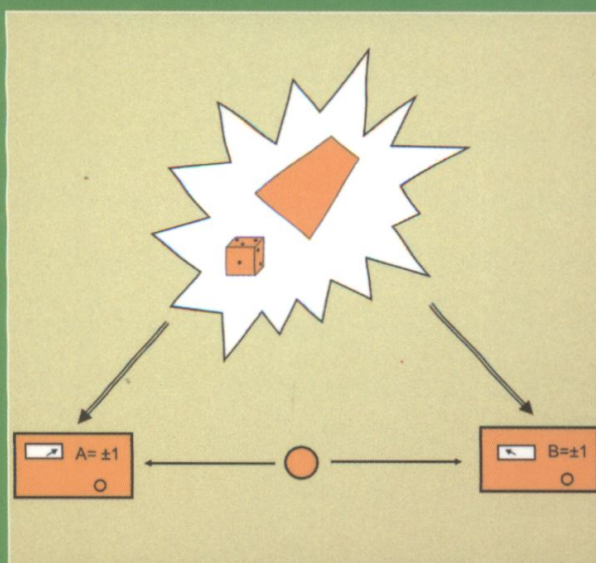


COMPRENONS-NOUS VRAIMENT
**LA MÉCANIQUE
QUANTIQUE ?**



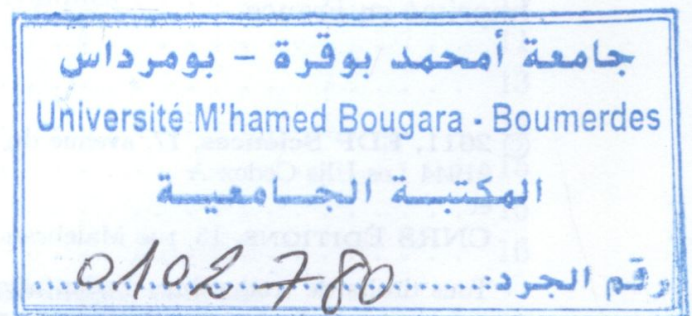
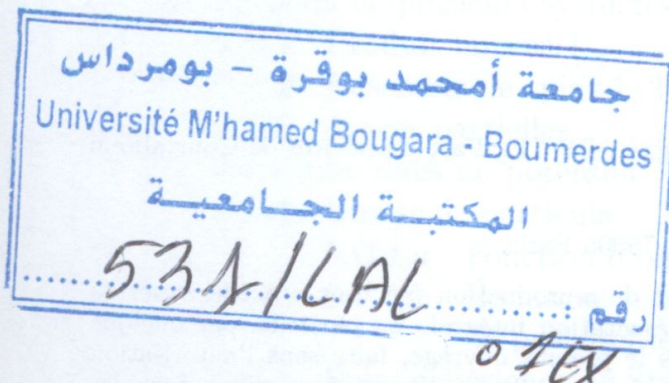
FRANCK LALOË

PRÉFACE DE CLAUDE COHEN-TANNOUDJI

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

Table des matières

Préface	xii
Avant-propos	xiii
0 Formalisme de base de la mécanique quantique standard	1
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
1 Perspective historique	23
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
2	Situation actuelle, des difficultés conceptuelles subsistent	41
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
3	Le théorème d'Einstein, Podolsky et Rosen	63
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
4	Le théorème de Bell	81
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
5	Autres théorèmes	125
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
6	Intrication quantique	145
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
7	Expériences : la réduction quantique vue en temps réel	189
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
8	Diverses interprétations	207
8.A	Pragmatisme dans les laboratoires	208
8.A.1	Interrompre « 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 bohmienne	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
Conclusion		283
9 Appendices		287
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
Bibliographie	319
Table des figures	347
Index	349