

l'expérience du NIST, de 60 mètres dans l'expérience de Vienne) où l'on mesurait les états de polarisation. La direction de mesure était décidée pendant le temps de vol des photons, ce qui éliminait la faille de localité.

Pour la faille de détection, il fallait récupérer plus des deux tiers des photons intriqués pour que l'on soit sûr d'avoir un échantillon représentatif. Au NIST, nous avons développé des détecteurs de photons uniques ultraperformants et constitués de matériaux supraconducteurs froids. Ces capteurs sont capables d'observer plus de 90% des photons qui les atteignent. La faille de détection était ainsi supprimée.

En répétant plus de 100 000 fois par seconde ces mesures, nous avons très vite accumulé des résultats statistiques significatifs sur les corrélations entre les états de polarisation des photons; les corrélations observées dans les deux expériences étaient beaucoup plus fortes que celles prédites par les théories à variables cachées. De fait, la probabilité que les résultats du NIST soient le fruit du hasard est de l'ordre de un milliardième, et les chances sont encore plus faibles avec l'expérience viennoise. Aujourd'hui, le groupe du NIST utilise une version améliorée du dispositif pour violer les inégalités de Bell à un degré similaire en moins d'une minute, et des perfectionnements attendus accéléreront encore le processus de deux ordres de grandeur.

DES GÉNÉRATEURS D'ALÉA

Ces expériences nous obligent à conclure que tous les modèles à variables cachées, tels ceux que soutenait Einstein, sont incompatibles avec la nature. Les corrélations que nous avons observées entre particules défient notre intuition, et nous démontrent que la fantomatique action à distance a bien lieu.

Nos résultats mettent aussi en avant la remarquable puissance de l'intrication pour d'éventuelles applications. À court terme, une situation où des tests de Bell sans faille seraient utiles est la génération de nombres aléatoires. De nombreuses techniques de cryptographie reposent sur la capacité à produire des nombres aléatoires. Or, en pratique, ces derniers sont difficiles à produire. Les générateurs de nombres aléatoires sont loin d'être infaillibles et s'il est possible d'anticiper les nombres qu'ils produisent, de nombreux systèmes financiers et de communication seraient en danger. Une bonne source de nombres aléatoires est donc d'une importance cruciale.

Pour générer des nombres aléatoires, on recourt le plus souvent à des algorithmes ou à des processus physiques. Avec les algorithmes, si l'on connaît les paramètres utilisés comme valeurs initiales, il est souvent possible de prédire le résultat. Avec les processus physiques, une compréhension détaillée de la physique sous-jacente du système est nécessaire. Il suffit

qu'un détail vous échappe, et un pirate exploitera cette faille. L'histoire de la cryptographie regorge d'exemples de générateurs de nombres aléatoires des deux types qui ont été cassés.

La physique quantique est une aubaine pour ces applications. Il est possible d'«extraire» le hasard inhérent aux processus quantiques afin de produire des nombres véritablement aléatoires. On peut convertir les corrélations mesurées dans un test de Bell sans échappatoire en une chaîne de nombres aléatoires. En 2018, l'équipe du NIST a utilisé son dispositif pour produire 1024 bits véritablement aléatoires à partir de 10 minutes de données expérimentales. La violation des inégalités de Bell garantit que la chaîne de bits est aléatoire.

Il est possible de quantifier la robustesse du système: il y a une chance sur 1 billion que la chaîne de bits du NIST ne soit pas parfaitement aléatoire. En comparaison, il faudrait plusieurs centaines de milliers d'années à un générateur classique de nombres aléatoires pour acquérir assez de données assurant une telle qualité d'aléa. Les chercheurs travaillent maintenant à développer un outil public: le générateur servirait de source de référence de nombres aléatoires datés et transmis sur internet à intervalles fixes pour être utilisés dans des applications de sécurité.

Plus généralement, les techniques développées dans les expériences de Bell sans faille rendraient possibles le déploiement de nouveaux types de réseaux de communication (*voir Inventer l'internet du futur, par N. Wolchover, page 96*). De tels réseaux, qui constituent ce que l'on appelle souvent l'«internet quantique», effectueraient des tâches dépassant les capacités des réseaux classiques. Un internet quantique garantirait des communications sécurisées, la synchronisation des horloges, et bien d'autres tâches sensibles.

De tels projets reposent sur l'intrication quantique et la qualité des dispositifs, comme dans nos expériences. En 2017, l'équipe de Delft a fait la démonstration d'une méthode pour améliorer la qualité des spins intriqués, et en 2018, elle a amélioré ses taux d'intrication de trois ordres de grandeur. En s'appuyant sur ces progrès, les chercheurs travaillent au développement d'une première version rudimentaire d'un internet quantique qui devrait être déployé en 2020 dans quelques villes des Pays-Bas.

Il y a quatre-vingts ans, quand la théorie quantique faisait ses débuts, les sceptiques se chagrinaient de sa contradiction apparente avec des siècles d'intuition physique. Désormais, quatre expériences ont asséné le coup final à cette intuition; mais, en même temps, ces résultats ont ouvert une porte pour exploiter la nature d'une façon que ni Einstein ni Bell n'avaient anticipée. La révolution silencieuse que John Bell a mise en branle bat maintenant son plein. ■

BIBLIOGRAPHIE

J. MALDACENA, L'intrication quantique est-elle un trou de ver?, *Pour la Science*, n° 475, art. 250401, mai 2017.

B. HENSEN ET AL., Loophole-free Bell inequality violation using electron spins separated by 1.3 kilometers, *Nature*, vol. 526, pp. 682-686, 2015.

M. GIUSTINA ET AL., Significant-loophole-free test of Bell's theorem with entangled photons, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 115, art. 250401, 2015.

L. K. SHALM ET AL., Strong loophole-free test of local realism, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 115, art. 250402, 2015.

L'ESSENTIEL

● À quoi ressemble la frontière entre les mondes microscopique et macroscopique? Plusieurs théories s'affrontent pour répondre.

● L'une d'elles met au centre du jeu l'action de mesurer, et une autre, l'influence de l'environnement.

● Une troisième, la localisation spontanée continue, suggère que les probabilités quantiques se réduisent aléatoirement pour devenir des certitudes classiques.

● Des expériences, parfois empruntées aux cosmologistes, aideront à tester ces différentes théories.

L'AUTEUR



TIM FOLGER
est journaliste scientifique.

Un pont entre deux mondes

Le monde quantique est un univers bien étrange où règnent en maîtres les probabilités. Pourtant, ce n'est pas le cas de notre réalité quotidienne, apparemment bien loin de ces bizarreries. Comment passe-t-on de l'un à l'autre ? De nouvelles expériences tentent de répondre.

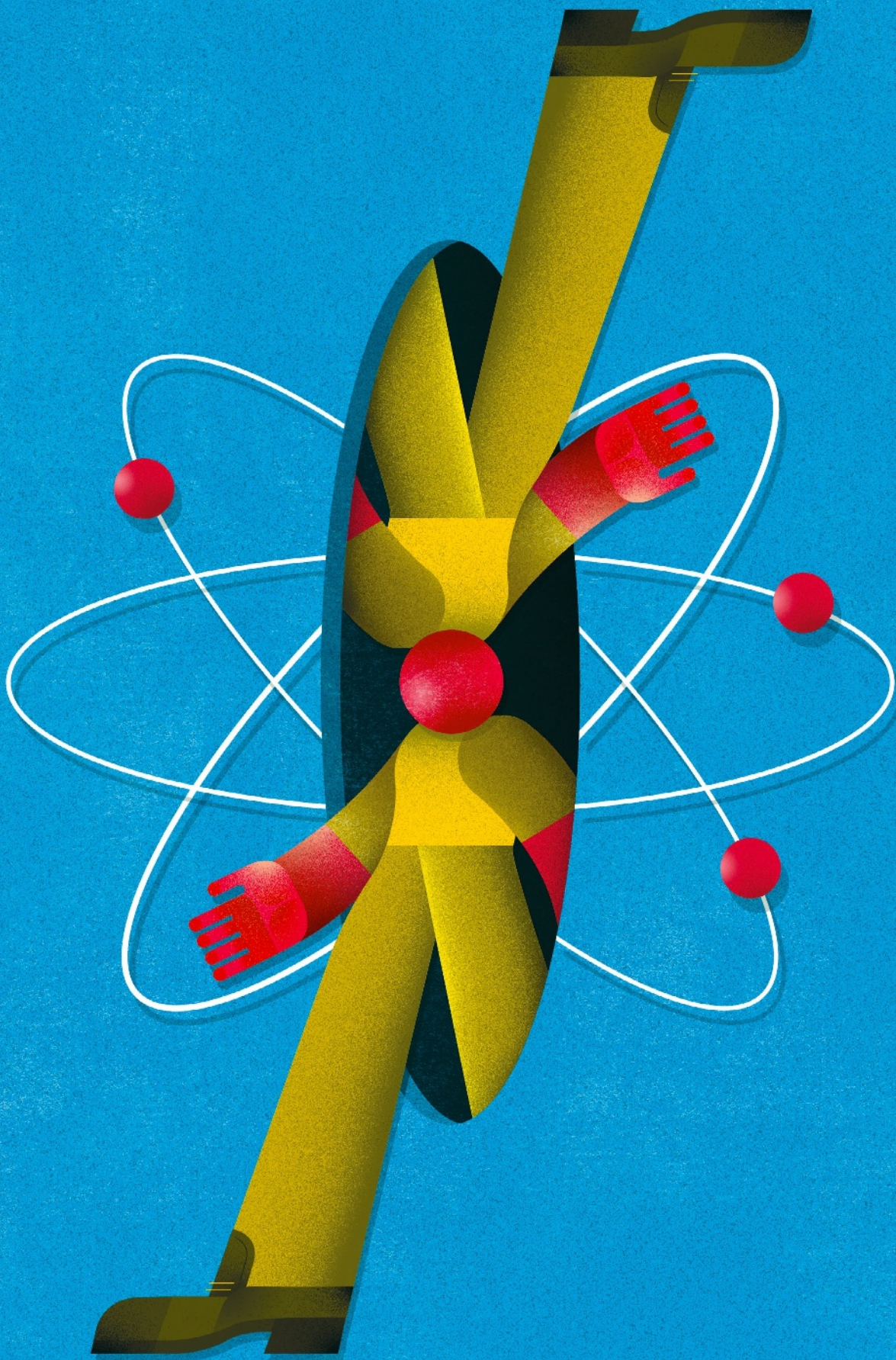
S

imon Gröblacher a la folie des grandeurs. Avec son équipe de l'université de technologie de Delft, aux Pays-Bas, il n'a de cesse de vouloir faire grossir ses créations! Et il le clame: «Nous essayons de créer des choses grandes, très grandes.» Encore faut-il s'entendre sur le terme... car l'une de ses œuvres ne mesure que

quelques micromètres de longueur – à peine plus qu'une bactérie – et 250 nanomètres d'épaisseur, soit un millième de l'épaisseur d'une feuille de papier. Et pour ce physicien, «très grand» signifie «1 millimètre par 1 millimètre». C'est à peine visible à l'œil nu!

En travaillant à cette échelle, ce scientifique espère répondre à une question extraordinaire: un objet macroscopique peut-il se trouver en deux endroits à la fois? Cette ubiquité est en fait la norme pour les atomes, les photons et toutes les autres particules. Plus encore, dans ce monde de l'infiniment petit, ce monde où la physique quantique règne, la réalité défie le sens commun: les particules n'ont ni position ni énergie fixe et ne possèdent aucune propriété définie – du moins tant que personne ne les observe. Elles existent simultanément en de nombreux états superposés.

Mais pour des raisons encore mal comprises, la réalité que nous percevons est différente. Notre monde semble résolument non



➤ quantique. Les grandes choses – c'est-à-dire à partir de la taille d'un virus – se manifestent toujours en un seul endroit. Tout le mystère est là: tout objet étant constitué de matière et d'énergie qui obéissent aux lois quantiques, pourquoi n'expérimentons-nous pas l'étrangeté quantique? En d'autres termes, où le monde quantique s'arrête-t-il et où commence le monde classique? Y a-t-il un fossé entre les deux, un seuil à partir duquel les effets quantiques cessent de se manifester? Ou bien sommes-nous aveugles à une mécanique quantique qui régnerait à toutes les échelles?

De fait, «nous ignorons la véritable nature de la matière entre les mondes micro et macro», avoue Angelo Bassi, chercheur en physique théorique à l'université de Trieste, en Italie. Ce *no man's land* laisse les physiciens perplexes depuis la naissance de la théorie quantique il y a un siècle. Mais ces dernières années, Simon Gröblacher et d'autres ont mis sur pied des expériences extrêmement sensibles qui pourraient révéler les secrets de la transition du quantique vers le quotidien. Nul ne sait si ces efforts porteront leurs fruits, mais une chose est sûre: en sondant les contours flous du monde quantique, les chercheurs pourraient bien mettre au jour un tout nouveau domaine de la physique.

UN PROBLÈME DE MESURE

Ces paradoxes d'échelles n'empêchent pas la mécanique quantique d'être la théorie scientifique la plus puissante et exigeante jamais élaborée. Ses prédictions coïncident avec les expériences avec une précision ridicule élevée. En révolutionnant notre compréhension de la structure atomique, elle a transformé toutes les facettes de la science, de la biologie à l'astrophysique. Sans la théorie quantique, notre monde ne ressemblerait pas à ce qu'il est, pas de GPS, pas de smartphone, pas de laser... Pourtant, la théorie présente un défaut flagrant, selon Stephen Adler, de l'institut d'études avancées de Princeton, dans le New Jersey. «En mécanique quantique, rien ne se passe.» C'est-à-dire?

Le physicien se réfère à l'équation fondamentale de la théorie quantique quant à la nature de la réalité. Connues sous le nom de fonction d'onde, ces équations attribuent des probabilités à ce qu'un objet soit découvert dans tel ou tel état. Contrairement à la physique classique, ou newtonienne, selon laquelle les pommes, les planètes et tout le reste ont toujours des propriétés bien définies, la physique quantique est intrinsèquement probabiliste. Dans un sens, on ne peut pas dire que les particules décrites par des fonctions d'onde existent vraiment; elles n'ont pas

d'emplacement, de vitesse ni d'énergie déterminée, seulement des probabilités.

Tout change lors d'une mesure. À ce moment, des propriétés tangibles font surface, comme si elles étaient invoquées par la simple tentative de les observer. La théorie n'explique pas cette transformation, ni d'ailleurs pourquoi une possibilité se manifeste plutôt qu'une des nombreuses autres. La mécanique quantique décrit ce qui pourrait arriver lorsque l'on effectue une mesure, mais pas ce qui va arriver. Autrement dit, la théorie ne fournit pas de mécanisme expliquant la transition du probable vers l'avéré.

Pour que «les choses se produisent» en mécanique quantique, l'un des fondateurs de la théorie estime nécessaire une faille métaphysique. À la fin des années 1920, Werner Heisenberg a formulé puis diffusé l'idée selon laquelle le fait de mesurer «réduit le paquet d'onde» d'une particule: les nombreuses issues potentielles sont instantanément réduites à une seule, le résultat observé.

Le seul défaut de cette idée est que rien ne dit, dans les équations de la théorie quantique, qu'une réduction se produit. Aucun processus physique connu ne l'explique. La solution de Heisenberg introduit en fait un nouveau mystère: que se passe-t-il exactement lors de la réduction du paquet d'onde? De nos jours, cette énigme quantique est connue sous le nom de «problème de la mesure.»

Les physiciens se sont accoutumés à l'idée de réduction ces quatre-vingt-dix dernières années, mais ils ne l'ont jamais vraiment admise. L'idée qu'une action humaine – la mesure – joue un rôle central dans l'une des théories les plus fondamentales sur le fonctionnement de l'Univers ne satisfait guère quiconque est partisan du concept de réalité objective.

LE CHOIX DE L'INTERPRÉTATION

«Fondamentalement, j'ai un idéal de ce que devrait être une théorie physique, concède Steven Weinberg, Prix Nobel de physique, à l'université du Texas à Austin. Ce devrait être quelque chose qui ne se réfère en aucune manière aux êtres humains. Ce devrait être une base à partir de laquelle tout le reste – y compris tout ce que vous pourriez dire systématiquement sur la chimie, la biologie ou les affaires humaines – peut être dérivé. Les lois de la nature ne devraient pas commencer par un facteur humain. Et pourtant, je ne vois pas comment formuler la mécanique quantique sans un postulat interprétatif faisant référence à ce qu'il se passe lorsque des personnes choisissent de mesurer telle ou telle chose.» ➤

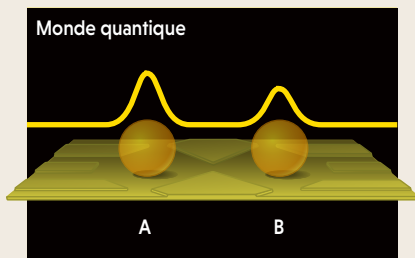
SOMMES-NOUS AVEUGLES À UNE MÉCANIQUE QUANTIQUE QUI RÉGNERAIT À TOUTES LES ÉCHELLES?

