Une incroyable illusion de réalité

On ne peut pas connaître la position d'un photon avant qu'un appareil de mesure ne l'observe. Et pour une bonne raison : cette position n'existe tout simplement pas.

Anton Zeilinger et **Markus Aspelmeyer** sont membres de l'Institut d'optique et d'information quantiques, à Vienne.
anton.zeilinger@univie.ac.at
markus.aspelmeyer@oeaw.ac.at

Texte traduit et adapté par Franck Daninos, journaliste à *La Recherche*.

« La Lune est-elle toujours là lorsque personne ne la regarde ? » Cette réflexion philosophique que les physiciens se sont appropriée est débattue depuis des siècles. Elle pose la question de savoir si nos observations révèlent quoi que ce soit sur un « monde réel » qui existerait indépendamment de nos observations et, si oui, de quoi pourrait-il s'agir. Côté scientifique, ce débat a culminé dans les années 1930 avec la controverse opposant Albert Einstein et Niels Bohr. Attaché au principe de réalisme, Einstein pensait que la physique décrivait la nature telle qu'elle est. Bohr, pour sa part, contestait la possibilité d'une physique décrivant une réalité totalement indépendante de notre activité d'exploration.

À l'époque, la controverse était théorique. Question de point de vue... Impossible de trancher, faute de pouvoir expérimenter. Mais, aujourd'hui, les choses ont changé. On peut apporter des éléments de réponse reposant sur des faits concrets, grâce à des expériences qui sondent les plus profondes implications de la mécanique quantique.

Voilà campé le paysage. La théorie quantique, on le sait, décrit avec une précision inégalée le comportement des particules subatomiques, ainsi que de nombreux phénomènes sensibles à l'échelle macroscopique. Aucune expérience n'est jamais parvenue à la mettre en défaut. Mais le monde quantique a ceci de particulier de ne livrer à l'observateur aucune information sur le « monde réel » avant qu'une mesure expérimentale ne soit effectuée.

L'exemple d'un photon émis vers un miroir semi-réfléchissant est bien connu des spécialistes. En moyenne, une fois sur deux, la particule est soit réfléchie, soit transmise dans la direction du photon incident. Pour savoir ce qu'il est advenu d'elle, on utilise deux détecteurs placés derrière le miroir : l'un dans le sens de la transmission et l'autre à 90°, dans celui de la réflexion.

Chemins indiscernables. En répétant l'expérience un grand nombre de fois, on constate que la moitié des photons a bien été enregistrée par le premier détecteur et l'autre par le second – comme le prévoient les équations de la mécanique quantique. Mais, en dépit de ce résultat final, la mécanique quantique est incapable de décrire le comportement d'une particule individuelle. Elle ne peut qu'évaluer la probabilité de l'observer dans l'un ou l'autre des détecteurs. Et elle ne donne aucune information sur le chemin que cette particule emprunte jusqu'aux appareils de mesure.

On vérifie cette impossibilité à l'aide de réflecteurs de lumière : ils font se rejoindre les deux chemins possibles vers un second miroir semi-réfléchissant, derrière lequel les détecteurs de photons sont maintenant placés (schéma, ci-contre). Si la particule suivait un chemin déterminé après avoir franchi le premier miroir, elle parviendrait au second de façon, elle aussi, précisément définie. Ce qui reviendrait à reproduire les conditions de l'expérience comprenant un seul miroir semi-réfléchissant et, du coup, sa conclusion : la moitié des particules doit être transmise et l'autre réfléchie.

