

Certaines révolutions débutent très discrètement. Ce fut le cas de celle entamée en 1964, lorsque le physicien britannique John Bell, alors au Cern, expliqua comment répondre à une question philosophique profonde qui avait beaucoup préoccupé les fondateurs de la physique quantique. Il s'agissait de savoir si des particules séparées par de grandes distances conservent un lien tel que des mesures effectuées sur l'une influent instantanément sur l'autre. En physique classique, une telle influence est impossible, car aucun signal ne peut se propager plus vite que la lumière. Mais dans le cadre de la théorie quantique, cela semble être le cas. Grâce aux inégalités mathématiques qu'il a trouvées, Bell a ouvert la possibilité de sonder la nature de ce lien.

© Kenn Brown et Chris Wren, Mondolithic Studios

2

➤ spin (moment cinétique intrinsèque) d'un électron, une propriété purement quantique. Si un électron dont le spin est orienté horizontalement traverse un champ magnétique orienté verticalement, le spin basculera vers le haut avec une probabilité de 50%, et vers le bas avec une probabilité de 50%, le résultat étant vraiment aléatoire par nature.

Comparez cela à une pièce que l'on tire à pile ou face. Nous sommes tentés de penser que le lancer de pièce est aussi aléatoire, mais si nous connaissons précisément la masse de la pièce, la force employée pour la lancer, les détails des courants d'air qui l'atteignent, etc., nous pourrions prédire comment la pièce va retomber. Le caractère aléatoire provient dans ce cas d'un manque d'information sur le système.

UN ALÉA FONDAMENTAL

Pour le spin de l'électron, c'est une toute autre affaire. Même si nous connaissons parfaitement toutes les propriétés de l'électron et de son spin avant qu'il ne traverse le champ magnétique, l'incertitude quantique nous empêche de prévoir de quel côté le spin basculera. Avec un spin initial horizontal, l'électron est dans une superposition à poids égaux des états de spin «haut» et «bas». Si une mesure est réalisée sur l'électron selon l'axe vertical, cette superposition cesse d'exister: elle se réduit à l'un de ses termes et l'on obtient un résultat unique; on mesure un spin orienté soit vers le haut, soit vers le bas.

Quand les physiciens ont développé la théorie quantique au début du xx^e siècle, certains de ses fondateurs, comme Albert Einstein et Erwin Schrödinger, étaient gênés par le flou des états quantiques. Selon eux, la nature ne peut pas être vraiment floue, et une théorie allant au-delà de la physique quantique devrait prédire exactement le comportement des particules. Il serait alors possible de prévoir le résultat d'une mesure du spin de l'électron de la même façon qu'il est possible de savoir comment une pièce va retomber si vous détenez assez d'information.

Plus surprenant encore, une superposition d'états peut s'étendre sur deux particules ou plus, un phénomène que Schrödinger a nommé intrication (*Verschränkung* en allemand). D'après la théorie quantique, les propriétés des particules peuvent être intriquées de telle façon que leur valeur d'ensemble soit bien connue, mais que les valeurs individuelles restent complètement incertaines – un peu comme si l'on avait deux dés spéciaux qui, quand on les lance, donneraient chacun un résultat aléatoire, mais dont la somme serait toujours égale à 7.

Einstein, Boris Podolsky et Nathan Rosen (le fameux trio EPR) ont analysé les conséquences de l'intrication. Imaginez que les spins de deux électrons soient intriqués de telle sorte que quand on les mesure selon un même axe,

on obtiendra toujours des valeurs opposées. Par exemple, si l'on mesure le spin d'un des électrons et qu'on trouve qu'il pointe vers le haut, l'autre pointera vers le bas. Cette corrélation tient toujours, même si les électrons sont très distants l'un de l'autre. Alors que l'état du premier électron ne devient déterminé qu'au moment de la mesure, il n'a aucun moyen de communiquer ce résultat à son partenaire. Comment la seconde particule «sait-elle» que le spin de la première pointe vers le haut? Einstein a qualifié cette synchronisation de «fantomatique action à distance».

