

Tim James

**MAGIQUE QUANTIQUE**

Comment la physique quantique  
peut tout expliquer... sauf la gravité!

Préface de Charles Antoine

Traduit de l'anglais (Royaume-Uni)  
par Benjamin Peylet



Copyright © Tim James 2019  
First published in Great Britain in 2019 by Robinson,  
an imprint of Little, Brown Book Group

Copyright © Tim James 2019  
Cet ouvrage a été publié au Royaume-Uni en 2019 par Robinson,  
et imprimé par Little, Brown Book Group, sous le titre original:  
*Fundamental: How Quantum and Particle Physics Explain Absolutely  
Everything (Except Gravity).*

Mise en pages : Nord Compo

**NOUS NOUS ENGAGEONS EN FAVEUR DE L'ENVIRONNEMENT :**



Nos livres sont imprimés sur des papiers certifiés pour réduire notre impact sur l'environnement.



Le format de nos ouvrages est pensé afin d'optimiser l'utilisation du papier.



Depuis plus de 30 ans, nous imprimons 70 % de nos livres en France et 25 % en Europe et nous mettons tout en œuvre pour augmenter cet engagement auprès des imprimeurs français.



Nous limitons l'utilisation du plastique sur nos ouvrages (film sur les couvertures et les livres).

© Dunod, 2020 pour la traduction française,  
2024 pour l'édition de poche  
11 rue Paul Bert, 92240 Malakoff  
[www.dunod.com](http://www.dunod.com)  
ISBN 978-2-10-086261-0

*Ce livre est dédié aux élèves de Northgate High School.*

*« Même quand les scientifiques sont sûrs de leur coup,  
la nature a le chic pour les surprendre. »*

*Nemesis, Isaac Asimov*



## Préface

Quel plaisir d'avoir découvert ce livre de Tim James ! Et quel plaisir de vous savoir à votre tour en route dans son exploration !

«Un livre doit avoir la force d'une poignée de main», m'a un jour confié le poète Christian Bobin. Et le sourire réjoui du lecteur passionné ! ajouterais-je volontiers, tant ce petit livre réussit le tour de force d'exposer avec simplicité et humour les concepts les plus élaborés de la physique quantique.

Nul besoin d'être géomètre pour entrer ici. Encore moins d'être expert quantique ! Il suffit d'être curieux et de ne pas avoir peur de muscler ses neurones autant que ses zygomatiques.

Car si la rigueur et la précision sont de mise dans cet ouvrage complet, c'est avec une légèreté aérienne et parfois malicieuse que Tim James nous entraîne dans la découverte du monde quantique, de ses concepts clefs, et des applications modernes qui en découlent et peuplent notre quotidien.

Mais ce n'est pas seulement un vent de fraîcheur aux effluves quantiques que fait souffler cet amoureux des sciences. Il est en effet le témoin d'un changement dans notre façon d'envisager la vulgarisation et

la transmission de la physique quantique. Car il est temps aujourd'hui de révolutionner notre manière de transmettre cette science, elle qui a transfiguré notre façon de voir le monde depuis bientôt cent ans.

Et si vous lisez ces lignes, vous êtes sûrement familiers de citations presque plus célèbres que leurs auteurs suggérant que la physique quantique serait une science extrêmement difficile, quasi inaccessible, absurde et incompréhensible même, réservée à une élite intellectuelle dont les efforts pour percer son mystère originel resteraient vains, tels des Sisyphe perdus sur le rocher de l'abstraction.

À l'instar du pétillant Tim James, je refuse cet état de fait et reste persuadé qu'une nouvelle génération de « passeurs quantiques » est en train d'éclorre et permettra, reprenant les mots du grand physicien Freeman Dyson, à tout un chacun de se sentir dans les années à venir « *at home with quantum ideas* »...

