

Introduction à la physique quantique

2^e édition

Charles Antoine

Maître de conférences à Sorbonne Université -
Campus Pierre et Marie Curie

DUNOD

Illustration de couverture : © Golden Wind, shutterstock.com

© Dunod, 2017, 2022
11, rue Paul Bert, 92240 Malakoff
www.dunod.com
ISBN 978-2-10-084198-1

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2° et 3° a), d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

Préface

La physique quantique est née il y a plus d'un siècle. Dès son avènement, elle a permis de rendre compte avec une extraordinaire précision d'un grand nombre de phénomènes concernant les particules, les atomes, les molécules, les solides et leur interaction avec le champ électromagnétique. Cette « première révolution quantique » a donné lieu à la publication il y a plusieurs décennies d'excellents manuels qui permettent de maîtriser le formalisme de la mécanique quantique et de l'utiliser pour décrire ces phénomènes.

Depuis la fin du XX^e siècle, on assiste à l'éclosion d'une « deuxième révolution quantique » qui s'appuie sur des propriétés extrêmement subtiles du monde quantique, telles que l'intrication, la non-localité... dont les applications se situent du côté du traitement de l'information comme la cryptographie ou le calcul quantiques. Il est naturel que ces progrès récents donnent lieu à la publication d'une nouvelle génération de livres d'enseignement qui intègrent ces avancées nouvelles.

Le livre de Charles Antoine, issu d'un enseignement au niveau Licence et Master à l'université Pierre et Marie Curie, se situe dans cette perspective. Il a pour ambition de présenter à un niveau relativement élémentaire les bases de la physique quantique avec un éclairage qui permet d'aborder et de comprendre ces nouveaux phénomènes quantiques. Il le fait de manière progressive et rigoureuse, dans un langage simple, avec une grande clarté d'exposé, et en s'appuyant sur des exemples récents. Il ne s'appesantit pas sur les parties plus « techniques », comme celles relatives à l'atome d'hydrogène ou à l'oscillateur harmonique..., et qui formaient la base de l'enseignement dans la première génération d'ouvrages. Dans un certain nombre de chapitres et à la fin du manuel, il présente de manière qualitative des éléments de la physique théorique qui sont ordinairement abordés à un niveau supérieur, comme l'« intégrale de chemin » ou le « modèle standard », ou même des sujets qui sont encore l'objet de débats, comme la théorie de de Broglie-Bohm ou les mesures faibles.

En résumé, un ouvrage moderne, concis et pédagogique qui permet une première approche de la physique quantique et de ses développements récents.

Claude Fabre

Professeur à l'université Pierre et Marie Curie – Sorbonne Université
Membre de l'Institut Universitaire de France

Table des matières

Préface	III
Avant-propos	XII
Chapitre 1 Introduction au monde quantique	1
1. Place de la physique quantique dans l'ensemble des théories scientifiques, atouts et limitations	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	6
3.4 Mesure quantique : probabiliste et perturbante	7
3.5 Bosons-fermions, spin et 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'un lame semi-réfléchissante	25
3.2 Quelques rappels sur les interféromètres	26
3.3 Exemple : signal de sortie d'un interféromètre de Mach-Zehnder	27
3.4 Interférences photon par photon	28

