

CHRONO X SCIENCES

John Polkinghorne

# LA THÉORIE QUANTIQUE

edp sciences

John Polkinghorne

# LA THÉORIE QUANTIQUE

La théorie quantique est la découverte la plus révolutionnaire en physique depuis Newton. Dans un langage simple et non mathématique, ce livre dévoile des idées passionnantes et surprenantes qui rendent le monde subatomique si différent du monde de tous les jours.

John Polkinghorne aborde des sujets tels que l'incertitude, la physique probabiliste, la dualité onde/particule, le problème non résolu de la mesure, et parvient à démystifier l'une des plus grandes découvertes de l'histoire de la physique et l'une des plus passionnantes réalisations intellectuelles du  $xx^e$  siècle.

Ainsi, dans un récit mêlant mathématiques et anecdotes historiques, ce petit livre expose tous les concepts de base de la théorie quantique et leurs applications, des années 1920 à nos jours.

John Polkinghorne est un physicien théoricien, théologien et prêtre anglican anglais. Il a étudié tout au long de sa vie la relation entre la science et la religion. Il fut professeur de physique mathématiques à l'Université de Cambridge de 1968 à 1979 et plus tard président du Queens' College. Il est membre de la Royal Society dont il a été fait chevalier en 1997.

 **edp sciences**  
[www.edpsciences.org](http://www.edpsciences.org)

ISBN : 978-2-7598-2571-4



9 782759 825714

# La théorie quantique

« John Polkinghorne nous offre ici le fruit d'un excellent travail... On peut regretter que de nombreux auteurs de livres « populaires » sur la physique moderne aient pris la fâcheuse habitude de mélanger la science factuelle avec la « science-fiction ». Polkinghorne ne commet jamais cette erreur : il laisse toujours la vérité se défendre toute seule et démontrer sa propre fascination. Je pense que c'est une excellente contribution à la documentation sur la théorie quantique destinée au grand public. »

Chris Isham, Imperial College, Londres

« Ce livre splendide explique à la fois le triomphe et le mystère que constitue la théorie quantique. C'est un triomphe en raison de sa structure mathématique imposante et de son étonnante précision empirique. C'est un mystère en raison de les énigmes sur la façon de l'interpréter. John Polkinghorne, lui-même un éminent physicien quantique, est un guide fiable pour tout cela : il célèbre ici les succès de la théorie, et fait preuve d'un jugement sûr s'agissant des énigmes. »

Jeremy Butterfield, Oxford University

CHRONO X SCIENCES

# La théorie quantique

John Polkinghorne

*Traduit de l'anglais par Alan Rodney*

edp sciences

## ChronoSciences

Collection destinée à un large public qui invite le lecteur à découvrir de façon très complète mais de manière abordable un sujet ou une thématique précise.

« Dans la même collection »

*L'Intelligence artificielle*, Margaret A. Boden (à paraître)

*Les Marées*, David George Bowers et Emyr Martyn Roberts (à paraître)

*L'Anthropocène*, Erle C. Ellis (à paraître)

*L'Odorat*, Matthew Cobb (à paraître)

*Quantum Theory: A very short introduction, first edition* was originally published in English in 2002. This translation is published by arrangement with Oxford University Press.

*Quantum Theory: A very short introduction, first edition*, a été initialement publiée en anglais en 2002. Cette traduction est publiée avec l'autorisation d'Oxford University Press.

© John Polkinghorne, 2002

© Pour la traduction française, EDP sciences, 2021.

Composition et mise en page : Desk ([www.desk53.com.fr](http://www.desk53.com.fr))

Imprimé en France

ISBN : 978-2-7598-2571-4

Ebook : 978-2-7598-2572-1

Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction par tous procédés, réservés pour tous pays. La loi du 11 mars 1957 n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, 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 intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (alinéa 1<sup>er</sup> de l'article 40). Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du code pénal.

À la mémoire de  
Paul Adrien Maurice Dirac  
1902-1984

« Je pense pouvoir dire avec force que  
personne ne comprend la mécanique  
quantique. »

Richard Feynman





## Remerciements

Je suis reconnaissant au personnel d'Oxford University Press pour leur aide dans la préparation du manuscrit pour aboutir à la version imprimée, en particulier à Shelley Cox pour un certain nombre de commentaires utiles sur le premier jet du texte.

