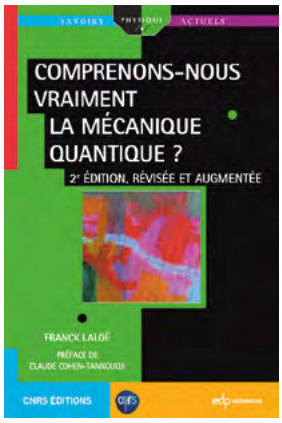



**Pour le troisième article de la série *Regards sur les sciences et technologies quantiques, Reflets de la Physique* aborde un sujet lié aux fondements mêmes de la discipline, celui de l'interprétation de la mécanique quantique. *Reflets de la Physique* a demandé à Franck Laloë de résumer les idées exposées dans son livre intitulé *Comprenons-nous vraiment la mécanique quantique ?* consacré aux fondements de la mécanique quantique. Ce livre présente en effet dans sa dernière partie un panorama général des différentes interprétations, les premières parties étant consacrées à un exposé historique sur la naissance des concepts quantiques et leur développement, à l'impact des idées de Bell et de son théorème et à leurs applications récentes à de nombreux domaines. Il était en fait impossible de résumer ce livre en quelques pages, mais nous remercions l'auteur d'avoir accepté de donner dans l'article qui suit un aperçu équilibré des principales interprétations de la mécanique quantique, dont certaines restent complexes et difficiles à appréhender et sont toujours discutées aujourd'hui entre physiciens et épistémologues.**

# La mécanique quantique, une merveilleuse théorie... que chacun interprète à sa façon

**Franck Laloë** (laloe@lkb.ens.fr)
Laboratoire Kastler Brossel, École normale supérieure, 24 rue Lhomond, 75005 Paris

Mécanique quantique et relativité générale constituent deux piliers théoriques essentiels de la physique contemporaine, dont la fécondité continue d'être impressionnante. Apparues presque simultanément au début du 20e siècle, ces théories n'ont jamais été mises en défaut, et n'ont cessé d'engendrer de nouvelles découvertes. Sur le plan conceptuel, elles sont pourtant toutes deux perçues de façons très différentes par la communauté.

Ce qui est en jeu dans les discussions est, non pas l'exactitude de ces théories, mais de savoir comment se représenter les objets mathématiques que ces théories manipulent. Dans le cas de la relativité, on est plutôt à l'aise : chacun comprend qu'il s'agit de décrire la géométrie de l'espace-temps, notion certes peu intuitive mais universellement acceptée, introduite par Einstein lui-même. Pour la mécanique quantique, le consensus est bien moins net : si les équations sont consensuelles, les opinions divergent sur ce que représentent précisément les objets mathématiques qu'elles contiennent. Ce n'est pas pour autant que la physique vit un drame ! Bien heureusement, comme la musique de Bach, la mécanique quantique peut être interprétée de façons très différentes sans perdre de sa beauté et de son efficacité.

## Deux théories presque jumelles, et pourtant bien différentes

La relativité générale et la mécanique quantique datent toutes les deux des années 1915 à 1925. Mais les circonstances et les motivations de leurs apparitions sont en fait très dissemblables.

Pour la relativité générale, Einstein est parti d'une réflexion personnelle et abstraite sur l'invariance de la vitesse de la lumière, l'équivalence entre masse gravitationnelle et masse inertielle, et les conséquences qu'elle doit entrainer sur la géométrie de l'espace-temps en présence de gravitation.

>>>



Article disponible sur le site https://www.refletsdelaphysique.fr ou https://doi.org/10.1051/refdp/202683005

>>>

En un sens, la théorie était bien en avance sur l'expérience, comme l'illustre la fameuse citation d'Einstein : « C'est la théorie qui décide de ce que l'on peut observer. » Elle est de plus apparue presque miraculeusement, sous une forme quasi complète et d'une immense portée, dans un grand article d'Einstein en 1916. Il ne « restait qu'à » développer les idées contenues dans ce cadre général. Cela a conduit à de multiples découvertes en physique et astrophysique, et à la prédiction de phénomènes auxquels personne n'avait pensé (lentilles gravitationnelles, trous noirs, ondes gravitationnelles observées pour la première fois en 2015, etc.).

