

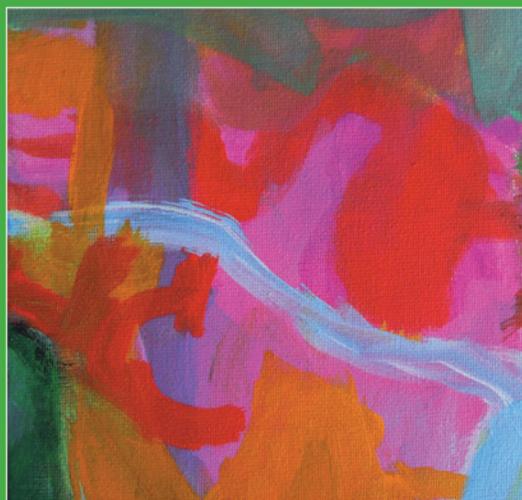
SAVOIRS

PHYSIQUE

ACTUELS

COMPRENONS-NOUS VRAIMENT LA MÉCANIQUE QUANTIQUE ?

2^e ÉDITION, RÉVISÉE ET AUGMENTÉE



FRANCK LALOË

PRÉFACE DE
CLAUDE COHEN-TANNOUJJI

CNRS ÉDITIONS



edp sciences

Franck Laloë

Comprenons-nous vraiment la mécanique quantique ?

2^e édition, révisée et augmentée

SAVOIRS ACTUELS

EDP Sciences/CNRS ÉDITIONS

Dans la même collection :

Mécanique quantique - Tome III

Claude Cohen-Tannoudji, Bernard Diu et Franck Laloë

Cohomologie galoisienne - Et théorie du corps de classes

David Harari

Optique non linéaire

François Hache

Chimie verte - Concepts et applications

Jacques Augé et Marie-Christine Scherrmann

De la solution à l'oxyde - Chimie aqueuse des cations métalliques,

Synthèse de nanostructures

Jean-Pierre Jolivet

Physique de la conversion d'énergie

Jean-Marcel Rax

Retrouvez tous nos ouvrages et nos collections sur
<http://laboutique.edpsciences.fr>

Imprimé en France

© 2017, 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.

EDP Sciences, ISBN (papier) : 978-2-7598-2184-6, ISBN (ebook) : 978-2-7598-2185-3

CNRS Éditions, ISBN : 978-2-271-07232-0

Table des matières

Préface	ix
Avant-propos	xi
I Perspective historique	1
A Trois périodes	2
A-1 Préhistoire	3
A-2 La période ondulatoire	4
A-3 Emergence de l'interprétation de Copenhague	5
B Le vecteur d'état	8
B-1 Définition, équation de Schrödinger, règle de Born	8
B-2 Processus de mesure	10
B-3 Statut	14
C Autres formalismes, théorie des champs, intégrales de chemin	19
II Situation actuelle, des difficultés conceptuelles subsistent	23
A La chaîne (ou régression) sans fin de von Neumann	26
B Le chat de Schrödinger ; mesures	29
B-1 L'argument	29
B-2 Malentendus	32
B-3 Lien avec le problème de la mesure	34
B-4 Les chats nouvelle vague	35
C L'ami de Wigner	35
D Mesures négatives et "sans interaction"	37
E Une grande variété de points de vue	44
F Des arguments peu convaincants	51
III Le théorème d'Einstein, Podolsky et Rosen	53
A Un théorème	54
B Des pois, des gousses, et de leurs gènes	56
B-1 Une expérience simple ; pas de conclusion à ce stade	56
B-2 Corrélations ; les causes dévoilées	57
C Transposition à la physique	60

