

Physique nucléaire

**Claude Le Sech
Christian Ngô**

Physique nucléaire

Des quarks aux applications

2^e édition

DUNOD

Illustration de couverture : Vue axiale du cerveau par TEP © Jeus Langner

<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^{er} juillet 1992 interdit en effet expressément la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Or, cette pratique</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, 2010, 2014, 2020 pour la nouvelle présentation

11 rue Paul Bert, 92240 Malakoff

ISBN 978-2-10-081089-5

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2^o et 3^o 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	XIII
CHAPITRE 1 • INTERACTIONS FONDAMENTALES ET SYMÉTRIES	1
1.1 Quatre interactions	1
1.2 Quarks et leptons	1
1.2.1 Les leptons	2
1.2.2 Les quarks	2
1.2.3 Bosons vecteurs	4
1.3 La gravitation	7
1.4 L'interaction électromagnétique	8
1.5 L'interaction forte	8
1.6 L'interaction faible	9
1.7 Symétries et lois de conservation	9
1.7.1 Uniformité et isotropie de l'espace, uniformité du temps	9
1.7.2 Symétries discrètes	10
1.8 Le boson de Higgs	15
Exercices	16
Solutions des exercices	17
CHAPITRE 2 • NOYAUX	19
2.1 Numéro atomique et nombre de masse	19
2.2 Isotopes, isobares, isotones	21
2.3 Énergie de liaison	22
2.4 Masses atomiques	23
2.5 Énergie de séparation	25
2.6 Nombres magiques	25

Table des matières

2.7	Isospin	27
2.8	Densité nucléaire	27
2.9	Le modèle de la goutte liquide	29
2.10	Vallée de stabilité	31
2.11	Approche locale des masses	32
	Exercices	32
	Solutions des exercices	33
CHAPITRE 3 • MODÈLES DE STRUCTURE NUCLÉAIRE		35
3.1	Modèles de champ moyen	35
3.1.1	L'atome	36
3.1.2	Le modèle en couches	39
3.2	Gaz parfait de Fermi	44
3.3	Approches collectives	47
3.3.1	Le modèle de la goutte liquide	47
3.3.2	Modèle collectif	48
3.3.3	Noyaux déformés	48
3.4	Résonances géantes	50
	Exercices	51
	Solutions des exercices	52
CHAPITRE 4 • LA RADIOACTIVITÉ		54
4.1	Cinétique de la désintégration	54
4.2	Filiation	56
4.3	Branchement	57
4.4	Désintégration alpha	58
4.4.1	Bilan énergétique	59
4.4.2	Mécanisme	59
4.5	Radioactivité bêta	62
4.5.1	Radioactivité β^-	63
4.5.2	Radioactivité β^+	65

4.5.3	Capture électronique.....	66
4.6	Familles radioactives.....	67
4.7	Émission γ	70
4.8	Fission.....	72
4.9	Résumé.....	75
	Exercices.....	75
	Solutions des exercices.....	76
CHAPITRE 5 • RÉACTIONS NUCLÉAIRES.....		78
5.1	Énergie dans le centre de masse.....	79
5.2	Section efficace.....	81
5.3	Paramètre d'impact.....	83
5.4	Ondes partielles.....	84
5.5	Le système du laboratoire.....	85
5.6	Diffusion élastique.....	87
5.7	Cinématique relativiste.....	87
5.8	Réactions directes.....	91
5.9	Résonance.....	93
5.10	Fusion et noyau composé.....	94
5.11	Réactions très inélastiques.....	97
5.12	Collisions d'ions lourds à basse énergie.....	98
5.13	Prééquilibre.....	99
5.14	Spallation, fireball.....	100
5.15	Plasma quarks-gluons.....	101
	Exercices.....	102
	Solutions des exercices.....	104
CHAPITRE 6 • INTERACTION DES PARTICULES IONISANTES AVEC LA MATIÈRE.....		106
6.1	Interaction des rayons-X et γ avec la matière.....	106
6.1.1	Effet photoélectrique.....	108

Table des matières

6.1.2	Effet Compton	111
6.1.3	Matérialisation et création de paire électron-positron	113
6.1.4	Réactions photonucléaires	114
6.1.5	Atténuation des rayons- X et γ par la matière	114
6.2	Interaction des particules chargées avec la matière	116
6.2.1	Diffusion par un potentiel central	118
6.2.2	Interaction avec les électrons	119
6.2.3	Interaction avec les noyaux atomiques	121
6.2.4	Perte d'énergie dans des molécules	122
6.2.5	Transfert d'énergie linéique (TEL)	123
6.2.6	Rayonnement de freinage	124
6.2.7	Parcours de la particule dans le milieu traversé	127
6.2.8	Collision inélastique électron-électron	128
	Exercices	130
	Solutions des exercices	131
	CHAPITRE 7 • DOSIMÉTRIE	133
7.1	Caractérisation d'un faisceau de particules ionisantes	133
7.2	Énergie transférée en un point du milieu par le rayonnement	135
7.2.1	Définition de la dose	135
7.2.2	Définition de l'exposition	136
7.2.3	Définition du KERMA	137
7.3	Dosimétrie absolue	137
7.3.1	La calorimétrie	137
7.3.2	La chambre à ionisation	138
7.3.3	Dosimétrie chimique : le dosimètre de Fricke	140
7.4	Quelques principes de radioprotection	141
7.4.1	Notion d'équivalent de dose pour un organisme	141
7.4.2	Protection contre les rayonnements ionisants	144
	Exercices	146
	Solutions des exercices	148