4. Qu'est-ce qu'un photon ?	31
4.1 Qu'est-ce que la lumière ?	31
4.2 Quantification de l'énergie : photon	31
4.3 Le photon en pratique	32
L'essentiel	34
Entraînez-vous	35
Solutions	39
Chapitre 3 Quantification(s) et notion d'état quantique	42
1. Photons : systèmes à deux états de polarisation	43
1.1 Polarisation de la lumière	43
1.2 Polariseur et loi de Malus	47
1.3 Cas d'un photon unique : états quantiques de polarisation, notation de Dirac	49
2. Autre exemple de système à deux états : spin 1/2 – expérience de Stern et Gerlach	54
2.1 Description de l'expérience	54
2.2 Observations et conséquences importantes	55
3. Généralisation : système à plus de deux états, spectre atomique	59
3.1 Espace des états de dimension N	59
3.2 Complément mathématique : kets, bras, espace de Hilbert	61
3.3 Spectres atomiques	65
3.4 Atome de Bohr, expériences de Franck et Hertz	67
L'essentiel	69
Entraînez-vous	70
Solutions	73
Chapitre 4 Mesure des grandeurs physiques	77
1. Mesure classique/mesure quantique	78
2. Les trois étapes d'une mesure quantique standard	80
2.1 Cas de la polarisation des photons et du spin 1/2	80
2.2 Généralisation : théorie de la mesure en dimension N	81
2.3 Dénominations et remarques importantes	82
3. Opérateur hermitien et notion d'observable	84
3.1 Notion d'observable	84
3.2 Définition d'un opérateur	85
3.3 Représentation matricielle d'un opérateur dans une base	86
3.4 Valeurs propres et vecteurs propres d'un opérateur	87

3.5 Opérateurs hermitiens et observables	91
3.6 Les trois étapes d'une mesure quantique standard : cas général	92
4. Observables compatibles et ECOC	94
4.1 Produit d'opérateurs, commutateurs	94
4.2 ECOC et observables compatibles	95
5. Valeur moyenne et dispersion des mesures, inégalités de Heisenberg-Ozawa	97
5.1 Valeur moyenne et dispersion des mesures	97
5.2 Inégalités de Heisenberg	100
6. POVM, mesure faible et décohérence	103
6.1 Projecteurs, POVM et mesure faible	104
6.2 Couplage avec l'extérieur, décohérence et réduction de la fonction d'onde	107
L'essentiel	110
Entraînez-vous	111
Solutions	114

Chapitre 5 Superposition et intrication d'états : information, téléportation et cryptographie quantiques	118
1. Quelques notions générales de cryptographie	119
2. Informatique quantique – notion de qubit	120
3. Théorème de non-clonage quantique	121
4. Principe de la cryptographie quantique	122
4.1 Échange d'un seul qubit	123
4.2 Exemple d'échange d'un signal complet	125
5. Intrication quantique, paradoxe EPR et téléportation quantique	128
5.1 Intrication d'états quantiques	128
5.2 Paradoxe EPR, inégalités de Bell	130
5.3 Téléportation quantique	134
6. Portes logiques, circuits et ordinateurs quantiques	136
6.1 Qubit et sphère de Bloch	136
6.2 Portes logiques quantiques	138
6.3 Circuits quantiques et lecture des qubits	139
L'essentiel	142
Entraînez-vous	143
Solutions	145

Chapitre 6	Évolution et symétries	147
1.	Notion de hamiltonien et équation de Schrödinger	147
1.1	Justification de l'équation de Schrödinger	149
1.2	Construction de l'opérateur hamiltonien $\hat{H}$	150
1.3	Résolution de l'équation de Schrödinger dans la base des vecteurs propres de $\hat{H}$	152
1.4	États stationnaires : cas des états d'énergie bien définie	153
2.	Applications : oscillations de neutrino et horloges atomiques	154
2.1	Oscillation naturelle entre états qui ne sont pas états propres de $\hat{H}$	154
2.2	Oscillation des neutrinos solaires	155
2.3	Oscillations forcées : horloges atomiques et RMN	156
3.	Théorème d'Ehrenfest, symétries et constantes du mouvement	159
3.1	Théorème d'Ehrenfest généralisé	159
3.2	Constantes du mouvement et symétries	161
	L'essentiel	164
	Entraînez-vous	165
	Solutions	168
Chapitre 7	Fonction d'onde	173
1.	De l'onde de de Broglie à la notion de fonction d'onde $\psi(x, t)$	174
2.	Lien entre fonction d'onde et vecteur d'état : $\psi(x, t) \longleftrightarrow \psi(t)\rangle$ et notion de représentation	176
3.	Propriétés mathématiques et physiques d'une fonction d'onde	179
4.	Relations de Heisenberg et étalement du paquet d'ondes	180
5.	De la distribution de Dirac à la transformée de Fourier : bases continues	182
6.	Densité de courant, chemins de Feynman et théorie de de Broglie-Bohm	186
6.1	Interprétation en termes de fluide de particules	186
6.2	Intégrale de chemin de Feynman	187
6.3	Théorie de de Broglie – Bohm	189
	L'essentiel	191
	Entraînez-vous	192
	Solutions	194

