

# Introduction à la physique quantique

2<sup>e</sup> édition


**Charles Antoine**

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

**DUNOD**

Illustration de couverture : © Golden Wind, shutterstock.com

<p>Le pictogramme qui figure ci-contre mérite une explication. Son objet est d'alerter le lecteur sur la menace que représente pour l'avenir de l'écrit, particulièrement dans le domaine de l'édition technique et universitaire, le développement massif du photocopillage.</p> <p>Le Code de la propriété intellectuelle du 1<sup>er</sup> juillet 1992 interdit en effet expressément la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Or, cette pratique s'est généralisée dans les établissements</p>	<p>d'enseignement supérieur, provoquant une baisse brutale des achats de livres et de revues, au point que la possibilité même pour les auteurs de créer des œuvres nouvelles et de les faire éditer correctement est aujourd'hui menacée.</p> <p>Nous rappelons donc que toute reproduction, partielle ou totale, de la présente publication est interdite sans autorisation de l'auteur, de son éditeur ou du Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC, 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).</p>
--	--



© Dunod, 2017, 2022

11, rue Paul Bert, 92240 Malakoff

[www.dunod.com](http://www.dunod.com)

ISBN 978-2-10-083431-0

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2<sup>o</sup> et 3<sup>o</sup> 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<sup>e</sup> 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
<b>Chapitre 1 Introduction au monde quantique</b>	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
<b>L'essentiel</b>	8
<b>Chapitre 2 Dualité onde-corpuscule</b>	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 $\lambda_{dB}$ : 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
<b>L'essentiel</b>	34
Entraînez-vous	35
Solutions	39
<b>Chapitre 3 Quantification(s) et notion d'état quantique</b>	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
<b>L'essentiel</b>	69
Entraînez-vous	70
Solutions	73
<b>Chapitre 4 Mesure des grandeurs physiques</b>	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
<b>4.</b>	<b>Observables compatibles et ECOG</b>	94
4.1	Produit d'opérateurs, commutateurs	94
4.2	ECOG et observables compatibles	95
<b>5.</b>	<b>Valeur moyenne et dispersion des mesures, inégalités de Heisenberg-Ozawa</b>	97
5.1	Valeur moyenne et dispersion des mesures	97
5.2	Inégalités de Heisenberg	100
<b>6.</b>	<b>POVM, mesure faible et décohérence</b>	103
6.1	Projecteurs, POVM et mesure faible	104
6.2	Couplage avec l'extérieur, décohérence et réduction de la fonction d'onde	107
	<b>L'essentiel</b>	110
	Entraînez-vous	111
	Solutions	114
<b>Chapitre 5</b>	<b>Superposition et intrication d'états : information, téléportation et cryptographie quantiques</b>	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
	<b>L'essentiel</b>	142
	Entraînez-vous	143
	Solutions	145

<b>Chapitre 6</b>	<b>Évolution et symétries</b>	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
	<b>L'essentiel</b>	164
	Entraînez-vous	165
	Solutions	168
<b>Chapitre 7</b>	<b>Fonction d'onde</b>	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
	<b>L'essentiel</b>	191
	Entraînez-vous	192
	Solutions	194



<b>Chapitre 8</b>	<b>Marches et puits de potentiels : de l'effet tunnel au vide quantique</b>	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
	<b>L'essentiel</b>	222
	Entraînez-vous	223
	Solutions	225
<b>Chapitre 9</b>	<b>Spin, atomes et molécules</b>	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

<b>L'essentiel</b>	246
Entraînez-vous	247
Solutions	249
<b>Chapitre 10</b> <b>Physique quantique et relativité : vertiges, promesses et problèmes</b>	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
<b>L'essentiel</b>	264
<b>Constantes physiques et unités</b>	265
<b>Bibliographie</b>	266
<b>Lexique français-anglais</b>	267
<b>Index</b>	269





# Avant-propos

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

Simone Bernard-Dupré – *Mélopie 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.