C-1	L'argument EPR pour deux particules microscopiques corrélées	60
C-2	La réponse de Bohr	65
C-3	Localité, relativité, séparabilité	69
D	Généralisations	72
D-1	Etats EPR généralisés	72
D-2	L'argument EPR pour des systèmes macroscopiques	76
IV	Le théorème de Bell	79
A	Inégalités de Bell	80
A-1	Mécanique quantique : deux spins dans un état singulet	80
A-2	Réalisme local : démonstration de l'inégalité BCHSH	82
A-3	Contradiction entre l'inégalité et la mécanique quantique	84
A-4	Contenu logique	90
A-5	Contradiction avec les expériences	92
B	Diverses démonstrations du théorème	95
B-1	Autres hypothèses de départ	95
B-2	Généralisations du théorème, théories non déterministes	97
B-3	Statut du théorème ; tentatives de le contourner	111
C	Impact du théorème de Bell, échappatoires	112
C-1	Echappatoires (loopholes), conspirations	113
C-2	La mécanique quantique est-elle non locale? Contra- factualité	125
V	Autres inégalités, limite de Cirelson, transmission de signaux	129
A	Autres inégalités	130
A-1	Bell 1964	130
A-2	Inégalités de Wigner et d'Espagnat	131
A-3	Inégalité de Mermin	134
A-4	Inégalité de Clauser et Horne	136
A-5	Inégalités de Eberhard	141
A-6	Le jeu de Bell	148
B	Théorème de Cirelson	150
B-1	Mesures sur deux systèmes à deux niveaux	151
B-2	Violation quantique maximale	152
C	Relativité, localité, théorie des champs	154
C-1	Bohr et l'espace-temps	155
C-2	La théorie des champs résoud-elle le problème ?	156
D	Non-transmission instantanée de signaux	157
D-1	Conditions NS de non-transmission instantanée de si- gnaux	158
D-2	Boîtes logiques	159

D-3	Boîte de Popescu-Rohrlich et corrélations “superquantiques”	162
D-4	Comment caractériser la théorie quantique ?	164
VI	Autres théorèmes	167
A	Propriétés quantiques des états GHZ	167
A-1	Contradictions GHZ	167
A-2	Inégalité de GHZ-Mermin	172
A-3	Généralisations de GHZ	174
B	Inégalité de Cabello	177
B-1	Réalisme local	178
B-2	Contradiction avec la mécanique quantique	180
C	Impossibilités de Hardy	180
D	Théorème de Bell-Kochen-Specker ; contextualité	184
D-1	Particule de spin 1	185
D-2	Inégalité du pentagramme	187
D-3	Deux particules de spin 1/2, règle du produit	191
D-4	Contextualité et réalisme local	193
E	Réalité du vecteur d’état	194
E-1	ψ ontique ou épistémique ?	195
E-2	Théorème PBR	196
E-3	Théorèmes similaires	199
VII	Intrication quantique	203
A	Une notion purement quantique	204
A-1	La partie et le tout	205
A-2	Deux origines possibles des corrélations	208
B	Caractérisations de l’intrication	209
B-1	Ambiguïté de l’intrication	209
B-2	Décomposition de Schmidt d’un état pur	211
B-3	Entropies statistiques	214
B-4	Mesures de l’intrication	215
B-5	Monogamie	216
B-6	Critère de séparabilité pour l’opérateur densité	217
C	Création et perte de l’intrication	218
C-1	Intrication par interactions locales	218
C-2	Echange d’intrication	220
C-3	Décohérence	223
C-4	Purification, distillation	230
D	Dynamique quantique d’un sous-système	231
D-1	Opérateurs de Kraus	231
D-2	Opérateur densité, somme de Kraus	234
D-3	Equation pilote, forme de Lindblad	235

VIII Applications de l'intrication	239
A Deux théorèmes	240
A-1 Non-clonage	240
A-2 Non-détermination d'un état avec une seule réalisation	242
A-3 Conséquences en termes de transmission de signaux . .	243
B Cryptographie quantique	243
B-1 Distribution de clés cryptographiques	244
B-2 Exemples de protocoles d'échange de clés	245
C Téléportation d'un état quantique	251
D Calcul et simulation quantiques	254
D-1 Principe général	255
D-2 Portes quantiques et algorithmes	256
D-3 Codes de correction quantique des erreurs	258
D-4 Simulation quantique	259
IX Mesure quantique	261
A Mesures directes	261
A-1 Mesure idéale, modèle de von Neumann	262
A-2 Effets de l'environnement, états pointeurs	265
A-3 Le paradoxe de Hund	267
A-4 Le théorème WAY (Wigner-Araki-Yanase)	269
B Mesures indirectes	273
B-1 Un modèle simple : système à deux niveaux	274
B-2 Généralisation : POVM	277
C Mesures faibles et continues	279
C-1 Valeurs faibles	279
C-2 Mesures continues	283
X Expériences : la réduction quantique en temps réel	293
A Ion unique dans un piège	294
B Electron unique piégé	298
C Nombre de photons dans une cavité	301
D Phase spontanée de condensats de Bose-Einstein	304
D-1 Interférences dans une région de l'espace	305
D-2 Une variable supplémentaire ?	306
D-3 Non-localité de la phase	308
XI Diverses interprétations et reconstructions de la mécanique quantique	313
A Pragmatisme dans les laboratoires	314
A-1 Interrompre "à la main" la chaîne de von Neumann . .	315
A-2 Interprétation des corrélations	317
A-3 Mettre l'accent sur l'information	322

