

# Physique des particules

Introduction aux concepts et au formalisme  
du modèle standard



# Physique des particules

Introduction aux concepts et au formalisme  
du modèle standard


**Benoît Clément**

**Maître de conférences à l'université Grenoble Alpes**

**2<sup>e</sup> édition**

DUNOD

Illustration de couverture : © Klavdiya Krinichnaya/shutterstock.com

<p>Le pictogramme qui figure ci-contre mérite une explication. Son objet est d'alerter le lecteur sur la menace que représente pour l'avenir de l'écrit, particulièrement dans le domaine de l'édition technique et universitaire, le développement massif du photocopillage.</p> <p>Le Code de la propriété intellectuelle du 1<sup>er</sup> juillet 1992 interdit en effet expressément la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Or, cette pratique s'est généralisée dans les établissements</p>	 <p><b>DANGER</b> LE PHOTOCOPIAGE TUE LE LIVRE</p>	<p>d'enseignement supérieur, provoquant une baisse brutale des achats de livres et de revues, au point que la possibilité même pour les auteurs de créer des œuvres nouvelles et de les faire éditer correctement est aujourd'hui menacée.</p> <p>Nous rappelons donc que toute reproduction, partielle ou totale, de la présente publication est interdite sans autorisation de l'auteur, de son éditeur ou du Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC, 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).</p>
--	---	--

© Dunod, 2013, 2017  
11, rue Paul Bert, 92240 Malakoff  
[www.dunod.com](http://www.dunod.com)  
ISBN 978-2-10-076171-5

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2° et 3° a), d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

# Table des matières

<b>Avant-propos</b>	VII
<b>Chapitre 1 Particules et interactions</b>	1
1. La matière ordinaire	1
2. Outils formels	4
3. D'autres particules	5
4. Le modèle standard	10
L'essentiel	14
Entraînez-vous	15
<b>Chapitre 2 Notions de physique moderne</b>	17
1. Relativité restreinte	17
2. Mécanique analytique	24
3. Mécanique quantique	30
L'essentiel	37
Entraînez-vous	38
<b>Chapitre 3 Seconde quantification</b>	41
1. Ensemble de particules identiques	41
2. Représentation des états d'occupation	44
3. Opérateurs de création et d'annihilation	45
4. Construction d'opérateurs	48
5. Opérateurs de champ	50
L'essentiel	53
Entraînez-vous	54
<b>Chapitre 4 Champs quantiques libres</b>	55
1. Champ scalaire	56
2. Champ spinoriel	59
3. Champ vectoriel	64
4. Spin et représentations	66
5. Quantification du champ	68
L'essentiel	72
Entraînez-vous	73

<b>Chapitre 5</b>	<b>Champs en interaction</b>	75
1.	Interaction de jauge	75
2.	Brisure spontanée de symétrie	78
3.	Le lagrangien du modèle standard	82
	L'essentiel	87
	Entraînez-vous	88
<b>Chapitre 6</b>	<b>Diagrammes de Feynman</b>	89
1.	Processus de diffusion	89
2.	Calcul des éléments de matrice	94
3.	Règles et diagrammes de Feynman	98
4.	Les vertex du modèle standard	102
5.	Renormalisation	105
	L'essentiel	109
	Entraînez-vous	110
<b>Chapitre 7</b>	<b>Le zoo des hadrons</b>	113
1.	Classification des hadrons	113
2.	Modèle des quarks	120
3.	Chromodynamique quantique	124
	L'essentiel	128
	Entraînez-vous	129
<b>Chapitre 8</b>	<b>Oscillations de neutrinos</b>	131
1.	Caractéristiques des neutrinos	131
2.	Mécanisme d'oscillation	133
3.	Oscillations à trois familles	136
	L'essentiel	139
	Entraînez-vous	140
	<b>Au-delà du modèle standard</b>	141
	<b>Quelques particules</b>	147
	<b>Solutions</b>	155
	<b>Bibliographie</b>	179
	<b>Index</b>	181

# Avant-propos

La physique des particules est une science récente. La première particule, au sens moderne du terme, fut l'électron découvert en 1897 et le formalisme théorique permettant de décrire correctement les différentes observations expérimentales n'a trouvé sa forme actuelle que dans les années 1970 comme une extension à la fois de la théorie quantique et de la relativité restreinte.

