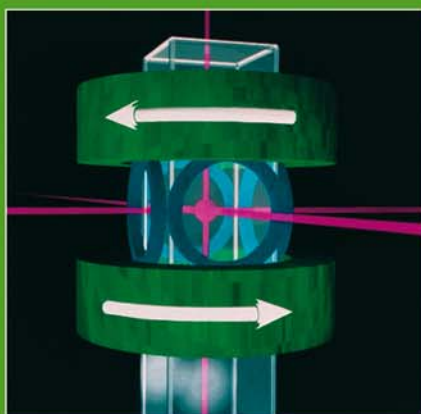


SAVOIRS

ACTUELS

PHYSIQUE • QUANTIQUE

2E ÉDITION



•
MICHEL LE BELLAC

CNRS ÉDITIONS

Illustration de couverture : Vue d'artiste d'un piège magnéto-optique (chapitre 15). Ces pièges sont devenus un outil de base de la physique atomique, et ils servent en particulier dans l'obtention de condensats de Bose-Einstein (chapitre 14). © National Institute of Standards and Technology (NIST) / Science Photo Library.

© **2007, 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 978-2-86883-998-5

ISBN CNRS ÉDITIONS 978-2-271-06584-1

Michel Le Bellac

Physique quantique

2^e édition

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

EDP Sciences/CNRS ÉDITIONS

Table des matières

Préface de la première édition	xiii
Avant-propos de la première édition	xv
Avant-propos de la deuxième édition	xix
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	3
1.1.3 Constituants élémentaires	6
1.1.4 Interactions (ou forces) fondamentales	8
1.2 Physique classique et physique quantique	10
1.3 Un peu d'histoire	14
1.3.1 Le rayonnement du corps noir	14
1.3.2 L'effet photoélectrique	17
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	32
1.5.1 Niveaux d'énergie en mécanique classique et modèles classiques de l'atome	32
1.5.2 L'atome de Bohr	35
1.5.3 Ordres de grandeur en physique atomique	37
1.6 Exercices	39
1.7 Bibliographie	45

2	Mathématiques de la mécanique quantique I : dimension finie	47
2.1	Espaces de Hilbert de dimension finie	48
2.2	Opérateurs linéaires sur $\mathcal{H}$	49
2.2.1	Opérateurs linéaires, hermitiens, unitaires	49
2.2.2	Projecteurs et notation de Dirac	51
2.3	Décomposition spectrale des opérateurs hermitiens	53
2.3.1	Diagonalisation d'un opérateur hermitien	53
2.3.2	Diagonalisation d'une matrice 2×2 hermitienne	55
2.3.3	Ensemble complet d'opérateurs compatibles	56
2.3.4	Opérateurs unitaires et opérateurs hermitiens	58
2.3.5	Fonctions d'un opérateur	58
2.4	Exercices	60
2.5	Bibliographie	63
3	Polarisation : photon et spin $1/2$	65
3.1	Polarisation de la lumière et polarisation d'un photon	65
3.1.1	Polarisation d'une onde électromagnétique	65
3.1.2	Polarisation d'un photon	72
3.1.3	Cryptographie quantique	78
3.2	Spin $1/2$	81
3.2.1	Moment angulaire et moment magnétique en physique classique	81
3.2.2	Expérience de Stern-Gerlach et filtres de Stern-Gerlach	84
3.2.3	États de spin d'orientation arbitraire	87
3.2.4	Rotation d'un spin $1/2$	89
3.2.5	Dynamique et évolution temporelle	95
3.3	Exercices	98
3.4	Bibliographie	103
4	Postulats de la physique quantique	105
4.1	Vecteurs d'état et propriétés physiques	106
4.1.1	Principe de superposition	106
4.1.2	Propriétés physiques et mesure	108
4.1.3	Inégalités de Heisenberg II	114
4.2	Évolution temporelle	116
4.2.1	Équation d'évolution	116
4.2.2	Opérateur d'évolution	118
4.2.3	États stationnaires	120
4.2.4	Inégalité de Heisenberg temporelle	122
4.2.5	Points de vue de Schrödinger et de Heisenberg	126
4.3	Approximations et modélisation	128
4.4	Exercices	130
4.5	Bibliographie	137

