

> Cette idée, le darwinisme quantique, explique pourquoi nous percevons le monde de façon «classique», et non de la manière si particulière avec laquelle il se manifeste à l'échelle des atomes et des particules fondamentales. Bien que certains aspects de l'énigme restent à préciser, le darwinisme quantique aide à bâtir des ponts au-dessus de la faille, seulement apparente, qui sépare la physique quantique de la physique classique.

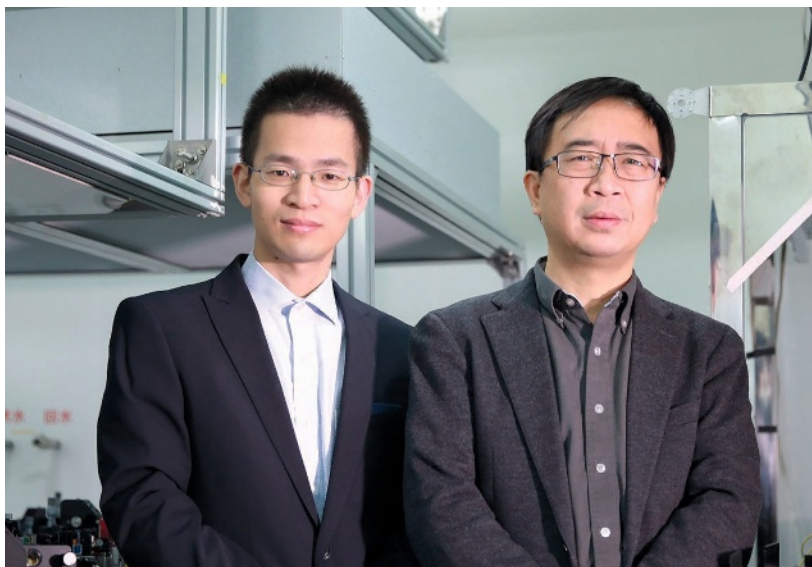
Cette idée a quitté récemment le monde théorique pour celui des tests expérimentaux. Trois groupes de recherche, travaillant indépendamment en Italie, en Chine et en Allemagne, se sont mis en quête de la signature de ce processus de sélection naturelle quantique. Ces tests sont rudimentaires, et demandent à être confirmés, mais jusqu'à présent, la théorie se vérifie.

STRANGER THINGS

Au cœur du darwinisme quantique se trouve la notion incertaine de mesure – le processus d'observation. En physique classique, ce que l'on voit est simplement ce qui est. Et il n'y a rien à ajouter. En physique quantique, ce n'est plus vrai. Les mathématiques formelles de la mécanique quantique ne disent rien d'évident sur «la nature des choses» dans un objet quantique; elles ne sont qu'une indication sur ce que nous pourrions voir si nous le mesurons. Ainsi, une particule quantique peut avoir un éventail d'états possibles que l'on dit «superposés». Cela ne signifie pas qu'elle est dans différents états en même temps, mais plutôt que, si nous la mesurons, nous observerions l'une de ces possibilités. Avant la mesure, les différents états superposés interfèrent, et peuvent chacun constituer le résultat avec une probabilité propre.

Mais pourquoi ne pouvons-nous pas voir une superposition quantique? Pourquoi tous les états possibles d'une particule ne survivent-ils pas jusqu'à l'échelle humaine? On répond souvent que les superpositions sont fragiles, facilement perturbées par le bruit de l'environnement. Ce n'est pas tout à fait exact. Lorsque deux objets quantiques interagissent, ils s'enchevêtrent, et adoptent un état quantique partagé où les possibilités pour leurs propriétés sont interdépendantes, c'est l'intrication quantique.

Prenons un atome dans une superposition de deux états possibles pour son spin: «haut» et «bas». L'atome est ensuite libéré, et heurte une molécule de l'atmosphère avec laquelle il s'intrique; les deux sont désormais dans une superposition jointe. La molécule d'air peut être poussée dans un sens quand le spin de l'atome est «haut» et dans un autre avec un atome au spin «bas». Ces deux possibilités coexistent.



Chaoyang Lu (à gauche) et Jian-Wei Pan (à droite) ont récemment dirigé une expérience qui a testé le darwinisme quantique dans un environnement artificiel composé de photons en interaction.

