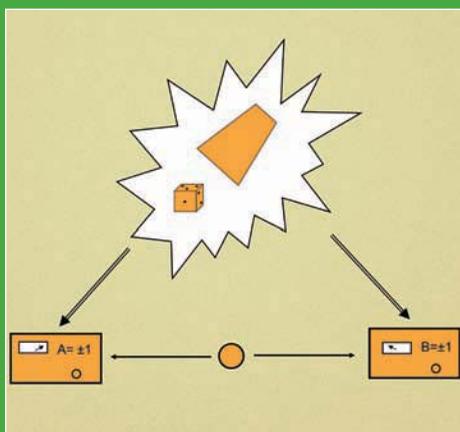


COMPRENONS-NOUS VRAIMENT  
**LA MÉCANIQUE  
QUANTIQUE ?**



FRANCK LALOË

PRÉFACE DE CLAUDE COHEN-TANNOUJJI

Franck Laloë

Comprenons-nous vraiment  
la mécanique quantique ?

S A V O I R S    A C T U E L S

---

EDP Sciences/CNRS ÉDITIONS

*Illustration de couverture* : La figure de couverture symbolise un processus de mesure quantique non-local tel qu'il est décrit dans le point de vue standard de la théorie (interprétation de Copenhague). Le dé symbolise le caractère fondamentalement aléatoire du processus, les deux flèches le fait que ce tirage de dé influence simultanément des résultats de mesure obtenus en des points arbitrairement éloignés de l'espace, et les rectangles avec des cadrans en bas de la figure les appareils de mesure utilisés.

Imprimé en France.

© 2011, **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 978-2-7598-0621-8

**ISBN** CNRS ÉDITIONS 978-2-271-07232-0

# Table des matières

<b>Préface</b>	<b>xi</b>
<b>Avant-propos</b>	<b>xiii</b>
<b>0 Formalisme de base de la mécanique quantique standard</b>	<b>1</b>
0.A Système physique général . . . . .	2
0.A.1 Espace des états quantiques . . . . .	2
0.A.2 Opérateurs, hermiticité . . . . .	3
0.A.3 Probabilités . . . . .	5
0.A.4 Évolution dans le temps . . . . .	6
0.A.5 Opérateur densité . . . . .	7
0.A.5.a Définition . . . . .	7
0.A.5.b États purs et mélanges statistiques . . . . .	8
0.A.5.c Évolution temporelle . . . . .	9
0.A.5.d Entropie statistique . . . . .	9
0.A.6 Un cas simple : le spin $1/2$ . . . . .	10
0.B Réunion de plusieurs systèmes physiques . . . . .	11
0.B.1 Produit tensoriel . . . . .	11
0.B.2 Ensemble de spins $1/2$ . . . . .	13
0.B.3 Traces partielles . . . . .	14
0.C Particules dans un potentiel . . . . .	15
0.C.1 Une seule particule . . . . .	15
0.C.1.a Fonction d'onde . . . . .	16
0.C.1.b Équation de Schrödinger, courant de probabilité . . . . .	17
0.C.2 Spin, expérience de Stern et Gerlach . . . . .	17
0.C.2.a Introduction du spin . . . . .	17
0.C.2.b Espace des états . . . . .	19
0.C.3 Plusieurs particules . . . . .	20
<b>1 Perspective historique</b>	<b>23</b>
1.A Trois périodes . . . . .	24
1.A.1 Préhistoire . . . . .	25