5	Systèmes à nombre de niveaux fini	139
5.1	Chimie quantique élémentaire	139
5.1.1	Molécule d'éthylène	139
5.1.2	Molécule de benzène	142
5.2	Résonance magnétique nucléaire (RMN)	146
5.2.1	Spin 1/2 dans un champ magnétique périodique	147
5.2.2	Oscillations de Rabi	150
5.2.3	Principes de la RMN et de l'IRM	152
5.3	La molécule d'ammoniac	155
5.3.1	La molécule d'ammoniac comme système à deux niveaux	156
5.3.2	La molécule dans un champ électrique : le maser à ammoniac	158
5.3.3	Transitions hors résonance	163
5.4	Atome à deux niveaux	166
5.4.1	Absorption et émission de photons	166
5.4.2	Principes du laser	170
5.5	Exercices	173
5.6	Bibliographie	176
6	États intriqués	177
6.1	Produit tensoriel de deux espaces vectoriels	178
6.1.1	Définition et propriétés du produit tensoriel	178
6.1.2	Système de deux spins 1/2	180
6.2	Opérateur statistique (ou opérateur densité)	182
6.2.1	Définition et propriétés	182
6.2.2	Opérateur statistique réduit	185
6.2.3	Opérateur statistique pour un système à deux niveaux	190
6.2.4	Non-unicité de la préparation	193
6.2.5	Dépendance temporelle de l'opérateur statistique	195
6.2.6	Postulats	197
6.3	Corrélations quantiques	198
6.3.1	États de Bell et de Hardy	198
6.3.2	Inégalités de Bell	202
6.3.3	Contextualité	207
6.4	Décohérence et mesure	208
6.4.1	Définition de la décohérence	208
6.4.2	Modèle pour l'émission spontanée	211
6.4.3	Modèle de von Neumann pour la mesure	212
6.4.4	Modèle de Zurek	215
6.4.5	La réduction du paquet d'ondes	218
6.5	Information quantique	219
6.5.1	Théorème de non-clonage quantique	219
6.5.2	Calcul quantique	222
6.5.3	Téléportation quantique	228

6.6	Exercices	231
6.7	Bibliographie	239
7	Mathématiques de la mécanique quantique II :	
	dimension infinie	241
7.1	Espaces de Hilbert	241
7.1.1	Définitions	241
7.1.2	Réalisations d'espaces séparables et de dimension infinie	243
7.2	Opérateurs linéaires sur $\mathcal{H}$	245
7.2.1	Domaine et norme d'un opérateur	245
7.2.2	Conjugaison hermitienne	247
7.3	Décomposition spectrale	249
7.3.1	Opérateurs hermitiens	249
7.3.2	Opérateurs unitaires	252
7.4	Exercices	253
7.5	Bibliographie	254
8	Symétries en physique quantique	255
8.1	Transformation d'un état dans une opération de symétrie . . .	256
8.1.1	Invariance des probabilités dans une opération de symétrie	256
8.1.2	Théorème de Wigner	259
8.2	Générateurs infinitésimaux	261
8.2.1	Définitions	261
8.2.2	Lois de conservation	263
8.2.3	Relations de commutation des générateurs infinitésimaux	264
8.3	Relations de commutation canoniques	269
8.3.1	Cas de la dimension $d = 1$	269
8.3.2	Réalisation explicite et commentaires	271
8.3.3	L'opération parité	272
8.4	Invariance galiléenne	275
8.4.1	Hamiltonien en dimension $d = 1$	275
8.4.2	Hamiltonien en dimension $d = 3$	278
8.5	Exercices	280
8.6	Bibliographie	285
9	Mécanique ondulatoire	287
9.1	Diagonalisation de X et de P ; fonctions d'onde	288
9.1.1	Diagonalisation de X	288
9.1.2	Réalisation dans $L_x^{(2)}(\mathbb{R})$	290
9.1.3	Réalisation dans $L_p^{(2)}(\mathbb{R})$	292
9.1.4	Inégalités de Heisenberg	293
9.1.5	Évolution du paquet d'ondes libre	295

9.2	Équation de Schrödinger	298
9.2.1	Hamiltonien de l'équation de Schrödinger	298
9.2.2	Probabilité de présence et vecteur courant	299
9.3	Résolution de l'équation de Schrödinger indépendante du temps	302
9.3.1	Généralités	302
9.3.2	Réflexion et transmission par une marche de potentiel	304
9.3.3	États liés du puits carré	306
9.3.4	Diffusion par un potentiel	309
9.4	Potentiel périodique	314
9.4.1	Théorème de Bloch	314
9.4.2	Bandes d'énergie	316
9.5	Mécanique ondulatoire en dimension $d = 3$	319
9.5.1	Généralités	319
9.5.2	Espace de phase et densité de niveaux	322
9.5.3	Règle d'or de Fermi	325
9.6	Exercices	329
9.7	Bibliographie	337
10	Moment angulaire	339
10.1	Diagonalisation de $\vec{J}^2$ et de J_z	339
10.2	Matrices de rotation	343
10.3	Moment angulaire orbital	348
10.3.1	Opérateur moment angulaire orbital	348
10.3.2	Propriétés des harmoniques sphériques	352
10.4	Particule dans un potentiel central	355
10.4.1	Équation d'onde radiale	355
10.4.2	Atome d'hydrogène	360
10.5	Distributions angulaires des désintégrations	364
10.5.1	Rotations de π , parité, réflexion par rapport à un plan	364
10.5.2	Transitions dipolaires	366
10.5.3	Désintégrations : cas général	371
10.6	Composition de deux moments angulaires	373
10.6.1	Composition de deux spins $1/2$	373
10.6.2	Cas général : composition de deux moments angulaires $\vec{J}_1$ et $\vec{J}_2$	375
10.6.3	Composition des matrices de rotation	378
10.6.4	Théorème de Wigner-Eckart (opérateurs scalaires et vectoriels)	379
10.7	Exercices	382
10.8	Bibliographie	391

