

- ne pourraient pas être décrites par la théorie quantique. En fait, ce serait tout le contraire!

Cependant, cette vision fait encore débat. Bien que ces idées tentent d'expliquer pourquoi les superpositions disparaissent à grande échelle et pourquoi seules les propriétés « classiques » concrètes demeurent, il reste à déterminer pourquoi les mesures livrent des résultats uniques. Quand une position donnée d'une particule est sélectionnée, qu'arrive-t-il aux autres possibilités inhérentes à sa description quantique? Ont-elles seulement été réelles à un moment donné? Les chercheurs ont longtemps été contraints de recourir à des interprétations philosophiques de la mécanique quantique précisément parce que personne n'avait de solution expérimentale à proposer pour répondre à cette question.

AU CŒUR DU LABORATOIRE

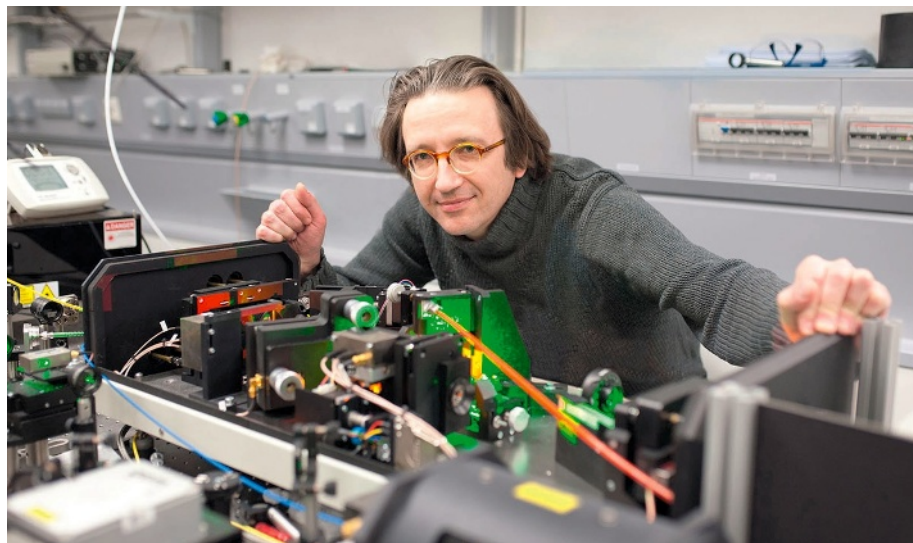
Le darwinisme quantique était-il condamné à ne rester convaincant que sur le papier? Non, en 2019, trois équipes de chercheurs ont indépendamment soumis la théorie à des tests expérimentaux en cherchant sa caractéristique clé: comment un système quantique imprime des répliques de lui-même dans son environnement.

Les expériences dépendaient de la capacité à étudier minutieusement quelles informations relatives à un système quantique sont transmises à son environnement. Ce n'est pas possible pour un grain de poussière flottant parmi des milliards de molécules d'air, par exemple. Ainsi, deux des équipes ont créé un objet quantique dans un « environnement artificiel » qui ne contenait que quelques particules.

Les deux expériences – l'une par Mauro Paternostro et des collaborateurs à l'université de La Sapienza, à Rome, l'autre par Jian-Wei Pan et ses collègues de l'université des sciences et des technologies, à Hefei, en Chine – ont utilisé un seul photon comme système quantique, et une poignée d'autres comme « environnement ».

Les deux équipes ont fait passer des photons d'un laser à travers des dispositifs optiques qui peuvent les combiner en plusieurs groupes intriqués. Ils ont ensuite sondé les photons de l'environnement pour déterminer quelles informations ils avaient encodées à propos de l'état pointeur du photon du système, ici sa polarisation (l'orientation de ses champs électromagnétiques oscillants), l'une des propriétés quantiques capables de passer à travers le filtre de la sélection darwinienne quantique.

