

La révolution inachevée d'Einstein

Lee Smolin

La révolution inachevée d'Einstein

Au-delà du quantique

Traduit de l'anglais (États-Unis) par
Marc Lachièze-Rey

DUNOD

Originally published as: "Einstein's Unfinished Revolution:
the search for what lies beyond the quantum".
Copyright © 2019 by Spin Networks, Ltd. All rights reserved.

Cet ouvrage a été publié sous le titre original :
« Einstein's Unfinished Revolution: the search for what lies
beyond the quantum ».
Copyright © 2019 by Spin Networks, Ltd. Tous droits réservés.

Illustration de couverture : Delphine Dupuy

Illustrations intérieures : Kaća Bradonjić

© Dunod, 2019 pour la traduction française
11 rue Paul Bert, 92240 Malakoff
www.dunod.com
ISBN 978-2-10-079553-6

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.

Pour Dina et Kai

« Tout ce qu'un musicien peut faire, c'est de se rapprocher des sources de la nature, et sentir ainsi qu'il communique avec les lois naturelles. »

John Coltrane

« Je peux dire sans risque de me tromper que personne ne comprend la mécanique quantique. »

Richard Feynman

Prologue

Les êtres humains ont toujours eu du mal à distinguer réalité et fantaisie. Nous inventons des histoires pour expliquer le monde, et comme nous sommes de bons conteurs, nous finissons par nous laisser influencer par elles, et par confondre nos représentations du monde avec le monde lui-même. Cette confusion afflige autant les scientifiques que les profanes ; en fait, elle nous touche même davantage, tant les histoires que nous avons dans nos besaces sont puissantes.

Nous approfondissons notre compréhension du monde naturel en considérant des phénomènes de plus en plus petits et de plus en plus élémentaires. Mais ce sont nos succès mêmes qui nous empêchent de progresser davantage. Tout en conservant notre confiance – certes justifiée – dans le pouvoir de nos connaissances établies, nous devons garder une conscience aiguë du caractère hypothétique de nos conjectures, même les plus probables. Sans cet équilibre, l'enlèvement nous guette. La leçon est difficile à apprendre : nos sensations sont en partie causées par la réalité, mais entièrement construites par notre cerveau, qui nous présente le monde sous une apparence qui nous permet de nous frayer un chemin dans la nature. Mais c'est au-delà de ces sensations que plane la nature elle-même, fondamentalement mystérieuse, à la limite de nos possibilités de connaissance.

Nous n'avons pas, à ce jour, identifié les caractéristiques les plus importantes de la nature. Les faits généraux les plus simples que nous connaissons à son propos résultent de siècles d'efforts intenses effectués par les chercheurs et les scientifiques : par exemple le fait que la matière est constituée d'atomes, ou que la Terre est une coquille sphérique de roches entourant un noyau en fusion, enveloppée dans une atmosphère mince, en orbite dans le vide autour d'un réacteur thermonucléaire

naturel. Chacun de ces faits est d'abord apparu comme une idée presque folle, en conflit avec d'autres hypothèses beaucoup plus évidentes et raisonnables, mais pourtant fausses.

Avoir un esprit scientifique, c'est d'abord respecter les faits consensuels qui résultent de générations de résolutions de conflits, mais c'est aussi être attentif à ce qui demeure inconnu. Il est indispensable de rester humble et de garder à l'esprit la notion d'un mystère essentiel du monde. Plus nous les examinons de près, plus les aspects connus deviennent mystérieux : plus on en sait, plus c'est étrange. Rien, dans la nature, n'est suffisamment ordinaire pour que sa contemplation ne puisse conduire vers un sentiment d'émerveillement et de gratitude de faire partie de tout cela.

Ce matin de printemps, l'air qui passe par la fenêtre ouverte amène les odeurs fraîches du jardin. Par quel miracle cela se produit-il ? Comment les molécules sont-elles transportées par la brise, et transformées par notre odorat en cet heureux parfum ? Nous voyons des couleurs éclatantes, et nous nous rappelons l'histoire qui raconte comment les différentes longueurs d'onde de la lumière excitent différents neurones. Mais comment les sensations de rouge ou de bleu peuvent-elles être causées par l'excitation de différents neurones ? De quelle sorte sont ces sensations, les *qualia* comme les appellent les philosophes ? En quoi les sensations d'odeurs diffèrent-elles des sensations des couleurs ? Et pourquoi cette diversité de stimuli, si toutes se résument à des impulsions électriques entre neurones ? Quel est le moi qui se réveille le matin ? Et quel est l'univers qui m'entoure quand j'ouvre les yeux ? Les faits les plus simples de notre existence et de notre relation au monde restent des mystères.

Passons de la difficile question de la conscience à des questions plus simples. En tant que scientifique, je crois que c'est la meilleure façon d'aboutir quelque part. Je commencerai par une question très simple : qu'est-ce que la matière ? J'attrape un caillou que mon fils a laissé sur la table. Son poids et sa forme s'insèrent confortablement dans ma main – sûrement une sensation très ancienne. Mais qu'est-ce qu'un caillou ?

Nous connaissons l'apparence qu'il nous présente. Mais celle-ci relève de nous-même qui l'observons, au moins autant que de lui en propre.

Cette apparence, les sensations qu'il nous fait ressentir, fournissent peu d'indications sur ce qui constitue son essence profonde, sa qualité d'« être un caillou ». Nous savons que la plus grande partie du volume qu'il occupe est en fait un espace vide, dans lequel sont disposés des atomes. Sa solidité, sa dureté ne sont des constructions de notre esprit qui intègre nos perceptions sur des échelles bien supérieures à celle des atomes.

La matière se présente sous de nombreuses formes. Certaines d'entre elles – la roche, la matière organique dont sont tissées nos couvertures, draps et vêtements... – apparaissent complexes. Concentrons-nous d'abord sur une forme plus simple : l'eau dans notre verre. Qu'est-ce que c'est ?