11 Oscillateur harmonique	393
11.1 L'oscillateur harmonique simple	394
11.1.1 Opérateurs de création et d'annihilation	394
11.1.2 Diagonalisation du hamiltonien	395
11.1.3 Fonctions d'onde de l'oscillateur harmonique	398
11.2 États cohérents	400
11.2.1 Définition et propriétés élémentaires	400
11.2.2 Opérateurs de déplacement et de phase	403
11.3 Quantification du champ électromagnétique	407
11.3.1 Quantification d'un mode	408
11.3.2 Cas général	410
11.4 États du champ électromagnétique	418
11.4.1 Fluctuations quantiques du champ électromagnétique	418
11.4.2 Lames séparatrices et détection homodyne	421
11.4.3 Hamiltonien de Jaynes-Cummings	425
11.5 Mouvement dans un champ magnétique	429
11.5.1 Invariance de jauge locale	429
11.5.2 Champ magnétique uniforme : niveaux de Landau	432
11.6 Exercices	435
11.7 Bibliographie	448
12 Méthodes semi-classiques	449
12.1 Propagateurs et fonctions de Green	452
12.1.1 Propagateur de l'équation de Schrödinger	452
12.1.2 Fonctions de Green	453
12.1.3 Propagateur libre	455
12.2 L'intégrale de Feynman-Kač	456
12.2.1 Mouvement brownien et diffusion	456
12.2.2 Propagateur euclidien et fonction de partition	460
12.2.3 Intégrale de chemin de Feynman	463
12.3 Applications de l'intégrale de chemin	465
12.3.1 Oscillateur harmonique	465
12.3.2 Intégrale de chemin en présence d'un champ magnétique	467
12.3.3 L'effet Aharonov-Bohm	470
12.4 L'approximation BKW	473
12.4.1 Forme asymptotique de la fonction d'onde	473
12.4.2 Formules de raccordement	475
12.4.3 Phénomène de Stokes	477
12.4.4 États liés	479
12.4.5 Effet tunnel	482
12.5 Mécanique quantique dans l'espace de phase	485
12.5.1 Conditions pour une représentation dans l'espace de phase	485
12.5.2 La distribution de Wigner	488
12.5.3 Distribution de Wigner pour les états purs	490

12.6	Théorème adiabatique et phases géométriques	491
12.6.1	Un exemple	491
12.6.2	Théorème adiabatique	494
12.6.3	La phase géométrique	496
12.7	Exercices	498
12.8	Bibliographie	508
13	Théorie élémentaire de la diffusion	509
13.1	Section efficace et amplitude de diffusion	509
13.1.1	Sections efficaces différentielle et totale	509
13.1.2	Amplitude de diffusion	512
13.2	Ondes partielles et déphasages	515
13.2.1	Développement en ondes partielles	515
13.2.2	Diffusion à basse énergie	519
13.2.3	Potentiel effectif	523
13.2.4	Diffusion neutron-proton à basse énergie	525
13.3	Diffusion inélastique	527
13.3.1	Théorème optique	527
13.3.2	Potentiel optique	530
13.4	Développements formels	531
13.4.1	Équation intégrale de la diffusion	531
13.4.2	Diffusion d'un paquet d'ondes	533
13.5	Exercices	536
13.6	Bibliographie	544
14	Particules identiques	545
14.1	Bosons et fermions	546
14.1.1	Symétrie ou antisymétrie du vecteur d'état	546
14.1.2	Spin et statistique	552
14.2	Diffusion de particules identiques	556
14.3	États collectifs de fermions	559
14.3.1	Le gaz de Fermi à température nulle	559
14.3.2	Opérateurs de création et d'annihilation	561
14.3.3	Opérateurs de champ et hamiltonien	564
14.3.4	Autres formes du hamiltonien	568
14.4	États collectifs de bosons	571
14.4.1	La condensation de Bose-Einstein	571
14.4.2	L'équation de Gross-Pitaevskii	575
14.4.3	L'approximation de Bogoliubov	578
14.5	Exercices	582
14.6	Bibliographie	588