Cet ouvrage vise à présenter une vision moderne de la physique des particules de manière abordable mais sans occulter les concepts formels sur lesquels elle repose. L'exposé présuppose que le lecteur soit familier avec les concepts de la mécanique analytique, de la mécanique quantique et de la relativité, qui seront brièvement rappelés au chapitre 2. Nous décrirons ainsi les lagrangiens pour des particules libres (chapitres 3 et 4), le principe d'invariance de jauge conduisant au lagrangien d'interaction ainsi que le mécanisme de brisure spontanée de symétrie, introduisant le mécanisme de Higgs (chapitre 5). À chaque étape, nous nous limiterons au cas le plus simple, ce qui nous permettra de nous affranchir des concepts de théorie des groupes et de calcul tensoriel. Avec ce formalisme allégé nous pourrions néanmoins illustrer les principaux concepts théoriques. L'extension au modèle standard complet serait formellement plus complexe mais ne repose sur aucune nouvelle idée. Le chapitre 6 se consacrera aux principes du calcul des observables physiques dans les processus de diffusion, toujours en se limitant au cas le plus simple pour illustrer les concepts. Enfin les deux derniers chapitres traiteront de deux aspects particuliers de la physique des particules : les états liés de l'interaction forte au chapitre 7 et la physique des neutrinos au chapitre 8.

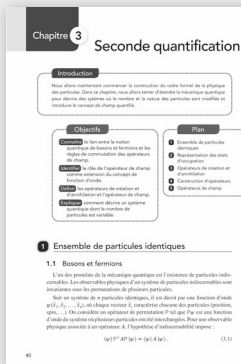
L'essentiel du contenu de cet ouvrage repose sur des cours donnés en première et seconde années de master de physique fondamentale à l'Université Joseph Fourier de Grenoble. Il n'existerait pas sans la contribution de nombreux collègues du Laboratoire de Physique Subatomique et de Cosmologie (LPSC). Je tiens particulièrement à remercier Arnaud Lucotte qui a patiemment relu ce document, ainsi que Michael Klasen, Ingo Schienbein et Yannick Arnoud.

# À la découverte de votre livre

## 1 Ouverture de chapitre

Elle donne :

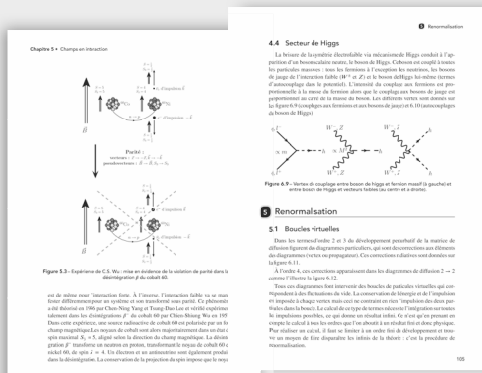
- une **introduction** aux sujets et aux problématiques abordés dans le chapitre
- un rappel des **objectifs** pédagogiques
- le **plan** du chapitre



## 2 Le cours

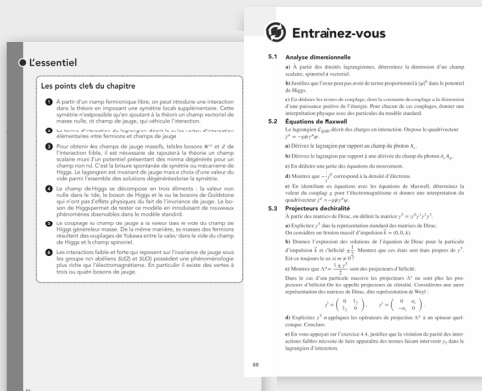
Le cours concis et structuré, expose le programme. Il donne :

