\Rightarrow$  **invariance de la vitesse de la lumière  $c$**

## Quadrivecteur énergie-impulsion

- Pour une particule de **masse  $m$** , quadrivecteur **énergie-impulsion**

$$P = (E/c, \vec{p})$$

- Énergie totale  $E =$  **énergie de masse** + énergie cinétique

$$E = E_0 + T = mc^2 + T \quad (\approx mc^2 \quad \text{si} \quad T \ll mc^2)$$

$\Rightarrow$  **non-conservation de la masse**

- Impulsion  $\vec{p}$  proportionnelle à la **vitesse  $\vec{v}$**

$$\vec{p} = \frac{E}{c^2} \vec{v} \quad (\approx m\vec{v} \quad \text{si} \quad T \ll mc^2)$$

- Invariance norme de  $Pc$  entre **référentiel propre** ( $\vec{v} = \vec{p} = T = 0$ ) et référentiel quelconque  $\Rightarrow$  relation entre énergie et impulsion

$$E^2 - p^2 c^2 = m^2 c^4 \quad \Longleftrightarrow \quad E = \sqrt{m^2 c^4 + p^2 c^2} = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}$$

# Cas particuliers

- Particule de **masse nulle** :  $m = 0$  (cf **photon**)

$$E = T = pc, \quad v = c$$

- Domaine **ultrarelativiste** :  $T \gg mc^2$  (cf **accélérateurs**)

$$E \approx T \approx pc, \quad v \lesssim c$$

- Domaine **relativiste** :  $T = O(mc^2) \Rightarrow$  pas d'approximation possible !
- Domaine **non relativiste** (cf ce cours) :  $T \ll pc \ll mc^2$

$$E = mc^2 \left( 1 + \frac{p^2}{m^2 c^2} \right)^{1/2} \approx mc^2 + \frac{p^2}{2m}, \quad T \approx \frac{p^2}{2m} \approx \frac{mv^2}{2}, \quad v \approx \frac{p}{m} \ll c$$

uniquement possible pour  $m \neq 0$  (cf **électrons**, **protons**, **neutrons**...)

- 1 Fondements microscopiques de la physique
- 2 Espace-temps et relativité restreinte
- 3 Particules élémentaires et composites**
- 4 Les quatre interactions fondamentales
- 5 Lois de conservation

# Modèle standard des particules élémentaires

- Colonne I : matière **usuelle**
- Colonne II et III : matière **instable**
- Colonne IV : vecteurs des **interactions** (sauf gravitation)
- $\forall$  particule matière,  $\exists$  **antiparticule**
  - ▶ **électron**  $e^- \leftrightarrow$  **positron**  $e^+$   
( $m_e = 9.11 \times 10^{-31}$  kg)
  - ▶ neutrino  $\nu_e \leftrightarrow$  antineutrino  $\bar{\nu}_e$
  - ▶ **photon**  $\gamma \leftrightarrow \gamma$ ,  $W^\pm \leftrightarrow W^\mp$
- Hadrons (sensibles interaction nucléaire forte)
  - ▶ mésons : quark + antiquark
  - ▶ **baryons** : 3 quarks

**proton**  $p^+ = uud$ , **neutron**  $n^0 = ddu$

- Leptons : élémentaires  
(insensibles interaction forte)

Three Generations of Matter (Fermions)

