

# Physique des particules

ULB MA | 2023-2024 | Prof. Barbara CLERBAUX

## Chapitre 1: Introduction et rappels

Notes manuscrites (scannées)

Antoine Dierckx • [ant.dierckx@gmail.com](mailto:ant.dierckx@gmail.com)

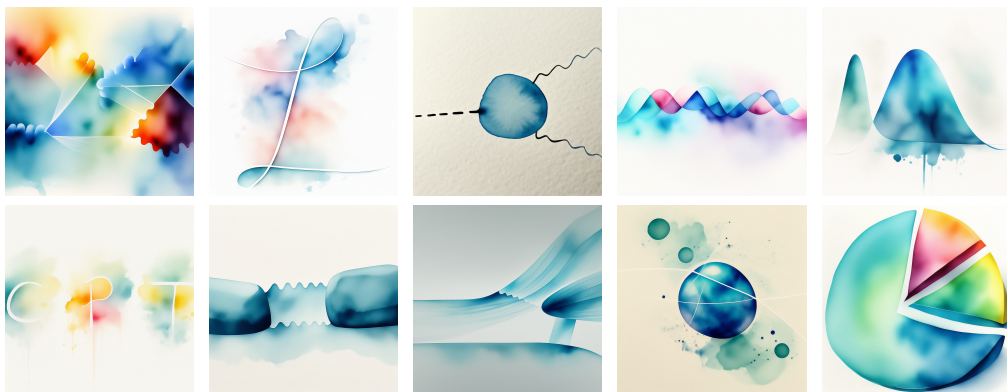
**Attention: uniquement le chapitre 1 ici.** Ce document DocHub contient **uniquement le premier chapitre**. L'ensemble des chapitres, des notes personnelles, des corrections d'exercices et une liste d'ouvrages de référence se trouvent sur mon site web.

- **Tous les chapitres :** voir la page du cours
- **Corrections d'exercices & travaux personnels :** voir la page principale.
- **Ouvrages de référence :** voir la section bouquin.

Accéder au reste : scannez ou cliquez ici



<https://adierckx.github.io/NotesAndSummaries/Master/MA1/PHYS-F-416>



*Avertissement.* Les notes publiées ici sont basées sur ma compréhension des cours et n'ont pas fait l'objet d'un examen ou d'une vérification indépendante. J'espère qu'elles sont utiles, mais il peut y avoir des erreurs ou des inexactitudes. Si vous trouvez des erreurs ou si vous avez des suggestions d'amélioration, n'hésitez pas à me contacter à l'adresse suivante : [ant.dierckx@gmail.com](mailto:ant.dierckx@gmail.com). Merci !

# COURS DE PHYSIQUE DES PARTICULES

## PNVS-F416

### 1 INTRODUCTION ET RAPPELS

#### 1.1 La physique des particules élémentaires

→ Élémentaire : sans structure interne dans la limite de la résolution expérimentale  $\sim 10^{-19}$  m

$$E = 13 \text{ TeV} = 13 \cdot 10^{12} \text{ eV et } \lambda = \frac{h}{p} = \frac{hc}{E} \text{ (m} \sim \text{)} \quad \text{P ou E}$$

$$\text{En Joule, } 1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J. On obtient } \lambda \sim \frac{6,6 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{13 \cdot 10^{12} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}} \approx 10^{-19} \text{ m}$$

→ Particules élémentaires considérées comme ponctuelles, sans dimensions spatiales, avec des propriétés intrinsèques.

→ Informations obtenues essentiellement par leurs interactions/diffusion.

DEF On définit la masse invariante d'un système de particule par

$$(Mc^2)^2 \equiv (\sum E)^2 - \|\sum \vec{p} c\|^2$$

$$\text{Si } c=1, \text{ on a: } M^2 = (\sum E)^2 - \|\sum \vec{p}\|^2$$

→ Production de particules: accélérateurs, faisceaux secondaires, collisionneurs, réacteurs nucléaires, rayonnement cosmique  
 $\hookrightarrow e^-, p, \pi^+, \dots$   $\hookrightarrow e^+, \pi^+, K^+, \dots$   
 $\hookrightarrow n, \nu$   $\hookrightarrow \mu^\pm, \nu, \gamma$

#### 1.2 Particules élémentaires de la matière

Quarks	u	c	t	g	H
	d	s	b	Y	
Leptons	e	$\mu$	$\tau$	$Z^0$	$W^\pm$
	$\nu_e$	$\nu_\mu$	$\nu_\tau$		

↑  
Boson de jauge

Découverte:  $W^\pm$ : 1983

E: 1995

$\nu_e$ : 2000

H: 2012

## ⑥ Nombres quantiques des leptons:

$Q_e$ : charge électrique

$L_i$ : # leptonique

$B$ : # baryonique

→ Les nombres  $L_i, B$  sont phénoménologiques.