Et si le monde quantique défie aujourd'hui notre sens commun et remet en cause toutes nos certitudes dans tous les domaines, le donner à connaître – à défaut de comprendre – au plus grand nombre est un acte social autant que politique. Un acte nécessaire et salvateur tant l'omniprésence quantique semble se conjuguer au futur (que ce futur soit singulier ou pluriel, comme ceux des mondes parallèles).

Insoumise et transgressive, la physique quantique est comme la poésie pour Jean-Pierre Siméon, elle « illimite le réel et récuse la segmentation et

l'immobilisation du sens». De façon évidente, elle est l'outil intellectuel idoine pour appréhender le monde de demain.

Qu'on se le dise, la physique quantique n'est pas compliquée, elle est étrange. Elle «semble» étrange. Pour l'instant en tous cas. En fait, elle attend juste son heure, l'heure d'un nouveau Jules Vernes pour reprendre les mots visionnaires du philosophe Michel Serres. Et cela tombe bien que vous ayez ce livre entre les mains, car son insondabilité supposée se languit d'être percée par votre regard neuf et curieux.

Drôle, léger et profond, avec des analogies originales, parlantes et tranchantes, le livre de Tim James participe de cette révolution de la démocratisation scientifique et saura parler à tous les lecteurs, des plus novices aux plus érudits. Le genre de livre dont le monde a aujourd'hui besoin.

Le genre de livre que j'aurais aimé écrire.

Le genre de livre qui ouvre des portes sur les toits.

Bon voyage!

Charles Antoine,  
Physicien, auteur de *Schrödinger à la plage*



# Prologue

## La fin

La Nature a perdu la tête. Quand on va au plus profond, jusqu'aux lois fondamentales de la physique, tout en bas, dans la cave, on débarque dans un royaume chaotique et fou où connaissance et imagination se confondent.

Ce ne devrait pas être une surprise, après tout ; il paraît censé de s'interroger sur l'état mental d'un univers qui permet à l'étoile de mer d'exister. Cependant, même quand on est habitué aux excentricités de la nature, la physique quantique a de quoi surprendre.

Tout commence à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, une époque où les gens étaient bien contents d'eux. Ils avaient cartographié les étoiles, isolé l'ADN et s'apprêtaient à briser l'atome. Leur savoir était presque complet, au point qu'ils paraissaient à l'aube du couronnement final : la fin de la science.

Il restait évidemment quelques casse-tête scientifiques étranges, que personne n'avait résolus, mais c'étaient de petites curiosités mineures qui pendouillaient dans un coin, comme les fils qui dépassent d'une jolie tapisserie. Et il fallut que nous tirions sur

ces fils, et tout ce que nous tissions depuis des siècles se délita soudain pour découvrir un nouveau paysage. Un paysage quantique.

Richard Feynman, prix Nobel, avait ouvert une série de conférences sur la physique quantique par ces mots : « Mes étudiants en physique ne la comprennent pas. Je ne la comprends pas. Personne ne la comprend. »<sup>1</sup> La sentence est déprimante, venant de celui que certains considèrent comme le plus grand théoricien de la physique quantique. Si quelqu'un d'aussi brillant que Feynman ne parvenait pas à tout saisir de ce sujet, comment nous autres, pauvres mortels, le pourrions-nous ?

Ce qu'il fallait comprendre, toutefois, c'est que Feynman ne disait pas que la physique quantique est trop *compliquée* pour être comprise. Il la jugeait en fait trop *étrange*.

Mettons que quelqu'un vous demande d'imaginer un triangle à quatre côtés, ou vous dise de penser à un nombre plus petit que dix mais plus grand qu'un milliard. Ces instructions n'ont rien de compliqué, toutefois vous auriez bien du mal à vous y conformer car elles n'ont pas de sens. C'est précisément ce à quoi va ressembler notre voyage en pays quantique.

