

DIVERSES INTERPRÉTATIONS DE LA MÉCANIQUE QUANTIQUE

L'interprétation de Copenhague, ou interprétation orthodoxe

Soutenue presque dès les débuts de la mécanique quantique par Niels Bohr et Werner Heisenberg, elle a longtemps été l'interprétation dominante, adoptée par défaut par la quasi-totalité des physiciens. Elle considère qu'une mesure est une interaction d'un système microscopique avec un appareil macroscopique qui, lui, ne doit pas être décrit par la mécanique quantique. Elle est de moins en moins acceptée en raison de la distinction artificielle et vague faite entre microscopique et macroscopique, et parce qu'il n'y a pas de justification à ce

qu'un système macroscopique échappe aux lois quantiques.

L'interprétation de de Broglie-Bohm

Avancée par David Bohm en 1952 en reprenant des idées de Louis de Broglie, elle fait l'hypothèse que la fonction d'onde ne fournit pas une description complète du système et qu'il est donc nécessaire de lui ajouter des variables supplémentaires, des « variables cachées » dont les valeurs sont supposées toujours bien définies et qui déterminent les résultats des mesures. Longtemps rejetée, la théorie de de Broglie-Bohm commence à être défendue par un nombre croissant de physiciens. Mais elle repose sur l'hypothèse de l'existence d'un potentiel quantique qui a une influence non locale et instantanée sur les trajectoires des particules ; de plus, la question de savoir s'il est possible d'en faire une théorie compatible avec la relativité restreinte d'Einstein reste ouverte.

L'interprétation GRW, ou théorie de l'effondrement spontané

Énoncée en 1986 par les physiciens italiens Giancarlo Ghirardi, Alberto Rimini et Tullio Weber (d'initiales GRW), cette théorie modifie l'équation de Schrödinger en lui ajoutant un terme aléatoire et non linéaire qui a pour effet que tout objet microscopique a une probabilité (très faible) de subir une évolution spontanée qui le localise à une position déterminée dans l'espace, ce qui permet effectivement de résoudre le problème de la mesure. Mais ce processus apparaît très *ad hoc* et nécessite d'être numériquement ajusté de façon artificielle pour reproduire les résultats de la mécanique quantique. Par ailleurs, préciser l'ontologie de cette théorie, c'est-à-dire la nature des objets physiques dont elle postule l'existence, se heurte à d'importantes difficultés.

L'interprétation des mondes multiples, ou théorie d'Everett

Émise par Hugh Everett dans sa thèse de 1957, elle suppose que lorsqu'une mesure est effectuée, toutes les valeurs possibles sont en fait obtenues car l'Univers (et donc

l'observateur lui-même) se scinde en autant de mondes différents qu'il y a de résultats possibles. Outre le côté insatisfaisant de postuler une multiplication de mondes en nombre infini, cette interprétation se heurte au problème fondamental de ne pas pouvoir rendre compte des probabilités qui interviennent de manière essentielle dans la règle de Born.

Le solipsisme convivial

Développée par l'auteur, cette interprétation pose qu'une mesure n'est pas un processus physique, mais la perception par un observateur d'un résultat, issu de l'observation de l'état superposé d'un système. Comme dans la théorie des mondes multiples, il n'y a donc aucune réduction physique de la fonction d'onde ; en revanche, nul n'est besoin de recourir à une multiplication infinie de mondes. C'est la seule interprétation qui réconcilie les trois propositions du problème de la mesure (voir l'encadré page 29) sans avoir à modifier le formalisme quantique.

> pixels en mouvement que chaque observateur interprète comme une danseuse tournant dans un sens ou dans l'autre selon sa configuration mentale du moment. Avec toutes les précautions qui s'imposent, on pourrait dire que l'état de cette danseuse est l'analogue de la superposition : $|\text{sens horaire}\rangle + |\text{sens antihoraire}\rangle$.