1.A.2	La période ondulatoire . . . . .	26
1.A.3	Émergence de l'interprétation de Copenhague . . . . .	27
1.B	Le vecteur d'état . . . . .	29
1.B.1	Définition, équation de Schrödinger, règle de Born . . . . .	30
1.B.1.a	Définition . . . . .	30
1.B.1.b	Équation de Schrödinger . . . . .	31
1.B.1.c	Règle de Born, probabilités . . . . .	31
1.B.2	Processus de mesure . . . . .	32
1.B.2.a	Von Neumann, la réduction . . . . .	32
1.B.2.b	Bohr . . . . .	34
1.B.3	Statut . . . . .	35
1.B.3.a	Deux extrêmes . . . . .	35
1.B.3.b	Le point de vue (orthodoxe) de Copenhague, interprétation standard . . . . .	37
<b>2</b>	<b>Situation actuelle, des difficultés conceptuelles subsistent</b>	<b>41</b>
2.A	La chaîne (ou régression) sans fin de Von Neumann . . . . .	43
2.B	Le chat de Schrödinger . . . . .	46
2.B.1	L'argument . . . . .	46
2.B.2	Malentendus . . . . .	49
2.B.3	Les chats nouvelle vague . . . . .	50
2.C	L'ami de Wigner . . . . .	50
2.D	Mesures négatives et « sans interaction » . . . . .	52
2.E	Une grande variété de points de vue . . . . .	56
2.F	Des arguments peu convaincants . . . . .	61
<b>3</b>	<b>Le théorème d'Einstein, Podolsky et Rosen</b>	<b>63</b>
3.A	Un théorème . . . . .	64
3.B	Des pois, des gousses, et de leurs gènes . . . . .	66
3.B.1	Une expérience simple ; pas de conclusion à ce stade . . . . .	66
3.B.2	Corrélations ; les causes dévoilées . . . . .	67
3.C	Transposition à la physique . . . . .	70
3.C.1	L'argument EPR pour deux particules microscopiques corrélées . . . . .	70
3.C.2	La réponse de Bohr . . . . .	73
3.C.3	Localité ; séparabilité . . . . .	76
3.C.4	L'argument EPR pour des systèmes macroscopiques . . . . .	78
<b>4</b>	<b>Le théorème de Bell</b>	<b>81</b>
4.A	Inégalités de Bell . . . . .	82
4.A.1	Mécanique quantique : deux spins dans un état singulet . . . . .	82
4.A.2	Réalisme local : démonstration de l'inégalité BCHSH . . . . .	83
4.A.3	Contradiction entre l'inégalité et la mécanique quantique . . . . .	84

4.A.4	Contenu logique . . . . .	88
4.A.5	Contradiction avec les expériences . . . . .	89
4.B	Diverses formes du théorème . . . . .	91
4.B.1	Autres inégalités . . . . .	91
4.B.1.a	Inégalités de Wigner . . . . .	91
4.B.1.b	Inégalité de Mermin . . . . .	93
4.B.2	Autres hypothèses de départ . . . . .	95
4.B.3	Généralisations du théorème ; rôle de la localité . . . . .	96
4.B.4	Statut du théorème ; tentatives de le contourner . . . . .	99
4.C	Théorème de Cirel'son . . . . .	100
4.C.1	Mesures sur deux systèmes à deux niveaux . . . . .	100
4.C.2	Violation quantique maximale . . . . .	101
4.D	Non-transmission de signaux instantanés . . . . .	103
4.D.1	Conditions NS de non-transmission instantanée de signaux . . . . .	104
4.D.2	Boîtes logiques . . . . .	105
4.D.2.a	Boîtes déterministes . . . . .	105
4.D.2.b	Boîtes stochastiques . . . . .	106
4.D.3	Boîte de Popescu-Rohrlich et corrélations « superquantiques » . . . . .	108
4.D.4	Comment caractériser la théorie quantique ? . . . . .	110
4.E	Impact du théorème ; où en sommes-nous ? . . . . .	112
4.E.1	Échappatoires, conspirations . . . . .	113
4.E.1.a	Échappatoire de l'échantillon biaisé (« efficiency loophole ») . . . . .	114
4.E.1.b	Conspiration des polariseurs/analyseurs (communication loophole) . . . . .	118
4.E.1.c	Fatalisme contre libre arbitre . . . . .	119
4.E.1.d	Crédibilité des échappatoires . . . . .	121
4.E.2	La mécanique quantique est-elle non-locale ? Contrafactualité . . . . .	121
<b>5</b>	<b>Autres théorèmes</b> . . . . .	<b>125</b>
5.A	Contradictions GHZ . . . . .	125
5.A.1	Démonstration . . . . .	125
5.A.2	Discussion . . . . .	128
5.B	Généralisations de GHZ . . . . .	130
5.C	Inégalité de Cabello . . . . .	133
5.C.1	Réalisme local . . . . .	134
5.C.2	Contradiction avec la mécanique quantique . . . . .	135
5.D	Impossibilités de Hardy . . . . .	136
5.E	Théorème de Bell-Kochen-Specker ; contextualité . . . . .	139
5.E.1	Particule de spin 1 . . . . .	139