	$Q_e$	$L_e$	$L_\mu$	$L_\tau$	$B$
$e^-$	-1	1	0	0	0
$\nu_e$	0	1	0	0	0
$\mu^-$	-1	0	1	0	0
$\nu_\mu$	0	0	1	0	0
$\tau^-$	-1	0	0	1	0
$\nu_\tau$	0	0	0	1	0

## ⑥ Nombres quantiques des quarks:

→ Le nombre quantique des quarks est appelé saveur, ou isospin pour  $u, d$ .

→ Convention: le signe de la saveur d'un quark est le même que celui de sa charge électrique  $Q_e$ .

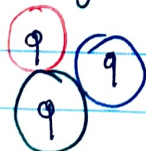
quark	$Q_e$	$B$	$S$	$C$	$\tilde{B}$	$T$	$I_3$
up	2/3	1/3	0	0	0	0	1/2
down	-1/3	1/3	0	0	0	0	1/2
charmé	2/3	1/3	0	1	0	0	0
étrange	-1/3	1/3	-1	0	0	0	0
top	2/3	1/3	0	0	0	1	0
beau	-1/3	1/3	0	0	-1	0	0

## ⑥ Les hadrons:

→ Les quarks sont confinés par l'IF (interaction forte) dans des systèmes liés: les singulets de couleurs (= particules non-colorées), les hadrons.  $\exists$  3 charges de couleur pour les quarks et l'anti-couleur correspondante pour les anti-quarks.

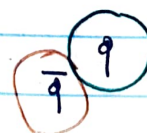
→ L'IF est attractive entre couleur  $\neq$  ou anti-couleur  $\neq$ , et entre couleur et anti-couleur. On distingue:

Baryons



→ spin  $\frac{N}{2}$ : fermion

Mésons



→ spin  $N$ : boson

→ Ces 3  $q$  ou paire  $\bar{q}q$  sont les quarks de valence qui fixent les # $Q$  des hadrons.  $\exists$  une infinité de gluons et de paires  $\bar{q}q$  de la mer.



## ⊙ Masse des quarks:

→ Compliquée à déterminer, pas modèle et/ou des produits de désintégration

## 1.3 Interactions fondamentales

→ Caractérisée par leur constante de couplage  $\alpha$  de l'interaction.  
Définie en comparant les énergies potentielles d'interaction d'une particule pour les 4 interactions

Interaction	Intensité	Effet
Forte	$\alpha_s \sim 1$	lie les q dans les nucléons
Electromagnétique	$\alpha_{em} = \frac{e^2 G}{\hbar c} \sim \frac{1}{137}$	lie les e <sup>-</sup> aux noyaux
Faible	$\alpha_f \sim 10^{-5}$	désintégration
Gravitation	$\alpha_g \sim 10^{-38}$	lie des objets de grande masse

## ⊙ Particules messagères:

→ le Modèle Standard de la physique des particules (MS) décrit 3 forces fondamentales: I<sub>em</sub>, I<sub>f</sub>, I<sub>g</sub>. Elles suivent un mécanisme d'échange de particules messagères ou bosons intermédiaires de spin 1.

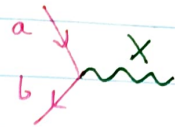
Ces bosons transmettent  $\vec{p}$  et  $Q$  entre particules.

Le principe d'incertitude de Heisenberg autorise une non conservation de l'énergie sur un  $\Delta t$  court. Les bosons sont alors dit virtuels

Nom	$\alpha$	Particules subissantes	Portée	Quanta	Domaine d'action	Charge
Forte	1	Quark Hadrons	$10^{-15}$	8 gluons	barions, mesons, nucléons	couleur
Electromagnétique	$10^{-2}$	part. électri. chargée	$\infty$	photon	atomes, optique, électricité	charge électrique
Faible	$10^{-5}$	$e^\pm, \nu$ , quarks	$10^{-18}$	$W^\pm, Z^0$	Beta, $\pi$ , muons	charge faible
Gravitationnelle	$10^{-38}$	part. massive	$\infty$	?	orbite, trou noir	masse

## ③ Portée des forces:

→ Estimée en utilisant le principe d'incertitude d'Heisenberg:  
Considérons le vertex élémentaire où le boson intermédiaire  $X$  est émis. Plaçons nous dans le CM de la particule émettrice.



La conservation de l'énergie est violée de:

$$\Delta E = \sqrt{m_b^2 + p^2} + \sqrt{m_x^2 + (-p)^2} - m_a$$

$$\Delta E_{\min} = m_b + m_x - m_a \quad (\text{si } p=0)$$

$$\text{Or, } \Delta E \cdot \Delta t \leq \hbar \Rightarrow \Delta t \leq \frac{\hbar}{|\Delta E_{\min}|}$$

$$\text{En approximant } v_x \sim c, \text{ on a } \Delta r \leq c \Delta t \leq \frac{\hbar c}{\Delta E_{\min}}$$

