

Introduction à la physique des particules

Module PHYS805, Master 1^{re}année

Notes de cours

Damir BUSKULIC, Université de Savoie

Chapitre 1

Panorama, notions de base et zoologie (1.5)

Pour une approche vulgarisatrice : <http://elementaire.lal.in2p3.fr/>

1.1 Un peu d'histoire

- Les grecs : matière = eau, air, terre, feu puis atome (Démocrite, 460 Av. J.C à Abdera, Thrace, Grèce)
- Modèle actuel a émergé au cours du siècle dernier :
 - électron découvert en 1897 par J.J. Thomson
 - proton découvert en 1919 par Rutherford, nommé vers 1920
 - neutron découvert en 1932 par Chadwick
 - neutrino postulé par Pauli (1930), mis en évidence par Reines et Cowan (1956)
 - Notion de quarks introduite en 1964 par M. Gell-Mann. Pas de mise en évidence claire avant 1969 (structure ponctuelle du nucléon à SLAC, Stanford Linear Accelerator Center)
proton = uud, neutron = udd
 - Autres particules, dont les plus marquantes :
 - 1935, hypothèse de Yukawa : la force nucléaire est due à l'échange de particules massives, les mésons
 - le muon μ (Anderson, Neddermeyer, 1936) qu'on pensait au départ être le méson de Yukawa
 - le méson π (Powell, 1947)
 - particules K^0 et Λ (Rochester et Butler, 1947), durée de vie "étrangement" longue. Nouveau nombre quantique, l'étrangeté.



FIG. 1.1 –

Voir Fig. 1.1

Nous verrons qu'il y a quatre types d'interactions :

- gravitationnelle (Newton, fin du XVII^e, Einstein, 1915)
- électromagnétique :
 - Electromagnétisme, Maxwell, 1865 puis
 - Théorie quantique de l'électrodynamique (QED = Quantum Electrodynamics), Feynman, Schwinger et Tomonaga, 1946-1950
- faible (théorie de Fermi de la désintégration β , 1933/34)
- forte :
 - force nucléaire grâce aux mésons, Yukawa, 1935
 - QCD = Quantum Chromodynamics, Politzer, Wilczek, Gross, 1973

1.2 Unités naturelles

Dans le monde macroscopique, unités du système international (SI) :

[longueur]_{SI} = 1 m

[temps]_{SI} = 1 s

[masse ou énergie]_{SI} = 1 kg ou 1 Joule

En physique des particules, les vitesses sont relativistes et les propriétés quantiques non négligeables. En outre, deux constantes :

- vitesse de la lumière : $c = 3 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$

- quantum de moment cinétique : $\hbar = 1,054 \times 10^{-34} \text{ J.s} = 6,58 \times 10^{-22} \text{ MeV.s}$

Il est plus facile de travailler avec des unités dites "naturelles", dans le "Système d'Unités Naturelles" (SUN) :

- Energie en eV, ou MeV ou GeV ($1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$, M = Mega, G = Giga)
- [vitesse] $_{SUN} = 1 c$
[moment cinétique] $_{SUN} = 1 \hbar$
[masse ou énergie] $_{SUN} = 1 \text{ eV}$

Dans ce système, on a

$$\hbar = c = 1 \quad (1.1)$$

et on exprime les masses sous forme d'énergie (ex : masse de l'électron = 0,511 MeV)

Exercice : exprimer le mètre et la seconde en unités naturelles

Avantages du système d'unités naturelles :

- $\hbar$ et c sont définis exactement ($\hbar = c = 1$)
- les équations se simplifient beaucoup

$$E^2 = p^2 c^2 + m^2 c^4 \implies E^2 = p^2 + m^2 \quad (1.2)$$

Mais on en abusera pas !