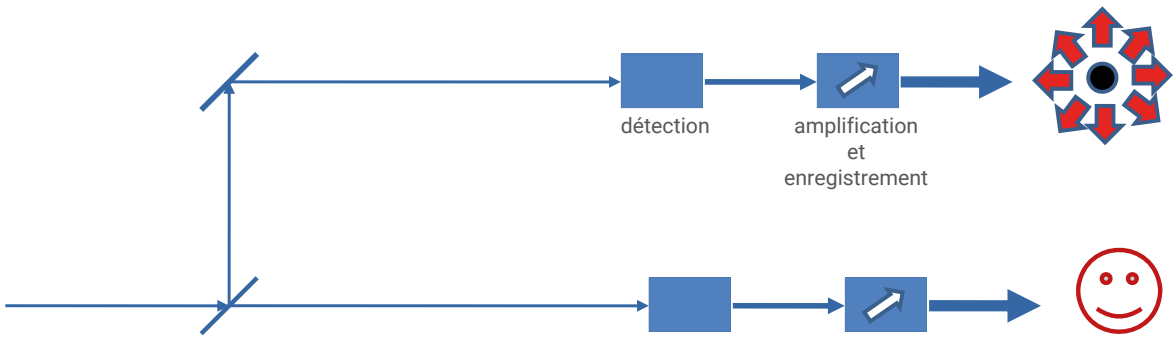
La mécanique quantique (MQ) est née tout autrement [1], plutôt comme une théorie devenue indispensable pour expliquer un certain nombre d'observations : la stabilité de la matière qui nous entoure et dont nous sommes constitués, l'existence et la position des raies spectrales des atomes, la compréhension du spectre du corps noir, etc. Un exemple particulièrement frappant est la théorie des matrices de Heisenberg, qui se basait sur l'introduction d'objets mathématiques directement associés aux mesures des raies spectrales émises par les atomes, tout en refusant délibérément d'entrer dans le détail de la dynamique de l'objet émetteur lui-même (l'atome). L'approche de la théorie quantique moderne s'est faite par étapes et approximations successives, avec la contribution de plusieurs physiciens hors pair (les « pères fondateurs »). Le fait que cette théorie soit fondamentalement probabiliste était d'ailleurs une nouveauté sans précédent dans la physique, et l'on comprend que cela ait suscité de nombreuses interrogations.

Depuis, la MQ reste l'objet de maintes discussions, concernant en particulier la compréhension du sens physique des objets manipulés par la théorie, tout particulièrement son vecteur d'état[(a)] (ou fonction d'onde) Ψ. Faut-il le voir comme une représentation directe des propriétés des systèmes physiques auxquels elle est associée, ou plutôt comme une caractérisation des connaissances que nous pouvons avoir de ces propriétés, ou comme une combinaison des deux ? Comme, mathématiquement, son carré présente certaines similarités avec une fonction de distribution classique dans l'espace des configurations, faut-il lui attribuer le même statut réaliste fondamental (ontologique) ? Ou, au contraire, la limiter au domaine des connaissances (épistémique) ?

## Les QSMDS : où est l'aiguillage ?

L'origine principale de ces questions fondamentales est que l'on peut dire, d'une certaine façon, que la MQ a un problème de cohérence interne : si on prend trop au sérieux sa dynamique (équations de Schrödinger ou de Heisenberg) et continue à l'appliquer sans discernement, on arrive à des absurdités. Prenons l'exemple simple (fig. 1) d'une particule qui, à la sortie d'une lame semi-réfléchissante, peut être détectée en deux endroits différents par des photomultiplicateurs, chacun suivi d'une chaine électronique d'amplification et d'enregistrement. Imaginons que l'on utilise le signal de l'un d'entre eux pour déclencher une énorme explosion. Si nous appliquons strictement l'équation de Schrödinger en partant de l'état initial de la particule arrivant sur la lame semi-réfléchissante, nous arrivons à un vecteur d'état Ψ qui comprend deux composantes très différentes, l'une où l'explosion a eu lieu, l'autre où ce n'est pas le cas ; comment imaginer que deux situations aussi contradictoires se produisent simultanément ? Nous sommes en présence d'une QSMDS (*Quantum Superposition of Macroscopically Distinct States*), dont l'exemple le plus connu est l'inévitable chat de Schrödinger (le pauvre animal pouvait, au début de l'expérience, être en train de faire sa sieste sur le paquet d'explosifs). La plupart des physiciens (pas tous, nous y reviendrons) considèrent cette QSMDS comme absurde, et pensent qu'elle a été obtenue parce que nous avons pris trop au sérieux l'équation de Schrödinger, bien au-delà du domaine où elle s'applique physiquement.