- un rappel des **définitions** clés
- des **schémas** pour maîtriser le cours



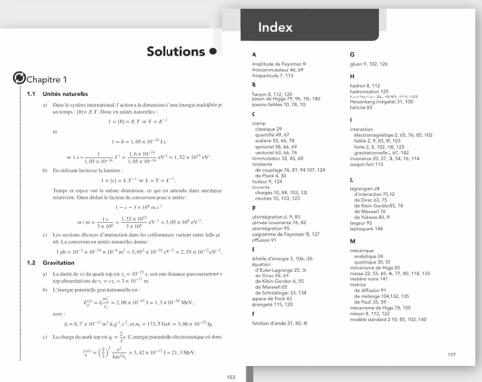
## 3 En fin de chapitre

- **L'essentiel** : les points clés pour réviser les connaissances essentielles
- Des **exercices** pour tester ses connaissances et s'entraîner



## 4 En fin d'ouvrage

- Des **annexes**
- Les **corrigés** des exercices
- Une **bibliographie**
- Un **index**





## Introduction

Dans toute étude physique, il est essentiel de commencer par définir le système à décrire. Dans notre cas, il s'agit de définir ce que sont les particules et leurs interactions. La nature du système physique va également imposer le cadre formel dans lequel un modèle théorique pourra être développé. En partant de la structure de la matière ordinaire et en ajoutant d'autres particules découvertes tout au long du XX<sup>e</sup> siècle, nous allons ainsi tracer les contours du modèle standard de la physique des particules.

## Objectifs

**Connaître** les particules et interactions du modèle standard.

**Identifier** le cadre théorique dans lequel décrire la physique des particules.

**Définir** le système physique étudié ainsi que le système d'unités approprié.

**Expliquer** la construction historique de la physique des particules.

## Plan

- 1 La matière ordinaire
- 2 Outils formels
- 3 D'autres particules
- 4 Le modèle standard

## 1 La matière ordinaire

### 1.1 Particules et interactions

La matière qui nous entoure est composée d'atomes en interaction les uns avec les autres. Il existe une centaine d'espèces chimiques différentes et cette multiplicité s'explique par une sous-structure : au cœur de l'atome le noyau est composé de protons, chargés positivement, et de neutrons, neutres comme leur nom l'indique. Ce noyau est entouré d'un cortège d'électrons, chargés négativement, en même nombre que les protons pour assurer la neutralité électrique de l'atome. Toute la matière ordinaire est ainsi composée de trois briques fondamentales :  $p$ ,  $n$  et  $e^-$ . Elles possèdent toutes un moment cinétique intrinsèque de spin  $J = \frac{1}{2}$ . Ce sont donc des fermions qui vérifient le principe d'exclusion de Pauli. Ce principe postule que deux fermions ne peuvent occuper le même état quantique et permet ainsi d'assurer l'existence de matière.

L'essentiel de la physique de la matière (physique atomique, physique de la matière condensée, chimie) est gouvernée par une unique interaction, l'électromagnétisme. Dans sa formulation classique cette interaction est décrite par un champ électromagnétique dont l'évolution suit les équations de Maxwell. La théorie quantique unifie les concepts classiques de particule et de champ, en un unique objet que nous continuerons d'appeler « particule » par la suite. Ainsi, la quantification du champ électromagnétique se traduit sous la forme d'une nouvelle particule, le photon  $\gamma$ . C'est une particule de spin  $J = 1$ , soit un boson.

La physique nucléaire, qui s'intéresse aux propriétés du noyau atomique, nécessite d'introduire deux interactions (ou forces) supplémentaires :

- L'interaction nucléaire forte assure la cohésion du noyau. Ce dernier étant composé uniquement de charges électriques positives et nulles devrait naturellement se dissocier sous l'effet de la répulsion coulombienne. La stabilité du noyau (et donc de la matière) ne peut alors s'expliquer que s'il existe une autre interaction attractive entre neutrons et protons. Cette force doit avoir une intensité supérieure à celle de l'interaction électromagnétique, d'où son nom d'interaction forte.
- L'interaction nucléaire faible est responsable de la désintégration de certains noyaux. Cette désintégration change un proton en neutron et inversement, ce qui n'est possible ni par interaction électromagnétique ni par interaction forte. Il faut donc une troisième force, l'interaction faible, pour décrire ces phénomènes.