Cet état ne correspond ni à tourner dans un sens ni à tourner dans l'autre, mais représente quelque chose qui n'a pas d'équivalent classique. En revanche, quand nous observons une telle image, nous l'interprétons sous la forme d'une danseuse qui tourne dans un sens déterminé, et ce sens n'est pas forcément le même pour tous les observateurs. Voir la danseuse tourner dans un sens déterminé n'implique nullement que la danseuse tourne réellement dans ce sens et ne modifie en rien l'image elle-même, qui reste une superposition. Cette observation signifie seulement que notre perception a construit une manière déterminée de voir cette image, que nous sommes incapables de percevoir en tant que superposition.

Cette analogie est très limitée, car il y a entre un état quantique superposé et l'état de la danseuse de nombreuses différences, mais cela permet d'avoir une idée approximative de ce qui se passe lorsqu'on perçoit une superposition quantique.

Le solipsisme convivial suppose qu'un état superposé ne peut être perçu en tant que tel et donne lieu, dans l'esprit de l'observateur, à une représentation correspondant à l'une des composantes de la superposition. Mais quelle que soit la composante retenue par la perception de l'observateur, l'état du système n'est en rien modifié et reste une superposition. Dans ce cadre, la perception de chaque observateur n'est pas absolue, mais relative à lui-même. Mais alors, deux observateurs pourraient-ils être en désaccord sur la mesure d'un même système ? La réponse est non, comme je vais l'expliquer.

PAS DE DÉSACCORDS

Pour un observateur donné, disons Alice, tout autre observateur, par exemple Bernard, doit être considéré comme un système quantique susceptible d'être lui-même dans un état superposé. Une communication entre Alice et Bernard est, pour chacun d'eux, l'équivalent d'une mesure de son interlocuteur. Dans ces conditions (et contrairement à ce qui se passe avec l'image animée de la danseuse), les règles du formalisme quantique garantissent qu'il ne sera jamais possible qu'Alice et Bernard, échangeant sur le résultat qu'ils ont chacun constaté après avoir fait une mesure quelconque, puissent être en désaccord même s'il n'est

nullement obligatoire qu'ils aient tous les deux perçu le même résultat. Cela peut paraître étrange, mais c'est l'un des points essentiels du solipsisme convivial, qui amène à renoncer à l'idée que nous pouvons « nous mettre à la place de quelqu'un d'autre pour parler de ses perceptions ». Expliquons-nous.

Alice échangeant avec Bernard, c'est-à-dire mesurant Bernard – qui, du point de vue d'Alice, reste dans un état superposé quel que soit le résultat qu'il a trouvé tant qu'elle n'a pas « mesuré » Bernard – entendra toujours celui-ci lui donner un résultat conforme à ce qu'elle a vu elle-même. Cet état de fait, qui justifie l'adjectif « convivial », provient du fait que, selon le mécanisme d'accrochage, un observateur ne peut obtenir comme résultat possible d'une mesure que ceux qui sont liés à la branche à laquelle il est accroché. Alice ne peut donc obtenir, quand elle parle avec Bernard, qu'un résultat correspondant à « la partie de Bernard » corrélée au même résultat de mesure sur le système que celui qu'elle a déjà obtenu.

Les choses sont même plus strictes que cela, car, compte tenu de la relativité de toute description dans ce cadre, une phrase doit toujours être rapportée à celui qui l'énonce. Il est donc illégitime de parler à la fois de ce qu'Alice et Bernard ont perçu : cela demanderait de se placer du point de vue d'un observateur ayant accès simultanément à leurs deux perceptions, et un tel observateur n'existe pas. L'étrangeté de la phrase selon laquelle Alice et Bernard ne peuvent jamais être en désaccord même s'ils n'ont pas perçu la même chose, est donc due à l'illégitimité, dans ce cadre, de faire référence simultanément à la perception d'Alice et à celle de Bernard. Seule la phrase « Alice a vu ceci et a entendu Bernard lui dire qu'il a vu ceci » est légitime. En revanche, la phrase « Alice a vu ceci alors que Bernard a vu cela » est interdite, car elle n'a pas de sens dans le monde du solipsisme convivial.