John Polkinghorne  
Queens' College  
Université de Cambridge





# Sommaire

Préface.....	11
1. Les « fissures » de la physique classique.....	13
2. La lumière de l'aube apparaît.....	27
3. Un horizon paradoxal qui s'assombrit.....	51
4. Des développements supplémentaires.....	71
5. Vers l'unité.....	91
6. Les leçons et leurs significations.....	97
Lectures complémentaires.....	109
Glossaire.....	111
Annexe mathématique.....	115
Index.....	125





## Préface

La découverte de la théorie quantique moderne au milieu des années 1920 entraîna la plus grande révision de notre réflexion sur la nature du monde physique depuis l'époque d'Isaac Newton. Ce qui avait été considéré comme l'arène d'un processus clair et déterministe s'avéra, au niveau de ses racines subatomiques, nébuleux mais bien adapté dans son comportement.

Par rapport à ce changement révolutionnaire, les grandes découvertes de la relativité restreinte et générale ne semblent guère être plus que des variations intéressantes sur des thèmes classiques. En effet, Albert Einstein, le progéniteur de la théorie de la relativité, trouva la mécanique quantique moderne si peu à son goût métaphysique qu'il y resta implacablement opposé jusqu'à la fin de sa vie. Il n'est pas exagéré de considérer la théorie quantique comme l'une des réalisations intellectuelles les plus remarquables du  $xx^e$  siècle et sa découverte comme une véritable révolution dans notre compréhension des processus physiques.

Cela étant dit, la jouissance des idées quantiques ne devrait pas être l'apanage des seuls physiciens théoriciens. Bien que l'articulation complète de la théorie nécessite l'utilisation de son langage naturel, c'est-à-dire les mathématiques, nombre de ses concepts de base peuvent être accessibles au lecteur lambda si ce dernier est prêt à souffrir un peu et se donne la peine de suivre le récit d'une découverte remarquable. Ce petit livre est écrit en pensant à de tels lecteurs. Son texte principal ne contient aucune équation mathématique. Une courte annexe présente, cependant, quelques aperçus mathématiques simples qui éclaireront davantage ceux qui sont capables de digérer une substance un peu plus

forte (les sections de cette annexe sont référencées en caractères gras dans le texte principal).

La théorie quantique s'est avérée incroyablement fructueuse durant les 75 ans qui ont suivi les découvertes initiales. Elle est actuellement appliquée avec confiance et succès dans la discussion sur les quarks et les gluons (les candidats contemporains pour être considérés comme les constituants ultimes de la matière nucléaire), malgré le fait que ces entités soient au moins 100 millions de fois plus petites que les atomes dont le comportement était l'affaire des pionniers quantiques. Pourtant, il existe toujours un profond paradoxe. L'épigraphe de ce livre traduit l'exagération qui caractérisait le discours de ce grand physicien quantique de la deuxième génération, Richard Feynman, mais il est certain que – bien que nous sachions faire les sommes – nous ne comprenons pas la théorie aussi bien que nous le devrions. Nous verrons dans ce qui suit que d'importantes questions d'interprétation restent en suspens. Pour y répondre, elles exigeront une compréhension physique ainsi que quelques décisions d'ordre métaphysique.

Jeune homme, j'ai eu le privilège d'apprendre ma théorie quantique face à Paul Dirac, assistant à ses célèbres cours à l'Université de Cambridge. Le contenu des cours de Dirac correspondait étroitement au traitement donné dans son livre de référence, *The Principles of Quantum Mechanics*, l'un des véritables classiques fondateurs de l'édition scientifique du xx<sup>e</sup> siècle. Dirac fut le plus grand physicien théorique que j'ai connu personnellement, et sa pureté d'esprit comme sa modestie (il n'a jamais mis en avant ses propres contributions pourtant immenses aux fondements de cette discipline) firent de lui une figure inspirante et une sorte de saint scientifique. Je dédie humblement ce livre à sa mémoire.

