

# Table des matières

## Tome I : Fondements

<b>Avant-propos</b>	<b>xxi</b>
<b>Préface de la première édition</b>	<b>xxv</b>
<b>Préface de la troisième édition</b>	<b>xxvii</b>
<b>1 Introduction</b>	<b>1</b>
1.1 Structure de la matière . . . . .	1
1.1.1 Échelles de longueur : de la cosmologie aux particules élémentaires . . . . .	1
1.1.2 États de la matière . . . . .	2
1.1.3 Constituants élémentaires . . . . .	6
1.1.4 Interactions (ou forces) fondamentales . . . . .	8
1.2 Physique classique et physique quantique . . . . .	11
1.3 Un peu d'histoire . . . . .	14
1.3.1 Le rayonnement du corps noir . . . . .	14
1.3.2 L'effet photoélectrique . . . . .	18
1.4 Ondes et particules : interférences . . . . .	19
1.4.1 Hypothèse de de Broglie . . . . .	19
1.4.2 Diffraction et interférences avec des neutrons froids . . . . .	20
1.4.3 Interprétation des expériences . . . . .	23
1.4.4 Inégalités de Heisenberg I . . . . .	27
1.4.5 Interféromètre de Mach-Zehnder . . . . .	30
1.5 Niveaux d'énergie . . . . .	33
1.5.1 Niveaux d'énergie en mécanique classique et modèles classiques de l'atome . . . . .	33
1.5.2 L'atome de Bohr . . . . .	36
1.5.3 Ordres de grandeur en physique atomique . . . . .	38
1.6 Exercices . . . . .	40
1.6.1 Ordres de grandeur . . . . .	40
1.6.2 Le corps noir . . . . .	41
1.6.3 Inégalités de Heisenberg . . . . .	42

1.6.4	Diffraction de neutrons par un cristal . . . . .	42
1.6.5	Atomes hydrogénéoïdes . . . . .	45
1.6.6	Interféromètre à neutrons et gravité . . . . .	45
1.6.7	Diffusion cohérente et diffusion incohérente de neutrons par un cristal . . . . .	46
1.7	Bibliographie . . . . .	47
<b>2</b>	<b>Mathématiques de la mécanique quantique I :</b>	
	<b>dimension finie</b> . . . . .	<b>49</b>
2.1	Espaces de Hilbert de dimension finie . . . . .	50
2.2	Opérateurs linéaires sur $\mathcal{H}$ . . . . .	51
2.2.1	Opérateurs linéaires, hermitiens, unitaires . . . . .	51
2.2.2	Projecteurs et notation de Dirac . . . . .	53
2.3	Décomposition spectrale des opérateurs hermitiens . . . . .	55
2.3.1	Diagonalisation d'un opérateur hermitien . . . . .	55
2.3.2	Diagonalisation d'une matrice $2 \times 2$ hermitienne . . . . .	57
2.3.3	Ensemble complet d'opérateurs compatibles . . . . .	59
2.3.4	Opérateurs unitaires et opérateurs hermitiens . . . . .	60
2.3.5	Fonctions d'un opérateur . . . . .	61
2.4	Produit tensoriel de deux espaces vectoriels . . . . .	62
2.4.1	Définition et propriétés du produit tensoriel . . . . .	62
2.4.2	Espaces de dimension $d = 2$ . . . . .	64
2.5	Exercices . . . . .	66
2.5.1	Produit scalaire et norme . . . . .	66
2.5.2	Commutateurs et traces . . . . .	66
2.5.3	Déterminant et trace . . . . .	67
2.5.4	Projecteur dans $\mathbb{R}^3$ . . . . .	67
2.5.5	Théorème de la projection . . . . .	67
2.5.6	Propriétés des projecteurs . . . . .	68
2.5.7	Intégrale gaussienne . . . . .	68
2.5.8	Commutateurs et valeur propre dégénérée . . . . .	68
2.5.9	Matrices normales . . . . .	69
2.5.10	Matrices positives . . . . .	69
2.5.11	Identités opératorielles . . . . .	69
2.5.12	Indépendance du produit tensoriel par rapport au choix de la base . . . . .	70
2.5.13	Produit tensoriel de deux matrices $2 \times 2$ . . . . .	70
2.5.14	Propriétés de symétrie de $ \Phi\rangle$ . . . . .	70
2.6	Bibliographie . . . . .	70
<b>3</b>	<b>Polarisation : photon et spin 1/2</b> . . . . .	<b>73</b>
3.1	Polarisation de la lumière et polarisation d'un photon . . . . .	73
3.1.1	Polarisation d'une onde électromagnétique . . . . .	80
3.1.2	Polarisation d'un photon . . . . .	80
3.1.3	Cryptographie quantique . . . . .	86

