

L'ESSENTIEL

> L'état quantique d'un système physique peut être une superposition d'états distincts, correspondant chacun à une valeur différente de la même grandeur physique.

> Pour expliquer pourquoi une mesure donne toujours un résultat univoque, l'interprétation « orthodoxe » de la mécanique quantique suppose que l'appareil de mesure, macroscopique, échappe aux lois quantiques.

> Cette exclusion du domaine quantique de l'appareil de mesure étant difficile à justifier, plusieurs interprétations concurrentes ont été proposées.

> L'auteur a récemment proposé le « solipsisme convivial », interprétation d'après laquelle chaque observateur ne peut percevoir que l'un des états d'une superposition, et sans que des observateurs distincts puissent constater un désaccord entre eux.

L'AUTEUR



HERVÉ ZWIRN
directeur de recherche au CNRS,
physicien et épistémologue à l'IHPST,
à Paris, et au Centre de mathématiques
et de leurs applications à l'École normale
supérieure Paris-Saclay

L'observateur, un défi pour la physique quantique

La théorie quantique est-elle compatible avec l'existence d'une réalité objective, indépendante de l'observateur ? Cette question reste en suspens depuis la naissance de la mécanique quantique. Une interprétation récente, le « solipsisme convivial », propose une réponse originale, qui confère à l'observateur un rôle essentiel.

La mécanique quantique, élaborée dans les années 1920, est l'une des théories les plus précises dont nous ayons jamais disposé. Elle permet de décrire quantitativement une très grande variété de phénomènes naturels, de la structure de l'atome à la supraconductivité. Mais elle pose des problèmes difficiles quand on veut comprendre la signification profonde de son formalisme mathématique.

Ces difficultés ne s'opposent heureusement en rien à son utilisation pratique quand il s'agit de prédire des résultats expérimentaux et de calculer les valeurs des grandeurs physiques. Les physiciens sont tous d'accord quant à la façon d'utiliser le formalisme à ces fins. La plupart des physiciens se satisfont d'ailleurs de cette situation et ne s'intéressent que de très loin aux problèmes conceptuels posés par les fondements de la théorie quantique.

Cependant, la réflexion autour de ces fondements touche à des problèmes philosophiques

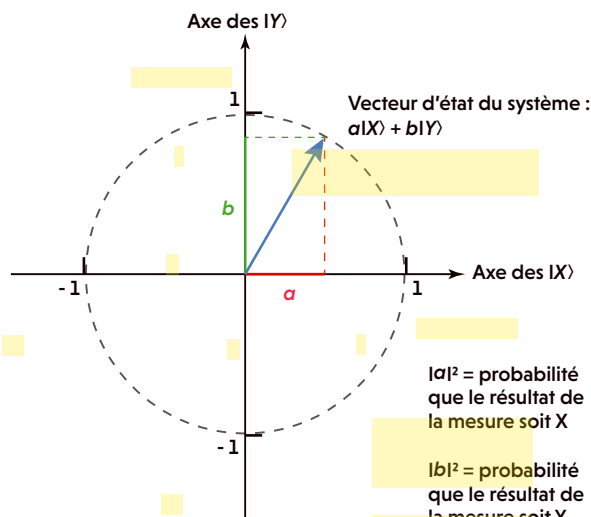
parmi les plus anciens et les plus profonds, tels que le problème du réalisme ou celui de la conscience. Ce que la mécanique quantique a apporté de nouveau est le fait que, si l'on considère que c'est la bonne théorie pour décrire le monde microscopique et qu'elle s'applique aussi au monde macroscopique, alors certaines positions philosophiques concernant la réalité qui nous entoure ne sont plus tenables.

Grâce aux nombreux articles de vulgarisation publiés ces dernières années dans de multiples médias, tout un bestiaire de mots étranges est associé à la théorie quantique dans l'esprit du grand public : indéterminisme, superposition, dualité onde-corpuscule, chat de Schrödinger, principe d'incertitude, non-localité, intrication, etc. Chacun d'eux se réfère à un aspect particulier et souvent contre-intuitif de la mécanique quantique. Nous allons ici nous intéresser à un problème qui est sans doute le plus fondamental de tous, qui provient à la fois de la superposition des états quantiques, de l'indéterminisme des résultats de mesure, de l'intrication des systèmes >