À nos yeux et au toucher, l'eau apparaît lisse, continue. Il y a un peu plus d'un siècle, les physiciens pensaient encore que la matière était entièrement continue. Au début du xx^e siècle, Albert Einstein a montré que c'était faux : l'eau est constituée de myriades d'atomes, organisés en triolets, liés entre eux sous forme de molécules (dont chacune comporte deux atomes d'hydrogène et un atome d'oxygène).

Oui, mais qu'est-ce qu'un atome ? Moins d'une décennie après Einstein, les physiciens ont compris que chaque atome ressemble à un petit système solaire, avec un noyau au centre à la place du Soleil, et des planètes représentées par des électrons.

Tout va bien encore, mais qu'est-ce qu'un électron ? Nous savons que les électrons se présentent en unités discrètes. Chacune, appelée précisément *électron*, porte une certaine quantité de masse et de charge ; un électron peut avoir un emplacement dans l'espace. Il peut également bouger : on le regarde une fois, il est ici ; on le regarde à nouveau, il est là... Mais au-delà de ces attributs, il n'est pas facile de donner une image claire de ce qu'est vraiment un électron. Ce problème occupera une place importante dans ce livre.

C'est la branche de la science appelée *physique quantique* qui nous fournit la meilleure compréhension de ce que sont les roches, l'eau, les molécules, les atomes et les électrons. Mais c'est un royaume plein de paradoxes et de mystères. La physique quantique décrit un monde dans lequel rien n'a d'existence stable : un atome ou un électron peuvent apparaître comme une onde ou comme une particule selon la façon

dont on les regarde ; un chat pourrait être à la fois vivant et mort. C'est sans doute une bonne chose pour la culture populaire, qui a fait de « quantique » un terme à la mode pour désigner ce qui bizarre, mystérieux. Mais c'est terrible pour ceux d'entre nous qui veulent comprendre le monde dans lequel nous vivons, car il ne semble pas y avoir de réponse facile à la simple question : « Qu'est-ce qu'un caillou ? »

Dans le premier quart du xx^e siècle, une théorie appelée *mécanique quantique* a été développée. Depuis ses débuts, elle a été l'enfant chéri de la science. C'est la base de notre compréhension des atomes, du rayonnement et de tant d'autres choses, des particules élémentaires aux forces fondamentales, en passant par le comportement des matériaux.

Mais c'est aussi, depuis longtemps, un enfant turbulent. Dès l'origine, ses inventeurs ont été profondément divisés sur ce qu'il fallait en faire. Certains ont ressenti un choc et des appréhensions, voire de l'indignation. D'autres ont déclaré qu'il s'agissait d'un nouveau type de science révolutionnaire qui brisait les hypothèses métaphysiques sur la nature et sur nos relations avec elle ; des hypothèses que les générations précédentes avaient jugées essentielles pour le succès de la science.

J'espère que les chapitres suivants vous convaincront que les problèmes conceptuels et les désaccords enflammés qui ont caractérisé la physique quantique depuis sa création ne sont pas résolus, et qu'ils ne peuvent l'être pour la simple raison que la théorie n'est pas la bonne. Elle fonctionne extrêmement bien, mais elle est incomplète. Si nous voulons des réponses simples à nos questions simples sur ce que sont les roches, nous devons dépasser la mécanique quantique pour décrire un monde qui ait un sens à l'échelle atomique.

Cette tâche pourrait sembler extrêmement difficile s'il n'était un aspect presque oublié et longtemps ignoré de l'histoire de la mécanique quantique. Depuis les balbutiements de l'ère quantique, dans les années 1920, il existe une version alternative de la physique quantique qui a du sens, une obscure théorie qui résout les paradoxes et les mystères apparents du domaine quantique. Le scandale – je crois ce terme justifié – est que cette forme alternative de théorie quantique est rarement enseignée et rarement mentionnée, que ce soit dans les manuels scolaires pour les physiciens en herbe ou dans la vulgarisation à destination des profanes.

Il existe aujourd'hui plusieurs formulations alternatives de la physique quantique qui ont un sens cohérent. Le défi consiste à s'appuyer sur elles pour trouver la bonne façon de comprendre la physique quantique, celle qui opère dans la nature. Je pense que cela engendrera de vastes répercussions, car cette nouvelle forme de physique quantique devrait résoudre bon nombre des problèmes de la physique en suspens : des questions comme la gravité quantique ou l'unification des interactions, sur lesquels nous n'avons fait que peu de progrès définitifs. Il me semble que si nous piétinons, c'est parce que, à la base, nous avons une théorie erronée.

Les physiciens s'entendent sur les aspects essentiels du monde quantique : atomes et rayonnements se comportent différemment des cailloux ou des chats. Et nous reconnaissons tous que la mécanique quantique permet de prédire certains aspects de leurs comportements. Mais nous divergeons quant à ce que cela signifie de déclarer que notre monde est un monde quantique. Il paraît clair qu'un changement radical dans notre compréhension de la nature est nécessaire, mais nous ne sommes pas d'accord sur la nature de ce changement. Certains prétendent que nous devons abandonner toute image de la réalité et nous contenter d'une théorie qui se borne à décrire la connaissance que nous pouvons acquérir sur le monde. D'autres pensent que notre notion de réalité doit être largement étendue afin de pouvoir embrasser une infinité de réalités parallèles. Mais en fait, aucune de ces hypothèses ne s'impose. Les visions alternatives du monde quantique ne nous obligent pas à renoncer à l'idée que la physique décrit une réalité indépendante de ce que nous en connaissons. Elles n'exigent pas non plus que nous étendions cette réalité au-delà du bon sens : il est possible de conserver l'idée que le monde est unique, et que c'est bien lui que nous voyons lorsque nous regardons autour de nous. Comme je l'expliquerai ici, ce que nous savons de la physique quantique ne menace pas le réalisme de bon sens : la science peut aspirer à donner une image complète du monde naturel tel qu'il est, et ceci même en notre absence.

