

CHARLES ANTOINE

SCHRÖDINGER



À LA PLAGE

LA PHYSIQUE QUANTIQUE
DANS UN TRANSAT

DUNOD

Dans la même collection :

Colette à la plage, Marie-Odile André

Proust à la plage, Johan Faerber

Einstein à la plage, Marc Lachièze-Rey

Darwin à la plage, Jean-Baptiste de Panafieu

Sapiens à la plage, Jean-Baptiste de Panafieu

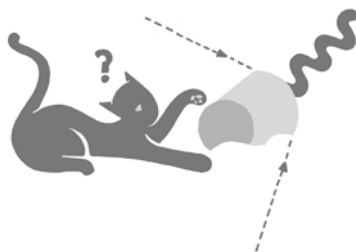
Principe de collection, conception et illustration de la couverture :

Marie Sourd, Atelier AAAAA

Crédits typographiques : *Grotesque6* © Émilie Rigaud,

A is for (titraille) & *Carrara* © Hoftype (texte courant)

Illustrations de l'intérieur : Rachid Marai



© Dunod, 2018

11 rue Paul Bert, 92240 Malakoff

www.dunod.com

ISBN 978-2-10-077289-6

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.

PROLOGUE



PHYSICIEN ICONOCLASTE POUR THÉORIE BIEN MYSTÉRIEUSE...

*Ce que vous vous apprêtez à faire est dangereux.
Pénétrer l'étrangeté du monde quantique est un
voyage fabuleux dont on ne ressort pas indemne...*

C'est un monde où de mystérieux chats sont à la fois morts et vivants, où de malicieuses souris font exister la lune rien qu'en l'observant, où certaines interactions se font hors de l'espace et du temps, où une chose peut être à deux endroits à la fois et aller d'un lieu à l'autre sans passer par un quelconque lieu intermédiaire... C'est aussi un monde où tout n'est que probabilités et ondes imaginaires, où la matière se révèle n'être que vibrations éphémères en perpétuelle re-création, où le

« L'instant le plus heureux d'une vie humaine est le départ vers une terre inconnue. »

Sir Richard Francis Burton,
Extrait de son journal

si mal nommé « vide » est rempli d'une énergie prodigieuse, où l'infiniment petit s'enchevêtre avec l'infiniment grand, où les univers parallèles se multiplient à volonté, où l'absurde côtoie le divin...

Pure construction intellectuelle pour amoureux des langages abstraits? Bizarrerie mathématique pour adeptes des questionnements métaphysiques? Excentrique théorie scientifique aux frontières de la philosophie et de la folie? Beaucoup pourraient être tentés de répondre par l'affirmative si le pouvoir prédictif de cette théorie ne s'était pas révélé aussi puissant que révolutionnaire! Car la physique quantique, malgré tout l'insensé dont elle semble se parer, est une théorie extrêmement bien vérifiée expérimentalement. Si bien, d'ailleurs, qu'elle en est même parfois déroutante, particulièrement lorsqu'il s'agit des interactions entre lumière et matière.

La physique quantique n'est cependant pas qu'une beauté cachée qui réserverait ses énigmatiques splendeurs aux explorateurs du monde microscopique... Nous n'en avons pas conscience, mais elle est présente dans presque chaque geste de notre quotidien : lorsque nous faisons glisser nos doigts sur notre smartphone, lorsque nous pianotons sur le clavier d'un ordinateur et, de façon générale, à chaque fois que nous utilisons

un appareil comportant des composants électroniques ! Car sans la physique quantique, pas de compréhension du fonctionnement des diodes et des transistors, donc pas de circuit intégré, ni de microprocesseur ou de mémoire flash. Sans physique quantique, pas d'onde de matière, donc pas d'horloge atomique ni de GPS. Sans physique quantique, pas de laser, pas de train à lévitation magnétique, pas d'imagerie médicale ultra-précise, pas de communication ultra-sécurisée.

Et demain, quand nous voterons, utiliserons notre carte bancaire, nous habillerons ou nous déplacerons sur Terre ou dans l'espace... notre environnement sera constellé d'appareils que la physique quantique a permis de créer en laboratoire : de l'ordinateur quantique à la téléportation quantique, en passant par les nouveaux matériaux comme le graphène ou les nanotubes de carbone.