LA RÈGLE DE BORN

La théorie quantique décrit l'état d'un système physique par un vecteur d'un certain espace abstrait. En général, ce vecteur s'écrit comme la somme de plusieurs vecteurs (ou états) de base orthogonaux entre eux et de norme (ou longueur) égale à 1, chacun correspondant à une valeur bien déterminée d'une même grandeur physique (position ou énergie par exemple) et étant affecté d'un certain coefficient. La règle



de Born donne la probabilité de trouver telle ou telle valeur lors d'une mesure en fonction des coefficients des vecteurs

de base dans la somme décrivant l'état du système. Elle stipule que la probabilité de trouver une valeur est égale

au carré du coefficient de l'état de base correspondant (plus précisément au carré du module du coefficient, qui peut être un nombre complexe). La somme des carrés des coefficients représente la somme des probabilités des résultats possibles, et doit donc être égale à 1. C'est pourquoi on demande que le vecteur d'état soit de norme égale à 1. Ainsi, si l'on mesure la position d'un électron dans l'état $1/\sqrt{2}(|X\rangle + |Y\rangle)$, on le trouvera soit en X, soit en Y avec une probabilité $1/2$. Si l'on mesure la position d'un électron dont l'état est $1/\sqrt{3}|X\rangle + \sqrt{2/3}|Y\rangle$, on le trouvera en X avec la probabilité $1/3$ et en Y avec la probabilité $2/3$. Le schéma ci-contre illustre la règle de Born pour un système à deux états de base et avec des coefficients réels a et b (en toute généralité, ils sont complexes).

> et qui est souvent exemplifié par le fameux chat de Schrödinger à la fois mort et vivant: le problème de la mesure des grandeurs physiques.

Cette question de la mesure est étroitement liée à celle de la réalité. La plupart des physiciens considèrent que l'on devrait pouvoir comprendre le monde quantique de façon objective, c'est-à-dire sans faire aucune référence à nous-mêmes: nous sommes supposés être des observateurs passifs, qui se contentent de prendre acte de phénomènes se déroulant dans une réalité extérieure et indépendante de nous. Cette attitude est naturelle. La mécanique classique nous a habitués à raisonner ainsi et, dans l'attitude scientifique traditionnelle, on considère l'objectivité comme une valeur déterminante.

Mais si le concept de mesure ne pose aucun problème en physique classique, il soulève de grandes difficultés en physique quantique. Ce sont ces difficultés que je vais analyser. Elles conduisent à remettre en cause l'existence objective, en l'absence de tout observateur, de valeurs définies pour les grandeurs caractérisant un système physique. Je vais ensuite présenter et défendre une idée plutôt surprenante: c'est seulement lorsqu'un observateur prend conscience de sa mesure qu'une valeur définie de la grandeur mesurée émerge, et celle-ci n'implique aucun changement dans l'état physique du système, mais est relative à l'observateur lui-même.

D'une certaine manière, les difficultés d'interprétation de la mécanique quantique ont pour origine fondamentale le «principe de superposition». Expliquons en quoi celui-ci consiste.

Dans la théorie quantique, on représente les états des systèmes physiques par des objets

mathématiques qui sont des vecteurs dans un certain espace aux propriétés convenables (un «espace de Hilbert»). On utilise aussi parfois le terme de «fonction d'onde» pour désigner le vecteur caractérisant l'état du système. Par exemple, l'état de position d'un électron qui se situe dans la région X sera représenté par un vecteur qu'on a l'habitude de noter $|X\rangle$; celui d'un électron situé dans la région Y sera $|Y\rangle$.

L'ORIGINE DES DIFFICULTÉS

Or le principe de superposition stipule que si deux états quantiques sont possibles, alors toute combinaison linéaire (c'est-à-dire une somme pondérée) des deux vecteurs d'état correspondants représente elle-même un état possible. Ainsi, selon ce principe, si $|X\rangle$ et $|Y\rangle$ sont des états possibles (et bien distincts) du système, l'état $a|X\rangle + b|Y\rangle$, où a et b sont des coefficients numériques, est également un état possible.

Prenons l'exemple de la combinaison linéaire $|X\rangle + |Y\rangle$, où les coefficients sont égaux (en fait, pour des raisons de normalisation liées à la règle de Born – voir l'encadré ci-dessus –, un tel vecteur doit avoir une longueur 1 et il faudrait donc l'écrire $1/\sqrt{2}(|X\rangle + |Y\rangle)$ si $|X\rangle$ et $|Y\rangle$ sont eux-mêmes de longueur 1 et orthogonaux; mais, pour simplifier, nous omettrons les facteurs de normalisation). À quoi correspond un tel état? Où se trouve un électron dont l'état est décrit par cette somme?

Aucune réponse conforme à une description usuelle n'est possible. On peut montrer qu'il est tout aussi faux de dire que l'électron est «à la fois» en X et en Y, qu'il est «tantôt» en X et «tantôt» en Y, qu'il est à mi-chemin