

INTRODUCTION À LA PHYSIQUE DES PARTICULES

Robert Zitoun

Professeur à l'Université de Savoie
(Annecy-le-Vieux)

2^e édition

DUNOD

La 1^{re} édition de cet ouvrage a été publiée par les Éditions Nathan dans la collection 128 sous la direction de Madeleine Veysié.

Illustration de couverture: *Digitalvision*

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.

Le Code de la propriété intellectuelle du 1^{er} 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

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. 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).



© Dunod, Paris, 2000, 2004

©Nathan, Paris, 1998 pour la 1^{re} édition
© Dunod, 2023 pour la nouvelle présentation

11 rue Paul Bert, 92240 Malakoff

www.dunod.com

ISBN 978-2-10-085535-3

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L122-5, 2^e et 3^e 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 L335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

Table des matières

AVANT-PROPOS	IX
CHAPITRE 1 • PROLOGUE HISTORIQUE	1
1.1 Atome et électrons	1
1.2 Le photon	2
1.3 Noyau et radioactivité	2
1.4 Nucléons et interaction nucléaire	3
CHAPITRE 2 • ASPECTS EXPÉRIMENTAUX	5
2.1 La course aux hautes énergies	5
2.2 Masse, énergie, quantité de mouvement	6
2.3 Les accélérateurs de particules	8
2.4 Les collisionneurs	11
2.5 Les détecteurs	14
CHAPITRE 3 • MORT ET RÉSURRECTION DES PARTICULES	19
3.1 La durée de vie	19
3.2 Les faisceaux de particules secondaires	21
3.3 Reconstitution d'une désintégration	22
3.4 Les résonances	23

CHAPITRE 4 • L'ÉLECTRON. LES LEPTONS	25
4.1 Spin et principe d'exclusion de Pauli	25
4.2 Les antiparticules	27
4.3 Le neutrino	29
4.4 Les autres leptons	31
CHAPITRE 5 • HADRONS ET QUARKS	35
5.1 Le nucléon	35
5.2 Le pion	35
5.3 Les hadrons	37
5.4 Les quarks u et d	38
5.5 Les autres quarks	39
5.6 La masse des quarks	40
5.7 La couleur des quarks	41
5.8 Hadronisation des quarks	42
CHAPITRE 6 • LE PHOTON ET LES BOSONS VECTEURS	45
6.1 Les champs d'interaction	45
6.2 La lumière : onde ou particules ?	46
6.3 La lumière : onde et particules	48
6.4 Le photon	49
6.5 Les autres bosons vecteurs	51
6.5.1 Le graviton	51
6.5.2 Les gluons	52
6.5.3 Les bosons W^\pm et Z	52
CHAPITRE 7 • INTERACTIONS I. EXPÉRIENCE	55
7.1 La longueur d'interaction	55
7.2 La section efficace totale	56
7.2.1 Définition	56
7.2.2 Valeurs expérimentales	57
7.3 La luminosité	59
7.4 Les sections efficaces partielles	60
7.5 La section efficace différentielle	61

CHAPITRE 8 • INTERACTIONS II. THÉORIE	65
8.1 La diffusion Rutherford	65
8.2 La théorie quantique des champs	67
8.2.1 Présentation	67
8.2.2 Éléments de matrice de transition	67
8.2.3 Les particules virtuelles	69
8.2.4 Les constantes de couplage	70
8.3 Les interactions fondamentales	72
8.3.1 La gravitation et l'électromagnétisme	72
8.3.2 L'interaction forte	73
8.3.3 L'interaction faible	74
8.4 Les désintégrations	75
CHAPITRE 9 • INTERACTIONS AVEC LA MATIÈRE	77
9.1 Les neutrinos	77
9.2 Les muons	78
9.2.1 La diffusion multiple	79
9.2.2 Perte d'énergie par ionisation	80
9.3 Les électrons	81
9.3.1 Le rayonnement synchrotron	82
9.3.2 Le bremsstrahlung	82
9.3.3 Cas des positons	83
9.4 Les photons	84
9.5 Les hadrons	85
CHAPITRE 10 • COLLISIONS $e^+ + e^-$	87
10.1 Introduction	87
10.2 Production de paires de leptons	88
10.3 Production de hadrons	90
10.4 Corrections radiatives	91
CHAPITRE 11 • STRUCTURE DU NUCLÉON	93
11.1 Les fonctions de structure	93
11.2 Les partons	94
11.3 Les collisions proton-proton	96

CHAPITRE 12 • SYMÉTRIES DISCRÈTES ET VIOLATIONS	97
12.1 La parité	97
12.2 La violation de la parité	98
12.3 Des leptons gauchers	99
12.4 La conjugaison de charge	101
12.5 La violation de \mathcal{CP}	101
12.5.1 Désintégration des mésons étranges K^\pm	101
12.5.2 Oscillations $K^0 \bar{K}^0$	102
12.5.3 La violation de \mathcal{CP}	104
12.6 Le renversement du temps \mathcal{T}	105
CHAPITRE 13 • LE MODÈLE STANDARD ET AU-DELÀ	107
13.1 L'électromagnétisme : théorie de jauge	107
13.2 La théorie de Yang et Mills	109
13.3 La chromodynamique quantique	109
13.4 Le modèle de Weinberg-Salam	110
13.5 Les théories unificatrices	111
13.5.1 La grande unification	111
13.5.2 La superunification et modèles composés	113
CHAPITRE 14 • LES PROBLÈMES OUVERTS	115
14.1 Le boson de Higgs	115
14.2 La violation de \mathcal{CP}	116
14.3 Les oscillations de neutrinos	118
14.4 L'Univers	120
14.4.1 La masse cachée	120
14.4.2 Matière-antimatière	121
ANNEXE • LAURÉATS DU PRIX NOBEL DE PHYSIQUE	123
BIBLIOGRAPHIE	127
INDEX	129

Avant-propos

Comprendre comment « ça marche » est le propre de la démarche scientifique. Ainsi, les savants du XIX^e siècle ont été amenés à faire des recherches sur le monde atomique pour comprendre le comportement des systèmes macroscopiques. Afin d'appréhender l'atome, il a fallu s'interroger de façon encore plus approfondie et un monde de poupées russes fut alors découvert : noyaux, nucléons, quarks.