1.3 Composition de la matière

1.3.1 Matière ordinaire

On définit les particules fondamentales comme les constituants de la matière ne possédant aucune sous-structure. Ça a toujours été temporaire (atome = "insécable" chez les grecs...). Pour le moment, la matière ordinaire est formée des particules suivantes :

	quarks		leptons	
	u	d	e^-	ν_e
Charge	2/3	-1/3	-1	0
Masse	1 – 4 MeV	4 – 8 MeV	511 keV	< 3 eV

Les particules de matière sont des fermions (spin 1/2), que l'on classe en deux catégories :

- les leptons ("leptos"=léger)

- pas d'interaction forte
- charge électrique entière
- charge "faible" $\rightarrow$ doublet d'interaction faible
- les quarks (roman "Finnegans Wake" de James Joyce : "Three Quarks for Muster Mark!"), formant la matière nucléaire
 - soumis à l'interaction forte
 - charge électrique fractionnaire
 - charge "faible" $\rightarrow$ doublet d'interaction faible
 - on leur associe une charge colorée (couleur) $\rightarrow$ triplet d'interaction forte

1.3.2 Plus de familles

Il existe deux autres familles de fermions, réplique de la première, aux masses près :

	quark +2/3	quark -1/3	lepton ⁻	neutrino
1ère	u	d	e ⁻	ν_e
2ème	c 1974	s 1947	μ^- 1936	ν_μ 1962
3ème	t 1993	b 1977	τ^- 1975	ν_τ

"u" = up, "d" = down, "s" = strange/étrange, "c" = charm/charme, "b" = beauty/beauté, "t" = top ou truth

Mais ces particules sont instables, c'est à dire qu'elles ont une durée de vie non infinie et se désintègrent en donnant finalement des particules de la première famille.

leptons	e ⁻	ν_e	μ^-	ν_μ	τ^-	ν_τ
Masse	511 keV	< 3 eV	106 MeV	< 190 keV	1777 MeV	< 18.2 MeV
τ			2.197 μ s		290.6 $\times 10^{-15}$ s	
quarks	u	d	s	c	b	t
Masse	~ 3 MeV	~ 6 MeV	~ 100 MeV	~ 1.25 GeV	~ 4.5 GeV	~ 175 GeV
τ			$\sim 10^{-10}$ s	$\sim 10^{-12}$ s	$\sim 10^{-12}$ s	$\sim 10^{-23}$ s

1.4 Les interactions

Force, désintégration = interaction au niveau des particules fondamentales

Interaction entre particules = échange d'un "quantum de champ", comme par exemple le photon, quantum du champ e.m. = échange de particules appelées bosons de jauge

1935, Yukawa propose connexion entre la portée d'une interaction et la masse du quantum échangé pendant l'interaction. Considérons l'échange virtuel d'un boson de masse m , qui ne peut se produire qu'en un temps (principe de Heisenberg) :

$$\Delta t \approx \frac{\hbar}{\Delta E} \approx \frac{\hbar}{m} \quad (1.3)$$

la portée maximale est donc :

$$R = c\Delta t = \Delta t \approx \frac{1}{m} \quad (1.4)$$

relation entre la portée de l'interaction R et la masse m du boson (quantum) échangé.

Dans l'approche de Yukawa, l'énergie potentielle entre deux particules en interaction est de la forme :

$$E(r) = \frac{g^2}{4\pi} \frac{e^{-mr}}{r} = \frac{g^2}{4\pi} \frac{e^{-\frac{r}{R}}}{r} \quad (1.5)$$

Ceci peut être expliqué à l'aide de l'équation de Klein-Gordon, vue dans une section suivante. g est la constante de couplage de l'interaction.

Portée

- très courte pour interactions faibles ($\sim 10^{-3}$ fm)
- infinie pour interaction e.m. et forte (finie pour cette dernière, mais pour d'autres raisons)

Si l'on ne tient pas compte de la gravitation, qui est un peu à part, on a la figure suivante :

	q	e ⁻	v	Boson	Masse	couplage ²
électromagnétique	×	×	—	γ (photon)	$< 6 \times 10^{-17}$ eV	$\alpha = 1/137$
faible chargée	×	×	×	$W^\pm$	80.425 GeV	$\sim 1/137$
faible neutre	×	×	×	Z	91.188 GeV	$\sim 1/137$
forte/couleur	×	—	—	g (gluon)	0 ?	$\alpha_s \sim 0.1-0.3$

1.5 Catégories de particules

1.5.1 Anti particules

Existence d'antiparticules

- même masse, spin et temps de vie que les particules
- charges opposées
- notées $\bar{X}$ pour particule X : $\bar{u}, \bar{d}, \bar{s}, \dots$
- antiparticule de l'électron, positron $e^+ = e^-$ (Anderson, 1932), anti-neutrino $\bar{\nu}$, antiproton $\bar{p}$, etc...