15 Atomes à un électron	589
15.1 Méthodes d'approximation	589
15.1.1 Généralités	589
15.1.2 Cas d'une valeur propre simple de H_0	591
15.1.3 Cas d'un niveau dégénéré	592
15.1.4 Méthode variationnelle	593
15.2 Atomes à un électron	595
15.2.1 Niveaux d'énergie en l'absence de spin	595
15.2.2 Structure fine	595
15.2.3 Effet Zeeman	598
15.2.4 Structure hyperfine	600
15.3 Interaction atome-champ électromagnétique	602
15.3.1 Théorie semi-classique	602
15.3.2 Approximation dipolaire	604
15.3.3 Effet photoélectrique	606
15.3.4 Champ électromagnétique quantifié : émission spontanée	609
15.3.5 Décohérence par émission de photons	614
15.4 Corrélations de photons	617
15.4.1 Détection de photons et fonctions de corrélation	617
15.4.2 Cohérences	620
15.4.3 Expérience de Hanbury Brown et Twiss	623
15.5 Manipulation d'atomes par laser	626
15.5.1 Équations de Bloch optiques	626
15.5.2 Forces dissipatives et forces réactives	630
15.5.3 Refroidissement Doppler	632
15.5.4 Piège magnéto-optique	638
15.6 Exercices	639
15.7 Bibliographie	649
16 Atomes complexes et molécules	651
16.1 L'atome à deux électrons	651
16.1.1 L'état fondamental de l'atome d'hélium	651
16.1.2 États excités de l'atome d'hélium	654
16.2 Modèle en couches de l'atome	656
16.2.1 Potentiel effectif	656
16.2.2 Couplage spin-orbite	658
16.3 Molécules diatomiques	660
16.3.1 Fonctions d'onde électroniques	660
16.3.2 Niveaux de rotation-vibration	663
16.4 Exercices	664
16.5 Bibliographie	668

17 Systèmes quantiques ouverts	669
17.1 Superopérateurs	671
17.1.1 Représentation de Kraus	671
17.1.2 Modèle pour l'amortissement de phase	675
17.2 Équations pilotes : la forme de Lindblad	677
17.2.1 L'approximation markovienne	677
17.2.2 L'équation de Lindblad	679
17.2.3 Exemple : l'oscillateur harmonique amorti	681
17.3 Couplage à un bain thermique d'oscillateurs	683
17.3.1 Équations d'évolution exactes	683
17.3.2 Dédution de l'équation pilote	685
17.3.3 Relaxation d'un système à deux niveaux	688
17.3.4 Mouvement brownien quantique	691
17.3.5 Décohérence d'un paquet d'ondes	696
17.4 Exercices	697
17.5 Bibliographie	704
Appendice A : Théorème de Wigner et renversement du temps	705
A.1 Démonstration du théorème	706
A.2 Renversement du sens du temps	708
Appendice B : Méthode de Wigner et Weisskopf	715
Appendice C : Constantes physiques	721
Références	723
Index	733

Préface de la première édition

LA NAISSANCE DE LA PHYSIQUE QUANTIQUE date d'un siècle et cette description des phénomènes physiques, qui a transformé notre vision du monde, n'est toujours pas remise en cause, ce qui est exceptionnel pour une théorie scientifique. Ses prédictions ont toujours été vérifiées par l'expérience avec une précision impressionnante. Les concepts fondamentaux, comme les amplitudes de probabilité, les superpositions linéaires d'états, qui semblent si étranges pour notre intuition lorsqu'on les rencontre pour la première fois, restent toujours essentiels. Une évolution importante s'est cependant manifestée au cours des dernières décennies. Les progrès spectaculaires des techniques d'observation, des méthodes de manipulation des atomes, permettent maintenant de réaliser des expériences si délicates qu'elles n'étaient considérées que comme des « expériences de pensée » par les pères fondateurs de la mécanique quantique. L'existence de corrélations quantiques « non séparables », qui est à la base du « paradoxe » de Einstein–Podolsky–Rosen et qui viole les fameuses inégalités de Bell, a pu être confirmée expérimentalement avec une grande précision. Les états « intriqués » de deux systèmes, qui manifestent de telles corrélations quantiques, sont mieux compris, et sont même utilisés pour des applications concrètes, comme la cryptographie quantique. L'intrication d'un appareil de mesure avec son environnement se révèle une piste intéressante pour une meilleure compréhension du processus de mesure.

Parallèlement à ces progrès conceptuels, on assiste également à une invasion de notre monde quotidien par des dispositifs dont le principe de fonctionnement repose sur des phénomènes quantiques. Les sources laser qui sont utilisées pour la lecture des disques compacts, l'ophtalmologie ou les télécommunications optiques, sont basées sur l'amplification de lumière par des systèmes atomiques dont les populations sont inversées. La résonance magnétique des noyaux des atomes est couramment utilisée dans les hôpitaux pour prendre des images de plus en plus précises des organes du corps humain. Des millions de transistors sont inclus dans les puces qui permettent à nos ordinateurs d'effectuer des opérations à des vitesses prodigieuses.

Il est donc clair qu'un enseignement moderne de la physique quantique doit tenir compte de ces développements, pour donner à l'étudiant ou au chercheur qui désire s'instruire une image plus précise des progrès réalisés et pour accroître sa motivation de mieux comprendre des phénomènes physiques dont

l'importance conceptuelle et pratique est de plus en plus évidente. C'est ce défi qu'essaie de relever avec succès Michel Le Bellac dans le présent ouvrage.

