

➤ 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.



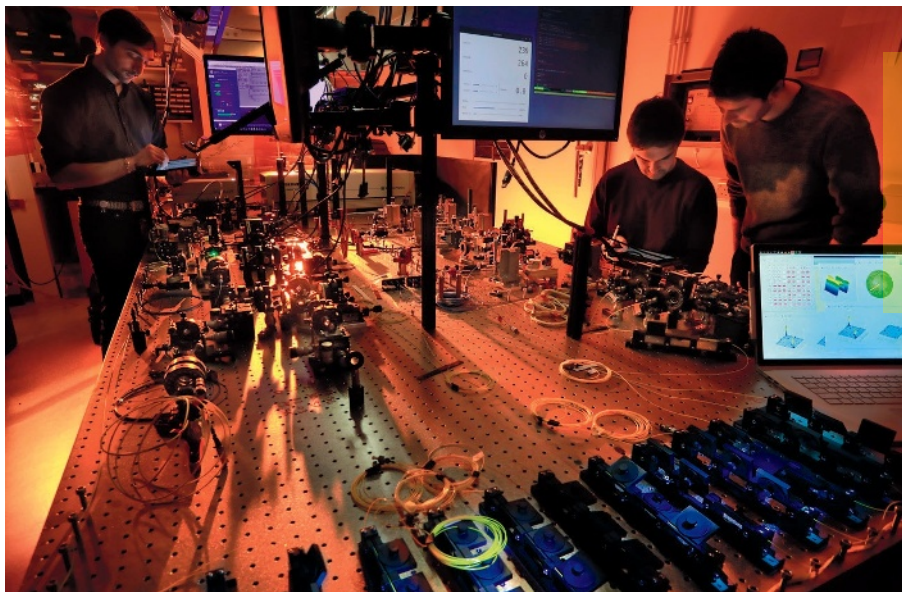
Les réactions ont été très vives! Certains physiciens ont suggéré que cela pouvait même remettre en cause la notion de réalité objective, mais cette possibilité a été mal accueillie. Le philosophe des sciences, spécialiste de la physique, Tim Maudlin a par exemple écrit: «S'il n'y a pas de monde physique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

>