

la boîte sans simplement l'ouvrir) dont le résultat ne peut s'expliquer que par le formalisme quantique. Il est difficile de se faire une représentation mentale correcte de la superposition tant elle lutte avec notre intuition de tous les jours. Pourtant, à l'échelle microscopique, la superposition des états est un phénomène incontestable.

La mesure, et donc l'action d'un observateur, a un effet irrémédiable sur un système quantique, il détruit l'effet de superposition et fait qu'on ne voit que des états bien définis. Mais la mesure et l'action de l'observateur sur la destruction de l'effet de superposition soulèvent de nombreuses questions. Avant la mesure, l'évolution du système est décrite par l'équation de Schrödinger, une équation parfaitement déterministe et réversible. En revanche, la mesure est une opération qui introduit une irréversibilité brutale dans le système. Et elle est fondamentalement aléatoire en reposant sur des lois probabilistes. Comment s'opère exactement cette transition lors de la mesure?

Autre problème, dans la formulation de la physique quantique, rien n'empêche le phénomène de superposition de se propager des échelles microscopiques à des systèmes de plus en plus grands. Par exemple, partant d'un électron dans l'état superposé « haut » et « bas », si l'on utilise un instrument de mesure pour déterminer l'orientation du spin, on peut considérer le système « électron + appareil de mesure » comme un ensemble qui interagit et devient lui-même superposé: « l'instrument a mesuré l'électron dans l'état haut » et « l'instrument a mesuré l'électron dans l'état bas ». On pourrait utiliser un autre appareil plus grand pour mesurer cet instrument, et la superposition devrait encore se propager. Or on n'observe pas ce phénomène à l'échelle macroscopique: comment cette chaîne s'arrête-t-elle?

Dans la vision très orthodoxe de l'école de Copenhague, prônée par ses pères fondateurs le Danois Niels Bohr et l'Allemand Werner Heisenberg – que le physicien américain David Mermin a caricaturé par une remarque célèbre: « Tais-toi et calcule » –, l'intrication s'arrête à l'échelle de l'observateur, c'est-à-dire un système assez complexe et grand qui ne peut pas être en superposition. On parle de « coupure de Heisenberg ». Selon cette approche, il n'est pas possible d'appliquer les outils de la physique quantique à un observateur ou tout système macroscopique.

Cette limite entre le système quantique mesuré d'un côté et l'observateur de l'autre semble pourtant assez arbitraire. Comment s'établit cette frontière? Quels critères

définissent un observateur? La théorie quantique ne fournit aucune réponse. Est-ce uniquement une question de taille? La réponse est délicate. En 2019, l'équipe de Markus Arndt, de l'université de Vienne, en Autriche, a démontré que si on contrôle parfaitement un système il est possible d'observer des effets de superposition pour des molécules contenant pas moins de 2000 atomes. À ce stade, l'obstacle semble donc surtout technique.

L'ABSURDE CHAT

Erwin Schrödinger avait identifié ce problème et n'était pas très satisfait de la situation. Il l'a illustré avec son expérience de pensée du chat dans sa boîte que nous avons décrite. Pour un observateur à l'extérieur de la boîte, tant qu'il ne regarde pas ce qui se passe à l'intérieur, la fonction d'onde qui décrit l'atome radioactif est une superposition des états « intact » et « désintégré », mais qu'en est-il du chat? Son état se retrouve intriqué avec celui de l'atome (ce qui signifie qu'on ne peut pas les décrire indépendamment l'un de l'autre), l'ensemble « atome + chat » est donc dans une superposition d'états « atome intact, chat vivant » et « atome désintégré, chat mort ». Évidemment quand l'observateur ouvre la boîte, le chat est soit « vivant » soit « mort ». Cette idée qu'un système aussi macroscopique qu'un chat puisse être dans une superposition d'états semblait absurde pour Schrödinger.