Il apparaît donc à la fois inutile et regrettable que le domaine quantique ait été présenté comme mystérieux et contre-intuitif. L'un des objectifs de ce livre est de présenter aux profanes les théories quantiques alternatives, de lever ainsi le voile du mystère et de présenter

le monde quantique d'une manière intuitive et accessible aux non-spécialistes en physique.

J'imagine mon lecteur pourvu d'une forte curiosité pour la nature, se tenant au courant de l'actualité scientifique à travers les articles, les blogs et les livres de vulgarisation, mais sans formation en mathématiques, habituellement considérées comme le langage de la physique. J'utiliserai plutôt des mots et des images pour expliquer les phénomènes de base rencontrés dans le monde quantique, ainsi que les principes que leur étude a inspirés. Après le prologue, trois courts chapitres décrivent les bases élémentaires de la physique quantique ; ils vont nous équiper pour explorer les différents univers conceptuels, correspondant aux différentes formes de théorie quantique qui ont été proposées.

Quel est l'enjeu du débat sur la mécanique quantique ? Pourquoi importe-t-il que notre vision fondamentale du monde naturel soit ou non mystérieuse et paradoxale ?

Derrière les débats centenaires autour de la mécanique quantique, se cache un désaccord fondamental sur la nature de la réalité ; un désaccord qui, s'il n'est pas résolu, se transforme en un débat sur la nature de la science elle-même. Deux questions sous-tendent les controverses.

Tout d'abord, le monde naturel existe-t-il indépendamment de notre esprit ? Plus précisément, la matière possède-t-elle des propriétés *en soi*, indépendamment de ce que nous pouvons en percevoir et connaître ?

Deuxièmement, avons-nous la capacité de comprendre et de décrire ces propriétés ? Pouvons-nous appréhender suffisamment les lois de la nature pour expliquer l'histoire de notre Univers et prédire son avenir ?

Les réponses à ces deux questions entraînent des implications encore plus larges, à propos de la nature et du but de la science, et de son rôle dans le plus grand projet humain. Elles concernent en effet la frontière entre réalité et fantaisie.

Ceux qui répondent « oui » à ces deux questions sont appelés les *réalistes*. Einstein était réaliste. Je suis aussi réaliste. Nous, les réalistes, croyons qu'il existe un monde réel, dont les propriétés ne dépendent en rien de la connaissance ou de la perception que nous en avons : la nature est telle qu'elle est, même en notre absence. Nous croyons également que le monde peut être compris et décrit avec une précision

suffisante pour expliquer comment se comporte n'importe quel système dans le monde naturel.

Si vous êtes réaliste, vous croyez que la science consiste en la recherche systématique d'une telle explication. Mais c'est une notion naïve de la vérité : les affirmations sur des objets ou des systèmes sont *vraies* dans la mesure où elles correspondent à des propriétés authentiques de la nature.

Si vous répondez « non » à l'une de ces questions ou aux deux, vous êtes un *antiréaliste*. La plupart des scientifiques sont réalistes à propos des objets du quotidien, à l'échelle humaine : une chose que nous pouvons voir, ramasser, jeter, a des propriétés simples et faciles à comprendre. Elle existe à chaque instant quelque part dans l'espace. Elle se déplace en suivant une trajectoire, de vitesse bien définie (par rapport à quelqu'un qui la décrit). Elle possède une masse, un poids... Si je dis à mon ami que le carnet rouge qu'il cherche se trouve sur la table, je m'attends à ce que cela soit tout simplement vrai ou faux, indépendamment de nos connaissances ou de nos perceptions.

La description de la matière – depuis, disons, l'échelle la plus petite que nous puissions voir à l'œil nu jusqu'à celle des étoiles et des planètes – est appelée *physique classique*. Elle a été mise au point par Galilée, Kepler, Newton... Les théories relativistes d'Einstein en constituent le couronnement.

Mais à l'échelle des atomes individuels et des particules, il est beaucoup moins facile, et loin d'être évident, d'avoir une vision réaliste de la matière, précisément à cause de la mécanique quantique ! Celle-ci constitue actuellement notre meilleure théorie de la nature à l'échelle atomique, mais comme je l'ai mentionné, certaines de ses caractéristiques sont très troublantes. Une opinion très répandue voudrait que ces caractéristiques interdisent une vision réaliste ; qu'elles exigent que nous répondions « non » à l'une ou l'autre des deux questions ci-dessus ; que si la mécanique quantique est bien la description correcte de la nature, cela nous obligerait de renoncer au réalisme.

La plupart des physiciens ne sont pas réalistes quand il s'agit d'atomes, de rayonnements et de particules élémentaires. Leur conviction ne résulte pas d'un désir de rejeter le réalisme à cause de positions philosophiques radicales. Mais ils sont convaincus que la mécanique

quantique est une théorie correcte, et ils croient, comme on le leur a enseigné, que la mécanique quantique interdit le réalisme.

Si cela était vrai, alors être réaliste impliquerait de croire que la mécanique quantique est fautive : son succès ne serait que temporaire ; il ne pourrait s'agir d'une description vraiment correcte de la nature à l'échelle atomique. C'est ainsi qu'Einstein a rejeté la mécanique quantique : il n'y voyait rien de plus qu'un expédient temporaire.

Comme d'autres réalistes, il jugeait incomplète la description de la nature qu'elle nous fournit, estimant qu'il lui manquait certaines caractéristiques nécessaires à une compréhension complète du monde. Il a imaginé que des « variables cachées », qui complèteraient la description du monde exprimée par la mécanique quantique, pourraient exister. Il pensait que l'inclusion de ces éléments permettrait une description complète, conforme au réalisme.

