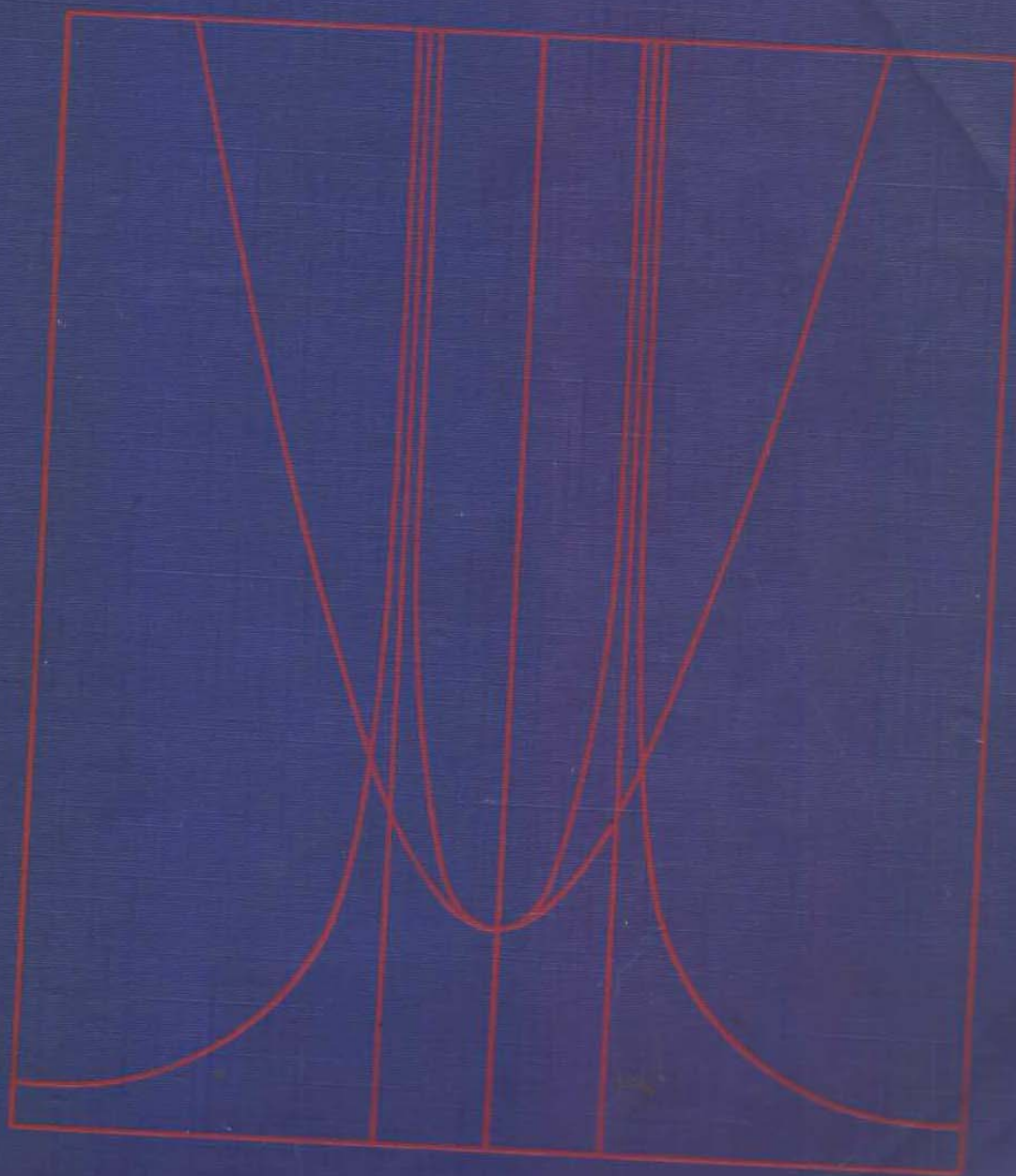


PHYSIQUE NUCLÉAIRE

D. BLANC



MASSON ET CIE



TABLE DES MATIÈRES

CHAPITRE PREMIER. — Généralités	1
1-1. <i>La diffusion élastique — Systèmes de référence employés en physique nucléaire</i>	1
1-1-1. Etude de la diffusion dans le système du laboratoire	3
1-1-2. Etude de la diffusion dans le système du centre de masse	4
1-2. <i>Diffusion élastique coulombienne des particules alpha. Conséquences concernant les idées sur la structure de l'atome</i>	4
1-2-1. Le modèle de Rutherford	5
1-2-2. Expériences de Geiger et Marsden	8
1-3. <i>Les réactions nucléaires</i>	9
1-4. <i>Le neutron, la fission</i>	11
1-5. <i>Les réactions thermonucléaires</i>	13
1-6. <i>Section efficace d'une réaction nucléaire</i>	14
1-6-1. Section géométrique du noyau	14
1-6-2. Sections efficaces des particules rapides	15
1-6-3. Sections efficaces des particules lentes	16
1-6-4. Section efficace différentielle	18
1-6-5. Section efficace totale	18
1-7. <i>Interactions fortes, interactions faibles. Non conservation de la parité dans les interactions faibles</i>	19
1-7-1. Les divers types d'interactions	19
1-7-2. Classification de ces interactions	19
1-7-3. Principe de conservation de la parité	21
1-7-4. Non conservation de la parité dans les interactions faibles	21
1-7-5. L'interaction superfaible	23
1-8. <i>Tendances actuelles des recherches nucléaires</i>	24
1-8-1. Recherche appliquée	24
1-8-2. Recherche fondamentale	24
1-8-2-1. Tableau des particules élémentaires	24
1-8-2-2. Les grand accélérateurs de particules	27
<i>Bibliographie</i>	29
<i>Index</i>	29
CHAPITRE 2. — Connaissance globale du noyau atomique	31
2-1. <i>Constitution du noyau</i>	31
2-1-1. Symboles représentant l'atome et le noyau	32
2-1-2. Isotopes, isobares, isotones	32
2-1-3. Le système des masses atomiques	33

2-2. Les éléments transuraniens	33
2-2-1. Les transuraniens connus	33
2-2-2. Les hyper-éléments	35
2-3. Energie de liaison nucléaire	37
2-3-1. Energie de liaison globale E_l du noyau	37