Ces deux interactions n'ont aucune influence, ni à l'échelle macroscopique ni même à l'échelle atomique. Ce sont des interactions à courte portée (de l'ordre de la taille du noyau, voire plus petite), alors que l'interaction électromagnétique a une portée infinie.

Une dernière interaction décrit la dynamique des corps massifs : la gravitation. En se limitant à une approche classique, on peut comparer les forces électromagnétique et gravitationnelle entre deux électrons de masse  $m_e = 9,11 \times 10^{-31}$  kg et de charge  $q_e = -1,6 \times 10^{-19}$  C :

$$\frac{F_{\text{gravitation}}}{F_{\text{électrique}}} = \frac{\frac{Gm_e^2}{r^2}}{\frac{q^2}{4\pi\epsilon_0 r^2}} = \frac{G m_e^2 4\pi\epsilon_0}{q^2} \approx 4 \times 10^{-42}, \quad (1.1)$$

où  $G = 6,67 \cdot 10^{-11}$  N.m<sup>2</sup>.kg<sup>-2</sup> est la constante de gravitation de Newton et  $\frac{q_e^2}{4\pi\epsilon_0} \approx \frac{1}{137}$  est la constante de structure fine, qui caractérise l'intensité de l'interaction électromagnétique. L'intensité de la force électromagnétique est 42 ordres de grandeur plus forte que celle de la gravitation. Aux échelles d'énergie qui concernent la physique des particules, les effets gravitationnels sont complètement négligeables.

Le modèle standard de la physique des particules que nous allons présenter dans cet ouvrage se limitera donc à la description des interactions électromagnétique, faible et forte entre particules élémentaires. Ce modèle est incomplet puisqu'il n'inclut pas

la gravitation. Cette dernière est décrite par la théorie de la relativité générale dont le formalisme est incompatible avec celui de la mécanique quantique.

## 1.2 Longueur, énergie et élémentarité

L'étude expérimentale d'un objet et la mesure de ses propriétés requièrent l'usage d'une sonde dont la longueur d'onde est comparable à la dimension de l'objet étudié. La sonde la plus couramment utilisée est la lumière ou plus généralement l'onde électromagnétique. On peut remonter à la forme et aux propriétés d'une structure en observant la diffusion de la lumière, l'application première étant bien entendu la vision qui reconstruit une image à partir de la lumière visible diffusée. Ce principe se généralise sans difficulté à d'autres échelles de distance et d'autres sondes (électrons, protons, ...). Pour pouvoir étudier une structure avec une sonde donnée il faudra :

- que l'énergie de la sonde ou sa longueur d'onde soit comparable à la dimension caractéristique de l'objet étudié ;
- que la sonde puisse interagir avec la structure étudiée afin qu'il y ait diffusion.

À toute échelle de longueur  $\lambda$ , on peut associer une échelle d'énergie caractéristique  $E$  à partir de la relation de de Broglie :

$$E = \frac{\hbar c}{\lambda}. \quad (1.2)$$

Pour étudier des objets physiques de taille  $\lambda = 10^{-15}$  m (rayon classique du proton), il faut disposer d'une sonde d'énergie au moins égale à  $3 \times 10^{-11}$  J  $\approx 200$  MeV. On utilise généralement comme unité d'énergie l'électronvolt (eV) défini comme l'énergie acquise par une charge élémentaire sur une distance  $L = 1$  m dans un champ électrique uniforme  $E = 1$  V.m. On a alors :

$$E = \frac{qV}{L} \Rightarrow 1 \text{ eV} = \frac{1,6 \times 10^{-19} \text{ C} \times 1 \text{ V.m}}{1 \text{ m}} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J} \quad (1.3)$$

En physique des particules, on sonde l'infiniment petit en réalisant des expériences de diffusion à haute énergie, soit en envoyant un faisceau de particules (électrons, protons, photons) de grande énergie cinétique sur une cible, soit en collisionnant deux faisceaux. Dans ce dernier cas, la sonde et la structure sondée peuvent avoir la même nature et la différenciation n'a plus de sens.