3.2	Spin $1/2$ . . . . .	91
3.2.1	Moment angulaire et moment magnétique en physique classique . . . . .	91
3.2.2	Expérience de Stern-Gerlach et filtres de Stern-Gerlach . . . . .	93
3.2.3	États de spin d'orientation arbitraire . . . . .	96
3.2.4	Rotation d'un spin $1/2$ . . . . .	98
3.2.5	Dynamique et évolution temporelle . . . . .	104
3.3	Exercices . . . . .	107
3.3.1	Polarisation elliptique et détermination de la polarisation . . . . .	107
3.3.2	Une stratégie optimale pour Ève . . . . .	107
3.3.3	Polarisation circulaire et opérateur de rotation pour les photons . . . . .	108
3.3.4	Théorème de non-clonage quantique . . . . .	109
3.3.5	Expérience à choix retardé . . . . .	109
3.3.6	Autres solutions de (3.45) . . . . .	110
3.3.7	Décomposition d'une matrice $2 \times 2$ . . . . .	111
3.3.8	Exponentielles de matrices de Pauli . . . . .	111
3.3.9	Tenseur $\epsilon_{ijk}$ . . . . .	112
3.3.10	Mesures successives d'un spin $1/2$ . . . . .	112
3.3.11	Rotation de $2\pi$ d'un spin $1/2$ . . . . .	112
3.3.12	Diffusion de neutrons par un cristal : noyaux de spin $1/2$ . . . . .	113
3.4	Bibliographie . . . . .	114
<b>4</b>	<b>Postulats de la physique quantique</b> . . . . .	<b>115</b>
4.1	Vecteurs d'état et propriétés physiques . . . . .	116
4.1.1	Principe de superposition . . . . .	116
4.1.2	Propriétés physiques et mesure . . . . .	118
4.1.3	Inégalités de Heisenberg II . . . . .	124
4.2	Évolution temporelle . . . . .	126
4.2.1	Équation d'évolution . . . . .	126
4.2.2	Opérateur d'évolution . . . . .	129
4.2.3	États stationnaires . . . . .	131
4.2.4	Inégalité de Heisenberg temporelle . . . . .	133
4.2.5	Points de vue de Schrödinger et de Heisenberg . . . . .	138
4.3	Approximations et modélisation . . . . .	139
4.4	Exercices . . . . .	142
4.4.1	Dispersion et vecteurs propres . . . . .	142
4.4.2	Méthode variationnelle . . . . .	143
4.4.3	Théorème de Feynman-Hellmann . . . . .	143
4.4.4	Évolution temporelle d'un système à deux niveaux . . . . .	143
4.4.5	Inégalités de Heisenberg temporelles . . . . .	144

	4.4.6	L'énigme des neutrinos solaires . . . . .	145
	4.4.7	Points de vue de Schrödinger et de Heisenberg . . . . .	147
	4.4.8	Borne de Helstrom . . . . .	147
	4.4.9	Règle de Born généralisée . . . . .	148
	4.4.10	Le système des mésons K neutres : évolution non unitaire . . . . .	149
	4.5	Bibliographie . . . . .	151
<b>5</b>		<b>Systèmes à nombre de niveaux fini</b>	<b>153</b>
	5.1	Chimie quantique élémentaire . . . . .	153
	5.1.1	Molécule d'éthylène . . . . .	156
	5.1.2	Molécule de benzène . . . . .	160
	5.2	Résonance magnétique nucléaire (RMN) . . . . .	161
	5.2.1	Spin 1/2 dans un champ magnétique périodique . . . . .	163
	5.2.2	Oscillations de Rabi . . . . .	166
	5.2.3	Principes de la RMN et de l'IRM . . . . .	169
	5.3	La molécule d'ammoniac . . . . .	169
	5.3.1	La molécule d'ammoniac comme système à deux niveaux . . . . .	169
	5.3.2	La molécule dans un champ électrique : le maser à ammoniac . . . . .	171
	5.3.3	Transitions hors résonance . . . . .	176
	5.4	Atome à deux niveaux . . . . .	179
	5.4.1	Absorption et émission de photons . . . . .	179
	5.4.2	Principes du laser . . . . .	183
	5.4.3	Franges de Ramsey et principe des horloges atomiques . . . . .	187
	5.5	Exercices . . . . .	191
	5.5.1	Base orthonormée de vecteurs propres . . . . .	191
	5.5.2	Moment dipolaire électrique du formaldéhyde . . . . .	191
	5.5.3	Le butadiène . . . . .	192
	5.5.4	Vecteurs propres du hamiltonien (5.22) . . . . .	194
	5.5.5	L'ion moléculaire $H_2^+$ . . . . .	194
	5.5.6	Compléments sur la RMN . . . . .	195
	5.6	Bibliographie . . . . .	195
<b>6</b>		<b>Mathématiques de la mécanique quantique II : dimension infinie</b>	<b>197</b>
	6.1	Espaces de Hilbert . . . . .	197
	6.1.1	Définitions . . . . .	197
	6.1.2	Réalisations d'espaces séparables et de dimensio infinie . . . . .	199
	6.2	Opérateurs linéaires sur $\mathcal{H}$ . . . . .	201
	6.2.1	Domaine et norme d'un opérateur . . . . .	201
	6.2.2	Conjugaison hermitienne . . . . .	203

6.3	Décomposition spectrale . . . . .	205
6.3.1	Opérateurs hermitiens . . . . .	205
6.3.2	Opérateurs unitaires . . . . .	208
6.4	Exercices . . . . .	209
6.4.1	Espaces de dimension infinie . . . . .	209
6.4.2	Spectre d'un opérateur hermitien . . . . .	209
6.4.3	Relations de commutation canoniques . . . . .	209
6.4.4	Opérateurs de dilatation et de transformation conforme . . . . .	210
6.5	Bibliographie . . . . .	210
<b>7</b>	<b>Symétries en physique quantique</b>	<b>211</b>
7.1	Transformation d'un état dans une opération de symétrie . . . . .	212
7.1.1	Invariance des probabilités dans une opération de symétrie . . . . .	212
7.1.2	Théorème de Wigner . . . . .	215
7.2	Générateurs infinitésimaux . . . . .	217
7.2.1	Définitions . . . . .	217
7.2.2	Lois de conservation . . . . .	218
7.2.3	Relations de commutation des générateurs infinitésimaux . . . . .	220
7.3	Relations de commutation canoniques . . . . .	225
7.3.1	Cas de la dimension $d = 1$ . . . . .	225
7.3.2	Réalisation explicite et commentaires . . . . .	227
7.3.3	L'opération parité . . . . .	228
7.4	Invariance galiléenne . . . . .	230
7.4.1	Hamiltonien en dimension $d = 1$ . . . . .	230
7.4.2	Hamiltonien en dimension $d = 3$ . . . . .	234
7.5	Exercices . . . . .	236
7.5.1	Rotations . . . . .	236
7.5.2	Rotations et $SU(2)$ . . . . .	236
7.5.3	Relations de commutation entre l'impulsion et le moment angulaire . . . . .	237
7.5.4	Algèbre de Lie d'un groupe continu . . . . .	238
7.5.5	Règle de somme de Thomas-Reiche-Kuhn . . . . .	239
7.5.6	Centre de masse et masse réduite . . . . .	239
7.5.7	Transformation de Galilée . . . . .	240
7.5.8	Hamiltonien dans un champ magnétique . . . . .	240
7.6	Bibliographie . . . . .	241
<b>8</b>	<b>Mécanique ondulatoire</b>	<b>243</b>
8.1	Diagonalisation de $X$ et de $P$ ; fonctions d'onde . . . . .	244
8.1.1	Diagonalisation de $X$ . . . . .	244
8.1.2	Réalisation dans $L_x^{(2)}(\mathbb{R})$ . . . . .	246

