

QUATRE INTERPRÉTATIONS DE LA PHYSIQUE QUANTIQUE

Que se passe-t-il réellement dans le monde quantique ? Les scientifiques ont proposé une dizaine d'interprétations différentes de ce qui est sous-jacent au formalisme mathématique. Le bayésianisme quantique est peut-être la plus radicale d'entre elles ; les quatre alternatives suivantes sont parmi les plus répandues.



L'interprétation dite de Copenhague, surtout due au Danois Niels Bohr et à l'Allemand Werner Heisenberg, est la version orthodoxe de la théorie quantique. Les propriétés mesurables d'un système tel qu'un atome sont déterminées par son « état quantique ». Ce dernier est décrit par une expression mathématique nommée fonction d'onde. Elle permet, à l'aide de la règle dite de Born, de calculer les probabilités des résultats d'une mesure. Lors d'une mesure, l'observateur provoque la réduction de l'état quantique en un nouvel état, qui correspond au résultat effectif de l'expérience. Cette réduction instantanée de la fonction d'onde soulève des difficultés conceptuelles, car elle suppose des effets se propageant plus vite que la lumière.



L'interprétation de l'onde-pilote. Plusieurs physiciens, dont Albert Einstein à un certain moment, ont privilégié une réécriture du corpus mathématique de la mécanique quantique de façon à inclure un champ de force réel, nommé onde-pilote, qui contrôle le mouvement d'une particule. Malheureusement, cette image séduisante échoue dès que plusieurs particules (disons N particules) sont impliquées. Elles ne se déplacent pas dans notre espace familier à trois dimensions, mais dans un espace abstrait à $3N$ dimensions. Plus troublant encore, l'onde-pilote exerce une action à distance, par laquelle des effets physiques sont transmis instantanément à grande distance.



L'interprétation des univers multiples. Selon cette idée radicale, l'état quantique de l'Univers est unique, évolue régulièrement et de manière prévisible. Quand on réalise une expérience pour déterminer par laquelle de deux fentes un électron est passé, par exemple, cet état ne se réduirait pas à l'état correspondant à une seule des fentes ; l'Univers se dédoublerait en deux branches indépendantes, correspondant aux deux résultats. Ainsi, au cours du temps, l'Univers se ramifierait indéfiniment comme un arbre où chacune des branches correspond à la réalisation d'un des résultats possibles. Mais cette théorie des « multivers » est incapable d'expliquer le processus responsable de la ramification et a du mal à justifier la règle de Born.



Théories de la réduction spontanée. Plutôt que d'éliminer la réduction de la fonction d'onde due à l'observateur, ces théories postulent qu'il s'agit d'un processus entièrement naturel : de tels processus ont lieu spontanément, bien que rarement, pour chaque système quantique, mais deviennent prépondérants quand le système quantique interagit avec un objet macroscopique. Ces théories doivent cependant expliquer comment est réalisée la réduction. Des expériences de laboratoire, portant sur des systèmes constitués de quelques atomes ou photons, ont été réalisées ou sont en cours afin d'analyser les mécanismes à l'œuvre et de les élucider.

On pourrait à la rigueur appliquer cette définition à la prévision du temps, en dénombrant les configurations météorologiques réelles ou simulées. Mais l'interprétation fréquentiste est inopérante pour attribuer une probabilité au succès d'une opération commando telle que l'assassinat de Ben Laden, situation manifestement non reproductible.

Le point de vue le plus ancien sur les probabilités est l'interprétation bayésienne. Il tire son nom de Thomas Bayes, pasteur anglais du XVIII^e siècle dont les idées ont été précisées et diffusées par le physicien français Pierre-Simon Laplace.

Des degrés de croyance mis à jour

À l'inverse de la probabilité fréquentiste, la probabilité bayésienne est subjective : elle mesure le degré de croyance qu'un événement se produira. Dans les cas simples tels que les lancers de pièce, les probabilités fréquentistes et bayésiennes sont en accord. Pour les prévisions météorologiques ou portant sur l'issue d'une

action militaire, la probabilité bayésienne, contrairement à la probabilité fréquentiste, a la liberté de combiner des informations statistiques quantitatives avec des estimations intuitives fondées sur l'expérience du passé.

L'interprétation bayésienne traite facilement les cas uniques, à propos desquels l'approche fréquentiste est muette, et évite les pièges de l'infini, mais sa véritable puissance est plus spécifique. Sur la base de cette interprétation, les probabilités attribuées à tel ou tel événement sont sujettes à changement, parce que les degrés de croyance ne sont pas définitifs. Un météorologue fréquentiste n'aurait pas de mal à calculer la probabilité de pluie si la région a un climat stable, prédictible depuis de nombreuses années. Mais dans le cas d'un changement soudain, telle une sécheresse, pour lequel il y a peu de données, un prévisionniste bayésien est mieux armé pour rendre compte de l'information nouvelle et de l'état du climat.

Au cœur de la théorie se trouve une formule explicite, le théorème de Bayes, qui permet de calculer l'effet d'une information

nouvelle sur l'estimation d'une probabilité. Par exemple, quand il soupçonne un cancer chez un patient, le médecin attribue une probabilité initiale, nommé probabilité *a priori*, fondée sur des données telles que l'incidence connue de la maladie dans la population générale, les antécédents médicaux de la famille du patient et d'autres facteurs pertinents. À réception des résultats des analyses du patient, le médecin peut mettre à jour cette probabilité en utilisant le théorème de Bayes. La valeur résultante n'est ni plus ni moins que le degré personnel de croyance du médecin.