# Introduction au monde quantique

« Dans le creuset de l'ordinaire, un parfum de poésie s'évade à l'infini. »

Marie-Edith Laval – Comme une feuille de thé à Shikoku

## Objectifs

**Comprendre** l'importance et le rôle de la physique quantique dans le monde d'aujourd'hui.

**Retenir** les principales notions clefs de la physique quantique : dualité onde-corpuscule, quantification, superposition d'états quantiques, mesure probabiliste et projective, notion de bosons-fermions.

## Plan

- 1 Place de la physique quantique dans l'ensemble des théories scientifiques, atouts et limitations
- 2 La physique quantique aujourd'hui, le « nanomonde » !
- 3 Grands principes et notions clefs de la physique quantique

## 1 Place de la physique quantique dans l'ensemble des théories scientifiques, atouts et limitations

Soulignons pour commencer que les deux grands piliers de la physique actuelle que sont la physique quantique et la relativité restreinte ne sont que « des » théories parmi l'ensemble des théories qui sont aujourd'hui considérées comme représentant correctement (c'est-à-dire à la précision de nos appareils de mesure) ce que l'on observe du monde. Attention, la nuance ici est importante : ce n'est pas « le » monde qui est représenté par nos théories, mais « ce qu'on en observe », c'est-à-dire les résultats numériques issus de nos expériences et observations.

Une théorie scientifique est un ensemble de principes (quasi philosophiques), de lois (exprimées à l'aide des mathématiques) et d'hypothèses (au sujet des grandeurs physiques concernées et du domaine de validité de la théorie) qui doit :

- rendre compte des expériences et observations, en tout lieu et à tout instant (condition de légitimité) ;
- et faire des prédictions vérifiables et vérifiées (force de la théorie et condition de réfutabilité).

De très nombreuses théories ont vu le jour au cours des derniers millénaires, et ce à travers toute la planète. Certaines ont été abandonnées car elles ne respectaient pas, ou plus, les conditions précédentes. D'autres ont survécu pendant des siècles jusqu'à aujourd'hui. La plupart des théories scientifiques actuelles ont été élaborées durant les trois derniers siècles.

Il est tentant de donner une structure à l'ensemble des théories actuelles. Par exemple en construisant un « arbre des théories » par domaine de validité croissant (c'est-à-dire des théories les plus simples et restreintes aux théories les plus générales et unifiées).

La base de l'arbre est constituée des théories dites « classiques » : mécanique newtonienne, physique statistique, mécanique des fluides, mécanique des solides, acoustique ; chimie et biologie classiques ; électrostatique, magnétostatique, optique géométrique ; électricité, magnétisme, optique ; électromagnétisme ; gravitation, cosmologie classique...

Il y a ensuite deux branches majeures, la physique quantique et la relativité restreinte, d'où partent et s'enchevêtrent de multiples ramifications : électrodynamique quantique (QED), théorie électrofaible, chromodynamique quantique (QCD), modèle standard, théorie quantique des champs (TQC), supercordes, relativité générale...

On ne sait pas aujourd'hui (en 2022) quelle est la forme finale de cet arbre des théories et même s'il possède un sommet, c'est-à-dire s'il existe d'autres théories plus générales (gravitation quantique ? « théorie du tout » ?) qui engloberaient toutes celles connues et qui unifieraient les quatre interactions fondamentales connues (interactions forte, faible, électromagnétique et gravitationnelle). Cette unification des théories n'en est encore qu'au stade de projet, mais sa recherche est une aventure intellectuelle prodigieuse qui mobilise des milliers de chercheurs à travers le monde.

