

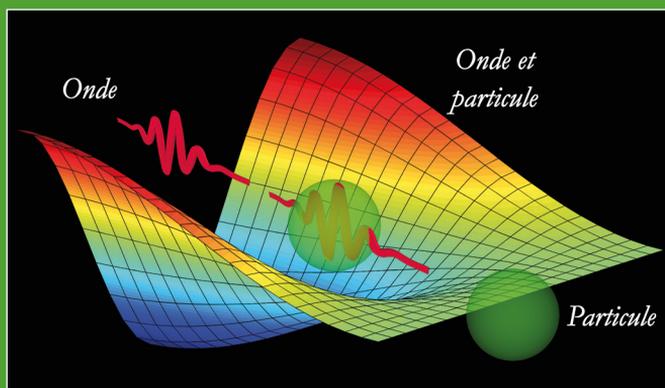
SAVOIRS

PHYSIQUE

ACTUELS

PHYSIQUE QUANTIQUE

FONDEMENTS – TOME I



3^e ÉDITION

MICHEL LE BELLAC

PRÉFACES DE
CLAUDE COHEN-TANNOUJJI
ET DE FRANCK LALOË

CNRS ÉDITIONS

edp sciences

Michel Le Bellac

Physique quantique

Tome I : Fondements

3^e édition

S A V O I R S A C T U E L S

EDP Sciences/CNRS ÉDITIONS

*Illustration de couverture : Vue d'artiste du comportement d'un photon. On observe une transition continue depuis un comportement ondulatoire (arrière-plan du dessin) à un comportement corpusculaire (avant-plan du dessin). F. Kaiser, T. Coudreau, P. Milman, D. Ostrowsky and S. Tanzilli, Entanglement enabled delayed choice experiment, Science **338**, 637 (2012). Copyright : F. Kaiser et S. Tanzilli, CNRS. Courtoisie de Sébastien Tanzilli.*

Imprimé en France.

© 2013, EDP Sciences, 17, avenue du Hoggar, BP 112, Parc d'activités de Courtabœuf, 91944 Les Ulis Cedex A

et

CNRS ÉDITIONS, 15, rue Malebranche, 75005 Paris.

Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction par tous procédés réservés pour tous pays. Toute reproduction ou représentation intégrale ou partielle, par quelque procédé que ce soit, des pages publiées dans le présent ouvrage, faite sans l'autorisation de l'éditeur est illicite et constitue une contrefaçon. Seules sont autorisées, d'une part, les reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective, et d'autre part, les courtes citations justifiées par le caractère scientifique ou d'information de l'œuvre dans laquelle elles sont incorporées (art. L. 122-4, L. 122-5 et L. 335-2 du Code de la propriété intellectuelle). Des photocopies payantes peuvent être réalisées avec l'accord de l'éditeur. S'adresser au : Centre français d'exploitation du droit de copie, 3, rue Hautefeuille, 75006 Paris. Tél. : 01 43 26 95 35.

ISBN EDP Sciences 978-2-7598-0803-8

ISBN CNRS ÉDITIONS 978-2-271-07736-3

Table des matières

Tome I : Fondements

Avant-propos	xxi
Préface de la première édition	xxv
Préface de la troisième édition	xxvii
1 Introduction	1
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 hydrogénoïdes	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
2	Mathématiques de la mécanique quantique I :	
	dimension finie	49
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 2×2 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 2×2	70
2.5.14	Propriétés de symétrie de $ \Phi\rangle$	70
2.6	Bibliographie	70
3	Polarisation : photon et spin 1/2	73
3.1	Polarisation de la lumière et polarisation d'un photon	73
3.1.1	Polarisation d'une onde électromagnétique	73
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 2×2	111
3.3.8	Exponentielles de matrices de Pauli	111
3.3.9	Tenseur ε_{ijk}	112
3.3.10	Mesures successives d'un spin $1/2$	112
3.3.11	Rotation de 2π 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
4	Postulats de la physique quantique	115
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	142
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
5	Systèmes à nombre de niveaux fini	153
5.1	Chimie quantique élémentaire	153
5.1.1	Molécule d'éthylène	153
5.1.2	Molécule de benzène	156
5.2	Résonance magnétique nucléaire (RMN)	160
5.2.1	Spin 1/2 dans un champ magnétique périodique	161
5.2.2	Oscillations de Rabi	163
5.2.3	Principes de la RMN et de l'IRM	166
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
6	Mathématiques de la mécanique quantique II : dimension infinie	197
6.1	Espaces de Hilbert	197
6.1.1	Définitions	197
6.1.2	Réalisations d'espaces séparables et de dimension 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
7	Symétries en physique quantique	211
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
8	Mécanique ondulatoire	243
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 δ	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
9	Moment angulaire	295
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 π , 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 (θ, ϕ)	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 Λ^0	343
9.7.15	Production et désintégration du méson ρ^+	345
9.7.16	Interaction de deux dipôles	347
9.7.17	Désintégration du Σ^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
10	Oscillateur harmonique	351
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
11	Intrication et non localité quantiques	379
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
Annexes		471
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
References		x1
Index		x11
Tome II : Applications et exercices corrigés		
Avant-propos		xxi
12 Méthodes semi-classiques		485
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
13	Théorie de la diffusion	547
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 neutrinos	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
14 Particules identiques	605
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 Ω^- et couleur	642
14.5.2	Parité du méson π	642
14.5.3	Fermions de spin 1/2 dans un puits infini	643
14.5.4	Désintégration du positronium	643
14.5.5	Lame 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 α^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
18	Systèmes quantiques ouverts	771
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 $\mathbf{J}(\omega)$	806
18.4.11	L'équation de Fokker-Planck-Kramers pour une particule brownienne	806
18.5	Bibliographie	807
19	Physique quantique relativiste	809
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^μ	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_λ	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
20	Corrigés d'une sélection d'exercices	871
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 opératorielles	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 δ	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 Λ^0	912
9.7.15	Production et désintégration du méson ρ^+	913
9.7.17	Désintégration du Σ^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

