

- Dans les années 1950, inspiré par la théorie de l'onde pilote de Louis de Broglie, proposée en 1927, le physicien américain David Bohm a développé une interprétation de la physique quantique reposant sur la dualité onde-corpuscule. La particule a ici une position toujours bien définie et elle est guidée par une onde qui est décrite par l'équation de Schrödinger. Cette vision est à la fois réaliste et déterministe. À la même époque, son compatriote Hugh Everett a imaginé une théorie dite «des mondes multiples». La fonction d'onde ne s'effondre jamais, lors d'une mesure, chaque état se réalise dans un monde différent.

UN AMI QUANTIQUE

En 1961, Eugene Wigner, un des spécialistes de la physique quantique (il a obtenu le prix Nobel en 1963 pour ses travaux sur la théorie de l'atome et des particules élémentaires), a proposé une expérience de pensée connue sous le nom de «l'ami de Wigner». Dans cette expérience, Wigner a poussé l'expérience du chat de Schrödinger un peu plus loin. Il voulait mettre en évidence certaines incohérences de la théorie quand il s'agit des observateurs et souligner l'importance, selon lui, de la différence entre un instrument de mesure et un observateur doté de conscience. L'idée est de remplacer le chat par un observateur, le fameux «ami de Wigner», qui réalise une mesure sur un atome et d'ajouter un second observateur à l'extérieur du système qui s'intéresse au système «atome + ami de Wigner», c'est «Wigner» lui-même.

Dans cette expérience, l'ami de Wigner, dans son laboratoire, mesure le spin de l'atome (vers le haut ou vers le bas). Wigner, lui, se trouve à l'extérieur du laboratoire sans savoir quel est le résultat. Initialement, l'atome est dans un état superposé de spin

«haut» et spin «bas», jusqu'au moment où l'ami réalise sa mesure. L'atome est alors dans un état bien défini. Wigner ne peut décrire le système «ami + laboratoire» qu'avec les informations limitées auxquelles il a accès. Pour lui, son ami est dans une superposition de deux états : «l'ami a mesuré un spin haut» et «l'ami a mesuré un spin bas». Bien sûr quand il ouvre la porte, la fonction d'onde s'effondre et les points de vue de Wigner et de son ami deviennent cohérents entre eux.

Mais ce qui est paradoxal (on parle du paradoxe de Wigner) est que pendant un certain temps, Wigner et son ami avaient une vision contradictoire de la situation : pour l'ami, l'atome était dans un état bien défini (celui obtenu par sa propre mesure) ; pour Wigner, l'atome était dans une superposition d'états. Quand l'effondrement de la fonction d'onde a-t-il vraiment lieu, au moment où l'ami fait sa mesure ou quand Wigner ouvre la porte ? L'ami peut même dire à Wigner qu'il a réalisé une mesure (sans lui donner la réponse) et donc Wigner sait que pour son ami l'état est bien défini mais ce n'est toujours pas le cas pour lui.

Ce raisonnement semble indiquer soit qu'il n'y a pas de réalité objective en physique quantique puisque deux personnes peuvent avoir des visions contradictoires du monde, soit qu'il y a un problème à utiliser les outils de la physique quantique (la superposition des états) sur un observateur comme l'ami de Wigner.

Dans l'interprétation de l'école de Copenhague, l'observateur est macroscopique et ne peut donc pas être dans un état de superposition. La fonction d'onde s'effondre dès la mesure de l'ami de Wigner, qui, en principe, ne devrait pas être décrit par Wigner dans une superposition d'états. «D'un point de vue mathématique, le problème apparaît dès lors

UN « PILE OU FACE » INCERTAIN

L'ami d'Alice dans son labo



- 1 L'ami d'Alice lance une pièce et prépare un électron en fonction du résultat.



« Face » : il prépare un électron avec un spin « bas ».



« Pile » : il prépare un électron avec des spins « haut » et « bas » superposés.

- 2 L'ami d'Alice envoie la particule à l'amie de Bob.

- 3 L'amie de Bob mesure le spin de l'électron.

L'amie de Bob dans son labo



- 4 Alice mesure le système « ami + labo » et en déduit le résultat du lancer de pièce.



- 5 Bob mesure le système « ami + labo » et en déduit le résultat du lancer de pièce.



RÉSULTAT. Alice et Bob comparent leurs conclusions : ils sont parfois en désaccord sur l'issue du lancer de pièce.

qu'on prend «la chose qui provoque l'effondrement de la fonction d'onde» et qu'on commence à la décrire quantiquement», explique Marc-Olivier Renou, de l'université de Genève. «La théorie ne définit pas ce qu'est un observateur, et différentes versions sont envisageables. Par exemple, un être doué de conscience, ou encore un système complexe doté d'une mémoire.» Cependant, la notion de mémoire est problématique en physique quantique. «En effet, d'un point de vue technique, toute la bizarrerie de ces expériences est que l'on utilise des outils mathématiques unitaires et donc réversibles sur des observateurs qui ont une mémoire. Or, la mémoire est un processus irréversible (au moins pendant un certain temps)», ajoute Antoine Tilloy, de l'institut Max-Planck d'optique quantique, à Munich. «Si on applique ces outils, cela revient à effacer la mémoire des observateurs!»