CHAPITRE 8 • EFFETS DES RAYONNEMENTS EN BIOLOGIE	151
8.1 Unités pour les rayonnements ionisants	151
8.2 La cellule eucaryote	152
8.3 Radiolyse de l'eau et des solutions aqueuses	155
8.3.1 Radiolyse de l'eau	155
8.3.2 Radiolyse d'une solution aqueuse de molécules biologiques	156
8.4 Dénombrement des coupures de l'ADN en solution	157
8.5 Effets du rayonnement sur les cellules	159
8.6 Radiosensibilité des cellules	160
8.7 Les courbes de survie cellulaire	160
8.8 Paramètres modifiant la mortalité cellulaire par irradiation	165
8.8.1 Influence du débit de dose	165
8.8.2 Rôle du TEL	165
8.9 Radiosensibilisateurs et radioprotecteurs	165
8.10 Effet à court terme de l'irradiation corps entier	166
8.11 Effets somatiques des rayonnements ionisants	167
8.12 Modification non spécifique de la durée de la vie induite par les rayonnements	168
8.13 Dommage sur l'embryon	170
8.14 Effets sur les générations futures	171
Exercices	171
Solutions des exercices	172
CHAPITRE 9 • APPLICATIONS À LA MÉDECINE	174
9.1 Imagerie par Résonance Magnétique	174
9.1.1 Généralités sur l'IRM	174
9.1.2 Principe de fonctionnement de l'IRM	175
9.1.3 Reconstruction d'une image par la transformée de Fourier	184
9.1.4 Spectre de résonance magnétique nucléaire	188
9.2 Utilisation des traceurs radioactifs	191
9.2.1 Traceurs en biologie et en médecine	192

Table des matières

9.2.2	Imagerie	193
9.2.3	Thérapie par rayonnements ionisants externes	196
	Exercices.....	201
	Solutions des exercices	203
	CHAPITRE 10 • L'IMAGERIE MÉDICALE.....	205
10.1	Imagerie médicale	206
10.2	L'imagerie par rayons X	207
10.3	L'IRM	208
10.4	L'échographie	210
10.5	Imagerie nucléaire	211
10.6	Imagerie par rayonnements ionisants	215
10.7	Conclusion	216
	CHAPITRE 11 • RÉACTEURS NUCLÉAIRES	217
11.1	La fission, source d'énergie	217
11.2	Oklo et les réacteurs naturels	220
11.3	Noyaux fissiles, noyaux fertiles	220
11.4	Produits de fission et neutrons	221
11.5	Réacteurs à neutrons lents, réacteurs à neutrons rapides	222
11.5.1	L'eau lourde	222
11.5.2	Les réacteurs à neutrons rapides	224
11.6	Masse critique	224
11.7	Interaction des neutrons	225
11.8	Principe d'un réacteur nucléaire	226
11.9	Modération	227
11.10	Neutrons retardés	228
11.11	Contrôle de la puissance	229
11.11.1	Barres de contrôle	229
11.11.2	Poisons neutroniques	229
11.11.3	Effet Doppler	230

11.11.4 Coefficient de vide	230
11.11.5 L'effet xénon	230
11.11.6 Puissance résiduelle	231
11.12 Enrichissement	231
11.13 Déchets nucléaires	232
11.14 Fusion thermonucléaire	234
11.15 Armes nucléaires	236
11.15.1 Bombe A	236
11.15.2 Bombe H	237
11.15.3 Autres armes nucléaires	237
Exercices	238
Solutions des exercices	239
CHAPITRE 12 • ACCÉLÉRATEURS, DÉTECTEURS ET APPLICATIONS NON MÉDICALES	240
12.1 Accélérateurs de particules	241
12.1.1 Accélérateurs à courant continu	242
12.1.2 Accélérateurs à tension alternative	242
12.1.3 Collisionneurs	246
12.1.4 Faisceaux secondaires	246
12.2 Détection de particules	247
12.2.1 Détecteurs à gaz	248
12.2.2 Détecteurs à scintillation	251
12.2.3 Détecteurs semiconducteurs	252
12.2.4 Autres détecteurs	252
12.3 Applications industrielles	253
12.3.1 Traceurs	253
12.3.2 Production de radio-isotopes	254
12.3.3 Radiographies nucléaires	254
12.3.4 Jauges radiométriques	255
12.3.5 Analyse par activation	256
12.3.6 Stérilisation	256
12.3.7 Ionisation des gaz	257