B	Interprétations statistiques (ensemblistes)	323
C	Interprétation relationnelle, vecteur d'état relatif	326
	C-1 Interprétation relationnelle	326
	C-2 Point de vue informationnel pur	328
D	Approches logiques, algébriques et déductives	331
	D-1 Logique quantique	332
	D-2 Théories algébriques, formelles, et axiomatiques	334
	D-3 Théorème de Gleason	335
E	Le réel voilé	338
F	Réel contextuel quantique	338
G	Histoires cohérentes	339
	G-1 Histoires, familles d'histoires	340
	G-2 Familles cohérentes	342
	G-3 Evolution quantique d'un système isolé	343
	G-4 Incompatibilité des familles différentes	346
	G-5 Comparaison avec d'autres interprétations	346
	G-6 Une profusion d'histoires ; discussion	349
H	Variables supplémentaires ("cachées")	352
	H-1 Théorie de De Broglie-Bohm (dBB)	353
	H-2 Mécanique de Nelson	391
J	Interprétations modale et interactive	393
K	Dynamique de Schrödinger modifiée	396
	K-1 Evolution des idées	398
	K-2 Description de la réalité dans le cadre d'une théorie à dynamique modifiée	410
	K-3 Systèmes quantiques ouverts en mécanique quantique standard	415
	K-4 Dynamique de Schrödinger attractive	415
L	Interprétation transactionnelle	418
M	Interprétation d'Everett	419
	M-1 Aucune limite pour l'équation de Schrödinger	419
	M-2 Développement logique de l'interprétation	421
	M-3 Discussion	427
Conclusion		432
XII Annexe : outils mathématiques de base		435
A	Système physique général	436
	A-1 Espace des états quantiques	436
	A-2 Opérateurs	437
	A-3 Probabilités	440
	A-4 Evolution dans le temps	441
	A-5 Points de vue de Schrödinger et de Heisenberg	442

A-6	Opérateur densité	443
A-7	Un cas simple : le spin $1/2$	447
B	Réunion de plusieurs systèmes physiques	448
B-1	Produit tensoriel	448
B-2	Ensemble de spins $1/2$	450
B-3	Traces partielles	451
C	Particules dans un potentiel	453
C-1	Une seule particule	453
C-2	Spin, expérience de Stern et Gerlach	455
C-3	Plusieurs particules	458

APPENDICES

Appendice A	: Contenu “mental” du vecteur d’état	461
Appendice B	: Inégalités de Bell et théories locales non déterministes	463
Appendice C	: Une tentative pour construire une théorie quantique séparable	469
Appendice D	: Probabilité maximale pour un état parti- culier	473
Appendice E	: Influence d’une sélection des paires observées	475
Appendice F	: Impossibilité d’une transmission superlu- minale de messages	481
Appendice G	: Mesures quantiques à des instants différents	487
Appendice H	: Manipulation des variables supplémentaires	493
Appendice I	: Corrélations et trajectoires en théorie de Bohm	497
Appendice J	: Modèles de réduction spontanée du vecteur d’état	513
Appendice K	: Familles d’histoires cohérentes	519
Appendice L	: Dynamique de Schrödinger attractive	523

BIBLIOGRAPHIE	532
---------------	-----

INDEX	589
-------	-----

Préface

La mécanique quantique est désormais une discipline scientifique de base, enseignée dans toutes les universités. Elle permet de rendre compte du comportement du monde microscopique avec une précision impressionnante, et en particulier du fonctionnement de tous les objets techniques (ordinateurs, téléphones mobiles, disques laser, etc.) que nous utilisons dans notre vie courante. Une pratique quotidienne de cette discipline permet au physicien d'acquérir une certaine maîtrise dans le maniement du formalisme quantique, une certaine intuition des erreurs qu'il ne faut pas commettre, de la démarche qu'il faut suivre pour parvenir au résultat correct. Cependant, lequel d'entre nous n'a pas ressenti, au moins une fois dans son parcours scientifique, un certain trouble concernant les fondements de la théorie quantique, l'impression qu'une formulation convaincante et satisfaisante de cette théorie restait encore à élaborer.

Un grand nombre d'ouvrages d'enseignement de la mécanique quantique sont désormais disponibles, qui présentent en détail le formalisme quantique traditionnel et la manière dont il permet de rendre compte des propriétés des atomes et molécules, des corps solides et liquides, des interactions matière-rayonnement, et plus généralement du monde physique qui nous entoure. D'autres livres retracent l'histoire de l'élaboration de cette discipline, et décrivent les diverses étapes qui ont conduit à sa formulation moderne. Rares sont cependant ceux qui présentent, d'une part une revue des difficultés conceptuelles de la théorie, et d'autre part un panorama complet de toutes les tentatives de reformulation de la mécanique quantique ayant pour but de résoudre, au moins partiellement, ces difficultés.