# 1

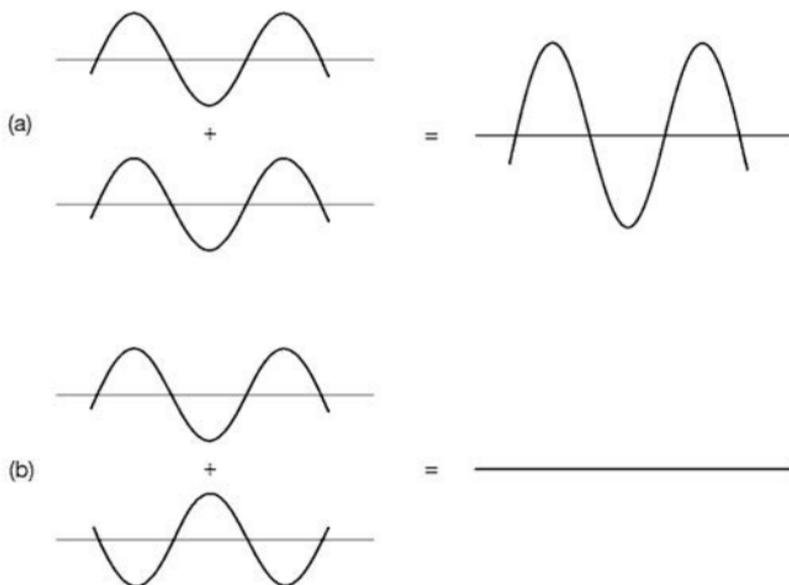
## Les « fissures » de la physique classique

La première floraison de la science physique moderne atteignit son sommet en 1687 avec la publication de l'ouvrage d'Isaac Newton intitulé *Principia*. Par la suite, la mécanique fut établie et reconnue comme une discipline mature, capable de décrire les mouvements des particules de manière claire et déterministe. Cette nouvelle science semblait si complète qu'à la fin du XVIII<sup>e</sup> siècle, le plus grand des successeurs de Newton, Pierre-Simon Laplace, pouvait dire – et il fut applaudi pour cette affirmation – qu'un être doté de pouvoirs de calcul illimités, connaissant parfaitement les dispositions de toutes les particules à un moment donné, pouvait utiliser les équations de Newton pour prédire l'avenir et rétrodater avec une égale certitude le passé de tout l'Univers. En fait, cette affirmation mécaniste plutôt effrayante a toujours été fortement soupçonnée d'être teintée d'orgueil. D'une part, les êtres humains ne se considèrent pas comme des automates mus par des mécanismes d'horlogerie. D'autre part, bien que considérables, les réalisations de Newton n'embrassaient pas tous les aspects du monde physique alors connus à son époque. Il restait des questions non résolues qui menaçaient la croyance en l'autosuffisance absolue de la synthèse newtonienne. Par exemple, quelles étaient la vraie nature et l'origine de la loi universelle de la gravité en carré inverse que Sir Isaac avait découverte ? À cette question, Newton lui-même avait refusé de formuler une hypothèse. Restait aussi la question non résolue de la nature de la lumière. Newton s'autorisa ici une certaine spéculation. Dans son ouvrage *Opticks*, il était enclin à penser qu'un faisceau de lumière était constitué d'un flux de minuscules particules. Ce type de théorie corpusculaire s'accordait avec sa tendance à considérer le monde physique en termes atomistes.

## LA NATURE DE LA LUMIÈRE

Il s'avéra que ce n'est qu'au  $xix^e$  siècle qu'il y eut de réels progrès dans la compréhension de la nature de la lumière. Dès le début du siècle, en 1801, Thomas Young présenta des preuves très convaincantes que la lumière avait pour caractéristique un mouvement ondulatoire. On notera qu'une hypothèse dans ce sens avait été faite plus d'un siècle plus tôt par le contemporain néerlandais de Newton, Christiaan Huygens. Les principales observations faites par Young portaient sur des effets que nous appelons aujourd'hui des phénomènes d'interférence. Un exemple typique est l'existence de bandes alternées de lumière et d'obscurité, qui, assez ironiquement, avait été mise en évidence par Sir Isaac lui-même dans un phénomène appelé « les anneaux de Newton ». Les effets de ce genre sont caractéristiques des ondes et se manifestent comme suit. La manière dont deux trains d'ondes se combinent dépend de la relation entre leurs oscillations l'un par rapport à l'autre. S'ils sont en phase (comme disent les physiciens), alors la crête de l'un coïncide de manière constructive avec la crête de l'autre, ce qui donne un renforcement mutuel maximal. Lorsque cela se produit dans le cas de la lumière, on obtient des bandes de luminosité. Si, en revanche, les deux ensembles d'ondes sont exactement décalés l'un par rapport à l'autre (déphasés), alors la crête de l'un coïncide avec le creux de l'autre ce qui conduit à une annulation mutuelle et on obtient une bande d'obscurité. Ainsi, l'apparition de motifs d'interférence alternant la lumière et l'obscurité est une signature indubitable de la présence d'ondes. Les observations de Young semblent avoir réglé la question. La lumière est de nature ondulatoire.

