

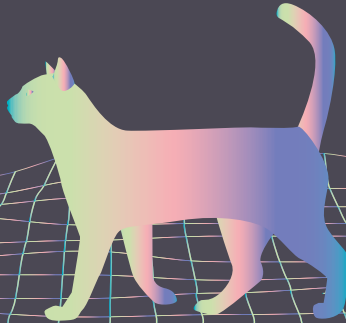
JOHN
GRIBBIN

LES MYSTÈRES DU MONDE QUANTIQUE

6 INTERPRÉTATIONS
IMPOSSIBLES

$$a_0 = \frac{4\pi\epsilon_0\hbar^2}{m_e q^2}$$

$$\Gamma_k[\Phi, \bar{\Phi}] = \sum_{\alpha=1}^{\infty} g_{\alpha}(k) P_{\alpha}[\Phi, \bar{\Phi}].$$



$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi = \hat{H} \Psi.$$

$$|\psi_n(t)\rangle = i\hbar \frac{\partial}{\partial t} |\psi_n(t)\rangle$$

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial k} \Psi = \hat{H} \Psi.$$

ALISIO
SCIENCES

Fascinantes sont les règles du monde quantique. Elles nous disent qu'un chat peut être mort et vivant à la fois et qu'une particule peut se trouver à deux endroits en même temps. Depuis près d'un siècle, les meilleurs esprits se heurtent à ces mystères. Or, appliquée, la physique quantique est à l'origine de certaines des plus grandes avancées de la science : les lasers, le gps, bientôt l'ordinateur quantique à la puissance de calcul incomparable... Les scientifiques font donc face à ce dilemme : continuer à effectuer des équations quantiques sans en chercher la signification ou tenter de déchiffrer la réalité qu'elles recouvrent.

Par son talent de vulgarisateur, John Gribbin nous plonge dans le monde de l'infiniment petit à la découverte des six principales interprétations des grands physiciens qui ont relevé le défi de décoder la réalité quantique. Dans ce voyage au sein de la matière invisible, nous revivons les expériences d'Einstein, de Feynman, de Schrödinger... Leurs interprétations sont impossibles d'après le sens commun, et pourtant... Le monde n'existerait-il pas sauf quand nous le regardons ? Tout ce qui pourrait arriver est-il déjà arrivé et nous n'en aurions remarqué qu'une partie ? À vous à présent d'en décider.

JOHN GRIBBIN est docteur en astrophysique et enseigne à Cambridge. Qualifié par le journal *The Spectator* de « Plus grand vulgarisateur de notre époque », il est l'auteur d'une centaine de livres de vulgarisation scientifique, dont notamment *Le chat de Schrödinger : Physique quantique et réalité* (Flammarion, 2009).

ISBN 978-2-37935-148-8



9 782379 351488

18 €
PRIX TTC
FRANCE

Rayon : Sciences

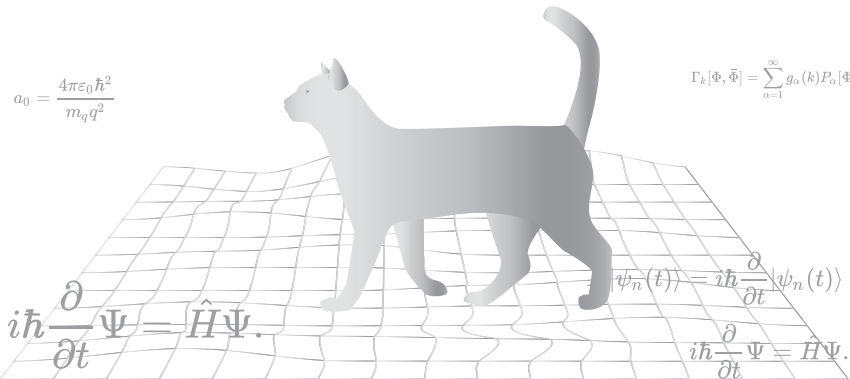
ALISIO
SCIENCES

JOHN
GRIBBIN

LES MYSTÈRES DU MONDE QUANTIQUE

$$a_0 = \frac{4\pi\epsilon_0\hbar^2}{m_q q^2}$$

$$\Gamma_k[\Phi, \bar{\Phi}] = \sum_{a=1}^{\infty} g_a(k) P_a[\Phi, \bar{\Phi}].$$



ALISIO
SCIENCES

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS

What's it all about, Alfie?