UNE COHÉRENCE MISE EN DÉFAUT

En 2016, Daniela Frauchiger et Renato Renner ont proposé une version améliorée de l'expérience de pensée de «l'ami de Wigner». En s'appuyant sur des hypothèses, *a priori* raisonnables (la physique quantique est valide de façon universelle, les prédictions de deux observateurs ne sont jamais contradictoires et une mesure donne un seul résultat), les deux chercheurs ont montré que deux observateurs arrivent parfois à des résultats contradictoires concernant une mesure en s'appuyant uniquement sur des arguments issus de la théorie quantique. Pour résoudre ce problème, il faut alors accepter qu'une des hypothèses raisonnables ne soit pas valide. L'étude n'indique pas laquelle est à rejeter, mais chaque possibilité éclaire sous un nouveau jour les différentes interprétations de la physique quantique et oblige les chercheurs à bien comprendre les particularités de chaque interprétation et les principes qu'elle admet, parfois pas toujours de façon très explicite.

En quoi consiste l'expérience de pensée de Daniela Frauchiger et Renato Renner? Comparé à l'idée de Wigner, il y a maintenant quatre acteurs: Alice et l'ami d'Alice, Bob et l'amie de Bob. L'ami d'Alice est dans son labo et réalise une expérience sur un système quantique; Alice est à l'extérieur de son labo. L'amie de Bob est dans son labo et réalise une expérience; Bob est à l'extérieur.

L'expérience commence avec l'ami d'Alice qui fait une mesure, l'équivalent d'un «pile» ou «face» avec une pièce quantique présentant une probabilité un tiers d'avoir «face» et deux tiers d'avoir «pile». Si c'est face, l'ami d'Alice prépare un électron avec un spin «bas» et l'envoie à l'amie de Bob. Si c'est «pile», le système est préparé de telle sorte que l'électron

CONTRADICTIONS QUANTIQUES

L'expérience de pensée de Daniela Frauchiger et Renato Renner oblige les physiciens à abandonner l'une des hypothèses *a priori* raisonnables sur lesquelles repose la physique quantique.

Q : L'UNIVERSALITÉ

Tout dans l'Univers obéit aux lois de la physique quantique.



Cette hypothèse est contredite par les théories selon lesquelles les grands systèmes quantiques s'effondrent d'eux-mêmes.

C : LA COHÉRENCE

Les prédictions de deux observateurs ne sont jamais contradictoires.



Cette hypothèse est contredite par des théories comme le QBism, postulant que les résultats des mesures dépendent de l'observateur.

S : L'UNICITÉ

Une mesure donne un seul résultat.



La pièce donne «face»

La pièce donne «pile»

2

Dans la théorie des mondes multiples, tous les résultats possibles d'une mesure adviennent chacun dans son propre univers.

est dans une superposition équiprobable de «haut» et «bas». Deuxième étape: l'amie de Bob mesure le spin de l'électron qu'elle a reçu. Quand elle obtient «haut», elle peut facilement déduire que l'ami d'Alice avait tiré «pile».

Qu'en est-il pour Alice et Bob? Ils considèrent, à la façon de Wigner, que leur ami respectif et son labo sont intriqués et font des prédictions sur les mesures en utilisant les règles de la physique quantique. À ce stade du raisonnement, il faut introduire la première hypothèse de l'expérience: la physique quantique est valide de façon universelle et peut s'appliquer à tout système, peu importe sa taille et sa complexité (Q). Il n'y a donc pas de coupure de Heisenberg et on suppose une situation idéale où on contrôle parfaitement le système de sorte qu'il est possible de considérer le laboratoire et l'ami à l'intérieur dans un état de superposition. Ainsi, comme chez Wigner, l'ami d'Alice connaît précisément le résultat de son tirage, mais pour Alice, le labo et son ami sont dans un état superposé «pile» et «face».

Dans l'expérience des deux chercheurs de Zurich, Alice opère une mesure quantique particulière sur le labo et son ami qui lui donne une certaine réponse (notée «oui» ou «non») à partir de laquelle elle peut déduire le résultat de la mesure de l'amie de Bob. Et, en particulier, si elle obtient «oui», elle en déduit que son ami a obtenu «pile». Pour cela, il faut faire appel à la deuxième hypothèse: la physique quantique présente une