Pour l'Im,  $m_\gamma = 0 \sim$  portée infinie

Pour l'If (sauf t),  $|m_a - m_b| \ll m_x \sim 80 \text{ GeV}/c^2$

$$\hookrightarrow \Delta E_{\min} \sim m_x \text{ et } \Delta r \leq \frac{\hbar c}{m_x} = \frac{197 \text{ MeV} \cdot \text{fm}}{80 \cdot 10^3 \text{ MeV}} \sim 2 \cdot 10^{-3} \text{ fm} \sim 2 \cdot 10^{-12} \text{ m}$$

## 1.4 Le modèle standard

### ③ Lagrangien du MS:

$$L_{MS} = L_{\text{cinétique}} + L_{\text{BEH}} + L_{\text{Yukawa}}$$

où  $L_{\text{cin}}$ : fermions + bosons de jauge + interaction

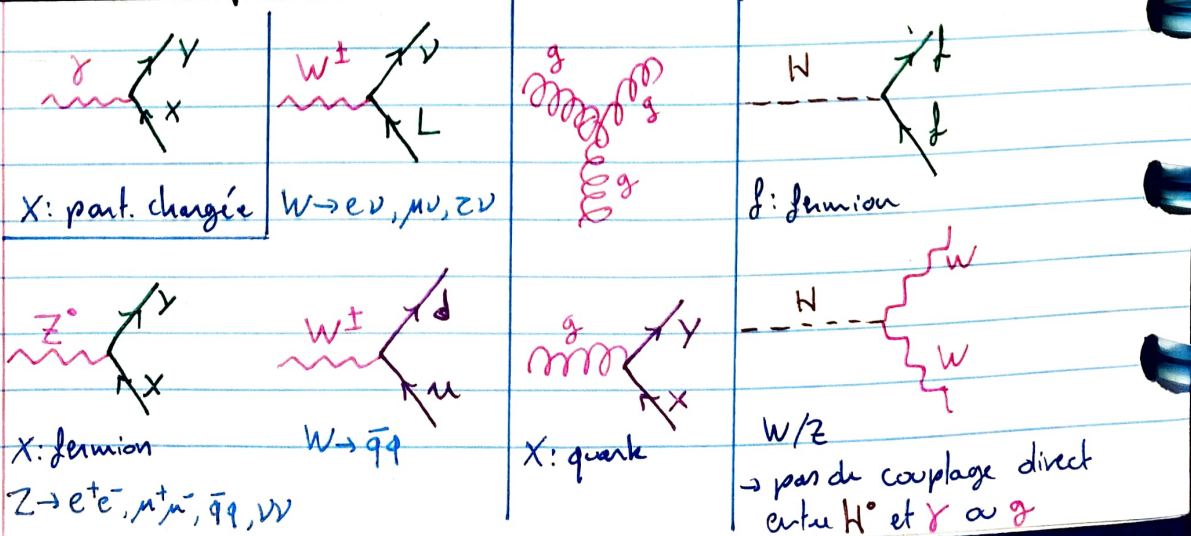
$L_{\text{BEH}}$ : champ et potentiel scalaire)

brisure BEH (après brisure:  $Z^0, W^\pm$  massif et  $H^0$  apparaît)

$L_{\text{Yuk}}$ : Interaction champ scalaire - fermions (masse des fermions).

→ Lagrangien invariant sous  $G = U(1)_Y \times SU(2)_L \times SU(3)_C$

### ③ Interactions possibles:





- le MS possède  $\sim 20$  paramètres libres (insatisfaisant).
- La plupart des particules élémentaires sont instables.

## **[2] SYMETRIES ET LOI DE CONSERVATION**

### 2.1 Théorème de Noether

#### ① Symétries

→ Loi de la physique symétriques si invariante sous certaines transformation.

ex: gravité de Newton invariante sous  $SO(3)$  car le champ gravitationnel est le même  $\forall$  directions.

→  $\forall$  symétrie  $\leftrightarrow$  groupe de transformation qui laisse le  $\mathcal{L}$  ou  $\mathcal{H}$  invariant.

#### ② Version classique:

THM Emmy Noether (1917):

A toute invariance du lagrangien pour une transformation donnée, correspond une intégrale première ou constante du mouvement.

Symétrie	Loi de conservation
Translation de temps	Energie
Translation d'espace	Quantité de mouvement
Rotation d'espace	Moment angulaire

→ ces symétries expriment le caractère isotrope, homogène et indépendant du temps des lois physiques.

#### ③ Version quantique non relativiste:

→ En mécanique quantique, ces symétries s'expriment par un opérateur unitaire  $\hat{Q}$  (unitaire  $Q^*Q = QQ^* = \mathbb{1}$ ) qui commute avec l'hamiltonien.

Soit le système dans un état  $\Psi$ .

→ mesure physique:  $\langle q \rangle = \int \Psi^* \hat{Q} \Psi dV$  valeur moyenne d'un opérateur

TNM  $\langle p \rangle$  est constante du mouvement  $\Leftrightarrow [\hat{Q}, \hat{H}] = 0 \Leftrightarrow \hat{H} = \hat{Q}^{-1} \hat{H} \hat{Q}$