

Des diamants sur le canapé quantique

PHYSIQUE | Une expérience ingénieuse de mécanique quantique confirme que deux objets séparés peuvent s'influencer instantanément. Tutoyant la métaphysique, elle apporte des réponses sur la nature profonde de notre monde

DAVID LAROUSSE

La physique étonne toujours : c'est une matière où des questions quasi philosophiques peuvent être tranchées par des expériences. C'est le cas avec le dernier résultat en date concernant la mécanique quantique, cette science du microscopique qui s'est véritablement développée dans les années 1920 et à qui l'on doit, entre autres, les lasers, les transistors, les éclairages LED...

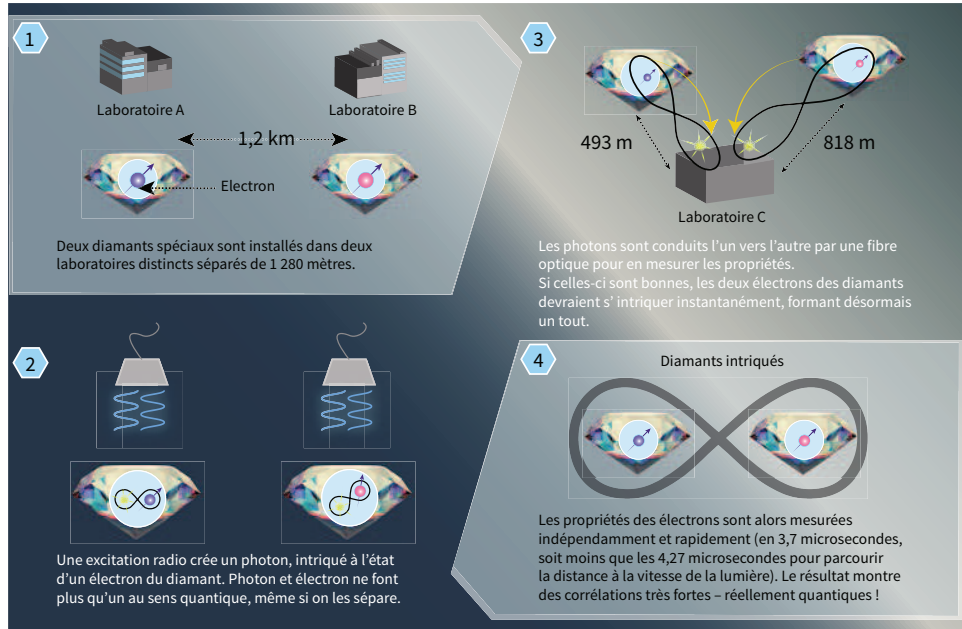
Une équipe néerlandaise de l'université de technologie de Delft, associée à des Britanniques et des Espagnols, a mis en ligne le 24 août, sur le site dédié Arxiv.org, un article confirmant une bizarrerie quantique qui avait perturbé en son temps jusqu'à Albert Einstein : deux objets géographiquement séparés constituent une seule entité au point qu'ils peuvent s'influencer de façon littéralement instantanée – plus vite même que la lumière. De quoi bouleverser la notion de réalité, au sens philosophique ou physique. Le processus de relecture en cours interdit aux auteurs de l'étude tout commentaire sur leur travail.

« Il est important d'attendre le verdict des spécialistes qui vont relire l'article avant sa publication, mais, à titre personnel, je trouve cette expérience magnifique », estime Alain Aspect, directeur de recherche émérite au CNRS et professeur à l'Institut d'optique et à l'École polytechnique. En 1982, ce physicien avait été le premier à observer ce phénomène dit de « non-localité ».

La mécanique quantique n'est pas avare en étrangetés. Ainsi, il est impossible de savoir simultanément où se trouve une particule et à quelle vitesse elle se déplace. Seul est calculable le nuage de probabilités qui entoure chaque particule. Autre conséquence, un objet peut être dans deux états à la fois. Symboliquement,

Une application en cryptographie : grâce à des paires de photons intriqués, des clés de chiffrement sont transmises sans possibilité d'écoute

un chat peut être mort ET vivant. Une autre étrangeté a été soulevée par Einstein dans les années 1930 : l'intrication quantique. C'est la capacité qu'ont deux objets à se comporter comme un tout malgré leur séparation spatiale. Toucher à l'un précipite l'autre immédiatement dans un état bien précis, dissipant le nuage de probabilités. Einstein voyait là une limite à nos connaissances et pensait que des principes sous-jacents devaient expliquer ces corrélations ahurissantes.