Chapitre 8	Marches et puits de potentiels : de l'effet tunnel au vide quantique	196
1.	Méthode générale de résolution de l'équation de Schrödinger pour un potentiel quelconque	197
2.	Quelques notions importantes et théorèmes généraux	198
2.1	États liés et états de diffusion	198
2.2	Recherche de solutions stationnaires réelles	199
2.3	Théorème de Sturm-Liouville	199
2.4	Potentiels symétriques et parité des fonctions d'onde	200
2.5	Courbure locale des fonctions d'onde solutions	201
2.6	Variation de la longueur d'onde locale avec $V(x)$	201
3.	Exemple 1 : particule libre : $V(x) = \text{constante} = 0$	202
4.	Exemple 2 : puits carré infini	202
5.	Exemple 3 : marche de potentiel, barrières et effet tunnel	208
5.1	Marche de potentiel : réflexion quantique et onde de matière évanescence	208
5.2	Barrière de potentiel et effet tunnel	210
6.	Oscillateur harmonique et énergie du vide	213
6.1	Les deux méthodes de résolution de l'oscillateur harmonique	213
6.2	Applications : vibrations cristallines et moléculaires	217
6.3	Énergie du point zéro, effets Lamb et Casimir	219
	L'essentiel	222
	Entraînez-vous	223
	Solutions	225
Chapitre 9	Spin, atomes et molécules	228
1.	Moments cinétiques en physique quantique	228
1.1	Définitions, base standard	228
1.2	Moments cinétiques orbital et de spin	230
1.3	Composition de moments cinétiques	232
2.	L'atome d'hydrogène	234
3.	Particules indiscernables et principe de Pauli	238
4.	Description approchée des atomes, structure en couches	240
4.1	Atomes et ions hydrogénoïdes	241
4.2	Atome d'hélium	242
4.3	Structure en couches des atomes et tableau de Mendeleïev	244

L'essentiel	246
Entraînez-vous	247
Solutions	249
Chapitre 10 Physique quantique et relativité : vertiges, promesses et problèmes	253
1. De la physique quantique relativiste au modèle « standard »	254
1.1 Physique quantique relativiste	254
1.2 Notions de théorie quantique des champs	256
1.3 Modèle standard et démarches d'unification des théories	258
2. Limitations actuelles et problèmes ouverts	261
L'essentiel	264
Constantes physiques et unités	265
Bibliographie	266
Lexique français-anglais	267
Index	269

Avant-propos

« Ne demande jamais ton chemin à celui qui sait. Tu pourrais ne pas te perdre. »

Simone Bernard-Dupré – *Mélopée africaine*

« Tout est quantique ! »

Vous, le livre ou la tablette que vous tenez dans vos mains... L'espace entre vos yeux et la phrase que vous lisez en ce moment... L'information qui y circule.

Matière, énergie, vide, information... tant de réalités diverses qui semblent s'exclure et qui, pourtant, trouvent un cadre naturel dans le langage de la physique quantique.

Considérée comme l'un des plus grands exploits scientifiques et intellectuels de l'histoire de l'humanité, la mécanique quantique est aujourd'hui omniprésente dans notre quotidien : cryptographie et information quantiques, diodes lasers et horloges atomiques, semi-conducteurs et liaisons chimiques, énergie nucléaire et scanners médicaux... Des quarks au Bigbang, presque tous les phénomènes physiques actuels peuvent être interprétés dans le cadre de cette théorie aidée de son alter-égo lumineux qu'est la théorie de la relativité d'Einstein.