On peut se ranger à cet avis, mais alors se pose la question : qu'est-ce qui, dans la théorie, justifie ces limitations du domaine de validité de ses équations dynamiques ? La réponse est hélas : rien sur le plan mathématique. Il faut recourir au bon sens, ou à des considérations philosophiques générales sur le rôle de la physique et celui de la mécanique quantique, ou encore sur le statut fondamental de la fonction d'onde. Dans tous les cas, l'idée générale est qu'on ne doit pas essayer de passer avec cette équation du monde quantique microscopique au monde classique que nous percevons. On ne peut dire, ni où est la limite entre les deux mondes ni comment se fait le passage. En ce sens, la MQ n'est pas une théorie logiquement complète, étant contrainte de s'appuyer sur des éléments conceptuels externes, et ceci à un degré bien plus fort que le reste de la physique.




**1. Une expérience de pensée souvent évoquée par Einstein dans sa correspondance**. Une particule quantique arrive de gauche sur une lame semi-réfléchissante, qui sépare sa fonction d'onde en deux branches, chacune arrivant sur un détecteur suivi d'un amplificateur et d'un enregistreur du signal. Dans une branche, il ne se passe rien de particulier, mais dans l'autre le signal déclenche l'explosion d'une bombe.

Les QSMDS résument le problème de logique interne le plus délicat de la MQ ; sans elles, la théorie ne donnerait pas lieu à tant de discussions. Il manque dans les équations du mouvement un processus d'aiguillage qui orienterait Ψ vers une seule composante de la QSMDS, évitant ainsi toute description du même système physique combinant des états quantiques macroscopiquement incompatibles. Lors de la réalisation d'une expérience, la théorie prédirait alors bien l'apparition d'un résultat de mesure unique. Sans cet aiguillage, nous en sommes réduits à faire confiance à la dynamique de Schrödinger « presque tout le temps » mais, lorsque le bon sens l'impose, à admettre que « quelque chose de plus » se produit : seule une partie de la solution des équations du mouvement doit alors être retenue. Le bon sens n'étant pas réellement une notion scientifique précise, on comprend que la situation soit délicate, et qu'elle ait suscité de nombreuses interprétations très différentes.

source : Wikipedia

**2. Dans le sens des aiguilles d'une montre, à partir du haut à gauche : Niels Bohr, Werner Heisenberg, Erwin Schrödinger et Max Born.**

## Différentes interprétations

Disons-le tout de suite, les interprétations de la MQ continuent de foisonner. Il semble impossible d'écrire en quelques pages un résumé qui permette de vraiment comprendre chacune d'entre elles. Nous nous limiterons donc à donner un aperçu, parfois superficiel, d'un certain nombre ; le lecteur qui désire en savoir plus sur tel ou tel point de vue pourra se reporter aux documents cités en référence. La plupart de ces interprétations ne remettent pas en cause les prédictions de la théorie habituelle. Les quelques-unes qui le font ont d'ailleurs un intérêt particulier, puisque cela ouvre la perspective de réfuter un jour, soit elles, soit la théorie standard.