2-3-2. Energie de liaison moyenne par nucléon, E_l/A	38
2-3-3. Modes possibles de production d'énergie à partir des réactions nucléaires	39
2-4. Modèle de la goutte liquide	39
2-4-1. Hypothèses de base	39
2-4-2. Formule semi-empirique de von Weizsäcker	40
2-4-3. Détermination des coefficients de la formule (2-8)	43
2-4-4. Corrections apportées à la formule	44
2-4-5. Applications de la formule de Weizsäcker	44
2-4-5-1. Détermination des rayons nucléaires	44
2-4-5-2. Stabilité des noyaux vis-à-vis de la radioactivité bêta	45
2-4-5-3. Calcul du bilan d'énergie des réactions nucléaires	47
2-4-5-4. Fission nucléaire spontanée	47
2-5. Mesures des rayons nucléaires	51
2-5-1. Méthode de Hofstadter (diffusion d'électrons rapides)	51
2-5-2. Spectres de rayons X	54
2-5-3. Structure des nucléons	56
2-6. Conclusion	56
Bibliographie	59
Exercices	60
CHAPITRE 3. — Nucléons et noyaux considérés comme des systèmes de la mécanique quantique	62
3-1. Quantification des nucléons	62
3-1-1. Nombre quantique principal n , radial n_r	62
3-1-2. Nombre quantique orbital l	53
3-1-3. Nombre quantique de spin s	64
3-1-4. Nombre quantique j	64
3-1-5. Nombre quantique magnétique orbital m_l	64
3-1-6. Nombre quantique magnétique de spin m_s	65
3-1-7. Nombre quantique magnétique total m	65
3-1-8. Isospin T	65
3-2. Quantification des états nucléaires	65
3-2-1. Niveaux nucléaires excités	65
3-2-2. Moment angulaire total	66
3-2-3. Nombre quantique magnétique nucléaire m_j	66
3-2-4. Parité du noyau	67
3-2-5. Moment magnétique dipolaire	67
3-2-5-1. Unité utilisée	67
3-2-5-2. Moment magnétique dipolaire des nucléons libres	67
3-2-5-3. Moments magnétiques des nucléons dans les noyaux	68
3-2-5-4. Moments magnétiques dipolaires des noyaux	69
3-2-6. Moment électrique quadripolaire	70
3-2-6-1. Calcul classique	70
3-2-6-2. Calcul quantique	72
3-2-6-3. Valeur mesurée du moment électrique quadripolaire	72
3-3. Etude du deutéron	73
3-3-1. Données expérimentales	73
3-3-1-1. Energie de liaison	73
3-3-1-2. Moment angulaire, parité	73
3-3-1-3. Rayon nucléaire	73