Table des matières

12.4	Datation	257
12.5	Sources d'énergie	259
	Exercices.....	260
	Solutions des exercices	261
	BIBLIOGRAPHIE	263
	CONSTANTES	267
	INDEX	269

AVANT-PROPOS

La radioactivité a été découverte il y a un peu plus d'un siècle et nombreuses sont les applications utilisant aujourd'hui ce phénomène. Cela va de la fabrication d'électricité avec des réacteurs nucléaires (78 % de l'électricité française) aux applications médicales d'imagerie, comme la tomographie par émission de positrons, ou les sources de curiethérapie permettant de détruire les cellules cancéreuses.

La dimension du noyau atomique est environ 100 000 fois inférieure à celle de l'atome – qui est essentiellement constitué de vide – mais il contient la majeure partie de la masse de ce dernier. Ces faibles dimensions et le petit nombre de nucléons qu'il contient rendent le problème très ardu à traiter du point de vue théorique. On est en face d'un problème à N-corps quantique dans toute sa complexité.

La physique du noyau est un domaine très riche mais difficile. En plus des modèles propres à la physique nucléaire, la caractéristique de cette discipline est d'emprunter, et d'améliorer, de nombreux concepts venant d'autres domaines de la physique. Chacun des modèles reproduit une des facettes du sujet mais reste malheureusement impuissant à reproduire les autres. On est donc encore loin d'une théorie générale permettant de décrire l'ensemble des phénomènes nucléaires observés et surtout de faire des prédictions quantitatives.

La complexité de la physique nucléaire a au moins un avantage en termes de formation. Elle permet d'acquérir des méthodes expérimentales et théoriques qui peuvent être utilisées dans de nombreux domaines de la physique. C'est une expérience unique et un atout important car elle permet de changer plus facilement de domaine. C'est une formation complète et riche où le physicien a l'habitude de se poser des questions, de travailler en équipe, de résoudre de multiples problèmes et de gérer des projets.

Dans ce livre, qui est une courte introduction sur le sujet, nous avons choisi de couvrir un grand nombre de domaines de la physique du noyau plutôt que de nous spécialiser sur l'un d'entre-eux. La contrepartie, compte tenu du volume limité de l'ouvrage, est que chaque sujet est traité de manière introductive et beaucoup d'aspects ne sont pas abordés. La raison de ce choix est qu'il y a une multitude d'applications de la physique nucléaire et qu'un nombre de plus en plus important de personnes auront à travailler dans ces domaines. Il n'est pas forcément nécessaire pour elles d'avoir une connaissance approfondie de la structure nucléaire et des réactions nucléaires mais quelques notions sur le sujet sont indispensables.

Ce livre n'est donc pas destiné aux spécialistes de chacun des domaines abordés mais à tous ceux, étudiants, élèves des grandes écoles, ingénieurs, chercheurs, techniciens, etc. qui ont ou auront besoin d'avoir des notions de physique nucléaire pour leurs activités professionnelles. Il est aussi destiné à ceux qui veulent satisfaire leur

Avant-propos

curiosité. Il sera alors aisé à tous de trouver des compléments dans des livres plus spécialisés dont certains sont cités dans la bibliographie.

Le premier chapitre introduit les interactions fondamentales et les particules qui permettent de construire notre monde et d'expliquer les phénomènes qui nous entourent. Dans la recherche de l'unification des interactions, les symétries jouent un rôle important car elles conduisent à des lois de conservation.

Le noyau atomique concentre la presque totalité de la masse de l'atome. Le chapitre 2 présente les propriétés du noyau qui est un système constitué de neutrons et de protons liés par une force nucléaire intense mais de courte portée dont on ne connaît pas encore l'expression exacte.

Le problème principal du noyau est qu'il n'existe pas de théorie permettant de reproduire et de comprendre l'ensemble des propriétés que l'on connaît. De nombreux modèles ont été développés, basés sur des approches physiques souvent très différentes, pour reproduire une partie de la physique observée. Le chapitre 3 en présente quelques-uns.

Certains noyaux naturels sont instables, c'est-à-dire radioactifs. De nombreux autres fabriqués artificiellement le sont aussi. La radioactivité des noyaux est à la base de nombreuses applications. C'est donc un aspect important qui est abordé dans le chapitre 4 où nous présentons les principales formes d'instabilité du noyau.

On ne se contente pas d'observer et d'utiliser des noyaux radioactifs. On bombarde des noyaux avec d'autres noyaux ou des particules pour induire des réactions nucléaires. On réalise ainsi, au niveau du noyau, l'équivalent des réactions chimiques au niveau de l'atome et des molécules. Le chapitre 5 donne les bases élémentaires pour aborder ce domaine complexe mais d'une incroyable richesse.