### La MQ des manuels

La majorité des livres d'enseignement fait usage du postulat de projection de von Neumann. Lors de toute mesure, ce postulat réduit aléatoirement Ψ à l'une de ses composantes où un seul résultat apparait ; si l'on répète l'expérience, cette composante est à nouveau tirée au sort, et peut donc être différente. Lorsque deux mesures quantiques se succèdent, le postulat de projection « réduit » le vecteur d'état pour tenir compte du résultat acquis lors de la première mesure ; ceci permet à Ψ de suivre de près la réalité physique perçue et enregistrée par l'observateur. Ainsi Ψ évolue sous l'effet de deux processus qui alternent[(b)], mais la théorie ne dit pas où et comment se produit la projection. Ce point de vue est concis et commode, ce qui explique probablement son succès.

### Le « bon sens des laboratoires »

Dans les laboratoires, les expérimentateurs ne se posent pas toutes ces questions ! Chacun sait parfaitement comment utiliser la MQ sans état d'âme. Il est évident que tout appareil de mesure est ouvert : par construction même, son rôle est de faire fuir l'information (plus précisément, l'intrication quantique) dans l'environnement. Quand la fuite est suffisamment lointaine, on considère tout naturellement qu'un résultat de mesure unique a été obtenu ; la QSMDS est alors résolue.

On peut formaliser un peu plus ce point de vue, sans pour autant recourir au postulat de projection de von Neumann, mais en utilisant une formule due à Wigner. Celle-ci permet de calculer la probabilité d'obtenir une suite de résultats dans une séquence de mesures quantiques successives, quelles qu'elles soient. Dans cette « interprétation des corrélations » on considère que, après tout, le rôle de la physique peut se limiter à prédire la probabilité d'obtenir telle ou telle séquence de résultats dans une succession d'étapes de préparation et de mesure d'un système quantique ; la formule de Wigner y suffit parfaitement. Ceux qui acceptent que la physique se limite ainsi à un objectif opérationnel n'ont alors plus aucun besoin d'aller chercher une description plus précise de la réalité.

### Bohr et l'école de Copenhague.

Bohr est souvent considéré comme le grand patriarche de l'interprétation de la MQ. Lui et son assistant Heisenberg, ainsi que Born, Jordan et quelques autres sont regroupés sous le nom d'École de Copenhague. Bohr insiste sur le fait que le but de la mécanique quantique n'est pas de décrire une réalité microscopique en elle-même, mais seulement les relations entre un système microscopique et un appareillage expérimental macroscopique ; ce dernier est le seul qui soit descriptible en langage ordinaire. Il insiste également sur le fait que l'ensemble de cet appareillage forme un tout indissociable, même s'il est très étendu dans l'espace. Les physiciens parlent avec déférence de l'interprétation de Copenhague ... d'ailleurs souvent sans avoir trop cherché à en comprendre le contenu, parfois élaboré du point de vue philosophique. Bohr a même étendu sa

>>>

>>>
notion favorite de « complémentarité quantique » à divers domaines, la biologie, la sociologie, etc., avec un succès limité.

### Interprétations ensemblistes

Ce point de vue considère que le seul but de la MQ est de décrire des ensembles de nombreuses réalisations d'une même expérience ; la théorie ne peut alors que fournir les probabilités des différents résultats de mesure. La description d'une expérience unique n'étant pas contenue dans Ψ, il faut alors accepter l'idée que la physique renonce à faire une description d'une expérience ou d'un évènement réalisés une seule fois (y compris le Big Bang !).

Le nom de Ballentine est souvent associé à ce point de vue. Nos collègues Allahverdyan, Balian et Nieuwenhuizen [2] partent de ce point de vue, étudient les propriétés « q-probabilités » qui apparaissent en parallèle dans la dynamique quantique et, grâce à un postulat approprié, en déduisent de véritables probabilités relatives à des évènements exclusifs. Ils font ainsi le pont avec le point de vue de von Neumann.

### Interprétations informationnelles et bayésiennes

Un courant de pensée bien établi en MQ considère que Ψ ne caractérise que notre connaissance du sytème quantique, non ses propriétés physiques réelles. Ce point de vue a été développé sous des formes multiples, et il s'accorde bien avec le développement actuel du calcul et de l'information quantique. Une version récente [3] qui rencontre un certain succès est le « QBisme », qui se fonde sur une conception bayésienne (subjective) des probabilités. On ne parle jamais des probabilités que tel ou tel évènement se produise, mais seulement des prédictions raisonnables que peuvent faire les différents « agents » concernant les résultats obtenus lors des expériences.

