Tout est quantique : ce que je mesure, mon détecteur, moi-même !

Dès la première formulation de la mécanique quantique, la Nature a été divisée en deux catégories : le monde classique (celui des balles de tennis) et le monde quantique constitué d'atomes et de photons. Le passage entre les deux se fait par la réduction de la fonction d'onde (wave function collapse) pendant le processus de mesure. De la multitude des résultats de mesure possibles inclus dans la fonction d'onde, une seule valeur en sort, celle effectivement mesurée, correspondant à un état particulier de la fonction d'onde. Ceci est un processus irréversible, bien différent de l'évolution (réversible) du système juste avant la mesure suivant l'équation de Schrödinger. Deux mondes et deux types de dynamique… trop compliqué ! Une autre approche est possible en considérant que tout est de nature quantique : le système étudié, l'appareil de mesure, l'observateur et même la montre qui marque le temps au moment de la mesure. Un chercheur de l'équipe Agrégats et surfaces sous excitation intense (ASUR) de l'INSP a démontré qu'avec cette approche, la fonction de probabilité des résultats de mesure est simple et unique. De plus, elle est valable aussi bien pour des balles de tennis que pour des photons.

Supposons que le système que nous voulons étudier suive les règles de la mécanique quantique. Supposons également que l'appareil de mesure suive les mêmes règles, mais aussi la personne qui mesure, son cerveau et sa montre qui lui donne le temps de mesure. Nous avons alors des chaînes de systèmes quantiques intriquées les unes avec les autres, liées par des interactions unitaires réversibles, c'est-à-dire compatibles avec l'équation de Schrödinger, sans aucune réduction. Rien de nouveau jusque-là ; Everett l'avait déjà dit en 1957 et plusieurs auteurs l'ont redécouvert ou répété par la suite. Mais comment sortir des prédictions et probabilités à partir de ces réseaux de relations ? Si tout est quantique, tous les ingrédients considérés (système mesuré, appareil de mesure, observateur, horloge...) peuvent être décrits dans un espace abstrait, appelé espace de Hilbert cinématique, où la dynamique fait partie intégrante de la fonction d'onde globale qui s'étend dans le temps et qui décrit tout. Dans ce cadre, formulé pour la première fois par Page et Wootters en 1983, une horloge n'est qu'un système quantique comme les autres, consistant par exemple en un spin en précession avec l'heure définie par l'orientation du spin au moment de sa mesure.

Si le système étudié l'observateur et son horloge peuvent être décrits dans un espace de Hilbert, chaque mesure peut être associée à un opérateur qui vit dans un tel espace. Nous démontrons [1] que la forme de la probabilité associée est alors univoquement définie par un théorème mathématique (théorème de Gleason-Bush). L'expression de cette probabilité, y compris les probabilités conditionnelles associées résultants d'une mesure intermédiaire, est alors bien définie. Ceci permet de décrire également des cas déroutants comme le scénario de l'ami.e de Wigner où une personne observe une autre personne et les deux mesurent des choses apparemment contradictoires (voir figure). L'expression non ambiguë de la probabilité d'obtenir un résultat souligne au contraire l'aspect relatif des mesures : Wigner voit son ami.e comme étant en superposition quantique mais aussi l'ami.e voit Wigner en état de superposition sans qu'aucune situation paradoxale n'apparaisse.

Figure
Vision artistique du cas de l'ami.e de Wigner. L'ami.e de Wigner fait une mesure sur un système qui peut donner comme résultat « haut » ou « bas ». Wigner mesure le système aussi et en même temps le résultat de la mesure de l'ami.e, mais avec une autre base : « gauche » ou « droite ». L'ami.e et Wigner ont donc une perception différente du même système étudié, d'où l'apparent paradoxe.

Si notre fonction de probabilité est unique, comment est-il possible d'appliquer la même règle au monde classique et au monde quantique ? En effet, pour des balles de tennis qui passent par deux fentes, A ou B, et sont détecté ensuite par un détecteur D, la probabilité de passer par A ou B est égale à la probabilité de A plus la probabilité de B, mais au niveau quantique, le monde des atomes et photons, cette simple règle de somme n'est plus valable (avec l'apparition de phénomènes d'interférence). Cependant, un accord peut être trouvé si nous généralisons encore plus la définition de probabilité. L'approche standard pour définir la probabilité d'une mesure réside dans son association à un opérateur dans l'espace de Hilbert. Une formulation équivalente peut être obtenue en définissant la probabilité comme une mesure quantitative (entre 0 et 1) de la véracité d'une proposition comme « j'ai mesuré x au temps t0 », comme les probabilités Bayésiennes. Avec cette approche, nous démontrons [2] qu'une phrase « j'ai mesuré A et D ou B et D » n'est plus équivalente à « j'ai mesuré A ou B et D ». Dans le premier cas nous avons la probabilité des balles de tennis car nous pouvons en principe suivre leur trajectoire qui consiste en les propositions « A et D » ou « B et D ». Dans le deuxième cas, l'ignorance intrinsèque de « A ou B » cause la possible présence d'interférences. Dans les deux cas, c'est toujours le théorème de Gleason-Bush qui dicte la forme unique de la probabilité. Dans le cadre plus spécifique de la mécanique quantique relationnelle de Rovelli (1996), une telle définition permet de réduire de trois à deux ses postulats [3].

En 1951, Richard Feynman, un des pères de l'électrodynamique quantique, écrivait « Le concept de probabilité n'est pas altéré en mécanique quantique…Ce qui est changé, et radicalement changé, est la méthode pour calculer les probabilités. ». Ce travail démontre que cela n'est pas nécessairement vrai. La fonction de probabilité est universelle. Elle émerge de manière univoque et naturellement quand tous les systèmes mis en jeu, y compris l'observateur et l'horloge, sont considérés comme des systèmes quantiques. Ce qu'il ne faut pas considérer comme valable est la propriété distributive des arguments (et des opérateurs logiques « et » et « ou ») de la fonction de probabilité. Le passage des balles de tennis aux photons n'est qu'une question de précision de la mesure et d'intrication entre le système étudié, l'appareil de mesure et l'observateur.

Références

[1] « Conditional probabilities of measurements, quantum time, and the Wigner's-friend case », M. Trassinelli, Phys. Rev. A 105, 032213 (2022) hal-03179772

[2] « Conditional probability and interferences in generalized measurements with or without definite causal order », M. Trassinelli, Phys. Rev. A 102, 052224 (2020) hal-02933221

[3] « Relational Quantum Mechanics and Probability », M. Trassinelli, Found. Phys. 48, 1092 (2018) hal-01723999

Contact

trassinelli@insp.jussieu.fr