8.1.3	Réalisation dans $L_p^{(2)}(\mathbb{R})$ . . . . .	248
8.1.4	Inégalités de Heisenberg . . . . .	249
8.1.5	Évolution du paquet d'ondes libre . . . . .	251
8.2	Équation de Schrödinger . . . . .	254
8.2.1	Hamiltonien de l'équation de Schrödinger . . . . .	254
8.2.2	Probabilité de présence et vecteur courant . . . . .	255
8.3	Résolution de l'équation de Schrödinger indépendante du temps . . . . .	258
8.3.1	Généralités . . . . .	258
8.3.2	Réflexion et transmission par une marche de potentiel . . . . .	260
8.3.3	États liés du puits carré . . . . .	262
8.3.4	Diffusion par un potentiel . . . . .	265
8.4	Potentiel périodique . . . . .	270
8.4.1	Théorème de Bloch . . . . .	270
8.4.2	Bandes d'énergie . . . . .	272
8.5	Mécanique ondulatoire en dimension $d = 3$ . . . . .	276
8.5.1	Généralités . . . . .	276
8.5.2	Espace de phase et densité de niveaux . . . . .	278
8.5.3	Règle d'or de Fermi . . . . .	281
8.6	Exercices . . . . .	285
8.6.1	Inégalités de Heisenberg . . . . .	285
8.6.2	Étalement du paquet d'ondes . . . . .	285
8.6.3	Paquet d'ondes gaussien . . . . .	286
8.6.4	Heuristique de l'inégalité de Heisenberg . . . . .	287
8.6.5	Potentiel de Lennard-Jones pour l'hélium . . . . .	287
8.6.6	Marche de potentiel et retard à la réflexion . . . . .	288
8.6.7	Potentiel en fonction $\delta$ . . . . .	288
8.6.8	Niveaux d'énergie du puits cubique infini en dimension $d = 3$ . . . . .	290
8.6.9	Courant de probabilité à trois dimensions . . . . .	290
8.6.10	Densité de niveaux . . . . .	290
8.6.11	Règle d'or de Fermi . . . . .	290
8.6.12	Étude de l'expérience de Stern-Gerlach . . . . .	291
8.6.13	Modèle de mesure de von Neumann . . . . .	292
8.6.14	Transformation de Galilée . . . . .	293
8.7	Bibliographie . . . . .	294
<b>9</b>	<b>Moment angulaire</b> . . . . .	<b>295</b>
9.1	Diagonalisation de $\vec{J}^2$ et de $J_z$ . . . . .	295
9.2	Matrices de rotation . . . . .	299
9.3	Moment angulaire orbital . . . . .	304
9.3.1	Opérateur moment angulaire orbital . . . . .	304
9.3.2	Propriétés des harmoniques sphériques . . . . .	308

9.4	Particule dans un potentiel central . . . . .	311
9.4.1	Équation d'onde radiale . . . . .	311
9.4.2	Atome d'hydrogène . . . . .	315
9.5	Distributions angulaires des désintégrations . . . . .	319
9.5.1	Rotations de $\pi$ , parité, réflexion par rapport à un plan . . . . .	319
9.5.2	Transitions dipolaires . . . . .	322
9.5.3	Désintégrations : cas général . . . . .	327
9.6	Composition de deux moments angulaires . . . . .	328
9.6.1	Composition de deux spins $1/2$ . . . . .	328
9.6.2	Cas général : composition de deux moments angulaires $\vec{J}_1$ et $\vec{J}_2$ . . . . .	331
9.6.3	Composition des matrices de rotation . . . . .	334
9.6.4	Théorème de Wigner-Eckart (opérateurs scalaires et vectoriels) . . . . .	335
9.7	Exercices . . . . .	338
9.7.1	Propriétés de $\vec{J}$ . . . . .	338
9.7.2	Rotation d'un moment angulaire . . . . .	338
9.7.3	Rotations $(\theta, \phi)$ . . . . .	338
9.7.4	Moments angulaires $j = \frac{1}{2}$ et $j = 1$ . . . . .	338
9.7.5	Moment angulaire orbital . . . . .	339
9.7.6	Relation entre les matrices de rotation et les harmoniques sphériques . . . . .	339
9.7.7	Indépendance de l'énergie par rapport à $m$ . . . . .	340
9.7.8	Puits sphérique . . . . .	340
9.7.9	Atome d'hydrogène pour $l \neq 0$ . . . . .	340
9.7.10	Éléments de matrice d'un potentiel . . . . .	341
9.7.11	Équation radiale en dimension $d = 2$ . . . . .	341
9.7.12	Propriété de symétrie des matrices $d^{(j)}$ . . . . .	342
9.7.13	Diffusion de la lumière . . . . .	342
9.7.14	Mesure du moment magnétique du $\Lambda^0$ . . . . .	343
9.7.15	Production et désintégration du méson $\rho^+$ . . . . .	345
9.7.16	Interaction de deux dipôles . . . . .	347
9.7.17	Désintégration du $\Sigma^0$ . . . . .	347
9.7.18	Coefficients de Clebsch-Gordan du couplage $\vec{L} \cdot \vec{S}$ . . . . .	348
9.7.19	Opérateurs tensoriels irréductibles . . . . .	349
9.8	Bibliographie . . . . .	350
<b>10</b>	<b>Oscillateur harmonique</b> . . . . .	<b>351</b>
10.1	L'oscillateur harmonique simple . . . . .	352
10.1.1	Opérateurs de création et d'annihilation . . . . .	352
10.1.2	Diagonalisation du hamiltonien . . . . .	353
10.1.3	Fonctions d'onde de l'oscillateur harmonique . . . . .	355
10.2	États cohérents . . . . .	357