DES MONDES SÉPARÉS

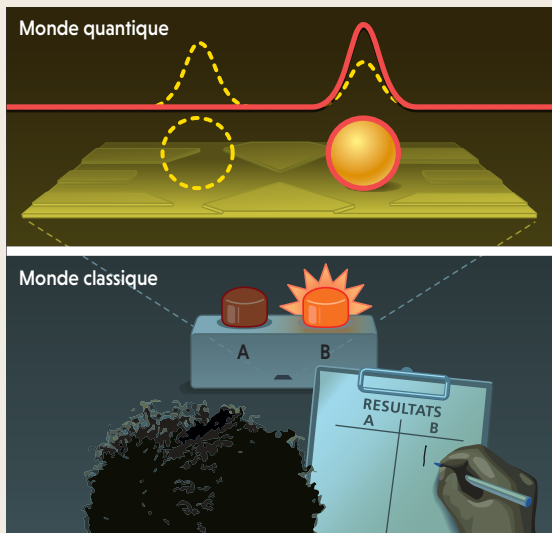
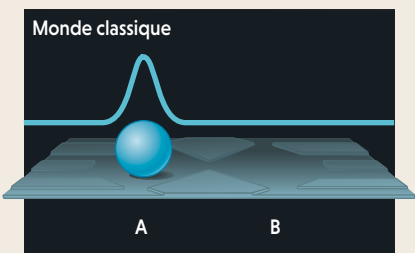
La mécanique quantique est synonyme d'effets étranges dans le monde microscopique. Mais nous ne les observons pas dans la réalité «classique» macroscopique. Pourquoi? Les scientifiques n'ont jamais compris pourquoi ni comment l'Univers saute d'un monde à l'autre, mais plusieurs théories, comme celles montrées ici, offrent d'éventuelles explications.

Quantique contre classique

D'après la mécanique quantique, les particules n'existent pas dans un état défini – à tel ou tel endroit, ayant telle ou telle énergie – mais se trouvent en fait simultanément dans chacun de ces états et positions. La théorie décrit les particules avec des fonctions d'onde, des équations qui sont des combinaisons, ou des «superpositions», de plusieurs ondes. Par exemple, pour la position, l'amplitude de chaque pic dans une fonction d'onde indique la probabilité pour une particule d'être observée en un endroit donné, ici au point A ou B.

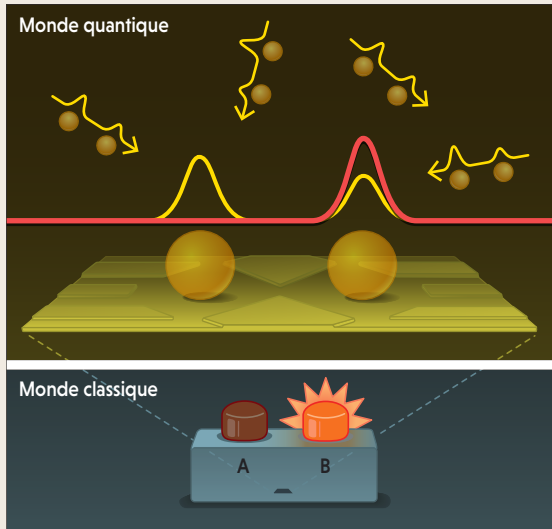


Quand les scientifiques effectuent des mesures sur une particule, toutes les possibilités quantiques semblent se réduire à une seule, vraisemblablement déterminée aléatoirement. L'expérience révélera que la particule se trouve au point A, par exemple, ce qui la fait entrer dans le monde classique, puisqu'elle cesse d'exister dans un état de superposition.



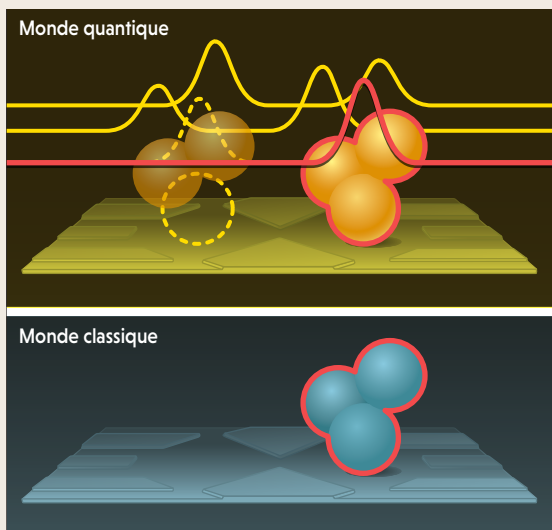
Effondrement et mesure

L'une des théories qui visent à expliquer comment l'Univers passe du monde quantique au monde classique prétend que l'action de mesurer joue un rôle. Les particules peuvent s'attarder dans un état de superposition quantique (le pointillé jaune) tant que personne ne les observe. Mais dès que l'on effectue une mesure, la particule est «obligée de choisir» un état spécifique (lignes rouges). Comment cela se passe-t-il, et pourquoi les mesures peuvent-elles avoir tant d'importance en physique? Cela reste un mystère.



Décohérence

Une autre théorie estime que l'environnement d'une particule est responsable de cette transition du monde quantique vers le monde classique. Tant qu'une particule n'est pas perturbée par une influence extérieure, pense-t-on, elle peut rester en état de superposition. Mais dès lors que les fonctions d'onde d'autres particules ou objets voisins rencontrent la sienne, elles interfèrent, ce qui entraîne la réduction des nombreuses possibilités quantiques de la particule à une seule réalité classique.



Localisation spontanée continue

Une autre possibilité serait que la réduction de la fonction d'onde en une possibilité singulière soit un événement aléatoire, qui ne serait pas causé par la mesure ni par l'interférence de l'environnement. Les probabilités que n'importe quelle particule se réduise à n'importe quel moment sont extrêmement faibles, mais dans les objets macroscopiques qui contiennent une multitude d'atomes, la réduction d'au moins l'une de ces particules est inévitable, ce qui engendre la réduction de la structure entière.

N'IMPORTE QUELLE MESURE PARTICULIÈRE NE CAPTURE QU'UN FRAGMENT DU MONDE QUANTIQUE

> Un tour de passe-passe permet de s'extirper du problème de la mesure : il consiste à présumer que le phénomène de réduction n'a pas lieu. Au début des années 1970, Heinz-Dieter Zeh, aujourd'hui professeur émérite à l'université de Heidelberg, en Allemagne, a proposé un processus qui donne l'apparence de la réduction tout en préservant la multiplicité quantique de la fonction d'onde.

Il fait valoir que, dans le monde réel, la fonction d'onde de n'importe quelle particule observée s'enchevêtre avec celle de tout ce qui se trouve dans son environnement, rendant impossible le suivi des innombrables interactions quantiques qui se produisent autour de nous. En termes quantiques, les fonctions d'onde deviennent intriquées (*voir Pas d'échappatoire pour l'intrication, par R. Hanson, page 26*). Un observateur ne peut qu'espérer voir une petite fraction de ce vaste système enchevêtré. En conséquence une mesure particulière ne capture qu'un fragment du monde quantique.

Ce processus, que Heinz-Dieter Zeh nomme la décohérence, a vite été adopté par les physiciens pour expliquer pourquoi nous ne percevons pas de phénomènes quantiques au niveau macroscopique. Il décrit l'effondrement d'une fonction d'onde intacte

(qui comprend tous les états physiques possibles qu'une particule peut avoir) lorsqu'elle interagit avec celles d'autres systèmes quantiques voisins. Si ce modèle est juste, nous vivons au milieu de cette toile quantique intriquée dont nous ne voyons qu'une partie.

La décohérence ne résout pas le problème de la mesure pour tous les physiciens. Par exemple, elle n'explique pas pourquoi nous voyons un fil de la toile quantique et pas les autres. «Il faut encore invoquer la réduction, selon laquelle un des états intriqués doit être sélectionné», explique Miles Blencowe, du Dartmouth College, aux États-Unis.

Pour lui et d'autres, ce processus ne capture pas notre expérience des choses, notamment son aspect temporel. «Comment, ajoute-t-il, passe-t-on d'un état intriqué à une perception du monde qui évolue avec le temps selon un unique chemin?» De nombreux spécialistes estiment qu'il faut passer par une réduction pour rétablir cette unité du monde à mesure qu'il évolue plutôt que cette toile

intriquée qui ne cesse de s'élargir. Stephen Adler se montre un peu plus direct à propos de la décohérence : «Elle ne fournit aucun mécanisme [pour la réduction]. Elle ne résout pas le problème, point final.»

Il y a soixante ans, un étudiant de l'université de Princeton proposa une solution encore plus radicale au problème de la réduction. Dans sa thèse de 1957, Hugh Everett expliquait que la fonction d'onde ne se réduit ni ne subit une décohérence. Au contraire, tous ses composants sont physiquement réels, et constituent des parties d'une panoplie d'univers aux ramifications infinies. Cette «théorie des univers multiples» est devenue populaire parmi les cosmologistes, qui ont d'autres raisons de penser que nous habitons un multivers. Mais personne n'est jamais parvenu à tester expérimentalement cette idée des mondes multiples et à la distinguer de la théorie quantique standard.

Il en va de même pour d'autres interprétations de la mécanique quantique. Le physicien français Louis de Broglie, l'un des fondateurs de la théorie quantique, cherchait à supprimer la nécessité de la réduction du paquet d'ondes en introduisant la notion «d'ondes pilotes» qui guident les trajectoires des électrons et de toutes les autres particules.

Dans cette version de la théorie quantique, que le physicien américain David Bohm a davantage développée dans les années 1950, il n'y a pas de réduction mystérieuse ; les mesures montrent simplement les interactions d'ondes pilotes et de leurs particules associées. Mais, encore une fois, personne n'a pu le prouver expérimentalement. La théorie de l'onde pilote de Louis de Broglie et David Bohm, la théorie des mondes multiples d'Everett et les dizaines d'autres approches de la mécanique quantique sont au même stade.

Finalement, les physiciens choisissent leur description de la réalité préférée d'après un critère esthétique. «J'en reviens au fait que nous avons un seul monde qui évolue, insiste Miles Blencowe. Pour cela, on a vraiment besoin d'une sorte de réduction, qui serait plus qu'une simple règle pour les résultats expérimentaux, un processus bien réel.»

LA VILLE INTRIKUÉE

La ville de Delft pourrait être qualifiée de système quantique intriqué. Ses canaux placides et ses bâtiments médiévaux de briques se superposent dans l'espace et dans le temps avec des voitures, des cyclistes, des magasins de téléphones portables et des étudiants qui arpentent les mêmes rues étroites qu'a explorées le peintre Johannes Vermeer. Le laboratoire de Simon Gröblacher est à environ 2 kilomètres au sud du centre historique et... à des centaines d'années dans le futur!

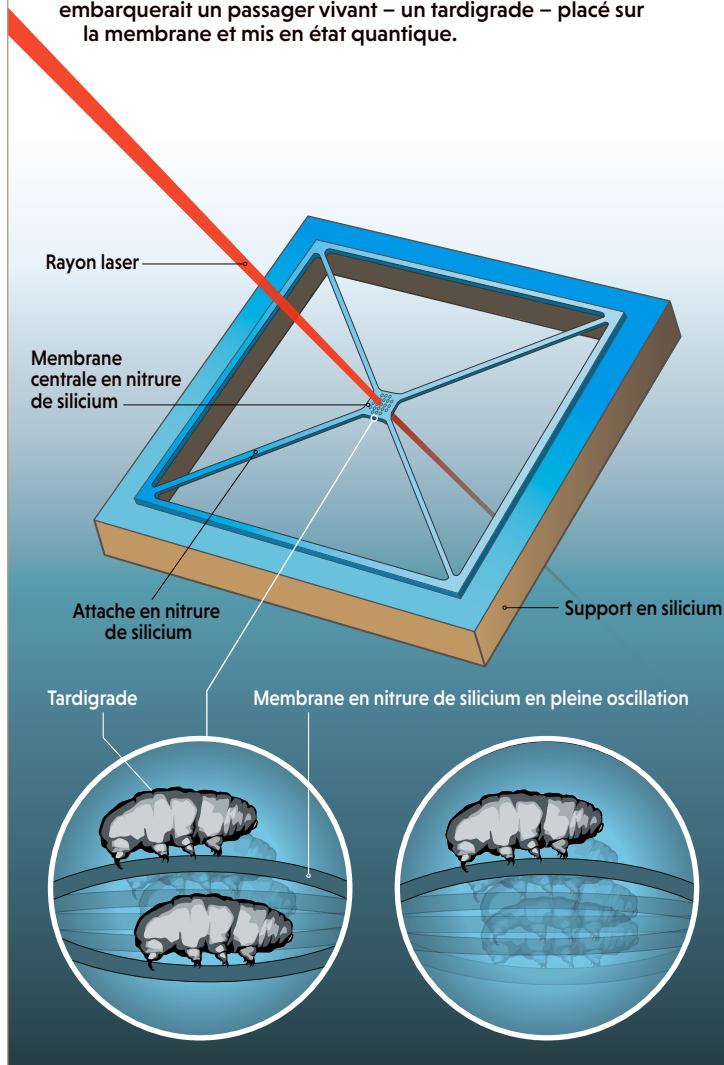
Par un matin chaud de printemps, il montre à un visiteur l'une des «grandes, très

grandes» créations dont il est, avec ses collègues, l'auteur: une membrane de l'ordre du millimètre, attachée à une puce de silicium, à peine visible à l'œil nu.

Vue de près (ou largement agrandie sur un poster dans le couloir), la membrane ressemble à un trampoline minuscule. Elle est composée de nitrure de silicium, un matériau céramique

TARDIGRADE SUR TRAMPOLINE

Des objets macroscopiques peuvent-ils se comporter de manière quantique ? L'une des expériences prévues pour y répondre met en jeu une membrane de taille millimétrique qui ressemble à un minuscule trampoline. Attachée à une puce en silicium, la membrane peut vibrer pendant de longues minutes. Les scientifiques comptent utiliser un laser pour placer la membrane dans un état de superposition quantique: la membrane pourrait vibrer à deux amplitudes différentes en même temps. Les chercheurs veulent suivre la possible réduction du paquet d'onde du système (la membrane adopte une seule amplitude). Lors de futurs tests, le dispositif embarquerait un passager vivant – un tardigrade – placé sur la membrane et mis en état quantique.



utilisé dans le moteur des navettes spatiales, et comprend en son centre un miroir hautement réfléchissant. Une seule secousse de l'un des composants peut faire vibrer la membrane pendant plusieurs minutes. De telles membranes sont «d'excellents oscillateurs, explique le physicien. Ce serait comme pousser une fois quelqu'un sur une balançoire pour qu'elle oscille d'avant en arrière pendant dix ans.» Malgré ses dimensions lilliputiennes, la membrane est extraordinairement résistante. «Nous la soumettons à une tension très importante – de l'ordre de 6 gigapascals, précise Richard Norte, l'un des collaborateurs de Simon Gröblacher. C'est environ dix mille fois la pression dans un pneu de vélo, dans quelque chose à peine huit fois plus large qu'un brin d'ADN.»

Cette résistance rend la membrane idéale pour étudier des phénomènes quantiques: elle vibre de façon fiable à température ambiante et sans se briser. Simon Gröblacher et Richard Norte comptent un jour utiliser un laser pour pousser la membrane dans un état de superposition (la membrane oscillerait simultanément à deux amplitudes différentes). La capacité de la membrane à vibrer pendant plusieurs minutes devrait, en principe, permettre à ces états quantiques de persister suffisamment longtemps pour que nous puissions voir ce qui se passe quand – ou si – la membrane se réduit à un seul état classique.

«C'est exactement ce qu'il faut pour créer un système qui garde ses spécificités quantiques, explique Simon Gröblacher. Il est très bien isolé et n'interagit pas avec son environnement, au risque d'induire, supposément, la décohérence. Une fois dans un état quantique, vous contrôlez sa décohérence, avec le laser. Nous espérons bientôt créer une superposition des oscillations du système.»

DES TARDIGRADES QUANTIQUES

Simon Gröblacher et ses collègues ne comptent pas s'arrêter en si bon chemin. *In fine*, ils espèrent placer un organisme vivant sur la membrane pour ensuite mettre celle-ci, et donc son passager, dans un état de superposition quantique. Les candidats principaux pour cette expédition dans l'espace quantique sont les tardigrades, des microorganismes à huit pattes parfois surnommés «oursons d'eau». «Ce sont des créatures fascinantes, s'enthousiasme Simon Gröblacher. Elles survivent à un refroidissement intense, à des températures élevées, à un vide poussé...» Mais avant d'obtenir un tardigrade quantique, la première étape consiste d'abord à mettre le dispositif sans voyageur dans un état de superposition.

Avec ou sans tardigrades, une telle expérience offrirait aux physiciens l'opportunité de tester si la nature censure, d'une manière ou d'une autre, les effets quantiques au-delà d'une

➤ certaine échelle de taille. Certains physiciens ont proposé que la réduction soit un véritable phénomène physique, avec des effets mesurables. L'une des idées, connue sous le nom de «localisation spontanée continue», ou CSL, stipule que la réduction du paquet d'onde est simplement un événement aléatoire qui se produit constamment dans le monde microscopique. D'après cette théorie, la probabilité qu'une particule quelconque se réduise est extrêmement rare (cela se produirait une fois par centaine de millions d'années), mais pour de larges agrégats de particules, la réduction devient une certitude.