5.E.2	Deux particules de spin 1/2, règle du produit . . . . .	141
5.E.3	Contextualité et réalisme local . . . . .	142
<b>6</b>	<b>Intrication quantique</b>	<b>145</b>
6.A	Une notion purement quantique . . . . .	146
6.A.1	La partie et le tout . . . . .	147
6.A.2	Deux origines possibles des corrélations . . . . .	149
6.B	Caractérisations de l'intrication . . . . .	150
6.B.1	Décomposition de Schmidt d'un état pur . . . . .	150
6.B.2	Entropies statistiques . . . . .	153
6.B.3	Monogamie . . . . .	154
6.B.4	Critère de séparabilité pour l'opérateur densité . . . . .	155
6.C	Création et perte de l'intrication . . . . .	156
6.C.1	Intrication par interactions locales . . . . .	157
6.C.2	Échange d'intrication . . . . .	158
6.C.3	Décohérence . . . . .	160
6.C.3.a	Mécanisme . . . . .	160
6.C.3.b	Retour sur le chat de Schrödinger . . . . .	162
6.C.4	Purification, distillation . . . . .	165
6.C.5	Intrication et processus de mesure quantique . . . . .	166
6.C.5.a	Modèle de Von Neumann . . . . .	166
6.C.5.b	Ambiguïté dans l'intrication . . . . .	167
6.C.5.c	Effet de l'environnement ; états pointeurs . . . . .	168
6.C.5.d	Le paradoxe de Hund . . . . .	170
6.D	Cryptographie quantique, téléportation . . . . .	171
6.D.1	Théorèmes : non-clonage et non-détermination d'un état unique . . . . .	172
6.D.1.a	Non-clonage . . . . .	172
6.D.1.b	Non-détermination avec une seule réalisation . . . . .	174
6.D.2	Distribution de clés cryptographiques . . . . .	175
6.D.2.a	Idée générale . . . . .	175
6.D.2.b	Exemples de protocoles d'échange de clés . . . . .	176
6.D.3	Téléportation d'un état quantique . . . . .	182
6.E	Calcul quantique et information . . . . .	184
6.E.1	Principe général . . . . .	185
6.E.2	Portes quantiques et algorithmes . . . . .	185
6.E.3	Codes de correction quantique des erreurs . . . . .	187
<b>7</b>	<b>Expériences : la réduction quantique vue en temps réel</b>	<b>189</b>
7.A	Ion unique dans un piège . . . . .	190
7.B	Électron unique piégé . . . . .	195
7.C	Mesure du nombre de photons dans une cavité . . . . .	195
7.D	Phase spontanée de condensats de Bose-Einstein . . . . .	199
7.D.1	Interférences dans une région de l'espace . . . . .	200