3-3-2. Etude théorique	74
3-3-2-1. Considérations de base	74
3-3-2-2. Résolution de l'équation	75
3-3-2-3. Normalisation de la fonction d'onde radiale	77
3-3-3. Remarque	78
<i>Bibliographie</i>	79
<i>Exercices</i>	79
CHAPITRE 4. — Les désintégrations radioactives	80
4-1. Divers types de radioactivité	80
4-1-1. La radioactivité alpha	80
4-1-2. La radioactivité p	80
4-1-3. La radioactivité bêta	81
4-1-4. Emissions de rayons gamma	81
4-2. Lois de l'émission radioactive	82
4-2-1. Le noyau produit est stable	82
4-2-2. Le noyau produit est radioactif	84
4-3. Eléments radioactifs naturels. Eléments radioactifs artificiels	85
4-3-1. Radioactivité naturelle	85
4-3-1-1. Radionucléides existant dans l'écorce terrestre	85
4-3-1-2. Radionucléides produits par l'interaction du rayonnement cosmique avec l'atmosphère	89
4-3-2. Radioactivité artificielle	90
4-3-2-1. Activation d'une cible	90
4-3-2-2. Séries collatérales	92
4-3-2-3. Radionucléides émetteurs bêta	92
4-3-3. Radioactivité du neutron	94
4-4. Activité radioactive: le curie	94
4-5. Radioactivité alpha	95
4-5-1. Propriétés expérimentales	95
4-5-2. Systématique de la radioactivité alpha	97
4-5-3. Théorie de la radioactivité alpha	99
4-5-3-1. Impossibilité d'un calcul classique	100
4-5-3-2. Utilisation de l'effet tunnel	101
4-6. Radioactivité bêta	103
4-6-1. Propriétés expérimentales	103
4-6-2. Systématique de la radioactivité bêta	105
4-6-3. Introduction du neutrino	106
4-6-3-1. Interprétation du spectre bêta	106
4-6-3-2. Recherche de l'existence du neutrino	107
4-6-3-3. Hélicité du neutrino	108
4-6-3-4. Masse du neutrino	108
4-6-3-5. Les deux sortes de neutrinos	109
4-6-4. Théorie de la radioactivité bêta	109
4-6-4-1. Equation de Fermi	110
4-6-4-2. Diagramme de Kurie	111
4-6-4-3. Période des émetteurs bêta	112
4-6-4-4. Classification des transitions bêta	112
4-7. Capture électronique	114
<i>Bibliographie</i>	115
<i>Exercices</i>	116
CHAPITRE 5. — Emissions de rayons gamma	118
5-1. Largeur de niveau nucléaire	118
5-2. Caractère multipolaire de l'émission gamma	119