Il nous faut un réconfort quantique 13

PREMIER ACTE

Le mystère central 19

DEUXIÈME ACTE

Le réseau intriqué 35

RÉCONFORT 1

La pas si merveilleuse interprétation

de Copenhague 53

RÉCONFORT 2

La pas si impossible interprétation de l'onde

pilote..... 71

RÉCONFORT 3

L'excédent de bagages

Interprétation des mondes multiples85

RÉCONFORT 4

L'interprétation incohérente de la décohérence...105

RÉCONFORT 5

La non-interprétation des ensembles..... 123

RÉCONFORT 6

L'intemporelle interprétation transactionnelle141

CONCLUSION

There Ain't No Sanity Clause 161

Lectures conseillées..... 165

L'auteur de ce livre 169

« Alice se mit à rire. “Inutile d’essayer, dit-elle, on ne peut pas croire aux choses impossibles.”

“Je présume que tu manques d’entraînement, répondit la Reine. Quand j’étais jeune, je le faisais une demi-heure chaque jour. Il m’est arrivé de croire jusqu’à six choses impossibles avant le petit déjeuner.” »

Alice au pays des merveilles

Lewis Carroll

SOLACE, *angl., n. (pl. -es)* réconfort ou consolation à un moment de grand désarroi.

AVANT-PROPOS

**WHAT'S IT ALL
ABOUT, ALFIE¹?**

**IL NOUS FAUT
UN RÉCONFORT
QUANTIQUE**

1. « À quoi rime tout ça, Alfie ? », en français. Titre d'une chanson à succès des années 1960. (NdT)

Étrange est la physique quantique. Étrange pour nous, du moins, car les règles du monde quantique, qui gouvernent la marche du monde au niveau des atomes et des particules subatomiques (le comportement de la lumière et de la matière, disait Richard Feynman), ne sont pas celles auxquelles nous sommes habitués – les règles de ce que nous appelons le « bon sens ».

Les règles quantiques nous disent apparemment qu'un chat peut être mort et vivant à la fois, tandis qu'une particule peut se trouver à deux endroits en même temps. Cette particule est aussi une onde, d'ailleurs, et tout dans le monde quantique peut être décrit entièrement en termes d'ondes, ou entièrement en termes de particules, à votre gré. Erwin Schrödinger a découvert les équations décrivant le monde quantique des ondes, Werner Heisenberg a découvert les

équations décrivant le monde quantique des particules et Paul Dirac a prouvé que ces deux versions de la réalité décrivent le monde quantique de manière exactement équivalente. Tout cela était clair dès la fin des années 1920. Mais, au grand désarroi de bien des physiciens, sans parler des mortels ordinaires, personne (ni alors, ni depuis) n'a pu trouver une explication de bon sens à ce qui se passe.

Certains préfèrent ignorer le problème en espérant qu'il s'en ira de lui-même. Les équations (quelle que soit votre version préférée) fonctionnent si vous voulez faire des choses telles que concevoir un laser, expliquer la structure de l'ADN ou construire un ordinateur quantique. « Tais-toi et calcule » se sont entendu dire des générations d'étudiants – ne demande pas ce que *signifie* les équations, contente-toi de mouliner les chiffres. Ce qui équivaut à se boucher les oreilles en chantonnant « la-la-la, je n'entends pas ce que tu dis ». Des physiciens plus réfléchis ont cherché à se reconforter autrement. Ils ont trouvé divers moyens plus ou moins improbables pour « expliquer » ce qui se passe dans le monde quantique.

Ces remèdes, les *quanta of solace* (réconforts quantiques), sont appelés « interprétations ». Aucune de celles-ci n'est meilleure qu'une autre au niveau

des équations, bien que les interprètes et leurs suiveurs prétendent tous qu'il n'y a qu'une seule vraie foi, leur propre interprétation chérie, et traitent en hérétiques tous ceux qui adhèrent à une autre. D'un autre côté, aucune des interprétations n'est pire qu'une autre mathématiquement parlant. Ce qui signifie très probablement que quelque chose nous échappe. Peut-être découvrira-t-on un jour une magnifique nouvelle description du monde qui fera les mêmes prédictions que l'actuelle théorie quantique, mais qui en plus paraîtra logique. L'espoir est permis, en tout cas.

Cependant, je me suis dit qu'il serait bon d'établir une présentation agnostique de certaines des principales interprétations de la physique quantique. Toutes sont loufoques au regard du bon sens, et certaines sont plus loufoques que d'autres, mais il est question ici d'un monde où loufoque ne signifie pas nécessairement faux. J'ai choisi six exemples, la demi-douzaine traditionnelle, en grande partie pour légitimer ma citation d'*Alice*. J'ai mon propre avis sur leurs mérites respectifs. J'espère ne pas le laisser transparaître : à vous de faire votre choix – ou bien sûr de vous boucher les oreilles en chantonnant « la-la-la, je n'entends pas ce que tu dis ».

