Introduction

Hervé ZWIRN[1,2]
[1] *IHPST, Paris, France*
[2] *Centre Borelli, École normale supérieure Paris-Saclay, France*

La physique contemporaine a connu des progrès spectaculaires ces dernières années aussi bien dans le domaine de l'infiniment grand que dans celui de l'infiniment petit. Le but de cet ouvrage est de faire partager au lecteur une partie de ces découvertes, présentées sous un angle généraliste et quelquefois philosophique. Il ne s'agit pas de présenter les choses d'une manière technique accessible uniquement aux spécialistes, mais au contraire d'adapter le niveau pour que les chapitres soient compréhensibles au moins en grande partie par la plupart des lecteurs ayant une connaissance scientifique du niveau de première année d'université.

Le mode d'exposition choisi est comparable à celui des revues de vulgarisation de bon niveau comme par exemple le journal *Pour la Science* (*Scientific American* pour les anglophones). Je remercie les auteurs qui ont accepté de contribuer à ce volume et de faire l'effort pédagogique de présenter leur discipline de manière accessible au plus grand nombre de lecteurs. Il faut toutefois reconnaître que tous les chapitres de cet ouvrage ne sont pas équivalents en termes de facilité de lecture et que certains demanderont un peu plus d'effort aux lecteurs que d'autres.

Cela est principalement dû à la diversité des champs scientifiques couverts. Certains chapitres présentent des observations récentes qui bouleversent ce que l'on pensait connaître, par exemple de la manière dont l'Univers s'est constitué et évolue. D'autres chapitres se penchent sur des questions scientifiques actuellement non résolues et pour lesquelles les difficultés de résolution sont telles que les plus grands scientifiques actuels s'arrachent les cheveux pour savoir s'il est possible de trouver des réponses dans

Physique quantique et cosmologie,
coordonné par Hervé ZWIRN. © ISTE Editions 2026.

le cadre des théories actuelles ou si, au contraire, il sera nécessaire de révolutionner totalement notre manière de penser pour y parvenir.

On comprend donc que l'effort à fournir pour comprendre le sujet traité devra s'adapter à la difficulté intrinsèque de chaque sujet.

Je tiens ici à remercier tout particulièrement Nathalie Palanque-Delabrouille pour le travail de relecture attentive et de correction qu'elle a fait des chapitres de la partie cosmologie.

Les sujets abordés concernent la physique quantique et la cosmologie qui constituent les deux parties de ce livre. Bien entendu, il ne s'agit pas d'être exhaustif, plusieurs volumes n'y suffiraient pas. Nous donnerons plutôt des coups de projecteurs sur certains aspects de ces disciplines qui ont connu récemment des avancées importantes ou qui, simplement, présentent un intérêt particulier. De nombreux sujets ne seront pas abordés faute de place, mais le lecteur qui aura été séduit par le côté stimulant des chapitres de cet ouvrage pourra avantageusement continuer son parcours à travers les nombreuses sources disponibles aussi bien dans des ouvrages plus spécialisés que sur Internet.

Nous fêtons le centenaire de la découverte de la mécanique quantique en 2025. La mécanique quantique décrit le comportement des atomes et des particules élémentaires. Elle fait partie des théories physiques les plus fécondes et les mieux corroborées. Féconde, car tout d'abord, elle explique un nombre gigantesque de phénomènes que la physique classique échouait à comprendre, de la stabilité de la matière à la couleur des corps en passant par le rayonnement du corps noir, l'effet photo-électrique, le comportement des semi-conducteurs, la superfluidité et la supraconductivité. Sans elle, beaucoup d'objets de notre monde quotidien n'auraient jamais été inventés, à commencer par nos smartphones et nos ordinateurs. Féconde ensuite parce qu'elle est à la base de la théorie quantique des champs qui est le fondement sur lequel repose le modèle standard de la physique des particules aujourd'hui, modèle dont les succès ne sont plus à démontrer avec, entre autres, la prédiction de l'existence des bosons intermédiaires W et Z (médiateurs de l'interaction électrofaible et du boson de Higgs (qui intervient dans le mécanisme donnant leur masse aux particules), tous découverts au CERN. Corroborée enfin, car, depuis sa création, elle a été soumise à un nombre faramineux de tests dans toutes sortes de circonstances et n'a jamais été démentie par l'expérience.