Il existe cependant des problèmes apparemment insolubles ou rédhibitoires dont vous, lecteurs, serez peut-être les acteurs d'une meilleure compréhension dans les années futures :

- le problème de la *matière noire* (représentant 27 % de l'énergie totale de l'Univers) et de l'*énergie sombre* (68 %) : « matière » et « énergie » incompréhensibles actuellement, dont on doit supposer l'existence pour rendre compte des observations astrophysiques (masse des amas de galaxies et accélération de l'expansion de l'Univers). Si l'on fait le total : 27 % + 68 % = 95 %... les théories scientifiques actuelles listées plus haut ne permettent donc de ne comprendre qu'à peine 5 % seulement de l'énergie de l'Univers (celle constituée de matière et de rayonnement « ordinaires ») !
- le problème de la *supraconductivité à haute température* : phénomène typiquement quantique (de type « condensation de Bose-Einstein ») mais incompréhensible actuellement à des températures au-delà de 30 degrés au-dessus du zéro absolu. En 2020, une équipe scientifique américaine de l'université de Rochester a même pu observer un tel phénomène à température ambiante (+15 degrés Celsius), mais en soumettant le matériau supraconducteur (du sulfure d'hydrogène carboné) à des pressions de



plusieurs millions de bars. À pression atmosphérique, le record est de  $-135$  degrés Celsius, obtenu grâce à des mélanges d'oxydes métalliques à base de cuivre appelés cuprates.

- les incompatibilités majeures entre la physique quantique et la relativité générale (les termes employés ci-dessous seront expliqués dans la suite du livre) :
  - le *hasard quantique* : la physique quantique est fondamentalement probabiliste alors que la relativité générale est déterministe ;
  - la *structure de l'espace-temps* : en physique quantique, l'espace-temps est fixe et plat alors qu'en relativité générale, il est dynamique et sa courbure dépend de la distribution de matière et d'énergie ;
  - le *rôle du temps* : simple paramètre en physique quantique, c'est une variable dynamique en relativité générale ;
  - les *relations de Heisenberg* : l'interdiction quantique d'avoir, au même instant, une connaissance infiniment précise de la position et de la vitesse d'une particule rend impossible la détermination du champ gravitationnel en un point de l'espace-temps ;
  - l'*énergie du vide* : « la » grande incompatibilité majeure ! Même en tenant compte de l'énergie sombre, la densité volumique d'énergie prédite par la relativité générale est de l'ordre de  $1 \text{ GeV/m}^3$  (c'est-à-dire  $1,6 \cdot 10^{-10} \text{ J/m}^3$  puisqu'un électron-volt est une unité d'énergie définie comme :  $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ ) alors que la densité volumique d'énergie du vide quantique est estimée à  $10^{121} \text{ GeV/m}^3$ . Cet écart de prédiction de 121 ordres de grandeur est le plus important jamais constaté en sciences !
- les *effets quantiques anormaux dans le vivant* : des effets quantiques (« cohérences ») ont été observés dans des systèmes biologiques sur de longues durées et de larges emplacements, en complet désaccord avec l'approche usuelle de la mécanique quantique, la « décohérence » due aux incessantes collisions avec le milieu environnant devant conduire – « normalement » – à une disparition de ces phénomènes quantiques très fragiles après seulement quelques infimes fractions de seconde...
- les problèmes de la *limite classique/quantique*, des *diverses interprétations de la physique quantique*, de la *théorie de la mesure* : comment passe-t-on du monde quantique microscopique au monde classique à notre échelle ? comment trancher en faveur de l'une des interprétations actuelles de la physique quantique ? comment comprendre les propriétés surprenantes de la théorie de la mesure en physique quantique ?...

Malgré ces nombreuses interrogations, la physique quantique et la relativité restreinte (ou, dans leur version plus élaborée, la théorie quantique des champs et la relativité générale) sont en accord quasi-parfait avec presque toutes les expériences et observations actuelles, que ce soit aux basses énergies (manipulation de quelques atomes et photons) ou aux très hautes énergies (accélérateurs de particules) et très grandes échelles

(mirages gravitationnels). Ce sont deux joyaux intellectuels, dont la portée et les applications sont omniprésentes dans notre quotidien et dont la connaissance est indispensable à tout étudiant en sciences ou technologies.