C'est un monde de triangles à quatre côtés et de nombres qui n'obéissent pas aux règles habituelles. Un endroit où des univers parallèles et des paradoxes vous guettent à chaque coin de rue, où les objets ne se préoccupent plus ni de l'espace ni du temps.

Malheureusement, nos cerveaux ne sont pas conçus pour assimiler des folies de ce genre. Le monde sous nos yeux n'est pas assez étrange pour nous donner une idée juste de la nature telle qu'elle est au fond. C'est pourquoi, songeant à la physique quantique, le physicien Niels Bohr a dit que «le langage ne peut plus être que poésie»<sup>2</sup>.

L'erreur que beaucoup commettent est de trouver la physique quantique si perturbante qu'ils se jugent trop peu intelligents pour la saisir. Ne soyez pas déstabilisés. Si vous trouvez tout cela bizarre et dérangeant, parfait ; vous avez de votre côté les plus grands esprits de l'histoire.

C'est de ceux qui affirment tout comprendre à la physique quantique que vous devriez vous méfier. Quelque chose cloche chez ces gens-là.



# Rougir de fierté

## Une lumineuse histoire

La physique quantique est née du désir de comprendre la lumière, une énigme qui a creusé bien des têtes, et ce depuis des millénaires. Le philosophe grec Empédocle fut le premier à théoriser sa nature, quelque part autour du v<sup>e</sup> siècle av. J.-C.

Il pensait que l'œil humain contenait une pierre de feu magique qui dardait ses rayons vers l'extérieur, illuminant ainsi tout ce que nous regardions<sup>1</sup>. Une idée poétique, qui présentait un défaut évident : si nos yeux généraient la lumière à la manière de torches, nous devrions être capables de voir dans le noir.

Empédocle est aussi le type qui nous a légué l'idée aujourd'hui démentie des quatre substances élémentaires (feu, eau, air et terre). Il a même suggéré que la diversité biologique s'expliquait par la présence de membres isolés rampant un peu partout dans le monde et s'agglutinant au hasard pour former les corps des animaux.

On peut ainsi dire que, du point de vue de l'histoire des sciences, le boulot d'Empédocle fut d'imaginer les idées les plus folles afin que tous les autres puissent le contredire. Cela dit, s'agissant des rayons lumineux, il nous a fallu mille trois cents ans pour nous en rendre compte.

Ce n'est qu'après l'érudit arabe Alhazen autour de l'an mille (965-1040) que nous avons abandonné cette idée. Alhazen fit une expérience, il disséqua un œil de cochon et prouva que la lumière rebondissait dans cette cavité comme dans une chambre noire. Ainsi, la lumière émanait plutôt des objets autour de nous, et nos yeux ne faisaient que se mettre en travers de son chemin<sup>2</sup>.

Il peut sembler bizarre que plus d'un millénaire fût nécessaire pour nous assurer que nos yeux ne lançaient pas des rayons laser, mais c'était une autre époque. Tout le monde croyait alors que les humains conféraient aux objets leur raison d'exister. Il était inutile qu'ils aient une apparence quand personne ne les regardait.

Heureusement, la suggestion d'Alhazen qui proposait que l'expérience passe avant l'ego humain s'imposa progressivement et nous décidâmes que la lumière, quelle que fût sa nature, émanait des objets eux-mêmes et passait par nos yeux en ligne droite. Puis vint la Renaissance.

On peut estimer que le scientifique et philosophe le plus important de la Renaissance fut René Descartes, qui nous légua la nouvelle grande idée quant à la physique de la lumière.

Descartes observa que, lorsqu'une bougie est allumée, la lumière atteint tous les coins de la pièce en même temps, de la même manière que les vaguelettes nées au centre de l'étang parviennent au même moment sur tous ses bords. La lumière, se dit-il en conséquence, devait être un phénomène du même type. Il devait y avoir une substance invisible qui nous entourait en toute direction, et la lumière était le résultat d'ondes et de vaguelettes se déplaçant dans ce milieu<sup>3</sup>.

