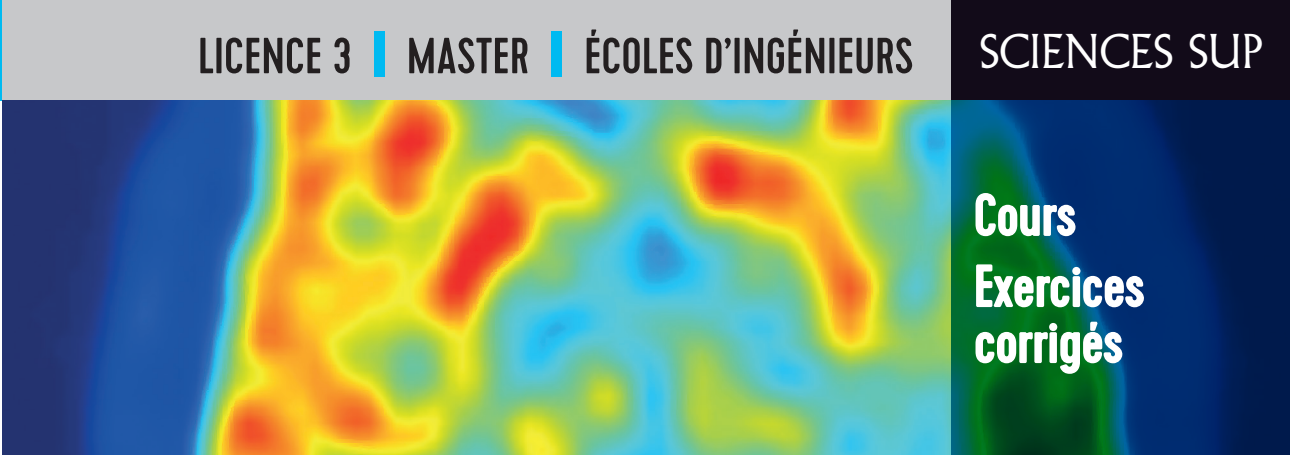




Cours
Exercices
corrigés

Claude Le Sech, Christian Ngô

Physique nucléaire

Des quarks aux applications

2^e ÉDITION

DUNOD

**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

© Dunod, 2010, 2014, 2020 pour la nouvelle présentation

11 rue Paul Bert, 92240 Malakoff

EAN 978-2-10-081122-9

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	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