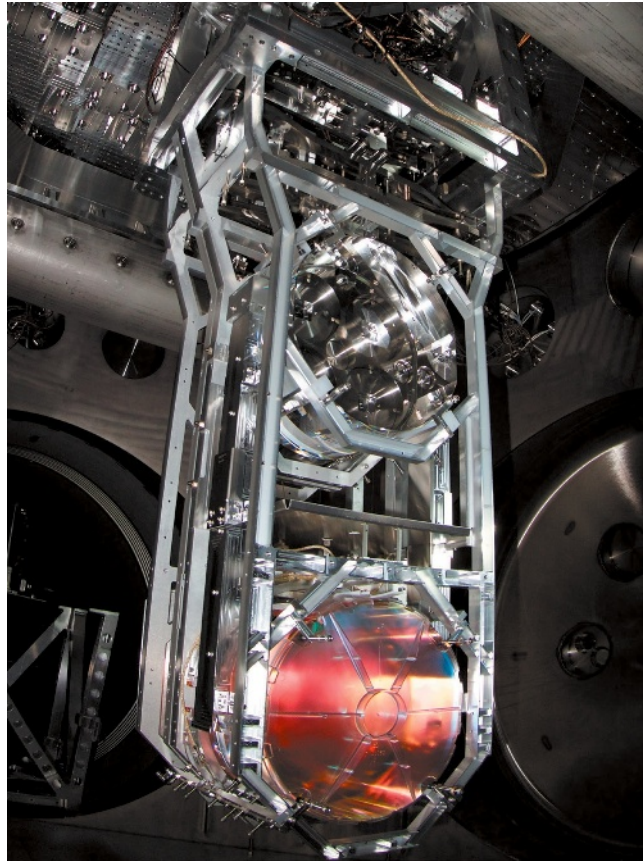
LA LOCALISATION SPONTANÉE CONTINUE

«Un seul proton doit attendre environ 10^{16} secondes (un peu plus de 317 millions d'années) pour subir une réduction. Elle n'advient donc que quelques fois dans l'histoire de l'Univers», détaille Angelo Bassi. Mais le nombre énorme de particules dans un objet macroscopique rend la réduction inévitable. «Si vous prenez une table, qui contient de l'ordre du nombre d'Avogadro de particules, soit 10^{24} , la réduction se produit quasi immédiatement.» Avec une théorie de la localisation spontanée avérée, la prise de mesure et l'observation ne joueraient plus aucun rôle dans la réduction du paquet d'onde. Dans n'importe quelle mesure, une particule donnée et l'instrument qui enregistre deviennent des parties d'un grand objet quantique dont le paquet d'onde se réduit très rapidement. La particule semble passer d'une superposition d'état à une valeur précise de cet état pendant une mesure, mais cette transformation se produit aussitôt que la particule interagit avec l'instrument, avant même la mesure.

Une réduction se révélant un phénomène physique réel aurait des conséquences pratiques importantes. D'abord, cela pourrait limiter la technologie naissante des ordinateurs quantiques. «Idéalement, on aimerait produire des ordinateurs quantiques de plus en plus grands, concède Angelo Bassi. Mais on ne pourrait pas exécuter des algorithmes quantiques puisque la réduction, inéluctable à grande échelle, détruirait tout.»

Pendant des décennies, la plupart des physiciens ont considéré la réduction comme un aspect de la théorie quantique inaccessible à l'expérimentation. Mais la localisation spontanée continue et d'autres modèles de réduction ont changé la donne. La localisation spontanée continue, par exemple, prédit que la réduction transmet une légère secousse aux particules, créant un fond de vibration omniprésent et possiblement détectable.

«Dans ce modèle, la réduction est quelque chose d'universel pour les micro- et les macro-systèmes, explique Angelo Bassi. À chaque



Pourtant très sensibles, les miroirs de *Ligo* n'ont pas bougé sous l'effet des vibrations quantiques prédites par la théorie de la localisation spontanée continue. De nouveaux tests plus précis sont à l'étude.

réduction, la particule bouge un peu.» Avec d'autres physiciens, il en a cherché des preuves à des endroits surprenants. Ils ont par exemple passé au peigne fin les données de calibration de l'*Observatoire d'ondes gravitationnelles par interférométrie laser (Ligo)*, un instrument capable d'enregistrer des mouvements 10 000 fois plus petits que la largeur d'un proton.

En février 2016, le *Ligo* a détecté une onde gravitationnelle pour la première fois. L'onde a étiré et compressé l'espace entre deux miroirs sur les sites jumeaux de l'expérience, dans les états de Washington et de Louisiane. Le décalage fut d'à peine quatre millièmes du diamètre d'un proton, ce qui s'accorde parfaitement avec les prédictions de la théorie de la relativité générale d'Albert Einstein. Mais dans les données de *Ligo*, Angelo Bassi et ses collègues n'ont trouvé aucun indice relatif à un mouvement additionnel causé par les petites poussées quantiques prédites par le modèle de la localisation spontanée continue. Le résultat ne les a pas surpris. Si la réduction quantique est un phénomène physique réel, il est très faible. Jusqu'à quel point? Les physiciens ont désormais attribué des limites extrêmement précises à l'effet.

Ils ont aussi traqué des manifestations de la réduction lors d'expériences conçues pour détecter la matière noire – des particules hypothétiques dont on estime qu'elles représentent 85% de la matière dans l'Univers. Une telle expérience, installée dans les Pyrénées espagnoles, utilise des détecteurs en germanium pour chercher des signes des particules de la matière noire qui les traverseraient à toute vitesse en générant un flash de rayons X. Une fonction d'onde en pleine réduction devrait, de la même façon, créer un flash. Mais aucun n'a encore été détecté...

UNE MINI-POUTRE RÉDUITE

Ces expériences ont considérablement resserré les contraintes imposées aux modèles de réduction, mais pas au point d'en écarter le principe. En septembre 2017, Andrea Vinante, de l'université de Southampton, en Angleterre, avec Angelo Bassi et trois autres collègues, ont découvert un embryon de preuve en faveur de la localisation spontanée continue. Ils ont construit un cantilever miniature (une mini-poutre horizontale fixée à l'une de ses extrémités) d'à peine 1 demi-millimètre de longueur et de 2 micromètres d'épaisseur et doté d'un petit aimant. Les chercheurs ont soigneusement protégé l'installation contre toute vibration externe et ont refroidi le dispositif à une température proche du zéro absolu, afin d'éliminer tout mouvement d'origine thermique.

Dans ces conditions, le cantilever vibre malgré tout très légèrement à cause du mouvement thermique de ses particules. Mais l'oscillation s'est montrée plus importante que prévu. Le cantilever et son aimant ont vibré comme un plongeur sur quelques trillièmes de mètre (10^{-18}). Ces valeurs sont compatibles avec les calculs de Stephen Adler sur la réduction de paquet d'onde.

«Nous aurions pu y voir un bruit inexplicable, se rappelle Andrea Vinante, cohérent avec ce que nous attendons d'un modèle de réduction. Mais il pourrait trahir un effet que nous n'avons pas complètement compris.» Avec ses collègues, il travaille à améliorer la sensibilité de l'expérience par un facteur d'au moins 10, voire 100. «Nous devrions être capables de confirmer la présence d'une anomalie ou, au contraire, d'exclure le caractère intéressant de ce qui a été observé.» Un an ou deux seront nécessaires avant d'obtenir de nouvelles données.

Qu'advient-il si l'une de ces expériences confirme le phénomène de la réduction quantique? Les paradoxes de la théorie seront-ils résolus? «Si la réduction existe vraiment, le monde sera divisé en différentes échelles, répond Igor Pikovski, du Centre d'astrophysique Harvard-Smithsonian. Au-delà d'une

AVEC LA MÉCANIQUE QUANTIQUE, NOUS NE FAISONS FACE À AUCUNE CRISE. TOUT LE PROBLÈME EST LÀ!

BIBLIOGRAPHIE

A. VINANTE ET AL., Improved noninterferometric test of collapse models using ultracold cantilevers, *Physical Review Letters*, vol. 119, Art. 110401, 2017.

R. NORTE ET AL., Mechanical resonators for quantum optomechanics experiments at room temperature, *Physical Review Letters*, vol. 116, art. 147202, 2016.

H. C. VON BAEYER, L'étrangeté quantique, juste une impression? *Pour la Science* n° 435, 2013.

certaine échelle, la mécanique quantique cesserait d'être la bonne théorie. Mais en dessous de ce seuil, tout ce que nous savons de la mécanique quantique continuerait d'être vrai. Donc, les mêmes questions et interprétations philosophiques continueront de nous préoccuper. Il y aurait toujours de multiples mondes pour les électrons et les atomes – mais pas pour la Lune! Cela ne réglerait donc pas tous les problèmes, mais rendrait les choses plus étranges.»

Les modèles comme celui de la localisation spontanée continue ne sont que des efforts pour unifier ces deux mondes. Bien qu'ils ne soient pas encore des théories à part entière, ils pourraient aider les physiciens à développer un modèle de la réalité plus clair que celui proposé actuellement par la mécanique quantique.

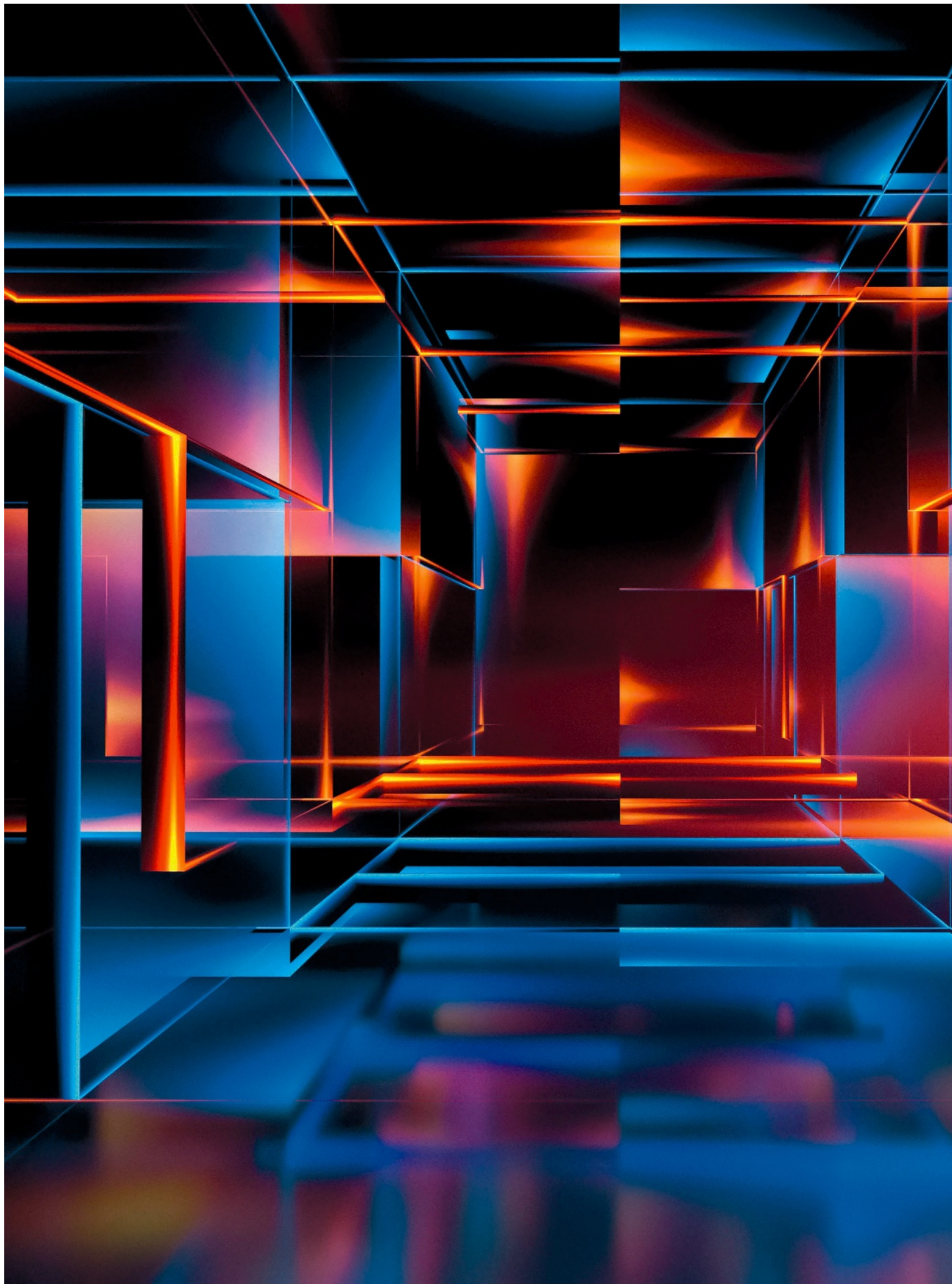
«Je pense personnellement que la mécanique quantique a besoin d'un petit lifting, avoue Stephen Adler. Je ne vois pas où est le problème d'y songer. La mécanique newtonienne est apparue correcte pendant deux cents ans, alors qu'elle ne l'est pas. La plupart des théories fonctionnent dans un domaine, mais cessent de suffire appliquées à un autre.»

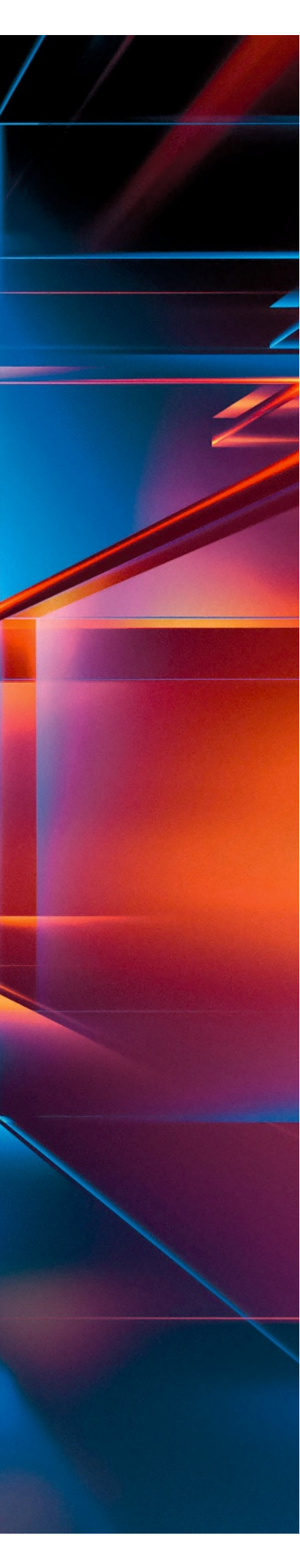
DES IDÉES DE RÉACTIONNAIRES

Mais, pour l'heure, la mécanique quantique semble répondre à tous les tests. «Non, nous ne faisons face à aucune crise. Tout le problème est là! s'exclame Steven Weinberg. Par le passé, nous n'avons cessé de progresser lorsque les théories existantes rencontraient des difficultés. Mais il n'y a rien de tel avec la mécanique quantique. Elle n'est pas en conflit avec les observations. Le problème, c'est qu'elle ne parvient pas à satisfaire les idées philosophiques préconçues et réactionnaires des gens comme moi.»

Quoi qu'il en soit, la plupart des scientifiques ne se préoccupent pas de l'étrangeté de la mécanique quantique. Ils continuent d'utiliser la théorie dans leurs dispositifs expérimentaux, collisionneurs d'atomes ou détecteurs de matière noire, et ne s'arrêtent que rarement pour réfléchir à ce que dit – ou ne dit pas – la mécanique quantique quant à la nature de la réalité.