S'il veut adopter un point de vue réaliste, un physicien est ainsi soumis à un impératif primordial : celui de dépasser la mécanique quantique pour découvrir ces caractéristiques manquantes ; et de construire, à partir de là, une véritable théorie des atomes. Ce fut la mission inachevée d'Einstein. Et c'est la mienne.

On peut distinguer différents types d'antiréalisme, qui conduisent à des points de vue distincts sur la mécanique quantique.

Certains antiréalistes pensent que les propriétés que nous attribuons aux atomes et aux particules élémentaires ne sont pas inhérentes à ces objets : elles seraient seulement créées par les interactions que nous pouvons avoir avec eux ; elles n'existeraient que dès lors que nous les mesurons. Nous les qualifierons d'*antiréalistes radicaux*. Niels Bohr, le plus influent d'entre eux, fut le premier à appliquer la théorie quantique à l'atome ; puis il devint le leader et le mentor de la nouvelle génération des révolutionnaires quantiques. Son antiréalisme radical a influencé en grande partie la façon dont la théorie quantique a été comprise.

D'autres antiréalistes pensent que la science, dans son ensemble, ne parle pas de ce qui est réel dans la nature, mais de notre connaissance du monde. Les propriétés que la physique attribue à un atome ne concerneraient pas cet atome, mais seulement la connaissance que nous en avons. Ils peuvent être appelés *épistémologues quantiques*.

Ensuite, les antiréalistes dits *opérationnalistes* sont agnostiques quant à l'existence ou non d'une réalité fondamentale indépendante de nous. La mécanique quantique, selon eux, n'est en aucun cas liée à la réalité ; il s'agit plutôt d'un ensemble de procédures d'interrogation à propos des atomes. Elle ne peut parler des atomes eux-mêmes, mais seulement de ce qui se passe lorsque les atomes entrent en contact avec les gros appareils que nous utilisons pour les mesurer. Werner Heisenberg, le plus célèbre des protégés de Bohr et un des inventeurs des équations de la théorie quantique, fut au moins en partie un opérationnaliste.

Antiréalistes radicaux, épistémologues quantiques et opérationnalistes ont des conceptions distinctes. À l'opposé, nous les réalistes, partageons une perspective commune en nous accordant sur les réponses aux deux questions posées ci-dessus. Nous divergeons cependant sur la façon de répondre à une troisième question : le monde naturel se compose-t-il uniquement des types d'objets que nous discernons lorsque nous regardons autour de nous, et de leurs constituants ? En d'autres termes : ce que nous apercevons autour de nous constitue-t-il la totalité de l'Univers ?

Ceux d'entre nous qui répondent par l'affirmative à cette question peuvent être qualifiés de réalistes *simples* ou *naïfs*. J'utilise l'adjectif « naïf » pour signifier « sans complication ». Pour moi, une vue est naïve si elle n'a pas besoin de justifications sophistiquées ou alambiquées. Et je pense qu'un réalisme naïf est à privilégier dans la mesure du possible.

D'autres sont réalistes sans être naïfs dans ce sens. Ils croient en une réalité, mais très différente du monde que nous pouvons percevoir et mesurer. Un exemple de ce point de vue est la théorie des « univers multiples », selon laquelle le monde que nous percevons ne serait qu'un monde parmi une vaste pluralité de mondes parallèles, en constante augmentation. Ses partisans méritent la désignation de réalistes car ils répondent « oui » aux deux premières questions. Mais ils ne le sont à mon avis que dans le sens le plus technique et académique du terme. On pourrait peut-être les appeler des *réalistes magiques*, car ils croient que ce qui est réel se situe bien au-delà du monde que nous pouvons percevoir. En ce sens, le réalisme magique est presque une forme de

mysticisme, car il implique que le vrai monde est totalement en dehors de notre perception.

Est-il possible de formuler une théorie réaliste des atomes, au sens le plus général et le plus naïf du terme : qui réponde « oui » aux trois questions ? Oui, et c'est cela que je veux évoquer dans ce livre. Mais cette théorie n'est pas la mécanique quantique ; et si elle est exacte, alors la mécanique quantique ne l'est pas, dans le sens où la description qu'elle donne de la nature serait très incomplète.

L'histoire de la physique est telle que cette approche naïvement réaliste a été mise de côté, tandis que se sont au contraire développées des théories qui exigeaient d'embrasser soit l'antiréalisme, soit le mysticisme. Je terminerai toutefois sur une note d'espoir, en esquissant une façon de progresser vers une vision quantique réaliste de la nature.

Tout cela est important, car ce début de XXI^e siècle voit la science attaquée, et avec elle la croyance en un monde réel, en un monde au sein duquel un fait est soit vrai soit faux. Et ce n'est pas une vue de l'esprit, car une partie de la société semble effectivement avoir renoncé à toute légitimité de la frontière entre réalité et fantaisie.

La science est attaquée par ceux qui trouvent que ses conclusions ne conviennent pas à leurs objectifs politiques et commerciaux. Le changement climatique, par exemple, ne devrait pas être un sujet de débat politique. Il ne relève pas d'une idéologie, mais il concerne la sécurité globale et devrait être traité comme tel. Il s'agit d'un véritable problème, qui nécessite des solutions fondées sur des données probantes.

La science est également attaquée par certains fondamentalistes religieux ; ceux qui affirment que les textes anciens nous enseignent des vérités immuables de Dieu. Je vois personnellement peu de raisons de conflit entre la plupart des religions et la science. De nombreuses religions acceptent – voire célèbrent – la science comme la voie de la connaissance du monde naturel. Il subsiste suffisamment de mystère au-delà, à propos de l'existence et de la signification du monde, pour que science et religion trouvent des sujets de discussion, même s'ils n'aboutissent pas nécessairement.

Une religion ne doit pas chercher à attaquer ou contrer les découvertes scientifiques ; si nous considérons celles-ci comme des connaissances

établies, c'est parce qu'elles sont étayées par des preuves accablantes, qu'admettent tous ceux qui sont suffisamment instruits pour évaluer leur validité. Et c'est bien le cas de nombreux guides religieux, quelle que soit leur confession. En retour, les scientifiques devraient considérer ces dirigeants éclairés comme des alliés pour bâtir un monde meilleur.