Avant de présenter ces interprétations, pourtant, je dois préciser ce que nous essayons d'interpréter. La science procède souvent par à-coups. En l'occurrence, néanmoins, il paraît opportun de commencer par un autre hommage à Charles Lutwidge Dodgson², en deux actes.

John Gribbin

Juin 2018

2. Alias Lewis Carroll, auteur d'*Alice au pays des merveilles*.
(NdT)

PREMIER ACTE

**LE MYSTÈRE
CENTRAL**

L'étrangeté du monde quantique est tout entière résumée dans ce qu'il est convenu d'appeler « l'expérience de la double fente ». Richard Feynman, récompensé d'un prix Nobel pour ses apports à la physique quantique, préférerait parler de l'« expérience avec deux trous ». Il disait qu'il s'agit d'un « phénomène impossible, *absolument* impossible, à expliquer de façon classique et qui contient le cœur de la mécanique quantique. En réalité, il renferme le *seul* mystère... les particularités élémentaires de toute la mécanique quantique »³.

3. *Leçons sur la physique* (Odile Jacob, 2000). Dans ce contexte, les termes « physique quantique » et « mécanique quantique » sont interchangeable. Par « physique classique », on désigne tout ce qui précède la relativité et la théorie quantique.

Ce qui surprendra peut-être tous ceux qui se souviennent de l'expérience réalisée à l'école, en cours de physique, pour « démontrer » que la lumière est une forme d'onde.

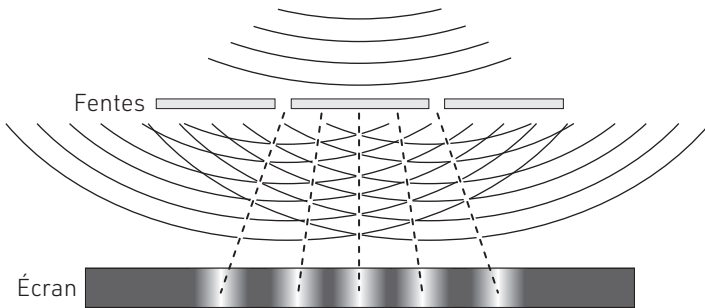
La version scolaire de l'expérience se déroule dans une pièce plongée dans l'obscurité. Une lumière est projetée sur un écran simple – une feuille de carton ou de papier – percé de deux trous d'épingle ou, dans certaines versions, de deux étroites fentes parallèles. Au-delà de cet écran s'en trouve un second, sans le moindre trou. La lumière passée par les deux trous du premier écran parvient au second écran où elle dessine un motif d'ombre et de lumière. La manière dont la lumière se diffuse en sortant des deux trous est appelée diffraction, et le motif est appelé figure d'interférences, car il est le produit de deux rayons lumineux, provenant des deux trous, qui se diffusent et interfèrent l'un avec l'autre. Et cette figure correspond exactement à celle que vous vous attendriez à voir si la lumière voyageait sous forme d'onde. Ici, les ondes s'additionnent et forment une tache brillante sur le second écran ; ailleurs, la crête de l'une des ondes correspond au creux de l'autre de sorte qu'elles s'annulent mutuellement et laissent une

zone sombre. Vous pouvez voir exactement le même genre de figure d'interférences dans les ondulations provoquées par deux cailloux jetés en même temps sur un plan d'eau calme. L'une des caractéristiques remarquables de ce genre d'interférences est que la tache lumineuse la plus brillante du second écran ne se trouve pas directement derrière l'un ou l'autre des deux trous, mais exactement à équidistance des deux, à l'endroit même où vous vous attendriez à ne voir que du noir si la lumière était en réalité un flux de particules. Car en ce cas, vous compteriez voir une tache lumineuse derrière chaque trou et de l'obscurité entre les deux taches.