«Je pense que la majorité des physiciens ont une attitude très saine, confie Steven Weinberg, en continuant d'utiliser la théorie, en repoussant les frontières de notre connaissance et en laissant les questions philosophiques aux générations futures.» Un certain nombre d'entre eux, toutefois, ne comptent pas attendre si longtemps. «Certains vous diront que la mécanique quantique nous a appris que le monde est étrange et que nous devons l'accepter, remarque Angelo Bassi. Je m'y refuse. Si une chose est étrange, nous devons faire en sorte de mieux la comprendre.» ■



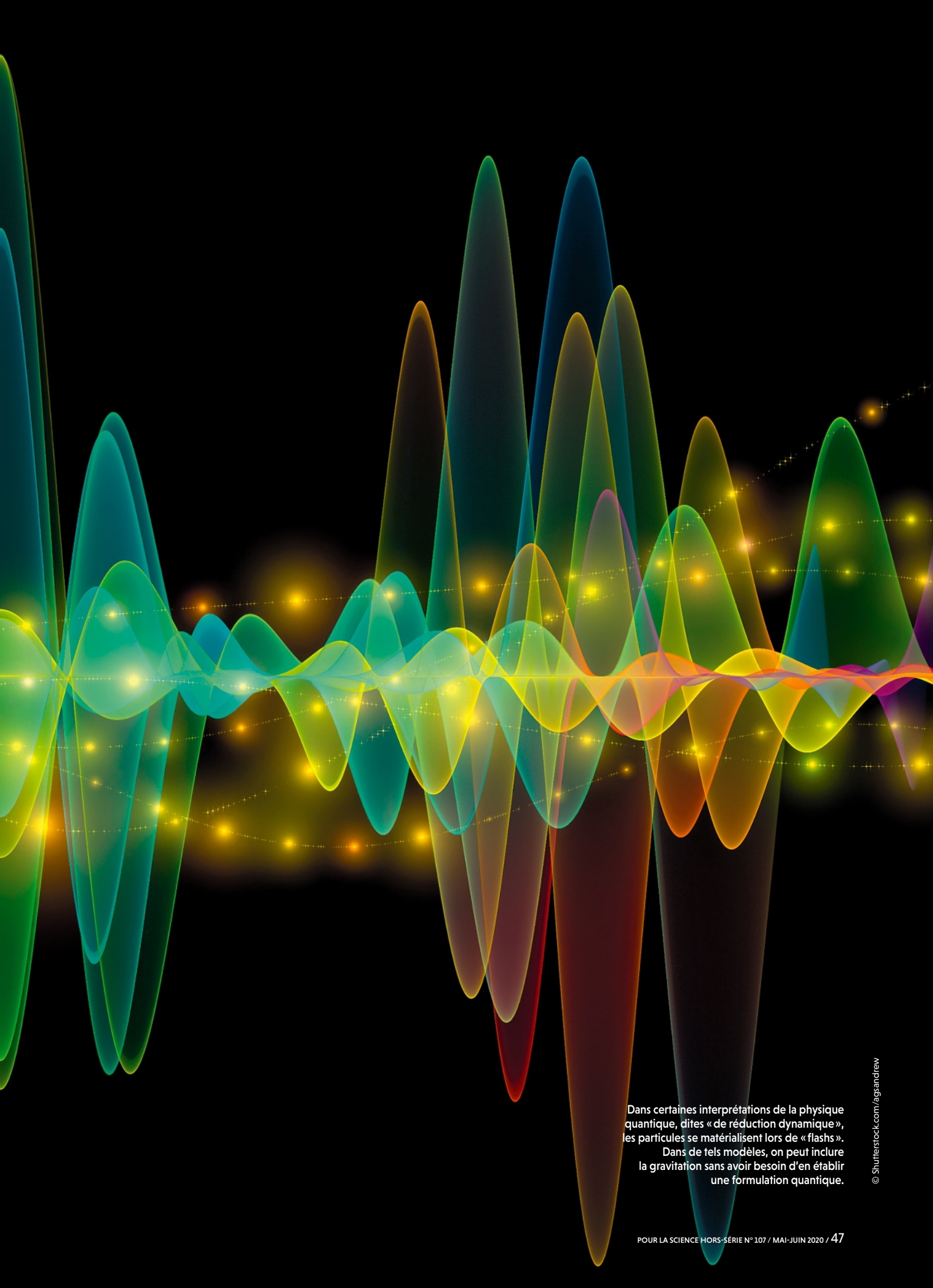


... MAIS UNE RÉALITÉ QUESTIONNÉE

Certes, la physique quantique décrit parfaitement une très grande variété de phénomènes naturels. Il n'empêche, sa nature essentiellement probabiliste, et les étranges concepts qu'elle véhicule (indéterminisme, superposition, dualité onde-corpuscule, chat de Schrödinger, principe d'incertitude, non-localité, intrication...) posent de sérieux problèmes à qui veut se pencher sur sa signification profonde. De fait, les lois de la physique quantique défient l'idée que nous avons de la réalité physique. Certains ne s'en préoccupent pas, et se satisfont de son extraordinaire efficacité, mais d'autres s'interrogent sur l'interprétation à lui donner. Les hypothèses en lice sont nombreuses, mais comment trancher ? On peut les tester par des expériences de pensée, mais aussi par de vrais montages en laboratoire.

La physique quantique sans gravité

Et si la gravité n'était pas quantique et restait de nature classique ? Cela expliquerait l'échec des tentatives d'échafauder une théorie quantique de la gravitation. Il faudrait alors repenser les fondements de la physique quantique.



Dans certaines interprétations de la physique quantique, dites « de réduction dynamique », les particules se matérialisent lors de « flashes ». Dans de tels modèles, on peut inclure la gravitation sans avoir besoin d'en établir une formulation quantique.

© Shutterstock.com/agsandrew

L'ESSENTIEL

● La plupart des physiciens pensent que la physique quantique et la relativité générale ne peuvent être conciliées que dans le contexte d'une théorie quantique de la gravitation.

● Les principales pistes que sont la théorie des cordes ou la gravitation quantique à boucles n'ont pas encore obtenu de résultats satisfaisants.

● Une autre voie est celle de la «gravitation semi-classique», où cette force resterait de nature classique. Des modèles développés récemment montrent que cette approche peut fonctionner.

● Des expériences pour tester directement la nature quantique ou classique de la gravitation pourraient voir le jour.

L'AUTEUR



ANTOINE TILLOY
physicien à l'institut
Max-Planck
d'optique quantique,
près de Munich,
en Allemagne

P

our Carlo Rovelli, du centre de physique théorique de Luminy, près de Marseille, «le problème de la gravitation quantique n'est rien de moins que le problème de trouver la nouvelle description cohérente du monde, qui amènerait enfin la révolution scientifique du xx^e siècle à sa conclusion.»

La révolution en question est celle de l'avènement de la physique quantique et de la relativité générale. Ces deux théories ont bouleversé notre vision du monde, des plus petites aux plus grandes échelles. Mais les réunir dans «une nouvelle description cohérente», est encore hors de portée. Jusqu'ici, toutes les tentatives visant à élaborer une théorie quantique de la gravitation, ou «gravité quantique», ont été décevantes. Mais cette synthèse est-elle vraiment nécessaire? Et si oui, la gravité quantique est-elle la seule façon d'y parvenir? Des physiciens explorent une autre piste qui consiste à concilier relativité générale et physique quantique sans pour autant imposer une formulation quantique de la gravitation.

Pour y parvenir, ils sont amenés à repenser les fondements de la physique quantique. Au cours de la seconde moitié du xx^e siècle, elle a conduit au développement de la théorie quantique des champs, qui intègre dans un ensemble cohérent le «modèle standard de la physique des particules», trois des quatre interactions

fondamentales: l'électromagnétisme, qui agit entre photons et particules dotées d'une charge électrique, l'interaction forte, qui assure la cohésion des protons et des neutrons dans le noyau atomique, et l'interaction faible, qui se manifeste notamment dans la radioactivité bêta.

La quatrième interaction fondamentale, la gravitation, est décrite par une autre théorie très différente, la relativité générale, introduite en 1915 par Albert Einstein. Dans cette théorie, la matière et l'espace-temps interagissent pour donner ce que l'on perçoit comme la force gravitationnelle: la matière (et l'énergie) courbe l'espace-temps et son mouvement est, en retour, déterminé par le «relief» de l'espace-temps.

La relativité générale est utile dans les situations où la gravitation domine, c'est-à-dire principalement en astrophysique et en cosmologie. La physique quantique, plus précisément le modèle standard, s'applique plutôt dans des situations où la gravitation est négligeable en comparaison des autres forces, ce qui est le cas dans les expériences menées dans les accélérateurs de particules.

DES THÉORIES INCOMPATIBLES

Ainsi, à son niveau le plus fondamental, l'Univers semble régi par deux mécaniques distinctes, deux ensembles de lois *a priori* incompatibles tant les notions et objets de ces théories sont différents. Dans leurs domaines d'application respectifs, ces deux théories sont d'une efficacité redoutable. Mais relativité générale et physique quantique ne semblent pas pouvoir être utilisées simultanément, en tout cas pas sans modification. Que se passe-t-il, par exemple, dans une situation où les effets dus à la physique quantique sont importants, mais où la force gravitationnelle domine? La réponse simple est que l'on ne sait pas. On n'a même pas de cadre théorique approprié.

Les situations où il faudrait utiliser à la fois la physique quantique et la relativité générale sont rares dans la nature. Nous n'avons donc

pas de résultats expérimentaux pour nous indiquer ce qui s'y passe. Cette situation est due au fait que la gravitation est une force extrêmement faible, qui ne domine les trois autres que pour les objets massifs et étendus. Or les effets quantiques tendent, eux, à se brouiller lorsque la taille des objets considérés augmente.

Cependant, au moins deux situations motivent la recherche d'une théorie quantique de la gravitation. Sans une telle théorie, il semble

A PRIORI, SANS UNE THÉORIE QUANTIQUE DE LA GRAVITÉ, IL SEMBLE IMPOSSIBLE DE SAVOIR CE QUI S'EST PASSÉ AU DÉBUT DE L'UNIVERS

impossible de savoir ce qui s'est passé au moment du Big Bang, ou encore aujourd'hui au centre des trous noirs. Dans ces deux cas, où la gravitation est très forte, la relativité générale prédit l'existence de singularités, c'est-à-dire des grandeurs physiques infinies. C'est un signal clair que cette théorie est insuffisante, à elle seule, pour décrire ces situations : les effets de la physique quantique y sont importants et doivent être pris en compte.

Dès lors, comment construire une théorie globale combinant physique quantique et relativité générale ? Une première piste naturelle est la « quantification canonique ». Cette technique formelle permet de produire une version quantique d'une théorie physique dont on ne connaît qu'une formulation « classique ». En 1927, le physicien anglais Paul Dirac a introduit et appliqué avec succès cette méthode à l'électromagnétisme. Avec ses raffinements successifs, cette approche a conduit à l'intégration des trois interactions non gravitationnelles au sein du modèle standard.

En 1967, les Américains John Wheeler et Bryce DeWitt ont tenté une formulation quantique de la gravitation en utilisant la quantification canonique. Mais cette approche fonctionnait mal et entraînait des difficultés techniques et conceptuelles qui semblaient insurmontables. Notamment, des notions *a priori* triviales comme le temps ou la causalité deviennent difficiles à comprendre et même à définir.

Ce premier échec a motivé des approches plus exotiques et élaborées, comme la « gravité quantique à boucles », qui est un raffinement de l'approche canonique et dont Carlo Rovelli est

l'un des auteurs, ou la théorie des cordes, qui s'en éloigne plus radicalement. Cette dernière, qui est probablement la voie la plus explorée et la plus aboutie, fait l'objet d'études intenses depuis environ quarante ans. Dans cette approche, les objets fondamentaux ne sont pas des particules ponctuelles, mais de minuscules cordes vibrantes. Parmi les nombreux aspects intéressants de cette théorie, un résultat prometteur du point de vue d'une gravité quantique est qu'elle décrit un mode de vibration (d'une corde) qui serait associé au graviton, la particule médiatrice de la force gravitationnelle lorsqu'on suppose que celle-ci est de nature quantique.

UNE THÉORIE CHER PAYÉE

Cependant, les succès de la théorie des cordes se paient par une complexité mathématique extrême, au point que l'on ne dispose pas d'une définition mathématique générale de la théorie. En pratique, les physiciens ont un ensemble d'approximations dont on conjecture qu'elles sont les limites d'une théorie sous-jacente (la théorie M) qui reste à expliciter. La théorie des cordes souffre aussi d'un excès de flexibilité. Un choix judicieux de conditions initiales permettrait d'obtenir à peu près n'importe quelle prédiction, ce qui met en question la réfutabilité de la théorie. Ces difficultés justifient que l'on s'intéresse à d'autres pistes.

Après tout, si parvenir à une formulation quantique de la gravitation est aussi difficile, c'est peut-être parce que la gravité diffère, par nature, des autres forces. Aucun principe n'interdit *a priori* de construire une théorie globale où cohabiteraient la relativité générale et la physique quantique en gardant une formulation classique de la gravité. L'idée est moins esthétique – la gravitation serait alors fondamentalement différente des autres interactions – mais l'Univers fait peu de cas de nos canons de beauté. On parle alors de gravité semi-classique (« semi » car la gravité n'est pas quantique, à l'inverse des autres forces).

À quelles contraintes une telle théorie est-elle soumise ? Elle doit continuer à décrire la force gravitationnelle de la même façon que la relativité générale, mais avec une subtilité supplémentaire : la matière doit obéir par ailleurs aux lois de la physique quantique.

La relativité générale décrit, nous l'avons vu, la gravitation comme le résultat d'une interaction dynamique entre matière et espace-temps : la courbure de l'espace-temps détermine le mouvement de la matière, tandis que, simultanément, la matière déforme le relief de l'espace-temps. Dans cette double dynamique, il est assez simple d'adapter les équations de la physique quantique pour prendre en compte une courbure donnée *a priori* : c'est la théorie quantique des champs en espace courbe, sur laquelle ont travaillé Stephen Hawking, Roger Penrose, Robert Wald... à partir des années 1970. ➤

➤ Bien que les calculs ne soient pas faciles, ce formalisme a été utilisé dans divers cas limites, pour calculer par exemple les propriétés d'atomes froids dans le champ gravitationnel terrestre ou pour prédire l'existence d'un rayonnement extrêmement faible (pas encore détecté) émis par les trous noirs, le rayonnement dit «de Hawking».

À l'inverse, nous n'avons aucune idée de la façon dont la matière décrite par la physique quantique courbe en retour l'espace-temps. Comprendre cette influence demande de s'interroger sur certains concepts très fondamentaux: qu'est-ce que la masse gravitationnelle en physique quantique? Comment se crée un champ gravitationnel? Sur ces questions, la physique quantique, dans son approche usuelle, est muette.

En revanche, cette théorie permet de faire des prédictions précises. Les informations disponibles sur un système quantique sont contenues dans un objet mathématique, la fonction d'onde du système. Dans les années 1920, les physiciens ont énoncé un ensemble de règles simples qui, à partir de la fonction d'onde, permettent de calculer et prévoir les résultats d'une mesure (ou plutôt leur probabilité) lors d'une expérience.

SUPERPOSITIONS D'ÉTATS

Mais cette approche ne dévoile rien d'une réalité qui serait sous-jacente aux résultats des mesures expérimentales. La physique quantique est une sorte de boîte noire. Dans cette vision dite «de l'école de Copenhague», héritée de Niels Bohr, l'un des pères de la théorie quantique, on ne cherche pas à en dire plus. Le statut même de la fonction d'onde – objet réel ou simple outil de calcul? – n'est lui-même pas clair. Or si l'on veut savoir comment la matière quantique courbe l'espace-temps, on ne peut se contenter de ce mutisme. Nous devons spéculer sur la nature tangible sous-jacente aux prédictions quantiques et explorer d'autres interprétations de la physique quantique que celle de l'école de Copenhague.

Une spécificité de la physique quantique, que l'on n'observe pas dans le monde classique, est le principe de superposition. Tant que la propriété d'un objet quantique (sa position, sa vitesse, son spin...) n'a pas été mesurée, l'objet peut exister dans une superposition d'états correspondant à des valeurs différentes de cette propriété. Du point de vue du formalisme, l'état quantique d'une particule peut, par exemple, mettre en jeu plusieurs positions différentes simultanément. Le célèbre chat de Schrödinger illustre cette idée.

Cependant, il est impossible d'observer directement les superpositions. Elles sont détruites lorsqu'on réalise une mesure. On ignore donc si une superposition d'états existe vraiment où s'il s'agit seulement d'un outil intermédiaire de calcul. En 1962, le Danois Christian Møller et le Belge Léon Rosenfeld ont proposé de supposer qu'une superposition d'états est une entité bien

réelle et contribue donc à courber l'espace-temps (qui, lui, reste bien unique, sans superposition). Ils ont ainsi spéculé que l'énergie de tous les états composant la superposition courbe l'espace-temps. Mais cette proposition de Møller et Rosenfeld soulève des difficultés conceptuelles. Il existe plusieurs façons de les mettre en évidence. Celle que nous allons présenter n'est pas celle qui a été utilisée historiquement, mais elle est la plus simple et la plus générale.

UNE INTRICATION NON LOCALE

Pour comprendre l'argument, il faut remonter à l'article d'Albert Einstein, Boris Podolsky et Nathan Rosen publié en 1935 sur, selon eux, l'impossible intrication (*voir Pas d'échappatoire pour l'intrication, par R. Hanson, page 26*). Einstein et ses deux coauteurs en concluaient que la superposition est un artefact de modélisation, et qu'il n'y a en fait qu'une seule réalité, prédéterminée avant même la mesure. La superposition, présente dans le formalisme quantique, ne serait qu'une conséquence de notre ignorance. Il manquerait ainsi des variables (parfois dites «cachées») qui spécifieraient de façon plus précise l'état des particules. Dès lors, le formalisme de la physique quantique serait incomplet car améliorable, manquant de spécifier un résultat pourtant prédéterminé.

Si, en revanche, les résultats ne sont pas déterminés avant la mesure, il faut admettre que la physique quantique implique l'existence d'interactions non locales, indépendantes de la distance séparant les particules et donc non contraintes par la relativité restreinte qui stipule qu'aucune information ne peut se propager plus vite que la lumière. Einstein jugeait cette solution inacceptable. L'histoire, en la personne de John Stewart Bell et Alain Aspect lui ont donné tort: la nature suit bien les prédictions quantiques et leur caractère non local.

Les conséquences de la non-localité sont-elles une menace pour la relativité restreinte? Bizarrement, en apparence seulement. Les équations de la physique quantique conspirent à maintenir la non-localité sous une forme bénigne: elle est inexploitable pour transmettre de l'information et reste donc compatible avec la relativité restreinte.