1.5.2 Hadrons

Nous avons vu ce que sont les **leptons** et les **quarks**, que nous considérons comme des particules élémentaires.

Autres catégories de particules, les **hadrons** sont des états liés de quarks et d'anti-quarks. Il y en a plus de 200 différents.

- interagissent par tous les types d'interaction
- charge électriques entières (multiple de la charge de l'électron)

Il y a deux catégories, les **baryons** et les **mésons**

1.5.3 Baryons

Ils sont constitués de 3 quarks (et/ou anti-quarks), sont instables sauf le proton (cas du neutron un peu spécial). Portent un nombre quantique dit "nombre baryonique" qui se conserve dans les interactions.

	Composition	Masse/ GeV	Charge	Spin	τ/s
p, n	uud, udd	0.938, 0.940	+, 0	1/2	$>7 \times 10^{36}, 886$
N(1440)	uud, udd	1.440	+, 0	1/2	$\sim 10^{-23}$
$\Delta(1232)$	uuu, uud, udd, ddd	1.230	++, +, 0, -	3/2	$\sim 10^{-23}$
Λ	uds	1116	0	1/2	2.6×10^{-10}
Σ	uus, uds, dds	1.189, 1.193, 1.197	+, 0, -	1/2	$\sim 10^{-10}(\pm), \sim 10^{-19}(0)$
Ξ	uss, dss	1.315, 1.321	0, -	1/2	$\sim 2 \times 10^{-10}$
Ω	sss	1.672	-	3/2	0.8×10^{-10}

1.5.4 Mésons

Constitués de 2 quarks (et/ou anti-quarks). Tous instables, temps de vie des plus stables :

- $\pi \sim 10^{-8} \text{ s}$

- $K \sim 10^{-8}$ s
- $D \sim 10^{-12}$ s
- $B \sim 10^{-12}$ s
- autres $\sim 10^{-23}$ s

	Composition	Masse/ GeV	Charge	Spin
π, ρ	$\underline{u}\underline{d}, \underline{u}\underline{u} - \underline{d}\underline{d}, \underline{d}\underline{u}$	0.140, 0.770	+, 0, −	0, 1
K, K^*	$\underline{u}\underline{s}, \underline{d}\underline{s}$	0.495, 0.890	+, 0	0, 1
η, ω, η'	$\underline{u}\underline{u} + \underline{d}\underline{d} + \underline{s}\underline{s}$	0.547, 0.782, 0.958	0	0, 1
ϕ	$\underline{s}\underline{s}$	1.020	0	1
D	$\underline{c}\underline{u}, \underline{c}\underline{d}, \underline{c}\underline{s}$	1.869, 1.865, 1.968	0, +, +	0
B	$\underline{b}\underline{u}, \underline{b}\underline{d}, \underline{b}\underline{s}$	5.279, 5.279, 5.370	−, 0, 0	0

1.6 Rappels de relativité, invariants relativistes

1.6.1 Transformation de Lorentz

Pour passer d'un référentiel I à un référentiel II en mouvement uniforme selon l'axe z par rapport au premier, transformation de Lorentz comparée à la transformation de Galilée :

$$\begin{aligned} z' &= z - vt & \longrightarrow & \quad z' = \gamma(z - \beta ct) \\ t' &= t & \longrightarrow & \quad ct' = \gamma(ct - \beta z) \end{aligned}$$

Où on définit

$$\beta = \frac{v}{c} \text{ et } \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} \quad (1.6)$$

Dans l'autre sens :

$$\begin{aligned} z &= z' + vt' & \longrightarrow & \quad z = \gamma(z' + \beta ct') \\ t &= t' & \longrightarrow & \quad ct = \gamma(ct' + \beta z') \end{aligned}$$

Moyen de s'en rappeler :

- partir de la transformation de Galilée
- changer vt en βct
- factoriser γ
- recopier pour t/t' en échangeant z/z' et ct/ct'