5-3. Isomérisme nucléaire	121
5-4. Conversion interne	122
5-5. Mesure des largeurs de niveaux	123
5-5-1. Mesure directe de la vie moyenne τ	124
5-5-2. Mesure d'absorption par résonance	124
5-5-2-1. Utilisation du mouvement de noyaux individuels	125
5-5-2-2. Effet Mossbauer	126
Bibliographie	128
Exercices	128
CHAPITRE 6. — Pénétration des particules dans la matière	129
6-1. Perte d'énergie des particules lourdes chargées	129
6-1-1. Calcul classique	129
6-1-2. Calcul quantique	131
6-1-3. Ionisation spécifique	132
6-1-4. Parcours	133
6-2. Exemple des particules α	134
6-2-1. Parcours	134
6-2-2. Ionisation	135
6-3. Perte d'énergie des électrons	137
6-3-1. Etude théorique	137
6-3-1-1. Diffusion sur les électrons atomiques	138
6-3-1-2. Diffusion coulombienne atomique	138
6-3-1-3. Rayonnement de freinage	137
6-3-2. Etude expérimentale	139
6-3-2-1. Parcours maximal des rayons β d'un radionucléide	139
6-3-2-2. Parcours d'électrons monocinétiques	140
6-3-2-2. Ionisation	140
6-4. Cas des positrons	141
6-4-1. Annihilation du positron	141
6-4-2. Le positronium	141
6-5. Effet Cerenkov	143
6-5-1. Milieux matériels denses	145
6-5-2. Milieux gazeux (pression moyenne)	145
6-6. Perte d'énergie des neutrons	147
6-7. Interactions des rayons X et γ	148
6-7-1. Effet Thomson	148
6-7-2. Diffusion Compton	149
6-7-3. Effet photoélectrique	150
6-7-4. Production de paires	150
6-8. Atténuation d'un faisceau de rayons gamma. Absorption de son énergie	151
Bibliographie	154
Exercices	154
CHAPITRE 7. — Les réactions nucléaires	156
7-1. Lois de conservation	156
7-1-1. Conservation de la charge	157
7-1-2. Conservation de la quantité de mouvement	157
7-1-3. Conservation de l'énergie	157
7-1-4. Conservation de la parité	159
7-2. Seuil d'une réaction endoénergétique	159

7-3. Fonction d'excitation d'une réaction nucléaire	160
7-3-1. Au-dessous de 1 MeV: résonances	160
7-3-2. Entre 1 et 50 MeV environ: continuum	160
7-3-3. Au-dessus de 50 MeV environ	161
7-4. Généralités sur les sections efficaces	161
7-4-1. Coefficient de transmission du noyau	162
7-4-2. Cas de la diffusion élastique	163
7-5. Modèles utilisés	163
✕ 7-5-1. Modèle du noyau composé	164
7-5-2. Modèle optique	166
7-5-3. Réactions de «stripping» ou «stripage»	168
7-4-5. Modèle unifié de Feshbach	169
✕ 7-6. Calcul des sections efficaces dans le cadre du modèle du noyau composé	170
7-6-1. Section efficace de formation du noyau composé	170
7-6-1-1. Cas des particules neutres	170
7-6-1-2. Cas des particules chargées	171
7-6-1-3. Résonances	171
7-6-2. Section efficace σ_{xy} (près d'une résonance)	172
7-6-3. Région du continuum	173
Bibliographie	174
Exercices	174
CHAPITRE 8. — Le neutron	176
8-1. Fiche signalétique du neutron	176
8-1-1. Masse	176
8-1-2. Spin	176
8-1-3. Moment magnétique dipolaire	177
8-1-4. Structure	177
8-1-5. Radioactivité	177
8-1-6. Classement des neutrons en fonction de leur énergie	178
8-1-6-1. Neutrons froids	180
8-1-6-2. Neutrons thermiques	180
8-1-6-3. Neutrons d'énergies supérieures aux valeurs thermiques	181
8-2. Sources de neutrons	182
8-2-1. Sources radioactives: réactions (α , n)	182
8-2-1-1. Sources de polonium-béryllium	182
8-2-1-2. Sources de radium-béryllium	183
8-2-1-3. Autres sources (α , n)	183
8-2-1-4. Rendements obtenus	183
8-2-2. Sources radioactives: réactions (γ , n)	183
8-2-3. Sources à fission spontanée	184
8-2-4. Accélérateurs de particules	185
8-2-4-1. Réactions (γ , n): photoneutrons	185
8-2-4-2. Interactions nucléaires des particules chargées	185
8-2-5. Fission nucléaire	188
8-2-5-1. Fission par neutrons lents	188
8-2-5-2. Fission par d'autres particules	189
8-2-6. Sources de neutrons thermiques	189
8-2-6-1. Réacteurs	189
8-2-6-2. Sources radioactives	191
8-2-7. Sources de neutrons froids	191
8-3. Spectrométrie des neutrons	192
8-3-1. Mesure directe des vitesses: spectromètres mécaniques	192
8-3-2. Mesure directe des longueurs d'onde: le spectromètre à cristal	194
8-4. Interactions des neutrons avec la matière	195
8-4-1. Diffusion élastique	195