Enfin, la science est encore attaquée d'une manière différente par certains universitaires des « sciences humaines » ; ceux qui prétendent que la discipline n'est rien de plus qu'une construction sociale comme les autres, qu'elle se borne à fournir une perspective parmi tout un éventail d'autres tout aussi valables.

La science doit répondre clairement et fermement à ces défis. Et dans cette optique, se garder de toute corruption par d'éventuelles aspirations mystiques de ses propres praticiens. Il ne fait aucun doute que la plupart des scientifiques sont parfois motivés par des sentiments mystiques et des idées préconçues métaphysiques. Mais cela ne nuit aucunement à leur pratique scientifique, tant que les critères qui distinguent hypothèses et vérités universellement établies restent compris et respectés.

Mais quand la physique fondamentale est détournée par une philosophie antiréaliste, elle est en danger. Cela introduit le risque que nous abandonnions ce projet séculaire du réalisme, qui n'est rien de moins que l'ajustement de la frontière entre les domaines de la réalité et de la fantaisie, qui évolue de manière continue au fur et à mesure du progrès des connaissances.

L'antiréalisme menace la pratique de la physique elle-même. Il réduit notre ambition d'une compréhension claire de la nature, en affaiblissant nos critères quant à la compréhension d'un système physique. Cette popularité dont il jouit à propos du monde atomique a déclenché des spéculations antiréalistes étendues aux plus grandes échelles : certains cosmologues proclament par exemple, au moins oralement, que l'Univers que nous voyons autour de nous ne serait qu'une bulle dans un vaste océan qu'ils appellent le *multivers*, qui contiendrait une infinité d'autres bulles, invisibles, régies par des lois diverses et réparties au hasard ; et que *notre* Univers serait loin d'être typique de l'ensemble. Comme toutes (ou presque toutes) les autres bulles seraient absolument hors de portée de toute observation, cela signifie que l'hypothèse

ne pourra jamais être testée ou falsifiée. Bien qu'elle outre passe clairement les limites de la science, cette fantaisie est pourtant soutenue par quelques physiciens et mathématiciens de renom.

Ce serait une erreur de confondre cette fantaisie du multivers avec la théorie des univers multiples de la mécanique quantique. Ce sont des idées bien distinctes. Néanmoins, elles partagent une même subversion de la science, de type réaliste magique, alors que la science a pour tâche d'expliquer le monde autour de nous sans faire appel à autre chose que le monde lui-même. Si les partisans du multivers ont pu détourner la tâche et le dessein de la science, c'est, me semble-t-il, parce qu'une majorité de physiciens avaient adopté auparavant, sans esprit critique, des versions antiréalistes de la physique quantique.

Comme nous l'avons écrit, la mécanique quantique* explique de nombreux aspects de la nature, et elle le fait avec une élégance suprême. Les physiciens ont mis au point une boîte à outils très puissante pour expliquer divers phénomènes en ses termes : elle vous permet de maîtriser une large part de la nature. En même temps, cette même mécanique quantique laisse subsister des trous béants dans notre compréhension du monde : elle ne fournit aucune image de ce qui se passe vraiment dans les processus individuels ; le plus souvent, elle n'explique pas pourquoi une expérience se déroule d'une façon plutôt que d'une autre.

Ces lacunes et ces échecs sont importants. Ils signalent une sorte d'essoufflement, alors que nous n'avons parcouru qu'une partie du chemin vers la solution des problèmes centraux de la science. Je crois par exemple que notre impuissance à harmoniser la théorie quantique avec la gravité et l'espace-temps (ce que nous entendons par « quantifier la gravité ») ou à unifier les interactions, résulte de notre utilisation d'une théorie quantique incomplète et incorrecte.

Je soupçonne des implications encore plus profondes de cette construction de la science sur des bases incorrectes. Lorsqu'un courant

* NdT : Il est important de distinguer, au fil de l'ouvrage, « physique quantique » et « mécanique quantique » ; la première est la discipline qui s'intéresse aux phénomènes quantiques, quelle que soit la manière dont on les envisage ; la seconde est une théorie bien particulière, que Lee Smolin critique ici, et à laquelle il propose des alternatives.

radical d'antiréalisme s'épanouit sur ses fondements, c'est la confiance même en la science, comme méthode de résolution des désaccords et d'identification de la vérité, qui est ébranlée ; lorsque ceux qui devraient établir la norme de ce qui constitue l'explication sont séduits par un mysticisme virulent. La confusion qui en résulte se fait sentir dans toute la culture.

J'ai eu le privilège de rencontrer quelques membres de la deuxième génération des fondateurs de la physique du xx^e siècle. L'un des plus contradictoires était John Archibald Wheeler, théoricien du nucléaire et mystique. Il a transmis l'héritage d'Albert Einstein et de Niels Bohr à ma génération, en nous contant les histoires de ses amitiés avec eux. Wheeler a travaillé sur la bombe à hydrogène alors même qu'il était le pionnier de l'étude des univers quantiques et des trous noirs. Il fut également un grand mentor, qui a compté parmi ses élèves Richard Feynman, Hugh Everett, et plusieurs des pionniers de la gravité quantique. Et il aurait pu être le mien, si j'avais eu un meilleur jugement.