En 1964, John Bell, un théoricien, sortit le débat des limbes métaphysiques en proposant une manière de tester les relations énigmatiques entre particules éloignées. Il calcule que les corrélations seront plus fortes dans le cas purement quantique que dans un cas classique.

Après de premières tentatives aux États-Unis dans les années 1970, Alain Aspect parvient au début des années 1980 à Orsay à faire le premier test considéré comme vraiment déterminant. En mesurant indépendamment l'état de deux photons intriqués, il trouve qu'ils sont corrélés au-delà du seuil défini par Bell distinguant théorie quantique et classique. « *Auparavant, le sujet était quasi sulfureux et peu connu des physiciens. Ces expériences ont popularisé le sujet, en lui donnant une vraie légitimité scientifique, et en ouvrant de nouveaux champs de recherche.* », estime Philippe Grangier, directeur de recherche CNRS à l'Institut d'optique, qui a travaillé dans les années 1980 avec Alain Aspect sur ces questions.

Cependant, d'irréductibles physiciens ont souligné qu'il existe deux échappatoires pour sauver d'éventuelles théories non quantiques. D'abord, ces expériences, certes stupéfiantes, ne détectent pas tous les photons intriqués. L'échantillon mesuré pourrait alors ne pas être représentatif de ce qu'est vraiment la Nature.

Ensuite, à cause de la lenteur des mesures, de l'information aurait le temps de passer entre

les deux jumeaux de la paire, faisant prendre pour quantique ce qui serait en fait classique. L'expérience d'Aspect en 1982 a été la première à éloigner tellement les deux jumeaux qu'aucun message ne pouvait être transmis entre les deux avant que leur état ne soit mesuré. Mais l'efficacité restait faible. D'autres expériences ont atteint une efficacité de quasiment 100 % mais avec des jumeaux trop proches l'un de l'autre.

L'expérience de Delft est donc la première à colmater simultanément ces deux brèches. « *C'est le couronnement d'une ligne de recherche impulsée dans les années 1970, salue Alexei Grinbaum, du Laboratoire de recherche sur les sciences de la matière au Commissariat à l'énergie atomique. Ce n'est pas une nouvelle découverte mais une preuve expérimentale importante.* » « *Cela clôt un sujet en respectant enfin toutes les hypothèses du théorème de Bell, et cela en ouvre un autre.* », ajoute Philippe Grangier.

En effet, avant même d'être certains que toutes les échappatoires soient fermées, des physiciens ont utilisé l'intrication quantique pour diverses applications, dont la cryptographie. Grâce à des paires de photons intriqués, des clés de chiffrement sont transmises sans possibilité d'écoute. Si un intrus voulait espionner, il perturberait l'un des éléments de la paire, ce qui immédiatement se verrait sur l'autre, et la clé serait rejetée. Mais les échappatoires empê-

chaient de garantir la sécurité complète. La technique néerlandaise le fait. « *Cela devrait plaire aux banquiers.* », sourit Alexei Grinbaum. Reste tout de même à améliorer le dispositif qui ne fournit qu'environ une paire intriquée par heure sur moins de 2 kilomètres.

Comment ces physiciens ont-ils réussi ? Les jumeaux de la paire sont deux diamants séparés de 1,3 kilomètre. Plus précisément, chacun des jumeaux est un électron libre à l'intérieur de ces diamants. On commence par intriquer, dans chaque diamant, l'électron avec un photon créé en excitant le diamant par des micro-ondes. Ces photons rouges se rejoignent via une fibre optique en un autre point éloigné d'au moins 800 mètres. Là, ils sont mesurés simultanément, ce qui a pour effet d'intriquer les deux électrons, pourtant éloignés de plus de 1 kilomètre. Ne reste plus qu'à tester les corrélations sur ces particules et constater qu'elles sont 20 % supérieures à ce que prévoient des théories classiques.

Pour les éternels sceptiques, il reste néanmoins une échappatoire : le super-déterminisme. Pour ce dernier, tout est en quelque sorte déterminé par ce qui s'est passé au moment du Big Bang. Même les choix aléatoires de l'expérience ne sont pas dus au hasard. L'effet instantané à distance est donc une illusion. Mais pour beaucoup, dont Alain Aspect, « *ce n'est plus de la science !* ». ■

La résilience des microtubules, squelettes de nos cellules

La capacité d'autoréparation révèle des propriétés surprenantes liées au fonctionnement de ces éléments

L'autoguérison. On en rêve, la nature le fait : les microtubules, constituants majeurs du squelette de nos cellules, ont la capacité de se réparer toutes seules. C'est ce que montre une étude publiée dans la revue *Nature Materials*, en date du 7 septembre.