8-4-1-1. Etude théorique	196
8-4-1-2. Etude expérimentale	197
8-4-2. Diffusion inélastique	198
8-4-2-1. Noyaux légers	198
8-4-2-2. Noyaux de masses moyennes	199
8-4-2-3. Noyaux lourds	199
8-4-3. Réactions de capture	199
8-4-3-1. Généralités	199
8-4-3-2. Captures radiative (n, γ)	200
8-4-3-3. Réactions (n, p)	202
8-4-3-4. Réactions (n, α)	203
8-4-3-5. Interactions de neutrons très rapides	203
<i>Bibliographie</i>	204
<i>Exercices</i>	205
CHAPITRE 9. — Fission nucléaire, réaction en chaîne	207
9-1. Application du modèle du puits de potentiel	207
9-1-1. $Q > V$: Fission spontanée	208
9-1-2. $Q < V$: Fission induite	208
9-1-2-1. $E_n > V-Q$	208
9-1-2-2. $E_n < V-Q$	209
9-2. Particularités de la réaction de fission	209
9-2-1. L'énergie produite	209
9-2-2. Les fragments de fission	209
9-2-3. L'émission de neutrons rapides	210
9-3. Fission accompagnée de particules α . Tripartition, quadripartition	210
9-4. Sections efficaces des réactions de fission	211
9-4-1. Noyaux du premier groupe	211
9-4-2. Noyaux du deuxième groupe	212
9-5. Energie dégagée par la réaction de fission	213
9-6. Les produits de fission	215
9-7. Neutrons émis par la fission	216
9-7-1. Neutrons immédiats	217
9-7-2. Neutrons différés	217
9-8. Notions sur la réaction en chaîne	219
9-8-1. Quantités caractérisant la réaction en chaîne	219
9-8-2. Rôle joué par les neutrons différés	221
9-8-3. Condition de criticité	221
9-8-3-1. Probabilité P	221
9-8-3-2. Conditions de criticité pour un réacteur de dimensions infinies	222
9-9. Classification des réacteurs nucléaires	224
9-9-1. Classification selon l'emploi	225
9-9-2. Classification selon le bilan de fonctionnement	225
9-9-3. Classification selon la filière	226
9-9-3-1. Graphite-gaz	226
9-9-3-2. Graphite-eau	226
9-9-3-3. Graphite-métal (ou sel) fondu	226
9-9-3-4. Ralentisseur: eau lourde	227
9-9-3-5. Eau légère-eau légère	227
9-9-3-6. Réacteurs à neutrons rapides	227
<i>Bibliographie</i>	228
<i>Exercices</i>	228

