

SCHRÖDINGER

À LA PLAGE

**LA PHYSIQUE QUANTIQUE
DANS UN TRANSAT**

CHARLES ANTOINE

SCHRÖDINGER

À LA PLAGE

LA PHYSIQUE QUANTIQUE
DANS UN TRANSAT

Nouvelle édition

DUNOD

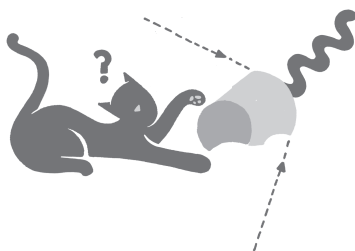
Principe de collection, conception et illustration de la couverture :

Marie Sourd, Atelier AAAAA

Crédits typographiques : *Grotesque6* © Émilie Rigaud,

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

Illustrations de l'intérieur : Rachid Marai



© Dunod, 2018, 2022 pour la présente édition

11 rue Paul Bert, 92240 Malakoff

www.dunod.com

ISBN 978-2-10-083759-5

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 co-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 empli d'une énergie prodigieuse, où l'infiniment petit s'enchevêtre avec l'infiniment grand, où les univers parallèles se multiplient à volonté, et où l'absurde côtoie le divin...

Est-ce une pure construction intellectuelle pour amoureux des langages abstraits? Une bizarrerie mathématique pour adeptes des questionnements métaphysiques? Ou une 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 de décrire les 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, par exemple, nous faisons glisser nos doigts sur notre smartphone, ou 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 déjà 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 migrants), ce domaine jusque-là exclu en raison de son extrême complexité, jugée réhibitoire 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 grand 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 au début du xx^e siècle, 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). Mais Schrödinger a également eu l'audace et la grandeur d'âme de remettre en cause la théorie qui avait pourtant fait sa gloire, en critiquant ouvertement 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. Comme tant d'autres, d'hier et d'aujourd'hui, il a aussi poursuivi 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. Enfin, passionné par la philosophie et les liens

entre science et spiritualité, il a ouvert la voie à ce qui deviendra, 50 ans après sa mort, 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 et la société de son époque et en a largement bousculé les consciences. Son travail scientifique et philosophique n'a d'ailleurs 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 ? Et que signifie donc 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 peut-être 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 en si peu de pages! L'idée générale est de vous outiller suffisamment pour en gagner le premier camp de base, et 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! En effet, 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 surtout 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...

☼ L'ESSENCE DE LA PHYSIQUE QUANTIQUE : SES TROIS CŒURS

Plus qu'une théorie, la physique quantique est un véritable *cadre conceptuel*, qui remplace celui, plus intuitif, de la physique classique, et qui s'applique à tous les domaines de la science – de l'optique à la chimie, en passant par la mécanique, la biologie et la théorie de l'information. C'est, avec la relativité d'Einstein, le socle scientifique sur lequel repose aujourd'hui notre façon de *voir le monde*. De le lire, de le décoder. Et de répondre aux questions millénaires à son sujet : de quoi est-il fait ? Comment fonctionne-t-il ? Comment y a-t-on accès ?

Résumer l'essence de la physique quantique à la notion de vibration universelle est donc forcément réducteur. La célèbre *dualité onde-corpuscule* constitue une seule des multiples facettes de cette métathéorie. Elle fait partie de ce qu'on pourrait appeler le « cœur philosophique » de la physique quantique. Celui qui traite de la superposition des possibles, mais également de son irrémédiable disparition lorsque l'on cherche à l'observer, et du caractère probabiliste intrinsèque de toute mesure ou observation (voir la définition du terme « physique quantique » dans le glossaire, p. 225).

Le deuxième cœur quantique, qu'on pourrait appeler le « cœur physique », se situe un cran plus loin. Dans les méandres du phénomène quasi magique d'*intrication*, cette super-superposition sans équivalent classique qui semble défier l'espace, le temps et la causalité, et qui est

le pilier central du domaine en pleine ébullition qu'est l'information quantique. Ce n'est en fait qu'une simple conséquence du formalisme mathématique de la théorie, mais pour beaucoup de physiciens, l'intrication est «le» phénomène quantique par excellence. Sa signature non classique.