10.2.1	Définition et propriétés élémentaires . . . . .	357
10.2.2	Opérateurs de déplacement et de phase . . . . .	361
10.3	Mouvement dans un champ magnétique . . . . .	365
10.3.1	Invariance de jauge locale . . . . .	365
10.3.2	Champ magnétique uniforme : niveaux de Landau . . . . .	368
10.4	Exercices . . . . .	371
10.4.1	Éléments de matrice de $Q$ et de $P$ . . . . .	371
10.4.2	Propriétés mathématiques . . . . .	371
10.4.3	États cohérents . . . . .	371
10.4.4	Couplage à une force classique . . . . .	373
10.4.5	Opérateur de phase . . . . .	374
10.4.6	Conservation du courant en présence d'un champ magnétique . . . . .	375
10.4.7	Transformations de jauge non abéliennes . . . . .	375
10.5	Bibliographie . . . . .	377
<b>11</b>	<b>Intrication et non localité quantiques</b> . . . . .	<b>379</b>
11.1	Opérateur statistique (ou opérateur densité) . . . . .	379
11.1.1	Définition et propriétés . . . . .	379
11.1.2	Opérateur statistique réduit . . . . .	382
11.1.3	Opérateur statistique pour un système à deux niveaux . . . . .	387
11.1.4	Non unicité de la préparation . . . . .	390
11.1.5	Dépendance temporelle de l'opérateur statistique . . . . .	393
11.1.6	Postulats . . . . .	395
11.2	Inégalités de Bell . . . . .	395
11.2.1	Démonstration de l'inégalité BCHSH . . . . .	395
11.2.2	Physique quantique et borne de Cirelson . . . . .	398
11.2.3	Expériences avec des photons . . . . .	403
11.2.4	EPR et la non localité quantique . . . . .	408
11.3	Compléments sur les inégalités de Bell . . . . .	411
11.3.1	Conditions sur les probabilités . . . . .	411
11.3.2	Boîtes de Popescu-Rohrlich . . . . .	413
11.3.3	États GHZ . . . . .	414
11.3.4	Contextualité . . . . .	416
11.4	Décohérence et mesure . . . . .	417
11.4.1	Intrication et perte de cohérence . . . . .	417
11.4.2	Définition générale de la décohérence . . . . .	420
11.4.3	Modèle pour l'émission spontanée . . . . .	422
11.4.4	Modèle de von Neumann pour la mesure . . . . .	424
11.4.5	Modèle de Zurek . . . . .	427
11.4.6	La réduction du paquet d'ondes . . . . .	430
11.4.7	Interprétations . . . . .	431
11.5	Information quantique . . . . .	435



11.5.1	Théorème de non-clonage quantique . . . . .	435
11.5.2	Calcul quantique . . . . .	438
11.5.3	Téléportation quantique . . . . .	444
11.5.4	Échange d'intrication . . . . .	447
11.6	Exercices . . . . .	453
11.6.1	Propriétés des opérateurs statistiques . . . . .	453
11.6.2	Structure fine et effet Zeeman du positronium . . . . .	453
11.6.3	11.6.3 Ondes de spin et magnons . . . . .	455
11.6.4	Écho de spin et décomposition des niveaux en RMN . . . . .	456
11.6.5	Non unicité de la préparation de l'opérateur statistique pour le spin 1/2 . . . . .	458
11.6.6	Inégalité de Wigner . . . . .	458
11.6.7	États de Hardy . . . . .	459
11.6.8	Photons intriqués en polarisation . . . . .	460
11.6.9	Stratégies gagnantes . . . . .	461
11.6.10	États de Bell et mesure de Bell . . . . .	462
11.6.11	États GHZ . . . . .	462
11.6.12	Théorème de non-clonage quantique . . . . .	463
11.6.13	Discrimination entre deux états non orthogonaux . . . . .	464
11.6.14	Interférences des temps d'émission . . . . .	465
11.6.15	Calcul quantique avec des ions piégés . . . . .	466
11.7	Bibliographie . . . . .	469
<b>Annexes</b>		<b>471</b>
A	Théorème de Wigner et renversement du temps . . . . .	471
A.1	Démonstration du théorème . . . . .	472
A.2	Renversement du sens du temps . . . . .	474
B	Méthode de Wigner et Weisskopf . . . . .	480
C	Constantes physiques . . . . .	484
<b>References</b>		<b>x1</b>
<b>Index</b>		<b>x11</b>
<b>Tome II : Applications et exercices corrigés</b>		
<b>Avant-propos</b>		<b>xxi</b>
<b>12 Méthodes semi-classiques</b>		<b>485</b>
12.1	Propagateurs et fonctions de Green . . . . .	488
12.1.1	Propagateur de l'équation de Schrödinger . . . . .	488
12.1.2	Fonctions de Green . . . . .	489
12.1.3	Propagateur libre . . . . .	491
12.2	L'intégrale de Feynman-Kac . . . . .	492
12.2.1	Mouvement brownien et diffusion . . . . .	492
12.2.2	Propagateur euclidien et fonction de partition . . . . .	496