Jusqu'ici, tout va bien. Cela prouve que la lumière voyage sous forme d'onde, comme Thomas Young l'avait compris au début du XIX^e siècle. Au début du XX^e siècle, hélas, des expériences d'un autre genre ont montré que la lumière se comporte comme un flux de particules. Elles faisaient intervenir des électrons éjectés d'une surface de métal par un rayon lumineux – l'effet photoélectrique. Si l'on mesurait l'énergie des électrons éjectés, il s'avérait qu'elle était toujours identique, quelle que soit la couleur de la lumière. Avec une lumière intense, les électrons éjectés sont plus nombreux,

mais tous possèdent la même énergie, et celle-ci est identique à l'énergie de chacun des électrons moins nombreux éjectés quand on baisse la lumière. C'est Albert Einstein qui a expliqué ce phénomène en termes de particules de lumière, que nous appelons aujourd'hui photons – et que lui-même appelait quanta de lumière. La quantité d'énergie transportée par un photon dépend de la couleur de la lumière, mais pour toute couleur tous les photons ont la même énergie. Comme le disait Einstein, « la conception la plus simple est qu'un quantum de lumière transfère son énergie entière à un seul électron ». Augmenter la lumière revient seulement à fournir plus de photons (quanta de lumière) ayant chacun la même énergie à transmettre aux électrons. C'est pour ce travail, et non pour ses théories de la relativité, qu'Einstein a reçu le prix Nobel. Après s'être représenté la lumière comme une onde pendant un siècle, les physiciens devaient désormais la considérer comme une particule – mais alors, comment expliquer l'expérience avec deux trous ?

Le mystère central



Les pointillés montrent où les ondes se renforcent, produisant des taches brillantes sur l'écran

Quand la lumière traverse deux fentes pratiquées dans un écran, les ondes se diffusent à partir de chacune d'elles et dessinent une figure d'interférences, comme des rides sur un étang.

Le pire restait à venir. Après avoir vu la nature ondulatoire de la lumière mise en doute par les expériences sur l'effet photoélectrique, les physiciens, décontenancés, ont dû constater dans les années 1920 que les électrons, particules archétypiques du monde subatomique, pouvaient se comporter comme des ondes. Cette fois, les expériences utilisaient des faisceaux d'électrons projetés à travers de minces feuilles d'or, d'un dix millièmètre à un cent millièmètre de millièmètre d'épaisseur, et étudiés de l'autre côté. Elles ont montré que les flux d'électrons étaient

diffractés quand ils traversaient les espaces séparant les ensembles d'atomes du métal, tout comme la lumière l'était dans l'expérience avec deux trous. George Thomson, auteur de ces expériences, a reçu le prix Nobel pour avoir prouvé que les électrons sont des ondes. Son père, J.J. Thomson, avait lui-même obtenu un prix Nobel pour avoir prouvé que les électrons sont des particules (il était encore en vie quand le prix a été remis à George). Les deux distinctions étaient justifiées. Rien ne démontre plus clairement la bizarrerie du monde quantique. Mais l'histoire ne s'arrête pas là.

L'énigme de la dualité onde-particule, selon une expression consacrée, est au cœur des débats théoriques sur la signification de la mécanique quantique depuis les années 1920. Une grande partie de ces conjectures sur les fondements de la mécanique quantique ont apporté aux physiciens un réconfort (*solace*) dont je parlerai plus tard. Mais puisque l'énigme est apparue dans toute sa gloire au cours d'une série d'expériences superbes menées à partir des années 1970, je vais d'abord enjamber un demi-siècle de quête du réconfort pour vous raconter ce qu'on sait aujourd'hui du mystère central. Si ce qui suit vous paraît difficilement acceptable, rappelez-vous ce que

disait Mark Twain : « La vérité est plus étrange que la fiction, mais c'est parce que la fiction est obligée de rester dans les limites du possible, et pas la vérité. »

En 1974, trois physiciens italiens, Pier Giorgio Merli, Gian Franco Missiroli et Giulio Pozzi, ont mis au point une technique destinée à observer l'équivalent de l'expérience avec deux trous pour les électrons. Au lieu d'un faisceau de lumière, ils ont utilisé un faisceau d'électrons émis par un filament chauffé et traversant un dispositif appelé biprisme à électrons. Le faisceau y pénètre par une seule entrée mais rencontre un champ électrique qui le partage en deux, la moitié des électrons ressortant par une issue et l'autre moitié par une autre. Ils parviennent alors à un écran détecteur, tel un écran d'ordinateur, où l'arrivée de chaque électron produit un point blanc. Les points persistent, de sorte qu'une figure se forme sur l'écran au fur et à mesure de l'expérience. Un électron solitaire projeté à travers le biprisme a autant de chances d'aller dans une direction que dans l'autre, et il produit un seul point sur l'écran. Si un faisceau contenant beaucoup d'électrons traverse le dispositif, il produit beaucoup de points qui se superposent sur l'écran, et qui ensemble forment un motif – la figure d'interférences attendue avec les ondes.