7.D.2	Une variable supplémentaire ? . . . . .	201
7.D.3	Non-localité de la phase . . . . .	203
<b>8</b>	<b>Diverses interprétations</b>	<b>207</b>
8.A	Pragmatisme dans les laboratoires . . . . .	208
8.A.1	Interrompt « à la main » la chaîne de Von Neumann . . . . .	208
8.A.1.a	Décohérence macroscopique . . . . .	209
8.A.1.b	Effet de la prise de conscience . . . . .	210
8.A.2	Interprétation des corrélations . . . . .	210
8.A.2.a	Calcul de la probabilité associée à une séquence de mesures . . . . .	211
8.A.2.b	La réduction du vecteur d'état devient inutile . . . . .	213
8.A.2.c	Discussion . . . . .	214
8.A.3	Mettre l'accent sur l'information . . . . .	215
8.B	Interprétation statistique . . . . .	217
8.C	Interprétation relationnelle, vecteur d'état relatif . . . . .	218
8.C.1	Interprétation relationnelle . . . . .	218
8.C.2	Point de vue informationnel pur . . . . .	220
8.D	Logique quantique ; approches axiomatiques . . . . .	221
8.E	Le réel voilé . . . . .	223
8.F	Variables supplémentaires (« cachées ») . . . . .	223
8.F.1	Théorie de De Broglie-Bohm . . . . .	225
8.F.1.a	Cadre général . . . . .	225
8.F.1.b	Trajectoires bohmiennes . . . . .	228
8.F.1.c	Mesure quantique en théorie de Bohm . . . . .	234
8.F.1.d	Théorie des champs . . . . .	236
8.F.1.e	Discussion . . . . .	236
8.F.2	Mécanique de Nelson . . . . .	243
8.G	Interprétation modale . . . . .	244
8.H	Dynamique de Schrödinger modifiée . . . . .	246
8.H.1	Évolution des idées . . . . .	248
8.H.1.a	Premiers travaux . . . . .	248
8.H.1.b	Localisation spontanée par sauts (« hits ») . . . . .	249
8.H.1.c	Localisation spontanée continue . . . . .	252
8.H.1.d	Liens avec la gravité . . . . .	256
8.H.1.e	Liens avec la relativité . . . . .	256
8.H.1.f	Liens avec l'expérience . . . . .	257
8.H.2	Description de la réalité dans le cadre d'une théorie à dynamique modifiée . . . . .	258
8.H.3	Systèmes quantiques ouverts en mécanique quantique standard . . . . .	262
8.I	Interprétation transactionnelle . . . . .	262
8.J	Histoires cohérentes . . . . .	263
8.J.1	Histoires, familles d'histoires . . . . .	264

8.J.2	Familles cohérentes . . . . .	265
8.J.3	Évolution quantique d'un système isolé . . . . .	267
8.J.4	Incompatibilité des familles différentes . . . . .	269
	8.J.4.a Comparaison avec d'autres interprétations . . . . .	270
8.J.5	Une profusion d'histoires ; discussion . . . . .	273
8.K	Interprétation d'Everett . . . . .	275
	8.K.1 Aucune limite pour l'équation de Schrödinger . . . . .	275
	8.K.2 Développement logique de l'interprétation . . . . .	277
	8.K.3 Discussion . . . . .	281
<b>Conclusion</b>		<b>283</b>
<b>9 Appendices</b>		<b>287</b>
9.A	Appendice A : Contenu « mental » du vecteur d'état . . . . .	287
9.B	Appendice B : Inégalités de Bell et théories locales non-déterministes . . . . .	289
9.C	Appendice C : Une tentative pour construire une théorie quantique « séparable » (non-déterministe mais locale) . . . . .	290
9.D	Appendice D : Probabilité maximale pour un état particulier . . . . .	293
9.E	Appendice E : Influence d'une sélection des paires observées . . . . .	293
	9.E.1 Sélection indépendante des paramètres de mesure . . . . .	294
	9.E.2 Sélection dépendante des paramètres de mesure . . . . .	296
9.F	Appendice F : Impossibilité d'une transmission superluminale de messages . . . . .	297
	9.F.1 Introduction . . . . .	297
	9.F.2 Un premier schéma . . . . .	299
	9.F.3 Généralisation . . . . .	300
9.G	Appendice G : Mesures quantiques à des instants différents . . . . .	301
	9.G.1 Formule de Wigner . . . . .	302
	9.G.2 Règle de Born généralisée . . . . .	304
9.H	Appendice H : Manipulation des variables supplémentaires . . . . .	306
9.I	Appendice I : Corrélations en théorie de Bohm . . . . .	308
	9.I.1 Fonction de corrélation temporelle . . . . .	308
	9.I.2 Corrélations de deux particules . . . . .	310
	9.I.2.a Expérience EPRB . . . . .	310
	9.I.2.b Interférences à deux photons . . . . .	311
9.J	Appendice J : Modèles de réduction spontanée du vecteur d'état . . . . .	312
	9.J.1 Un seul opérateur . . . . .	312
	9.J.1.a Équation d'évolution . . . . .	312
	9.J.1.b Solution de l'équation . . . . .	313
	9.J.1.c La règle de probabilité CSL . . . . .	313
	9.J.2 Plusieurs opérateurs . . . . .	314
	9.J.2.a Équation d'évolution . . . . .	315