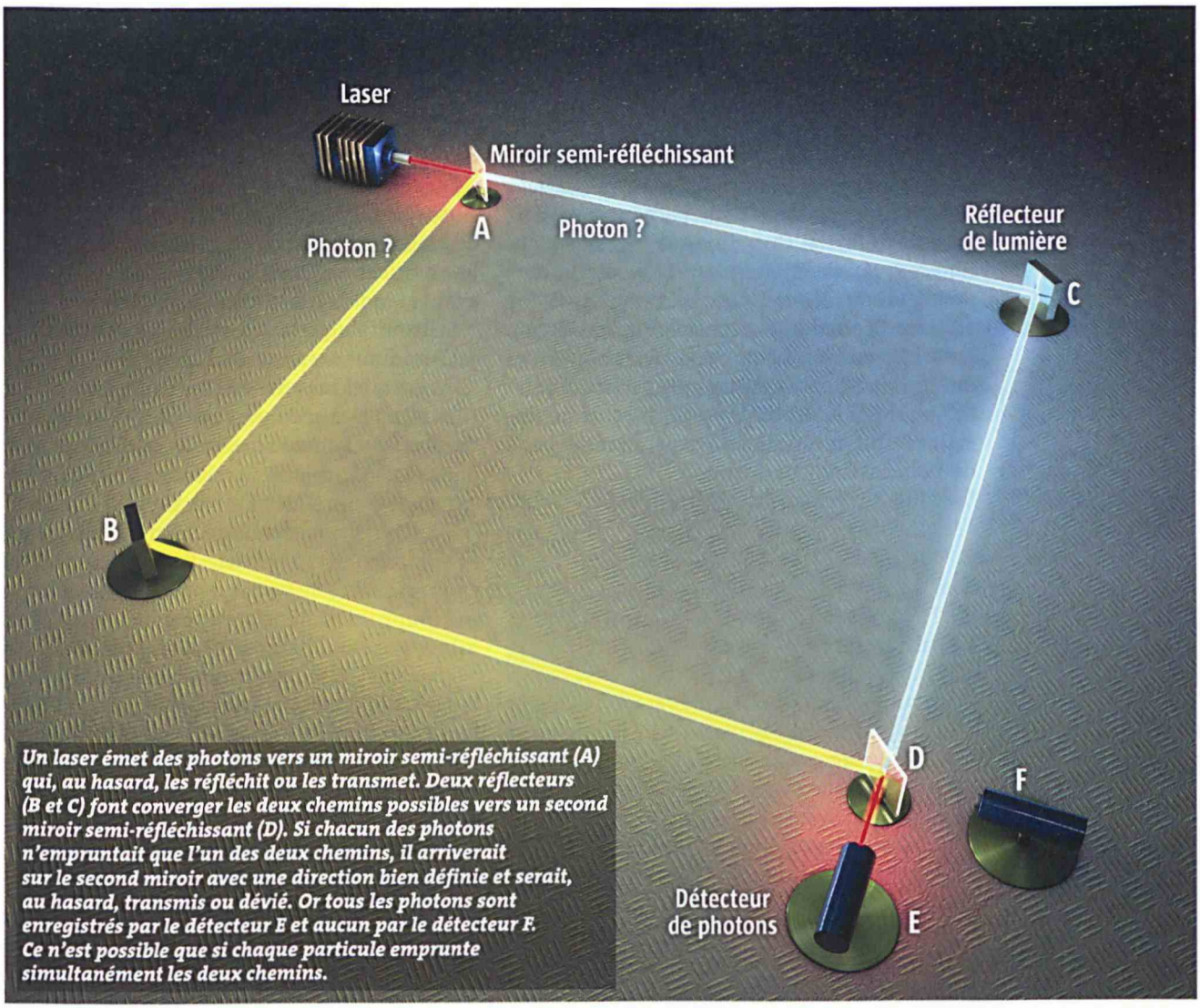
Or toutes les particules sont observées dans le même détecteur ! Ce résultat est incompatible avec le fait que les particules possèdent une position bien définie entre les deux miroirs. Et

L'essentiel

> EN MÉCANIQUE QUANTIQUE, on ne peut faire des prévisions qu'avec des probabilités : on n'a pas de certitude sur la position ou la vitesse d'un photon tant qu'on ne l'a pas détecté.

> LES PROPRIÉTÉS D'UNE PARTICULE, en outre, peuvent dépendre de la mesure réalisée sur une autre située à très grande distance.

> PLUSIEURS EXPÉRIENCES ont démontré que la mécanique quantique n'est pas réaliste : les propriétés des particules n'existent pas indépendamment des observations.



Un laser émet des photons vers un miroir semi-réfléchissant (A) qui, au hasard, les réfléchit ou les transmet. Deux réflecteurs (B et C) font converger les deux chemins possibles vers un second miroir semi-réfléchissant (D). Si chacun des photons n'empruntait que l'un des deux chemins, il arriverait sur le second miroir avec une direction bien définie et serait, au hasard, transmis ou dévié. Or tous les photons sont enregistrés par le détecteur E et aucun par le détecteur F. Ce n'est possible que si chaque particule emprunte simultanément les deux chemins.