Au cours du  $xix^e$  siècle, la nature du mouvement ondulatoire associé à la lumière devins apparemment claire. D'importantes découvertes de Hans Christian Oersted et de Michael Faraday montrèrent que l'électricité et le magnétisme, phénomènes qui, à première vue, semblaient très différents, étaient, en fait, intimement liés les uns aux autres. La manière dont ils pouvaient être combinés pour donner une théorie cohérente de l'électromagnétisme fut finalement arrêtée par James Clerk Maxwell – un



**Fig. 1** L'addition des ondes : (a) en phase ; (b) déphasées.

homme doté d'un tel génie qu'on pouvait le comparer à Isaac Newton lui-même. Les célèbres équations de Maxwell, qui constituent encore aujourd'hui la base fondamentale de la théorie de l'électromagnétisme, furent exposées en 1873 dans son *Traité sur l'électricité et le magnétisme*, l'un des livres de référence classiques de l'édition scientifique. Maxwell se rendit compte que ces équations avaient des solutions ondulatoires et que la vitesse de ces ondes était déterminée en fonction de constantes physiques connues. Il s'agissait en fait de la vitesse de la lumière !

Cette découverte a été considérée comme le plus grand triomphe de la physique du XIX<sup>e</sup> siècle. Le fait que la lumière soit des ondes électromagnétiques était on ne peut plus solidement établi. Maxwell et ses contemporains considéraient ces ondes comme des oscillations dans un milieu élastique omniprésent, que l'on a fini par appeler éther. Dans un article d'encyclopédie, il allait même avancer que l'éther était l'entité la mieux confirmée de toute la théorie physique.

Nous avons donné à la physique de Newton et Maxwell le nom de « physique classique ». À la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, elle était devenue un imposant édifice théorique. Il n'est guère surprenant que de grands « anciens », comme Lord Kelvin, en soient venus à penser que toutes les grandes idées de la physique étaient désormais connues et qu'il ne restait plus qu'à en régler les détails avec une précision accrue. Au cours du dernier quart de siècle, un jeune homme en Allemagne qui envisageait une carrière universitaire a été mis en garde contre une carrière dans la physique. Il valait mieux chercher ailleurs, car la physique était au bout du chemin, il restait trop de peu de choses à entreprendre. Le jeune homme s'appelait Max Planck et, heureusement, il a ignoré les conseils qui lui avaient été donnés.

En fait, certaines « fissures » avaient déjà commencé à se manifester dans la splendide façade de la physique classique. Dans les années 1880, les Américains Michelson et Morley réalisèrent des expériences intelligentes destinées à démontrer le mouvement de la Terre à travers l'éther. L'idée était que, si la lumière était effectivement constituée d'ondes dans ce milieu, alors sa vitesse mesurée devait dépendre de la façon dont l'observateur se déplaçait par rapport à l'éther. Pensez aux vagues sur la mer. Leur vitesse apparente, telle qu'observée depuis un navire, dépend du fait que celui-ci se déplace dans le sens des vagues ou dans le sens opposé, apparaissant moins élevée dans le premier cas que dans le second. L'expérience permet de comparer la vitesse de la lumière dans deux directions mutuellement perpendiculaires. Ce n'est que si et seulement si la Terre se trouve « au repos » par rapport à l'éther au moment où les mesures sont effectuées que l'on peut s'attendre à ce que les deux vitesses mesurées soient les mêmes, et cette possibilité peut être exclue en répétant l'expérience quelques mois plus tard, lorsque la Terre se déplace dans une direction différente sur son orbite. En fait, Michelson et Morley n'ont pu détecter aucune différence de vitesse. La résolution de ce problème a nécessité une application de la théorie restreinte de la relativité d'Einstein, qui ignore totalement l'existence de l'éther. Cette grande découverte n'est pas l'objet de notre histoire actuelle, aussi significative et surprenante que fut la relativité, elle n'a pas

aboli les qualités de clarté et de déterminisme que possède la physique classique. C'est pourquoi, dans la préface, j'ai affirmé que la relativité restreinte exigeait beaucoup moins d'être repensée radicalement que la théorie quantique.