Véritable disciple de Bohr, Wheeler a parlé par énigmes et paradoxes. Son tableau noir différait de tous ceux que j'ai pu rencontrer : pas d'équations, seulement quelques aphorismes élégamment écrits, chacun présenté dans un cadre, distillant une vie entièrement consacrée à chercher la raison pour laquelle notre monde est quantique. Un exemple typique était « It from bit »*. Wheeler fut l'un des premiers à suggérer de considérer le monde comme étant constitué d'information, et l'information comme plus fondamentale que ce qu'elle décrit. Une forme d'antiréalisme, très à la mode en ce moment, sur laquelle nous reviendrons. En voici un autre : « Aucun phénomène n'est réel tant qu'il n'est pas observé. » Pour illustrer le genre de conversation que l'on pouvait tenir avec lui, il m'a un jour demandé : « Supposons que vous mourriez et comparaisiez devant saint Pierre pour votre examen final ; il vous pose une seule question : "Pourquoi le quantique ?" » (C'est-à-dire, pourquoi vivons-nous dans un monde décrit par la mécanique quantique ?) « Que vas-tu lui répondre ? »

* NdT : La formulation de Wheeler est consacrée ; une traduction beaucoup moins élégante pourrait être « la matière c'est de l'information ».

J'ai passé une grande partie de ma vie à chercher une réponse satisfaisante à cette question. Alors que j'écris ces pages, je me rappelle très vivement mes premières rencontres avec la physique quantique. À dix-sept ans, après le lycée, j'avais pris l'habitude de parcourir les rayons de la bibliothèque de physique de l'université de Cincinnati. J'y ai un jour trouvé un livre contenant un texte de Louis de Broglie (que nous rencontrerons au chapitre 3) qui, le premier, proposa l'idée que les électrons sont des ondes aussi bien que des particules. Ce texte présentait sa théorie de l'onde pilote, qui a constitué la première formulation *réaliste* de la mécanique quantique. C'était en français, une langue que deux années d'études secondaires me permettaient de lire assez bien. Je me souviens encore de mon enthousiasme lorsque j'en ai compris les bases. En fermant les yeux, je peux encore voir la page du livre affichant l'équation qui relie la longueur d'onde à l'impulsion*.

Mon premier cours de mécanique quantique, donné par Herbert Bernstein, a eu lieu le printemps suivant au Hampshire College. Il s'est terminé par une présentation du théorème fondamental de John Bell¹. En bref, ce dernier démontre que le monde quantique s'accorde difficilement avec notre vision de l'espace. Je me souviens qu'après avoir compris la preuve du théorème, je suis sorti dans l'après-midi chaud et me suis assis stupéfait sur les marches de la bibliothèque. J'ai sorti un cahier et immédiatement écrit un poème à une fille qui me plaisait. Je lui écrivis que, chaque fois que nous nous touchions, il y avait dans nos mains des électrons qui devenaient intriqués. Je ne me souviens plus qui elle était, ni ce qu'elle a fait de mon poème, ni même si je le lui ai montré. Mais mon obsession de pénétrer le mystère de l'intrication non locale a commencé ce jour-là et ne m'a jamais quitté depuis ; l'urgence à mieux comprendre le quantique ne s'est pas atténuée au cours des décennies qui ont suivi. Les énigmes de la physique quantique sont restées le mystère central sur lequel je suis revenu encore et encore au cours de ma carrière. J'espère que ces pages vous inspireront une fascination similaire.

* NdT : L'impulsion est également appelée *moment cinétique* ; et parfois, en abrégé, tout simplement *moment*. Mais nous n'utiliserons pas ce terme pour éviter toute confusion.'

Prologue

L'histoire que je raconte dans ce livre a la forme d'une pièce en trois actes. Le premier enseigne les concepts de base de la mécanique quantique, tout en retraçant l'histoire de son invention (ce que je raconte ici n'est qu'une esquisse ; la véritable histoire est beaucoup plus complexe). Le thème principal est le triomphe des antiréalistes, menés par Bohr et Heisenberg, sur les réalistes, dont le champion était Einstein. Le deuxième acte retrace la renaissance des approches réalistes à partir des années 1950, dont j'expose les points forts et les points faibles. Les héros sont ici le physicien américain David Bohm et le théoricien irlandais John Bell. Il conclut à la légitimité des approches réalistes : elles fonctionnent suffisamment bien pour saper les affirmations selon lesquelles la physique quantique *exigerait* que nous devenions tous antiréalistes. Cependant, aucune de ces approches n'a encore pour moi le son de la vérité : je pense que nous pouvons faire mieux. Et pour des raisons que j'expliquerai, je me risquerais à prophétiser que l'achèvement correct de la mécanique quantique résoudra également le problème de la gravité quantique, tout en nous fournissant une bonne théorie cosmologique. Le dernier acte présente les efforts contemporains visant à construire cette « théorie du tout » réaliste, certains de mon fait, certains par d'autres.

Bienvenue dans le monde quantique ! Sentez-vous comme chez vous, car c'est notre monde. Et c'est une chance pour nous que ses mystères restent à résoudre.

Partie 1

UNE ORTHODOXIE DU NON-RÉEL

1

La nature aime à se cacher

« L'affaire de la physique, c'est la réalité. »
Albert Einstein¹

Voilà neuf décennies que la mécanique quantique est au cœur de notre compréhension de la nature, et elle reste profondément mystérieuse. Peu d'aspects de la science moderne peuvent prendre sens sans elle. Pourtant, les experts ont du mal à s'accorder sur ce qu'elle nous dit de la nature.

La mécanique quantique explique pourquoi il y a des atomes, pourquoi ils sont stables et pourquoi ils ont des propriétés chimiques distinctes. Elle décrit la manière dont ils peuvent se combiner en molécules diverses et fonde notre compréhension des formes de ces molécules, ainsi que de leurs interactions : la vie serait incompréhensible sans le quantique. Du comportement de l'eau aux formes des protéines, en passant par la transmission d'informations par l'ADN et l'ARN, tout, en biologie, ressort du quantique.

La mécanique quantique explique les propriétés des matériaux : pourquoi un métal conduit l'électricité tandis qu'un autre est isolant ? Elle explique la lumière et la radioactivité. Elle est à la base de la physique nucléaire. Sans elle, nous ne comprendrions pas comment brillent les étoiles. Sans elle, nous n'aurions jamais inventé les puces électroniques et les lasers, à la base d'une large part de notre technologie.