- ordinaire 75
 - rayonnement du corps noir
 - (ou thermique) 14, 752
 - rayonnement gaussien 751
 - réduction du paquet d'ondes
 - 122, 430
 - référentiel tournant 162
 - réflexion quantique 34
 - refroidissement Doppler 670
 - refroidissement laser 664
 - registre de données 441
 - registre de résultats 441
 - règle
 - de Bohr-Sommerfeld 37, 516
 - de Born 117, 148, 395
 - de factorisation 82
 - de Hund 695
 - de sélection 734
 - de supersélection 118
 - d'or de Fermi 284, 738, 792
 - relation
 - d'anticommutation canonique (RAC) 623, 857
 - de commutation canonique (RCC) 140, 226, 638
 - de commutation du champ électromagnétique 717
 - de commutation du moment angulaire 22, 295
 - de fermeture 55, 207, 245, 277
 - d'Einstein 676, 795
 - de Planck-Einstein 19, 132
 - d'unitarité 569, 584, 601
 - renormalisation 38, 718
 - renversement du temps 230, 474, 588, 854
 - représentation
 - chirale 838
 - de Kraus 774
 - des relations de commutation 227
 - de Wigner (voir distribution de)
 - irréductible 302
 - projective 216, 225
 - spinorielle 216
 - vectorielle 216
 - répulsion (ou non-croisement) des niveaux 173, 697
 - réseau réciproque 43
 - résolvante 62, 491
 - résonance 161, 165, 595
 - magnétique nucléaire (RMN) 161, 166
 - rotateur sphérique 307
 - rotation 218
 - de Thomas-Wigner 823, 829, 861
 - de Wick 493, 811
 - rydberg 38, 316
- S**
- saut quantique 775
 - section efficace
 - cohérente 598
 - de Rutherford 596
 - différentielle 548
 - élastique 566
 - incohérente 598
 - inélastique 567
 - totale 549, 567
 - semi-groupe dynamique 783
 - sensibilité d'un détecteur 748
 - séparabilité (d'un espace) 199
 - simplement connexe 224, 815
 - source 501
 - classique 373
 - de particules 259
 - du champ électromagnétique 11, 708
 - sous-espace d'une valeur propre 57
 - spectre 205
 - continu 206
 - de rotation 308
 - de niveaux 37, 318
 - discret 206
 - sphère
 - de Fermi 621
 - de Poincaré-Bloch 103, 389
 - dure 550
 - spin 92, 702
 - spin 1/2 92, 161, 303, 329
 - spineur de Dirac 837
 - spineur de Majorana 854

- spineur de Pauli 833
- spineur de Weyl 833
- statistique 609
 - de Bose, ou de Bose-Einstein 609
 - de Fermi, ou de Fermi-Dirac 609
 - de Maxwell-Boltzmann 633
- structure fine 454, 657, 694, 843
- structure hyperfine 663, 701
- superfluidité 642
- superopérateur 775
- superposition cohérente 121, 389, 778
- superposition incohérente 390, 778
- surface de Fermi 620
- symétrie 211
 - de jauge 375
 - interne 375
- symétrisation 611
- système
 - à deux niveaux 387
 - à nombre de niveaux fini 140
 - intégrable 517
 - quantique fermé 127, 771
 - quantique ouvert 666, 771
- T**
- téléportation quantique 444
- température
 - critique 634
 - de Curie 615
 - de Néel 615
 - de recul 673
 - Doppler 675
- temps
 - de cohérence 186
 - de décohérence 421, 778, 798, 803
 - de relaxation 779
 - de relaxation longitudinale T_1 167, 772
 - de relaxation transverse T_2 167, 456, 772
 - imaginaire (ou euclidien) 493
- tenseur complètement
 - antisymétrique d'ordre 4 $\varepsilon_{\mu\nu\rho\sigma}$ 826
- tenseur métrique 813
- terme
 - d'échange 631
 - de Darwin 682, 845
 - diamagnétique 684
 - direct 631
- test 84
 - idéal 120
 - maximal 123
- tétrade 827
- théorème
 - adiabatique 529
 - d'addition des harmoniques sphériques 310
 - de Bell 403
 - de Bloch 271
 - de Feynman-Hellmann 143
 - d'Ehrenfest 133
 - de Gleason 387
 - de Kochen-Specker 416
 - de nonclonage quantique 87, 109, 435
 - de purification de Schmidt 385
 - de représentation de Kraus 776
 - de Stone 208
 - de von Neumann 227
 - de Wigner 215, 472
 - de Wigner-Eckart 337, 350
 - GHJW 392
 - optique 568, 603
 - spin-statistique 612, 859
- théorie
 - de Fermi 600
 - de jauge abélienne 376
 - de jauge non abélienne 375
 - des perturbations dégénérée 652
 - des perturbations dépendant du temps 282
 - des perturbations non dégénérée 652, 688
 - électrofaible 600
 - locale 406
- trace 55
 - partielle 384