En outre, s'il n'y a pas d'observateur pour provoquer l'effondrement de la fonction d'onde, le chat reste-t-il dans une superposition d'états? Et si l'on étend la question à l'ensemble de l'Univers, celui-ci ne pourrait jamais être dans un état bien défini. L'observateur semble donc indispensable. Einstein, opposé à cette idée et fervent partisan d'une réalité objective de la nature, s'en était ému: « Pensez-vous que la Lune n'existe que si quelqu'un la regarde? »

La formulation de la physique quantique offre peu de moyens de répondre à ces interrogations. Or, à l'exception d'une poignée de chercheurs, peu de personnes se sont intéressées à l'interprétation de la physique quantique jusqu'à la Seconde Guerre mondiale. La vision de l'école de Copenhague s'était imposée: la physique quantique est avant tout une collection d'outils permettant de calculer les probabilités d'obtenir un certain résultat lors d'une mesure, un point c'est tout.

Malgré l'efficacité redoutable de cette vision opérationnelle de la physique quantique, des physiciens ont commencé à critiquer l'interprétation de Copenhague après la guerre. Était-il possible d'en formuler d'autres? Oui. ➤

L'IDÉE QU'UN CHAT PUISSE ÊTRE DANS UNE SUPERPOSITION D'ÉTATS SEMBLAIT ABSURDE POUR SCHRÖDINGER

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

L'amie de Bob dans son labo



- 2 L'ami d'Alice envoie la particule à l'amie de Bob.
- 3 L'amie de Bob mesure le spin de l'électron.



- 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

➤ 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.



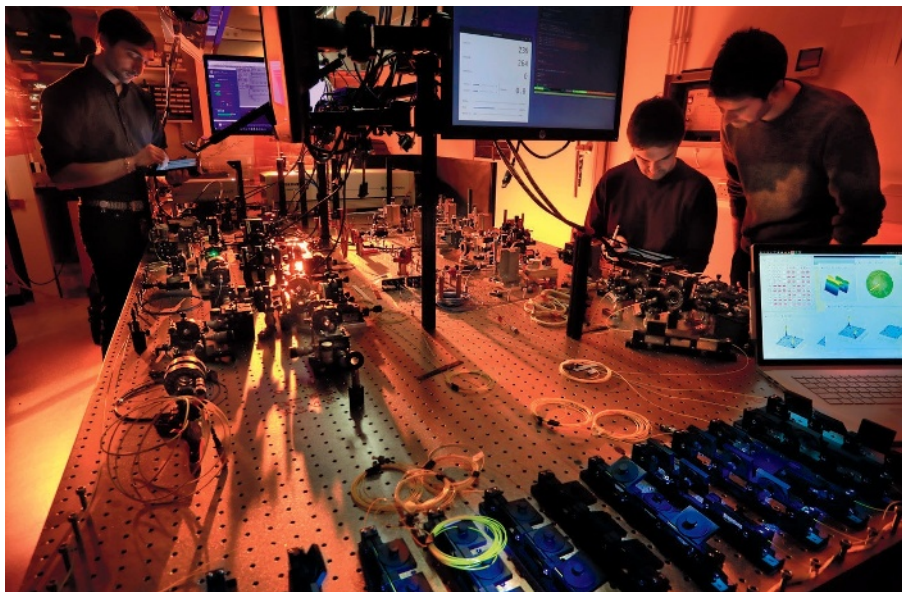
Les réactions ont été très vives! Certains physiciens ont suggéré que cela pouvait même remettre en cause la notion de réalité objective, mais cette possibilité a été mal accueillie. Le philosophe des sciences, spécialiste de la physique, Tim Maudlin a par exemple écrit: «S'il n'y a pas de monde physique 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 fausse, 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»**



L'expérience de pensée élaborée par Daniela Frauchiger et Renato Renner est finalement devenue une expérience réelle grâce à Massimiliano Proietti, de l'université Heriot-Watt, à Édimbourg.

coupure de Heisenberg entre les systèmes quantiques et les observateurs est alors pleinement justifiée.