L'ouvrage présent de Franck Laloë répond à ces deux objectifs. Il introduit et discute en détail un certain nombre de résultats et de notions, comme le théorème d'Einstein-Podolsky-Rosen, le théorème de Bell, l'intrication quantique, qui illustrent clairement le caractère étrange du comportement quantique. Au cours des dernières décennies, des progrès expérimentaux importants ont été réalisés. Par exemple, il est devenu possible de suivre l'évolution en temps réel d'un atome unique. De nombreuses expériences, considérées comme des "expériences de pensée" par les pères fondateurs de

la mécanique quantique sont devenues réalisables. Ces expériences sont brièvement passées en revue, ce qui permet de faire le point sur les résultats acquis à ce jour, comme la démonstration convaincante d'une violation des inégalités de Bell.

Une grande partie de ce livre est par ailleurs consacrée à une présentation claire et objective des différentes formulations alternatives qui ont été jusqu'ici proposées pour remplacer la théorie "orthodoxe" traditionnelle. Un grand soin est apporté au respect de la logique propre et de la cohérence interne de chacune de ces formulations. Le lecteur peut ainsi se forger une idée précise de ces tentatives et acquérir une vision globale de l'état de la discipline. A une époque où la spécialisation des recherches s'accroît de plus en plus, il me paraît crucial de ménager des temps de réflexion, où l'on essaie de prendre du recul et de se poser des questions sur la signification profonde des concepts que l'on utilise. Je suis sûr que le présent ouvrage sera précieux pour entreprendre une telle réflexion. J'y reconnais les qualités de clarté, de rigueur intellectuelle, de profondeur de l'analyse que j'ai toujours grandement appréciées chez l'auteur tout au long de nombreuses années de collaboration amicale. Je souhaite à cet ouvrage de rencontrer le succès qu'il mérite.

Claude Cohen-Tannoudji

Avant-propos

La mécanique quantique est une théorie étonnante dans tous les sens du terme. C'est un lieu commun que de faire remarquer qu'elle est peu intuitive, souvent contraire à toute représentation des phénomènes physiques issue de notre expérience journalière. Mais elle est également étonnante par le contraste qu'elle présente entre ses triomphes et ses difficultés.

D'une part, de toutes les théories scientifiques, la mécanique quantique est probablement l'une des plus couronnées de succès. Inventée initialement dans le cadre de la physique atomique, elle a rapidement débordé dans de très nombreux domaines, permettant de concevoir et de réaliser maintes expériences en optique, en physique du solide, des liquides, en astrophysique, etc. Plus qu'une simple théorie, elle est ainsi devenue une méthode générale, un cadre qui a permis de développer la théorie des fluides et des solides, celle des champs, celle des particules élémentaires et l'unification des interactions en physique. Elle a ainsi très largement dépassé les objectifs initiaux de ses inventeurs sans qu'il soit nécessaire, ce qui est vraiment remarquable, de modifier les principes généraux de la théorie qu'ils avaient élaborée. Ses applications sont multiples, peuplant notre environnement au XXI^e siècle de multiples dispositifs qui auraient été inimaginables il y a 50 ans.

D'autre part, cependant, cette théorie reste relativement fragile du fait des difficultés conceptuelles et d'interprétation qu'elle présente, sans d'ailleurs que cela affecte son efficacité. Ce n'est pas que les physiciens aient voulu ignorer ou occulter ces difficultés, bien au contraire ! En témoigne le nombre important d'interprétations de la théorie qui ont été proposées au cours des décennies, mettant en jeu des méthodes d'approche et des techniques mathématiques souvent très diverses. C'est une situation rare dans l'histoire des sciences : un consensus général se dégage concernant une approche des phénomènes et des méthodes de calcul, dont la puissance prédictive est extraordinaire ; et cependant, presque un siècle après l'introduction de ces méthodes, le même consensus est loin d'être obtenu en ce qui concerne l'interprétation de la théorie, sa base en quelque sorte. On retrouve l'image du colosse d'airain aux pieds d'argile.