12.2.3	Intégrale de chemin de Feynman . . . . .	499
12.3	Applications de l'intégrale de chemin . . . . .	501
12.3.1	Oscillateur harmonique . . . . .	501
12.3.2	Intégrale de chemin en présence d'un champ magnétique . . . . .	503
12.3.3	L'effet Aharonov-Bohm . . . . .	506
12.4	L'approximation BKW . . . . .	508
12.4.1	Forme asymptotique de la fonction d'onde . . . . .	508
12.4.2	Formules de raccordement . . . . .	511
12.4.3	Phénomène de Stokes . . . . .	513
12.4.4	États liés . . . . .	515
12.4.5	Effet tunnel . . . . .	518
12.5	Mécanique quantique dans l'espace de phase . . . . .	522
12.5.1	Conditions pour une représentation dans l'espace de phase . . . . .	522
12.5.2	La distribution de Wigner . . . . .	523
12.5.3	Distribution de Wigner pour les états purs . . . . .	526
12.6	Théorème adiabatique et phases géométriques . . . . .	527
12.6.1	Un exemple . . . . .	527
12.6.2	Théorème adiabatique . . . . .	529
12.6.3	La phase géométrique . . . . .	532
12.7	Exercices . . . . .	534
12.7.1	Formule de Trotter . . . . .	534
12.7.2	Longueur de corrélation et niveau excité . . . . .	535
12.7.3	Fonctionnelle génératrice . . . . .	536
12.7.4	Propagateur de Feynman et propagateur euclidien . . . . .	536
12.7.5	Équation de Schrödinger et intégrale de chemin . . . . .	537
12.7.6	Calcul de la fonctionnelles génératrice pour l'oscillateur harmonique . . . . .	537
12.7.7	Formules de raccordement pour $K < 0$ . . . . .	540
12.7.8	Propriétés de la distribution de Wigner . . . . .	541
12.7.9	Évolution temporelle de la distribution de Wigner . . . . .	541
12.7.10	Probabilités de transition à l'approximation adiabatique . . . . .	542
12.7.11	Spin 1/2 dans un champ magnétique : relation avec l'étude générale . . . . .	544
12.7.12	Phase de Berry et effet Aharonov-Bohm . . . . .	545
12.8	Bibliographie . . . . .	545
<b>13</b>	<b>Théorie de la diffusion</b> . . . . .	<b>547</b>
13.1	Section efficace et amplitude de diffusion . . . . .	548
13.1.1	Sections efficaces différentielle et totale . . . . .	548
13.1.2	Amplitude de diffusion . . . . .	550

13.2 Ondes partielles et déphasages . . . . .	553
13.2.1 Développement en ondes partielles . . . . .	553
13.2.2 Diffusion à basse énergie . . . . .	557
13.2.3 Potentiel effectif . . . . .	561
13.2.4 Diffusion neutron-proton à basse énergie . . . . .	563
13.3 Diffusion inélastique . . . . .	565
13.3.1 Théorème optique . . . . .	565
13.3.2 Potentiel optique . . . . .	568
13.4 Développements formels . . . . .	570
13.4.1 Équation intégrale de la diffusion . . . . .	570
13.4.2 Matrice $T$ . . . . .	572
13.4.3 Diffusion d'un paquet d'ondes . . . . .	575
13.5 Théorie opératorielle de la diffusion . . . . .	577
13.5.1 Équations de Lippman-Schwinger . . . . .	577
13.5.2 Matrice $T$ et matrice $S$ . . . . .	581
13.5.3 Collisions inélastiques . . . . .	584
13.5.4 Symétries de la matrice $T$ . . . . .	588
13.6 Exercices . . . . .	591
13.6.1 Pic de Gamow . . . . .	591
13.6.2 Diffusion de neutrons de basse énergie par une molécule d'hydrogène . . . . .	593
13.6.3 Propriétés analytiques de l'amplitude de diffusion neutron-proton . . . . .	594
13.6.4 Approximation de Born . . . . .	596
13.6.5 Optique neutronique . . . . .	596
13.6.6 Section efficace d'absorption de neutrons . . . . .	599
13.6.7 Non hermiticité de $H_0$ . . . . .	601
13.6.8 Unitarité et théorème optique . . . . .	601
13.6.9 Opérateurs de Møller . . . . .	603
13.7 Bibliographie . . . . .	604
<b>14 Particules identiques . . . . .</b>	<b>605</b>
14.1 Bosons et fermions . . . . .	606
14.1.1 Symétrie ou antisymétrie du vecteur d'état . . . . .	606
14.1.2 Spin et statistique . . . . .	612
14.2 Diffusion de particules identiques . . . . .	616
14.3 États collectifs de fermions . . . . .	619
14.3.1 Le gaz de Fermi à température nulle . . . . .	619
14.3.2 Opérateurs de création et d'annihilation . . . . .	621
14.3.3 Opérateurs de champ et hamiltonien . . . . .	624
14.3.4 Autres formes du hamiltonien . . . . .	629
14.4 États collectifs de bosons . . . . .	632
14.4.1 La condensation de Bose-Einstein . . . . .	632
14.4.2 L'équation de Gross-Pitaevskii . . . . .	635