Une forme un peu différente a été proposée par notre collègue Hervé Zwirn, avec le nom volontairement paradoxal de « Solipsisme convivial » [4].

### Interprétation relationnelle

Le point de vue relationnel sur la mécanique quantique a été introduit par Carlo Rovelli [5], par ailleurs spécialiste de la gravité quantique. Ce point de vue rejette la notion d'état absolu d'un système physique : des observateurs différents peuvent rendre compte de la même suite d'évènements en utilisant des vecteurs d'état distincts. Sans nécessairement faire appel à la notion d'observateur, les propriétés physiques des systèmes ne sont pas vues comme absolues, mais comme dépendant de l'appareil utilisé pour y avoir accès. Le vecteur d'état Ψ est alors interprété comme un objet mathématique décrivant des relations entre objets physiques.

### Histoires cohérentes

L'interprétation des « histoires cohérentes » a été développée initialement par David Griffiths et, en France, reprise par notre collègue Roland Omnès, hélas récemment disparu. Elle consiste à attribuer à l'évolution quantique de tout système physique une famille d'histoires possibles, définies par des propriétés du système physique à toute une série d'instants. La formule de Wigner, mentionnée plus haut, permet d'attribuer une probabilité à chacune de ces histoires ; une condition d'additivité des probabilités permet de déceler les histoires cohérentes, qui sont seules prises en compte dans la description de la réalité physique.

Récemment, Jacob Barandes [8] a proposé une interprétation assez proche de celle-ci, basée sur une étude de la divisibilité des dynamiques markoviennes. Il propose de considérer que toutes les particules d'un système physique possèdent des positions bien définies à un certain nombre d'instants (ceux des *division events*), où le système est suffisamment couplé à l'extérieur pour perdre les cohérences quantiques entre ses configurations différentes ; il reconstruit alors la dynamique quantique standard qui permet de relier entre eux ces instants.

### Théories algébriques et logiques

Von Neumann est à l'origine des théories algébriques de la mécanique quantique, où l'intérêt se focalise sur les propriétés algébriques des ensembles d'opérateurs quantiques agissant dans un espace des états abstrait (théorie des C* algèbres). Il faut faire la distinction entre les algèbres de type I (le cas simple dont on parle dans les ouvrages d'enseignement) et celles de type III (indispensables lorsque l'espace des états devient très grand, comme en théorie des champs). Ces dernières présentent des propriétés spécifiques – en particulier une division en « secteurs » non connectés par les observables physiques habituelles. C'est un domaine à forte composante mathématique qui continue à être développé par un certain nombre de physiciens. En particulier et tout récemment, nos collègues Philippe Grangier et Mathias Van Den Bossche [9] ont examiné dans quelle mesure ces considérations permettent de comprendre comment interagissent des systèmes quantiques microscopiques et des environnements macroscopiques comme des appareils de mesure classiques, et de fonder ainsi l'interprétation CSM (Contextes, Systèmes et Modalités).

Von Neumann, Birkhoff et Zwicky ont initié une autre approche où l'on doit modifier radicalement les règles de la logique standard pour décrire un système physique, ce qui permet de mieux les adapter à la MQ. Ceci conduit en particulier à renoncer à l'utilisation d'identités logiques distributives. La version contemporaine de cette approche, illustrée par le fameux théorème de Gleason, se concentre plutôt sur les propriétés des projecteurs et de leurs fonctions en théorie de l'information quantique.

## Des propositions plus radicales

Il existe des présentations de la mécanique quantique plus audacieuses, qui n'hésitent pas à modifier ou enrichir ses équations dynamiques. L'objectif général est une unification : on recherche des équations d'évolution qui restent valables dans tous les cas, à la fois pour les systèmes microscopiques et les appareils de mesure macroscopiques. Elles doivent donc être capables de résoudre les QSMDS, sans qu'il faille leur imposer des limites externes fondées sur des considérations générales ou philosophiques. La composante probabiliste doit alors apparaitre directement, dès leur écriture mathématique ; il faut donc ajouter du hasard à la main quelque part dans ces équations. La théorie dBB met ce hasard dans les conditions initiales, les théories à dynamique de Schrödinger modifiée dans les équations d'évolution.

