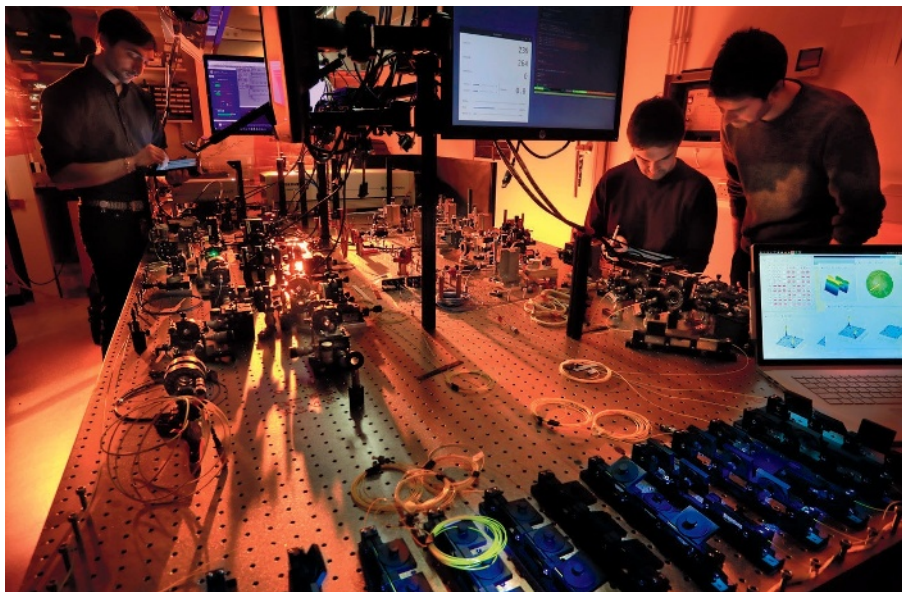




L'expérience de pensée élaborée par Daniela Frauchiger et Renato Renner est finalement devenue une expérience réelle grâce à Massimiliano Proietti, de l'université Heriot-Watt, à Édimbourg.

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).

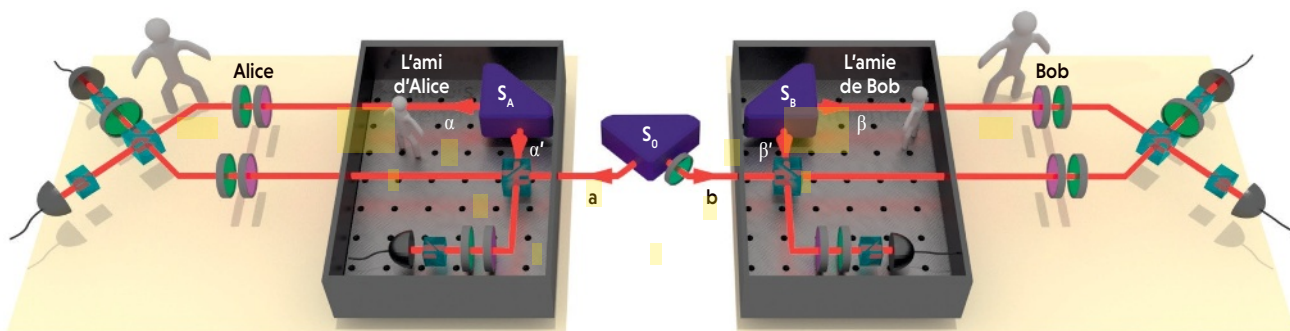
UN AUTRE THÉORÈME NO-GO

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'ami 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.