9.J.2.b	Émergence spontanée d'une localisation du vecteur d'état . . . . .	316
9.K	Appendice K : Familles d'histoires cohérentes . . . . .	316
<b>Bibliographie</b>		<b>319</b>
<b>Table des figures</b>		<b>347</b>
<b>Index</b>		<b>349</b>

**This page intentionally left blank**

# 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

par exemple 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, c'est ainsi devenu 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<sup>e</sup> 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 n'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 électromagnétisme 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 par exemple 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 1, 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 « zéro » est inséré en début 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 zéro afin de préciser tel ou tel point particulier.

Les chapitres 1 et 2 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 3, 4 et 5 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. Le chapitre 6 aborde de façon plus générale les propriétés de l'intrication quantique, et les illustre par une discussion de quelques processus physiques qui la mettent en œuvre, comme cryptographie quantique ou téléportation. Quelques expériences sont décrites au chapitre 7 ; 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 8, 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 serait propre à l'auteur. 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. 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 limiterons 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. À 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 dernier chapitre 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 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 ceux 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, et Thibault Damour pour sa relecture 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.

# Chapitre 0

## Formalisme de base de la mécanique quantique standard

La numérotation particulière de ce chapitre zéro est destinée à encourager le lecteur à aller directement au chapitre un, qui constitue le véritable début de cet ouvrage. Le chapitre zéro rappelle et résume le formalisme mathématique de base de la mécanique quantique, avec une courte bibliographie placée directement à la fin. C'est donc plutôt un complément destiné aux lecteurs pour lesquels ce qui sera rappelé au passage au cours de l'ouvrage ne serait pas suffisant ; chacun pourra donc, s'il désire, y revenir en cours de lecture, pour en savoir un peu plus sur les outils mathématiques utilisés en choisissant le paragraphe pertinent du chapitre zéro. Un certain nombre de résultats sont énoncés sans que les démonstrations soient explicitées ; on les trouvera par exemple dans les chapitres II et IV de la Ref. [0 – 1]. Il existe de nombreux ouvrages de mécanique quantique où son formalisme général est présenté de façon plus complète, comme dans le chapitre VII de la Ref. [0 – 2], le chapitre 3 de la Ref. [0 – 3], ou encore le chapitre 2 de la Ref. [0 – 4].

Nous commençons par résumer le cadre général et le formalisme quantique s'appliquant à un système physique quelconque (§ 0.A), en utilisant la notation de Dirac ; nous étudions ensuite comment ce formalisme traite la réunion de plusieurs systèmes physiques (§ 0.B) ; enfin nous traitons quelques cas particuliers simples (§ 0.C), comme celui d'une particule unique dans un potentiel extérieur, avec ou sans spin ; le lecteur peu enclin à une présentation générale et préférant raisonner en termes de fonctions d'onde pourra commencer directement par ce paragraphe s'il le désire.