Ainsi, dans les expériences de pensée, les amis de Wigner, d'Alice et de Bob ne peuvent pas être dans un état superposé. Par ailleurs, ces approches retirent à l'observateur son rôle déclencheur de l'effondrement de la fonction d'onde. Dans la théorie proposée par l'Anglais Roger Penrose et le Hongrois Lajos Diósi, la force gravitationnelle est responsable de l'effondrement. Dans une autre proposée en 1985 par les physiciens italiens Giancarlo Ghirardi, Alberto Rimini et Tullio Weber, une modification *ad hoc* de l'équation de Schrödinger (justifiée par une théorie plus fondamentale) déclenche l'effondrement de la fonction d'onde.

Même si cela est moins évident *a priori*, la mécanique bohémienne entre aussi dans cette catégorie des interprétations qui violent (Q). Cette vision suppose une fonction d'onde globale sur l'ensemble de l'expérience. Cela impose que tous les observateurs doivent avoir la même perception des choses (C) et une mesure ne peut donner qu'un seul résultat (S), donc (Q) est nécessairement violée d'après le théorème no-go.

La cohérence des points de vue n'est pas forcément respectée par toutes les interprétations de la physique quantique. Pour celle nommée QBism, la fonction d'onde ne décrit pas le système lui-même mais donne l'état de connaissance de l'observateur sur le système. Il n'y a donc pas de contradiction à avoir deux observateurs dont les points de vue diffèrent. Ainsi, dans son expérience, Wigner actualise sa connaissance de l'état de l'atome quand il ouvre la porte, soit bien après que son ami a réalisé sa mesure.

«Le théorème de Daniela Frauchiger et Renato Renner montre une incompatibilité

entre (Q), (C) et (S), souligne Marc-Olivier Renou, c'est un résultat intéressant car cela impose des critères forts sur toute interprétation de la physique quantique.» Ce théorème no-go n'est pas sans rappeler celui du physicien irlandais John Bell, postulé dans les années 1970 autour de la nature de l'intrication quantique (voir *Pas d'échappatoire pour l'intrication*, par R. Hanson, page 26).