La notion d'élémentarité d'une particule n'a de sens que relativement à l'échelle d'énergie du processus : une particule est élémentaire dans une diffusion si son énergie caractéristique est grande devant celle du processus. Par exemple, lors d'une désintégration  $\alpha$ , l'énergie échangée est de l'ordre de 5 MeV alors que la particule  $\alpha$  a un diamètre classique d'environ 2 fm soit  $E \approx 90$  MeV : la particule  $\alpha$  peut être considérée comme élémentaire. Les particules que l'on va considérer comme élémentaires en physique des particules sont celles qui n'ont pas de structure connue à ce jour, c'est-à-dire pour lesquelles il n'y a aucune évidence de l'existence de sous-structure aux échelles d'énergie accessibles en laboratoire. À titre indicatif, l'accélérateur de particules de plus

haute énergie atteint une énergie de 10 TeV dans le centre de masse, correspondant à une longueur caractéristique d'environ  $10^{-20}$  m.

La physique des particules s'intéresse à la description des objets physiques plus petits que le noyau atomique. Ceci concerne deux échelles de taille. La première, autour de  $10^{-15}$  m, est celle des constituants du noyau (le proton et le neutron) auxquels viendront s'ajouter toute une zoologie de nouvelles particules de courte durée de vie. La seconde, plus petite que  $10^{-16}$  m, est celle des particules élémentaires, c'est-à-dire celle dont on ne connaît aucune sous-structure interne. On verra ainsi que neutrons et protons sont composés de quarks, alors que l'électron est déjà élémentaire. Là encore de nouvelles particules similaires mais instables viendront s'ajouter aux briques de la matière ordinaire.

## 2 Outils formels

### 2.1 Unités naturelles

La mécanique quantique et la relativité restreinte font chacune intervenir une constante fondamentale qui intervient dans la plupart des équations : la constante de Planck  $\hbar$  et la célérité de la lumière  $c$ . Dans les unités du système international :

$$\hbar = \frac{h}{2\pi} = 1,05457148 \times 10^{-34} \text{ J.s et } c = 2,99792458 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}. \quad (1.4)$$

Ces constantes sont des caractéristiques de notre univers. Elles relient entre elles des grandeurs ayant des dimensions différentes : temps, espace, énergie et quantité de mouvement :

$$\begin{array}{ccc} \text{Énergie, } E & \overset{\hbar}{\longleftrightarrow} & \text{Pulsation, } \omega \sim \frac{1}{T} \\ E = \hbar\omega & & c \quad \updownarrow \quad \lambda = \frac{c}{\omega} \\ c \quad \updownarrow \quad E = pc & & \\ \text{Impulsion, } p & \overset{\hbar}{\longleftrightarrow} & \text{Longueur d'onde, } \lambda \\ p = \frac{\hbar}{\lambda} & & \end{array}$$

L'existence de ces constantes fondamentales semble indiquer que ces grandeurs (ou leur inverse) auraient la même dimensionnalité. Il n'y aurait alors besoin que d'une unique dimension. De même, la valeur numérique de ces constantes ne résulte que d'un choix arbitraire d'un système d'unités.

Le système d'**unités naturelles** est celui où ces deux constantes valent 1 et n'ont pas de dimension. Dans ce système d'unités les équations sont simplifiées puisque les facteurs  $c$  ou  $\hbar$  disparaissent. À partir d'une analyse dimensionnelle on montre que :

$$[\hbar] = E.T = 1 \Rightarrow T = E^{-1}, \quad (1.5)$$

$$[c] = LT^{-1} \Rightarrow L = T. \quad (1.6)$$

Le temps et l'espace ont la même dimension, ce qui semble naturel puisque la relativité va traiter le temps comme une quatrième coordonnée. De plus, toutes les dimensions

s'expriment en unités naturelles comme des puissances de l'énergie. Ainsi temps et espace ont la dimension inverse de l'énergie. À partir des valeurs de  $\hbar$  et  $c$  dans les deux systèmes d'unités, on détermine les facteurs de conversion pour le mètre et la seconde (voir exercice 1.1) :

$$1 \text{ m} = 5,07 \times 10^6 \text{ eV}^{-1} \text{ et } 1 \text{ s} = 1,52 \times 10^{15} \text{ eV}^{-1}. \quad (1.7)$$

Une autre grandeur utile pour les conversions entre systèmes d'unités est  $\hbar c \approx 197 \text{ MeV}\cdot\text{fm}$ .