Il existe pourtant de nombreux autres concepts quantiques qui n'ont pas d'équivalents classiques: par exemple le spin (dans sa version quantifiée tout du moins), ou encore l'impossibilité de pouvoir toujours mesurer deux grandeurs physiques avec une précision infinie, ce qu'on appelle l'*incompatibilité des mesures* et qui est parfaitement incarnée par les célèbres relations d'indétermination de Heisenberg. Et c'est ici que réside le troisième cœur quantique, son «cœur mathématique» pourrait-on dire: la *non-commutativité* des grandeurs observables.

Voyons cela de plus près dès maintenant, car nous touchons là à l'essence la plus profonde de la physique quantique.

Lorsque l'on manipule un objet, par exemple, qu'on le bouge, le tourne sur lui-même ou le renverse, on dit qu'on lui applique des «transformations». Deux transformations peuvent alors ne pas commuter, c'est-à-dire donner une configuration finale différente selon que l'on applique les transformations dans un ordre ou dans un autre. Cela vous paraît compliqué? Pas tant que ça...

Faisons un jeu. Tendez votre bras droit devant vous, paume ouverte. Tournez alors votre bras d'un

quart de tour vers la droite (autour d'un axe vertical donc, celui formé par l'alignement de votre corps), puis tournez votre bras d'un autre quart de tour, mais vers le haut cette fois-ci (autour d'un axe horizontal, donc, celui qui pointe vers l'avant). Votre bras se retrouve ainsi en haut, tendu au-dessus de votre tête. Bien. Reprenez maintenant la position initiale, bras tendu vers l'avant, et recommencez, mais cette fois-ci en *inversant* l'ordre des transformations. Tournez d'abord votre bras d'un quart de tour autour de l'axe de votre bras tendu vers l'avant. Vous constatez alors que seule votre main tourne sur elle-même, votre bras étant lui-même l'axe de la rotation. Faites ensuite l'autre transformation, c'est-à-dire tournez votre bras d'un quart de tour vers la droite. Vous y êtes ? Dans ce cas, vous devriez normalement vous retrouver avec votre bras tendu vers la droite, et non vers le haut, c'est-à-dire dans une configuration finale totalement différente de la précédente. Eh bien c'est cela, la non-commutativité. La non-commutativité des rotations en l'occurrence.

Ce que vous venez d'expérimenter, en effet, c'est le fait que deux rotations d'axes différents ne commutent pas : l'ordre avec lequel on les exécute conduit à des résultats différents. Amusant ou anodin, pourrait-on penser... Si ce n'est que cette propriété particulière des rotations (à 3D, car ce n'est évidemment plus le cas à 2D, les rotations partageant toutes le même axe de rotation dans ce cas) illustre précisément *l'essence mathématique* de la physique quantique : le fait que deux

transformations associées à des grandeurs observables peuvent ne *pas* commuter.

Ce qui différencie la physique quantique de la physique classique, c'est en effet que cette non-commutativité ne concerne en fait pas que les rotations, mais également d'autres grandeurs physiques, comme la position et la vitesse, par exemple, pour lesquelles cette propriété est totalement inattendue et désarçonnante. Au niveau le plus fondamental, c'est la non-commutativité qui distingue la physique quantique des autres théories. Sa signature géométrique en quelque sorte. Celle à l'origine des fameuses relations de Heisenberg et de l'existence de cette quantité si mystérieuse qu'on appelle *spin*.

Dualité, intrication, non-commutativité. Trois termes à la sonorité intrigante mais dont vous aurez rapidement une idée plus précise dans les pages qui suivent. Trois mots-clés pour décrire les trois facettes « essentielles » de la physique quantique. Ses trois cœurs : le philosophique, le physique et le mathématique. Et vous, vers lequel votre cœur balance-t-il ?