À mesure que ces particules rencontrent d'autres molécules dans l'air, l'intrication se répand, et la superposition initialement spécifique à l'atome se diffuse. Les états superposés de l'atome n'interfèrent plus de façon cohérente, car ils sont désormais intriqués avec d'autres états dans l'environnement, parmi lesquels, peut-être, se trouve un instrument de mesure. Pour celui-ci, la superposition de l'atome a disparu et a été remplacée par une liste de résultats classiques qui n'interfèrent plus.

Cette disparition du «caractère quantique» d'un système dans l'environnement est la décohérence. C'est l'événement crucial de la transition quantique-classique, qui explique pourquoi un comportement quantique est difficile à observer dans des systèmes macroscopiques. Ce processus est extrêmement fugace.

Étonnamment, bien que la décohérence soit inhérente à la mécanique quantique, elle n'a été identifiée que dans les années 1970, par l'Allemand Heinz-Dieter Zeh. L'Américano-Polonais Wojciech Zurek, aujourd'hui au Laboratoire national de Los Alamos, dans le Nouveau-Mexique, développa l'idée au début des années 1980 et la popularisa.

Mais pour expliquer l'émergence de la réalité classique et objective, il ne suffit pas de dire que la décohérence efface le comportement quantique d'un système. D'une certaine façon, plusieurs observateurs peuvent s'accorder sur les propriétés d'un système quantique. Pour ce faire, Wojciech Zurek, estime que deux conditions doivent être remplies.

D'abord, les systèmes quantiques doivent avoir des états particulièrement robustes, face à la décohérence perturbatrice de l'environnement. Wojciech Zurek parle d'«états pointeurs» parce qu'ils peuvent être représentés par une aiguille pointant une position sur le

cadran d'un instrument de mesure. De tels états pointeurs sont par exemple la position d'une particule, sa vitesse, la valeur de son spin... Selon le physicien, le comportement classique d'un système quantique est uniquement possible parce que des états pointeurs des objets quantiques existent.

Un état pointeur a la particularité de ne pas être brouillé par les interactions avec l'environnement qui induisent la décohérence. L'état pointeur est soit préservé, soit simplement transformé en un état qui paraît quasiment identique. Cela implique que l'environnement ne balaie pas le caractère quantique d'un objet sans discrimination; il sélectionne certains états et supprime les autres. La position d'une particule est résiliente à la décohérence, par exemple. Ce n'est pas le cas des superpositions de différentes localisations: les interactions avec l'environnement les décomposent en états pointeurs localisés, de sorte que seul l'un d'entre eux peut être observé; il est sélectionné.

IMPRIMÉES DANS L'ENVIRONNEMENT

Mais une propriété quantique doit remplir une seconde condition pour être observée. Son immunité aux interactions avec l'environnement assure la stabilité d'un état pointeur, mais nous avons tout de même besoin d'accéder aux informations qui le concernent. Cela n'est possible que si elles sont imprimées dans l'environnement de l'objet. Lorsque vous voyez un objet, cette information est conduite jusqu'à votre rétine par les photons qu'il renvoie. Ils transportent l'information jusqu'à vous sous la forme d'une réplique partielle de certains aspects de l'objet, ce qui vous informe sur sa position, sa forme et sa couleur. De nombreuses répliques sont nécessaires si plusieurs observateurs doivent s'accorder sur une valeur mesurée. Ainsi, comme Wojciech Zurek le disait dans les années 2000, notre capacité à observer une propriété dépend non seulement de sa sélection comme état pointeur, mais aussi de l'ampleur de la trace qu'elle laisse dans l'environnement. Les états les plus aptes à créer des répliques dans l'environnement sont les seuls à être accessibles à nos mesures. C'est le darwinisme quantique.

Il se trouve que la même propriété de stabilité qui favorise la sélection induite par l'environnement des états pointeurs favorise également la valeur adaptative darwinienne quantique, autrement dit la capacité à générer des répliques.