### Théorie dBB (de Broglie et Bohm)

Dans cette théorie, on ne change rien aux équations quantiques, mais on ajoute des

variables supplémentaires dont l'évolution est asservie à celle de Ψ : les positions précises de toutes les particules, dites « positions bohmiennes » [10]. Comme, inversement, l'évolution de Ψ est totalement indépendante de ces nouvelles variables, tous les calculs de mécanique quantique standard restent strictement valables, la seule différence étant que l'interprétation de leurs solutions est enrichie. Les prévisions de la théorie standard concernant les observations sont ainsi automatiquement conservées.

Les valeurs initiales des positions bohmiennes sont aléatoires et inconnues, mais elles sont capables de résoudre les QSMDS en indiquant quelle composante de Ψ est physique, et quelles sont toutes les « composantes vides » à ignorer. Ce sont ces positions que nous observons, mais elles restent dans un monde à part puisque nous ne pouvons pas influencer directement leurs valeurs (nous ne pouvons que modifier Ψ qui, à son tour, agira sur elles).

La théorie reproduit dans sa dynamique le postulat de projection via un mécanisme dit de « fonction d'onde conditionnelle ». Techniquement, elle peut se révéler utile : par exemple, en cosmogénèse quantique, le fait que le facteur d'échelle de l'Univers ait une trajectoire unique dans l'espace des configurations peut rendre possibles des calculs qui resteraient impossibles si ce facteur était un opérateur [11]. Elle donne toujours lieu à des travaux [12, 13] et à des congrès chaque année. Sans être intrinsèquement contraire à la relativité, elle demande toutefois d'admettre que le guidage des positions se fait dans un référentiel privilégié, qui prend ainsi un caractère absolu ; il n'y a pas vraiment contradiction, mais tension, avec une formulation totalement relativiste. Introduire en théorie dBB les processus de création et d'annihilation de particules conduit à rendre la théorie plus complexe en y ajoutant une dynamique stochastique. Elle garde donc ses partisans convaincus, mais qui restent une minorité parmi les physiciens.

## Dynamique de Schrödinger modifiée

Sans avoir besoin d'introduire de variables supplémentaires (Ψ suffit donc), une autre approche consiste à changer les équations d'évolution de la MQ. On peut en effet ajouter un terme stochastique à l'équation de Schrödinger : le rôle de ce terme est de résoudre les QSMDS en une seule de ses composantes macroscopiques, et donc de mimer efficacement le postulat de projection de von Neumann. Ce n'est pas aussi simple que cela peut sembler ! Il faut en effet éviter deux écueils opposés : modifier Ψ trop faiblement de sorte que les QSMDS subsistent trop longtemps ; ou au contraire trop fortement et perturber l'évolution de nombreux systèmes microscopiques dont on sait que l'évolution est parfaitement reproduite par la dynamique de la MQ standard. Deux versions de la théorie ont été proposées : GRW (Ghirardi, Rimini, Weber) où Ψ subit des sauts discontinus [14] et CSL (*Continuous Spontaneous Localization*) où l'évolution est continue sous l'effet de perturbations décrites par des processus de Wiener [15]. Ces théories demandent l'introduction de deux constantes universelles, une constante de temps et une longueur. Leur intérêt est qu'elles peuvent dans certains cas faire des prédictions différentes de celles de la MQ standard, ce qui peut permettre de les confirmer ou réfuter par des expériences. Plusieurs ont d'ailleurs déjà été réalisées, mais le domaine de paramètres le plus pertinent n'a pas encore pu être exploré.