|                      | I                                              | II                                           | III                                          |                                         |
|----------------------|------------------------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------------------|-----------------------------------------|
| mass $\rightarrow$   | 2.4 MeV                                        | 1.27 GeV                                     | 171.2 GeV                                    | 0                                       |
| charge $\rightarrow$ | $\frac{2}{3}$                                  | $\frac{2}{3}$                                | $\frac{2}{3}$                                | 0                                       |
| spin $\rightarrow$   | $\frac{1}{2}$                                  | $\frac{1}{2}$                                | $\frac{1}{2}$                                | 1                                       |
| name $\rightarrow$   | <b>u</b><br>up                                 | <b>c</b><br>charm                            | <b>t</b><br>top                              | <b><math>\gamma</math></b><br>photon    |
| Quarks               | 4.8 MeV                                        | 104 MeV                                      | 4.2 GeV                                      | 0                                       |
|                      | $-\frac{1}{3}$                                 | $-\frac{1}{3}$                               | $-\frac{1}{3}$                               | 0                                       |
|                      | $\frac{1}{2}$                                  | $\frac{1}{2}$                                | $\frac{1}{2}$                                | 1                                       |
|                      | <b>d</b><br>down                               | <b>s</b><br>strange                          | <b>b</b><br>bottom                           | <b>g</b><br>gluon                       |
| Leptons              | $< 2.2$ eV                                     | $< 0.17$ MeV                                 | $< 15.5$ MeV                                 | 91.2 GeV                                |
|                      | 0                                              | 0                                            | 0                                            | 0                                       |
|                      | $\frac{1}{2}$                                  | $\frac{1}{2}$                                | $\frac{1}{2}$                                | 1                                       |
|                      | <b><math>\nu_e</math></b><br>electron neutrino | <b><math>\nu_\mu</math></b><br>muon neutrino | <b><math>\nu_\tau</math></b><br>tau neutrino | <b>Z</b><br>weak force                  |
| Leptons              | 0.511 MeV                                      | 105.7 MeV                                    | 1.777 GeV                                    | 80.4 GeV                                |
|                      | -1                                             | -1                                           | -1                                           | $\pm 1$                                 |
|                      | $\frac{1}{2}$                                  | $\frac{1}{2}$                                | $\frac{1}{2}$                                | 1                                       |
|                      | <b>e</b><br>electron                           | <b><math>\mu</math></b><br>muon              | <b><math>\tau</math></b><br>tau              | <b>W<math>^\pm</math></b><br>weak force |

Bosons (Forces)

[Wikipedia]

+ boson de Higgs-Brout-Englert ?

$$(1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J})$$

# Particules composites usuelles

- Nucléon (**neutron** et **proton**)
  - constitué de **quarks** (baryon)
  - rayon  $\approx 0.8$  fm, avec **1 femtomètre = 1 fermi = 1 fm =  $10^{-15}$  m**
  - masse  $m_n \gtrsim m_p \approx 1.67 \times 10^{-27}$  kg  $\approx 2\,000\, m_e$   
 énergie de masse  $\approx 1$  GeV ( $\gg$  somme masses quarks constitutifs)
- Noyau (ou **noyau atomique**)
  - constitué de **nucléons**
  - ordre de grandeur : **femtomètre**
- Atome (si chargé : **ion**)
  - constitué d'**un noyau** et d'**électrons**
  - ordre de grandeur : **1 ångström = 1 Å =  $10^{-10}$  m**
- Molécule (si chargée : **ion moléculaire**)
  - constituée de plusieurs **atomes**,  
 c-à-d de **plusieurs noyaux** et d'**électrons**
  - ordre de grandeur : **Å**
- Charge = somme des charges constitutives mais  
**masse  $\neq$  somme des masses constitutives**

- 1 Fondements microscopiques de la physique
- 2 Espace-temps et relativité restreinte
- 3 Particules élémentaires et composites
- 4 Les quatre interactions fondamentales**
- 5 Lois de conservation

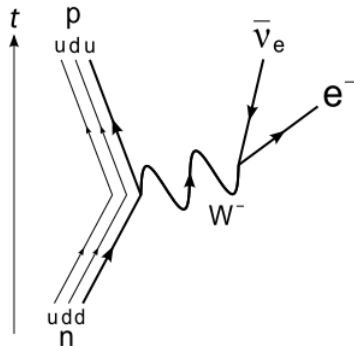
# Propriétés générales et importance physique

| Interaction       | Attractive ou Répulsive | Portée<br><i>a</i> | Ordre de grandeur relatif |
|-------------------|-------------------------|--------------------|---------------------------|
| Gravitationnelle  | A                       | infinie            | $10^{-36}$                |
| Électromagnétique | A/R                     | infinie            | $10^{-2}$                 |
| Nucléaire forte   | A/R                     | $10^{-15}$ m       | 1                         |
| Nucléaire faible  | A/R                     | $10^{-18}$ m       | $10^{-5}$                 |