## 2 La physique quantique aujourd'hui, le « nanomonde » !

---

### 2.1 Pourquoi étudier la mécanique quantique aujourd'hui ?

1. Parce que les deux tiers de la science nécessitent la physique quantique pour sa compréhension ou son utilisation... et parce qu'on estime aujourd'hui qu'environ 50 % de la richesse mondiale est liée, de près ou de loin, à des technologies utilisant la physique quantique. En 2012, un article paru dans la célèbre revue scientifique *Nature* estimait qu'entre 30 et 35 % du PIB des USA était lié à des inventions dérivées de la physique quantique.

2. Parce que la physique quantique concerne tout aussi bien l'infiniment petit (particules élémentaires, structure énergétique et métrologie des atomes, liaison chimique entre molécules, réactions nucléaires...), que l'infiniment grand (étoiles à neutron, rayonnement du fond diffus cosmologique, raie à 21 cm de l'hydrogène...), en passant par l'échelle humaine et industrielle :

- conducteurs, isolants et semi-conducteurs, laser... → électronique, informatique et société d'information actuelle (LED, fibres optiques, mémoires flash...);
- horloges atomiques → positionnement de type GPS, navigation et mesure ultraprécise du temps ;
- résonance magnétique nucléaire → fondamentale en médecine (IRM) ;
- panneaux solaires, cellules photovoltaïques, détecteurs CCD.

3. Parce qu'il y a une explosion des nanosciences et nanotechnologies : l'avènement de la « 2<sup>e</sup> révolution quantique » dont les enjeux financiers, écologiques et géostratégiques sont colossaux !

- microscopes électroniques, à effet tunnel et à effet de champ : pour observer et manipuler/créer des structures de taille nanométrique → miniaturisation extrême des composants électroniques ;
- création de nouveaux matériaux → graphène, nanotubes de carbone, semi-métaux ;
- boîtes quantiques → imagerie médicale ;
- information quantique : cryptographie quantique, ordinateur quantique, téléportation et télécommunication quantiques, internet quantique... ;
- condensats de Bose-Einstein, supraconductivité et superfluidité ;
- senseurs et capteurs quantiques → navigation autonome ;
- effets quantiques dans le vivant...

## 2.2 Ordres de grandeur classiques vs. quantiques : quand est-il vraiment nécessaire d'utiliser la physique quantique ?

Comme rappelé précédemment, l'énoncé d'une théorie implique la définition de son domaine de validité. La physique quantique ayant été initialement créée pour aller au delà de la physique classique au niveau microscopique (pour, entre autres, expliquer certaines expériences et observations incompatibles avec la physique classique qui seront détaillées plus loin), on est en droit de se demander s'il existe des domaines où il n'est pas absolument nécessaire d'utiliser la physique quantique et où l'on peut se contenter d'utiliser les théories non quantiques (c'est-à-dire classiques) de la physique.

Parmi les différents critères utilisés, celui utilisant la notion d'action caractéristique est particulièrement pertinent. L'action caractéristique d'un système, notée  $S$ , se construit à partir des grandeurs « caractéristiques » du système étudié :

$$S = \text{énergie} \cdot \text{temps} = \text{masse} \cdot \text{vitesse} \cdot \text{longueur} = \text{moment cinétique} \cdot \text{angle} \dots$$

Elle est ensuite à comparer au quantum d'action de la physique quantique donné par la « constante de Planck »  $h \simeq 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ , ou plutôt par la constante de Planck « réduite » :

$$\hbar = \frac{h}{2\pi} \simeq 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$

dont la valeur numérique est particulièrement pratique à mémoriser. Le résultat est alors le suivant :

si  $S \gg \hbar$ , une description classique du système étudié est suffisante. Sinon (c'est-à-dire si  $S \lesssim \hbar$  ou  $S \gtrsim \hbar$ ), il est absolument nécessaire d'utiliser la physique quantique pour décrire le système.