> **« [...] pour le moment il ne s'est pas dégagé de présentation de la mécanique quantique qui soit suffisamment supérieure aux autres pour convaincre la majorité des physiciens. Cela viendra peut-être le jour où nous serons capables d'unifier mécanique quantique et relativité générale, mais pour le moment cela reste un vœu pieux. »**

## Liens avec la gravité

Nous l'avons mentionné, relativité générale et MQ ne sont pas des théories compatibles[c]. Si par exemple, un objet massif quantique est mis dans une QSMDS où il se trouve à la fois dans deux régions de l'espace différentes, on pourrait s'attendre à ce qu'il déforme l'espace-temps simultanément en deux configurations distinctes ; or une telle situation échappe à la relativité générale. L. Diosi et R. Penrose se sont penchés sur ce problème qui, de façon générale, pose la question de faire cohabiter dans une même théorie des systèmes physiques classiques et quantiques. Notre collègue A. Tilloy a rédigé une discussion générale du sujet en 2019 [16]. Penrose a montré [17] comment la présence de la superposition induit une incertitude $\Delta E$ sur l'énergie, et suggéré de postuler que cette incertitude produit une réduction spontanée vers une seule composante de la QSMDS.

Le présent auteur a proposé un modèle élémentaire combinant les positions de la théorie dBB, supposées sources de la gravitation, avec un mécanisme de réduction du vecteur d'état [18]. Au lieu des deux constantes dimensionnelles requises par la théorie GRW, une seule suffit, de plus sans dimension. Il est surprenant qu'un modèle aussi élémentaire fonctionne aussi bien, grâce à un effet collectif de projection qui réduit les QSMDS juste lorsque c'est nécessaire ; mais, n'étant même pas relativiste, il reste de portée bien limitée ! De façon générale, le domaine qui cherche à conjuguer MQ et relativité générale classique reste toujours actif, comme l'illustrent les travaux récents de J. Oppenheim et son équipe à *University College* (Londres).

>>>

>>>

## Une interprétation à part, celle d'Everett

La plus hardie des interprétations de la MQ est probablement celle d'Everett, aussi appelée « des mondes multiples » (pour de mauvaises raisons, puisqu'au contraire elle insiste sur l'unité d'un monde aux multiples composantes). Dans cette interprétation, on prend au sérieux l'équation de Schrödinger en toutes circonstances ; les QSMDS subsistent donc indéfiniment, incorporant dans leurs branches les observateurs humains. Les contradictions mentionnées plus haut disparaissent alors immédiatement ! Tout est donc déterministe, et l'aspect probabiliste que nous observons expérimentalement n'est qu'une conséquence des limitations de notre perception humaine. Les observateurs sont en effet incapables de percevoir qu'ils se trouvent dans des superpositions d'états où les contenus de leurs « registres mémoire » sont totalement divergents ; leurs composantes sur les différentes branches des QSMDS s'ignorent totalement. La difficulté, alors, est de bien comprendre comment apparaissent et quel sens prennent les probabilités dans ce point de vue déterministe.

Bien des physiciens considèrent une telle vue de la réalité physique comme trop fantastique : tous les évènements possibles se réalisent simultanément dans l'Univers, sans que nous nous en rendions compte. Mais d'autres l'acceptent plus volontiers, en particulier parmi les cosmologistes quantiques pour lesquels l'utilisation d'un Ψ universel est relativement commode et naturelle.

## Une liste bien incomplète !

Cette liste d'interprétations est loin d'être exhaustive. Nous avons cité au passage quelques travaux à titre d'illustration, un peu arbitrairement choisis, souvent dans notre pays, le but principal étant d'illustrer la variété des solutions proposées et la vivacité du champ de réflexion. Il faudrait de nombreuses pages et des centaines de citations pour rendre justice à toutes les contributions du domaine. Le présent texte n'est donc certainement pas un article de revue !

## Conclusion

On le voit, pour le moment il ne s'est pas dégagé de présentation de la MQ qui soit suffisamment supérieure aux autres pour convaincre la majorité des physiciens. Cela viendra peut-être le jour où nous serons capables d'unifier MQ et relativité générale, mais pour le moment cela reste un vœu pieux. En attendant, selon ses gouts personnels, chacun choisit son interprétation favorite dans un éventail de possibilités.