L'une des prédictions clés de cette théorie est l'effet de saturation: quasiment toute l'information qu'il est possible de rassembler sur un système quantique devrait être accessible rien qu'en étudiant une poignée de particules environnantes. « N'importe quelle petite



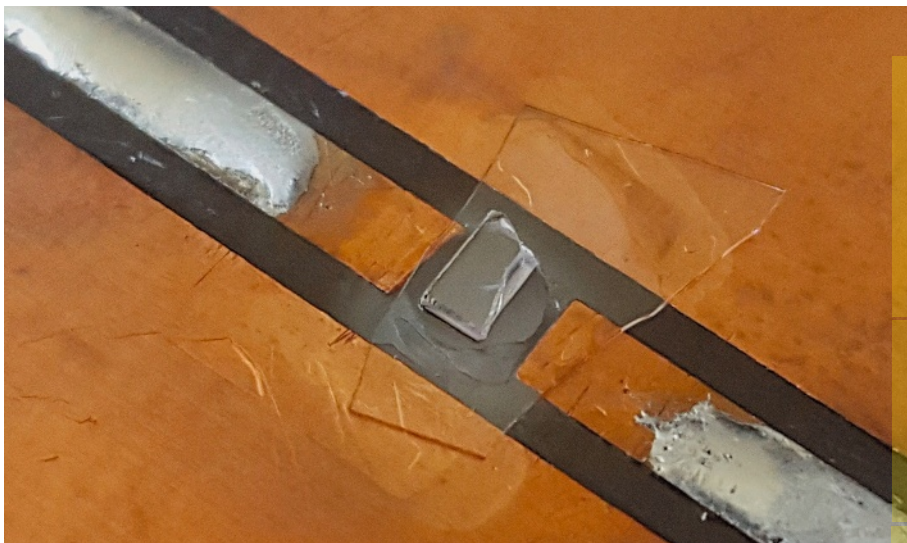
fraction de l'environnement après interaction est suffisante pour fournir un maximum d'informations classiques sur le système observé», explique Jian-Wei Pan.

C'est précisément ce qu'ont montré les deux équipes. Les mesures d'un seul photon de l'environnement ont suffi à révéler une grande partie des informations sur la polarisation du photon du système. Qui plus est, mesurer une fraction croissante des photons de l'environnement était moins efficace. Même un seul photon peut jouer le rôle d'un environnement entraînant décohérence et sélection, précise Jian-Wei Pan, s'il interagit suffisamment avec le photon solitaire du système quantique initial. Lorsque les interactions sont plus faibles, une plus grande part de l'environnement doit être étudiée.

On doit le troisième test expérimental du darwinisme quantique à Fedor Jelezko, de l'université d'Ulm, en Allemagne, en collaboration avec Wojciech Zurek et d'autres. Ils ont utilisé un système et un environnement très différents, consistant en un centre azote-lacune (noté centre NV, pour *nitrogen vacancy*). Dans le réseau cristallin d'un diamant, un atome de carbone est remplacé par un atome d'azote. L'atome d'azote possède un électron de plus que le carbone, qui ne peut donc pas s'apparier avec un électron des atomes voisins de carbone pour former une liaison chimique. Résultat: l'électron célibataire de l'atome d'azote agit comme un « spin » solitaire, c'est-à-dire comme une flèche pointant vers le haut, le bas ou, en général, dans une superposition de ces deux directions possibles.

Ce spin peut interagir magnétiquement avec ceux des quelque 0,3% de noyaux de carbone présents dans le diamant sous la forme de l'isotope carbone 13, qui contrairement au carbone 12, plus abondant, possède aussi un spin.

Fedor Jelezko (à gauche) et son équipe ont sondé l'état d'un défaut d'azote à l'intérieur d'un diamant synthétique (à droite) en étudiant les atomes de carbone voisins. Leurs résultats confirment la théorie du darwinisme quantique.



En moyenne, chaque spin azote-lacune est fortement associé à quatre spins de carbone 13 à une distance d'environ 1 nanomètre.

En contrôlant et étudiant les spins à l'aide de lasers et d'impulsions radiofréquences, les chercheurs ont pu mesurer comment un changement dans le spin de l'azote est enregistré par les changements dans les spins nucléaires de l'environnement. Comme ils l'ont rapporté en septembre 2019, ils ont également observé la redondance caractéristique prédite par le darwinisme quantique: l'état du spin de l'azote est «enregistré» sous la forme de copies multiples dans l'environnement, et les informations sur le spinaturent d'autant plus rapidement que la fraction de l'environnement considérée est plus grande.