L'essentiel des difficultés fondamentales de la mécanique quantique tient au vecteur d'état $|\Psi\rangle$ qu'elle utilise pour décrire les systèmes physiques. Alors

qu'en mécanique classique un système est décrit de façon directe par des positions et des vitesses, en mécanique quantique il s'y substitue l'objet mathématique $|\Psi\rangle$, qui n'en donne qu'une description relativement indirecte. C'est un énorme changement, non seulement sur le plan mathématique, mais aussi conceptuel ; c'est lui qui ouvre la porte à de nombreuses discussions concernant l'interprétation de la théorie. Beaucoup des difficultés rencontrées par ceux qui ont essayé (ou essaient toujours) de "vraiment comprendre" la mécanique quantique sont liées aux questions concernant le statut exact de $|\Psi\rangle$. Le vecteur d'état décrit-il la réalité physique elle-même, ou seulement une connaissance (partielle) que nous aurions de cette réalité ? Décrit-il seulement des ensembles de systèmes (description statistique), ou un système physique unique (une seule réalisation, un événement unique) ? Si $|\Psi\rangle$ contient une composante reliée à notre connaissance imparfaite de la réalité du système, n'est-il alors pas naturel de rechercher une description plus précise, qui devrait exister au moins en principe ? Dans ce cas, quelle serait cette meilleure description de la réalité ?

Une autre propriété troublante de $|\Psi\rangle$ est que, pour des systèmes physiques qui sont étendus dans l'espace (par exemple un système physique constitué de deux particules éloignées), le vecteur d'état donne une description globale de toutes les propriétés physiques du système, en un tout indissociable d'où la notion d'espace semble avoir disparu ; les propriétés des deux systèmes peuvent être "intriquées" d'une telle façon que les notions habituelles d'espace-temps et d'événement (au sens de la relativité) paraissent s'être en quelque sorte diluées. En particulier il peut devenir difficile, voire impossible, de donner une représentation spatio-temporelle de leurs corrélations qui reste compatible avec la relativité. Tout cela est évidemment très contraire aux concepts habituels en physique classique, où l'on attribue des propriétés locales aux systèmes physiques en spécifiant en chaque point de l'espace la densité, la valeur du champ, etc. En mécanique quantique, cette séparabilité entre les contenus physiques des différents points de l'espace n'est plus possible en général. Bien sûr, on pourrait penser que cette perte d'une description locale est juste une propriété innocente du formalisme, sans conséquence particulière. On sait par exemple, en électromagnétisme classique, qu'il est souvent commode d'introduire de façon intermédiaire un choix de jauge pour décrire les champs ; dans la jauge de Coulomb, le potentiel se propage de façon instantanée, alors que la relativité d'Einstein interdit la propagation d'un signal plus rapidement qu'à la vitesse de la lumière. Mais cette propagation instantanée est juste un artefact mathématique qui disparaît dès qu'un calcul complet est effectué : on voit alors apparaître des annulations entre termes opposés qui, au bout du compte, font que la limitation relativiste est parfaitement respectée. N'en serait-il pas de même pour le formalisme de la mécanique quantique ? En réalité nous verrons que, dans le cadre de cette théorie, la situation est bien plus compliquée qu'en élec-

tromagnétisme classique ; en fait, une intrication contenue dans l'expression mathématique de $|\Psi\rangle$ peut parfaitement avoir des conséquences physiques importantes sur les résultats des expériences, et même conduire à des prédictions qui, en un certain sens, sont en contradiction avec la localité. Sans aucun doute, le vecteur d'état est vraiment un curieux objet pour décrire la réalité !

Il n'est donc pas surprenant que la mécanique quantique ait donné lieu à des interprétations variées. De par leur diversité même, ces interprétations sont intéressantes. Chacune apporte son cadre conceptuel et sa conception générale propre de la physique, lui donnant parfois un statut particulier parmi les autres sciences de la Nature. Plusieurs d'entre elles permettent de jeter des regards complémentaires sur la théorie, mettant en lumière certaines propriétés particulières qui autrement seraient passées inaperçues. L'exemple le plus connu est celui de la théorie de Bohm, dont l'étude a conduit Bell à un théorème illustrant des propriétés générales de la mécanique quantique, mais qui dépasse largement le cadre de cette théorie. On peut en citer d'autres, comme l'utilisation de la dynamique de Schrödinger stochastique qui permet de mieux comprendre l'évolution d'un sous-système quantique, l'interprétation des histoires et son éclairage sur la complémentarité, etc.

