

Table des matières

Avant-propos	XV
Chapitre 1. Du classique au quantique	1
1.1 Aspects utiles de la physique classique	2
1.1.1 La mécanique classique	3
1.1.2 Diffraction et interférences	3
1.1.3 Ondes stationnaires	7
1.1.4 Rayonnement d'une charge en mouvement	8
1.2 Comportement corpusculaire des ondes	9
1.2.1 Le rayonnement du corps noir	9
1.2.2 Effet photoélectrique	10
1.2.3 Effet Compton	12
1.3 Comportement ondulatoire des corpuscules	12
1.3.1 Electrons et fentes d'Young	13
1.3.2 Diffraction d'électrons	15
1.4 L'atome	16
1.4.1 Expérience de Franck et Hertz	17
1.4.2 Séries spectroscopiques	18
1.4.3 Quantification du moment cinétique orbital	21
1.4.4 Spin	25
1.4.5 Bosons et fermions	26
1.4.6 Couleur	27
1.5 Premiers pas dans le monde quantique	29
1.5.1 Ondes de matière	30
1.5.2 Principes d'incertitude de Heisenberg	33
1.5.3 Quantique ou classique ?	36
1.5.4 Équation de Schrödinger	37
Exercices	41
Chapitre 2. Le cadre mathématique	43
2.1 Vecteurs et espace vectoriel	43
2.2 Espace vectoriel euclidien	45
2.2.1 Définition	45
2.2.2 Opérateurs	49
2.2.3 Transformations orthogonales	51
2.2.4 Commutateur	57

2.3	Espace hermitien	
2.3.1	Définition	58
2.3.2	Opérateurs hermitiques	60
2.4	Valeurs et vecteurs propres	62
2.5	Opérateurs unitaires	65
2.6	Espace de Hilbert	68
2.7	La distribution de Dirac	70
2.8	Transformation de Fourier	75
2.9	Produit tensoriel d'espaces	79
2.9.1	Définition	79
2.9.2	Produit tensoriel d'opérateurs	80
2.9.3	Prolongement d'opérateurs	80
2.9.4	Valeurs propres, vecteurs propres	80
<i>Exercices</i>		82

Chapitre 3. Postulats		85
3.1	Postulat 1: Vecteurs d'état	86
3.2	Bases continues	87
3.3	Postulat 2: mesures	92
3.3.1	Spectre discret non dégénéré	93
3.3.2	Spectre discret et dégénéré	95
3.3.3	Spectre continu	98
3.3.4	Valeur moyenne d'une observable	99
3.4	Invariance de phase	100
3.5	Mesure de plusieurs observables	101
3.5.1	Observables qui commutent	102
3.5.2	Ensemble complet d'observables qui commutent	103
3.5.3	Mesure simultanée d'observables	105
3.6	Postulat 3: équation de Schrödinger	107
3.6.1	Évolution des valeurs moyennes	109
3.6.2	Constantes du mouvement, lois de conservation	110
3.7	Postulat 4: règles de quantification	110
3.8	Courant de probabilité	113
3.8.1	Equation de continuité	113
3.8.2	Loi de conservation locale	115
3.8.3	Opérateurs associés à la densité et au courant	116
3.9	Inégalités de Heisenberg	117
3.9.1	Inégalités spatiales	117
3.9.2	Inégalités énergie-temps	119
3.10	Paquet d'ondes	121
3.10.1	Ondes planes	121
3.10.2	Notion de paquet d'ondes	124

3.10.3	Vitesse de groupe	127
3.10.4	Paquet d'ondes gaussien	130
3.11	Théorème d'Ehrenfest	133
<i>Exercices</i>		134

Chapitre 4. États stationnaires		139
4.1	Introduction	139
4.2	Évolution temporelle	140
4.3	Particule libre dans une boîte cubique	142
4.3.1	Généralités	142
4.3.2	Parité	144
4.3.3	Puits carré infini	145
4.3.4	Invariance par translation	148
4.3.5	Particule libre dans une boîte cubique	150
4.4	Puits fini, barrières de potentiel	150
4.4.1	Remarques générales	150
4.4.2	États liés ou états continus ?	152
4.4.3	Conditions aux limites	152
4.5	Marche de potentiel	153
4.5.1	Calcul classique	154
4.5.2	Calcul quantique	154
4.6	Puits carré fini	160
4.6.1	États liés	160
4.6.2	Quantification de l'énergie	162
4.6.3	Propriétés des fonctions d'onde	164
4.6.4	Invariance par translation	165
4.7	Effet tunnel	166
4.8	Potentiel périodique	171
4.8.1	Groupe des translations	171
4.8.2	Fonctions de Bloch	175
4.8.3	Modèle de Krönig-Penney	177
4.8.4	Bandes d'énergie	180
4.8.5	Conducteurs, isolants, semi-conducteurs	185
4.8.6	Réflexion de Bragg	189
<i>Exercices</i>		191