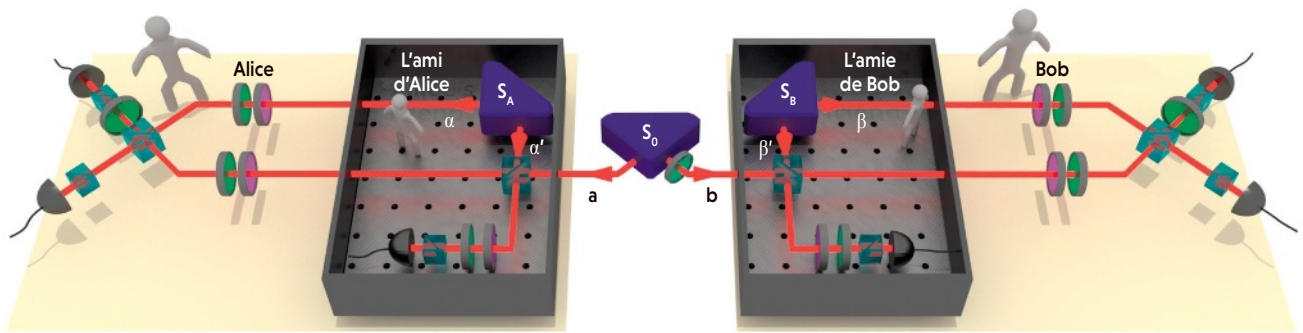
UN AUTRE THÉORÈME NO-GO

L'intrication est un phénomène fondamental en physique quantique. On dit que deux particules sont intriquées quand leurs propriétés sont liées de sorte qu'on ne peut pas les décrire séparément. Par exemple, prenons le cas où les deux particules sont émises simultanément depuis une source avec toujours des spins opposés. Le système est donc dans un état superposé de deux états : «particule 1, spin haut; particule 2, spin bas» et «particule 1, spin bas; particule 2, spin haut». Imaginons qu'on laisse les deux particules s'éloigner l'une de l'autre avant de mesurer le spin de la particule 1. Au moment de la mesure, on regarde la particule 1, mais c'est bien la fonction d'onde globale qui s'effondre et donc la particule 2 se retrouve instantanément dans l'état de spin opposé à celui mesuré de la particule 1.

Comme pour le phénomène de superposition, on peut avoir l'impression qu'une explication classique est possible et qu'on ne fait que révéler un état prédéterminé depuis l'émission de la source. Par exemple, si on remplace la source de photons par deux gants qu'on met chacun secrètement dans une enveloppe et qu'on les expédie dans des directions opposées, on constate effectivement que si on ouvre une enveloppe et qu'on obtient le gant gauche, alors on sait instantanément que l'autre enveloppe contient le gant droit. Dans ce cas classique, on révèle un état préexistant. Mais dans l'intrication quantique, il est possible de faire des mesures plus subtiles. La personne qui mesure le spin de la particule 1 peut le faire selon un angle arbitraire, par exemple 45° et pas seulement dans les directions «haut» et «bas». Et la personne qui fait la mesure pour la particule 2 peut aussi configurer son instrument de mesure avec l'angle de son choix. En itérant l'expérience un grand nombre de fois, les corrélations qu'on obtient entre les mesures des particules 1 et 2 ne peuvent plus s'expliquer par un raisonnement classique, l'intrication est bien un phénomène purement quantique.

À l'image du théorème de Bell, qui a ouvert la voie à des expériences sur l'intrication quantique, le théorème de Daniela Frauchiger et de Renato Renner peut-il être aussi testé en laboratoire? Dans leur article, les chercheurs se contentent de parler d'expérience de pensée. Il y a une difficulté expérimentale certaine à vouloir manipuler un observateur soumis à la

>



➤ superposition des états. En effet, plus un système est grand et complexe, plus il est difficile de contrôler son caractère quantique sans que sa fonction d'onde s'effondre spontanément (en interagissant avec son environnement). Il y a aussi le problème de la mémoire qui s'efface, comme l'évoquait Antoine Tilloy. Ainsi, au sens de l'interprétation de Copenhague, un objet dont on peut effacer la mémoire ne qualifie pas en tant qu'observateur. Il faudrait donc trouver un objet qui pourrait être un observateur crédible et dont il est possible d'effacer la mémoire de façon cohérente. L'ordinateur quantique semble être techniquement ce qui se rapproche le plus de ces contraintes.

VERS UN TEST EXPÉRIMENTAL

En 2019, Massimiliano Proietti et ses collègues ont réalisé une expérience dans la lignée des idées de Daniela Frauchiger et Renato Renner, mais s'inspirant surtout d'une autre expérience de pensée, proposée en 2018 par Caslav Brukner, de l'université de Vienne. Ce dernier établit un autre théorème no-go impliquant que l'une des trois hypothèses suivantes est nécessairement violée: l'indépendance des observateurs (Alice et Bob sont libres de réaliser la mesure qu'ils veulent), la localité (les choix d'Alice et de Bob n'influent pas sur les mesures de l'autre) et l'établissement de faits objectifs, indépendants de l'observateur. Ce théorème no-go peut être reformulé en termes d'inégalités de Bell (celles qui d'après le théorème du physicien sont violées dans le cas de l'intrication), ce qui ouvre la possibilité de réaliser expérimentalement ce test de Bell-Wigner.