Ce livre s'adresse au lecteur curieux qui désire connaître la situation générale de la physique quantique, ainsi que la nature des interprétations auxquelles elle a donné lieu, sans que les difficultés soient passées sous silence. Ce n'est pas un "textbook", destiné aux étudiants voulant apprendre les premiers éléments de mécanique quantique ; il existe déjà de nombreux ouvrages de référence qui sont excellents. D'ailleurs, à partir du Chapitre I, le texte suppose une certaine familiarité du lecteur avec la mécanique quantique et son formalisme de base (notation de Dirac, notion de fonction d'onde, etc.). Tout étudiant qui a déjà derrière lui une année de mécanique quantique n'aura cependant aucune difficulté à suivre les équations. L'ouvrage en contient relativement peu car il se concentre, non pas sur les difficultés techniques, mais logiques et conceptuelles. De plus, un chapitre en annexe est inséré à la fin du livre pour aider ceux qui n'ont guère l'habitude du formalisme quantique. Il propose un premier contact avec les notations ; le lecteur pourra, au fur et à mesure de sa progression dans les autres chapitres, revenir sur un paragraphe du chapitre annexe afin de préciser tel ou tel point particulier.

Les Chapitres I et II retracent le contexte historique depuis l'origine de la mécanique quantique jusqu'à la situation actuelle, tout en mentionnant les difficultés qui subsistent. Nous pourrions ainsi rappeler quelles ont été les étapes successives qui ont fait émerger le statut actuel du vecteur d'état $|\Psi\rangle$. Prendre le temps de se pencher sur l'histoire de l'émergence des idées n'est pas inutile dans un domaine où, souvent et de façon récurrente, les mêmes idées sont redécouvertes ; elles refont surface régulièrement, soit parfois presque identiques à des décennies de distance, soit parfois mises au goût

du jour avec un vocabulaire différent, tout en restant très semblables sur le fond. Dans ces conditions, commencer par un examen du passé n'est pas forcément une perte de temps ! Les Chapitres III et IV sont consacrés à deux théorèmes importants qui s'enchaînent, celui de EPR (Einstein, Podolsky et Rosen) et celui de Bell, ce dernier donnant lieu à différentes variantes dont certaines sont décrites. Les Chapitres V et VI introduisent et discutent un certain nombre de théorèmes plus récents qui se situent dans la même ligne, ainsi que leurs conséquences concernant le statut du vecteur d'état. Le Chapitre VII aborde de façon plus générale les propriétés de l'intrication quantique, qui sont illustrées au Chapitre VIII par une discussion de quelques processus physiques qui la mettent en œuvre, comme cryptographie quantique ou téléportation. Les propriétés de la mesure quantique sont discutées au Chapitre IX, en particulier les notions de mesure faible et de mesure continue. Quelques expériences sont décrites au Chapitre X ; parmi la multitude de celles qui illustrent la mécanique quantique, elles ont été choisies parce qu'elles permettent de voir "en temps réel" les effets de la réduction du vecteur d'état dans un processus de mesure quantique. Enfin le Chapitre XI, le plus important en nombre de pages, discute les différentes interprétations de la mécanique quantique. Ce plan n'est pas un passage obligé pour le lecteur, les chapitres étant relativement indépendants.

Le but du présent ouvrage n'est certainement pas de mettre en avant telle ou telle interprétation, comme l'ont déjà fait de nombreux ouvrages et articles excellents (nous en citerons un bon nombre). Il est encore moins de proposer une nouvelle interprétation qui résoudrait miraculeusement tous les problèmes. Son objectif est plutôt de passer en revue ces diverses interprétations, afin de dégager un point de vue général sur la façon dont elles s'articulent, leurs différences ou leurs points communs, leur cohérence individuelle. Chacune de ces interprétations possède en effet sa logique propre, qu'il est important de respecter. Une erreur classique est de mélanger des composantes de différentes interprétations. Par exemple, la mécanique quantique "bohémienne" a parfois été critiquée à partir de constructions intellectuelles qui en retiennent certains éléments, mais pas tous, ou y insèrent des éléments qui lui sont étrangers ; on arrive alors à des contradictions, mais cela n'apporte guère d'élément logique pour ou contre la véritable approche bohémienne. Cette nécessité de cohérence logique est générale dans le contexte des fondements de la mécanique quantique. Il est arrivé que l'argument EPR ou le théorème de Bell soient mal compris, par exemple à cause d'une confusion entre hypothèses et conclusions. Nous nous efforcerons de signaler au passage quand de telles erreurs sont possibles, afin d'aider à les éviter. Précisons d'emblée qu'il n'est pas question de prétendre donner une présentation exhaustive de toutes les interprétations de la mécanique quantique ! Elles peuvent être combinées de tant de façons différentes qu'il est impossible de rendre compte de toutes les associations ou nuances possibles. Nous nous li-

miterons donc à une introduction des grandes familles d'interprétations. Une bibliographie relativement abondante est proposée au lecteur mais, même sur ce plan, il n'est pas possible d'atteindre une quelconque exhaustivité ; l'auteur a dû procéder à des choix, parfois quelque peu arbitraires, pour rester dans les limites d'un volume raisonnable.