En revanche, si l'on utilise la méthode de Møller et Rosenfeld pour intégrer une force gravitationnelle classique à la physique quantique, la situation devient problématique. Cette approche brise la linéarité de l'équation de Schrödinger, équation fondamentale qui régit l'évolution temporelle de la fonction d'onde d'un système quantique. En 1989, Nicolas Gisin, physicien genevois, fit remarquer que la non-linéarité a, de façon générale, une conséquence fatale: se propageant à d'autres éléments mathématiques de la théorie, elle est exploitable pour transmettre de l'information

plus vite que la lumière. Cet argument a disqualifié la proposition de Møller et Rosenfeld ainsi que toutes les approches similaires.

La question devient alors : existe-t-il une façon de coupler un espace-temps classique à de la matière quantique sans que la non-localité mette à mal les principes de la relativité restreinte ? Existe-t-il des modifications de la physique quantique contournant l'objection de Nicolas Gisin ? Dès 1984, Nicolas Gisin lui-même avait construit un modèle rudimentaire modifiant la physique quantique sans briser la relativité restreinte, en ajoutant aux équations un terme fondamentalement aléatoire. Ce modèle préfigurait les modifications de la physique quantique dites d'*objective collapse* en anglais ou « de réduction dynamique ».

Avant de chercher à les appliquer à la gravitation, les physiciens ont étudié les modèles de réduction dynamique pour résoudre un problème lié aux superpositions d'états. Dans l'exemple du chat de Schrödinger, la superposition d'états d'un atome se répercute sur un objet macroscopique et jusque sur les instruments de mesure. Or, soulignait Schrödinger, ce phénomène est problématique puisqu'on n'observe pas de superpositions à l'échelle macroscopique. Les

partisans de l'école de Copenhague écartaient cette difficulté en postulant que les instruments de mesure étaient de nature différente, intrinsèquement classique, et qu'ils réduisaient automatiquement les superpositions à leur contact. Mais cette distinction entre monde quantique et instruments de mesure classiques est arbitraire, les instruments étant eux-mêmes faits d'atomes.

SUPPRIMER LES SUPERPOSITIONS

À partir de la fin des années 1980, les physiciens ont exploré la possibilité que la physique quantique ne soit qu'une approximation d'une théorie plus fondamentale, dans laquelle les superpositions à l'échelle macroscopique sont impossibles. Qu'elles soient réelles ou de purs artefacts du formalisme, les superpositions resteraient confinées au monde microscopique. L'idée est d'ajouter dans l'équation de Schrödinger des termes garantissant que les superpositions se réduisent à un état unique lorsque le système devient grand. Cependant, pour respecter la remarque de Gisin, la seule façon de modifier l'équation est d'ajouter des termes de nature aléatoire : en les choisissant judicieusement, les non-linéarités problématiques comme celles qui émergeaient dans le

RÉDUCTION PAR DES « FLASHS »

Les superpositions quantiques sont difficiles à interpréter pour une particule élémentaire. Mais la situation est encore plus gênante à l'échelle macroscopique. Comme l'a souligné Erwin Schrödinger avec son chat à la fois mort et vivant, les superpositions ne sont *a priori* pas confinées au microscopique.

Les modèles de réduction dynamique visent à résoudre ce problème en détruisant de façon aléatoire les superpositions macroscopiques, tout en conservant (à peu près) les superpositions microscopiques nécessaires pour expliquer les résultats expérimentaux.

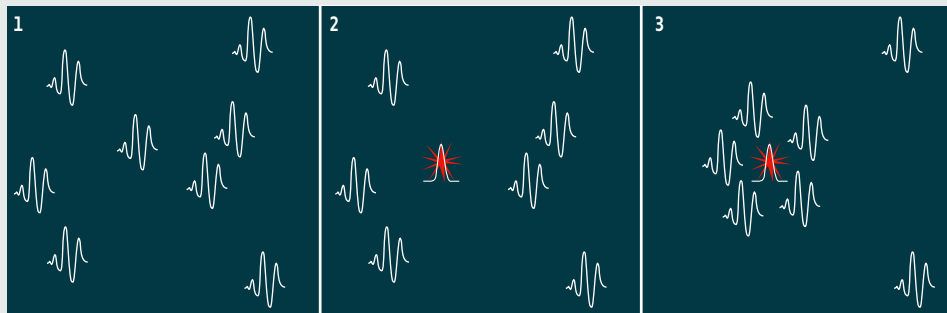
En 1986, les Italiens Giancarlo Ghirardi, Alberto Rimini et Tullio Weber (GRW), proposent que la fonction d'onde d'une particule obéisse à l'équation de Schrödinger la plupart du temps, mais subisse parfois un « flash ». Avec une probabilité très faible, de sorte que l'événement

se produit en moyenne moins de une fois par milliard d'années, la particule se matérialise en un endroit bien précis, nommé flash, autour duquel se resserre aussitôt la fonction d'onde. Cette réduction brutale, qui modifie l'équation de Schrödinger, a un impact minime sur la dynamique microscopique, car une particule ne « flashe » presque jamais. En revanche, un objet macroscopique tel qu'un chat, contenant de l'ordre de 10^{23} atomes, voit chaque seconde des milliards de ses particules élémentaires se

matérialiser en un flash. Une réalité « non superposée » émerge ainsi comme un tableau pointilliste.

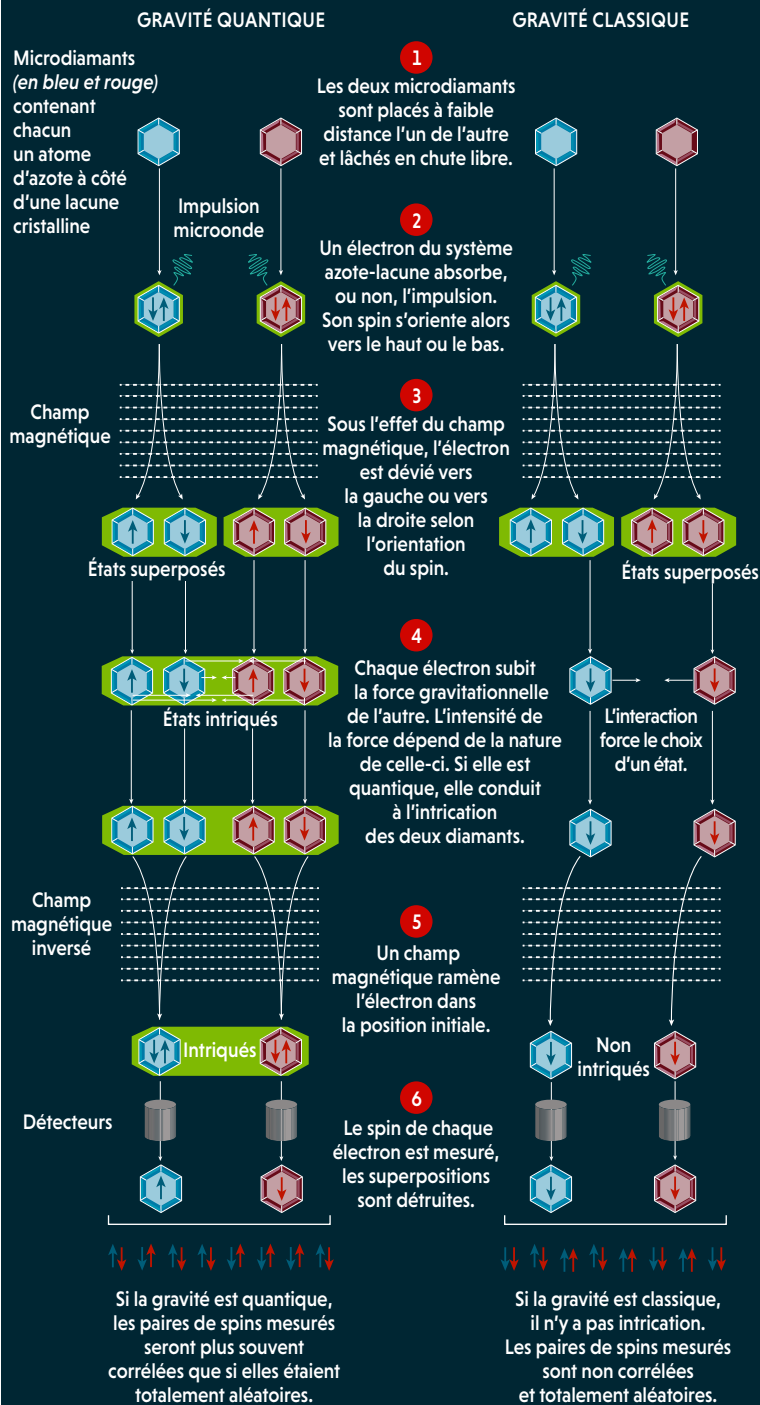
S'il résout le problème des superpositions, le modèle GRW est *ad hoc* et ajoute de nouveaux paramètres fondamentaux à la physique sans intuition quant à leur origine. Peu de physiciens pensent que GRW est la solution aux problèmes conceptuels de la physique quantique. Les expériences cherchant à mesurer la stabilité de superpositions dans des systèmes de plus en plus gros devraient le réfuter.

Ce modèle permet néanmoins d'explorer des moyens d'introduire une force gravitationnelle classique. Dans le modèle développé par Antoine Tilloy et Lajos Diósi en 2015, au sein d'un système de particules (1, représentées de façon abusive chacune par une fonction d'onde, au lieu d'une fonction d'onde pour l'ensemble du système), une particule subit un flash (2, en rouge). Elle acquiert une masse et crée un champ gravitationnel qui attire les fonctions d'onde des autres particules (3).



VERS UN TEST EXPÉRIMENTAL ?

Une nouvelle expérience a été proposée pour sonder le caractère quantique de la force gravitationnelle. Elle sera peut-être réalisable d'ici à quelques années. Elle repose sur deux microdiamants, mis chacun dans une superposition quantique de deux états. En rapprochant les deux diamants l'un de l'autre, la force de gravitation devrait intriquer ces états si cette force est de nature quantique. Si elle est fondamentalement classique, les chercheurs n'observeront pas de phénomène d'intrication.



➤ modèle de Møller et Rosenfeld se compensent et s'annulent. L'aléa permet de rétablir la linéarité de l'équation et élimine la possibilité de transmettre des signaux plus rapides que la lumière.

Les plus connus de ces modèles de réduction dynamique sont le modèle GRW (voir l'encadré page précédente), du nom des Italiens Giancarlo Ghirardi, Alberto Rimini et Tullio Weber, et le modèle DP, du Hongrois Lajos Diósi et de l'Anglais Roger Penrose.

Initialement, aucun de ces modèles n'incluait la force gravitationnelle; l'objectif était alors simplement de supprimer les superpositions. Ces tentatives ont aussi prouvé qu'il est possible de modifier l'équation de Schrödinger en respectant la limite de Gisin: il faut simplement ajouter la bonne quantité d'aléa.

Durant les vingt-cinq années qui ont suivi l'introduction de ces modèles de réduction dynamique, l'idée d'y inclure la gravitation est restée peu discutée. Les physiciens pensaient que les prédictions seraient de toute façon impossibles à tester expérimentalement. Mais vers 2010, les chercheurs ont envisagé la possibilité d'explorer le caractère quantique de la gravitation grâce à des expériences à basse énergie exploitant finement les superpositions quantiques.

UNE GRAVITATION IRRÉALISTE

Du côté théorique, la situation était embarrassante: on ne disposait pas de théorie de gravité semi-classique cohérente qui puisse être comparée aux résultats des expériences futures. En pratique, les théoriciens étaient contraints d'utiliser l'approche (incohérente) de Møller et Rosenfeld en croisant les doigts pour que ses prédictions soient à peu près valables dans des situations simples. Faute de mieux, on se servait d'une théorie que l'on savait fautive pour estimer des ordres de grandeur et guider le choix des expériences futures.

En 2014, les physiciens Dvir Kafri et Jacob Taylor, de l'université du Maryland, avec Gerard Milburn, de l'université de Californie à Santa Barbara, ont développé un premier modèle simplifié de gravité semi-classique. Mais la force gravitationnelle n'était pas réaliste, même dans le cas non relativiste où l'on considère des vitesses faibles: elle ne reproduisait pas l'expression newtonienne d'une force proportionnelle à l'inverse du carré de la distance. Cependant, par construction, le modèle est cohérent. Et s'il ne décrit pas une force réaliste, ce résultat est un grand pas en avant. Pouvaient-on aller plus loin?

Au début de 2015, en exploitant la même intuition que Dvir Kafri et ses collègues et en la fusionnant avec les constructions historiques des modèles de réduction dynamique des années 1990, j'ai construit, avec Lajos Diósi, un modèle complet reproduisant la bonne force gravitationnelle (newtonienne). Notre modèle ne fonctionne que pour des vitesses faibles, ce

qui est néanmoins suffisant pour traiter toutes les expériences de laboratoire à basse énergie.

Quelle est l'idée du modèle? Rappelons que la difficulté de la gravité semi-classique consiste à extraire de la physique quantique une grandeur que l'on peut définir comme la masse (ou l'énergie) servant de source à un champ gravitationnel classique (sans superposition d'états).

SOUS LES FLASHS

Dans l'approche standard, le seul objet dont on dispose est la fonction d'onde. Dans les approches de réduction dynamique comme le modèle GRW, l'évolution de la fonction d'onde de chaque particule (dictée par l'équation de Schrödinger) est interrompue de façon aléatoire. C'est un «flash», c'est-à-dire un point de l'espace-temps où la superposition est détruite. Le terme de «flash» a été choisi pour mettre en valeur l'aspect éphémère du phénomène (et n'a rien à voir avec une émission de lumière).

Dans notre modèle, la particule devient réelle à l'instant et l'endroit précis du flash. Elle se matérialise et acquiert une masse et crée donc un champ gravitationnel. La particule attire alors vers elle la fonction d'onde du reste du système ou, dit de façon un peu abusive, toutes les autres particules du système. Puis une autre particule se matérialise par un flash et attire vers elle la fonction d'onde du reste... Entre chaque flash, l'évolution quantique usuelle reprend le relais. La gravité se manifeste ainsi de façon saccadée.

Si cette dynamique semble en contradiction avec l'impression que nous avons d'une force gravitationnelle continue, elle est compatible avec les contraintes expérimentales actuelles. Cela s'explique par la faiblesse de la gravitation. Entre deux particules élémentaires, cette force est bien trop petite pour être détectable. Elle n'est observable qu'avec des objets suffisamment macroscopiques dans lesquels les milliards de flashes et d'à-coups gravitationnels qui apparaissent chaque milliseconde donnent aux observateurs l'impression d'un champ gravitationnel évoluant de façon douce et continue.

Un tel modèle, où les flashes sont la source de la force gravitationnelle, présente un certain nombre de signatures expérimentales potentiellement détectables. Par exemple, chaque flash ajoute de l'énergie cinétique aux particules. Cette petite augmentation d'énergie serait observable sous la forme d'un réchauffement mesurable, par exemple, dans des condensats d'atomes ultrafroids.

Faut-il croire à ce modèle? Probablement pas: rappelons qu'il ne fonctionne que dans le régime non relativiste. Il sera intéressant de le réfuter par des expériences pour tester les limites de la physique quantique. Mais en développant ce modèle, notre objectif était surtout de fournir un contre-exemple à l'affirmation selon laquelle une théorie hybride, où la gravité

serait classique, est impossible à construire. Disposer d'un modèle cohérent, même s'il est *in fine* réfuté, permet de prouver que la question de la quantification de la gravité est bien empirique et se tranchera par l'expérience.

Ce modèle peut aussi servir de point de départ pour construire de nombreuses variantes, chacune entraînant des prédictions quantitatives, qu'il sera intéressant de confronter avec les expériences. Cette flexibilité pourrait cependant devenir une faiblesse: si tout résultat expérimental est explicable *a posteriori* en changeant le modèle à la marge, l'approche globale perdra son caractère prédictif. Ainsi, alors que le problème initial était l'impossibilité apparente de construire un seul modèle de gravité semi-classique cohérent, on risque de se retrouver au contraire avec trop de solutions.

TRAQUER LES SIGNATURES

Une autre façon d'aborder le problème de la gravité classique ou quantique est de chercher des signatures expérimentales permettant de tester la pertinence de la gravité semi-classique indépendamment du modèle. En 2017, une équipe menée par Sougato Bose, à l'University College de Londres, a répondu précisément à ce défi. Ils ont proposé une expérience permettant de conclure quant au caractère quantique ou non de la gravitation.

Pour ce faire, ils exploitent une différence qualitative entre toutes les approches semi-classiques cohérentes et une hypothétique théorie quantique. L'idée est d'intriquer une fonction d'onde *via* la force gravitationnelle (voir la figure page ci-contre). Cela n'est possible que si cette force est de nature quantique. Si la force gravitationnelle n'est pas quantique, on n'observera pas d'intrication.

La difficulté de l'expérience de Bose est de trouver une configuration telle que toutes les autres forces, notamment la force de Casimir, liée aux fluctuations électromagnétiques du vide, sont bien négligeables devant la gravité. La surprise est que les avancées techniques requises sont assez raisonnables en termes de microfabrication, de contrôle quantique des systèmes... Des défis, certes, mais sans commune mesure avec celui d'un accélérateur de particules grand comme le Système solaire, qui semble indispensable pour détecter directement des gravitons.

