

Table des matières

Préface	III
Avant-propos	XI
Chapitre 1 Introduction au monde quantique	1
1. Place de la physique quantique dans l'ensemble des théories scientifiques	1
2. La physique quantique aujourd'hui, le « nanomonde » !	4
2.1 Pourquoi étudier la mécanique quantique aujourd'hui ?	4
2.2 Ordres de grandeur classiques vs. quantiques : quand est-il vraiment nécessaire d'utiliser la physique quantique ?	5
3. Grands principes et notions clefs de la physique quantique	6
3.1 Dualité onde-corpuscule	6
3.2 Quantification des grandeurs physiques	6
3.3 Superposition et intrication d'états quantiques	7
3.4 Mesure quantique : probabiliste et perturbante	7
3.5 Bosons-fermions, principe de Pauli	7
L'essentiel	8
Chapitre 2 Dualité onde-corpuscule	9
1. Aspects corpusculaires de la lumière, photons	9
1.1 Effet photoélectrique	9
1.2 Rayonnement de corps noir	11
1.3 Énergie et quantité de mouvement du photon, effet de recul et pression de radiation	15
1.4 Probabilités (temporelle et spatiale) d'impact de photons	15
2. Aspects ondulatoires de la matière, onde de de Broglie	18
2.1 Diffraction, interférences, hologrammes... d'ondes de matière	19
2.2 Relation de de Broglie et critère classique/quantique	20
2.3 Résolution « qualitative » d'un problème avec λ_{dB} : boîtes quantiques	23
3. Lien entre interférences lumineuses et photons	25
3.1 Probabilité de traversée d'une lame semi-réfléchissante	25
3.2 Quelques rappels sur les interféromètres	26
3.3 Exemple : signal de sortie d'un interféromètre de Mach-Zehnder	26
3.4 Interférences photon par photon	28
L'essentiel	31

Entraînez-vous	32
Solutions	34
Chapitre 3 Quantification(s) et notion d'état quantique	39
1. Photons : systèmes à deux états de polarisation	40
1.1 Polarisation de la lumière	40
1.2 Polariseur et loi de Malus	43
1.3 Cas d'un photon unique : états quantiques de polarisation, notation de Dirac	46
2. Autre exemple de système à deux états : spin 1/2 – expérience de Stern et Gerlach	50
2.1 Description de l'expérience	50
2.2 Observations et conséquences importantes	52
3. Généralisation : système à plus de deux états, spectre atomique	56
3.1 Espace (de Hilbert) des états de dimension N	56
3.2 Spectres atomiques	57
3.3 Atome de Bohr, expériences de Franck et Hertz	59
L'essentiel	61
Entraînez-vous	62
Solutions	65
Chapitre 4 Mesure des grandeurs physiques	69
1. Mesure classique <i>versus</i> mesure quantique	70
2. Les trois étapes d'une mesure quantique standard	72
2.1 Cas de la polarisation des photons et du spin 1/2	72
2.2 Généralisation : théorie de la mesure en dimension N	73
2.3 Dénominations et remarques importantes	74
3. Opérateur hermitien et notion d'observable	75
3.1 Notion d'observable	75
3.2 Définition d'un opérateur	77
3.3 Représentation matricielle d'un opérateur dans une base	77
3.4 Valeurs propres et vecteurs propres d'un opérateur	79
3.5 Opérateurs hermitiens et observables	82
4. Observables compatibles et ECOC	83
4.1 Produit d'opérateurs, commutateurs	83
4.2 ECOC et observables compatibles	84
5. Valeur moyenne et dispersion des mesures, inégalités de Heisenberg-Ozawa	86