1.6.2 Quadri-vecteur énergie-impulsion (ou énergie-quantité de mouvement)

Energie et quantité de mouvement d'une particule de masse m au repos, l'exposant $*$ représente les quantités dans le système du centre de masse .

$$E^* = mc^2 \text{ et } \mathbf{p}^* = 0 \quad (1.7)$$

Pour des particules en mouvement à la vitesse β selon l'axe z :

$$E = m\gamma c^2, p_z = m\gamma c\beta \text{ et } p_x = p_y = 0 \quad (1.8)$$

On a la relation :

$$E^2 - \mathbf{p}^2 c^2 = m^2 c^4 \Rightarrow E = \sqrt{\mathbf{p}^2 c^2 + m^2 c^4} \quad (1.9)$$

Les transformations de Lorentz pour ces quantités s'écrivent :

$$\begin{aligned} E &= \gamma(E^* + \beta p_z^* c) & E^* &= \gamma(E - \beta p_z c) \\ p_z c &= \gamma(p_z^* c + \beta E^*) & p_z^* c &= \gamma(p_z c - \beta E) \\ p_x &= p_x^* & p_x^* &= p_x \\ p_y &= p_y^* & p_y^* &= p_y \end{aligned} \quad (1.10)$$

Mêmes équations qu'au dessus en changeant ct en E et $\mathbf{r}$ en $\mathbf{p}$
Les réécrire dans le système d'unités naturelles.

1.6.3 Quadri-vecteurs

Objets à 4 composantes qui se transforment comme $r \equiv (ct, \mathbf{r})$ ou $E \equiv (E, \mathbf{p}c)$. On note $X \equiv (X_0, \mathbf{X})$ ou (X_0, X_1, X_2, X_3) ou (X_0, X_x, X_y, X_z)

Exemples : sommes de positions, sommes d'impulsions (quantités de mouvement, potentiel électromagnétique : $A \equiv (cV, \mathbf{A})$).

Propriétés :

- Norme : $X^2 = X_0^2 - \mathbf{X}^2$
- Produit scalaire : $X.Y = X_0 Y_0 - \mathbf{X} \cdot \mathbf{Y} = X_0 Y_0 - X_1 Y_1 - X_2 Y_2 - X_3 Y_3$
Astuce : $X.Y = \frac{1}{2} [(X + Y)^2 - X^2 - Y^2]$
- Le produit scalaire de deux quadri-vecteurs (et donc aussi la norme) est un invariant relativiste, sa valeur est constante d'un référentiel à l'autre

1.7 Mécanique quantique

Juste pour voir comment on passe à la mécanique quantique relativiste (puis éventuellement à la théorie quantique des champs)...

1.7.1 Equation d'onde de Schrödinger

Equation obtenue en définissant l'hamiltonien d'une particule libre non relativiste dans un potentiel V , sa relation avec l'énergie, puis (postulat MQ) en identifiant les quantités classiques aux opérateurs quantiques :

$$E = \frac{\mathbf{p}^2}{2m} + V \quad \xrightarrow{\text{substitution MQ}} \quad \left(\frac{(-i\hbar\nabla)^2}{2m} + V \right) \psi = i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} \quad (1.11)$$

L'équation finale est bien :

$$\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \psi + V \psi = i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} \quad (1.12)$$

1.7.2 Equation de Klein-Gordon

Si on veut traiter le cas relativiste, on part naturellement de la conservation du quadri-vecteur énergie-impulsion :

$$E^2 - \mathbf{p}^2 = m^2 \quad \xrightarrow{\text{substitution MQ}} \quad \left(i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \right)^2 \psi - (-i\hbar \nabla)^2 \psi = m^2 \psi \quad (1.13)$$

Ce qui donne l'équation de Klein-Gordon :

$$-\frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} + \nabla^2 \psi = m^2 \psi \quad (1.14)$$

Cette équation décrit les bosons (spin entier), mais elle souffre de problèmes d'interprétation liés à l'existence de densités de probabilité de présence négatives dans un cadre de MQ standard. Le cadre correct pour traiter les ensembles de particules relativistes est la *théorie quantique des champs*