Elle constitue le langage même que nous utilisons pour écrire le modèle standard de la physique des particules, qui résume tout ce que nous savons à leur propos, y compris leurs interactions.

Nos meilleures théories de l'univers primordial suggèrent que toute la matière, toutes les structures qui ont fini par devenir des galaxies, ont pris naissance à partir de fluctuations quantiques aléatoires, sous l'effet de l'expansion rapide de l'Univers. Je ne m'attends pas à ce que le lecteur comprenne ici exactement ce que cela signifie, mais j'espère susciter une image. Si tout cela est vrai, sans le quantique il n'y aurait littéralement rien, rien sinon l'espace-temps vide.

Malgré tous ces succès, une énigme tenace demeure au plus profond de la mécanique quantique : le comportement du monde quantique remet en question notre intuition. On déclare souvent, par exemple, en l'invoquant, qu'un atome peut se trouver à deux endroits à la fois ; que l'état dans lequel il se trouve occupe simultanément les deux positions. C'est ce que l'on appelle une *superposition*, ou un *état superposé*.

Si vous êtes novice dans le monde quantique, vous vous demandez sans aucun doute ce que cela peut signifier. Ne vous découragez pas. Il est tout à fait normal de trouver cela déroutant. Ceci constitue l'un des principaux mystères de la mécanique quantique. Il suffit pour l'instant de l'accepter comme un mystère, auquel nous attachons le terme « superposition ». Plus tard, nous pourrions tenter de le démystifier.

Cette première étape – la possibilité qu'une particule quantique soit dans un état superposé ici et là – ressort de la nature ondulatoire de la matière. Une onde est en effet une perturbation qui se propage, si bien qu'elle peut se trouver à la fois ici et là. Tout ce qui ressort de la physique quantique, y compris les particules élémentaires, les atomes et les molécules, peut apparaître tantôt comme un corpuscule, tantôt comme une onde*.

* NdT : Il existe une ambiguïté à propos des termes « particule » et « corpuscule », souvent considérés comme synonymes. On parle à la fois de « dualité onde-particule » en opposant les deux notions, et l'on déclare que la particule peut être vue comme une onde. C'est pourquoi il vaut mieux employer le terme « particule » de manière générique, pour désigner telle ou telle espèce de matière (un électron, un photon...), tandis que le terme « corpuscule » désigne une particule localisée ou localisable.

Donnons en un avant-goût en concevant une expérience qui cherche à déterminer la position d'un atome. Elle aura toujours un résultat : nous trouverons toujours l'atome quelque part. Mais en dehors de l'expérience elle-même, c'est-à-dire si nous ne sommes pas en train de mesurer la position, il s'avère impossible d'attribuer une position à l'atome, de déclarer qu'il est ici ou là. La probabilité, ou la propension, de le trouver à un certain endroit semble s'étaler à la manière d'une onde, tant que nous ne sommes pas en train de le regarder ; alors que, dès qu'on le regarde, on le trouve à un endroit précis.

Comme si l'on jouait à cache-cache avec l'atome. Ouvrons les yeux, ou allumons un détecteur, et nous verrons l'atome localisé quelque part. Fermons les yeux, sa localisation se dissout en une vague de potentialité. Ouvrons à nouveau les yeux, et nous le trouverons encore quelque part.

Le monde quantique présente une autre caractéristique déroutante : l'*intrication*. Prenons deux particules qui interagissent puis s'éloignent l'une de l'autre. Bien que séparées, elles continuent pourtant apparemment à partager certaines propriétés, qu'il est impossible d'attribuer à l'une ou à l'autre ; des propriétés communes, qui ne peuvent être décomposées en propriétés dont chacune des particules jouirait individuellement ; ceci alors qu'elles peuvent être très éloignées l'une de l'autre. On dit qu'elles sont *intriquées*.

Les atomes et les molécules auxquels s'appliquent ces nouveaux concepts sont trop petits pour être vus directement. Nous devons les étudier indirectement, ce qui implique des appareils de mesure importants et complexes. Ces appareils font partie du monde quotidien et familier, du monde des objets « macroscopiques » (par opposition au microscopique). Or, nous sommes certains que ces objets macroscopiques de la vie quotidienne ne présentent jamais aucun de ces comportements bizarres de la mécanique quantique : une chaise est ici ou là, mais jamais dans une combinaison « ici et là », jamais dans un état superposé. Si nous nous réveillons au milieu de la nuit dans une chambre d'hôtel inconnue, nous ne savons peut-être pas où se trouve la chaise, mais nous sommes convaincus qu'elle se trouve bien localisée quelque part. Et si nous nous cognons contre elle dans le noir, notre avenir ne sera pas pour autant intriqué avec le sien.

Dans le monde macroscopique où nous vivons, un chat est vivant ou il est mort. Même enfermé dans une boîte, il ne se trouve pas dans une combinaison de « mort et vivant » à la fois ; une combinaison qui se résoudrait soudainement en l'une ou l'autre alternative dès que nous ouvrons la boîte ! Si nous le trouvons mort, c'est probablement qu'il l'est depuis un certain temps déjà. N'aurions-nous pas... senti une odeur ?

Ainsi, les objets ordinaires ne partagent pas les mêmes bizarreries quantiques que les atomes dont ils sont composés. Bien que cela semble évident, cela soulève pourtant un mystère. Censée être une théorie fondamentale de la nature, la mécanique quantique devrait être universelle. Si elle s'applique à un atome, elle doit s'appliquer également à deux atomes, ou à dix, ou à quatre-vingt-dix. D'excellents résultats expérimentaux nous ont prouvé que c'est bien le cas ; des expériences très délicates ont permis de mettre en superposition quantique de grandes molécules, et de montrer qu'elles se comportent de manière aussi étrange que des électrons : elles peuvent diffracter et interférer comme des ondes.