Mais il y a plus, comme dirait l'enchanteur radio-phonique Jean-Claude Ameisen : de récentes recherches ont en effet montré l'existence d'effets quantiques dans le domaine du vivant (chez les plantes, lors de la photosynthèse par exemple, ou dans les yeux de certains oiseaux migrateurs), domaine jusque-là exclu en raison de son extrême complexité, jugée rédhibitoire pour la préservation du si fragile phénomène de cohérence quantique. Même la conscience, ou du moins la transformation d'une information en constatation consciente par un esprit humain, semble aujourd'hui

en passe d'être reliée à des interactions de nature quantique...

Oui, décidément, comme le souligne le physicien Steven Weinberg, «le jour où l'on découvre la physique quantique, on n'est plus jamais le même». C'est donc bien à un voyage extraordinaire – au sens premier du terme – que ce livre vous convie.



Erwin Schrödinger en 1940, à l'âge de 53 ans

Et qui mieux qu'Erwin Schrödinger (1887-1961), parmi l'ensemble des principaux découvreurs et artisans de cette théorie, pourrait nous servir de guide ? Il n'est certes pas aussi connu que Planck, Einstein ou

Feynman, peut-être pas aussi visionnaire que Bohr, de Broglie ou Pauli, et assurément moins précoce que Dirac, von Neumann ou Heisenberg... (Pas de panique, si les noms de ces physiciens ne vous disent rien, c'est que ce livre est fait pour vous!) Mais toute la vie et l'œuvre d'Erwin Schrödinger sont à l'image de la physique quantique.

D'âge intermédiaire, entre les deux générations de physiciens qui se sont affrontées à la naissance de la physique quantique, il a été de presque toutes ses étapes-clés: en établissant l'équation centrale de cette théorie – l'équation de Schrödinger –, dont la résolution est à l'origine des principales applications technologiques actuelles; en réalisant la synthèse entre les deux versions majeures de la théorie (la mécanique des matrices d'Heisenberg, Born et Jordan, et la mécanique ondulatoire qu'il a lui-même établie à la lumière des travaux du Français Louis de Broglie); en critiquant l'interprétation standard de la théorie avec son célèbre chat mort-vivant et l'introduction, avec son ami Albert Einstein, de la notion fondamentale d'intrication quantique; en poursuivant son opiniâtre recherche, hélas infructueuse, d'une superthéorie qui unifierait les deux grands piliers de la science actuelle que sont la physique quantique et la relativité générale; en se passionnant pour la philosophie et les liens entre science et spiritualité; et enfin, en ouvrant la voie à ce qui deviendra, quatre-vingts ans plus tard, le révolutionnaire domaine de la biologie quantique...

Et si Erwin Schrödinger fut iconoclaste dans son approche de la science, il le fut tout autant dans ses relations amoureuses, ses amitiés et ses choix de vie. Esprit libre, rejetant les conventions de toutes sortes, il a profondément marqué la science de son époque et en a largement bousculé les consciences. Son travail scientifique et philosophique n'a de cesse d'être redécouvert et apprécié à une plus juste valeur, comme si le temps avait été nécessaire pour en saisir toute la portée visionnaire.

«Inventer, c'est penser à côté», disait Einstein. Quelle plus belle illustration que la vie et l'œuvre de Schrödinger, dont chaque élément peut éclairer le grand livre de la physique quantique !

CHAPITRE 1



PRÉLUDE AU VOYAGE

La physique quantique résumée en trois mots et dix questions !

« Il n'est pas nécessaire de construire un labyrinthe, quand l'Univers déjà en est un », soulignait le poète argentin Jorge Luis Borges. Ce premier chapitre se veut fil d'Ariane dans vos pérégrinations quantiques. À la fois carnet de bord et invitation au voyage, résumant les notions et principes quantiques exposés et développés dans la suite du texte.

Quelques réponses, immédiates et concises, aux questions que vous vous posez sûrement sur cette intrigante théorie : de quoi parle la **physique quantique** ? Quels en sont ses principes ? En quoi diffère-t-elle des autres théories ? Pourquoi la lumière y joue-t-elle un rôle important ? Que signifie le mot *quantique* ?

« Tout voyageur est
d'abord un rêveur. »

Bruce Chatwin, *En Patagonie*

Ce chapitre a également
pour vocation de vous
immerger tout de suite dans
cette fantastique théorie et

de vous permettre de répondre, en trois mots ou trois phrases, à votre voisin de transat qui vous demande avec insistance ce qu'est donc cette fameuse physique quantique... Évidemment, si vous savez déjà répondre à cette question, vous pouvez sauter ce chapitre. Inversement, si l'évocation de certains termes techniques ou noms de savants autrichiens baladeurs vous fait perdre pied, pas de panique, les lignes qui suivent devraient vous aider à mettre de la couleur sur votre chemin.