WWW.GREGCIRADE.COM

il contredit notre conception traditionnelle de la réalité physique : tout se passe comme si les deux chemins étaient, au même moment, aussi « réels » l'un que l'autre. Il est donc vain, du point de vue de la mécanique quantique, d'évoquer l'un ou l'autre chemin pris par la particule avant qu'elle ne soit détectée : ils sont, à proprement parler, « indiscernables ».

Particules et ondes. On peut interpréter ce résultat à l'aide d'un postulat fondateur de la mécanique quantique, la dualité : chaque particule est aussi une onde. La présence du second miroir a pour effet de faire interférer les ondes correspondant aux deux chemins possibles : elle les recombine en une seule, un peu comme lorsque deux vagues se croisent pour n'en former plus qu'une. Pour les physiciens, il y a dilemme : apparemment, la mécanique quantique ne fournit pas une description complète des propriétés possibles d'un système physique, comme sa position dans l'espace. Existe-t-il un moyen de dépasser cette contradiction ? On pourrait supposer les lois de la nature plus complexes. Et imaginer, par exemple, qu'elles permettent à une particule de « mémoriser » le chemin emprunté après avoir franchi un miroir semi-réfléchissant ; puis d'utiliser cette information de manière à satisfaire pleinement aux prédictions de la mécanique quantique. Dès lors, on pourrait envisager de construire une théorie contenant un type de « variables cachées », en accord avec l'expérience, fournissant une description complète de la réalité.

Dans les années 1960, le physicien irlandais John Bell s'y est essayé. Il a voulu tester l'hypothèse de l'existence des « variables cachées », en étudiant un système composé de deux particules « intriquées ». Ce terme avait été introduit une trentaine d'années auparavant par Erwin Schrödinger, l'un des fondateurs de la mécanique quantique, pour qualifier une paire de particules, distantes l'une de l'autre, mais ayant interagi à un moment ›››

>>> donné et dont l'état est décrit de façon plus complète par leurs propriétés conjointes (dites « intriquées », ou encore « corrélées ») que par leurs simples propriétés individuelles.

Polarisation. De telles particules intriquées peuvent être produites en éclairant un cristal non linéaire* avec un laser. Deux photons sont alors émis par ce cristal. On vérifie que leur état quantique est corrélé en mesurant leur polarisation, propriété intrinsèque de l'onde électromagnétique associée. Ces ondes sont constituées d'un champ électrique, qui lui-même est caractérisé par une direction (horizontale ou verticale, par exemple, en référence à la direction de propagation de l'onde), et une forme particulière. C'est pourquoi on parle de polarisation* de forme « rectiligne », « circulaire » ou « ellipsoïdale ».

Einstein n'a jamais accepté l'idée d'une « action fantôme à distance »

Pour la mécanique quantique, la polarisation de deux particules intriquées est rigoureusement la même. Cette polarisation reste indéterminée avant d'être observée par un appareil de mesure (comme un « polariseur », qui ne laisse passer que les photons présentant un certain type de polarisation). Elle a ainsi autant de chances d'être soit horizontale, soit verticale.

Mais, toujours du point de vue des physiciens quantiques, une mesure réalisée sur l'une des deux particules détermine instantanément les propriétés de la seconde. Si la première indique une polarisation horizontale, par exemple, l'autre pointera aussitôt dans la même direction, et ce, quelle que soit la distance qui sépare les deux particules ! Einstein ne s'est jamais fait à cette idée. Il en parlait comme une « action fantôme à distance ». Preuve, à ses yeux, que la mécanique quantique restait à parfaire.

Revenons aux expériences de Bell. Le physicien porte un premier coup de canif aux objections d'Einstein, en calculant que, si des particules intriquées existent réellement, la théorie qui les décrit ne peut satisfaire aux approches à la fois « locales » et « réalistes » de la physique – telles que les postule, précisément, une théorie à variable cachée. Rappelons que, selon l'hypothèse de localité, les propriétés de la première particule ne dépendent en aucun cas d'une modification survenue sur la seconde. Et que, sous l'hypothèse de réalisme, l'issue d'une mesure effectuée sur une particule reflète les propriétés qu'elle portait avant et indépendamment de sa détection.

Bell constate que la prise en compte des variables cachées diminue fortement l'intensité des corrélations entre les mesures effectuées sur deux particules intriquées – cela, pour nombre d'états de polarisation. Pour la mécanique quantique, en revanche, ces corrélations sont très fortes. De son théorème découle des inégalités mathématiques, dites de « Bell », où les termes principaux représentent la somme algébrique des mesures de corrélation. Leur violation confirmerait ainsi les prédictions de la mécanique quantique, et partant, l'existence de particules intriquées.