Il apparaîtrait donc naturel que la mécanique quantique s'applique aussi aux vastes collections d'atomes qui composent notre chat, ou à la chaise sur laquelle il est perché, ou à chacun de nous. Il semble pourtant que ce ne soit pas le cas. Elle ne s'applique pas non plus aux instruments et machines macroscopiques que nous utilisons pour étudier les atomes et révéler leurs bizarreries quantiques.

Comment est-ce possible ?

Nous mesurons les propriétés d'un atome à l'aide d'instruments macroscopiques. L'atome peut se trouver dans un état superposé, localisé à plusieurs endroits à la fois, mais l'instrument de mesure indiquera toujours une seule des réponses possibles, une seule localisation. Pour quelle raison ? Pourquoi la mécanique quantique ne s'applique-t-elle pas aux instruments eux-mêmes, ceux que l'on utilise pour mesurer les systèmes quantiques ? C'est ce qu'on appelle le *problème de la mesure*. Sujet de controverses depuis les années 1920, toujours non résolu ! Aucun accord entre les experts depuis cette période : un aspect fondamental de la nature nous échappe.

Il doit donc exister une transition qui sépare le monde quantique, dans lequel un atome peut occuper plusieurs positions à la fois, du

monde ordinaire (macroscopique), où un objet est toujours localisé à un endroit précis.

La mécanique quantique décrit parfaitement une molécule composée de dix ou quatre-vingt-dix atomes, mais pas un chat. Où se trouve la ligne de démarcation ? À quelle échelle s'arrête la validité du monde quantique ? C'est ce que devrait indiquer une réponse au problème de la mesure : où se trouve cette ligne ? Où se situe la transition ?

Certains croient connaître la réponse. Nous en rencontrerons quelques-uns plus tard. Mais de manière générale, on peut diviser ceux qui s'efforcent d'aborder les mystères quantiques en deux catégories.

Les premiers supposent essentiellement que la théorie telle qu'elle a été formulée dans les années 1920 (la mécanique quantique) est correcte. Ils estiment que les problèmes ne concernent pas la théorie quantique elle-même, mais plutôt la façon dont nous la comprenons ou dont nous en parlons. Cette stratégie, qui cherche à atténuer l'étrangeté de la mécanique quantique, remonte à certains de ses fondateurs, à commencer par le physicien danois Niels Bohr. Après avoir été le premier à appliquer la théorie quantique aux atomes, il finit par devenir *de facto* le chef de file de la révolution quantique ; en partie à cause de l'attrait de ses idées, et en partie parce qu'il a éduqué et encadré un grand nombre de jeunes révolutionnaires quantiques.

Le second groupe juge la théorie incomplète : si on ne peut lui trouver un sens, c'est parce qu'elle ne constitue qu'une partie de l'histoire. Ils cherchent à la compléter, à identifier la partie manquante qui permettrait de résoudre les mystères quantiques. Ce courant remonte à Albert Einstein. Ce dernier fut plus que quiconque à l'origine de la révolution quantique : il fut le premier à exprimer la nature double de la lumière, à la fois particule (ou plutôt corpuscule) et onde. Il est davantage connu pour sa théorie de la relativité, mais c'est son travail sur la physique quantique qui lui a valu le prix Nobel. Il a lui-même déclaré avoir passé plus de temps sur la physique quantique que sur la relativité. Pourtant, même s'il fut un initiateur de la révolution quantique, Einstein n'en devint pas un leader, son réalisme exigeant qu'il rejette la théorie telle qu'elle avait été formulée à la fin des années 1920.

Selon la classification introduite dans la préface, la première catégorie regroupe essentiellement des antiréalistes ou des réalistes magiques. Les réalistes se trouvent quant à eux dans le second groupe.

Ceux qui plaident pour l'incomplétude de la mécanique quantique soulignent que, dans la plupart des cas, elle ne peut fournir au mieux que des prédictions statistiques pour les résultats des expériences. Plutôt que d'annoncer *ce qui se produira*, elle donne les probabilités de *ce qui pourra arriver*. Dans une lettre à son ami Max Born en 1926, Einstein écrit : « La mécanique quantique est sans nul doute impressionnante. Mais une voix intérieure me souffle que ce n'est pas encore la réalité. La théorie nous dit beaucoup, mais ne nous rapproche pas vraiment du secret "du Vieux". Je suis en tout cas convaincu qu'Il ne joue pas aux dés. »²

Einstein était un ami de Niels Bohr, et leurs divergences à propos de la mécanique quantique ont alimenté un débat passionné entre eux pendant plus de quarante ans, jusqu'à la mort d'Einstein. Un débat qui se poursuit aujourd'hui entre leurs descendants intellectuels. Einstein fut le premier à énoncer clairement le besoin d'une théorie révolutionnaire des atomes et des radiations, mais il n'acceptait pas que la mécanique quantique soit cette théorie. Il soutint d'abord qu'elle était incohérente. Puis il rectifia son point de vue en déclarant qu'elle donnait une description incomplète de la nature en laissant de côté l'essentiel.

Je pense que si Einstein a rejeté la mécanique quantique comme théorie définitive, c'est à cause du niveau extrêmement élevé de ses aspirations pour la science. Il était animé par l'espoir de dépasser l'opinion subjective, et de découvrir une description de la nature capable d'exprimer l'essence de sa réalité selon quelques lois mathématiques intemporelles. Pour lui, la science vise à capturer la véritable essence du monde, et cette essence est indépendante de nous ; elle ne dépend pas de ce que nous pouvons savoir à son sujet.

Einstein se sentait autorisé plus que quiconque à exprimer ces exigences parce qu'il y avait par ailleurs satisfait avec ses découvertes des théories de la relativité. Après avoir jeté les bases de la physique quantique, il s'est consacré à la recherche d'une description complète du monde microscopique, des atomes, des électrons et de la lumière.