Cette condition de validité de la mécanique classique est à rapprocher de la condition de validité  $v \ll c$  de cette même mécanique classique vis-à-vis de la mécanique relativiste (c'est-à-dire de la relativité restreinte, avec  $v$  la vitesse d'un objet et  $c$  la vitesse de la lumière). Ne pas considérer la physique quantique pour décrire un système revient ainsi à faire des prédictions/calculs à des termes/erreurs en  $\hbar/S$  près.

### Exemples

- Mouvement d'un escargot :  $v \sim 10^{-4} \text{ m/s}$ ,  $m \sim 10^{-2} \text{ kg}$ ,  $l \sim 10^{-2} \text{ m} \Rightarrow S \simeq mvl \sim 10^{-8} \text{ J} \cdot \text{s} \gg \hbar$  : classique !
- Électron dans un atome :  $|E| \sim 10 \text{ eV} \sim 10^{-18} \text{ J}$ ,  $\lambda \sim \text{visible} \sim 0,6 \cdot 10^{-6} \text{ m} \Rightarrow v = \frac{c}{\lambda} \sim 5 \cdot 10^{14} \text{ Hz} \Rightarrow S \sim |E|/v \sim 2 \cdot 10^{-33} \text{ J} \cdot \text{s} \lesssim \hbar$  : quantique !
- Bactérie de type mycoplasme :  $m \simeq 10^{-18} \text{ kg}$ ,  $v \simeq 10^{-7} \text{ m/s}$ ,  $l \simeq 10^{-7} \text{ m} \Rightarrow S \sim 10^{-32} \text{ J} \cdot \text{s}$  : limite classique / quantique.

## 3 Grands principes et notions clefs de la physique quantique

---

Ils correspondent au « cœur » de la physique quantique, c'est-à-dire à ses propriétés les plus importantes, celles que tout un chacun devrait connaître et que vous devrez retenir même lorsque vous aurez oublié tout le reste dans quelques années...

Les « comprendre » implique d'être capable d'expliquer leur signification exacte, avec vos propres mots et en donnant des exemples, de les interpréter correctement lorsque vous en entendrez parler, de les appliquer correctement à des exercices et problèmes, et surtout d'expliquer leur originalité et leur différence par rapport à la physique classique.

Ces grands principes et notions clefs ne sont ici que très légèrement abordés. Ils seront détaillés dans la suite de ce livre, mais cette liste doit vous accompagner lors de votre lecture/apprentissage.

Les notions physiques et mathématiques liées à ces grands principes sont indiquées par le symbole \*\*\*. Elles correspondent au minimum à maîtriser lors d'examens et concours de niveau 1er cycle universitaire ou classes préparatoires aux grandes écoles.

### 3.1 Dualité onde-corpuscule

Il s'agit du double comportement ondulatoire et corpusculaire pour la lumière (onde électromagnétique *vs.* photons) et pour la matière (particules *vs.* ondes de matière).

\*\*\* : propriétés du photon, calcul d'un signal d'interférences, longueur d'onde de de Broglie  $\lambda_{dB}$ , fonction d'onde  $\psi(x, t)$ , inégalités de Heisenberg.

### 3.2 Quantification des grandeurs physiques

Ces grandeurs physiques sont l'énergie, le moment cinétique, la position et, de façon générale, toute grandeur « observable » classiquement, auxquelles s'ajoutent des grandeurs typiquement quantiques comme le spin.

Exemple : structure discrète de l'énergie des atomes et molécules, et des échanges d'énergie (photons) impliquant l'existence de sauts quantiques, comme lors de l'absorption/émission de quanta d'énergie (photons, phonons...) par la matière.

\*\*\* : équation de Schrödinger à savoir résoudre dans des cas simples (marche de potentiel, puits carré infini, barrière carrée...), principe de l'absorption/émission de photons par les atomes, notion d'observable quantique.