Les travaux de Bell ont ouvert la voie à un vaste programme de recherche, qui, au regard des enjeux scientifiques et philosophiques, a été qualifié par le physicien américain Abner Shimony de « métaphysique expérimentale ». Le premier test des inégalités de Bell a été effectué en 1972 par Stuart Freedman et John Clauser, de l'université de Californie. Il a confirmé les prédictions de la mécanique quantique. Des années plus tard, d'autres expériences, plus sophistiquées et effectuées dans les groupes d'Alain Aspect, à l'université de Paris-Sud, et de l'un d'entre nous (A. Zeilinger), à l'aide de photons intriqués distants de plusieurs mètres, ont encore confirmé ce résultat, en lui donnant un fort retentissement [1].

Un nouveau pas a été franchi en 1989. En collaboration avec l'un d'entre nous (A. Z.), les physiciens

*UN CRISTAL NON LINÉAIRE, tel que le niobate de lithium, est un milieu transparent où les charges électriques ne sont pas disposées de manière symétrique.

*LA POLARISATION d'une onde électromagnétique correspond à une orientation particulière du champ électrique associé.

[1] A. Zeilinger *et al.*, *Nature, 433,* 230, 2005.
[2] D. Greenberger *et al.*, *Amer. J. Phys., 58,* 1131, 1990.
[3] A. Leggett, *Foundations of Physics, 33,* 1469, 2003.
[4] S. Gröblacher *et al.*, *Nature, 446,* 871, 2007.

Les promesses de l'information quantique

Le petit nombre d'expérimentateurs qui, dans les années 1970 et 1980, se sont penchés sur le problème de l'interprétation de la mécanique quantique étaient motivés par la curiosité et la recherche fondamentale. La plus pure, pensaient-ils alors. Mais leurs résultats ont vite suscité l'intérêt d'autres physiciens, d'informaticiens et de mathématiciens, qui ont compris l'intérêt que pourraient avoir les propriétés quantiques dans le codage, la transmission et le traitement de l'information. Deux champs d'applications ont émergé de leurs travaux : la cryptographie et le calcul quantiques. Le premier tire profit des phénomènes de « superposition » et d'« intrication », pour coder et transmettre des données, en théorie de façon inviolable. Des applications ont déjà vu le jour. Le second domaine, plus prospectif, repose sur les mêmes phénomènes. L'idée est d'utiliser un grand nombre de particules intriquées afin de calculer plus vite et de résoudre des problèmes hors de portée des ordinateurs traditionnels.

américains Daniel Greenberger et Michael Horne ont calculé qu'un système formé d'au moins trois particules intriquées constituerait un modèle encore plus efficace pour éprouver le caractère fondamental de la mécanique quantique. Les corrélations à l'œuvre dans un tel système sont en effet beaucoup plus fortes que celles qui s'exercent sur deux particules intriquées. Au point qu'une seule mesure permettrait de réfuter les assertions locales et réalistes, alors qu'un traitement statistique concernant un grand nombre de mesures reste nécessaire pour vérifier les inégalités de Bell.

Les trois physiciens se sont penchés sur le cas théorique où l'une des trois particules possède une polarisation rectiligne et la deuxième, une polarisation circulaire. La mécanique quantique prédit alors l'état de la troisième : une polarisation rectiligne et horizontale. Dans le cadre des hypothèses locale et réaliste, en revanche, cette polarisation doit nécessairement être rectiligne et verticale. Là encore, les expériences menées dans les années 1990 sur trois photons intriqués ont donné raison à la mécanique quantique, contre les théories à variables cachées [2].