Lorsque les particules ionisantes comme les électrons, les photons gammas, ou les noyaux traversent la matière, ils interagissent avec celle-ci. Plusieurs types d'interactions sont possibles et le milieu traversé est perturbé. Comprendre les mécanismes et calculer leurs conséquences est important pour analyser les phénomènes et proposer des applications. C'est l'objet du chapitre 6.

Les rayonnements ionisants déposent de l'énergie dans la matière qu'ils traversent. Celle-ci peut être vivante ou inerte mais ce dépôt d'énergie peut avoir des conséquences, aussi est-il nécessaire de quantifier la dose de rayonnement reçue. La dosimétrie, objet du chapitre 7, fait le point sur ce sujet délicat en donnant les éléments de base.

La radioactivité est invisible à l'œil mais ses effets ne le sont pas si la dose reçue est suffisante. L'effet des rayonnements ionisants sur les êtres vivants sera différent selon la nature du rayonnement et le tissu concerné. Ce sujet est important, puisqu'il touche à la santé. C'est la raison pour laquelle nous lui avons consacré le chapitre 8.

La connaissance du noyau et l'utilisation des rayonnements ionisants ont permis de faire de nombreux progrès dans le domaine de la médecine. Ils permettent de mieux voir certains organes, grâce à l'imagerie, et de mieux soigner certaines pathologies en utilisant la radioactivité. Le chapitre 9 est consacré aux applications à la médecine et

le chapitre 10 développe plus particulièrement l'imagerie médicale qui joue un rôle de plus en plus important dans la médecine moderne.

Une autre application importante des phénomènes nucléaires est la production d'énergie. Le chapitre 11 présente l'utilisation de la fission pour produire de la chaleur dont une partie est convertie en électricité. Aujourd'hui, l'énergie nucléaire fournit 78 % de l'électricité française sans émettre, en fonctionnement, de CO₂, un gaz à effet de serre préjudiciable pour le climat. La fusion, énergie d'avenir, est aussi présentée ainsi que le principe des armes nucléaires.

Le chapitre 12 aborde les autres applications des phénomènes nucléaires qui concernent de multiples domaines scientifiques mais aussi non scientifiques. L'extrême sensibilité de détection de la radioactivité permet de faire des mesures qui sont impossibles avec les méthodes classiques.

Tout ce que l'on ne voit pas fait peur ; c'est le cas de la radioactivité. Tout ce que l'on ne comprend pas inquiète. La science et la technologie peuvent être sources de bonnes comme de mauvaises choses pour l'humanité mais la plupart du temps c'est l'Homme qui en décide ainsi. On a trop souvent tendance à regarder les applications négatives en oubliant celles qui ont sauvé des vies ou accru le bien-être de la population mondiale. Comprendre les phénomènes permet de mieux apprécier les véritables problèmes et de pouvoir objectivement évaluer les avantages, les inconvénients mais aussi les risques des solutions que l'on peut imaginer pour une application donnée.

Remerciements

Claude Le Sech a travaillé dans un première partie de sa carrière dans le domaine de la physique atomique et moléculaire, et plus spécifiquement dans le domaine des collisions des ions atomiques avec les atomes ou les molécules. Ces travaux m'ont incité à chercher à comprendre les utilisations des rayonnements ionisants en médecine et en particulier les traitements des tumeurs irradiées par des ions atomiques. La possibilité d'utiliser les mécanismes fondamentaux de physique atomique, comme l'effet Auger, ou nucléaire, comme la radioactivité, pour proposer des applications directes dédiées à la médecine, qu'elles soient dans un but diagnostique ou thérapeutique, est quelque chose de fascinant. Cette mutation thématique a été possible, en bonne partie, grâce à une longue collaboration fructueuse avec le Pr K. Kobayashi de la Photon Factory à Tsukuba (Japon), que je remercie ici, et avec le centre du Heavy Ion Medical Accelerator at Chiba (HIMAC). Je n'oublie pas la collaboration avec l'Institut Curie à Orsay. Je tiens aussi à remercier les personnes du Laboratoire des Collisions Atomiques et Moléculaires (LCAM) pour l'atmosphère propice à la création et à l'innovation régnant dans ce laboratoire grâce à tous ses membres. Je remercie aussi ma femme, Martine, pour son soutien constant lors de mon changement de thématique de recherche.

Avant-propos

Christian Ngô a travaillé dans de nombreux domaines de la physique et de la technologie en ayant au départ fait presque deux décennies de recherche en physique nucléaire. Cette expérience initiale s'est avérée particulièrement efficace pour aborder de nouveaux sujets. C'est pourquoi j'exprime ma gratitude aux personnes qui m'ont permis de m'engager dans cette voie. Tout d'abord le professeur Marc Lefort qui m'a accueilli et guidé à mes débuts avec compétence, dynamisme et enthousiasme ; à Jean Péter et Bernard Tamain qui m'ont aidé à faire mes premières armes dans le domaine expérimental. Merci aussi à Helmut Hofmann, de Munich, pour m'avoir initié au dur métier de théoricien. Je souhaiterais aussi remercier tous mes collègues de physique et chimie nucléaire de l'université d'Orsay, du CEA/Saclay mais aussi de laboratoires étrangers pour les échanges scientifiques nombreux que nous avons eu tout au long de ces années de recherche. Enfin je remercie mon épouse, Hélène, pour son constant soutien et pour avoir accepté que je travaille plus que de raison dans ce domaine passionnant.