- 14.4.3 L'approximation de Bogoliubov . . . . . 638
- 14.5 Exercices . . . . . 642
  - 14.5.1 Particule  $\Omega^-$  et couleur . . . . . 642
  - 14.5.2 Parité du méson  $\pi$  . . . . . 642
  - 14.5.3 Fermions de spin 1/2 dans un puits infini . . . . . 643
  - 14.5.4 Désintégration du positronium . . . . . 643
  - 14.5.5 Lambe séparatrice et fermions . . . . . 644
  - 14.5.6 Fonctions d'onde et opérateurs de champ . . . . . 644
  - 14.5.7 Hiérarchie BBGKY et approximation de Hartree-Fock . . . . . 645
  - 14.5.8 Approximation semi-classique pour la condensation dans un piège . . . . . 648
- 14.6 Bibliographie . . . . . 649
- 15 Atomes à un électron . . . . . 651**
  - 15.1 Méthodes d'approximation . . . . . 651
    - 15.1.1 Généralités . . . . . 651
    - 15.1.2 Cas d'une valeur propre simple de  $H_0$  . . . . . 653
    - 15.1.3 Cas d'un niveau dégénéré . . . . . 654
    - 15.1.4 Méthode variationnelle . . . . . 655
  - 15.2 Atomes à un électron . . . . . 657
    - 15.2.1 Niveaux d'énergie en l'absence de spin . . . . . 657
    - 15.2.2 Structure fine . . . . . 657
    - 15.2.3 Effet Zeeman . . . . . 660
    - 15.2.4 Structure hyperfine . . . . . 662
  - 15.3 Manipulation d'atomes par laser . . . . . 664
    - 15.3.1 Équations de Bloch optiques . . . . . 664
    - 15.3.2 Forces dissipatives et forces réactives . . . . . 668
    - 15.3.3 Refroidissement Doppler . . . . . 670
    - 15.3.4 Piège magnétooptique . . . . . 676
    - 15.3.5 Fontaines atomiques . . . . . 677
  - 15.4 Exercices . . . . . 679
    - 15.4.1 Perturbation au second ordre et forces de van der Waals . . . . . 679
    - 15.4.2 Corrections d'ordre  $\alpha^2$  aux niveaux d'énergie . . . . . 680
    - 15.4.3 Atomes muoniques . . . . . 682
    - 15.4.4 Atomes de Rydberg . . . . . 683
    - 15.4.5 Terme diamagnétique . . . . . 684
  - 15.5 Bibliographie . . . . . 685
- 16 Atomes complexes et et molécules . . . . . 687**
  - 16.1 L'atome à deux électrons . . . . . 687
    - 16.1.1 L'état fondamental de l'atome d'hélium . . . . . 687
    - 16.1.2 États excités de l'atome d'hélium . . . . . 690
  - 16.2 Modèle en couches de l'atome . . . . . 691

- 16.2.1 Potentiel effectif . . . . . 692
- 16.2.2 Couplage spin-orbite . . . . . 694
- 16.3 Molécules diatomiques . . . . . 696
  - 16.3.1 Fonctions d'onde électroniques . . . . . 696
  - 16.3.2 Niveaux de rotation-vibration . . . . . 699
- 16.4 Exercices . . . . . 700
  - 16.4.1 États  $np^3$  permis . . . . . 700
  - 16.4.2 Théorème de non croisement des niveaux . . . . . 701
  - 16.4.3 Structure hyperfine du deutérium . . . . . 701
  - 16.4.4 Modèle en couches du noyau atomique . . . . . 703
- 16.5 Bibliographie . . . . . 705
- 17 Champ électromagnétique quantifié . . . . . 707**
  - 17.1 Quantification du champ électromagnétique . . . . . 707
    - 17.1.1 Quantification d'un mode . . . . . 708
    - 17.1.2 Cas général . . . . . 711
  - 17.2 États du champ électromagnétique . . . . . 718
    - 17.2.1 Fluctuations quantiques du champ électromagnétique . . . . . 718
    - 17.2.2 Lames séparatrices et détection homodyne . . . . . 722
    - 17.2.3 Hamiltonien de Jaynes-Cummings . . . . . 726
  - 17.3 Interaction atome-champ électromagnétique . . . . . 730
    - 17.3.1 Théorie semi-classique . . . . . 731
    - 17.3.2 Approximation dipolaire . . . . . 733
    - 17.3.3 Effet photoélectrique . . . . . 735
    - 17.3.4 Champ électromagnétique quantifié : émission spontanée . . . . . 737
    - 17.3.5 Décohérence par émission de photons . . . . . 743
  - 17.4 Corrélations de photons . . . . . 746
    - 17.4.1 Détection de photons et fonctions de corrélation . . . . . 746
    - 17.4.2 Cohérences . . . . . 749
    - 17.4.3 Expérience de Hanbury Brown et Twiss . . . . . 752
  - 17.5 Exercices . . . . . 755
    - 17.5.1 Potentiels scalaire et vecteur en jauge de Coulomb . . . . . 755
    - 17.5.2 Dépendance temporelle du coefficient de Fourier classique . . . . . 755
    - 17.5.3 Relations de commutation du champ électromagnétique . . . . . 756
    - 17.5.4 Détection homodyne et lame séparatrice déséquilibrée . . . . . 756
    - 17.5.5 Oscillations de Rabi dans une cavité . . . . . 757
    - 17.5.6 Effet Casimir . . . . . 758
    - 17.5.7 Observation non destructive de photons . . . . . 759