### 3.3 Superposition et intrication d'états quantiques

Lié au fait qu'un système en physique quantique est représenté par un vecteur non nul (appelé « vecteur d'état »), c'est-à-dire un élément non nul d'un espace vectoriel (complexe). On peut donc faire des sommes ou, plus généralement, des combinaisons

linéaires (avec coefficients complexes !) d'états quantiques, par exemple, d'états de position, de vitesse, d'énergie... On peut même créer des combinaisons linéaires sans aucun équivalent classique : les états intriqués.

\*\*\* : état quantique, vecteur d'état, notation de Dirac  $|\psi\rangle$ , superposition, intrication, produit scalaire d'états, notions de qubit et de cryptographie quantique, évolution d'états (équation de Schrödinger et importance de la notion de hamiltonien).

### 3.4 Mesure quantique : probabiliste et perturbante

Chaque résultat possible d'une mesure est obtenu de façon aléatoire avec une certaine probabilité, et ce, même si l'état du système étudié est parfaitement défini et connu (la physique quantique est dite « probabiliste » contrairement, par exemple, à la mécanique newtonienne qui est « déterministe »). De plus, une mesure perturbe/modifie en général le système mesuré et conduit à la « projection » du système dans un état quantique donné. Enfin, et c'est certainement « la » caractéristique quantique principale : il existe des observables qui ne commutent pas entre elles.

\*\*\* : probabilité de présence, les trois étapes d'une mesure standard en physique quantique (résultats possibles, probabilités de les obtenir, état après la mesure), notion de POVM, commutateur, ECOC, fluctuation quantique.

### 3.5 Bosons-fermions, spin et principe de Pauli

Toutes les particules (de matière ou de rayonnement) connues semblent pouvoir se classer en deux catégories : soit des fermions, soit des bosons. Cette différence est liée à la valeur de leur spin (demi-entier pour les fermions et entier pour les bosons). Elle se traduit par une « symétrisation » de la fonction d'onde des bosons et par une « anti-symétrisation » de la fonction d'onde des fermions.

Exemples de fermions : électrons, neutrinos, quarks, protons, neutrons...

Exemples de bosons : photons, bosons Z et W, bosons de Higgs, gluons, gravitons...

Lorsqu'ils sont plusieurs à interagir, les fermions et bosons n'ont pas le même comportement. Le « principe de Pauli » stipule ainsi que deux fermions ne peuvent pas être dans le même état quantique au même instant. Cette « répulsion fermionique » est à l'origine de notre compréhension actuelle de la stabilité de la matière et de la classification périodique des éléments.

Les bosons, au contraire, ont tendance à se regrouper dans un même état quantique. Cette « attraction bosonique » est responsable du phénomène de « condensation de Bose-Einstein ». La supraconductivité, la superfluidité, les lasers sont considérés comme des exemples de ce phénomène.

\*\*\* définition et exemples de bosons et fermions, symétrisation vs. anti-symétrisation d'une fonction d'onde, principe de Pauli.

## Les points clés du chapitre

- 1 La physique quantique est l'un des deux grands piliers, avec la théorie de la relativité, de la physique moderne.
- 2 De l'infiniment petit à l'infiniment grand, en passant par l'échelle humaine et industrielle, la physique quantique est aujourd'hui omniprésente.
- 3 L'essor récent des nanosciences et nanotechnologies incite tout un chacun à maîtriser les bases de la physique quantique.
- 4 S'il n'y avait que cinq notions clefs à retenir, ce serait les notions de dualité onde-corpuscule, d'état quantique et de quantification, de superposition et d'intrication d'états, de mesure probabiliste et projective, et de bosons-fermions.
- 5 Les trois propriétés mathématiques ou phénomènes physiques cruciaux de la physique quantique sont : la **linéarité** (permettant les superpositions d'états), l'**intrication** (effet purement quantique) et la **non-commutation des observables** (différence mathématique de fond avec la physique classique).
- 6 L'action caractéristique d'un système permet d'estimer la nécessité ou non, d'utiliser la physique quantique pour décrire un phénomène.