En 1935, Einstein, Podolsky et Rosen ont publié un article désormais célèbre sur ce problème. Ils se sont appuyés sur deux hypothèses raisonnables. Premièrement, si l'on peut prédire avec certitude le résultat d'une mesure sur un système, celui-ci doit avoir une certaine propriété qui correspond à ce résultat. Einstein a nommé de telles propriétés des «éléments de réalité». Par exemple, si nous savons que le spin d'un électron pointe vers le haut, nous pouvons prédire avec certitude que s'il se propage dans un champ magnétique approprié, il sera toujours dévié vers le haut. Dans cette situation, le spin de l'électron serait un élément de réalité.

Deuxièmement, un événement survenant à un endroit ne peut pas affecter instantanément un événement lointain; les influences se propagent, au mieux, à la vitesse de la lumière. C'est le principe dit «de localité».

Vue d'ensemble du campus de l'université de Delft, aux Pays-Bas, où Ronald Hanson et ses collègues ont réalisé leur expérience du test de Bell sans faille. Les stations (à gauche et en haut à droite) hébergent les cristaux au sein desquels des électrons peuvent être intriqués à distance par l'intermédiaire de photons qu'ils émettent. Les stations sont distantes de 1280 mètres, mais sont reliées à une station intermédiaire qui assure la bonne réception et l'intrication des photons émis par les deux cristaux.



© Université de Delft

À partir de ces deux principes, imaginons deux électrons intriqués tenus à distance par deux personnes, Alice et Bernard. Supposons qu'Alice mesure le spin de son électron selon la direction z . À cause de la parfaite anticorrélation du système intriqué, elle sait aussi quel sera le résultat si Bernard mesure le spin de son électron le long de la direction z . Dès lors, selon EPR, la composante en z du spin de l'électron de Bernard serait un élément de réalité. De la même façon, si Alice décide de mesurer plutôt le spin selon la direction x , elle connaîtra avec certitude le résultat de la mesure du spin de l'électron de Bernard selon l'axe des x . Dans ce cas, la composante en x du spin de l'électron de Bernard est un élément de réalité.

Mais Alice et Bernard étant très éloignés l'un de l'autre, la décision d'Alice de mesurer selon l'axe des x ou des z ne peut pas influencer sur ce qui se passe chez Bernard (principe de localité). Par conséquent, pour rendre compte des anticorrélations, la valeur du spin de l'électron de Bernard doit être parfaitement prévisible le long de l'axe des z comme de celui des x . Or cette conclusion est en contradiction avec la théorie quantique, dont les lois imposent que si le spin a une valeur bien définie dans une direction, il est nécessairement flou dans les autres.

Cette incohérence a conduit Einstein et ses collègues à conclure que la théorie quantique est incomplète. Ils ont suggéré qu'il serait possible de résoudre cette contradiction en complétant la théorie par des variables supplémentaires

inaccessibles pour Alice et Bernard (on parle de variables cachées). En d'autres termes, il existerait une théorie plus fondamentale que la physique quantique dans laquelle les électrons ont des propriétés supplémentaires par rapport à celles connues. Celles-ci décriraient comment les électrons se comportent lorsqu'on les mesure conjointement. Si nous y avions accès à ces variables cachées, nous pourrions prédire ce qui arriverait aux électrons. Le flou apparent des particules quantiques résulterait ainsi de notre ignorance. Pour désigner cet éventuel successeur de la physique quantique, les physiciens parlent de «théorie locale à variables cachées». Le qualificatif «local» se réfère ici au fait que les signaux cachés ne peuvent pas se propager plus vite que la lumière.

Pour les défenseurs de la physique quantique, tel le Danois Niels Bohr, celle-ci était complète et l'intrication ne créait pas de contradiction, considérant que la physique quantique est non locale par nature.

BELL RELANCE LE DÉBAT

Einstein ne mettait pas en doute les prédictions de la physique quantique elle-même; il pensait qu'il existait une vérité plus profonde qui gouverne la réalité. Après l'article EPR de 1935, l'intérêt pour ces questions fondamentales posées par la physique quantique est retombé. La possibilité des variables cachées a été considérée comme une question philosophique sans importance pratique, car on pensait que les >

