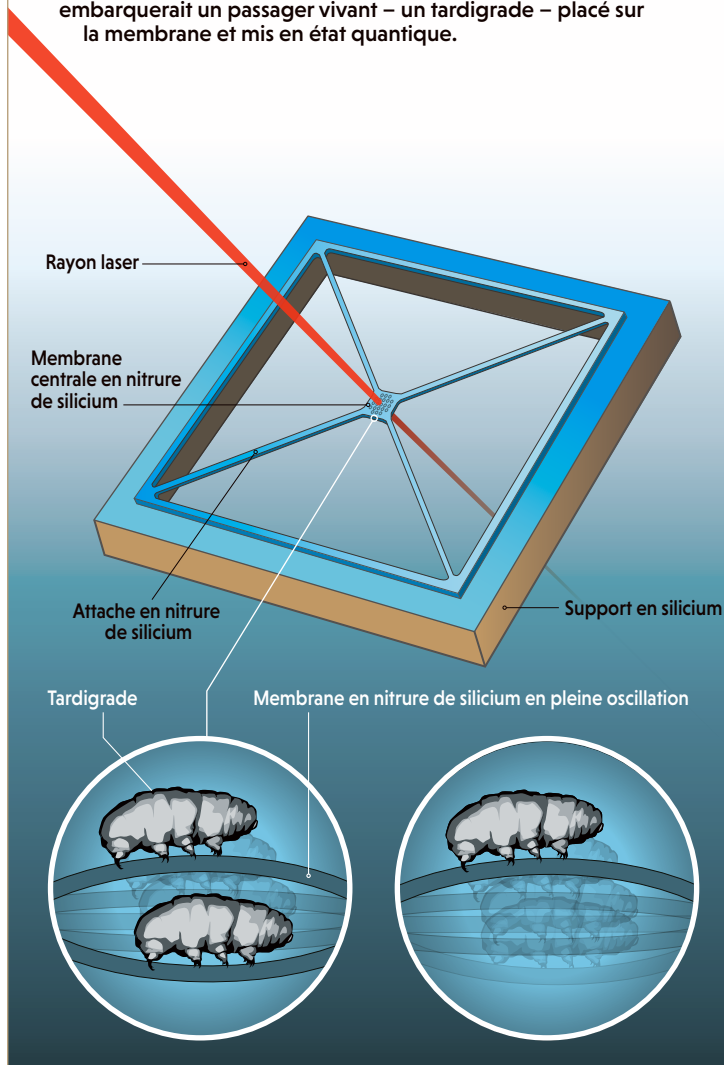


grandes» créations dont il est, avec ses collègues, l'auteur: une membrane de l'ordre du millimètre, attachée à une puce de silicium, à peine visible à l'œil nu.

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.

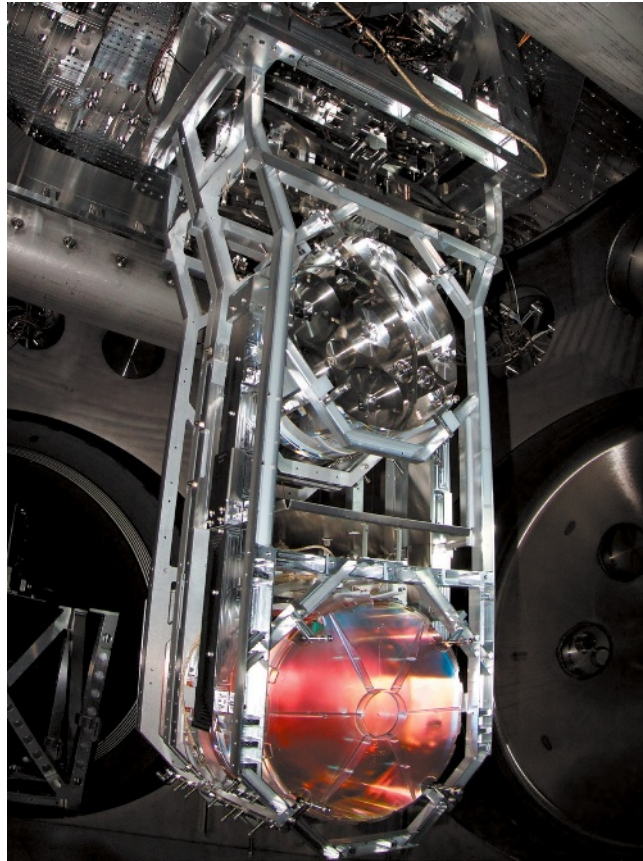
LA LOCALISATION SPONTANÉE CONTINUE

«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 macrosystèmes, 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 trilliardièmes 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 inexpliqué, 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!

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 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.» ■

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.