Chacun des 14 chapitres de ce livre contient en effet, en plus d'un exposé clair et concis des notions de base, de nombreuses discussions présentant des développements conceptuels ou expérimentaux très récents, qui permettent au lecteur de se faire une idée précise des avancées de la discipline et de ses grandes tendances d'évolution. Le chapitre 6 sur les états intriqués est bien caractéristique d'un tel choix de présentation. Au lieu de mettre l'accent sur les propriétés mathématiques du produit tensoriel de deux espaces d'états, ce qui est un peu austère et rébarbatif, ce chapitre préfère centrer la discussion sur la notion d'intrication, et introduire de nombreux exemples de développements théoriques et expérimentaux (dont certains sont très nouveaux) : inégalités de Bell, tests de ces inégalités, en particulier les plus récents utilisant la conversion paramétrique, les états GHZ (Greenberger, Horne, Zeilinger), la notion de décohérence illustrée par des expériences modernes d'électrodynamique quantique en cavité, et qui sera reprise plus en détail dans une annexe, la téléportation. Comme on le voit, il est difficile d'imaginer une immersion plus complète dans l'un des domaines les plus actifs actuellement de la physique quantique. De nombreux exemples de présentation moderne peuvent être donnés à propos d'autres chapitres : interférences d'ondes de de Broglie réalisées avec des neutrons lents ou des atomes refroidis par laser ; microscopie à effet tunnel ; fluctuations du champ quantique et effet Casimir ; transformations de jauge non abéliennes ; équations de Bloch optiques ; forces radiatives exercées par des faisceaux laser sur les atomes ; piège magnéto-optique ; oscillations de Rabi dans le vide d'une cavité, etc.

Je suis vraiment admiratif devant l'effort fait par l'auteur pour donner à son lecteur une vision si moderne et si attrayante de la physique quantique. Certes, les développements décrits ne peuvent pas toujours être analysés en grand détail, et le lecteur devra fournir un effort personnel pour parvenir à une compréhension plus approfondie du sujet étudié. Il sera aidé en cela par la bibliographie détaillée qu'il trouvera, soit au cours du chapitre sous forme de notes en bas de page, soit à la fin de chaque chapitre. Je suis convaincu qu'un tel ouvrage permettra une meilleure compréhension de la physique quantique et stimulera un plus grand intérêt pour cette discipline aussi centrale. Je remercie Michel Le Bellac pour cette contribution importante qui va certainement donner une image plus vivante de la physique.

Claude Cohen-Tannoudji

Avant-propos de la première édition

CE LIVRE EST ISSU DE COURS DONNÉS À NICE DANS LES ANNÉES 1970–1980, en maîtrise de physique et en DEUG MP deuxième année, et plus récemment en licence et en maîtrise de physique. Les dix premiers chapitres correspondent à un cours de base de mécanique quantique niveau licence et les quatre derniers chapitres peuvent servir comme complément de cours en maîtrise, par exemple pour un cours de physique atomique. Le livre contient environ 130 exercices de longueur et de difficulté variées; plus des trois quarts de ces exercices ont été effectivement utilisés pour des séances de travaux dirigés ou des examens. Les corrigés d’une sélection de ces exercices sont disponibles sur le site web http://livres.edpsciences.org/livres/sa_physique_quantique/

En plus des étudiants de second cycle et des Écoles d’Ingénieurs, ce livre est susceptible d’intéresser un large public de physiciens : étudiants de DEA ou de thèse, chercheurs, enseignants du second degré ou du supérieur souhaitant rafraîchir leurs connaissances en physique quantique. Il contient des développements récents qui ne figurent pas dans les manuels classiques : états intriqués, cryptographie et calcul quantiques, expériences sur la décohérence, interaction d’un champ laser avec un atome à deux niveaux, fluctuations quantiques du champ électromagnétique, manipulation d’atomes par laser, etc., ainsi qu’en annexe un exposé succinct des idées actuelles sur la mesure en mécanique quantique.

L’organisation du livre diffère profondément de celle des textes classiques, qui prennent tous comme point de départ l’équation de Schrödinger et l’étudient dans diverses configurations, ce qui oblige à exposer les principes de base de la mécanique quantique dans un cas qui n’est pas le plus simple et a l’inconvénient de masquer ces principes par des calculs souvent fastidieux. Je me suis efforcé au contraire de présenter les fondements de la mécanique quantique sur les exemples les plus simples et l’équation de Schrödinger apparaît seulement au chapitre 9. L’approche suivie consiste à mener jusqu’à à son terme la logique qu’avait adoptée Feynman (Feynman *et al.* [1965]) : développer au maximum une approche algébrique et exploiter les symétries,

en présentant la mécanique quantique dans son cadre autonome, sans faire référence à la physique classique. Cette logique a de nombreux avantages.

- L'approche algébrique permet de traiter des problèmes simples dans des espaces de dimension finie, par exemple de dimension deux : polarisation d'un photon, spin $1/2$, atome à deux niveaux...
- Cette approche permet d'énoncer de la façon la plus claire les postulats de la mécanique quantique, en séparant ce qui est fondamental de ce qui ne l'est pas (par exemple le principe de correspondance n'est pas un postulat fondamental).
- L'exploitation des propriétés de symétrie permet l'introduction la plus générale des grandeurs physiques fondamentales : impulsion, moment angulaire... comme générateurs infinitésimaux de ces symétries, sans faire appel au principe de correspondance et à un analogue classique.
- Un dernier avantage est que le lecteur qui souhaite s'initier aux développements récents de l'information quantique peut se limiter aux six premiers chapitres. On peut parfaitement comprendre les bases de la cryptographie quantique sans être passé au préalable par le développement de la fonction d'onde en harmoniques sphériques et la résolution de l'équation de Schrödinger dans un potentiel central !