## 2.2 Contexte théorique

Une théorie de la physique des particules doit pouvoir décrire des interactions où la nature et le nombre des particules varient : ceci n'est pas possible dans le cadre usuel de la mécanique quantique où la fonction d'onde, associée à une probabilité de présence dans l'espace, ne peut pas décrire de tels systèmes. C'est le formalisme de la seconde quantification et de l'espace de Fock qui permet de traduire ce type de phénomènes. Il sera décrit au chapitre 3.

Les particules étudiées peuvent avoir une vitesse très élevée, proche ou égale à celle de la lumière, ce qui implique que la théorie de la physique des particules doit intégrer la relativité restreinte.

Enfin, on souhaite une théorie qui intègre l'électromagnétisme et donc le concept de champ. L'approche formelle de l'électromagnétisme passe par la théorie des champs, qui est une extension de la mécanique analytique. La théorie des champs classique de l'électromagnétisme inclut naturellement la relativité restreinte qui permet un traitement quasi identique des coordonnées d'espace et de temps dans les équations. En revanche la mécanique quantique décrit l'évolution temporelle d'une fonction d'onde, normalisée sur l'espace. L'unification de ces deux théories, qui présentent des approches radicalement différentes de l'espace-temps, n'est pas aisée. Une simple théorie de mécanique quantique relativiste fait rapidement apparaître des incohérences qui ne peuvent se résoudre que dans un formalisme plus vaste, celui de la théorie quantique des champs. Nous donnerons, dans les chapitres 3 à 6, un aperçu de ce formalisme et de son application à la physique des particules.

## 3 D'autres particules

---

En plus des particules de la matière ordinaire, d'autres objets sont venus s'ajouter à la liste, parfois comme découverte expérimentale qu'il faut inclure dans le modèle, parfois en tant que conséquence des modèles théoriques qui prévoient de nouveaux objets. Ces particules sont par nature instables puisqu'absentes de la matière ordinaire.

### 3.1 Interaction et bosons massifs

L'interprétation du champ électromagnétique en tant que particule est le photon. L'interaction, c'est-à-dire l'échange d'énergie ou d'impulsion entre deux charges, s'opère par l'échange d'un photon de masse nulle. Le potentiel pour une source statique est solution de l'équation de Laplace<sup>1</sup> :

$$\Delta V = 0 \implies V = \frac{g}{r}, \quad (1.8)$$

où  $r$  est la distance à la source et  $g$  une constante numérique qui va quantifier l'intensité de l'interaction. La portée d'une telle interaction est infinie, avec une décroissance inverse à l'éloignement des charges en interaction.

Les interactions faible et forte devraient également faire intervenir un équivalent au photon. Néanmoins, pour prendre en compte la courte portée de ces interactions, ces « photons » doivent être massifs. L'émission d'une telle particule par une charge statique viole la conservation de la masse, mais est autorisée en mécanique quantique tant que le principe d'incertitude d'Heisenberg n'est pas satisfait ( $\Delta E \Delta t \leq \hbar$ ), c'est-à-dire tant que le temps d'interaction  $\tau$  est inférieur à  $\frac{m}{\hbar c^2}$ , le phénomène n'est pas observable et donc autorisé. Cette durée limitée se traduit par une portée limitée de l'interaction de l'ordre de  $\lambda = \frac{m}{\hbar c}$ .

Ceci peut se formuler plus rigoureusement en quantifiant la relation relativiste entre énergie et impulsion (voir également chapitre 4) :

$$E^2 = p^2 c^2 + m^2 c^4 \xrightarrow[\substack{E \rightarrow i\hbar \frac{\partial}{\partial t}, \vec{p} \rightarrow i\hbar \vec{\nabla}}]{\text{Quantification}} \square \psi + \frac{m^2 c^2}{\hbar^2} \psi = 0. \quad (1.9)$$