CHAPITRE 10. — Les réactions thermonucléaires	230
10-1. <i>Intérêt pratique de la question</i>	230
10-1-1. Réserves mondiales d'énergie	230
10-1-2. Radioactivité artificielle	231
10-1-3. Conversion directe de l'énergie	231
10-2. <i>Réactions nucléaires utilisables</i>	232
10-3. <i>Relation entre l'énergie cinétique et la température</i>	233
10-4. <i>Conditions nécessaires pour la divergence d'un réacteur à fusion</i>	235
10-4-1. Énergie produite dans le volume du plasma	235
10-4-2. Énergie rayonnée à travers la surface externe du plasma	238
10-4-3. Température d'«ignition» du plasma	239
10-4-4. Nécessité de confinement du plasma	239
10-5. <i>Réalisations pratiques</i>	242
10-5-1. Systèmes basés sur le confinement par «striction»	243
10-5-1-1. Principe de l'effet de striction	243
10-5-1-2. Appareils cylindriques	245
10-5-1-3. Appareils toroïdaux	245
10-5-1-4. Striction tubulaire	245
10-5-2. Systèmes utilisant des miroirs magnétiques	246
10-5-2-1. Principe des miroirs magnétiques	246
10-5-2-2. Précisions techniques	248
10-5-2-3. Pièges à champs pulsés rapides «theta pinch»	249
10-5-2-4. Machines à champ hybride	249
10-5-3. Le programme «Astron»	251
10-5-4. Autres systèmes	251
10-5-4-1. Utilisation de champs de haute fréquence	251
10-5-4-2. Système à laser	252
10-6. <i>Extraction possible de l'énergie depuis les machines à plasma</i>	252
10-6-1. Transfert thermique	252
10-6-2. Conversion directe de l'énergie	253
10-7. <i>Conclusion</i>	254
<i>Bibliographie</i>	254
<i>Exercices</i>	255
CHAPITRE 11. — Les modèles nucléaires	256
11-1. <i>Modèle des couches</i>	257
11-1-1. Introduction	257
11-1-2. Oscillateur harmonique	258
11-1-3. Puits de potentiel rectangulaire à parois infinies	259
11-1-4. Puits de potentiel rectangulaire à parois finies	261
11-1-5. Puits de potentiel non rectangulaire	262
11-1-6. Couplage (spin-orbite)	263
11-1-7. Groupement des nucléons en couches	263
11-1-8. Caractéristiques globales du noyau	264
11-1-8-1. Parité	264
11-1-8-2. Moment angulaire	264
11-1-8-3. Règles générales	264
11-2. <i>Modèle du gaz de Fermi</i>	265
11-3. <i>Modèle à particules α, (quartets)</i>	266
11-4. <i>Modèles intermédiaires</i>	267
11-4-1. Modèle unifié	267
11-4-2. Modèle à quasi-particules	268
<i>Bibliographie</i>	269
<i>Exercices</i>	270