Notations

Les vecteurs sont notés à l'aide de caractères gras.

Exemple : \mathbf{A} est un vecteur de composantes $(A_x, A_y$ et $A_z)$.

INTERACTIONS FONDAMENTALES ET SYMÉTRIES

1

INTRODUCTION

Ce premier chapitre introduit très rapidement quelques notions sur les interactions fondamentales qui régissent notre monde. L'approche est superficielle mais suffisante pour aborder la physique du noyau. Alors que l'électron, constituant des atomes, est une particule élémentaire, le proton et le neutron, constituants du noyau, ne le sont pas. Ils sont formés de particules élémentaires, les quarks, qu'on ne peut isoler mais dont les interactions ont pour conséquence de former les nucléons et de gouverner leurs interactions.

1.1 QUATRE INTERACTIONS

Quatre interactions fondamentales suffisent à expliquer l'ensemble des phénomènes physiques, chimiques et biologiques connus. Il s'agit de ;

1. l'**interaction gravitationnelle** responsable par exemple de la chute des corps ;
2. l'**interaction électromagnétique** qui gouverne les réactions chimiques ou biologiques, les phénomènes électriques ou magnétiques, etc. ;
3. l'**interaction forte** responsable de la cohésion des noyaux ;
4. l'**interaction faible** qui intervient dans la radioactivité bêta des noyaux.

Un des objectifs des physiciens est d'unifier les quatre interactions fondamentales avec une seule théorie. Pour le moment, ceci n'a été réussi que pour les trois dernières (électromagnétique, forte et faible) dans le cadre d'une théorie que l'on appelle le *modèle standard*. La théorie de la *relativité générale* permet de décrire la première : la gravitation.

1.2 QUARKS ET LEPTONS

On peut construire toute la matière connue de l'univers avec seulement 12 fermions (6 *quarks*, 6 *leptons*) – leurs antiparticules – et 12 *bosons vecteurs*. Ce sont les constituants de base du *modèle standard* qui est la théorie admise actuellement pour reproduire la physique des particules. Cette théorie ne permet pas de décrire la gravitation. Pratiquement tous les phénomènes naturels peuvent être compris dans le cadre du modèle standard et de la gravitation.

1.2.1 Les leptons

Les leptons sont classés en trois familles. Leur liste et quelques-unes de leurs propriétés sont indiquées dans le tableau 1.1.

Tableau 1.1 – Quelques propriétés des leptons.

Leptons						
Famille	Particule		Masse	Particule		Masse
1	électron	e^-	0,511 MeV/c ²	neutrino électronique	ν_e	< 2,5 eV/c ²
2	muon	μ^-	105,7 MeV/c ²	neutrino muonique	ν_μ	< 170 keV/c ²
3	tau	τ^-	1777 MeV/c ²	neutrino tau	ν_τ	< 18 MeV/c ²

Les leptons peuvent être considérés comme des particules ponctuelles. Leur taille est en effet inférieure à 10^{-18} m, c'est-à-dire 10^{-3} fm (1 fm = 1 femtomètre = 10^{-15} m).

Parmi les leptons chargés, seul l'électron est stable. Il est un des constituants de la matière ordinaire puisque les atomes sont formés d'un noyau et d'électrons. Le muon (μ^-) et le tau (τ^-) sont instables. Le premier a une période de 2,2 μ s et se décompose en un électron e^- , un neutrino muonique ν_μ et un antineutrino électronique $\bar{\nu}_e$. Le tau a une durée de vie beaucoup plus courte ($\simeq 3,4 \times 10^{-13}$ s) avec plusieurs voies de décomposition. Les neutrinos sont stables.

À chaque lepton chargé est associé un neutrino. On parle de *saveurs* : les leptons ont trois saveurs qui sont les familles indiquées dans le tableau 1.1. À chaque lepton correspond un antilepton de même masse mais de charge électrique opposée lorsqu'il en a une. Il y a donc six antileptons : (e^+ , $\bar{\nu}_e$), (μ^+ , $\bar{\nu}_\mu$) et (τ^+ , $\bar{\nu}_\tau$).