L'ARBRE DE LA CONNAISSANCE

À force d'être immergé dans l'aventure scientifique, on en oublierait presque certaines questions évidentes. Par exemple, une question toute simple : mais pourquoi donc tout cela ? Pourquoi la science ? Et pourquoi la connaissance est-elle structurée de la sorte ? Pourquoi

certains domaines sont-ils davantage mis en valeur que d'autres ? Et puis, qu'est-ce donc au juste que la science ? Pourquoi comporte-t-elle des domaines distincts, comme la biologie, la chimie, la physique, les mathématiques, l'économie ou encore la philosophie ? Et au sein d'un même domaine, comme la physique par exemple, pourquoi y a-t-il tant de sous-domaines différents ? Physique classique, physique quantique, physique relativiste... On s'y perd ! Y aurait-il une physique mieux que les autres ? Plus précise et plus complète ? Et finalement, quelle place occupe la physique quantique dans cet entrelacs de théories, de domaines et de sous-domaines de la connaissance ?

La première chose que l'on peut répondre à cela est que, du plus loin que le sable de cette plage s'en souvienne, les humains ont constamment tenté de comprendre le monde qui les entourait. En classant les phénomènes, tout d'abord, puis en réduisant leur apparente complexité à quelques idées fondamentales seulement, reliées entre elles de façon logique. La science, au sens large du terme, est alors à la fois cette démarche rationnelle et l'ensemble des expériences, observations et théories qui en résultent. C'est aussi un pan entier de la connaissance, mais qui ne se réduit évidemment pas à elle.

Face à l'ensemble disparate et mystérieux des phénomènes et objets de l'Univers, êtres vivants compris, l'humain semble en effet adopter une démarche universelle : il classe, ordonne, rationalise, pense et émet des hypothèses, puis les teste et affine sa pensée, avant de recommencer le processus. Pour chaque classe de

phénomènes identifiés, il construit alors une *théorie* en dégagant des grands principes, quasi-philosophiques, et en établissant des lois, exprimées généralement en langage mathématique, dont l'objectif est de rendre compte des observations en faisant des prédictions vérifiables et vérifiées.

Parmi les innombrables théories qui ont vu le jour au cours des derniers millénaires, et ce à travers toute la planète, beaucoup sont aujourd'hui tombées dans l'oubli et seule une infime poignée a survécu. Dans l'arbre des connaissances scientifiques, ces théories survivantes occupent une place de choix. Ce sont les branches solides, ou pensées comme telles, sur lesquelles s'appuient les divers domaines et sous-domaines de la science. La physique, pour sa part, est cette partie de l'arbre qui traite de la matière inerte, non-vivante, de sa structure en constituants élémentaires et de son mouvement à travers l'espace et le temps.

Depuis une centaine d'années, deux branches majeures soutiennent l'ensemble des théories de ce domaine : la physique quantique et la relativité générale. D'où arrivent et partent de multiples théories secondaires, de la mécanique des fluides à la physique des particules, en passant par l'électromagnétisme, la thermodynamique et les diverses tentatives d'unification de la gravité avec la physique quantique.

Aussi solides qu'irréconciliables en apparence, ces deux théories fondamentales semblent donc aujourd'hui

se partager notre description du monde. Mais attention, pas n'importe quel monde! Le monde «invisible», tel celui du Petit Prince. Celui qu'on ne peut pas voir. Pas voir car *trop loin* pour nos yeux, et c'est l'infiniment grand de la relativité générale. Ou pas voir car *trop petit* pour nos yeux, et c'est l'infiniment petit de la physique quantique. Mais comme on aura l'occasion de le constater à plusieurs reprises, ce partage des eaux est en fait poreux à plus d'un titre... même, d'ailleurs, avec le troisième infini de la connaissance, l'infiniment complexe du vivant, dans lequel baigne notre monde quotidien, bien visible celui-ci.



LA PHYSIQUE QUANTIQUE EN DIX QUESTIONS

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

Comme expliqué dans les pages qui précèdent, 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