Dans les années 1980, les physiciens pensaient que la nature quantique ou classique de la gravité était une question théorique. Elle sera peut-être expérimentale dans un futur proche. Le résultat le plus intéressant serait de découvrir que la gravité n'est pas quantique. Cela irait à contre-courant de ce que pensent la majorité des physiciens et des efforts consentis ces soixante dernières années. À l'inverse, si la gravité est quantique, une théorie de la gravité quantique n'en deviendra que plus indispensable. ■

BIBLIOGRAPHIE

F. LALOË, *Comprenons-nous vraiment la mécanique quantique?*, EDP Sciences (2^e éd.), 2018.

A. TILLOY, Ghirardi-Rimini-Weber model with massive flashes, *Phys. Rev. D*, vol. 97(2), 021502, 2017.

S. BOSE ET AL., A spin entanglement witness for quantum gravity, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 119(24), article 240401, 2017.

G. GHIRARDI, *Collapse theories*, The Stanford Encyclopedia of Philosophy, Edward N. Zalta, 2016.

N. GISIN, Stochastic quantum dynamics and relativity, *Helv. Phys. Acta*, vol. 62, pp. 363-371, 1989.

L'ESSENTIEL

● L'espace-temps pourrait être constitué de minuscules éléments d'information liés par le phénomène d'intrication quantique.

● Des physiciens explorent cette idée dans le cadre d'un programme de recherche intitulé *It from Qubit*, qui réunit des spécialistes de

l'informatique quantique et des physiciens de la relativité générale et de la théorie des cordes.

● L'objectif, à terme, est d'obtenir une théorie quantique de la gravitation, compatible avec la physique quantique et avec la relativité générale.

L'AUTRICE



CLARA MOSKOWITZ est rédactrice pour la revue *Scientific American* où elle couvre l'astrophysique, la cosmologie et la physique.

La matrice de l'espace-temps

L'intrication quantique de minuscules bribes d'information est-elle la matrice de l'espace et le temps ? Telle est l'audacieuse hypothèse explorée par le projet collaboratif intitulé « It from Qubit ».

P

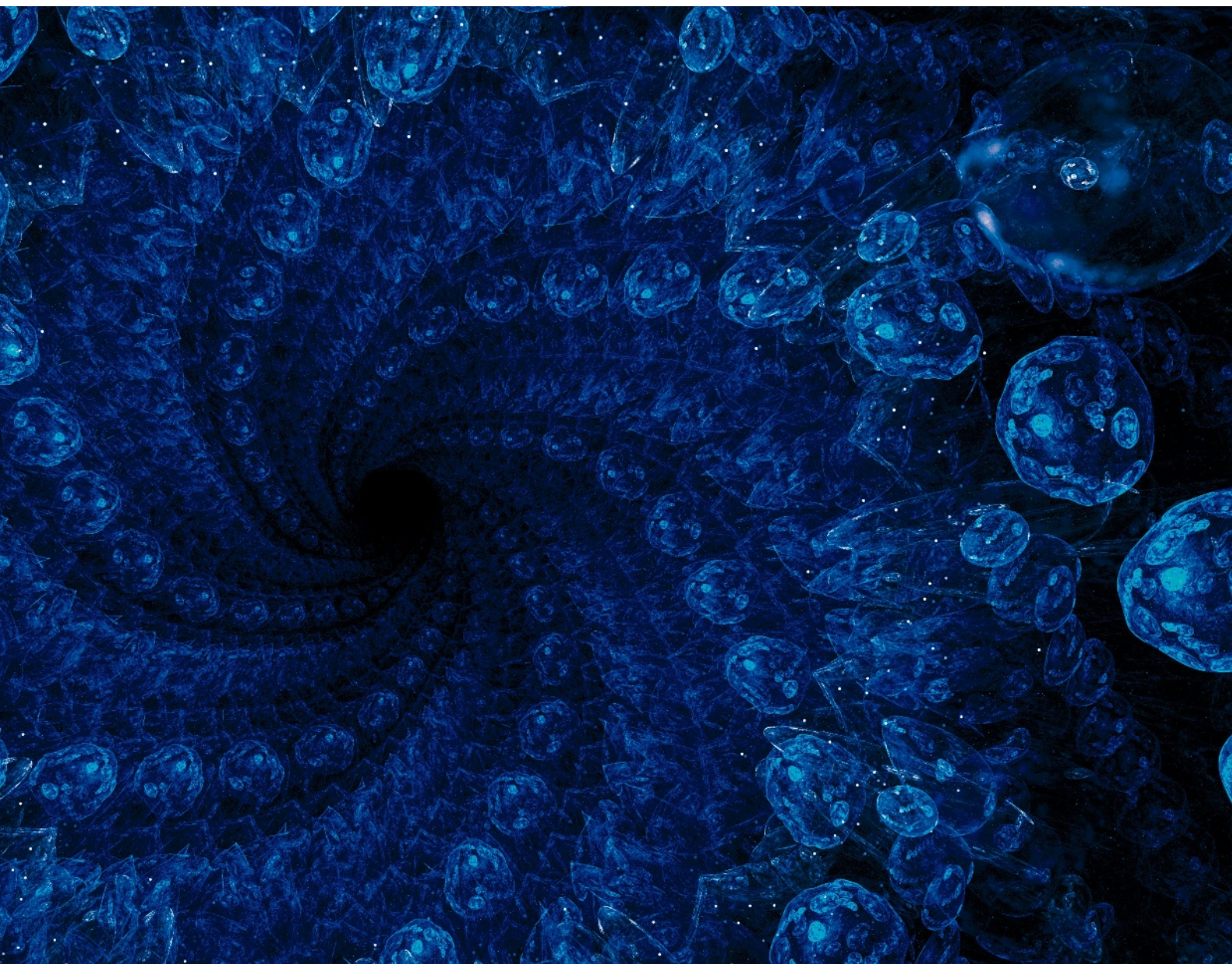
our Shakespeare, «le monde entier est un théâtre». Les physiciens partagent cette idée, mais pour eux, le théâtre est l'espace. Et sur la scène, les acteurs sont les forces et les particules. L'espace, tel qu'on le conçoit le plus souvent, n'est constitué de rien de matériel.

Cependant, les chercheurs remettent en question cette vision. L'espace (ou plutôt

l'espace-temps dans le contexte de la théorie de la relativité générale) pourrait être composé de minuscules bouts d'information. Selon cette approche, ces petits éléments, en interagissant, créent l'espace-temps et font émerger ses propriétés, telles que la courbure – dont découle la gravité.

Cette idée, si elle est correcte, n'expliquerait pas seulement l'origine de l'espace-temps. Elle aiderait aussi les physiciens à formuler la théorie quantique de la gravitation qui se fait attendre depuis si longtemps. En effet, les physiciens ont développé au xx^e siècle deux théories irréconciliables, la relativité générale, qui décrit la dynamique de l'espace-temps, et la physique quantique, qui régit le monde des particules et de leurs interactions.





Le projet *It from Qubit* réunit régulièrement une centaine de physiciens pour réfléchir à ces nouvelles idées. Le nom de ce projet résume l'hypothèse qui anime ces chercheurs: le *it* est ici l'espace-temps et le *qubit* représente la plus petite quantité d'information – la version quantique du bit informatique.

L'idée que l'Univers serait construit à partir d'informations a été popularisée dans les années 1990 par le physicien américain John Wheeler et son expression «*It from bit*». Pour lui, toute la physique serait décrite au niveau le plus fondamental à partir d'information. Aujourd'hui, avec les progrès en physique quantique, le *bit* est devenu *qubit* et l'idée s'est modernisée.

La réunion *It from Qubit* (IfQ) de juillet 2016 à l'institut Perimeter de physique

théorique, au Canada, illustre l'engouement autour de cet axe de recherche. Les organisateurs attendaient environ 90 personnes, mais ils ont reçu tellement de demandes qu'ils ont finalement accueilli 200 participants et ont animé, en simultané, six sessions parallèles dans d'autres universités. «Je pense que c'est l'une des voies les plus prometteuses, si ce n'est *la* voie, pour parvenir à la gravité quantique», confie Netta Engelhardt, postdoctorante à l'université Princeton et qui a assisté à plusieurs de ces réunions. «C'est vraiment en train de décoller.»

Parce que le projet concerne à la fois la science des ordinateurs quantiques, l'étude de l'espace-temps dans le cadre de la relativité générale, la physique des particules et la

»

➤ théorie des cordes, il réunit des chercheurs de communautés qui n'ont pas l'habitude de collaborer. Depuis plusieurs années, la fondation Simons, un organisme privé qui soutient la recherche scientifique, alloue un budget pour financer le projet collaboratif *It from Qubit* ainsi que les recherches et les rencontres des physiciens sur ce sujet. L'excitation ne cesse de croître, et les rencontres successives ont attiré de plus en plus de chercheurs, parmi lesquels des membres de la collaboration financée par la fondation Simons mais aussi de nombreuses autres personnes simplement intéressées par le sujet.

UN PONT ENTRE PLUSIEURS DISCIPLINES

L'intérêt pour le projet IfQ s'étend bien au-delà du cercle de chercheurs qui y participent. Par exemple, Brian Greene, théoricien des cordes à l'université Columbia et extérieur à IfQ, souligne que «si le lien avec la théorie de l'information quantique est aussi fructueux que certains l'anticipent, tout cela pourrait bien déboucher sur la prochaine révolution de notre compréhension de l'espace et du temps. C'est un projet important et tout à fait passionnant.»

L'idée selon laquelle l'espace-temps n'est pas fondamental, mais émerge de bits d'information et est «constitué» de quelque chose, marque une rupture par rapport au tableau dépeint par la relativité générale. De quoi exactement ces bits sont-ils faits et quel type d'information contiennent-ils? Les chercheurs l'ignorent. Mais curieusement, cela ne semble pas les déranger. «Ce qui compte, ce sont les relations [entre les bits plus que les bits eux-mêmes]», explique Brian Swingle, postdoctorant à l'université Stanford. «Toute la richesse vient de ces relations collectives. Ici, l'élément crucial, ce n'est pas les constituants, mais la manière dont ils s'organisent.»

La clé de cette organisation pourrait être l'étrange phénomène que l'on nomme intrication quantique: une corrélation qui peut exister entre deux particules, et grâce à laquelle des mesures réalisées sur l'une des particules ont un effet instantané sur l'autre, même quand une grande distance les sépare (*voir Pas d'échappatoire pour l'intrication, par R. Hanson, page 26*). «Selon une idée fascinante, l'étoffe

de l'espace-temps serait tissée par l'intrication quantique des éléments sous-jacents d'espace-temps, quelle qu'en soit la nature», explique Vijay Balasubramanian, physicien à l'université de Pennsylvanie et l'un des principaux collaborateurs d'IfQ.

Le raisonnement qui sous-tend cette idée est le produit d'une série de découvertes réalisées par des physiciens, notamment par Shinsei Ryu, maintenant à l'université de l'Illinois à Urbana-Champaign, aux États-Unis, et Tadashi Takayanagi, à l'université de Kyoto, au Japon. En 2006, ces deux chercheurs ont mis en évidence une connexion entre l'intrication quantique et la géométrie de l'espace-temps. En 2013, en s'appuyant sur ces travaux, Juan Maldacena, de l'institut d'études avancées de Princeton, et Leonard Susskind, de l'université Stanford, ont montré que si deux trous noirs étaient intriqués, ils créeraient un trou de ver, un raccourci dans l'espace-temps prédit par la relativité générale.

Cette idée a été surnommée ER=EPR, d'après les noms des physiciens qui ont suggéré ces phénomènes: Albert Einstein et Nathan Rosen pour les trous de ver, Einstein, Rosen et Boris Podolsky pour l'intrication quantique. Cette découverte, et d'autres comparables, suggèrent que, curieusement, l'intrication quantique (dont on pensait qu'elle ne faisait intervenir aucun lien physique) peut façonner l'espace-temps.

Afin de comprendre comment l'intrication pourrait donner lieu à l'espace-temps, les physiciens doivent d'abord mieux comprendre comment l'intrication fonctionne.

Ce phénomène nous paraît «fantomatique», pour reprendre les mots d'Einstein, lorsque lui et ses collaborateurs l'ont prédit en 1935, parce qu'il implique une connexion instantanée entre particules même très éloignées. Une situation qui semble défier la relativité restreinte qui stipule que rien ne peut voyager plus vite que la lumière. L'intrication quantique a cependant été confirmée par de nombreuses expériences, sans pour autant violer les principes de la relativité restreinte.

Depuis peu, les physiciens considèrent qu'il existe plusieurs formes d'intrication. Dans la plus simple, plusieurs particules de même nature réparties dans l'espace sont reliées par une unique caractéristique (leur spin ou leur polarisation, par exemple). Mais, comme dit Vijay Balasubramanian, ce type d'intrication ne suffit pas pour reconstruire l'espace-temps. D'autres formes d'intrication seraient plus pertinentes. Par exemple, on peut imaginer des intrications entre particules de natures différentes. Les chercheurs explorent aussi la complexité déroutante de l'intrication d'un grand nombre de particules.

L'ÉTOFFE DE L'ESPACE-TEMPS SERAIT TISSÉE PAR L'INTRICATION QUANTIQUE DES ÉLÉMENTS SOUS-JACENTS, QUELLE QU'EN SOIT LA NATURE

Une fois que les différents aspects de l'intrication seront mieux compris et maîtrisés, les chercheurs comprendront peut-être comment l'espace-temps émerge de ce phénomène. L'émergence est quelque chose que l'on retrouve par exemple en thermodynamique ou en météorologie, où les mouvements microscopiques des molécules de l'air donnent naissance à la pression et à d'autres grandeurs macroscopiques. « Ce sont là des phénomènes émergents », explique Netta Engelhardt. « Quand vous faites un zoom arrière sur quelque chose, vous voyez un tableau différent dont vous ne sauriez pas qu'il découle d'une dynamique à plus petite échelle. » De façon analogue, on voit l'espace-temps mais nous ne comprenons pas la dynamique quantique fondamentale à partir de laquelle il émerge.

HOLOGRAMMES COSMIQUES

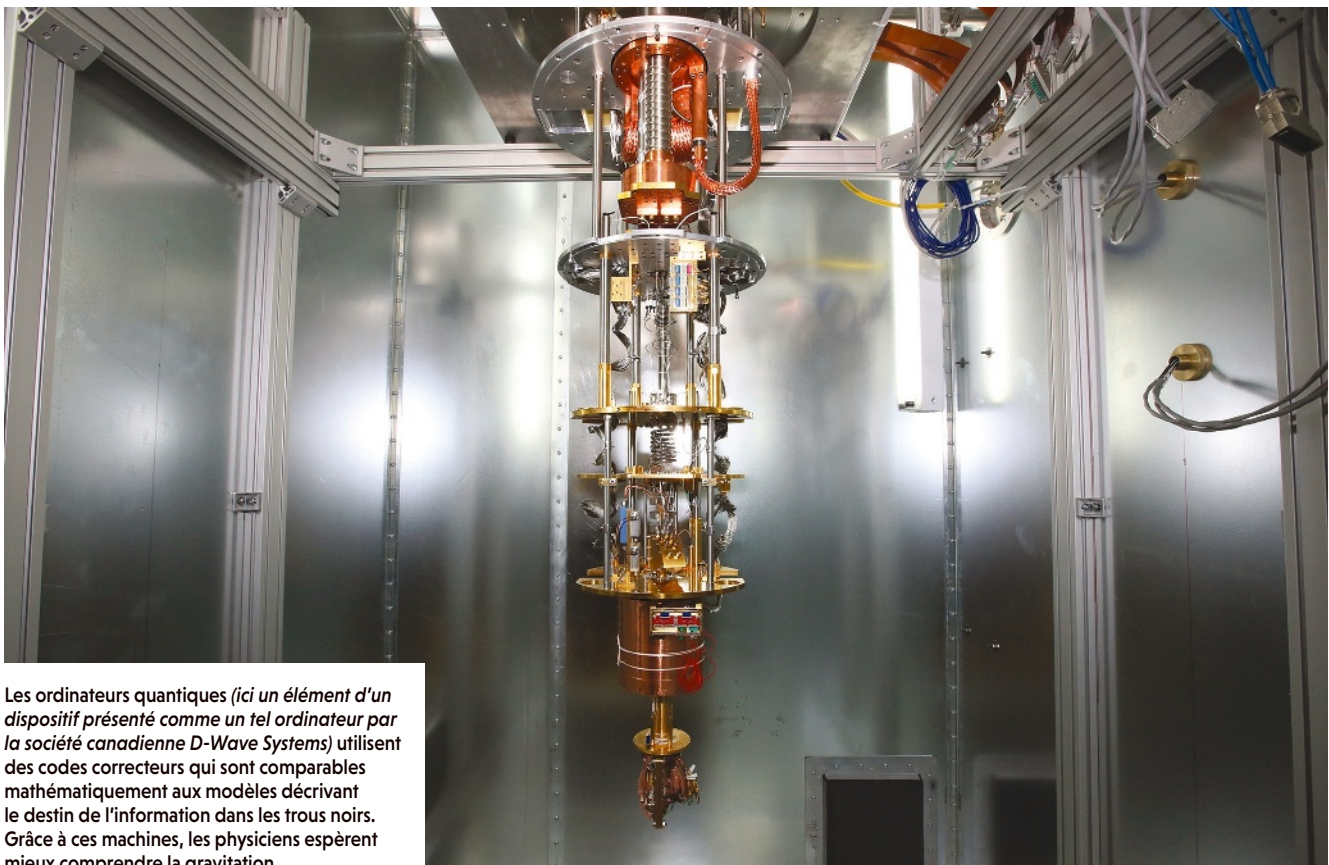
À terme, l'objectif de tous ces travaux est d'enfin parvenir à une théorie qui décrit la gravité d'un point de vue quantique. Mais les physiciens qui se sont donné cette ambition se heurtent à un mur depuis un siècle. Les participants au projet *It from Qubit* misent sur l'idée du « principe holographique » pour réussir là où leurs prédécesseurs ont échoué.