Dans le modèle standard, on suppose que la masse des neutrinos est nulle. Si tel est le cas, un lepton d'une famille ne peut se transformer en un lepton d'une autre famille. Or la mesure des neutrinos solaires montre un déficit du nombre de neutrinos émis par rapport à ce qui est prévu par le modèle standard. Ceci provient de ce que le neutrino peut changer de saveur (un neutrino électronique peut par exemple se transformer en un neutrino muonique qu'on ne détectera pas). Il en résulte que l'on observe moins de neutrinos électroniques que prévu puisque certains se sont transformés en neutrinos d'une autre saveur lors de leur trajet entre le Soleil et la Terre. L'existence d'une *oscillation du neutrino*, qui signifie qu'un neutrino peut changer de saveur au cours du temps, implique que la masse des neutrinos n'est pas nulle mais elle doit être très faible.

1.2.2 Les quarks

Les quarks sont au nombre de six : on dit qu'ils ont six saveurs. Ils sont groupés en trois générations. À chaque quark est associé un antiquark. Ainsi l'antiquark de u est \bar{u} . Les *hadrons* sont des particules composites formées de quarks. On distingue les *baryons*, formés de trois quarks comme le neutron ou le proton, des *mésons*, comme le π , composés de deux quarks. Les hadrons interagissent par interaction forte. La

structure du proton est (uud) et celle du neutron (udd) . Le π^+ a la structure $(u\bar{d})$. Le π^- , qui est son antiparticule, a la structure $(\bar{u}d)$.

On ne peut pas observer des quarks libres : ils sont *confinés*. Plus on essaye de séparer deux quarks, plus il faut d'énergie et on crée des paires particule-antiparticule sans jamais pouvoir les séparer. C'est un peu comme deux particules liées par un ressort incassable. Plus on tire, plus il faut fournir de l'énergie mais on ne peut pas les séparer. À très grande énergie, on peut déconfiner localement les quarks. C'est ce qui est fait et étudié dans les expériences de collisions d'ions lourds ultrarelativistes (cf. section 5.15). On essaye ainsi de recréer en laboratoire ce qui s'est passé dans les premiers instants de la formation de l'univers.

Le quark est caractérisé par une autre propriété, la *couleur*. Chaque quark a un nombre quantique de couleur qui peut prendre l'une des trois valeurs suivantes (choisies par convention) : rouge, vert et bleu. Les antiquarks ont une anticouleur : antirouge, antivert et antibleu, parfois dénommées cyan, jaune et magenta. La matière qui nous entoure n'est faite que de deux saveurs de quarks : ceux de la génération 1.



« LES HADRONS DOIVENT ÊTRE BLANCS »

La raison pour laquelle il a fallu introduire le nombre quantique de couleur vient de ce qu'il n'est pas possible de comprendre l'existence de certains hadrons (ce sont en fait des résonances car ils existent très peu de temps). C'est le cas du $\Delta^{++} = (uuu)$, du $\Omega^- = (sss)$ ou du $\Delta^- = (ddd)$. Dans ces particules, le moment orbital des quarks est nul donc la partie espace de la fonction d'onde est symétrique. En l'absence de couleur, la fonction d'onde totale est le produit d'une fonction d'onde d'espace, d'une fonction d'onde de spin et d'une fonction d'onde de saveur. Comme chacune d'entre elles est symétrique pour ces particules, la fonction d'onde totale est symétrique ce qui est en contradiction avec le fait que ces particules sont des fermions. On résout ce problème en introduisant un nouveau nombre quantique : la *couleur*. La fonction d'onde associée à la couleur doit être antisymétrique pour que la fonction d'onde totale soit antisymétrique. Les propriétés de la couleur sont les suivantes :

- Chaque quark peut exister dans un des trois états de couleur, rouge, vert et bleu. Il peut changer de couleur en échangeant un gluon, un boson vecteur de l'interaction forte.
- On ne peut observer dans la nature que des objets « blancs ». On dit que l'on ne peut observer que des singulets de couleur. Ceci conduit au confinement des quarks.

On peut se demander pourquoi les particules existantes sont « blanches ». Pour très grossièrement essayer de comprendre cela, revenons sur l'interaction électromagnétique. Il y a des charges positives et négatives mais la matière qui nous entoure est neutre. De la même manière, pour l'interaction forte où il y a trois charges de couleur, il n'est pas choquant que les particules soient « blanches », c'est-à-dire

neutre au niveau de la couleur. Si au niveau macroscopique on est capable de séparer des charges et d'avoir des objets chargés positivement ou négativement, on ne peut par contre pas séparer les quarks et avoir des objets colorés.

Tableau 1.2 – Quelques propriétés des quarks.

Quarks					
Génération	Quark ($q = -\frac{1}{3}e$)		Masse (MeV/c ²)	Quark ($q = +\frac{2}{3}e$)	Masse (MeV/c ²)
1	Down (bas)	d	$\approx 4-8$	Up (haut)	$u \approx 1,5-4$
2	Strange (étrange)	s	$\approx 80-130$	Charm (charmé)	$c \approx 1\ 150-1\ 350$
3	Bottom/ Beauty (beauté)	b	$\approx 4\ 100-4\ 400$	Top/Truth (vérité)	$t \approx 173\ 000$

Dans l'interaction forte, on peut créer une paire quark-antiquark s'il y a suffisamment d'énergie. On ne peut pas, avec cette interaction, changer la saveur d'un quark mais cela peut être fait avec l'interaction faible. Ainsi, lors de la radioactivité β , dans laquelle un neutron se transforme en proton, un quark u est transformé en quark d .