On constate également que la mécanique quantique pousse les physiciens à philosopher, chacun à sa façon, souvent afin de mieux justifier leur interprétation favorite. C'est bien sûr le cas de l'interprétation de Copenhague, que Bohr base sur des conceptions philosophiques qu'il a développées à maintes reprises sur la base épistémologique des sciences naturelles. Pour lui, Heisenberg et d'autres, il n'y a pas le choix, la nouvelle théorie impose des vues philosophiques assez précises.

Certes, il n'est pas rare que les motivations de l'inventeur d'une théorie physique soient philosophiques, parfois religieuses (le principe de moindre action en est un exemple), mais l'expérience montre que ces théories se dégagent ensuite de ce contexte initial, et arrivent à se glisser assez facilement dans des cadres divers. C'est beaucoup moins le cas de la MQ. Est-ce un défaut ? Dans quelle mesure est-il souhaitable qu'une théorie physique nous contraigne à un cadre philosophique précis, par exemple pour la définition de la réalité, ou doit-elle au contraire permettre le plus de souplesse possible ? Chacun répondra à la question selon ses convictions personnelles.

(a) Il est plus général en MQ de définir l'état quantique d'un système par un opérateur densité que par un vecteur d'état Ψ. La discussion qui suit s'applique cependant aussi bien à l'opérateur densité qu'à Ψ.

(b) Dans le point de vue de Heisenberg, Ψ reste statique entre les mesures, et effectue des sauts discontinus lors des mesures, mais sur le plan fondamental cela reste équivalent.

(c) Pour quantifier la gravité, il faut avoir recours à des théories élaborées comme la théorie des cordes ou la gravité à boucles.


1• O. Darrigol, *From c-numbers to q-numbers*, University of California Press (1992)

2• A.E. Allahverdyan, R. Balian and T.M. Nieuwenhuizen, "Teaching ideal quantum measurement, from dynamics to interpretation", *Comptes Rendus Physique* **25** (2024) 251

3• D. Mermin, "Physics : QBism puts the scientist back into science", *Nature* **507** (2014) 421

4• H. Zwirn, « L'observateur, un défi pour la physique quantique », *Pour la Science* **509** (2020) 34

5• C. Rovelli, "Relational quantum mechanics", *Int. J. Theor. Phys.* **35** (1996) 1637; arXiv:quant-ph/9609002v2 (2008)

6• R.B. Griffiths, *Consistent Quantum Theory*, Cambridge University Press (2002)

7• R. Omnès, *The Interpretation of Quantum Mechanics*, Princeton University Press (1994) ; *Understanding Quantum Mechanics*, Princeton University Press (1999)

8• J. Barrandes, "The stochastic-quantum correspondence", ArXiv :2302.10778 (2023)

9• M. Van Den Bossche and P. Grangier, "Postulating the Unicity of the Macroscopic Physical World", *Entropy* **25** (2023) 1600 ; arXiv:2310.06099

10• J. Bricmont, *Making sense of quantum mechanics*, Springer (2016)

11• P. Peter, E. Pinho and N. Pinto-Neto, "Tensor perturbations in quantum cosmological backgrounds", *JCAP* **07** (2005) 14 ; "Gravitational wave background in perfect fluid quantum cosmologies", *Phys. Rev.* **D73** (2006) 104017

12• A. Drezet and A. Ambland, "Can dBB mechanics be considered complete?", *Entropy* **27** (2025) 99

13• M. Gondran et A. Gondran, « Les fonctions d'onde externe et interne : une double solution à la Louis de Broglie », hal-02194727

14• G.C. Ghirardi, A. Rimini and T. Weber, "Unified dynamics for microscopic and macroscopic systems", *Phys. Rev.* **D 34** (1986) 470

15• P. Pearle, "Reduction of the state vector by a nonlinear Schrödinger equation", *Phys. Rev.* **D 13** (1976) 857

16• A. Tilloy, "Does gravity have to be quantized ? Lessons from non-relativistic toy models", *J. Phys. Conf. Series* **1275**(1) (2019) 012006 ; arXiv:1903.01823

17• R. Penrose, "On gravity's role in quantum state reduction", *General Relativity and Gravitation* **28** (1996) 581

18• F. Laloë, "A model of quantum collapse induced by gravity", *Eur. Phys. J.* **D 74** (2020) 25