Chapitre 5. Moment cinétique		193
5.1	Moment cinétique orbital	193
5.1.1	Quantification	193
5.1.2	Relations de commutation	194
5.2	Moment cinétique	195
5.3	Potentiel central	200

5.4	Harmoniques sphériques	202
5.5	Représentation matricielle	205
5.6	Interprétation géométrique	207
5.7	Lien avec les rotations : groupe $SO(3)$	208
5.7.1	Rotations	208
5.7.2	Lien avec le moment cinétique	209
5.8	Couplage au champ électromagnétique	213
5.8.1	Transformations de jauge	213
5.8.2	Hamiltonien	216
5.8.3	Moment magnétique dipolaire	218
<i>Exercices</i>		221

Chapitre 6. Spin et statistique		223
6.1	Expérience de Stern et Gerlach	224
6.2	Spin 1/2	226
6.2.1	Opérateurs et matrices de Pauli	226
6.2.2	Spineurs	228
6.2.3	Précession de Larmor	230
6.3	Groupe $SU(2)$	232
6.4	Résonance magnétique	234
6.4.1	Principe	234
6.4.2	Spectroscopie RMN	237
6.4.3	Résonance paramagnétique électronique	242
6.5	Addition des moments cinétiques	243
6.5.1	Principe	243
6.5.2	Couplage de deux spins 1/2	247
6.5.3	Couplage $L + s$	249
6.6	Particules identiques	251
6.7	Bosons et fermions	253
6.7.1	Particules indépendantes	254
6.7.2	Orthohélium et parahélium	255
<i>Exercices</i>		257

Chapitre 7. L'oscillateur harmonique		261
7.1	Valeurs propres	263
7.2	États propres	267
7.3	Fonctions d'onde	268
7.4	L'oscillateur isotrope	270
7.4.1	Coordonnées cartésiennes	271
7.4.2	Coordonnées sphériques	272
7.5	Propriétés	274

7.6 Vibrations, phonons, photons	275
<i>Exercices</i>	278
Chapitre 8. Méthodes d'approximation	281
<i>I. Phénomènes indépendants du temps</i>	281
8.1 Perturbations stationnaires	282
8.1.1 Spectre discret non dégénéré	282
8.1.2 Spectre discret dégénéré	287
8.1.3 Structures fine et hyperfine de l'hydrogène	290
8.2 Méthode variationnelle	294
<i>II. Phénomènes dépendant du temps</i>	297
8.3 Perturbations dépendant du temps	297
8.3.1 Perturbation indépendante du temps	300
8.3.2 Règle d'or de Fermi	302
8.3.3 Perturbation périodique	304
8.4 Rayonnement dipolaire	305
8.4.1 Absorption et émission stimulée	306
8.4.2 Approximation dipolaire électrique	308
8.4.3 Émission stimulée	310
8.4.4 Émission spontanée	311
8.4.5 Le rayonnement du corps noir	311
8.4.6 Coefficients d'Einstein	314
8.4.7 Largeur naturelle	315
8.5 Résonance entre deux niveaux	317
8.6 Règles de sélection	318
8.7 Masers, Lasers	320
8.7.1 Le maser à ammoniac	321
8.7.2 Lasers	323
<i>Exercices</i>	327

Chapitre 9. Atomes et molécules 329

I. Atomes 329

9.1 L'atome d'hydrogène 329

9.1.1 Le problème à deux corps 329

9.1.2 Niveaux d'énergie et fonctions d'onde d'espace 333

9.1.3 Orbitales atomiques 338

9.2 Effet Zeeman 342

9.2.1 Effet Zeeman en champ fort 343

9.2.2 Effet Paschen-Back 345

9.2.3 Effet Zeeman en champ faible 345

9.3 Effet Stark 346

9.4	Atomes	347
9.4.1	Approximation des particules indépendantes	348
9.4.2	Approximation de Hartree-Fock	352
9.4.3	L'atome d'hélium	353
9.4.4	Effet des corrélations et du couplage spin-orbite	357
II.	<i>Molécules</i>	361
9.5	La molécule d'hydrogène	362
9.6	Molécules diatomiques homonucléaires	367
9.7	Termes électroniques	370
9.8	Hybridation	373
9.9	Spectroscopie moléculaire	378
9.9.1	Spectres de rotation	380
9.9.2	Spectres de vibration	383
9.9.3	Spectres de vibration-rotation	384
9.9.4	Spectroscopie Raman	385
9.9.5	Spectroscopie électronique	387
	<i>Exercices</i>	389
	Corrigé des exercices	391
	Annexe	419
	Constantes	421
	Bibliographie	422