On obtient l'équivalent relativiste de l'équation de Schrödinger : l'équation de Klein-Gordon. Pour un système statique et un boson sans masse, on retrouve l'équation de Laplace. On remarque, dans ce cas, que la fonction d'onde du photon dans l'équation de Klein-Gordon correspond au potentiel électrostatique. Pour un vecteur d'interaction massif, le potentiel statique devient solution de l'équation :

$$\Delta U = \frac{mc^2}{\hbar} U. \quad (1.10)$$

Pour un potentiel ne dépendant que de la coordonnée radiale,  $U(r)$ , on résout cette équation en coordonnées sphériques :

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial U}{\partial r} \right) = \frac{mc^2}{\hbar} U \implies U(r) = \frac{g}{r} e^{-r/R}, \quad (1.11)$$

---

1. On rappelle quelques opérateurs différentiels usuels : l'opérateur vectoriel nabla ou gradient  $\vec{\nabla} = \left( \frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z} \right)$ , le laplacien  $\Delta = \vec{\nabla}^2$  et le d'alembertien  $\square = \frac{\partial^2}{c^2 \partial t^2} - \Delta$ .

où  $R = \frac{\hbar}{mc}$  est la portée de l'interaction. Ce potentiel, dit potentiel de Yukawa, tombe rapidement à zéro pour des distances supérieures à quelques  $R$  à cause du facteur exponentiel. Un « photon » massif va permettre de décrire une interaction de courte portée, cette portée étant égale à l'inverse de la masse du « photon ».

La portée caractéristique de l'interaction forte dans le noyau est de l'ordre du fermi ( $10^{-15}$  m, taille du noyau). La masse du vecteur doit alors être de l'ordre de la centaine de MeV. Il existe effectivement trois particules, les pions, qui sont des bosons de masse  $m_\pi \approx 140$  MeV correspondant au boson prédit par Yukawa. Nous discuterons par la suite du fait que ce pion n'est pas le véritable équivalent du photon pour l'interaction forte.

Pour l'interaction faible, la durée de vie de certaines particules appelées hypérons, qui ne peuvent se désintégrer que par interaction faible (voir chapitre 7), donne une indication de la masse du vecteur de l'interaction faible. Cette durée de vie est de l'ordre de  $10^{-12}$  s, soit une masse de l'ordre de la centaine de GeV. C'est effectivement la masse des bosons  $W^+$ ,  $W^-$  et  $Z$  qui véhiculent l'interaction faible.

### 3.2 Antiparticules

L'équation relativiste de Klein-Gordon, décrite au paragraphe précédent, découle d'une relation quadratique entre énergie, masse et impulsion. De ce fait, la résolution de cette équation conduit à deux types de solutions en onde plane d'impulsion  $\vec{k}$  de la forme :

$$\psi(\vec{x}, t) \propto e^{\pm i\omega_k t - i\vec{k}\vec{x}}, \quad \omega_k = \sqrt{k^2 + m^2}, \quad (1.12)$$

avec des énergies positive et négative respectivement. Les solutions d'énergie négative n'ont *a priori* aucun sens physique. Ce résultat avait été dérivé par Erwin Schrödinger, qui n'avait alors publié que l'équation non relativiste qui porte son nom. Paul Dirac apporta une solution à ce problème en interprétant ces solutions négatives comme des antiparticules. L'astuce mathématique consiste à absorber le signe "-" du  $-\omega_k t$  dans le temps plutôt que dans  $\omega_k$ . Ainsi une antiparticule est équivalente à une particule qui remonte le temps, avec une énergie positive. Une antiparticule possède la même masse et le même spin que la particule correspondante, mais tous ses nombres quantiques additifs ou charges sont inversés.

### 3.3 Rayons cosmiques

À ce stade de notre exposé, il est utile de faire un petit historique de la découverte des premières particules. L'électron fut la première particule subatomique observée par Thompson en 1897. Suivirent le proton (1912) puis le neutron (Chadwick, 1932). L'observation de particules ne composant pas la matière ordinaire s'avérera plus délicate. Nous verrons par la suite que pour fabriquer de telles particules il faut réaliser des collisions mettant en jeu une énergie cinétique au moins égale à l'énergie de masse ( $E = mc^2$ ) de la particule à produire. De telles collisions sont réalisées naturellement