17.5.8	Cohérences et interférences . . . . .	763
17.5.9	Forces réactives . . . . .	763
17.5.10	Capture radiative de neutrons par l'hydrogène . . . . .	765
17.5.11	L'expérience de Badurek <i>et al.</i> . . . . .	767
17.6	Bibliographie . . . . .	769
<b>18</b>	<b>Systèmes quantiques ouverts</b>	<b>771</b>
18.1	Superopérateurs . . . . .	773
18.1.1	Représentation de Kraus . . . . .	773
18.1.2	Modèle pour l'amortissement de phase . . . . .	777
18.2	Équations pilotes : la forme de Lindblad . . . . .	779
18.2.1	L'approximation markovienne . . . . .	779
18.2.2	L'équation de Lindblad . . . . .	781
18.2.3	Exemple : l'oscillateur harmonique amorti . . . . .	783
18.3	Couplage à un bain thermique d'oscillateurs . . . . .	785
18.3.1	Équations d'évolution exactes . . . . .	785
18.3.2	Déduction de l'équation pilote . . . . .	787
18.3.3	Relaxation d'un système à deux niveaux . . . . .	790
18.3.4	Mouvement brownien quantique . . . . .	793
18.3.5	Décohérence d'un paquet d'ondes . . . . .	798
18.4	Exercices . . . . .	799
18.4.1	La transposition n'est pas complètement positive . . . . .	799
18.4.2	Représentation de Kraus pour le modèle d'émission spontanée . . . . .	800
18.4.3	Modèle de dépolarisation . . . . .	800
18.4.4	Amortissements de phase et d'amplitude . . . . .	801
18.4.5	Détails de la preuve de l'équation pilote . . . . .	801
18.4.6	Superposition d'états cohérents . . . . .	802
18.4.7	Dissipation dans un système à deux niveaux . . . . .	804
18.4.8	Approximation séculaire et équation de Lindblad . . . . .	804
18.4.9	Modèles simples de relaxation . . . . .	805
18.4.10	Un autre choix pour la fonction spectrale $J(\omega)$ . . . . .	806
18.4.11	L'équation de Fokker-Planck-Kramers pour une particule brownienne . . . . .	806
18.5	Bibliographie . . . . .	807
<b>19</b>	<b>Physique quantique relativiste</b>	<b>809</b>
19.1	Les groupes de Lorentz et de Poincaré . . . . .	810
19.1.1	Transformations de Lorentz spéciales . . . . .	810
19.1.2	Produit scalaire de Minkowski . . . . .	811
19.1.3	Groupe de Lorentz connexe . . . . .	814
19.1.4	Relation avec le groupe $SL(2, \mathbb{C})$ . . . . .	815
19.1.5	Cinématique relativiste . . . . .	818
19.2	L'analyse de Wigner : masse et spin des particules . . . . .	819
19.2.1	Algèbre de Lie du groupe de Poincaré . . . . .	819

19.2.2	États à une particule : masse et spin . . . . .	824
19.2.3	Particules de masse non nulle . . . . .	827
19.2.4	Particules de masse nulle . . . . .	829
19.3	L'équation de Dirac . . . . .	832
19.3.1	Construction de l'équation de Dirac . . . . .	832
19.3.2	Courants de de Dirac . . . . .	838
19.3.3	Courant de Dirac en présence d'un champ électromagnétique . . . . .	840
19.3.4	Le hamiltonien de structure fine . . . . .	843
19.3.5	L'atome d'hydrogène . . . . .	845
19.4	Symétries de l'équation de Dirac . . . . .	851
19.4.1	Invariance de Lorentz . . . . .	851
19.4.2	Parité . . . . .	852
19.4.3	Conjugaison de charge . . . . .	853
19.4.4	Inversion du temps . . . . .	854
19.5	Quantification du champ de Dirac . . . . .	855
19.5.1	Ondes planes . . . . .	855
19.5.2	Champ de Dirac quantifié . . . . .	857
19.5.3	Hamiltonien du champ de Dirac . . . . .	858
19.6	Exercices . . . . .	860
19.6.1	Décomposition polaire d'une transformation de Lorentz . . . . .	860
19.6.2	Relations de commutation des $J^{\alpha\beta}$ et des $P^\mu$ . . . . .	861
19.6.3	Rotation de Thomas-Wigner et précession de Thomas . . . . .	861
19.6.4	Relation de commutation des $J_{\mu\nu}$ et des $W_\lambda$ . . . . .	865
19.6.5	Cas de la masse nulle . . . . .	866
19.6.6	Courant de Klein-Gordon . . . . .	866
19.6.7	Automorphismes de $SL(2, \mathbb{C})$ . . . . .	866
19.6.8	Équation de Dirac . . . . .	867
19.6.9	Courant de Dirac en présence d'un champ magnétique . . . . .	867
19.6.10	Transformation de Lorentz d'un spineur de Dirac . . . . .	867
19.6.11	Relations d'orthogonalité . . . . .	868
19.6.12	Relation de Parseval . . . . .	868
19.7	Bibliographie . . . . .	868
<b>20</b>	<b>Corrigés d'une sélection d'exercices</b>	<b>871</b>
20.1	Exercices du chapitre 1 . . . . .	871
1.6.1	Ordres de grandeur . . . . .	871
1.6.4	Diffraction de neutrons par un cristal . . . . .	873
1.6.6	Interféromètre à neutrons et gravité . . . . .	874

1.6.7	Diffusion cohérente et diffusion incohérente de neutrons par un cristal . . . . .	875
20.2	Exercices du chapitre 2 . . . . .	876
2.5.3	Déterminant et trace . . . . .	876
2.5.10	Matrices positives . . . . .	877
2.5.11	Identités opératoriels . . . . .	877
20.3	Exercices du chapitre 3 . . . . .	878
3.3.1	Polarisation elliptique et détermination de la polarisation . . . . .	878
3.3.2	Une stratégie optimale pour Ève . . . . .	879
3.3.5	Autres solutions de (3.45) . . . . .	880
3.3.7	Exponentielles de matrices de Pauli . . . . .	881
3.3.12	Diffusion de neutrons par un cristal : noyaux de spin 1/2 . . . . .	882
20.4	Exercices du chapitre 4 . . . . .	883
4.4.4	Évolution temporelle d'un système à deux niveaux . . . . .	883
4.4.5	Inégalités de Heisenberg temporelles . . . . .	884
4.4.6	L'énigme des neutrinos solaires . . . . .	885
4.4.8	Borne de Helstrom . . . . .	886
4.4.9	Règle de Born généralisée . . . . .	887
4.4.10	Le système des mésons K neutres : évolution non unitaire . . . . .	888
20.5	Exercices du chapitre 5 . . . . .	889
5.5.3	Le butadiène . . . . .	889
5.5.5	L'ion moléculaire $H_2^+$ . . . . .	891
5.5.6	Compléments sur la RMN . . . . .	892
20.6	Exercices du chapitre 6 . . . . .	892
6.4.3	Relations de commutation canoniques . . . . .	892
20.7	Exercices du chapitre 7 . . . . .	894
7.5.2	Rotations et $SU(2)$ . . . . .	894
7.5.4	Algèbre de Lie d'un groupe continu . . . . .	895
7.5.5	Règle de somme de Thomas-Reiche-Kuhn . . . . .	896
7.5.8	Hamiltonien dans un champ magnétique . . . . .	897
20.8	Exercices du chapitre 8 . . . . .	898
8.6.2	Étalement du paquet d'ondes . . . . .	898
8.6.3	Paquet d'ondes gaussien . . . . .	899
8.6.7	Potentiel en fonction $\delta$ . . . . .	901
8.6.12	Étude de l'expérience de Stern-Gerlach . . . . .	905
8.6.13	Modèle de mesure de von Neumann . . . . .	906
20.9	Exercices du chapitre 9 . . . . .	907
9.7.5	Moment angulaire orbital . . . . .	907
9.7.6	Relation entre les matrices de rotation et les harmoniques sphériques . . . . .	908