Ce principe suggère que certaines théories physiques sont équivalentes à d'autres, plus

simples, qui s'appliquent dans un univers de dimensionnalité inférieure. On retrouve cette idée avec les hologrammes : une carte postale en deux dimensions portant un hologramme de licorne peut contenir toute l'information nécessaire pour décrire et représenter la forme tridimensionnelle de la licorne. Dans cette logique, puisqu'il est si difficile de trouver une théorie satisfaisante de la gravité quantique, les physiciens tentent de trouver une théorie équivalente, plus maniable, valable dans un univers de dimensionnalité inférieure à la nôtre.

L'une des incarnations les plus réussies du principe holographique est la « correspondance AdS/CFT », sigles faisant référence à l'équivalence entre un modèle cosmologique dit « univers anti-de Sitter » (AdS) et un cas particulier de théorie quantique des champs, dite « théorie conforme des champs » (CFT pour *conformal field theory*), définie à la frontière de l'univers anti-de Sitter et dénuée de gravité.

Par cette approche, il est possible de décrire complètement un trou noir à partir de ce qui se passe à la frontière de l'Univers. Juan Maldacena a établi cette relation à la fin des années 1990, alors qu'il travaillait dans le cadre de la théorie des cordes. Dans cette dernière, les particules fondamentales, considérées jusque-là comme ponctuelles, sont remplacées par de minuscules cordes. ➤



Les ordinateurs quantiques (ici un élément d'un dispositif présenté comme un tel ordinateur par la société canadienne D-Wave Systems) utilisent des codes correcteurs qui sont comparables mathématiquement aux modèles décrivant le destin de l'information dans les trous noirs. Grâce à ces machines, les physiciens espèrent mieux comprendre la gravitation.

- L'objectif était de résoudre certains problèmes de calcul pour développer une description quantique de la gravitation.

Grâce à la correspondance AdS/CFT, les physiciens espèrent découvrir une théorie qui soit équivalente à la gravitation quantique, tout en étant beaucoup plus simple à manipuler – en laissant de côté la gravitation. «Il est très difficile d'obtenir des descriptions quantiques pour les théories avec gravitation, alors que celles sans gravitation sont beaucoup plus faciles à décrire complètement», insiste Vijay Balasubramanian.

UNE THÉORIE DE LA GRAVITATION... SANS GRAVITATION

Mais comment une théorie laissant de côté la gravité pourrait-elle être légitime en tant que théorie quantique de la gravitation ? La réponse viendrait peut-être de la nature fondamentale de la gravitation. La gravité et l'espace-temps pourraient n'être que le produit final, en trois dimensions, de l'intrication des qubits dans un espace n'ayant que deux dimensions.

Depuis une vingtaine d'années, les physiciens ont montré que la correspondance AdS/CFT fonctionne dans certaines situations, sans bien comprendre pourquoi. «Nous savons que ces deux théories sont duales [équivalentes], mais la raison pour laquelle la dualité fonctionne n'est pas claire», raconte Brian Swingle. «L'un des résultats qu'on espère [du projet IfQ] serait une théorie expliquant comment surgissent ces dualités.»

La théorie de l'information quantique pourrait aussi contribuer à ce projet grâce à un outil de cette discipline : les codes quantiques correcteurs d'erreurs. Les chercheurs en informatique quantique ont conçu ces codes pour aider à protéger l'information d'éventuelles pertes en cas d'interférences avec les intrications des qubits.

Les ordinateurs quantiques, au lieu de coder l'information avec des bits uniques, utilisent des états hautement intriqués de multiples qubits. Le système reste ainsi robuste : une erreur unique ne peut pas affecter l'exactitude d'un élément d'information donné. Mais de façon surprenante, ces codes correcteurs pourraient jouer un rôle dans la correspondance AdS/CFT.

En effet, les mathématiques impliquées dans ces codes se retrouvent aussi dans cette dernière. Il semble que l'arrangement utilisé par les chercheurs pour intriquer de multiples bits et former des réseaux exempts d'erreurs soit aussi en jeu dans, par exemple, le codage de l'information de l'intérieur du trou noir que l'on retrouve à sa surface à travers l'intrication.

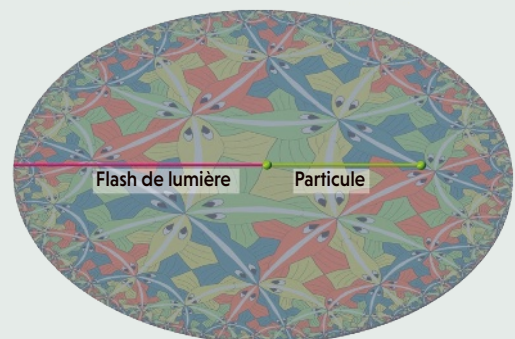
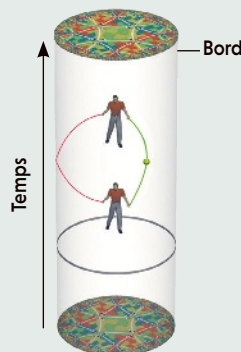
Même si les physiciens parviennent à comprendre comment fonctionne la correspondance AdS/CFT, et par là à concevoir une théorie de dimensionnalité inférieure qui se substitue à la gravité quantique, ils ne seront toutefois pas encore au bout de leurs peines. La correspondance elle-même ne fonctionne que dans une version simplifiée de l'Univers.

En particulier, toutes les lois de la gravitation qui s'appliquent à notre Univers n'interviennent pas dans le monde épuré de la correspondance. «La correspondance AdS/CFT possède une sorte de gravitation, mais ce n'est pas la théorie de la gravitation dans un univers en expansion comme celui où nous vivons», explique Brian Swingle. L'univers anti-de Sitter ne contient pas de matière, juste une constante cosmologique de valeur négative. Et, décrit d'une certaine façon, il est stable : ni en expansion ni en contraction (*voir l'encadré ci-dessous*). Si notre Univers contient aussi une constante cosmologique, elle doit être légèrement positive pour s'accorder aux observations sur l'expansion accélérée du cosmos. Néanmoins, ce modèle fournit aux physiciens un terrain de jeu théorique utile pour tester leurs idées, et appréhender plus simplement la gravitation quantique.

UN UNIVERS-JOUET À COURBURE NÉGATIVE

Un univers anti-de Sitter est un monde dont l'espace-temps est à courbure négative, ou hyperbolique. Dans le cas de deux dimensions d'espace, on peut le représenter par un disque de Poincaré (*à droite*). En y ajoutant le temps (*axe vertical, à gauche*), on obtient un cylindre plein dont chaque section est un espace hyperbolique. Cet univers possède une certaine forme de gravitation.

Une particule lancée du centre y retourne en un temps fini. Un rayon de lumière ira jusqu'au bord de l'espace avant de revenir dans le même temps. La description de cet univers est équivalente à une théorie des champs dite «conforme» définie sur l'enveloppe du cylindre. Elle comporte une dimension spatiale de moins et est dénuée de gravitation, ce qui facilite les calculs.



Si le projet IfQ repose sur des fondements irréalistes, font remarquer certains sceptiques, peut-il vraiment produire des résultats valables? «C'est une critique légitime», concède Netta Engelhardt. «Pourquoi nous concentrons-nous sur ce modèle simplifié? Tout cela dépend de la validité du modèle simplifié et de l'idée que, *in fine*, il est une version approchée, mais satisfaisante, de notre Univers. J'aimerais avoir la certitude que si nous comprenons le modèle simplifié, nous comprendrons la réalité.» Les participants du projet IfQ font le pari qu'en partant d'un tableau simplifié plus facile à manipuler, ils pourront à terme y greffer la complexité nécessaire pour appliquer la théorie au monde réel.

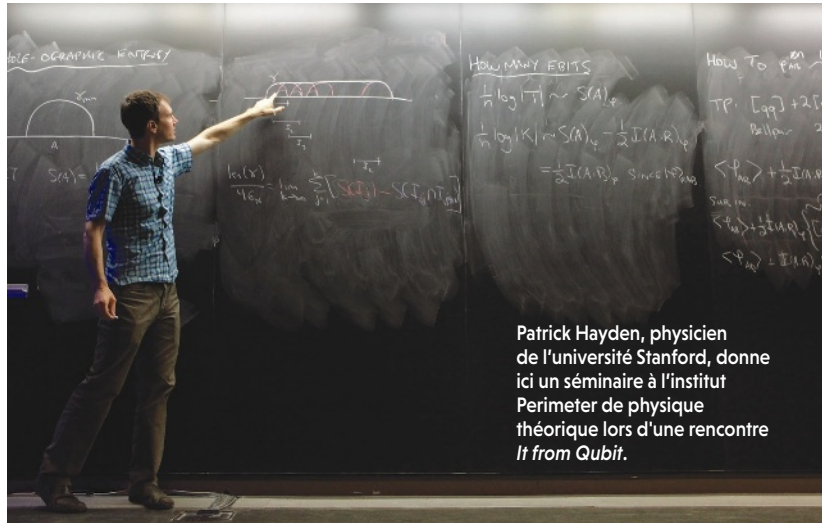
Malgré ces réserves, les physiciens affirment que l'approche vaut la peine d'être tentée. Elle a déjà ouvert de nouvelles pistes de recherche intéressantes. «Je pense depuis longtemps que la relation entre l'information quantique et la gravitation quantique est d'une importance fondamentale», confie Raphael Bousso, physicien à l'université de Californie à Berkeley. «La connexion s'est approfondie au fil des ans, et je suis ravi de voir autant de chercheurs talentueux travailler ensemble pour s'atteler à ces questions et voir où elles nous mènent.»

Théoricienne à l'université Stanford, Eva Silverstein, qui elle non plus n'est pas membre du projet, est du même avis: «Il est clairement utile de développer l'information quantique et de l'appliquer à ces problèmes. Mais pour comprendre la dynamique [de la gravitation quantique], il faut encore d'autres éléments, et il est important que la discipline ne se concentre pas trop sur une approche unique.»

UN PROJET QUI PORTERA DES FRUITS

De plus, même si le projet n'aboutit pas au développement d'une théorie quantique de la gravitation, il aura vraisemblablement des retombées fructueuses. L'application de techniques et d'idées inspirées de la théorie des cordes et de la relativité générale à des questions d'information quantique aidera, par exemple, à mieux définir les différents types d'intrication quantique, à la fois pour comprendre l'espace-temps et pour construire des ordinateurs quantiques.

«Quand vous commencez à jouer avec ces outils dans un cadre différent, il y a de bonnes chances que cela mène à de nouvelles idées qui sont intéressantes et qui pourraient être utiles dans d'autres domaines», s'enthousiasme Dorit Aharonov, spécialiste en informatique quantique à l'université hébraïque de Jérusalem et participante au projet IfQ. «Il semble que l'on soit en train de progresser sur des questions posées depuis de nombreuses années, ce



Patrick Hayden, physicien de l'université Stanford, donne ici un séminaire à l'institut Perimeter de physique théorique lors d'une rencontre *It from Qubit*.

qui est passionnant.» Par exemple, des chercheurs ont trouvé qu'il serait possible de mesurer le temps à l'intérieur d'un trou de ver en le représentant comme un circuit quantique, que l'utilisation de la théorie des cordes et de l'intrication permet de définir certaines phases de la matière condensée, etc.

En outre, combiner information quantique et théorie des cordes aiderait aussi à évaluer les théories que les chercheurs proposeront. On peut se représenter n'importe quelle théorie physique comme un ordinateur, ses entrées et ses sorties étant l'équivalent d'un état initial et d'un état ultérieur, mesurable, décrits par la théorie. Lorsque les chercheurs proposeront une théorie candidate pour la gravitation quantique, ils pourront la tester avec cette analogie et se demander quelle est la puissance de calcul de la théorie. «Si cette puissance est trop grande, si notre modèle de gravitation quantique était capable de calculer des choses dont nous pensons qu'elles ne peuvent pas être calculées dans notre monde, cette théorie susciterait un doute», explique Dorit Aharonov. «C'est un moyen de dire, par une approche différente, si la théorie tient la route ou non.»

Le projet *It from Qubit* rappelle à certains physiciens une autre époque grisante où de grandes idées voyaient le jour. «J'ai commencé ma thèse en 1984, au moment de la révolution de la première théorie des cordes», dit Hiroshi Ooguri, physicien à Caltech, l'institut de technologie de Californie. «C'était une période très enthousiasmante, où la théorie des cordes émergeait en tant que principale candidate pour une théorie unifiée de toutes les forces de la nature. Je vois d'un même œil l'actuelle explosion d'intérêt autour de ces idées. C'est clairement une époque passionnante pour les jeunes de la discipline comme pour ceux d'entre nous qui ont obtenu leur thèse de doctorat il y a plusieurs décennies.» ■

BIBLIOGRAPHIE

V. BALASUBRAMANIAN ET AL., Superluminal chaos after a quantum quench, *Journal of High Energy Physics*, art. 132, 2019.

X. DONG ET AL., Flat entanglement spectra in fixed-area states of quantum gravity, *Journal of High Energy Physics*, vol. 1910, art. 240, 2019.

J. OPPENHEIM, A post-quantum theory of classical gravity?, 2018. arxiv.org/abs/1811.03116

P. BINÉTRUY, Au-delà de la relativité générale: «une théorie quantique de la gravitation est nécessaire», *Pour la Science*, n° 457, novembre 2015.

Site internet du projet *It from Qubit*: http://bit.ly/PLS475_IfQ

Le darwinisme quantique à l'heure des tests

Le darwinisme quantique est une des pistes explorées pour expliquer le passage du monde quantique à la réalité objective classique. Trois expériences récentes soutiennent le bien-fondé de cette idée.

La physique quantique dépeint un monde étrange et contre-intuitif. De fait, il ne ressemble en rien à celui dont nous faisons l'expérience au quotidien, au moins mécaniquement parlant. Jusqu'au xx^e siècle, tout le monde pensait que les lois de la physique classique formulées par Isaac Newton et d'autres s'appliquaient à toutes les échelles. Dans ce cadre, n'importe quel objet a une position et des propriétés bien définies à tous moments. Ce n'est pas le cas.

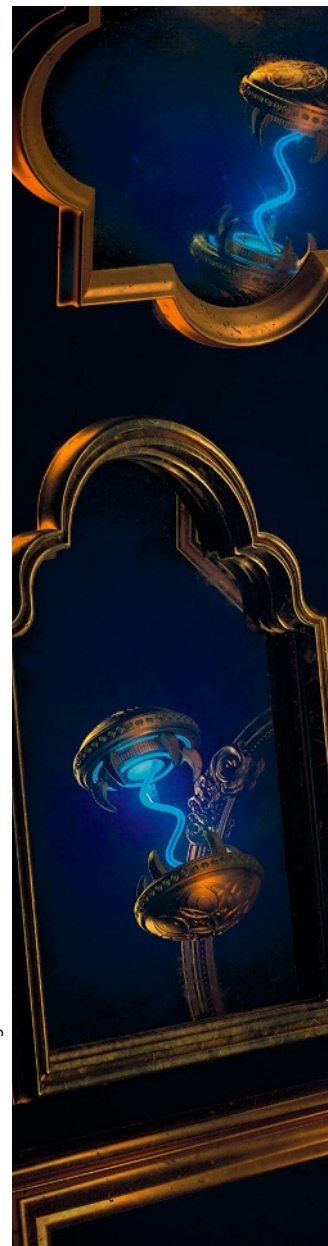
Max Planck, Albert Einstein, Niels Bohr et leurs contemporains ont découvert que, à l'échelle des atomes et des particules subatomiques, cette loi de bon sens disparaît, engloutie dans un océan de possibilités. On ne peut pas, par exemple, assigner une position définie à un atome: on peut à peine calculer la

probabilité de le trouver en tel endroit. La question devient alors: comment des probabilités du monde quantique peuvent-elles se métamorphoser en la réalité tangible du monde classique?

À propos de ce phénomène, les physiciens parlent de «transition quantique-classique». Toutefois, on découvre depuis peu qu'il n'y a pas de raison de penser que les règles changent selon les échelles, petite ou grande. En d'autres termes, aucune transition soudaine ne marque le passage entre les deux. Ces dernières décennies, des chercheurs ont mieux compris comment la mécanique quantique devient classique lorsqu'une particule, ou un autre système microscopique, interagit avec son environnement.