Les aspects pédagogiques ont fait l'objet d'une attention particulière. La progression des chapitres a été soigneusement étudiée, les premiers chapitres utilisant uniquement les espaces de dimension finie ; c'est seulement une fois les bases acquises que l'on passe au cas général à partir du chapitre 7, tandis que les chapitres 11 à 14 et les annexes font appel à des techniques plus avancées qui pourront intéresser les physiciens professionnels. Un effort a été porté sur le vocabulaire, afin d'éviter certaines expressions historiquement datées et qui peuvent être un obstacle à la compréhension de la mécanique quantique : suivant la modernisation du vocabulaire préconisée par Lévy-Leblond, « grandeur physique » est utilisé au lieu d'« observable », « inégalité de Heisenberg » au lieu de « principe d'incertitude », des expressions comme « complémentarité » ou « dualité onde-corpuscule » ont été évitées, etc.¹

Les chapitres clés du livre, c'est-à-dire ceux qui divergent de la façon la plus évidente de l'exposé traditionnel, sont les chapitres 3, 4, 5, 6, et 8. Le chapitre 3 introduit l'espace des états sur l'exemple de la polarisation des photons et montre comment passer d'une amplitude ondulatoire à une amplitude de probabilité. Le spin $1/2$ introduit d'emblée le lecteur à un problème sans analogue classique (ou si peu...). Les propriétés essentielles du spin $1/2$ (algèbre des matrices de Pauli, matrices de rotation...) sont obtenues à partir des

1. J.-M. Lévy-Leblond « Mots et maux de la physique quantique » *Bull. U. Phys.* **816**, 1129 (1999).

deux seules hypothèses : (1) la dimension deux de l'espace des états ; (2) l'invariance par rotation. La précession de Larmor du spin quantique permet d'introduire l'équation d'évolution. Ce chapitre prépare le lecteur à l'énoncé des postulats de la mécanique quantique au chapitre suivant : il lui est possible dans chaque cas d'illustrer ces postulats de façon concrète en revenant aux exemples du chapitre 3. La distinction entre le cadre conceptuel général de la mécanique quantique et la modélisation d'un problème concret est soigneusement expliquée. Le chapitre 5 met en pratique la mécanique quantique sur des applications simples et physiquement importantes, dans le cas de systèmes dont le nombre de niveaux est fini, avec comme cas particulier la diagonalisation d'un hamiltonien en présence d'une symétrie périodique. Ce chapitre introduit également sur l'exemple de la molécule d'ammoniac l'interaction d'un système à deux niveaux atomique ou moléculaire avec un champ électromagnétique et les notions fondamentales d'émission et d'absorption.

Le chapitre 6 est consacré aux états intriqués. On s'est rendu compte de l'importance de ces états depuis le début des années 1980, mais ils sont ignorés par la plupart des manuels, à l'exception notable de celui de Basdevant et Dalibard [2001]. Ce chapitre traite aussi bien des applications fondamentales : inégalités de Bell, interférences à deux photons, théorie de la mesure, que des applications concrètes potentielles à l'information quantique. Le chapitre 8 a comme objectif l'étude des symétries à partir du théorème de Wigner, qui est généralement ignoré des manuels malgré son importance cruciale. La symétrie de rotation permet de définir le moment angulaire comme générateur infinitésimal, et de démontrer immédiatement les relations de commutation de $\vec{J}$ en soulignant leur origine géométrique. Les relations de commutation canoniques de X et P sont déduites de l'identification de l'impulsion comme générateur infinitésimal des translations. Enfin, on obtient la forme la plus générale du hamiltonien compatible avec l'invariance galiléenne, moyennant une hypothèse sur la loi de transformation de la vitesse. Ce hamiltonien sera réinterprété ultérieurement dans le cadre de l'invariance de jauge locale.

Les autres chapitres peuvent se résumer comme suit. Le chapitre 1 poursuit un triple objectif : (1) introduire des notions de base de physique microscopique auxquelles il sera fait appel dans la suite du livre ; (2) introduire le comportement des particules quantiques, la conventionnelle « dualité onde-corpuscule » ; (3) à l'aide de l'atome de Bohr, expliquer simplement la notion de niveau d'énergie et de spectre de niveaux. Le chapitre 2 présente les notions essentielles sur l'espace de Hilbert dans le cas de la dimension finie. Le chapitre 7 donne quelques indications sur les espaces de Hilbert de dimension infinie ; le but n'est évidemment pas de traiter les mathématiques de façon rigoureuse, mais de prévenir le lecteur de certaines difficultés de la dimension infinie.