# Dualité onde-corpuscule

« Lorsqu'on est confronté à l'improbable, une fois qu'on a éliminé l'impossible, il reste la réalité. »

Conan Doyle – *Le signe des quatre*

## Objectifs

**Comprendre** ce que signifie la dualité onde-corpuscule pour la lumière (photon vs. interférences lumineuses) et la matière (ondes de matière).

**Comprendre** le principe de l'effet photoélectrique et ce qu'est un rayonnement de corps noir.

**Comprendre et savoir** utiliser la notion d'onde de de Broglie.

**Comprendre** la notion de probabilité de présence (temporelle et spatiale).

## Plan

- 1 Aspects corpusculaires de la lumière, photons
- 2 Aspects ondulatoires de la matière, onde de de Broglie
- 3 Lien entre interférences lumineuses et photons
- 4 Qu'est-ce qu'un photon ?

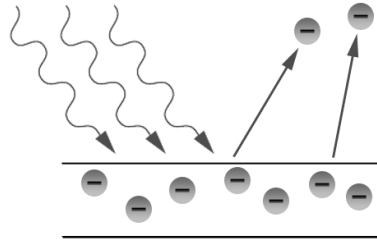
Symbole même de la physique quantique, la dualité onde-corpuscule n'a jamais cessé – depuis sa mise en évidence pour la matière au début du vingtième siècle – d'intriguer, de choquer ou d'émerveiller.

Si elle apparaît plus intuitive pour la lumière (l'accès à la notion, pourtant subtile, de « photon » étant facilité par l'observation quotidienne de rayons et de points lumineux), elle semble en revanche défier notre logique habituelle lorsque ce sont des particules matérielles qui présentent un aspect ondulatoire. Ces fameuses « ondes de matière » ont depuis longtemps quitté les laboratoires pour investir le monde qui nous entoure (horloges atomiques, imagerie médicale IRM, microscopes à effet tunnel, cryptographie quantique...) et constituer l'un des ingrédients de base des technologies à venir.

## 1 Aspects corpusculaires de la lumière, photons

### 1.1 Effet photoélectrique

C'est l'émission d'électrons d'une surface matérielle (métallique, typiquement) lorsqu'elle est éclairée par une onde électromagnétique.



**Figure 2.1** – Schéma de principe de l'effet photoélectrique.

Les photons d'une onde électromagnétique incidente peuvent communiquer suffisamment d'énergie aux électrons d'une surface matérielle pour qu'ils puissent en être éjectés.

Les principales propriétés sont les suivantes (Hertz 1887) :

- le phénomène ne se produit que si la fréquence de la lumière est supérieure à une fréquence seuil

$$\nu \geq \nu_s$$

quelle que soit la puissance lumineuse incidente  $\mathcal{P}$  ;

- il est alors instantané (moins de  $10^{-9}$  s), même pour de très faibles valeurs de  $\mathcal{P}$  ;
- l'énergie cinétique des électrons arrachés est proportionnelle à la fréquence  $\nu$  de l'onde mais indépendante de  $\mathcal{P}$  ;
- le nombre d'électrons arrachés est proportionnel à  $\mathcal{P}$ .

Exceptée la dernière, toutes ces propriétés sont en complet désaccord avec l'explication classique selon laquelle l'énergie lumineuse serait progressivement transférée de l'onde électromagnétique aux électrons du métal.

Une explication pertinente de l'effet photoélectrique est donnée par Einstein en 1905 (ce qui lui vaudra le prix Nobel en 1921) : l'énergie d'extraction est en fait donnée aux électrons par l'intermédiaire de collisions photon-électron.

La conservation de l'énergie lors de ces processus s'écrit :

$$E_{cin}(\text{électron émis}) = h\nu - W$$

où  $h\nu$  est l'énergie du photon incident et  $W$  est le travail d'extraction, c'est-à-dire l'énergie nécessaire pour extraire un électron (la valeur de  $W$  dépendant du métal considéré).