LA SURVIE DU PLUS APTE

Dans ce cadre, l'une des idées les plus intéressantes est que les propriétés classiques des objets (comme la position et la vitesse), résultent d'une sélection au sein d'un champ de possibilités quantiques selon un processus analogue à la sélection naturelle dans le monde vivant. Les propriétés qui survivent sont, en quelque sorte, les plus «adaptées». Ce sont elles qui génèrent ensuite le plus de copies d'elles-mêmes pour qu'en fin de compte de nombreux observateurs indépendants puissent mesurer un système quantique et se mettre d'accord sur le résultat. On retrouve alors une caractéristique du monde classique. ➤



© Olena Shmahalo/Quanta Magazine

L'ESSENTIEL

● La transition quantique-classique intrigue les physiciens depuis le début du xx^e siècle. Comment les propriétés contre-intuitives du monde quantique disparaissent-elles à l'échelle macroscopique?

● Pour l'expliquer, les physiciens Dieter Zeh et Wojciech Zurek ont développé une théorie, le darwinisme quantique.

● Elle stipule que des copies de l'état quantique d'un système sont transférées à l'environnement et que seules les plus robustes, les plus aptes, peuvent être observées.

● Ces idées ont récemment été testées par trois expériences distinctes.

L'AUTEUR



PHILIP BALL est journaliste scientifique. Il contribue régulièrement à *Quanta Magazine*, mais aussi à *Nature*, *New Scientist*...



Quanta
magazine

Cet article a d'abord été publié en anglais par *Quanta Magazine*, une publication en ligne indépendante soutenue par la Simons Foundation afin de favoriser la diffusion des sciences: <http://bit.ly/QM-QDarwin>



> 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.

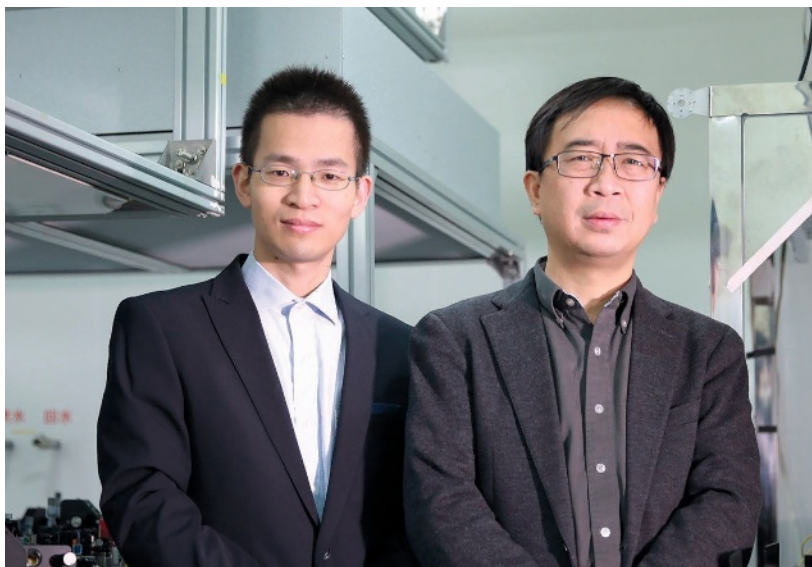
Cette idée a quitté récemment le monde théorique pour celui des tests expérimentaux. Trois groupes de recherche, travaillant indépendamment en Italie, en Chine et en Allemagne, se sont mis en quête de la signature de ce processus de sélection naturelle quantique. Ces tests sont rudimentaires, et demandent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

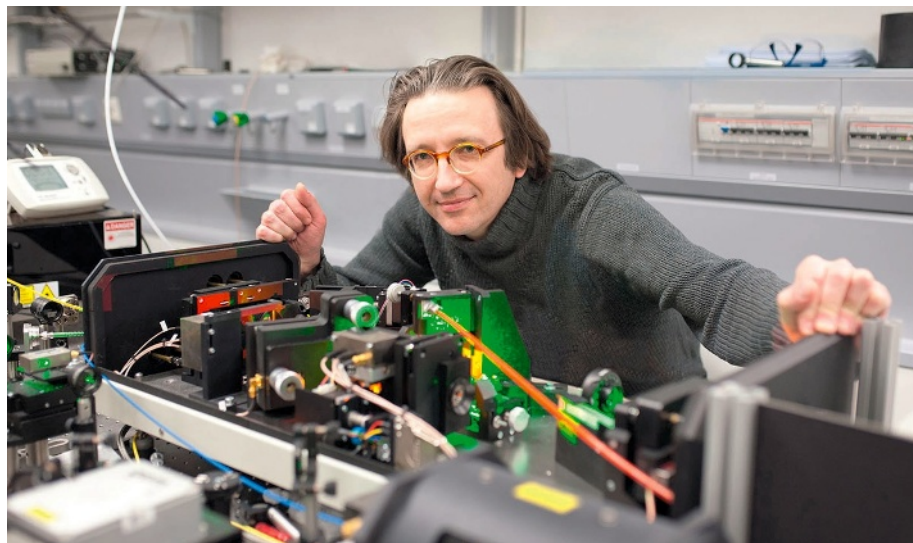
Le darwinisme quantique était-il condamné à ne rester convaincant que sur le papier? Non, en 2019, trois équipes de chercheurs ont indépendamment soumis la théorie à des tests expérimentaux en cherchant sa caractéristique clé: comment un système quantique imprime des répliques de lui-même dans son environnement.

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



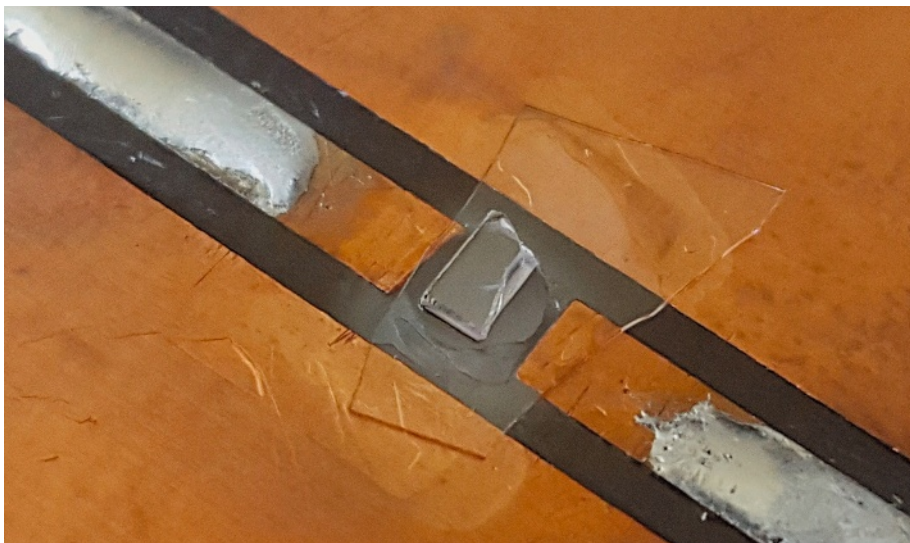
fraction de l'environnement après interaction est suffisante pour fournir un maximum d'informations classiques sur le système observé», explique Jian-Wei Pan.

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.



En moyenne, chaque spin azote-lacune est fortement associé à quatre spins de carbone ^{13}C 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.

L'ESSENTIEL

- La physique quantique est bien embarrassée par le rôle à attribuer aux observateurs.
- Plusieurs expériences de pensée poussent dans leurs retranchements les différentes théories en lice.

● Elles obligent à renoncer à certaines hypothèses *a priori* raisonnables de la physique quantique: l'universalité, la cohérence et l'unicité du résultat d'une mesure.

● Des versions expérimentales de ces raisonnements existent désormais.

L'AUTEUR



SEAN BAILLY
est journaliste au magazine
Pour la Science.

L'ami de Wigner, un paradoxe mis à l'épreuve

En physique quantique, le rôle attribué à l'observateur varie de simple figurant à acteur central selon les diverses interprétations de la théorie. Comment y voir plus clair ? Grâce à une version améliorée de l'expérience de pensée « l'ami de Wigner ».

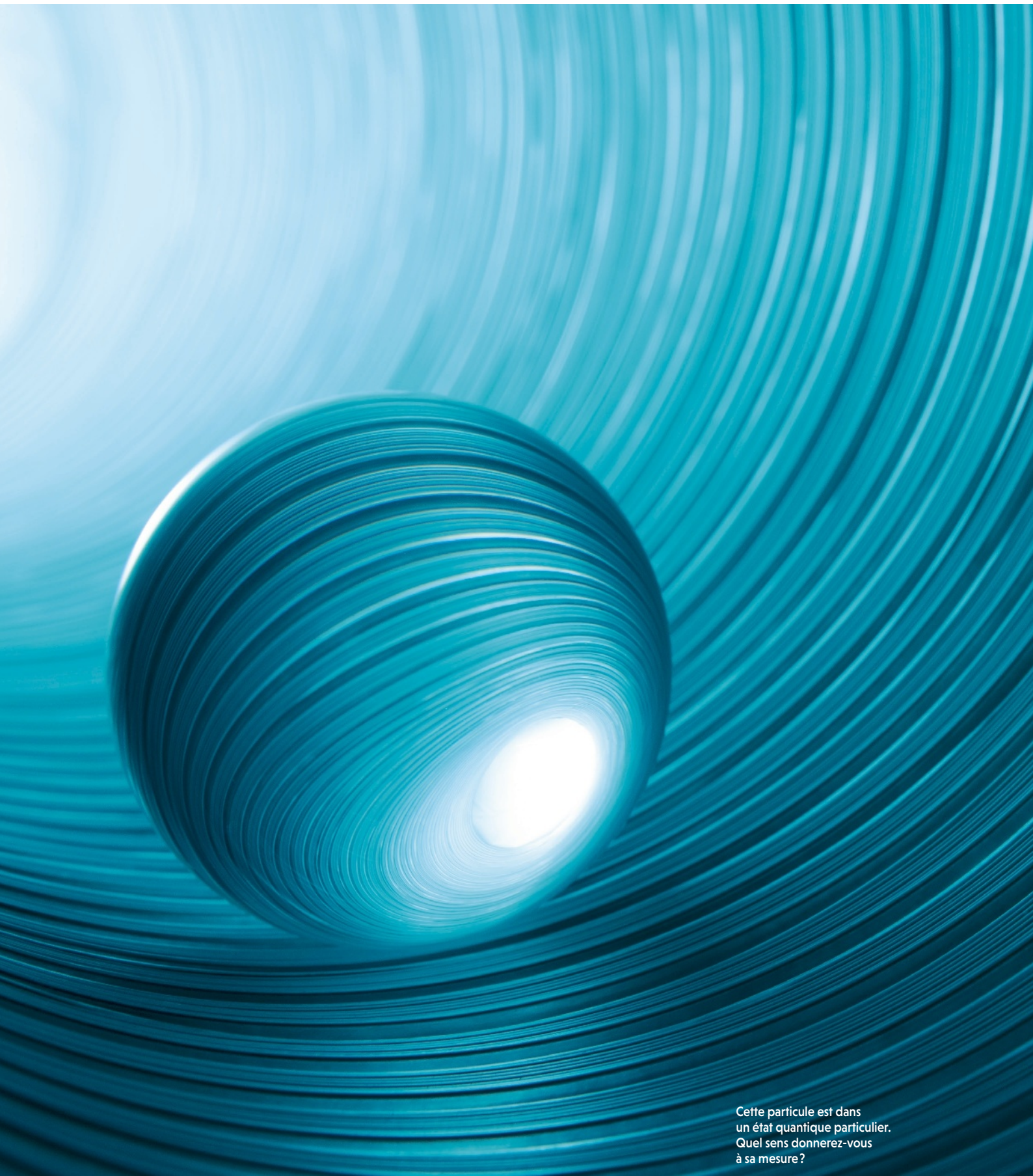
E

n 1935, Erwin Schrödinger, l'un des fondateurs de la physique quantique, imaginait sa célèbre expérience de pensée du chat dans sa boîte. Aujourd'hui, cette histoire est utilisée pour illustrer auprès du grand public certains des aspects les plus surprenants et contre-intuitifs de la physique quantique: le chat, exposé à un

dispositif mortel au déclenchement aléatoire (de nature quantique comme la désintégration d'un atome radioactif), est à la fois « vivant » et « mort » dans la boîte fermée. Mais cette expérience de pensée souligne aussi certaines des questions fondamentales de la physique quantique qui sont encore aujourd'hui sans réponses.

L'« ami de Wigner » est une sorte de version revisitée du chat de Schrödinger avec des chercheurs qui font des expériences de physique quantique dans leurs laboratoires (l'équivalent de la boîte du chat). En 2016, Daniela Frauchiger et Renato Renner, de l'école polytechnique fédérale de Zurich, ont proposé une nouvelle expérience de pensée inspirée de celle de Wigner, mais plus subtile, qui permet de sonder les fondements des diverses interprétations de la physique quantique.

Lorsque les deux physiciens ont soumis leur idée, les réactions ont été vives au sein de la communauté des chercheurs. En effet, cette ➤



Cette particule est dans
un état quantique particulier.
Quel sens donnerez-vous
à sa mesure ?

➤ expérience mettait en évidence des contradictions dans la théorie quantique. Comment devait-on comprendre ce résultat, et quelles conséquences pouvait-il avoir sur l'interprétation de la physique quantique? Bien que conçue au départ comme une expérience de pensée, une version de cette idée a été mise en œuvre en laboratoire en 2019 sous l'impulsion de Massimiliano Proietti, de l'université Heriot-Watt, à Édimbourg, et ses collègues. Comprenons-nous alors mieux? Pas sûr...

UNE THÉORIE EFFICACE

Au vu de ces questions théoriques et presque philosophiques, la physique quantique semble être incomplète, encore à construire. En effet, son statut est étrange et peut-être unique dans l'histoire des sciences. Dès sa naissance dans les années 1920, elle s'est imposée comme la théorie rendant le mieux compte des phénomènes à l'échelle microscopique. Dans les années 1940, le physicien américain Richard Feynman et d'autres ont utilisé la physique quantique pour décrire les interactions de la matière et de la lumière. En un mot, elle est une théorie testée avec une précision inégalée et jamais mise en défaut par l'expérience. Aujourd'hui encore, elle s'impose et est omniprésente dans les technologies des objets de notre quotidien: ordinateurs, téléphones, fibres optiques, etc.

Pourtant, cette théorie, si efficace, reste muette sur de nombreuses questions concernant sa nature profonde. Elle repose en effet

sur des axiomes et des définitions dont l'origine ou les justifications ne sont pas toujours très claires.

Pour avancer sur ces questions et mieux comprendre les fondements de la physique quantique, les chercheurs se sont parfois appuyés sur des expériences de pensée, notamment pour tenter d'y trouver des failles, c'est en particulier le cas d'Erwin Schrödinger et de son chat ou encore d'Albert Einstein et son paradoxe EPR (du nom de ses inventeurs en 1935: Einstein, Nathan Rosen et Boris Podolsky) sur l'intrication quantique (voir *Pas d'échappatoire pour l'intrication*, par R. Hanson, page 26).

UN FLOU QUANTIQUE

Pour comprendre l'enjeu de ces différentes expériences de pensée, il faut revenir à la question de la mesure en physique quantique et au rôle de l'observateur. Concrètement, un système quantique est décrit par un objet mathématique nommé «fonction d'onde». Souvent, on considère que celle-ci n'indique pas quel est l'état du système à un moment donné, mais permet de calculer les probabilités d'obtenir un résultat donné lors d'une mesure. Ainsi, si l'on s'intéresse à la position d'une particule, et parce que la fonction d'onde est spatialement étendue, on aura une certaine chance de trouver la particule à tel endroit ou à tel autre. Avant la mesure, la particule n'a pas de position définie, on a une sorte de «flou quantique» et seule la mesure «matérialise» cette position.

De façon plus générale, une fonction d'onde regroupe tous les états accessibles au système. Celui-ci est dit dans une «superposition d'états». Par exemple, prenons un électron dont le spin (une propriété purement quantique) peut être orienté vers le haut ou vers le bas. Alors l'électron peut être dans une superposition de l'état «haut» et de l'état «bas». Si on veut maintenant mesurer le spin de la particule, cette opération a un impact radical sur le système: la fonction d'onde «s'effondre», c'est-à-dire que l'observateur ne constate qu'un seul de ces deux états. L'électron reste dans l'état mesuré soit «haut» soit «bas».

Par rapport à notre expérience de tous les jours, le phénomène de superposition quantique est difficile à comprendre. On pourrait avoir l'impression que le fait de lancer un dé dans une boîte fermée conduirait à une superposition des états «le dé est égal à 1», «le dé est égal à 2»... Si on ouvre la boîte avec le dé, on révèle un état préexistant. Ce n'est cependant pas la même chose que la superposition quantique, car il est possible de réaliser certaines mesures (la physique quantique permet de mesurer l'intérieur de



Eugene Wigner, physicien théoricien américain d'origine hongroise, a été l'un des fondateurs de la théorie quantique. Il a reçu le prix Nobel de physique en 1963.

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

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

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. ➤

- 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

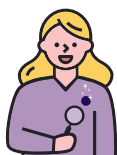
UN « PILE OU FACE » INCERTAIN

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.