

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.



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

➤ cohérence interne, c'est-à-dire que les prédictions de deux observateurs font en utilisant les règles de la physique quantique ne sont jamais contradictoires (C).

Bob peut évidemment réaliser le même genre de mesure qu'Alice avec comme résultat «oui» ou «non» mais sur le labo de son amie. Le système est conçu de telle façon que si Bob obtient la réponse «oui», il doit conclure que l'ami d'Alice avait tiré «face».

Bob et Alice peuvent ensuite comparer leurs résultats. Mais pour que cela soit pertinent, il faut introduire la troisième hypothèse: l'unicité de la mesure, qui prévoit que quand un observateur réalise une mesure, il obtient un résultat unique (S). Si l'ami d'Alice a joué à «pile» ou «face», un seul résultat a pu sortir de ce tirage; on ne peut pas avoir simultanément les deux solutions.

Résultat: quand Alice obtient «oui» de sa mesure, elle conclut que le tirage était «pile»; et quand Bob obtient «oui», il déduit que le tirage était «face». Daniela Frauchiger et Renato Renner ont montré que la plupart du temps Alice et Bob obtiennent l'un «oui», l'autre «non», donc tout est cohérent, mais... dans un cas sur douze, Alice et Bob obtiennent tous les deux «oui»! Ils ne sont donc pas d'accord sur l'issue du tirage. Les deux discutent du même événement survenu dans le passé, pourtant l'un assure que le résultat était «pile» quand l'autre affirme que c'était «face».

Daniela Frauchiger et Renato Renner ont conclu que toute théorie qui satisfait (Q), (C) et (S) simultanément produit parfois des résultats contradictoires. On parle de «théorème no-go» pour dire que cette situation n'est pas physiquement acceptable. Une interprétation de la physique quantique qui serait exempte de ce type de contradiction doit donc violer une de ces hypothèses.

Dans la première version de leur article, en 2016, les deux chercheurs de Zurich arrivaient à la conclusion que si on applique la théorie quantique à un modèle d'observateur qui utilise lui-

même la théorie quantique, alors il est impossible d'avoir une interprétation cohérente de la physique quantique qui repose sur l'existence d'un seul monde. En d'autres termes, la contradiction qu'ils mettent en avant serait un argument fort pour la théorie des mondes multiples d'Everett. En effet, dans ce contexte, l'hypothèse de la mesure unique (S) n'est pas vérifiée. Lors d'une mesure, chacun des états possibles donne lieu à un monde où cet état est réalisé.



Les réactions ont été très vives! Certains physiciens ont suggéré que cela pouvait même remettre en cause la notion de réalité objective, mais cette possibilité a été mal accueillie. Le philosophe des sciences, spécialiste de la physique, Tim Maudlin a par exemple écrit: «S'il n'y a pas de monde physique objectif, il n'y a alors rien à étudier pour les physiciens.» De façon plus raisonnable, les chercheurs ont essayé de comprendre comment chaque interprétation se comportait face à cette expérience de pensée.

PLUS RIEN À ÉTUDIER!

Il est possible de classer les différentes interprétations selon qu'elles violent (Q), (C) ou (S). En revanche, l'expérience ne permet pas de dire quelle piste est juste. Comme Renato Renner l'a indiqué dans *Quanta Magazine*, «la science s'arrête ici. Nous savons qu'une des hypothèses est fautive, mais nous ne pouvons pas vraiment donner un bon argument pour dire laquelle. C'est maintenant une affaire d'interprétation et de goût.» D'ailleurs, dans la version de l'article de 2018, les deux chercheurs ont une position plus modérée et ne concluent pas nécessairement que les incohérences exhibées sont un argument en faveur de l'interprétation des mondes multiples.

Les interprétations qui violent (Q) sont celles qui ne suivent pas certaines règles de la physique quantique. C'est par exemple le cas des approches d'effondrement dynamique qui supposent un mécanisme qui fait spontanément s'effondrer la fonction d'onde. Avec ce processus probabiliste, plus un objet est macroscopique, plus les chances d'effondrement sont élevées. Cela permet d'expliquer pourquoi on n'observe pas d'effets de superposition sur des objets très étendus. La

**À PROPOS D'UN
MÊME ÉVÉNEMENT
PASSÉ, L'UN ASSURE
QUE LE RÉSULTAT
ÉTAIT «PILE» QUAND
L'AUTRE AFFIRME
QUE C'ÉTAIT «FACE»**