Pourtant, de manière paradoxale, malgré ce succès, la mécanique quantique est toujours sujette à de violents débats quant à la manière de comprendre ce qu'elle nous dit sur le monde. Les physiciens s'accordent tous sur la manière dont il faut utiliser ses équations pour prédire le résultat des expériences qu'ils peuvent faire, mais ils sont en désaccord sur la signification ontologique du formalisme. Que nous apprend la mécanique quantique sur la réalité ? Contrairement à la physique classique qui peut se comprendre comme décrivant directement le monde tel qu'il est, la mécanique quantique pose des

problèmes conceptuels graves lorsque l'on essaye de l'aborder de la même manière. Bien sûr la mécanique quantique met en avant beaucoup de propriétés étranges comme l'indéterminisme, la superposition des états ou l'incompatibilité entre elles de certaines propriétés. Mais les problèmes les plus graves trouvent leur source dans ce qu'il est convenu d'appeler le problème de la mesure qui n'a pas trouvé de solution consensuelle pour le moment. Les différentes propositions pour résoudre ce problème se traduisent par ce que l'on appelle des interprétations donnant des visions du monde souvent non compatibles entre elles. Le problème est qu'il n'existe à ce jour aucune expérience permettant de trancher entre elles.

Afin de poser le contexte et de permettre au lecteur de situer les débats en question, Hervé Zwirn fait dans un chapitre de panorama (chapitre 1) une présentation sommaire du problème de la mesure, des raisons de ces débats et des interprétations principales auxquelles ils ont donné lieu.

Thomas Ryckman analyse la position de Niels Bohr qui, avec Werner Heisenberg, est considéré comme le principal auteur de la position appelée « interprétation de Copenhague ». Cette interprétation, qui est restée longtemps très largement majoritaire parmi les physiciens et qui est encore très influente aujourd'hui, n'est pas monolithique et les positions de Heisenberg et de Bohr diffèrent par de nombreux points subtils. Mais au-delà de ces divergences, la pensée de Bohr en elle-même a souvent été qualifiée d'obscure et il n'est pas facile de se faire une idée précise de ce que pensait Bohr de la réalité. C'est le sujet qui sera abordé dans le chapitre 2.

Lev Vaidman décrit l'interprétation des mondes multiples (MWI) initialement inventée par Hugh Everett en 1957. Cette interprétation popularisée ensuite par DeWitt et Graham en 1973 a été abondamment commentée en raison de son caractère extraordinaire qui fait que certains la qualifient de science-fiction. Il est vrai que le concept de mondes parallèles fait irrémédiablement penser à certains films de cette nature. Pourtant, aussi étrange que cela puisse paraître, cette manière de résoudre le problème de la mesure n'est pas absurde et elle emporte l'adhésion de nombreux défenseurs. Mais il existe plusieurs manières, non compatibles entre elles, de comprendre la position d'Everett. Lev Vaidman nous décrit ici sa version personnelle (chapitre 3) après avoir rappelé les éléments de base communs à toutes les versions.

Jeffrey A. Barrett s'intéresse, lui, au problème de donner un sens au concept de probabilité dans l'interprétation d'Everett. Il se trouve en effet que l'un des reproches principaux qui sont faits à cette interprétation réside dans le fait qu'il est difficile de la réconcilier avec l'approche probabiliste usuelle de la mécanique quantique. Puisque tous les événements possibles se produisent lors d'une mesure, donnant lieu à autant de mondes distincts qu'il y a de résultats possibles, il semble que la notion de probabilité disparaît. Différentes tentatives de résoudre ce problème ont été proposées sans pour autant

emporter l'adhésion des physiciens. Jeffrey A. Barrett (chapitre 4) analyse en détail certaines de ces tentatives et aboutit à privilégier l'une d'entre elles.

Face à ces problèmes d'interprétations, une attitude possible est le pragmatisme, dû initialement à Charles Peirce, John Dewey et William James, qui appliqué à la physique quantique prétend que la fonction d'onde censée décrire l'état d'un système en mécanique quantique n'a en réalité pas ce rôle. Plus généralement, pour les pragmatistes, une théorie scientifique ne décrit pas le monde tel qu'il est, mais a pour but de guider un agent à estimer les probabilités qu'il se produise tel ou tel résultat lors des expériences que l'agent fera. Richard Healey nous présente, dans le chapitre 5, sa position pragmatiste et la manière dont celle-ci résout le problème de la mesure et évite d'introduire la non-localité dans les expériences du type Einstein-Podolski-Rosen.