- Potentiel d'interaction  $V(r) \underset{r \rightarrow \infty}{\sim} \frac{e^{-r/a}}{r}$
- Gravitationnelle : **très faible** ( $\Rightarrow$  pas de rôle ici) mais **toujours attractive** ( $\Rightarrow$  rôle essentiel en macroscopique)
- Électromagnétique : cohésion des **atomes** et **molécules**
- Nucléaire forte : cohésion des **noyaux** atomiques
- Nucléaire faible : relie hadrons et leptons, explique la **radioactivité  $\beta$**

# Désintégration $\beta^-$ du neutron

- Neutron isolé = particule **instable**,  
**durée de vie moyenne**  $\tau = 887 \text{ s}$
- Neutron dans un noyau : peut être stable (noyau stable) ou instable (noyau radioactif  $\beta^-$ )
- Mécanisme symétrique pour un proton : radioactivité  $\beta^+$
- Description théorique
  - ▶ émission **boson de jauge**  $W^-$  **virtuel**, grande masse  $\Rightarrow$  faible portée
  - ▶ désintégration en **antineutrino** et **électron** ( $\ll$  particule  $\beta^- \gg$ )
- (Anti)neutrino : difficilement détectable (découverte : Cowan, Reines, 1956), prédit (Pauli, 1930) car **violation loi de conservation de l'énergie**



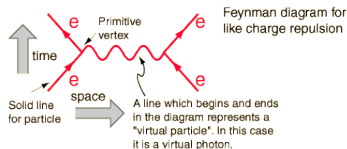
[Wikipedia]

# Vers la grande unification des forces ?

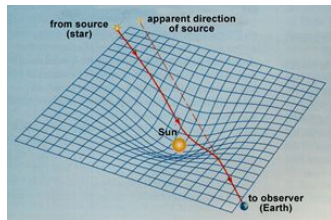
- Unification 3 forces microscopiques
  - ▶ électricité et magnétisme ⇒ **électromagnétisme** (Maxwell, 1862)
  - ▶ électromagnétique et faible ⇒ **électrofaible** (Glashow, Salam, Weinberg, 1960) ⇒ prédiction du **boson de Higgs-Brout-Englert**
  - ▶ forte : chromodynamique quantique

⇒ **théories quantiques des champs**

- Gravitation : **relativité générale** (Einstein, 1916)
    - ▶ énergie-matière  
⇒ **courbure espace-temps**
    - ▶ courbure espace-temps  
⇒ **mouvement** énergie-matière
- ⇒ nature très différente  
⇒ unification (théorie des cordes. . .) ?



[Hyperphysics]



[The Open University]

- 1 Fondements microscopiques de la physique
- 2 Espace-temps et relativité restreinte
- 3 Particules élémentaires et composites
- 4 Les quatre interactions fondamentales
- 5 Lois de conservation**

# Lois de conservation

- Découvertes par **induction** :  
**observation** : valeur d'une grandeur conservée lors d'interactions entre particules  $\Rightarrow$  **loi : grandeur toujours conservée**
- Processus **interdit** si loi violée  $\Rightarrow$  **jamais observé**  
 (mais particules virtuelles en théorie quantique des champs)
- Conservation de l'**énergie**, de l'**impulsion** et du **moment cinétique**
  - ▶ unification énergie et impulsion en relativité restreinte
  - ▶ aussi conservées en mécanique classique (grandeurs **continues**)
  - ▶ ici : **quantification** moment cinétique et énergie de liaison
  - ▶ **non-conservation de la masse** :  
 seule énergie totale conservée (masse + liaison + cinétique),  
 conservation **approximative** si forces peu intenses (cf chimie)
- Conservation de la **charge**, du **nombre leptonique** et du **nombre baryonique**
  - ▶ lepton : nombre leptonique +1, antilepton : nombre leptonique -1
  - ▶ baryon : nombre baryonique +1, antibaryon : nombre baryonique -1
  - ▶ exemple : désintégration  $\beta^-$  du neutron
- $\forall$  loi de conservation,  $\exists$  **symétrie** des lois physiques

Who said gravity was the weakest force in the universe ?