1.2.3 Bosons vecteurs

En mécanique classique, on suppose que chaque particule crée un champ dans tout l'espace. L'interaction avec une autre particule est alors l'influence de ce champ sur celle-ci. Ainsi, une charge q crée à une distance \mathbf{r} un champ électrique \mathbf{E} égal à :

$$\mathbf{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \left(\frac{\mathbf{r}}{r} \right) \quad (1.1)$$

où \mathbf{r}/r est le vecteur unitaire pointant dans la direction \mathbf{r} et ϵ_0 la permittivité du vide. Une particule de charge q' placée au point \mathbf{r} subira la force :

$$\mathbf{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qq'}{r^2} \left(\frac{\mathbf{r}}{r} \right) \quad (1.2)$$

Tableau 1.3 – Quelques propriétés des bosons vecteurs. m est la masse, s le nombre quantique de spin et q la charge électrique.

Interaction	Boson vecteur
Électromagnétique	Photon virtuel, $m = 0, s = 1$
Forte	8 Gluons. $m \approx 0, s = 1$, Charge de couleur, $q = 0$
Faible	$W^+, W^-, m = 80\ \text{GeV}/c^2$ et $Z^0, m = 91\ \text{GeV}/c^2; s = 1$
Gravitation	Graviton ? $m = 0, s = 2$

1.2 Quarks et leptons

Chacun d'entre nous est confronté à la notion de champ et de force dans la vie de tous les jours. Si on lâche un objet, il tombe sur le sol : la force qui le fait tomber est son poids et c'est le champ de gravitation qui l'entraîne vers le sol. Si l'on approche un objet en fer d'un aimant on sent que celui-ci est attiré par l'aimant et il faut fournir un effort pour le retenir. L'aimant crée un champ magnétique qui attire l'objet en fer.

En physique quantique, l'interaction se fait par échange de particules. Ces particules, qui sont les vecteurs de l'interaction, sont en nombre limité. Ce sont :

- le photon virtuel pour l'interaction électromagnétique ;
- les bosons intermédiaires W^+ , W^- et Z^0 pour l'interaction faible ;
- les gluons, au nombre de 8, pour l'interaction forte.

On parle de boson vecteur car le spin des bosons du modèle standard est $s = 1$. Il y a donc trois composantes $(\pm 1, 0)$ pour la projection s_z tout comme un vecteur. Une particule de spin zéro est appelée particule scalaire car il n'y a qu'une composante, comme pour un scalaire.

LES MÉDIATEURS D'INTERACTION

Une image souvent utilisée pour comprendre comment une interaction peut résulter de l'échange de particules est celle dans laquelle on imagine deux barques sur un lac avec une personne sur chacune. Si la personne de la première barque envoie un objet pesant à la personne située dans la deuxième barque, il en résulte, par le principe de l'action et de la réaction, un recul pour la première barque et la seconde voit sa trajectoire modifiée. L'objet pesant joue ici le rôle du vecteur de l'interaction analogue aux bosons vecteurs qui s'échangent lorsque des particules interagissent. Plus l'objet est pesant, moins la personne pourra l'envoyer loin. C'est la même chose pour les bosons vecteurs : plus ils sont massifs, plus la portée de l'interaction est faible.

Dans une interaction entre deux particules, A et B par exemple ($A + B \rightarrow A + B$) se faisant par échange de boson vecteur X , la particule échangée est considérée comme *virtuelle* car elle n'apparaît pas en temps que particule réelle dans l'état final. Dans le cas de l'interaction électromagnétique, le photon virtuel a trois projections possibles du moment angulaire sur un axe de quantification alors que pour un photon réel il n'y en a que deux possibles (qui correspondent aux deux états de polarisation de la lumière) à cause de la relativité. La figure 1.1 montre, par exemple, l'interaction élastique d'un électron et d'un positron par échange d'un photon virtuel. Ce type de représentation s'appelle un *diagramme de Feynman*. Il permet de facilement se représenter une interaction. Les interactions complexes entre des particules sont représentées par un ensemble de diagrammes de Feynman qui permettent de calculer l'amplitude de diffusion du processus.

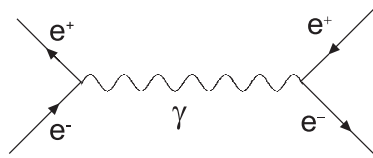


Figure 1.1 – Diffusion élastique $e^- + e^+ \longrightarrow e^- + e^+$

Il peut sembler étrange que la flèche du positron soit dirigée en sens inverse de celle de l'électron. Il s'agit d'une convention : les antiparticules sont représentées comme remontant le temps.