Pour finir, le but principal de ce livre est de tenter de donner une vue honnête de la situation générale concernant une théorie qui est indiscutablement l'un des plus grands succès de l'esprit humain, la mécanique quantique, sans en occulter ni les difficultés ni les réussites. Nous l'avons dit, sa force prédictive extraordinaire ne cesse de triompher dans des domaines toujours nouveaux, parfois totalement imprévisibles, mais pourtant cet édifice intellectuel reste l'objet de discussions sur le plan des concepts fondamentaux, parfois même de controverses. Personne ne songerait à discuter de la même façon la mécanique rationnelle ou les équations de Maxwell. Peut-être faut-il y voir le présage que la mécanique quantique n'a pas encore atteint sa forme définitive et optimale ?

Remerciements

Nombreux sont ceux qui ont joué un rôle important dans la naissance de ce livre. En tout premier lieu, c'est Claude Cohen-Tannoudji à qui vont mes remerciements. Il m'a fait bénéficier, comme d'ailleurs tant d'autres, de sa façon unique et profonde d'aborder (et même de penser) la mécanique quantique ; plus de 40 années d'amitié (et de rédactions communes) m'ont permis de bénéficier d'innombrables discussions passionnantes et éclairantes pour moi. Alain Aspect est un autre ami avec qui, depuis le début de sa thèse au milieu des années 70, l'échange d'idées sur la mécanique quantique a été et continue à être riche et fructueux ; à l'époque, les fondements de la mécanique quantique n'avaient souvent pas très bonne presse parmi les physiciens "mainstream", et nous nous sommes abondamment appuyés l'un sur l'autre pour progresser dans un domaine qui nous passionnait tous deux, ainsi que Bernard d'Espagnat. Jean Dalibard et Philippe Grangier ont été d'autres interlocuteurs privilégiés, disponibles et toujours d'une grande précision intellectuelle, que je tiens également à remercier chaleureusement. Le titre "Comprenons-nous vraiment la mécanique quantique ?" m'a été suggéré il y a bien longtemps par Pierre Fayet, à l'occasion de deux séminaires qu'il m'avait demandé de présenter ; je l'ai gardé depuis. A la source de ce livre se trouve une première version d'un texte publié en 2001, sous la forme d'un article avec le même titre dans l'*American Journal of Physics*, et initié lors d'un séjour à l'Institut de physique théorique de l'Université de Californie à Santa Barbara. Lors d'une session consacrée à la condensation de Bose-Einstein, j'ai eu la chance de pouvoir discuter de mécanique quantique avec son organisateur, Antony Leggett ; une autre chance favorisant les échanges a été de partager le bureau de Wojciech Zurek ! Un peu plus tard, un séjour à l'Institut Lorentz de Leyde m'a fait bénéficier de contacts stimulants et d'une relecture fort utile de Stig Stenholm. Quant à Abner Shimony, il m'a guidé de maints conseils utiles et encouragé dans la rédaction de cette première version.

Parmi ceux qui ont beaucoup aidé pour la version actuelle du texte, Michel Le Bellac a joué un rôle important, en effectuant une lecture détaillée de l'ensemble et en donnant des conseils avisés, sources de nombreuses améliorations. Michèle Leduc et lui ont participé à la mise au point de ce livre, en particulier en trouvant un excellent rapporteur anonyme qui, lui aussi, a fait des remarques fort pertinentes ; que tous trois en soient vivement remerciés. Parmi les autres amis qui ont également joué un rôle essentiel figurent Roger Balian, Serge Reynaud, William Mullin, Olivier Darrigol et Catherine Chevalley ; je les remercie tous vivement pour de nombreux avis scientifiques, conseils, précisions, etc., qui m'ont été précieux.