Les six derniers chapitres sont consacrés à des applications plus classiques. Le chapitre 9 présente la mécanique ondulatoire et ses applications usuelles (effet tunnel, états liés du puits carré, potentiel périodique...). Les relations

de commutation du moment angulaire ayant été établies au chapitre 8, le chapitre 10 débute par la construction des états propres de $\vec{J}^2$ et J_z et se termine par le théorème de Wigner-Eckart pour les opérateurs vectoriels. Le chapitre 11 développe la théorie de l'oscillateur harmonique et celle du mouvement dans un champ magnétique constant, ce qui est l'occasion de donner quelques explications sur l'invariance de jauge locale. Une section importante traite des champs quantifiés : champ de vibrations et phonons, champ électromagnétique et ses fluctuations quantiques. Les chapitres 12 et 13 sont consacrés à la diffusion et aux particules identiques. Enfin le chapitre 14 est une brève introduction à la physique de l'atome à un électron, l'objectif principal étant de calculer les forces sur un atome à deux niveaux placé dans le champ d'un laser et d'en discuter les applications, dont le refroidissement Doppler et les pièges magnéto-optiques.

Les annexes contiennent des sujets qui sont techniquement un peu plus exigeants. La démonstration du théorème de Wigner et l'opération de renversement du sens du temps sont expliquées en détail. Des compléments sur la théorie et les expériences sur la décohérence et une discussion des idées actuelles sur la mesure se trouvent dans l'annexe B. Enfin l'annexe C contient une discussion de la méthode de Wigner et Weisskopf pour les états instables.

Remerciements. J'ai bénéficié des critiques et suggestions de Pascal Baldi, Jean-Pierre Farges, Yves Gabellini, Thierry Grandou, Jacques Joffrin, Christian Miniatura et tout particulièrement de Michel Brune (à qui je suis aussi redevable des figures 6.9, B.1 et B.2), Jean Dalibard, Fabrice Mortessagne, Jean-Pierre Romagnan et François Rocca qui ont lu de larges extraits, ou parfois même l'intégralité du manuscrit. Je remercie également David Wilkowski qui a inspiré le texte de plusieurs exercices du chapitre 14. Je suis bien entendu entièrement responsable du texte final. L'aide de Karim Bernardet et de Fabrice Mortessagne, qui m'a initié à XFIG et installé le logiciel, a été décisive dans la réalisation des figures, et je tiens à remercier Christian Taggiasco pour sa compétence et sa disponibilité dans l'installation et la maintenance de l'ensemble des logiciels nécessaires. Enfin ce livre n'aurait pas vu le jour sans les encouragements et le soutien sans faille de Michèle Leduc, et je suis très reconnaissant à Claude Cohen-Tannoudji qui a bien voulu le préfacer.

Nice, mars 2003
Michel Le Bellac

N.B. Cet ouvrage utilise le point décimal.

Avant-propos de la deuxième édition

J'AI SOUHAITÉ FAIRE DE CETTE SECONDE ÉDITION un ouvrage qui puisse servir aussi bien de manuel d'enseignement que de référence (ou du moins d'introduction à la littérature) pour des sujets qui ont pris aujourd'hui une grande importance : états intriqués, décohérence, information quantique, états du champ électromagnétique, intégrale de chemin, atomes froids, condensats de Bose-Einstein, équations pilotes pour les systèmes ouverts, etc. Cette seconde édition, contrairement à la première qui était avant tout un livre d'enseignement, couvre une trop grande variété de sujets pour qu'elle puisse encore correspondre à un cours de première année de master (M1). Un guide de lecture est proposé au lecteur afin de lui permettre de s'orienter dans un cours d'introduction à la mécanique quantique.

Je résume maintenant les principales différences par rapport à la première édition. J'ai complété le chapitre 1 par une sous-section 1.4.5 sur les lames séparatrices et l'interféromètre de Mach-Zehnder. Le chapitre 5 (Systèmes à nombre de niveaux fini) a été remanié : une nouvelle section (5.2) est consacrée à la RMN, comme exemple d'application des oscillations de Rabi, et une courte sous-section (5.4.2) expose le principe du laser. Le chapitre 6 (États intriqués) a été récrit à 80 %. La théorie de l'opérateur statistique (ou densité) a été considérablement développée, ainsi que celles de la décohérence et de la mesure. La section 6.5 sur l'informatique quantique a été complétée par une analyse détaillée du théorème de non-clonage quantique et de l'algorithme de recherche de Grover. Dans le chapitre 9 (Mécanique ondulatoire), j'ai supprimé plusieurs passages sur les puits et barrières de potentiel en crêteau. Le chapitre 11 (Oscillateur harmonique) a été complété par une discussion détaillée des états cohérents, de la quantification et des états du champ électromagnétique et par des applications : détection homodyne, électrodynamique en cavité. Le chapitre 12 (Méthodes semi-classiques) est entièrement nouveau. Il traite de l'intégrale de chemin, aussi bien dans son aspect temps réel que temps euclidien, de la méthode BKW, de la distribution de Wigner et de la phase géométrique. On trouve maintenant dans le chapitre 14 (Particules identiques, ancien chapitre 13) une introduction à la « seconde quantification » ainsi qu'aux condensats de Bose-Einstein. Une section (15.4)



Physique statistique hors d'équilibre

Processus irréversibles linéaires

Noëlle Pottier

Le champ de la physique statistique hors d'équilibre est extrêmement vaste, et met en oeuvre des échelles très éloignées, depuis le nanomonde jusqu'aux structures cosmologiques. L'une des difficultés de la physique statistique de ces systèmes réside dans le fait que l'on ne dispose pas d'approche unifiée. L'ambition de ce livre est de dégager, à propos des systèmes physiques divers, quelques idées centrales communes aux différentes approches utilisées.