CHAPITRE 12. — Forces de cohésion nucléaire	271
12-1. <i>Symétrie de charge et indépendance de charge</i>	271
12-1-1. Energie de séparation des nucléons	271
12-1-2. Structures des noyaux miroirs	272
12-2. <i>Rayon d'action</i>	272
12-3. <i>Saturation</i>	273
12-4. <i>Influence du couplage spin-orbite</i>	273
12-5. <i>Influence du spin</i>	273
12-5-1. Diffusion (n, p)	274
12-5-2. Interprétation théorique	275
12-5-2-1. A basse énergie	275
12-5-2-2. Aux énergies supérieures à 1 eV	275
12-6. <i>Caractère tensoriel</i>	276
12-7. <i>Théorie de l'échange mésonique</i>	277
<i>Bibliographie</i>	280
<i>Exercices</i>	281
CHAPITRE 13. — Dynamique des particules relativistes	282
13-1. <i>Transformation de Lorentz</i>	282
13-2. <i>Représentation graphique de la transformation de Lorentz</i>	283
13-2-1. Vitesses colinéaires	283
13-2-2. Vitesses non colinéaires	283
13-3. <i>Durée de vie d'une particule</i>	284
13-4. <i>Caractéristiques des particules relativistes</i>	284
13-4-1. Masse	284
13-4-2. Energie totale E	285
13-4-3. Energie cinétique T	285
13-4-4. Quantité de mouvement p	285
13-4-5. Energie à laquelle une particule devient relativiste	286
13-5. <i>Choc de deux particules identiques, anneaux de stockage</i>	286
13-5-1. Choc de deux électrons	287
13-5-1-1. Cas d'une cible au repos	287
13-5-1-2. Cas de faisceaux opposés	287
13-5-1-3. Conséquences	287
13-5-2. Choc de deux nucléons	287
13-5-3. Application aux anneaux de stockage	288
13-6. <i>Hypothèse des tachyons</i>	290
13-6-1. Propriétés des tachyons	290
13-6-1-1. Masse	291
13-6-1-2. Relation fondamentale de la relativité	291
13-6-1-3. Energie	292
13-6-1-4. Quantité de mouvement	293
13-6-2. Tentatives expérimentales	293
13-6-2-1. Chambres à bulles	293
13-6-2-2. Radioactivité bêta	293
13-6-2-3. Effet Cerenkov	293
13-6-3. Conclusion	294
<i>Bibliographie</i>	294
<i>Exercices</i>	295

CHAPITRE 14. — <i>La physique corpusculaire aux hautes énergies</i>	296
14-1. <i>Les méthodes d'investigation expérimentale</i>	296
14-1-1. Les antiparticules	296
14-1-1-1. Découverte de l'antiproton (1955)	296
14-1-1-2. Découverte de l'antineutron (1956)	299
14-1-1-3. Découverte de l'antioméga (1971)	300
14-1-2. Les résonances	301
14-1-2-1. Résonances (pion-nucléon)	301
14-1-2-2. Résonances (pion-hypéron)	302
14-1-2-3. Résonances des mésons	305
14-1-3. Le neutrino	305
14-2. <i>Nombres quantiques des particules</i>	307
14-2-1. L'isospin T (ou spin isotopique)	307
14-2-1-1. Cas des nucléons (doublets)	307
14-2-1-2. Cas des pions (triplets)	308
14-2-2. L'hypercharge Y	308
14-2-2. L'étrangeté S	309
14-2-4. Lois de conservation	309
14-3. <i>Essai de classification des particules élémentaires</i>	310
14-3-1. Les trajectoires de Regge	310
14-3-2. La théorie de Gell-Mann et Neeman	312
14-3-3. L'hypothèse des quarks, le parton	315
<i>Bibliographie</i>	317
<i>Exercices</i>	318
APPENDICE 1. — <i>Historique de la physique nucléaire et corpusculaire</i>	320
1-1. Mise en évidence de l'atome, sa structure	320
1-2. L'électron; naissance de la physique corpusculaire	320
1-3. Radioactivité naturelle, radioactivité artificielle	321
1-4. Hypothèses et théories sur les structures atomiques et nucléaires	321
1-5. Interactions nucléaires, accélérateurs, particules élémentaires	321
1-6. Le neutron, la fission, les réactions thermonucléaires	322
1-7. Détection des particules	323
APPENDICE 2. — <i>Liste des réacteurs nucléaires français</i>	324
APPENDICE 3. — <i>Notion de longueur de diffusion</i>	329
APPENDICE 4. — <i>Constantes physiques usuelles</i>	331
<i>Bibliographie générale</i>	332
<i>Index alphabétique des noms d'auteurs</i>	335
<i>Index alphabétique des matières.</i>	341