L'atome qui a perdu l'un de ses électrons par effet photoélectrique est dans un état « excité » qui ne dure pas. Il y a alors désexcitation (ou relaxation) par réarrangement interne des électrons de l'atome. Ceci peut conduire à l'émission d'un photon (appartenant au domaine du visible ou des rayons X typiquement) ou à l'éjection d'un autre électron (effet Auger).

Les applications de l'effet photoélectrique sont nombreuses : cellules photoélectriques ou photovoltaïques, photodiodes (sur Terre ou dans l'espace), capteurs CCD,



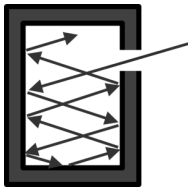


Figure 2.2 – Schéma d'une enceinte percée servant de corps noir.

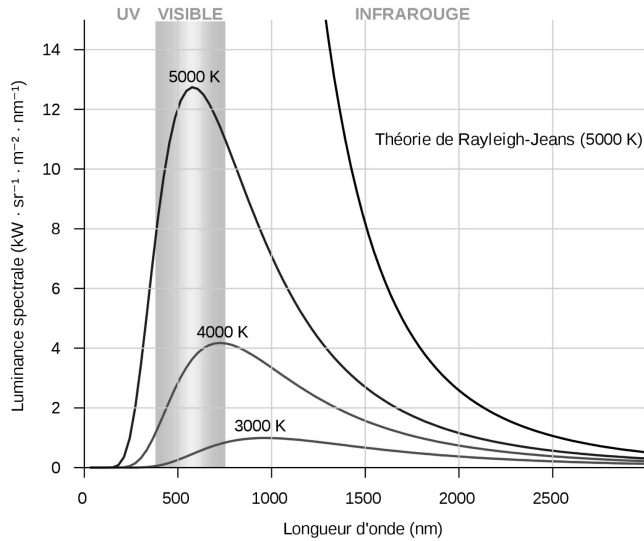


Figure 2.3 – Intensité du rayonnement de corps noir pour diverses valeurs de la température (la courbe en noire sur la droite est la prédiction classique de Rayleigh-Jeans).

photomultiplicateurs (dans lesquels les photoélectrons sont accélérés par de fortes tensions, qui conduisent à l'émission en cascade de nombreux électrons secondaires, formant ainsi un courant mesurable facilement), protection des satellites...

L'effet photoélectrique n'est en fait que l'un des nombreux mécanismes d'interaction entre la lumière et la matière : diffusion Rayleigh, diffusion Compton, création de paires électron-positron... En fonction de l'énergie des photons incidents, tel ou tel mécanisme dominera. Ainsi, un photon incident de faible énergie ( $h\nu < W$ ) subira principalement une diffusion élastique (c'est-à-dire sans perte d'énergie) de type Rayleigh (la diffusion habituelle de la lumière qui permet par exemple d'expliquer la couleur bleue du ciel). Pour des énergies plus importantes, l'effet photoélectrique dominera, les photons seront absorbés et des photoélectrons seront émis. Si  $W \ll h\nu < 2m_e c^2$ , un autre mécanisme domine : la diffusion Compton, diffusion inélastique lors de laquelle le photon incident n'est pas absorbé mais perd une partie seulement de son énergie (au profit d'un électron) et voit donc sa fréquence modifiée (voir l'exercice 2.3). Enfin, si  $h\nu \geq 2m_e c^2 \simeq 1 \text{ MeV}$ , un photon approchant un noyau atomique peut se convertir en matière et donner naissance à une paire électron-positron.

## 1.2 Rayonnement de corps noir

Le rayonnement de « corps noir » est un rayonnement très particulier qu'émettent les corps (pas nécessairement noirs) dont la température est fixée, et qui absorbent tous les rayonnements électromagnétiques incidents.