5.1 Valeur moyenne et dispersion des mesures	86
5.2 Inégalités de Heisenberg	89
6. POVM, mesure faible et décohérence	92
6.1 Projecteurs, POVM et mesure faible	92
6.2 Couplage avec l'extérieur, décohérence et réduction de la fonction d'onde	95
L'essentiel	98
Entraînez-vous	99
Solutions	102
Chapitre 5 Superposition et intrication d'états	106
1. Quelques notions générales de cryptographie	107
2. Informatique quantique – notion de qubit	108
3. Théorème de non-clonage quantique	109
4. Principe de la cryptographie quantique	110
4.1 Échange d'un seul qubit	111
4.2 Exemple d'échange d'un signal complet	113
5. Intrication quantique, paradoxe EPR et téléportation quantique	115
5.1 Intrication d'états quantiques	115
5.2 Paradoxe EPR, inégalités de Bell	117
5.3 Téléportation quantique	121
L'essentiel	124
Entraînez-vous	125
Solutions	127
Chapitre 6 Évolution	129
1. Notion de hamiltonien et équation de Schrödinger	129
1.1 Construction de l'opérateur hamiltonien \hat{H}	130
1.2 Résolution de l'équation de Schrödinger dans la base des vecteurs propres de \hat{H}	131
1.3 États stationnaires : cas des états d'énergie bien définie	133
2. Applications : oscillations de neutrino et horloges atomiques	133
2.1 Oscillation naturelle entre états qui ne sont pas états propres de \hat{H}	133
2.2 Oscillation des neutrinos solaires	135
2.3 Oscillations forcées : horloges atomiques et RMN	136
3. Théorème d'Ehrenfest, symétries et constantes du mouvement	138
3.1 Théorème d'Ehrenfest généralisé	139

3.2 Constantes du mouvement et symétries	141
L'essentiel	142
Entraînez-vous	143
Solutions	146
Chapitre 7 Fonction d'onde	150
1. De l'onde de de Broglie à la notion de fonction d'onde $\psi(x, t)$	151
2. Lien entre fonction d'onde et vecteur d'état : $\psi(x, t) \leftrightarrow \psi(t)\rangle$ et notion de représentation	153
3. Propriétés mathématiques et physiques d'une fonction d'onde	156
4. Relations de Heisenberg et étalement du paquet d'ondes	157
5. De la distribution de Dirac à la transformée de Fourier : bases continues	159
6. Densité de courant, chemins de Feynman et théorie de de Broglie-Bohm	163
6.1 Interprétation en termes de fluide de particules	163
6.2 Intégrale de chemin de Feynman	164
6.3 Théorie de de Broglie – Bohm	166
L'essentiel	168
Entraînez-vous	169
Solutions	171
Chapitre 8 Marches et puits de potentiels	173
1. Méthode générale de résolution de l'équation de Schrödinger pour un potentiel quelconque	174
2. Exemple 1 : particule libre : $V(x) = \text{constante} = 0$	175
3. Exemple 2 : puits carré infini	176
4. Exemple 3 : marche de potentiel, barrières et effet tunnel	181
4.1 Marche de potentiel : réflexion quantique et onde de matière évanescence	181
4.2 Barrière de potentiel et effet tunnel	183
5. Oscillateur harmonique et énergie du vide	186
5.1 Les deux méthodes de résolution de l'oscillateur harmonique	186
5.2 Applications : vibrations cristallines et moléculaires	190
5.3 Énergie du point zéro, effets Lamb et Casimir	192
L'essentiel	195

Entraînez-vous	196
Solutions	198
Chapitre 9 Spin, atomes et molécules	200
1. Moments cinétiques en physique quantique	200
1.1 Définitions, base standard	200
1.2 Moments cinétiques orbital et de spin	202
1.3 Composition de moments cinétiques	204
2. L'atome d'hydrogène	206
3. Particules indiscernables et principe de Pauli	210
4. Description approchée des atomes, structure en couches	212
4.1 Atomes et ions hydrogénoïdes	213
4.2 Atome d'hélium	214
4.3 Structure en couches des atomes et tableau de Mendeleïev	216
L'essentiel	218
Entraînez-vous	219
Solutions	221
Chapitre 10 Physique quantique et relativité	224
1. De la physique quantique relativiste au modèle « standard »	225
1.1 Physique quantique relativiste	225
1.2 Notions de théorie quantique des champs	227
1.3 Modèle standard et démarches d'unification des théories	229
2. Limitations actuelles et problèmes ouverts	232
L'essentiel	235
Constantes physiques et unités	236
Bibliographie	237
Lexique français-anglais	238
Index	240