Lors de l'échange d'une particule virtuelle, l'énergie totale n'est pas rigoureusement conservée. Pour un boson vecteur massif de masse M_X dont l'impulsion est petite devant son énergie ΔE , l'énergie est conservée à $M_X c^2$ près. La relation d'incertitude sur l'énergie $\Delta E \cdot \Delta t \gtrsim \hbar$ autorise que la conservation de l'énergie soit violée à ΔE près pendant un temps $\Delta t \lesssim \hbar / \Delta E$. Comme une particule ne peut pas se propager à une vitesse supérieure à celle de la lumière, elle peut au plus parcourir une distance égale à $c\Delta t \lesssim \hbar / M_X c$. La quantité $\hbar / M_X c = \hbar c / M_X c^2$ représente l'ordre de grandeur de la portée de l'interaction. Donc plus le boson vecteur est massif, plus cette portée est faible.

L'interaction faible peut se faire par courants chargés lorsque les médiateurs de l'interaction sont les W^\pm , ou par courant neutre lorsque le médiateur est le Z^0 . La figure 1.2 montre trois exemples d'interaction faible avec échange de boson vecteur.

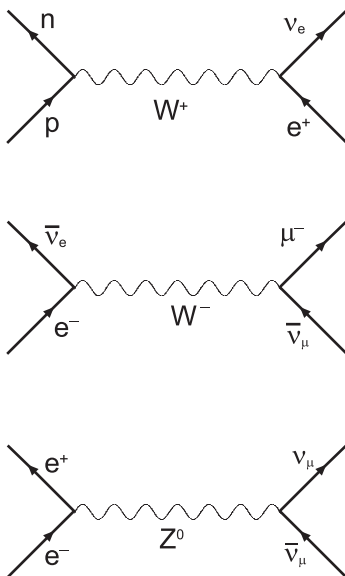


Figure 1.2 – De haut en bas :
 $p \longrightarrow n + e^+ + \nu_e$; $e^- + \bar{\nu}_e \longrightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$
 et $e^+ + e^- \longrightarrow \nu_\mu + \bar{\nu}_\mu$

La portée de l'interaction électromagnétique est infinie car la masse du photon est nulle. Remarquons qu'il n'existe pas de référentiel où le photon est au repos.

Les *gluons*, qui sont les médiateurs de l'interaction forte, sont au nombre de 8. Ils ont un nombre quantique de couleur, c'est-à-dire qu'ils portent une charge de couleur. En comparaison, le photon, médiateur de l'interaction électromagnétique, ne porte pas de charge électrique. Une des conséquences est que les gluons interagissent entre eux par la force de couleur alors que ce n'est pas le cas des photons. La théorie qui décrit l'interaction forte est la *chromodynamique quantique*.

1.3 LA GRAVITATION

La gravitation est une interaction très faible (*cf.* tableau 1.4), de portée infinie, qui agit sur la masse des particules. La force de gravitation est toujours attractive. Deux corps de masse M_1 et M_2 s'attirent par une force donnée par :

$$\mathbf{F} = -G \frac{M_1 M_2}{r^2} \left(\frac{\mathbf{r}}{r} \right) \quad (1.3)$$

où G est la *constante gravitationnelle* ($G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ N.m}^2.\text{kg}^{-2}$), r la distance séparant les corps 1 et 2 et \mathbf{r}/r le vecteur unitaire dirigé du corps 1 vers le corps 2. Le signe moins indique que la force est attractive. Elle décroît avec la distance. Sur Terre, un objet subit l'attraction gravitationnelle de notre planète. Si m est la masse de ce corps, la force d'attraction est dirigée vers le centre de la Terre et son module vaut $F = mg$. L'accélération de la pesanteur, g , vaut :

$$g = G \frac{M_T}{R^2} = 9,91 \text{ m/s}^2,$$

où M_T ($\simeq 6 \times 10^{24} \text{ kg}$) est la masse de la Terre et R son rayon en supposant que c'est une sphère parfaite.

L'intensité de l'interaction gravitationnelle est si faible qu'elle est négligeable au niveau des atomes ou des noyaux. En revanche, à l'échelle macroscopique, on en ressent les effets et elle joue un rôle très important au niveau astronomique (planètes, étoiles, univers...).

Einstein a montré, en 1915, que la gravitation était une manifestation de la déformation de l'espace-temps. Malgré de nombreux efforts, on n'a pas encore pu réconcilier les lois de la gravitation avec celles de la mécanique quantique et trouver une théorie permettant d'intégrer les quatre interactions fondamentales. En termes d'échange de particules, la gravitation serait alors décrite par l'échange d'une particule hypothétique : le *graviton*. Si cette particule existait, la mécanique quantique prédit que sa masse serait nulle et que son spin serait égal à 2.