

Benoît Clément

Physique des particules

Introduction aux concepts et au formalisme
du modèle standard

3^e ÉDITION

DUNOD

Illustration de couverture : © pixelparticle - Shutterstock.com

© Dunod, 2013, 2017, 2023
11, rue Paul Bert, 92240 Malakoff
www.dunod.com
ISBN 978-2-10-085428-8

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

Avant-propos	VII
Chapitre 1 Particules et interactions	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
Chapitre 2 Notions de physique moderne	17
1. Relativité restreinte	17
2. Mécanique analytique	24
3. Mécanique quantique	30
L'essentiel	37
Entraînez-vous	38
Chapitre 3 Seconde quantification	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
Chapitre 4 Champs quantiques libres	55
1. Champ scalaire	56
2. Champ spinoriel	59
3. Champ vectoriel	61
4. Spin et représentations	63
5. Quantification du champ	65
L'essentiel	68
Entraînez-vous	69

Chapitre 5 Champs en interaction	73
1. Interaction de jauge	73
2. Brisure spontanée de symétrie	76
3. Le lagrangien du modèle standard	80
L'essentiel	86
Entraînez-vous	87
Chapitre 6 Diagrammes de Feynman	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
Chapitre 7 Le zoo des hadrons	113
1. Classification des hadrons	113
2. Modèle des quarks	120
3. Chromodynamique quantique	124
L'essentiel	128
Entraînez-vous	129
Chapitre 8 Oscillations de neutrinos	131
1. Caractéristiques des neutrinos	131
2. Mécanisme d'oscillation	133
3. Oscillations à trois familles	136
L'essentiel	139
Entraînez-vous	140
Au-delà du modèle standard	141
Quelques particules	147
Solutions	155
Bibliographie	179
Index	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 :

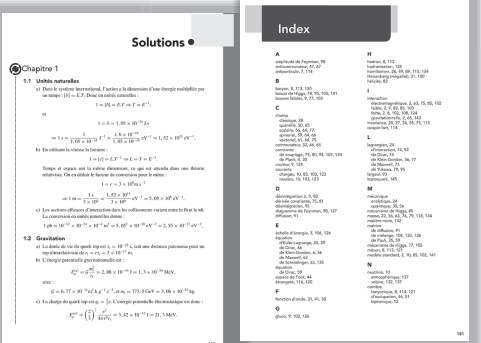
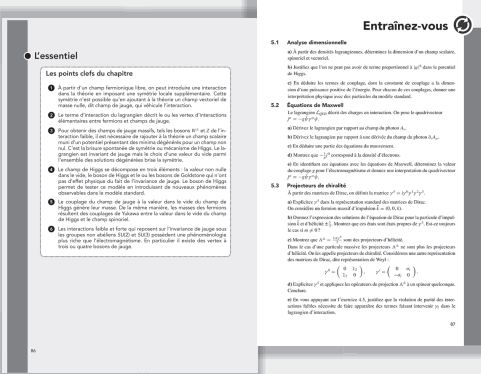
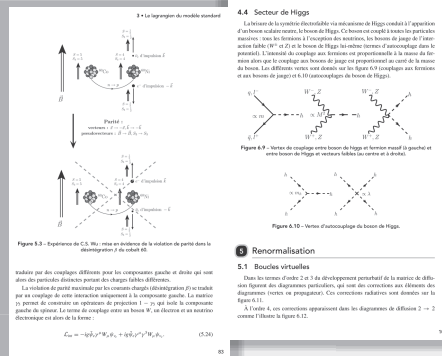
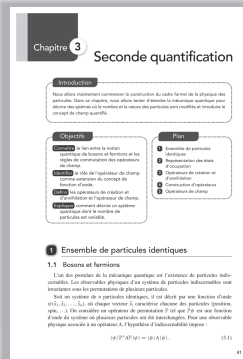
- un rappel des **définitions** clés
- des **schémas** pour maîtriser le cours

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



Particules et interactions

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^e 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 γ . 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 :

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

où $G = 6,67 \times 10^{-11}$ N.m².kg⁻² 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 λ , on peut associer une échelle d'énergie caractéristique E à partir de la relation de de Broglie :

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

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 3×10^{-11} J ≈ 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 α , l'énergie échangée est de l'ordre de 5 MeV alors que la particule α a un diamètre classique d'environ 2 fm soit $E \approx 90$ MeV : la particule α 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 :

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

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 :

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

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