Pour le Chapitre XI qui décrit les diverses interprétations de la mécanique quantique, j'ai demandé à des spécialistes de chacune d'entre elles de bien

vouloir vérifier leur accord avec mon texte. Je remercie Sheldon Goldstein et Ward Struyve pour une relecture de la mécanique quantique de Bohm, Philip Pearle et Giancarlo Ghirardi pour leurs conseils sur la dynamique de Schrödinger modifiée, Robert Griffiths et Roland Omnès pour leurs commentaires sur l’interprétation des histoires, Bernard d’Espagnat pour ses précieuses remarques sur l’interprétation du réel voilé, Richard Healey pour son aide concernant l’interprétation modale, Carlo Rovelli pour ses avis et suggestions concernant l’interprétation relationnelle, Alexei Grinbaum pour bien des clarifications concernant la logique quantique et les théories formelles, et Thibault Damour pour sa relecture fort utile de la présentation de l’interprétation d’Everett. Comme le veut la tradition ajoutons que, si toutefois des erreurs avaient subsisté dans le texte, la responsabilité en serait celle de l’auteur ! Enfin, sans le cadre exceptionnel de travail qu’offre le LKB, sans les échanges constants avec ses membres, et sans l’environnement intellectuel de l’ENS, rien n’aurait été possible.

Deuxième édition

Cette seconde édition a bénéficié de nombreuses discussions avec des collègues, de la participation à des séminaires, etc. dans de nombreux laboratoires ; tout ceci a stimulé des améliorations et des additions à la première édition. Je suis particulièrement reconnaissant à Philip Stamp, qui a lu en détail la première édition et proposé une excellente liste de suggestions. Mon vieil ami Bill Mullin a également été d’une grande aide par ses remarques judicieuses sur certains chapitres, alors que lui était occupé à la rédaction de son propre ouvrage *Quantum weirdness* (Oxford University Press, 2017). J’ai grandement bénéficié de la compréhension profonde de Johannes Kofler concernant le domaine de validité des diverses inégalités de Bell et leurs possibles “échappatoires” lors de l’interprétation des expériences. Philippe Grangier, Patrick Peter, Jean Bricmont, Ward Struyve, Roger Balian, Julia Kempe et Michel Le Bellac ont eux aussi fourni d’excellentes suggestions et remarques qui ont permis d’améliorer le texte.

Enfin, une caractéristique merveilleuse d’Internet est de permettre à l’auteur d’un livre de recevoir par courriel les réactions de nombreux lecteurs du monde entier. C’est particulièrement le cas sur un sujet comme la mécanique quantique, et c’est précieux. Parmi eux, je voudrais remercier particulièrement Paul Slater qui, depuis la Californie, m’a envoyé une liste particulièrement utile, mais hélas je ne puis pas nommer ici la longue liste de tous les collègues qui m’ont ainsi rendu service.

Chapitre I

Perspective historique

Les pères fondateurs de la mécanique quantique avaient déjà perçu l'essence des difficultés de la mécanique quantique. De nos jours, presque un siècle plus tard, les discussions sont toujours bien vivantes ; s'il est vrai que de nouveaux aspects très intéressants ont émergé, il faut reconnaître qu'au niveau fondamental beaucoup de questions n'ont pas tellement changé. Ce qui est plus récent, cependant, est un changement général d'attitude parmi les physiciens : jusqu'en 1970 ou 1980, la plupart des physiciens pensaient que l'essentiel des questions fondamentales avait définitivement été réglé et que "Bohr avait raison ; il a clairement montré que ses opposants avaient tort". C'était probablement une conséquence du fameux débat entre Bohr, Einstein, Schrödinger, Heisenberg, Pauli, de Broglie et d'autres (en particulier au cours des rencontres Solvay [1–3]), où Bohr avait remarquablement su déjouer toutes les attaques d'Einstein avec succès, malgré leur extrême habileté. Sans nécessairement connaître le détail des arguments, la majorité des physiciens pensaient donc que l'interprétation standard "de Copenhague" avait émergé sans conteste comme la seule attitude raisonnable pour les bons physiciens, c'est-à-dire ceux soucieux de ne pas s'accrocher inutilement aux idées du passé. Cette interprétation se fonde sur l'idée que la physique moderne doit comprendre le non-déterminisme comme un ingrédient essentiel : il est fondamentalement impossible de prédire ce qui se produit au niveau d'événements microscopiques individuels ; il est également impossible d'aller au-delà du formalisme de la fonction d'onde (ou de sa généralisation, le vecteur d'état $|\Psi\rangle$) afin de le compléter. Pour certains physiciens, l'interprétation de Copenhague comprend aussi la difficile notion de "complémentarité"... même s'il est vrai qu'en fonction du contexte la complémentarité recouvre bien des notions différentes qui ont été interprétées de façons variées ! Sans aller dans le détail, il reste vrai que l'impression de la grande majorité était que Bohr avait gagné le débat contre Einstein, de sorte que discuter encore les fondations de la mécanique quantique après ces géants était un peu prétentieux, passéiste,