Peu importe, bien sûr, que des informations sur un système quantique s'impriment

LE DARWINISME QUANTIQUE EXPLIQUE LE CARACTÈRE CLASSIQUE DE TOUT CE QUI EXISTAIT AVANT LES HUMAINS



Wojciech Zurek a développé la théorie du darwinisme quantique dans les années 2000 afin d'expliquer l'émergence de la réalité classique et objective.

dans l'environnement soient réellement lues par un observateur humain; seul compte pour l'émergence d'un comportement classique que les informations soient là afin qu'elles puissent être lues en principe. «Un système n'a aucunement besoin d'être étudié de manière formelle» pour devenir classique, explique Jess Riedel, physicien de l'institut Perimeter de physique théorique, à Waterloo, au Canada, ancien étudiant de Wojciech Zurek et partisan du darwinisme quantique. Selon lui, cette théorie explique, ou aide à expliquer, tout ce qui relève du classique, y compris les objets macroscopiques quotidiens éloignés de tout laboratoire, ou qui existaient avant qu'il n'y ait des humains.

REDONDANCE ET MONDE CLASSIQUE

Les deux physiciens ont montré que, en théorie, des informations issues d'un système quantique simple et idéalisé sont copiées en grand nombre dans l'environnement, de sorte qu'il est seulement nécessaire d'accéder à une petite partie de cet environnement pour déduire les valeurs des variables. Ils ont calculé qu'un grain de poussière d'un micromètre, après avoir été illuminé par le soleil pendant une microseconde, verra sa localisation imprimée environ 100 millions de fois dans les photons dispersés.

C'est grâce à cette redondance que les propriétés classiques et objectives existent. Dix observateurs peuvent chacun mesurer la position d'un grain de poussière et trouver la même localisation, car chacun accède à une réplique distincte de l'information. Ainsi, on peut assigner une «position» objective au grain; non pas parce qu'il «a» cette position (quoi que cela veuille dire), mais parce que son état de position imprime dans l'environnement de nombreuses répliques identiques et accessibles à divers observateurs. Ces derniers convergent donc vers un consensus.

Par ailleurs, il n'est pas nécessaire d'étudier plus d'une fraction de l'environnement pour rassembler la plupart des informations disponibles. Cette redondance est la caractéristique du darwinisme quantique, selon Mauro Paternostro, physicien à la Queen's University, à Belfast, et impliqué dans l'une des trois nouvelles expériences. «C'est même cette redondance qui caractérise la transition vers le monde classique.»

Selon le chercheur en physique théorique Adán Cabello, de l'université de Séville, en Espagne, le darwinisme quantique bouscule une idée reçue tenace en mécanique quantique: la transition entre les mondes quantique et classique ne serait pas comprise et les mesures

➤ 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

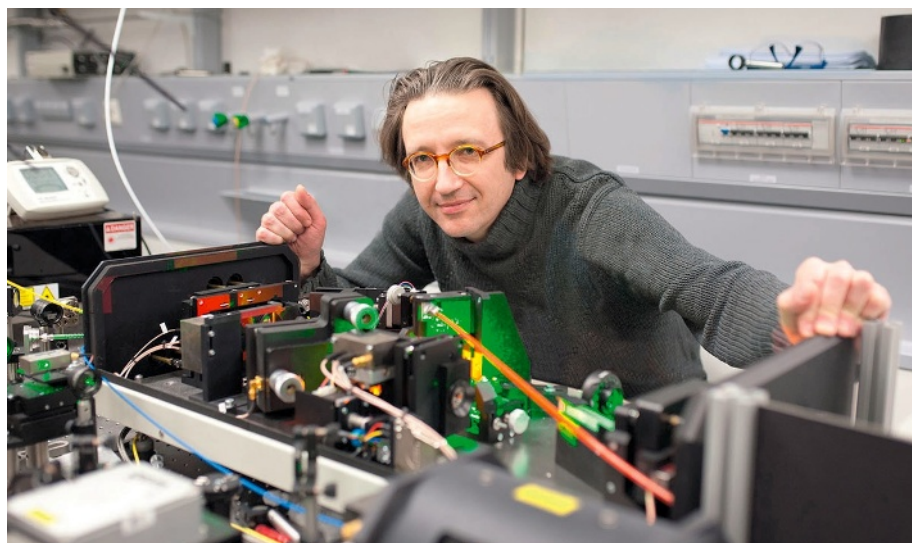
Le darwinisme quantique était-il condamné à ne rester convaincant que sur le papier? Non, en 2019, trois équipes de chercheurs ont indépendamment soumis la théorie à des tests expérimentaux en cherchant sa caractéristique clé: comment un système quantique imprime des répliques de lui-même dans son environnement.

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.