

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.**

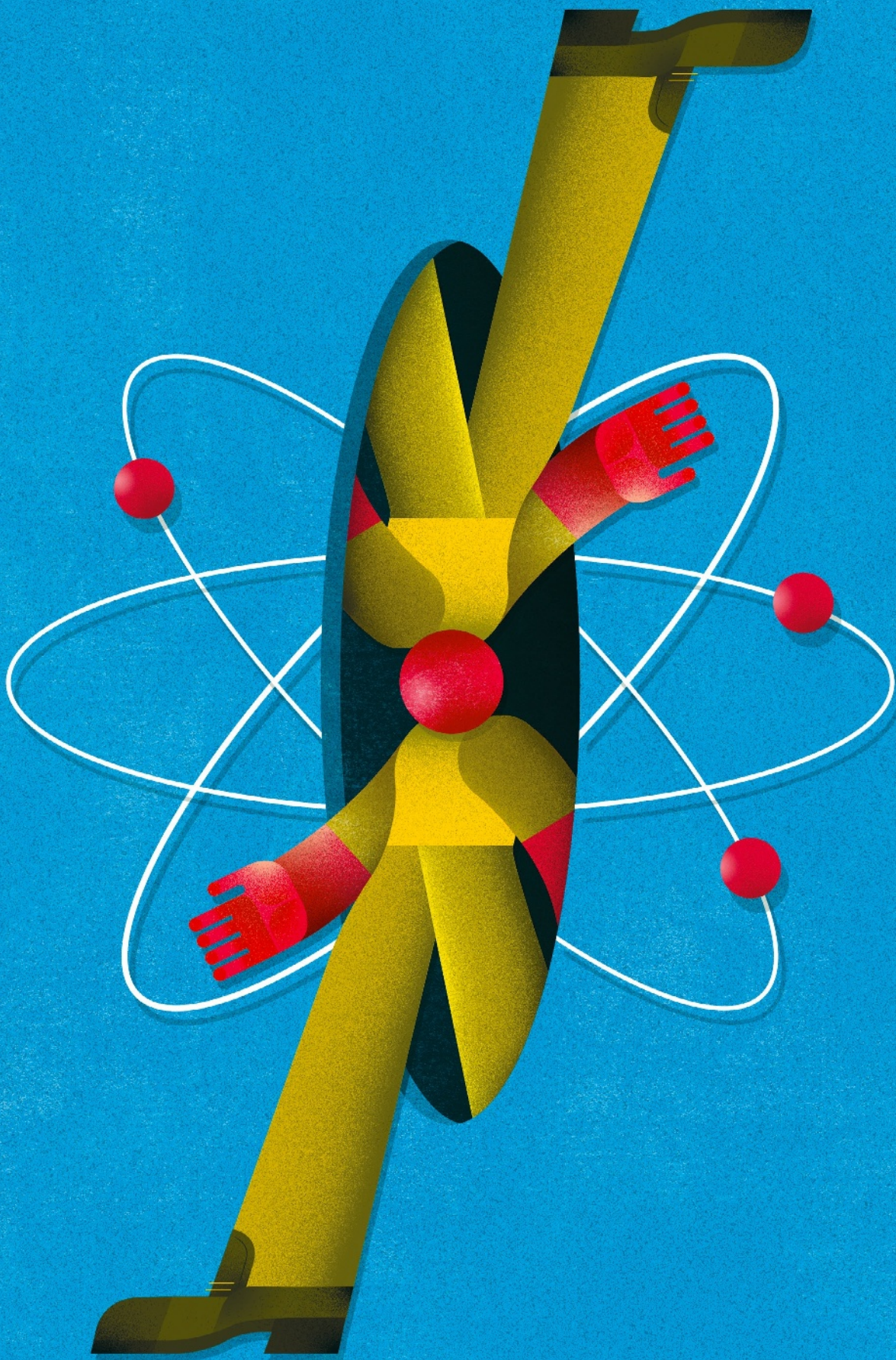
S

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?