Selon Wojciech Zurek, les expériences avec les photons créent des copies d'une façon artificielle, laquelle ne fait que simuler un véritable environnement, elles n'intègrent pas un véritable processus de sélection qui extraierait des états pointeurs naturels résilients à la décohérence. Ce sont plutôt les chercheurs qui imposent les états pointeurs.

Par contre, l'environnement dans le diamant suscite bien des états pointeurs, même si «l'expérience pose aussi un problème à cause de la taille de l'environnement, ajoute Wojciech Zurek, mais au moins celui-ci est naturel.»

GÉNÉRALISER LE DARWINISME QUANTIQUE

Jusqu'à présent, tout va bien pour le darwinisme quantique. «Toutes ces études révèlent ce à quoi on s'attendait, du moins approximativement», précise Wojciech Zurek.

Jess Riedel estime qu'on pouvait difficilement s'attendre à autre chose. Selon lui, cette théorie n'est que l'application prudente et systématique de la mécanique quantique standard

à l'étude de l'interaction d'un système quantique avec son environnement. Bien que cela soit virtuellement impossible à faire en pratique pour la plupart des mesures quantiques, les prédictions sont claires, si l'on peut suffisamment simplifier une mesure: «le darwinisme quantique ressemble plutôt à un contrôle interne d'autocohérence effectué sur la théorie quantique elle-même.»

Toutefois, bien que ces études soient cohérentes avec la théorie, elles ne peuvent pas encore faire office de preuve définitive. Par exemple, rappelle Adán Cabello, les trois expériences ne proposent que des versions schématisées de ce qu'est réellement un environnement.

Par ailleurs, ces expériences n'écartent pas toute autre explication du passage vers le classique. Ainsi, une alternative nommée «théorie du spectre de diffusion», développée par Pawel Horodecki, de l'école polytechnique de Gdańsk, en Pologne, et ses collaborateurs, tente de généraliser le darwinisme quantique. La théorie du spectre de diffusion (qui n'a été traitée que pour quelques cas idéalisés) identifie les états d'un système quantique intriqué avec son environnement, lesquels fournissent des informations objectives que de nombreux observateurs peuvent obtenir sans les perturber. En d'autres termes, elle vise à assurer non seulement que différents observateurs peuvent accéder aux répliques du système dans l'environnement, mais aussi qu'en agissant de la sorte, ils n'affectent pas les autres répliques. Et cette propriété est aussi une caractéristique des mesures classiques.

Pawel Horodecki et d'autres théoriciens ont aussi cherché à intégrer le darwinisme quantique dans un cadre théorique qui n'impose pas de séparation arbitraire entre un système d'une part et son environnement de l'autre. L'idée est ici de comprendre comment la réalité classique peut émerger des interactions entre différents systèmes quantiques. Pourra-t-on trancher? Pas sûr. Mauro Paternostro estime que les prédictions de ces théories se distinguent de façon très subtile, et peut-être trop pour être révélées expérimentalement.

Quoi qu'il en soit, les chercheurs poursuivent leurs efforts, et de toute façon nous en saurons plus sur le fonctionnement du monde quantique. «La meilleure raison d'effectuer ces expériences repose probablement dans le fait qu'elles constituent un très bon exercice, remarque Jess Riedel. L'illustration directe du darwinisme quantique peut nécessiter des mesures très difficiles qui repousseront les limites des techniques de laboratoire actuelles.» La seule façon de découvrir ce qu'une mesure signifie réellement, semble-t-il, est d'effectuer de meilleures mesures. ■

BIBLIOGRAPHIE

T. UNDEN ET AL., Revealing the emergence of classicality in nitrogen-vacancy centers, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 123, 140402, 2019.

M.-C. CHEN ET AL., Emergence of Classical Objectivity of Quantum Darwinism in a Photonic Quantum Simulator, *Science Bulletin*, vol. 64, pp. 580-585, 2019.

M. CIAMPINI ET AL., Experimental signature of quantum Darwinism in photonic cluster states, *Phys. Rev. A*, vol. 98, 020101, 2018.

C. RIEDEL ET W. ZUREK, Quantum Darwinism in an Everyday Environment: Huge Redundancy in Scattered Photons, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 105, 020404, 2010.

W. ZUREK, Quantum Darwinism, *Nature Physics*, vol. 5, pp. 181-188, 2009.