Le seul qui n'était pas trop d'accord avec cette idée de vague dans l'espace était Isaac Newton, qui s'était donné pour mission principale de contredire tous ceux qu'il considérait comme moins intelligents que lui (c'est-à-dire à peu près tout le monde).

Newton remarqua que, si la lumière était une vague se déplaçant dans un milieu, elle devrait infléchir sa course quand elle croisait un obstacle, comme une vague modifie légèrement sa trajectoire autour d'un rocher. En conséquence, les contours des ombres devraient être flous, or, ils sont très nettement dessinés au contraire, si bien qu'il est plus sensé d'imaginer la lumière comme constituée de particules, qu'il appela des « corpuscules »<sup>4</sup>.

La théorie corpusculaire de la lumière s'imposa inévitablement contre la théorie ondulatoire de Descartes, principalement en vertu de la notoriété de Newton et de la hargne qu'il mettait à écraser quiconque le défiait.

Si bien que Newton aurait été horrifié d'apprendre les résultats de l'expérience de Thomas Young, qui montra que l'inverse était vrai soixante-dix ans après sa mort. La mort de Newton, veux-je dire. Thomas Young ne fit que bien peu d'expériences après la sienne.

## Nouvelle Vague

Thomas Young était doté de l'un des plus beaux esprits que le XVIII<sup>e</sup> siècle ait produits. Il est peut-être plus connu pour sa traduction de la pierre de Rosette, ce qui fit de lui le premier homme à avoir déchiffré les hiéroglyphes<sup>5</sup>. Il fut également le premier à identifier les récepteurs de la couleur dans nos yeux. Il écrivit plusieurs livres de médecine, parlait quatorze langues, jouait d'une douzaine d'instruments de musique et développa une théorie moderne de l'élasticité<sup>6</sup>.

L'expérience de Young qui fit vraiment des vagues dans la théorie de la lumière date de 1801. On la connaît sous le nom d'expérience de la double fente.

Revenons à l'image des vaguelettes qui parcourent un étang. Imaginez un front régulier de vagues se déplaçant sur une surface liquide calme, et passant par une digue interrompue en son milieu. Quand les vagues passent par l'interstice, elles s'évasent légèrement, un processus nommé diffraction.

La raison qui explique ce déploiement est que le bord de la vague dissipe son énergie dans l'eau environnante. Vu du dessus, on obtient une disposition semblable au schéma ci-après, où les crêtes des vagues

sont figurées par des lignes pleines, et les creux par des pointillés.

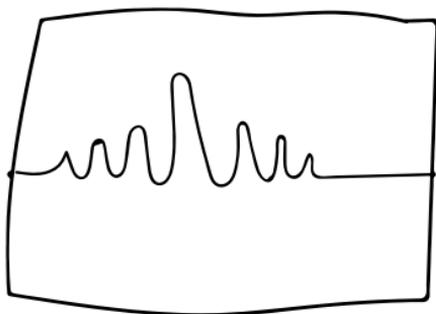


Perçons à présent notre digue de deux trous. La même chose se passe, seulement cette fois, on obtient deux vagues qui sont diffractées en même temps, puis se superposent et se mélangent. Vu du dessus, cela donne :



Par endroits, les vagues se superposent parfaitement, la crête de la première correspond exactement à la crête de la seconde, si bien qu'on observe une méga-crête à la surface de l'eau. Entre ces méga-crêtes, on constate l'effet inverse, où la crête de l'une rencontre le creux de l'autre. En ces endroits, les vagues se neutralisent, et la surface de l'eau est presque lisse.