Signalons tout d'abord qu'il n'est pas question, ici, de vouloir atteindre le sommet de l'Everest quantique ! L'idée générale est de vous outiller pour en gagner le premier camp de base, de vous donner les clés pour vous permettre d'être autonomes dans votre ascension ultérieure par la face nord...

Mais attention, il ne s'agit pas non plus de vous soustraire au plaisir aérien de saisir des choses difficiles ! Si certaines simplifications et analogies, forcément approximatives, sont au programme, il n'en reste pas moins que l'aventure demandera de l'attention, de l'envie et un certain effort de votre part. Comme aime à le partager l'acteur-poète Jacques Gamblin : « Pas de pression, pas d'enjeu. De l'envie, du jeu et de la joie ! »



LA PHYSIQUE QUANTIQUE EN TROIS MOTS

De la même façon qu'Einstein a montré, avec la célèbre formule $E = mc^2$ issue de sa théorie de la relativité, que « tout était énergie », on pourrait résumer l'essence de la physique quantique par les trois mots suivants :

« Tout est vibration ! »

Tout est vibration, tout est « onde ». Comme celles qui apparaissent à la surface de l'eau quand on y jette un caillou, ou celles qui parcourent les épis de blé dans le vent, ou encore celles qui prennent vie dans les instruments de musique... Mais à la différence de ces ondes physiques qui peuplent notre quotidien, les ondes quantiques ne sont ni matérielles (contrairement aux ondes sonores), ni visibles (contrairement aux ondes lumineuses), ni même observables par quelque moyen que ce soit. Ce sont des ondes abstraites, appartenant à un autre monde, un monde mathématique imaginaire... mais qui a tout de même des effets physiques sur le nôtre !

Comment est-ce possible ? Quel est le lien entre ces deux mondes ? Quelle est la nature de ce lien entre ce monde abstrait et le monde *réel* qui nous entoure ? Subtil et perturbant questionnement qui a conduit les scientifiques à revoir le concept de *mesure*, à comprendre en profondeur ce que signifiait *observer*, et par là même à redéfinir la notion même de réalité...

LA PHYSIQUE QUANTIQUE EN DIX QUESTIONS

1. QUAND ET POURQUOI LA PHYSIQUE QUANTIQUE A-T-ELLE ÉTÉ CRÉÉE ?

La physique quantique est l'une des deux théories fondamentales majeures de la physique d'aujourd'hui, l'autre étant la relativité générale d'Einstein.

Ses principes ont été progressivement établis au cours des années 1900-1930 par un collectif de chercheurs, essentiellement européens. Si Albert Einstein a introduit la notion de grain de lumière en 1905, puis Louis de Broglie celle d'onde de matière en 1923, c'est principalement les physiciens Werner Heisenberg, Erwin Schrödinger, Paul Dirac, Niels Bohr, Wolfgang Pauli et John von Neumann qui ont finalisé et formalisé la théorie telle qu'on la connaît aujourd'hui.

La physique quantique fut en fait créée en réponse à des observations et expériences impossibles à expliquer simplement avec les théories de l'époque (c'est-à-dire essentiellement la mécanique et l'électromagnétisme), qui furent par la suite qualifiées de *classiques*, par opposition à *quantique*.

L'essentiel des expériences et observations incomprises à l'époque font intervenir les interactions entre lumière et matière (par exemple, le problème du rayonnement émis par un corps à température constante).

2. QUE VEUT DIRE LE MOT « QUANTIQUE » ?

Ce mot vient du latin *quantum* qui signifie *combien*. Son sens actuel est *petit grain*, sous-entendu *petit grain d'énergie*, si rien n'est précisé concernant la nature de ce grain. Au sens large, le mot *quantique* fait référence à tout ce qui peut, de près ou de loin, être relié à un effet ou à une notion de physique quantique. Ainsi, un effet quantique n'est rien d'autre qu'un effet prédit, ou décrit, par la physique quantique.

De façon plus précise, un quantum (pluriel *quanta*) est la quantité minimale qu'une grandeur physique peut prendre lors d'une interaction entre deux choses. On dit alors qu'il y a **quantification** de la grandeur caractérisant cette interaction.