9.7.8	Puits sphérique . . . . .	909
9.7.13	Diffusion de la lumière . . . . .	910
9.7.14	Mesure du moment magnétique du $\Lambda^0$ . . . . .	912
9.7.15	Production et désintégration du méson $\rho^+$ . . . . .	913
9.7.17	Désintégration du $\Sigma^0$ . . . . .	916
9.7.18	Coefficients de Clebsch-Gordan du couplage $\vec{L} \cdot \vec{S}$ . . . . .	917
20.10	Exercices du chapitre 10 . . . . .	917
10.4.2	Propriétés mathématiques . . . . .	917
10.4.3	États cohérents . . . . .	918
10.4.4	Couplage à une force classique . . . . .	921
10.4.5	Opérateur de phase . . . . .	922
10.4.7	Transformations de jauge non abéliennes . . . . .	924
20.11	Exercices du chapitre 11 . . . . .	925
11.6.1	Propriétés des opérateurs statistiques . . . . .	925
11.6.2	Structure fine et effet Zeeman du positronium . . . . .	926
11.6.3	Ondes de spin et magnons . . . . .	928
11.6.4	Écho de spin et décomposition des niveaux en RMN . . . . .	930
11.6.6	Inégalité de Wigner . . . . .	931
11.6.7	États de Hardy . . . . .	932
11.6.8	Photons intriqués en polarisation . . . . .	933
11.6.11	États GHZ . . . . .	934
11.6.13	Discrimination entre deux états non orthogonaux . . . . .	934
11.6.14	Interférences des temps d'émission . . . . .	935
11.6.15	Calcul quantique avec des ions piégés . . . . .	936
20.12	Exercices du chapitre 12 . . . . .	939
12.7.2	Longueur de corrélation et niveau excité . . . . .	939
12.7.4	Propagateur de Feynman et propagateur euclidien . . . . .	940
12.7.6	Calcul de la fonctionnelle génératrice pour l'oscillateur harmonique . . . . .	941
12.7.10	Probabilités de transition à l'approximation adiabatique . . . . .	945
20.13	Exercices du chapitre 13 . . . . .	948
13.5.1	Pic de Gamow . . . . .	948
13.5.2	Diffusion de neutrons de basse énergie par une molécule d'hydrogène . . . . .	951
13.5.3	Propriétés analytiques de l'amplitude de diffusion neutron-proton . . . . .	952
13.5.5	Optique neutronique . . . . .	958
13.5.6	Section efficace d'absorption des neutrinos . . . . .	960
13.6.7	Non hermiticité de $H_0$ . . . . .	962
20.14	Exercices du chapitre 14 . . . . .	962

14.5.1	Particule $\Omega^-$ et couleur . . . . .	962
14.5.2	Parité du méson $\pi$ . . . . .	963
14.5.4	Désintégration du positronium . . . . .	963
14.5.7	Hiérarchie BBGKY et approximation de Hartree-Fock . . . . .	964
20.15	Exercices du chapitre 15 . . . . .	967
15.4.1	Perturbation au second ordre et forces de van der Waals . . . . .	967
15.4.2	Atomes muoniques . . . . .	969
15.4.4	Atomes de Rydberg . . . . .	970
20.16	Exercices du chapitre 16 . . . . .	971
16.4.3	Structure hyperfine du deutérium . . . . .	971
16.4.4	Modèle en couches du noyau atomique . . . . .	973
20.17	Exercices du chapitre 17 . . . . .	975
17.5.4	Détection homodyne et lame séparatrice déséquilibrée . . . . .	975
17.5.5	Oscillations de Rabi dans une cavité . . . . .	977
17.5.6	Effet Casimir . . . . .	979
17.5.7	Observation non destructive de photons . . . . .	981
17.5.9	Forces réactives . . . . .	985
17.5.10	Capture radiative de neutrons par l'hydrogène . . . . .	986
17.5.11	L'expérience de Badurek <i>et al.</i> . . . . .	988
20.18	Exercices du chapitre 18 . . . . .	989
18.4.6	Superposition d'états cohérents . . . . .	989
18.4.8	Approximation séculaire et équation de Lindblad . . . . .	993
18.4.11	L'équation de Fokker-Planck-Kramers pour une particule brownienne . . . . .	995
20.19	Exercices chapitre 19 . . . . .	996
19.6.1	Décomposition polaire d'une transformation de Lorentz . . . . .	996
19.6.2	Relation de commutation des $J_{\mu\nu}$ et des $W_\lambda$ . . . . .	996
19.6.3	Rotation de Thomas-Wigner et précession de Thomas . . . . .	997
19.6.9	Courant de Dirac en présence d'un champ magnétique . . . . .	1000
19.6.10	Transformation de Lorentz d'un spineur de Dirac . . . . .	1001
<b>Références</b>		<b>x1</b>
<b>Index</b>		<b>x11</b>