DES DIFFICULTÉS APLANIES

Quelle que soit l'étrangeté de cette situation, il est possible de donner un sens mathématique précis à ces idées et de montrer comment elles permettent de résoudre de nombreuses énigmes.

Le formalisme mathématique du solipsisme convivial permet de résoudre le problème de la mesure. Il évite aussi tous les paradoxes liés à la mesure de deux systèmes intriqués, comme la question de savoir laquelle des deux mesures détermine la valeur de l'autre lorsqu'elles sont séparées par un « intervalle du genre espace » (deux mesures séparées dans l'espace et dans le temps de telle façon qu'aucun signal physique, dont la vitesse de propagation est au maximum celle de la lumière, ne puisse relier les deux événements) – un intervalle tel que, selon la théorie



Selon le « solipsisme convivial » développé par l'auteur, l'observateur qui mesure un système ne modifie *a priori* pas l'état quantique de celui-ci. Mais quand cet état quantique est une superposition, l'observateur ne peut percevoir qu'un résultat correspondant à l'un des états de base entrant dans la superposition. Une analogie est donnée par des images telles que celle-ci, qui peut être « lue » de deux façons différentes : soit la danseuse semble nous tourner le dos, soit elle semble nous faire face ; dans une séquence animée, elle semble tourner soit dans un sens, soit dans l'autre.

de la relativité, aucune des deux mesures ne peut être considérée d'une manière absolue comme antérieure à l'autre. Le solipsisme convivial permet aussi de rétablir la localité (l'idée que les influences physiques se font de proche en proche, et non à distance de façon instantanée) en mécanique quantique, alors qu'il est fréquemment admis que cette théorie doit nécessairement être non locale.

Le prix à payer n'est cependant pas négligeable, et c'est principalement cela que beaucoup de physiciens ne sont pas prêts à accepter. Il faut renoncer à penser que le monde est directement conforme à ce que nous percevons et que nous le percevons tous de la même façon. Le monde du solipsisme convivial est étrange : nous n'en avons chacun qu'une perception réduite à une projection ou une coupe et nous ne voyons pas forcément tous la même projection. En ce sens, c'est une sorte de solipsisme, car chacun vit dans un monde de perceptions qui lui sont propres. Mais il est convivial dans la mesure où, contrairement au solipsisme classique, il laisse la place à d'autres esprits et à un monde extérieur, et il est tel que, malgré des perceptions pouvant être différentes, deux observateurs ne pourront jamais constater de désaccord entre eux.

Pour des physiciens attachés à une description plus strictement conforme à nos intuitions habituelles, ce renoncement peut paraître trop important. Pour d'autres, tirant la leçon du constat que la science n'a pas cessé de nous forcer progressivement à renoncer à nos intuitions les plus fortement ancrées, surtout depuis l'avènement de la mécanique quantique, cette nouvelle vision est un moyen de résoudre des énigmes qui résistent depuis longtemps. ■

BIBLIOGRAPHIE

H. Zwrn, **Nonlocality versus modified realism**, *Foundations of Physics*, vol. 50, pp. 1-26, 2020.

H. Zwrn, **Delayed choice, complementarity, entanglement and measurement**, *Physics Essays*, vol. 30(3), pp. 281-293, 2017 (<http://arxiv.org/abs/1607.02364>).

F. Laloë, **Comprenons-nous vraiment la mécanique quantique ?**, CNRS Éditions/EDP Sciences, 2^e édition, 2017.

H. Zwrn, **The measurement problem : Decoherence and convivial solipsism**, *Foundations of Physics*, vol. 46, pp. 635-667, 2016.

B. d'Espagnat et H. Zwrn (dir.), **Le Monde quantique**, Éd. Matériologiques, 2014.

H. Zwrn, **Les Limites de la connaissance**, Odile Jacob, 2000.

B. d'Espagnat, **Le Réel voilé**, Fayard, 1994.