Plusieurs grands principes sous-tendent cette théorie subtile dont l'étude est aujourd'hui indispensable pour tout étudiant en sciences et technologies. Ce livre de cours, issu d'un enseignement à l'université Pierre et Marie Curie pendant près de dix ans, expose de façon originale les grandes idées et notions clefs de la mécanique quantique (qu'est-ce que la dualité onde-corpuscule ? la quantification des grandeurs physiques ? l'intrication et la superposition d'états ? la différence entre mesures quantique et classique ? le spin ?...) et y développe de façon concise le formalisme et les principales méthodes qui en découlent.

Les récentes applications de la mécanique quantique sont illustrées par de nombreux exemples tirés de domaines scientifiques multiples, dont l'astrophysique et les nanosciences et nanotechnologies actuelles, et de nombreux exercices corrigés de difficulté croissante permettent d'affiner et compléter le cours.

Contrairement à une idée reçue, les bases de la physique quantique ne sont pas difficiles à maîtriser. Les outils mathématiques utilisés sont simples (nombres complexes, produit scalaire, équation différentielle très simple, notions basiques sur les probabilités et les matrices) et faciles à (ré-)apprendre, même pour un novice. Les systèmes physiques pris comme exemples sont également très simples généralement : il s'agit typiquement d'« une » particule (atome, électron, photon...), sur laquelle on fait une mesure idéale ou dont on étudie l'évolution dans un potentiel très simple.

En fait, les trois écueils principaux sont liés, d'une part, à la notation, qui est inhabituelle (la fameuse « notation de Dirac » des vecteurs d'état), d'autre part aux règles (concernant l'état du système, la mesure ou l'évolution par exemple) qui sont différentes de celles rencontrées habituellement en physique classique, et enfin aux phénomènes quantiques eux-mêmes, qui peuvent choquer notre intuition (classique) et nous conduire à ne pas savoir comment interpréter les résultats, voire à les interpréter incorrectement (par exemple, par le prisme de la logique classique).

Si les deux premiers écueils sont assez faciles à surmonter (en travaillant !), le troisième est beaucoup plus subtil à appréhender, et ceci est valable pour tout le monde, de l'étudiant débutant au chercheur le plus confirmé.

Ce livre est néanmoins conçu pour aider au maximum le lecteur à surmonter ces trois écueils, en abordant de façon progressive, chapitre après chapitre, les diverses propriétés quantiques et les outils/notations/interprétations principales. S'inspirant de travaux universitaires récents concernant les difficultés et incompréhensions typiques rencontrées par les étudiants, ce cours est en effet structuré en « couches », à la manière d'une poupée russe.

Le premier chapitre pose ainsi le cadre général, cite les principales applications et limitations de la théorie, et donne les grands principes et notions clefs correspondant au « cœur » de la physique quantique, c'est-à-dire au minimum qu'il faudrait retenir si tout le reste venait à être oublié ! Puis chacun des chapitres suivants revient en détail sur les différentes notions clefs, tout en gardant la volonté de constamment fournir une vision globale de la physique quantique, chaque couche englobant la précédente et étendant progressivement les connaissances et techniques de base. Cet apprentissage par couches se poursuit jusqu'au dernier chapitre où sont abordées les avancées les plus récentes de la théorie, avant de fermer le cercle et conclure sur quelques réflexions entrevues au premier chapitre.

Ce livre n'aurait bien évidemment pu voir le jour sans l'aide, le soutien et l'inspiration de nombre de mes collègues et amis, et c'est avec une grande joie que je les en remercie, en particulier Laetitia Jammet pour m'avoir incité à écrire ce livre, Claude Fabre pour avoir eu la gentillesse de m'écrire une préface, Thierry Fouchet pour sa relecture attentive du manuscrit, Amiya et Meredith pour leur présence lumineuse, et Gabriel et Raphaël pour leur zèle suave et surprenant.