Il semble que, si l'on se place dans le formalisme standard de la mécanique quantique sans le modifier[1], il soit difficile de résoudre le problème de la mesure sans faire jouer à l'observateur un rôle central. C'est l'approche qu'a suivie Hervé Zwirn qui présente, dans son chapitre 6, le solipsisme convivial, une interprétation qu'il a développée et qui considère qu'aucune modification de l'état physique du système n'a lieu lors d'une mesure. Dans cette interprétation, une mesure est essentiellement un acte de perception par un observateur. Cette manière de voir la mesure permet de résoudre le problème posé dans le cadre traditionnel et apporte aussi un certain nombre de solutions à d'autres problèmes comme celui de la non-localité par exemple.

Le solipsisme convivial s'inscrit dans une grande famille d'interprétations que David Schmid, Yìlè Yīng et Matthew S. Leifer qualifient de « Copenhagenish » en ce qu'elles ont une parenté avec l'interprétation de Copenhague, tout en s'en distinguant. Ces interprétations ont en commun, le fait qu'elles considèrent que le résultat qu'obtient un observateur lors d'une mesure est unique, que la mécanique quantique s'applique à tous les systèmes physiques quelle que soit leur échelle, que la mécanique quantique est une théorie complète qui ne peut pas être complétée par des variables cachées et enfin que le vecteur d'état d'un système ne représente pas directement son état physique. Dans le chapitre 7, les auteurs font une comparaison de différentes interprétations de ce type et analysent la manière dont elles expliquent l'expérience de l'ami de Wigner (dont on trouvera une description sommaire dans le chapitre introductif d'Hervé Zwirn).

À l'autre extrémité du spectre des dimensions, dans l'infiniment grand, les questions profondes suscitées par les découvertes récentes se sont multipliées ces dernières années. La découverte du fait que l'expansion de l'Univers ne ralentissait pas, mais au contraire accélérait a été une grande surprise. Cette accélération a été observée pour la

1. Contrairement à ce que font les théories de de Broglie-Bohm ou de Ghirardi-Rimini-Weber qui seront brièvement présentées dans le panorama d'introduction d'Hervé Zwirn.

première fois en 1998, lorsque des astronomes ont constaté que certaines supernovæ (étoiles explosant en fin de vie) semblaient être plus éloignées que prévu, suggérant que l'Univers s'étendait plus vite que ce que l'on pensait. Afin d'expliquer ce phénomène, les astronomes ont alors eu recours à une forme mystérieuse d'énergie, appelée « énergie sombre (ou noire) », qui constitue environ 70 % de l'Univers. L'énergie sombre représente un des plus grands défis de la physique moderne. Bien que son existence soit largement acceptée en raison de son influence observable sur l'expansion de l'Univers, sa véritable nature reste un mystère. Nathalie Palanque-Delabrouille nous explique dans son chapitre 8 l'état actuel des réflexions sur ce sujet.

La matière noire est un autre grand mystère de la cosmologie moderne. L'introduction de la matière noire résulte de l'observation du fait que les galaxies tournent sur elles-mêmes à une vitesse qui devrait les désagréger si elles ne contenaient que la masse de leur matière visible dont la gravitation ne serait pas suffisante pour les maintenir. La matière noire représenterait 25 % de ce qui constitue notre Univers, ce qui veut dire qu'avec les 70 % d'énergie sombre, la matière ordinaire que nous connaissons ne pèse que 5 % de la totalité. Beaucoup d'hypothèses ont été faites sur la nature de cette matière noire, mais aucune reposant sur des particules de matière connues n'a été satisfaisante. Il semble donc que la matière noire soit faite de particules exotiques inconnues, à moins que l'autre hypothèse envisagée, celle d'une modification de la loi de la gravitation, ne soit finalement retenue. Françoise Combes nous explique dans son chapitre 9 les dernières avancées dans ce domaine. Mais d'ores et déjà, nous pouvons nous interroger sur le fait que 95 % de ce qui constitue l'Univers nous sont totalement inconnus !