L'acception *petit grain d'énergie* fait référence au fait qu'il a été démontré que la lumière possède un aspect granulaire, sous forme de quanta d'énergie appelés aussi *photons*, et que, de façon générale, tout ce qui existe autour de nous présente un tel comportement granulaire. Les atomes, par exemple, que nous concevons aisément comme des grains de matière, possèdent également en eux une structure énergétique granulaire. Même l'espace et le temps pourraient en fait être, selon les dernières spéculations théoriques, structurés en grains d'espace-temps...

3. QUELLES SONT LES EXPÉRIENCES EMBLÉMATIQUES DE LA PHYSIQUE QUANTIQUE ?

De multiples expériences ont été nécessaires pour confirmer la pertinence des principes et notions révolutionnaires que les découvreurs de la physique quantique ont progressivement introduits.

La plus emblématique est sans conteste l'expérience des **fentes d'Young**, que nous verrons en détail par la suite (voir p. 32) et dans laquelle deux fentes sont utilisées pour mettre en évidence la notion d'onde de probabilité associée à une seule particule, que celle-ci soit de matière (un électron ou un atome, par exemple) ou de lumière (un photon).

D'autres expériences-clés ont permis d'asseoir la théorie à ses débuts, en particulier celles démontrant la quantification de l'énergie (lumineuse ou atomique), l'existence du **spin** et la réalité physique des **ondes de matière**. Parmi les expériences plus récentes, on peut citer celles qui ont prouvé la réalité des phénomènes d'**intrication** et de **non-localité** (grâce aux travaux d'Alain Aspect, en 1981, puis de Ronald Hanson, en 2015) et celles en lien avec la découverte de particules élémentaires comme le boson de Higgs, en 2012.

Dans les années 1990, ce sont d'autres portes qui s'ouvrent, avec la réalisation pratique de la téléportation quantique et la production d'ondes de matière cohérentes (ce qui vaudra le prix Nobel au français Claude Cohen-Tannoudji en 1997). Enfin, depuis 2010, ce sont

l'informatique quantique et la **biologie quantique** qui prennent leur envol par l'intermédiaire de multiples expériences, publiques ou privées, à travers le monde entier.

4. EST-CE UNE THÉORIE BIEN VÉRIFIÉE ?

La physique quantique est une théorie extrêmement bien vérifiée. Sa version augmentée, appelée *électrodynamique quantique* (QED pour les intimes), dans laquelle les interactions lumière-matière ainsi qu'une forme restreinte de la relativité d'Einstein sont prises en compte, est même considérée comme LA théorie la mieux vérifiée de tous les temps ! (En compétition pour ce titre avec la **relativité générale** d'Einstein, d'autant plus depuis la détection en 2015 des fameuses ondes gravitationnelles prédites par cette théorie.)

L'électrodynamique quantique ne peut cependant pas s'appliquer à des quantités importantes d'atomes et de matière, pour lesquelles la version simplifiée de la physique quantique (celle exposée principalement dans ce livre) est utilisée pour décrire les phénomènes observés. Dans ce cas également, l'accord entre prédictions et mesures est extrêmement précis, même s'il existe des effets quantiques anormaux (entre autres en biologie et dans le domaine de la supraconductivité, par exemple) qui interrogent et laissent la porte ouverte à de nouvelles avancées.

5. À QUELS OBJETS LA PHYSIQUE QUANTIQUE S'INTÉRESSE-T-ELLE ?

Bien que le domaine principal d'application de la physique quantique soit celui de l'infiniment petit, il existe des effets quantiques à toutes les échelles de la nature, de l'échelle sub-microscopique des sous-constituants élémentaires d'un atome à l'échelle astronomique de l'Univers, en passant par l'échelle humaine et industrielle.

La physique quantique s'intéresse donc à tous les objets, des plus petits aux plus gros ! On pourrait même dire sous forme lapidaire que « tout est quantique » !

Il est en effet possible d'associer une onde quantique à tout objet ou ensemble d'objets, même si les propriétés quantiques des objets du quotidien ne nous sont pas accessibles ou, du moins, très difficilement. Il y a d'ailleurs un domaine de recherche à part entière qui étudie où se situe la frontière entre le monde fortement quantique observé au niveau des atomes et celui, beaucoup moins quantique en apparence, dans lequel nous vivons au jour le jour.

6. EN QUOI CETTE THÉORIE DIFFÈRE-T-ELLE DES AUTRES ?

Contrairement à la relativité générale, l'autre grand pilier de la physique moderne, la physique quantique ne repose pas sur un grand principe, quasi-philosophique, comme le principe de relativité du mouvement pour la théorie éponyme. La physique quantique fait en effet