• 2007 • 978-2-86883-934-3 • 544 pages • 49 €



Transitions de phase et groupe de renormalisation

Jean Zinn-Justin

Le but de cet ouvrage est de familiariser le lecteur avec un concept, le groupe de renormalisation, concept qui permet d'expliquer les propriétés universelles de quantité de systèmes physique.

• 2005 • 2-86883-790-5 • 512 pages • 45 €



Les surfaces solides: concepts et méthodes

Stéphane Andrieu et Pierre Müller

Le livre présente une large vision de la physique des surfaces solides, depuis les concepts thermodynamiques de base, jusqu'à la surface "échange" entre cristal et environnement. Des exercices de difficultés variables complètent le cours. Cet ouvrage est destiné aux étudiants de Maîtrise, de 3^e cycle de physique ou de chimie de la matière condensée, et aux ingénieurs.

• 2005 • 2-86883-773-5 • 536 pages • 49 €



Einstein aujourd'hui

Alain Aspect, François Bouchet, Éric Brunet, Claude Cohen-Tannoudji, Jean Dalibard, Thibault Damour, Olivier Darrigol, Bernard Derrida, Philippe Grangier, Franck Laloë et Jean-Paul Pocholle

Ce livre a pour objectif de montrer combien les idées d'Einstein continuent à inspirer la science de ce début du XXI^e siècle. Il contient sept contributions : une introduction historique et six articles retraçant les travaux les plus importants d'Einstein et leur impact sur la physique d'aujourd'hui. Ce livre s'inscrit dans le cadre de l'année 2005, année mondiale de la physique.

• 2005 • 2-86883-790-5 • 512 pages • 45 €



Physique des solitons

Michel Peyrard et Thierry Dauxois

Dans cet ouvrage, les fondements de la physique des solitons sont introduits à partir d'exemples de la physique macroscopique. Les principales méthodes théoriques sont ensuite abordées, avant la présentation détaillée de nombreuses applications consacrées à des problèmes microscopiques de la physique des solides ou des macromolécules biologiques.

• 2004 • 2-86883-732-8 • 426 pages • 42 €



Physique mésoscopique des électrons et des photons

Eric Akkermans et Gilles Montambaux

Cet ouvrage propose une présentation générale du problème de la propagation des ondes dans les milieux aléatoires, en considérant les phénomènes physiques pour lesquels les effets d'interférences quantiques jouent un rôle essentiel. Il représente une solide introduction à la physique mésoscopique.

• 2004 • 2-86883-712-3 • 644 pages • 52 €

Intégrale de chemin en mécanique quantique : Introduction

Jean Zinn-Justin

• 2003 • 2-86883-660-7 • 316 pages • 48 €

Lasers - Interaction lumière-atomes

Bernard Cagnac et Jean-Pierre Faroux

• 2002 • 2-86883-528-7 • 528 pages • 53 €

Hydrodynamique physique - Nouvelle édition, revue et augmentée

Étienne Guyon, Jean-Pierre Hulin et Luc Petit

• 2001 • 2-86883-502-3 • 640 pages • 54 €

Théorie des formes de croissance - Digitations, dendrites et flammes

Pierre Pelcé

• 2000 • 2-86883-477-9 • 394 pages • 39 €

Magnétisme et supraconductivité

Laurent-Patrick Lévy

• 1997 • 2-86883-380-2 • 480 pages • 49 €

Processus d'interaction entre photons et atomes

Claude Cohen-Tannoudji, Jacques Dupont-Roc et Gilbert Grynberg

• 1996 • 2-86883-358-6 • 648 pages • 59 €

Analyse continue par ondelettes

Bruno Torrèsani

• 1995 • 2-86883-377-2 • 256 pages • 30 €

Physique des plasmas (Vol. I et Vol. II)

Jean-Loup Delcroix et Abraham Bers

Vol. I : • 1994 • 2-86883-368-3 • 416 pages • 39 €

Vol. II : • 1994 • 2-86883-369-1 • 532 pages • 49 €

Des phénomènes critiques aux champs de jauge

Une introduction aux méthodes et aux applications de la théorie quantique des champs

Michel Le Bellac

• 1988 • 2-86883-359-4 • 640 pages • 59 €

Photons et atomes - Introduction à l'électrodynamique quantique

Claude Cohen-Tannoudji, Jacques Dupont-Roc et Gilbert Grynberg

• 1987 • 2-86883-535-X • 492 pages • 46 €