La plupart des physiciens affichent leur foi dans les probabilités fréquentistes plutôt que bayésiennes, tout simplement parce qu'on leur a appris à fuir la subjectivité. Mais quand il s'agit de faire une prédiction, l'approche bayésienne prévaut, affirme Marcus Appleby, mathématicien à l'Université de Londres, convaincu par Ch. Fuchs de l'importance des probabilités bayésiennes.

M. Appleby fait remarquer qu'il nous paraîtrait insensé de participer à une loterie si l'on a appris que c'est la même personne

qui a gagné chaque semaine depuis dix ans, même si une approche strictement fréquentiste affirmerait que les résultats des tirages précédents sont sans effet sur les résultats futurs. En pratique, personne n'ignorerait le résultat des semaines précédentes. En réalité, la stratégie de bon sens serait d'adopter le point de vue bayésien, c'est-à-dire d'actualiser nos connaissances et d'agir en tenant compte des meilleures données disponibles.

Récrire les règles quantiques

Même si le QBisme nie la réalité de la fonction d'onde, ce n'est pas une théorie nihiliste qui nie toute réalité, souligne R. Schack, l'un des trois concepteurs initiaux du QBisme. Le système quantique examiné par un observateur est en effet très réel, note-t-il. Sur le plan philosophique, dit D. Mermin, le QBisme suggère l'existence d'une séparation, d'une frontière, entre le monde où vit l'observateur et l'expérience qu'a cette personne du monde, cette expérience subjective étant décrite par une fonction d'onde.

Sur le plan mathématique, Ch. Fuchs a réalisé une découverte importante susceptible de renforcer la proposition du QBisme comme une interprétation valable de la théorie quantique et des probabilités. Ce résultat concerne la « règle de Born », formule qui indique à l'observateur comment calculer la probabilité d'un événement quantique à partir de la fonction d'onde (plus précisément, la règle de Born stipule que la probabilité que le système quantique manifeste la propriété X est égale au carré du module de l'amplitude de la composante de la fonction d'onde correspondant à X). Ch. Fuchs a démontré que l'on pouvait récrire presque entièrement la règle de Born dans le langage de la théorie des probabilités, sans se référer à une fonction d'onde. La règle de Born constituait le pont reliant les fonctions d'onde aux résultats expérimentaux ; Ch. Fuchs a désormais montré que l'on peut prédire les résultats expérimentaux en utilisant directement des probabilités, sans passer par une fonction d'onde.

Selon Ch. Fuchs, la nouvelle expression de la règle de Born est une indication supplémentaire que la fonction d'onde n'est qu'un outil permettant à l'observateur de calculer ses croyances personnelles,

ou probabilités, sur le monde quantique qui l'entoure.

La simplicité de la nouvelle équation est frappante. À un petit détail près, elle ressemble à la loi des probabilités totales, qui exige que la somme des probabilités de tous les résultats possibles d'une épreuve soit égale à 1. Le détail qui change (la seule référence à la théorie quantique dans cette prescription de la façon de calculer les probabilités) est l'intervention de d , la dimension quantique du système. Ce terme de dimension ne se rapporte pas à la longueur ou à la largeur, mais au nombre d'états qu'un système quantique peut occuper. Par exemple, un électron unique, dont l'état de spin a deux orientations possibles, aurait une dimension quantique égale à 2.

Ch. Fuchs fait remarquer que la dimension quantique est un attribut intrinsèque, irréductible, qui caractérise la « nature quantique » d'un système, de la même façon que la masse d'un objet caractérise ses propriétés gravitationnelles et inertielles. Bien que d soit implicite dans tous les calculs de physique quantique, son apparition explicite et au premier plan dans une équation fondamentale est inédite. La règle de Born étant parée de ces nouveaux habits, Ch. Fuchs espère avoir découvert la clef d'une nouvelle vision de la mécanique quantique. « Je caresse l'idée, confesse-t-il, que [la règle de Born] soit le plus important de tous les axiomes de la théorie quantique. »

Une théorie encore en construction

L'un des reproches faits au QBisme est son incapacité à expliquer des phénomènes macroscopiques complexes en fonction de phénomènes microscopiques plus primitifs, comme le fait la théorie quantique habituelle. La manière la plus directe de répondre à ce défi serait que le QBisme réussisse à fonder la théorie quantique sur des hypothèses nouvelles et convaincantes.

Cet objectif affiché n'est pas encore atteint, mais le QBisme offre dès maintenant une nouvelle vision de la réalité physique. En interprétant la fonction d'onde en termes de degrés de croyance personnelle, il donne un sens mathématique précis à l'intuition de Bohr selon laquelle la physique porte sur ce que l'observateur peut dire de la nature, et pas plus. ■

■ L'AUTEUR



Hans Christian von BAEYER est physicien théoricien des particules et professeur émérite au *College of William and Mary*, en Virginie (États-Unis).

■ BIBLIOGRAPHIE

N. D. Mermin, **Quantum mechanics : Fixing the shift split**, *Physics Today*, pp. 8-10, juillet 2012. Réactions à ce commentaire : *Physics Today*, pp. 8-15, décembre 2012.

C. A. Fuchs, **Interview with a Quantum Bayesian**, 2012 [<http://arxiv.org/abs/1207.2141>].

M. F. Pusey *et al.*, **On the reality of the quantum state**, *Nature Physics*, vol. 8, pp. 475-478, 2012.

F. Laloë, **Comprenons-nous vraiment la mécanique quantique ?**, CNRS Éditions/EDP Sciences, 2011.

C. A. Fuchs, **QBism, the perimeter of quantum bayesianism**, 2010 [<http://arxiv.org/abs/1003.5209>].

T. Martin, **La probabilité, un concept pluriel**, M. Cozic et I. Drouet, **Interpréter les probabilités**, *Pour la Science*, novembre 2009.