Depuis les années 1950, les chercheurs en physique des particules ont défriché un important territoire et en ont aujourd'hui une compréhension approfondie. L'objectif de cet ouvrage est d'élargir ce domaine, habituellement abordé en maîtrise, à un public scientifique avec un langage accessible tout en conservant suffisamment de détails. Dans une première partie, l'auteur plante le décor du monde des particules (accélérateurs, détecteurs) et en présente les acteurs : leptons, quarks et bosons vecteurs. Après avoir montré comment on concentre les données expérimentales sur le comportement des particules, il décrit de quelles façons elles interagissent et comment leurs interactions donnent de nouvelles indications. Enfin, il présente la vision synthétique moderne que l'on a des interactions pour conclure sur les points non encore éclaircis sur lesquels s'orientent les recherches actuelles.

Cet ouvrage, écrit à la demande de Madeleine Veyssié, a beaucoup bénéficié de la lecture critique de Marie-Laure Delsante, alors étudiante en DEUG de sciences à l'université de Savoie. Il a été préparé avec le soutien de Michel Yvert, directeur du LAPP (Laboratoire d'Annecy-le-Vieux de physique des particules).

Chapitre 1

Prologue historique

1.1 ATOME ET ÉLECTRONS

Au début du xx^e siècle, nombre de savants étaient convaincus que la matière est constituée d'**atomes** mesurant environ 1 \AA ($1 \text{ \AA} = 0,1 \text{ nm} = 10^{-10} \text{ m}$)⁽¹⁾. Mais la petite centaine d'espèces atomiques, classée par Dmitri Mendeleïev en 1869, plaidait en faveur d'une simplification nouvelle d'autant que les atomes (mot d'origine grecque signifiant insécable) se sont vite révélés avoir une structure.

En étudiant les décharges électriques dans les gaz raréfiés, Joseph John Thomson montra en 1897 que les atomes contiennent des particules de charge négative appelées **électrons**. Il mesura le rapport de leur charge électrique e à leur masse m_e , puis obtint une première estimation de e et en déduisit m_e . Depuis, on a appris que les électrons jouent un rôle fondamental dans la nature. Ils sont responsables de la conduction des métaux, des propriétés des semi-conducteurs à la base de l'électronique, de la réactivité chimique, des constructions moléculaires ou cristallines, etc.

1. Les unités sous-multiples sont milli (m) pour 10^{-3} , micro (μ) pour 10^{-6} , nano (n) pour 10^{-9} , pico (p) pour 10^{-12} et femto (f) pour 10^{-15} .

1.2 LE PHOTON

La nature de la lumière, onde ou particules, a donné lieu à de longs débats. La théorie électromagnétique de James Clerk Maxwell (1865), unifiant électrostatique et magnétisme, avait convaincu les savants que **la lumière est une onde électromagnétique** : les phénomènes d'interférence et de diffraction en sont une démonstration éclatante.

Mais, vers la fin du XIX^e siècle, Max Planck trouva une explication à la forme du spectre du rayonnement du corps noir⁽¹⁾. Pour cela, il supposait que les atomes ne peuvent absorber ou émettre un rayonnement de fréquence ν que par grains (ou **quantums**) d'énergie très petit $E = h\nu$. Planck pensait que cette quantification ne concernait que les échanges d'énergie, mais Albert Einstein généralisa l'idée en supposant que les ondes électromagnétiques sont composées de grains d'énergie $E = h\nu$, **les photons**. Il expliqua ainsi l'effet photoélectrique, faisant des prédictions ultérieurement vérifiées. On sait depuis que **toutes les ondes électromagnétiques, lumineuses ou non, transportent des photons**. En particulier, les rayons X sont des photons émis lors du réarrangement du cortège électronique de l'atome et les rayons γ lors du réarrangement des nucléons dans les noyaux.

1.3 NOYAU ET RADIOACTIVITÉ

J.J. Thomson imaginait que les atomes étaient des boules chargées positivement dans lesquelles sont piégés les électrons. Ces boules, plusieurs milliers de fois plus lourdes que les électrons, constituaient l'essentiel de la masse de l'atome. Vers 1910, Ernest Rutherford suggéra à Hans Geiger et Marsden de bombarder une mince feuille d'or (0,1 μm d'épaisseur) avec des particules α afin de sonder la matière. Ceux-ci constatèrent que la majorité des α sont très peu déviés mais que certains d'entre eux subissent des déviations très importantes, pouvant même rebrousser chemin. E. Rutherford en déduisit que toute la charge positive de l'atome est concentrée dans un noyau dont il estima la taille à quelques fermis (1 fermi = 1 fm = 10^{-15} m), c'est-à-dire 10^5 fois plus petits que les atomes eux-mêmes. On eut alors la preuve de la

1. On appelle ainsi le rayonnement électromagnétique thermique émis par tous les corps ; il est d'autant plus intense que ceux-ci sont chauds : infrarouge pour les températures ambiantes, visible à partir de 1 000 °C.