## SPECTRES

Le premier signe de la révolution quantique, non reconnu comme tel à l'époque, apparut en 1885. Elle naquit des gribouillages mathématiques d'un maître d'école suisse appelé Balmer. Il pensait au spectre de l'hydrogène, c'est-à-dire à l'ensemble des raies colorées distinctes que l'on voit lorsque la lumière d'un gaz incandescent est divisée en passant à travers un prisme. Les différentes couleurs correspondent à différentes fréquences (différents taux d'oscillation) des ondes lumineuses impliquées. En jouant avec les chiffres, Balmer découvrit que ces fréquences pouvaient être décrites par une formule mathématique assez simple [voir l'Annexe mathématique, 1]. À son époque, cela pouvait être appréhendé comme une simple curiosité.

Plus tard, les scientifiques essayèrent de comprendre le résultat de Balmer en fonction de l'image contemporaine de l'atome. En 1897, J. J. Thomson découvrit que la charge négative d'un atome était portée par de minuscules particules, que l'on nomma « électrons ». On supposait alors que la charge positive d'équilibre était simplement répartie dans l'atome. Cette idée fut appelée « le modèle du *plum-pudding* », les électrons jouant le rôle des prunes et la charge positive celui du pudding. Les fréquences spectrales devaient alors correspondre aux différentes façons dont les électrons pouvaient osciller dans le « pudding » chargé positivement. Il s'avéra toutefois extrêmement difficile de faire appliquer cette idée de manière empiriquement satisfaisante. Nous verrons que la véritable explication de l'étrange découverte de Balmer a finalement été trouvée en utilisant un ensemble d'idées très différentes. Entre-temps, la nature des atomes semblait probablement trop obscure pour que ces problèmes suscitent une anxiété généralisée.

## LA CATASTROPHE ULTRAVIOLETTE

Une autre difficulté, beaucoup plus évidente mais déroutante, fut mise en lumière pour la première fois par Lord Rayleigh en 1900, et appelée « la catastrophe ultraviolette ». Elle était née de l'application des idées d'une autre grande découverte du XIX<sup>e</sup> siècle, la physique statistique. Les scientifiques tentaient alors de comprendre le comportement de systèmes très complexes, dont les mouvements détaillés pouvaient prendre des formes très différentes. Un exemple d'un tel système pourrait être un gaz composé de très nombreuses molécules différentes, chacune ayant son propre état de mouvement. Un autre exemple serait l'énergie rayonnante (ou radiative), qui pourrait être constituée de contributions réparties entre de nombreuses fréquences différentes. Il serait tout à fait impossible de suivre tous les détails de ce qui se passe dans des systèmes de cette complexité, néanmoins, certains aspects importants de leur comportement global pourraient être analysés et mis en équation.

Cela s'explique par le fait que le comportement global résulte d'une moyenne grossière des contributions de nombreux états de mouvement individuels. Parmi ces possibilités, l'ensemble le plus probable domine parce qu'il s'avère être justement le plus probable. Sur la base de cette maximisation de la probabilité, Maxwell et Ludwig Boltzmann ont pu montrer que l'on peut calculer de manière fiable certaines propriétés générales du comportement global d'un système complexe, comme, par exemple, la pression dans un gaz de volume et de température donnés.

Rayleigh appliqua ces techniques de physique statistique au problème de la répartition de l'énergie entre les différentes fréquences dans le cas du rayonnement des corps noirs. Un corps noir est un corps qui absorbe parfaitement toutes les radiations et qui les réémet ensuite toutes. La question du spectre des radiations en équilibre avec un corps noir peut sembler assez originale, mais il existe en fait d'excellentes approximations des corps noirs. C'est donc une question qui peut être étudiée aussi bien de manière expérimentale que théorique, par exemple en étudiant les radiations à l'intérieur d'un four spécialement préparé. La question a été simplifiée par le fait que l'on savait que la réponse ne devait dépendre

Thomson, George 31  
Thomson, Joseph 17, 31

## V

Valeurs propres 42, 43, 47, 121, 122  
Variables cachées 54, 55, 66, 69  
Vecteurs propres 42, 43, 122  
Vide 55, 84, 87, 88

von Neumann, John 50, 55, 65

## W

Wheeler, John Archibold 78  
Wien, Wilhelm 46

## Y

Young, Thomas 14, 22