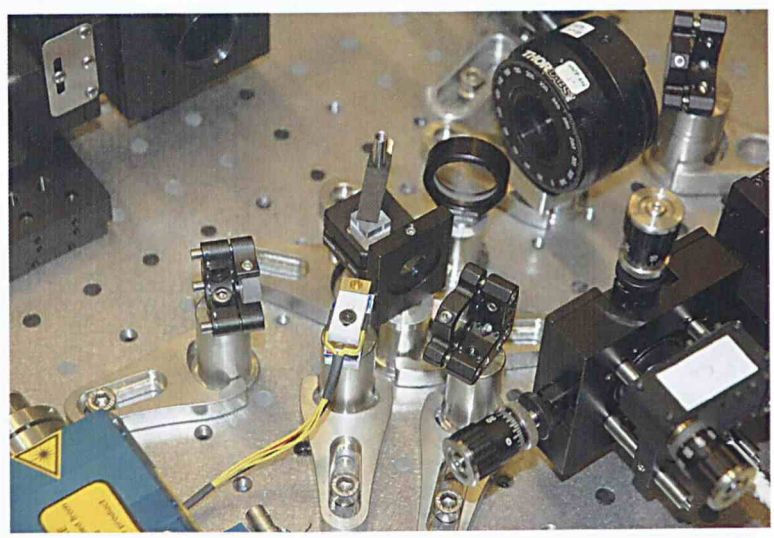
Sacrifier la localité. Mais l'ensemble des expériences réalisées jusqu'alors indiquaient que les hypothèses réaliste et locale, prises ensemble, étaient inaptes à décrire le monde physique – du moins pour un système formé de particules intriquées. Cela ne dit pas laquelle (voire les deux) il faudrait rejeter... Cherchant à répondre, même partiellement, le Prix Nobel de physique Anthony Leggett a élaboré en 2003 un théorème d'incompatibilité qui s'inspire beaucoup de celui formulé par Bell [3]. L'idée générale consiste à délaisser l'hypothèse locale, afin de savoir si un groupe de théories réalistes reproduiraient, à elles seules, les prédictions de la mécanique quantique.

Ces théories sont, dans leur genre, parmi les plus simples qui soient. On présume, tout d'abord, que deux photons intriqués possèdent un état de polarisation fixe et bien défini, propriété « réaliste » s'il en est. La probabilité pour que ces photons passent au travers d'un polariseur dépendrait donc uniquement de leur polarisation et du type de polariseur. Afin de prendre en compte la non-localité, on suppose ensuite que l'issue de chacune des mesures puisse être influencée par une action à quelque distance que ce soit.

Tout comme Bell, Leggett a alors formulé une série d'inégalités mathématiques relatives aux mesures des corrélations entre les deux particules. Ces inégalités sont violées dans le cadre des prédictions de la mécanique quantique ; jamais dans celui du groupe de théories non locales et réalistes. Ce qui permet de trancher, expérimentalement, en faveur de la validité des unes ou des autres. C'est ce que notre équipe de l'Institut d'optique et d'information quantiques de Vienne a entrepris, entre 2006 et 2007 [4]. La différence avec les tests des inégalités de Bell consiste à prendre en compte les polarisations de type ellipsoïdal, essentielles pour calculer l'intensité des corrélations entre particules intriquées. Nous avons ainsi constaté que les inégalités de Leggett n'étaient pas satisfaites. Une fois de plus, le caractère fondamental de la mécanique quantique a été confirmé.

Nos expériences démontrent donc qu'il ne suffit pas de sacrifier l'hypothèse de localité pour sauver celle du réalisme. Et elles suggèrent d'abandonner l'idée selon laquelle les propriétés des particules (leur polarisation, dans le cas que nous avons étudié) existeraient indépendamment de nos observations. Certes, il ne faut pas perdre de vue que cette explication reste partielle. D'autres interprétations sont possibles pour expliquer la « bizarrerie quantique » – en particulier la nature des interactions à l'œuvre au sein d'une paire de particules intriquées.

L'une d'elles, par exemple, suppose l'influence qu'une observation aurait sur le « passé », de telle sorte qu'une mesure effectuée à un instant donné sur une particule intriquée détermine les propriétés de l'autre, au moment (pourtant antérieur !) de son émission... Quelle que soit l'interprétation que l'on adopte, toutes nécessitent une révision radicale de notre manière de concevoir la structure et le fonctionnement du monde physique. Qui sait vers quelles implications scientifiques et philosophiques les prochaines expériences sur les fondements de la mécanique quantique nous conduiront ? ■



DR

Un cristal non linéaire (au milieu) produit, lorsqu'il est éclairé par un laser, des paires de photons intriqués : de fréquence identique, différente de celle du laser, les deux photons restent liés même lorsqu'on les sépare à longue distance.

CET ARTICLE est la version revue et mise à jour par ses auteurs du texte paru dans le n° 418 de *La Recherche*.

En savoir plus

> Le monde quantique, *Les Dossiers de La Recherche*, novembre 2007.

> **http://tinyurl.com/2gwle2** trois conférences d'Étienne Klein sur les origines et les controverses liées à la mécanique quantique.