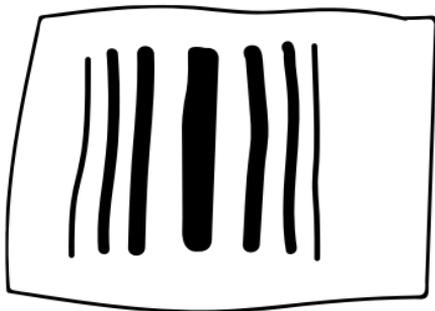
Si on place à présent un écran au bout de l'étang, les vagues mélangées le frappent avec des alternances de méga-crêtes et de presque rien neutralisé. Si on regarde cet écran de face plutôt que du dessus, voilà le schéma qu'on observe :



Ce qu'on voit là est un effet d'interférence entre deux vagues qui sont diffractées à la sortie d'une double fente, un schéma alternant hautes et basses intensités. Ce phénomène est appelé « superposition ».

Ce que fit Thomas Young, c'est reproduire ce schéma de superposition d'ondes, mais avec la lumière à la place de l'eau. En allumant une chandelle contre un mur percé de deux trous, Young obtint une alternance de bandes de lumière zébrée, ombre et lumière,

sur son écran de détection, très semblable au schéma obtenu quand on mélange des vagues (voir ci-après).



Si la lumière était faite de particules comme l'affirmait Newton, celles-ci devraient se faufiler par les ouvertures pour venir s'écraser toutes ensemble en formant un gros pâté sur l'écran placé de l'autre côté. Les zébrures qu'on obtient ne peuvent s'expliquer que si la lumière a, d'une manière ou d'une autre, une nature ondulatoire.

L'objection de Newton sur la précision des contours d'une ombre tenait toujours, mais à présent qu'il était mort, quelques-uns osaient remettre en question ses enseignements. Quand on regarde une ombre de très près, on observe en réalité des contours flous, seulement ces flous sont tout petits et il est facile de les rater. C'est impossible à expliquer par le biais d'une théorie corpusculaire de la lumière ; en revanche, cela peut s'interpréter comme une onde qui s'infléchit au passage d'un obstacle.

La substance qui transporte ces ondes, ce milieu cher à Descartes, trouva bientôt un nom sophistiqué,

l'éther luminifère. Et voilà! La nature de la lumière était établie. Enfin, presque.

L'idée de Descartes était fondamentalement en avance sur son temps et ne fut acceptée qu'après cette preuve expérimentale. Ce qui nous pousse à penser qu'il ne faut jamais juger une situation sans avoir tout Descartes en main, une blague pour laquelle je serais presque tenté de présenter mes excuses. Presque.

## La catastrophe du siècle

Dans la première décennie du xx<sup>e</sup> siècle, plus personne ne se demandait de quoi la lumière était faite. Young avait donné la réponse. Quelques détails n'entraient cependant pas dans les cases, le plus célèbre d'entre eux étant les interactions de la lumière avec un objet chaud. Et pour comprendre ce mystère, je vais devoir vous refourguer un tuyau.

Imaginez un tuyau d'arrosage dont l'embout est branché au bas d'une boîte. Quand on ouvre l'eau, la boîte se remplit peu à peu, jusqu'à ce que ça déborde. Mais supposez maintenant qu'on y ajoute un couvercle pourvu de trois trous, un petit, un moyen, un grand.

Quand on ouvre l'eau cette fois, la boîte se remplit toujours, puis elle se met à déborder par les trous au sommet. On devrait noter un gros bouillon sortant du gros trou, et un petit écoulement venu du plus petit. On ne peut pas dire que cet appareillage soit

très utile, mais enfin, rien de compliqué jusqu'ici. On fourre de l'eau en bas, ça sort par les trous en haut.

C'est une bonne analogie avec la façon dont un objet brille quand il s'échauffe. Quand un objet chauffe, il absorbe et absorbe l'énergie calorique jusqu'à ce qu'il ne puisse plus la contenir, alors celle-ci s'épanche hors de l'objet sous forme de lumière.