2015 a été l'année de la première détection d'ondes gravitationnelles puis en 2017, on a vu la fusion d'étoiles binaires à neutrons. Depuis, l'astronomie des ondes gravitationnelles a progressé rapidement, produisant une multitude de résultats scientifiques en astrophysique, en cosmologie et en physique fondamentale. Ce nouveau mode d'exploration de l'Univers lointain est fascinant, car il nous donne accès à des événements que nous ne pourrions pas voir à l'aide de nos moyens habituels d'observation basés sur les ondes électromagnétiques. Le réseau international d'ondes gravitationnelles LIGO-Virgo-KAGRA a déjà observé plus de deux cents sources d'ondes gravitationnelles, et des plans sont en cours pour améliorer les détecteurs actuels et étendre leur portée astrophysique. Dans leur présentation (chapitre 10), Matteo Barsuglia et Simone Mastrogiovanni décrivent l'importance des résultats déjà obtenus, ainsi que les projets pour les deux prochaines décennies.

Bruno Mansoulié (chapitre 11) analyse, lui, le problème posé par l'énergie du vide. Cette question liée à l'énergie sombre et à la constante cosmologique est une des plus intrigantes de la physique moderne. La valeur de cette énergie lorsqu'on la calcule en relativité générale par l'intermédiaire de la constante cosmologique est 10^{120} fois plus petite que lorsqu'on la calcule dans le formalisme de la théorie quantique des champs.

Un tel écart est un record dans les disparités de prédictions que peuvent faire deux théories. On sait en effet que nous ne disposons pas d'une théorie unifiant la gravité et la physique quantique, mais on est là en présence de quelque chose de monstrueux. Comment réconcilier les deux prédictions ? Personne ne sait aujourd'hui répondre à cette question et ce chapitre présente les pistes – très prospectives – explorées aujourd'hui.

Marc Lachièze-Rey analyse, dans le chapitre 12, la notion de temps en relativité et nous montre, à travers la présentation de différents effets temporels relativistes, que le temps, entendu au sens usuel, c'est-à-dire classique, n'existe pas. Seule existe la durée propre de chaque histoire.

On sait que l'un des défis les plus importants de la physique moderne est d'arriver à unifier les deux piliers théoriques que sont la mécanique quantique et la relativité générale. De nombreuses tentatives ont été faites dans ce but et plusieurs théories sont en concurrence, mais aucune n'est pour le moment satisfaisante. La question même de la nécessité de quantifier la gravité (c'est-à-dire de la traiter de manière quantique) est controversée. Il serait possible que la gravité soit une force classique bien qu'existant dans un mode quantique. Mais des arguments de symétrie et d'homogénéité des théories (voire d'esthétique) poussent plutôt dans la direction de considérer que la gravité doit être quantique comme les autres forces. Olival Freire Junior et Thiago Hartz nous relatent l'histoire des expériences de pensées en gravité quantique (chapitre 13) des débuts de la mécanique quantique à l'époque actuelle.

Baptiste Le Bihan, Emilia Margoni et Annica Vieser analysent, dans le chapitre 14, d'un point de vue plus épistémologique, le concept de possibilités en physique classique, en relativité générale et en physique quantique. Ces possibilités peuvent être cinématiques ou dynamiques. Mais comment définir clairement la différence entre ces deux types de possibilités et représentent-elles toutes de véritables possibilités physiques ?

On voit à la lecture de ces chapitres à quel point la physique moderne a fait ces dernières années des progrès considérables (on a sans doute plus appris dans les cent dernières années que dans toute l'histoire de l'Humanité auparavant), mais en même temps a suscité des questions nouvelles en nombre au moins aussi grand que les découvertes. Les questions sans réponse aujourd'hui comme le mystère de l'énergie sombre et de la matière noire, de l'énergie du vide, du problème de la mesure, de l'absence de théorie unifiant la gravité et la mécanique quantique se révèleront-elles être des difficultés passagères que l'on résoudra dans le cadre des théories actuelles ou bien joueront-elles le même rôle que les deux nuages évoqués par Lord Kelvin à la fin du XIXe siècle (la constance de la vitesse de la lumière incompatible avec l'éther et le spectre du rayonnement du corps noir) qui ont conduit aux deux plus grandes révolutions de la physique, à savoir la relativité d'Einstein et la mécanique quantique ? Seul l'avenir nous le dira.