**O**

Observateur, 42, 57–59  
 Omnès, 263  
 Onde vide, 232  
 Ondes vides, 235  
 Opérateur  
   densité, 7  
   hermitique, 3  
 Origine des corrélations, 149  
 Ouverts (systèmes quantiques), 262

**P**

Paradoxe de Hund, 170  
 Parisi-Wu, 244  
 Partie et le tout (la), 147  
 Pearle, 50, 76, 115, 248, 249, 252, 254  
 Penrose, 256  
 Peres, 38, 86, 141, 156, 214, 216, 220, 282, 288  
 Phase spontanée des condensats, 199  
 Photons dans une cavité, 195  
 Planck, 25  
 Popescu-Rohrlich, 108, 110  
 Porte de Hadamard, 186  
 Portes quantiques, 185  
 Potentialités, 57  
 Pouvoir rotatoire, 170  
 Pragmatisme dans les labos, 208  
 Probabilités, 5, 31, 278  
 Processus de Markov, 254  
 Produit tensoriel, 11  
 Projecteur, 6  
 Protocole  
   BB, 84, 176  
   EPR, 179  
 Protocoles cryptographiques, 176  
 Purification, 165

**Q**

QND, 33, 197  
 Quantification stochastique, 244  
 Quantum non-demolition, 33, 197  
 Qubit, 185

**R**

Réalisme local, 83, 126, 134

**Réduction**

du vecteur d'état, 32, 41, 51, 112, 189

spontanée, 312

Réel voilé, 223

**Règle**

de Born, 5, 31, 304

de Born généralisée, 304

de non-croisement, 231

des probabilités de Born, 5, 31

du produit, 129, 141

Régression infinie Von Neumann, 43

Reichenbach, 222

Relationnelle (interprétation), 218

Réunion de plusieurs systèmes, 11

Rimini, 249, 254

Rosenfeld, 59

Rovelli, 218

Rydberg (atomes de), 196

**S**

Saunders, 279

Schmidt, 150

Schrödinger, 46, 50, 58, 146, 193

  équation, 6, 17, 31

Scully, 287

Sélection des paires, 293

Séparabilité, xiv, 76, 155, 290

Shimony, 59, 90

Shor, 186

Signaux instantanés, 103

Singulet, 13, 82

Specker, 139

Spin 1, 17, 139

Spin 1/2, 10

Spineur, 20

Stapp, 59

Statistique (interprétation), 217

Statut du vecteur d'état, xiv, 35

Stern et Gerlach, 17, 44, 233

Subadditivité de l'entropie, 153

Sujet et objet, 58

Superluminal, 103, 297

Superquantique, 108

Systèmes quantiques ouverts, 262

**T**

Téléportation, 171, 182

- Théorème  
  de Bell, 81  
  de Bell-Kochen-Specker, 139  
Théorie de De Broglie-Bohm, 225  
Trace  
  d'un opérateur, 5  
  partielle, 14, 160  
Trajectoires bohmiennes, 228, 236  
Transactionnelle (interprétation), 262  
Transmission superluminale, 103, 297  
Tumulka, 257
- U**
- Unicité du monde macroscopique, 47,  
  259, 275
- V**
- Van Fraassen, 244  
Van Kampen, 60, 287  
Variables  
  cachées, 223  
  supplémentaires, 201, 223, 306  
Vecteur d'état, 2, 29, 35, 61  
Violation maximale, 101  
Vitesse quantique (terme), 225  
Voilé (réel), 223  
Von Neumann, 9, 32, 43, 166, 222  
Von Weizsäcker, 61, 222
- W**
- W state, 160  
Wallace, 279  
Walther, 287  
Weber, 249  
Weinberg, 258  
Werner states, 98  
Wiener et Siegel, 248  
Wigner, 50, 87, 91, 210, 212, 233, 302
- Z**
- Zeh, 168, 169  
Zeilinger, 125  
Zénon (effet), 171  
Zurek, 168, 169, 279  
Zwicky, 222