Le tuyau dans cette analogie représente la chaleur appliquée à l'objet et les trous, différents types de lumière émis. Le plus petit représente les infrarouges (trop peu énergétiques pour être vus), le trou du milieu est la lumière visible (de rouge à violet) et le plus gros trou les ultraviolets (trop énergétiques pour être vus).

Les objets sombres sont les plus efficaces pour cette conversion chaleur-lumière, car ils absorbent toute l'énergie qui les frappe. C'est pourquoi l'objet théorique qui absorbe parfaitement la chaleur est appelé un « corps noir » dans le jargon des physiciens (même s'il n'est pas vraiment noir).

Tout cela est très bien décrit par une équation simple, la loi de Rayleigh-Jeans, qui donne une bonne approximation du phénomène, surtout aux températures faibles à modérées. Mais quand ça chauffe vraiment, quelque chose de très étrange se produit.

En toute logique, le plus gros de la lumière émise par un objet chaud devrait être restitué sous forme d'ultraviolets puisque c'est la lumière de plus haute

énergie (le plus gros trou dans notre analogie du tuyau). Mais en réalité, presque toute la lumière émise par l'objet prend une valeur moyenne.

Eh oui, il y a bien un peu d'infrarouge et un peu d'ultraviolet, mais un objet chaud émet surtout du jaune/orange, ce qui n'a aucun sens. Ce serait comme si on remplissait la boîte d'eau et que tout jaillissait par le trou moyen plutôt que par le gros.

En réalité, la situation est encore plus troublante que dans notre analogie à trois trous, parce que la lumière peut prendre toutes les valeurs qu'elle veut ; elle n'est pas limitée à trois choix. Une image plus juste serait ainsi celle d'une fente au sommet de la boîte de laquelle l'eau ne jaillirait qu'au centre, ignorant les côtés sans qu'on sache comment ni pourquoi.

Le physicien autrichien Paul Ehrenfest parlait de ce problème comme de la « catastrophe des ultraviolets »<sup>7</sup>, et les manuels de physique lui ont emboîté le pas depuis en la nommant « catastrophe ultraviolette ».

Cette situation illustre un désaccord entre la théorie et l'expérience. Dans ces cas-là, en science, c'est la théorie qui doit changer. On ne peut exiger d'une expérience qu'elle produise tel ou tel résultat. Si la théorie ne prévoit pas les données obtenues, bye bye la théorie.

La catastrophe est survenue en raison des idées apparemment incorrectes sur le fonctionnement de l'énergie lumineuse. Personne n'aurait pu deviner qu'ajuster légèrement ces idées allait nous mettre sur la voie de

la révolution quantique. Par ailleurs, celui qui trouva la réponse n'envisageait rien de si radical. Il voulait simplement inventer une ampoule bon marché.

## Planck et vous !

Max Planck était le plus jeune d'une famille de six enfants. Il sortit de l'école en 1875, avec un an d'avance. Il voulut s'inscrire à l'université de Munich pour y étudier la physique mais le professeur von Jolly (c'est vraiment son nom), qui examina sa candidature, tenta de l'en dissuader sous prétexte que la physique était pratiquement achevée alors et que ce serait en conséquence gâcher un si bel esprit<sup>8</sup>.

Jolly grimaça, mais Planck tint bon. Il insista pour suivre le cours qu'il avait choisi. Il se fichait bien de découvrir quelque chose de nouveau, car il ne tenait pas à entrer dans l'histoire. Il voulait simplement comprendre le fonctionnement du monde et ne comptait pas qu'on le lui interdise. Planck ne cachait pas ses intentions.

Jolly, impressionné par cette détermination, décida d'admettre Planck, qui devint bientôt l'une des figures les plus respectées de la physique européenne. Ses conférences étaient paraît-il si populaires que l'on s'y pressait épaule contre épaule pour y assister. Des rumeurs parlent même d'auditeurs s'évanouissant sous l'effet de la chaleur, ce que tout le monde faisait mine d'ignorer de peur que Planck ne mette fin à la leçon.