Les microtubules sont des tubes creux extrêmement rigides qui s'allongent ou se raccourcissent selon les besoins. Formant une véritable autoroute, ils guident le transport des protéines du centre à la périphérie de la cellule et régulent de nombreux processus importants tels que la division cellulaire ou l'activité des neurones.

Malgré ce rôle majeur joué par des microtubules, il reste beaucoup à découvrir sur les mécanismes contrôlant leur dynamique et leurs propriétés mécaniques.

Une équipe de l'Institut de recherches en technologies et

sciences pour le vivant du CEA, du CNRS et de l'université Grenoble-Alpes, codirigée par Manuel Théry et Laurent Blanchoin, a mis au point un dispositif permettant de révéler des caractéristiques étonnantes. Pour ce faire, les chercheurs ont travaillé sur des microtubules reconstitués in vitro. « *La beauté de l'étude, c'est d'avoir réussi à étudier des objets cellulaires tout petits qu'on ne peut pas manipuler habituellement.* », s'enthousiasme Manuel Théry.

Mis en solution dans un liquide intracellulaire artificiel, les microtubules ont été soumis à des contraintes de flux très faibles : en jouant sur la pression du liquide au sein du dispositif, les chercheurs ont étudié leur dynamique tout en contrôlant leur position et leur orientation. Sous ces contraintes, les microtubules se pliaient doucement. Les chercheurs ont ensuite répété ces

cycles de flux six fois de suite. Les microtubules ramollissaient de plus en plus sans pour autant se briser. Comment des structures réputées si rigides ne rompent-elles pas, comme le chêne de la fable ? La réponse réside dans un défaut « naturel » de fabrication des microtubules, qui a été identifié de longue date en microscopie électronique.

Points de faiblesse

Les microtubules sont faits de l'assemblage de dimères, deux molécules de tubuline associées. Mais le réseau ainsi constitué comporte des brèches, qui se créent dans la structure par des manques ponctuels de dimères. Ces zones sont autant de points de faiblesse lorsqu'une contrainte mécanique est exercée : le filament de tubuline se déforme à cet endroit et le microtubule plie. Le défaut s'élargit par la perte de

molécules, ce qui aggrave le dommage. Ce phénomène réduit progressivement la rigidité du tube. Pour confirmer ce résultat, un microtubule fabriqué sans défaut a aussi été soumis aux microflux : aucun assouplissement n'a alors été observé.

Un second test, consistant à faire une pause entre chaque cycle d'application de microflux, a montré que les microtubules retrouvaient leur raideur initiale. « *Les microtubules assouplis peuvent s'autoréparer, une vraie magie.* », s'émerveille Manuel Théry. Pour comprendre ce mécanisme, l'équipe a utilisé de la tubuline fluorescente de deux couleurs : la rouge constituait les microtubules, et la verte était libre dans le liquide extracellulaire.

Les chercheurs ont appliqué des cycles de microflux aux microtubules rouges avant que ces dernières ne retrouvent leur raideur

initiale. Résultat : dans leurs zones de faiblesse, de la tubuline rouge avait disparu et de la tubuline verte avait comblé le dommage. « *La nature n'est pas parfaite et développe des mécanismes pour compenser.* », souligne Manuel Théry. Le défaut de fabrication initial confère alors une qualité supplémentaire. »

« *Cette expérience est jolie et "fun", mais elle ne précise cependant pas s'il s'agit d'une vraie restauration ou simplement d'une réparation de fortune.* », commente Marie-France Carlier, chercheuse au CNRS, à Gif-sur-Yvette. Cette découverte vient compléter les connaissances actuelles sur l'élongation de la tubuline. En complément du phénomène déjà observé aux extrémités, cette étude prouve qu'une polymérisation est également possible le long du filament.

Cette capacité unique d'autoréparation pourrait inspirer le sec-

teur de l'ingénierie pour la construction de nouveaux matériaux. « *L'expérience est intéressante, car elle précise les propriétés mécaniques des microtubules*, remarque Marie-France Carlier. *Mais il me semble peu probable que des microtubules individuels soient soumis dans leur environnement cellulaire à de tels stress répétés, étant donné leur durée de vie et leur dynamique.* »

Poursuivre les travaux permettra donc d'affiner la compréhension de leur fonctionnement. « *In vivo, les microtubules évoluent au contact de nombreuses protéines associées qui n'étaient pas présentes dans notre milieu d'étude et qui pourraient jouer un rôle*, convient Manuel Théry. *Nous devons maintenant nous rapprocher du milieu cellulaire pour mieux comprendre cette régénération.* » ■

ÉLISE MAGNIN