Dans leur expérience, Massimiliano Proietti et ses collègues ont utilisé un «ordinateur quantique» très simple impliquant trois paires de photons intriqués (voir la figure ci-dessus). Dans le dispositif, une source unique émettait deux photons intriqués, envoyés l'un à l'ami d'Alice et l'autre à l'amie de Bob. Et chacun de ces amis est en fait remplacé par une source de photons intriqués qui interfèrent avec les photons reçus. Avec les photons qui sont émis hors du système, Alice et Bob réalisent ensuite des tests de Bell. L'expérience a montré que l'inégalité de Bell

L'expérience de Massimiliano Proietti. Les photons (a et b) d'une paire intriquée émise par une source S_0 sont envoyés respectivement vers les amis d'Alice et de Bob. Ils mesurent l'état de leur photon grâce à d'autres photons (émis par S_a et S_b) de paires intriquées (α et α') et (β et β'). Les photons α' et β' sont mesurés pour valider la mesure, tandis que les photons α et β enregistrent les mesures des amis. Alice et Bob vérifient ensuite avec les paires (α , α') et (β , β') que les inégalités de Bell sont violées et déduisent par ailleurs les résultats obtenus par leurs amis. On en conclut que la physique quantique doit être interprétée de façon indépendante de l'observateur.

qu'ils avaient construite était violée. Conséquence: le théorème no-go de Caslav Brukner a été confirmé.

Pour concilier ce résultat expérimental avec le théorème no-go de Daniela Frauchiger et Renato Renner, Massimiliano Proietti et ses collègues ont noté que la violation de la localité ou de l'indépendance des observateurs ne suffit pas. Cela semble indiquer que la seule solution serait qu'il n'y a pas de réalité objective, comme le propose le QBism par exemple. Néanmoins, cette conclusion est encore soumise à d'importants débats. D'autres approches pourraient passer ce test, par exemple, «la théorie de Bohm n'a aucun problème, elle est parfaitement indépendante de l'observateur et décrit très bien l'expérience», souligne Antoine Tilloy.

Par ailleurs, ce résultat expérimental pose de nombreuses questions. S'il n'y a pas de réalité objective à l'échelle microscopique, comment expliquer l'émergence de l'illusion d'une réalité objective à l'échelle macroscopique? Par ailleurs, les photons, ce qui se fait de plus microscopique et quantique, peuvent-ils simuler correctement un observateur dans l'esprit de l'expérience de Wigner? «Pour notre expérience, nous avons considéré une définition minimaliste de l'observateur», explique Cyril Branciard, physicien à l'institut Néel de Grenoble qui a participé à cette expérience. «Nous avons considéré que tout système qui interagit avec un autre, qui extrait de l'information de celui-ci et qui est capable d'enregistrer cette information dans un système physique servant de mémoire peut être considéré comme un observateur.»

L'interprétation de la physique quantique reste donc une question ouverte, mais les chercheurs ne manquent pas d'idées pour mettre à l'épreuve les différentes propositions aussi bien par des expériences de pensée que par des expériences réelles. Elles aideront à faire le tri dans les hypothèses implicites contenues dans ces interprétations et serviront certainement de garde-fou pour les futures théories qui résoudront les énigmes de la physique quantique ou participeront à unifier la physique quantique et la relativité générale! ■

BIBLIOGRAPHIE

M. PROIETTI ET AL., Experimental test of local observer-independence, *Quantum Physics*, 2019. <https://arxiv.org/abs/1902.05080>

D. FRAUCHIGER ET R. RENNER, Quantum theory cannot consistently describe the use of itself, *Nature Communications*, vol. 9, art. 3711, 2019.



« Aurélie Jean, l'étoile scientifique qui monte. »

Guillaume Grallet, *Le Point*

« Aussi bien autobiographie
qu'essai scientifique et social,
ce livre m'a passionné. »

François Busnel, La Grande Librairie

« Un récit extrêmement incarné. »

Élisabeth Quin, 28 minutes

« La figure montante
de la science numérique. »

Patrick Cohen, Europe 1

