

L'ESSENTIEL

● En 1964, le physicien John Bell a montré comment tester la nature de l'intrication quantique, phénomène par lequel deux particules conservent un lien «fantomatique» même quand elles sont très éloignées l'une de l'autre.

● Pour Einstein, l'intrication était la preuve que la physique quantique était incomplète: des «variables cachées locales» expliqueraient le phénomène.

● Plusieurs équipes ont mis en œuvre le test de Bell. Les résultats semblaient

écarter l'hypothèse des variables cachées et confirmaient les prédictions de la physique quantique. Mais ces expériences comportaient des failles (ou «échappatoires»), qui ne permettaient pas d'éliminer complètement l'hypothèse de variables cachées agissant en coulisses.

● Finalement, en 2015, plusieurs groupes ont réalisé les premiers tests de Bell sans échappatoire, qui excluent définitivement toute explication par des variables cachées locales.

LES AUTEURS



RONALD HANSON est physicien à l'université de technologie de Delft, aux Pays-Bas.



KRISTER SHALM est physicien au NIST (Institut américain des normes et de la technologie) et à l'université du Colorado à Boulder.

C

ertaines révolutions débutent discrètement. Ce fut le cas de celle entamée en 1964, lorsque le physicien nord-irlandais John Bell, alors au Cern, expliqua comment répondre à une question 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.

Cinquante ans plus tard, les idées de Bell ont profondément changé notre vision de la théorie quantique. Et les physiciens se sont inspirés du test de Bell pour inventer de nouvelles technologies. Pourtant, ce n'est qu'en 2015 que les scientifiques ont réussi à vérifier les prédictions du théorème de Bell de la façon la plus complète qui soit. Ces expériences marquent la fin d'une longue quête et le début d'une nouvelle ère dans le développement d'applications quantiques.

Pour comprendre ce que Bell a fait, revenons aux racines de la physique quantique, cette théorie décrivant le comportement de la lumière et de la matière aux plus petites échelles. L'une des principales différences est que les atomes, les électrons et les autres particules subatomiques existent dans des états marqués du sceau de l'incertitude. Prenez par exemple le spin d'un électron, une propriété purement quantique correspondant à un moment cinétique intrinsèque. 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 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 connaissions précisément la masse de la pièce, la force employée pour la lancer, les détails des courants d'air qui l'atteignent... 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.

John Bell a repris l'expérience de pensée EPR, mais avec une variante qui change la donne

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». 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 ont analysé les conséquences de l'intrication et ont publié en 1935 un article (*voir Une efficacité déraisonnable?, par E. Klein, page 16*) dans lequel ils concluent 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 où les électrons ont des propriétés supplémentaires. 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, on parle de «théorie locale à variables cachées». Le qualificatif «local» se réfère au fait que les signaux cachés ne peuvent 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.

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 prédictions des théories avec ou sans variables cachées seraient identiques. Mais tout cela a changé en 1964, quand Bell a montré que dans certaines circonstances, les prédictions des théories à variables cachées diffèrent de celles de la physique quantique. Il serait possible de tester avec une expérience si des variables cachées existent et expliquent l'intrication quantique.

BELL RELANCE LE DÉBAT

Bell a reconsidéré l'expérience de pensée EPR, mais avec une petite variante qui change la donne: il laissait Alice et Bernard mesurer le spin de leurs électrons respectifs dans n'importe quelle direction. Dans l'expérience de pensée initiale, Alice et Bernard mesurent les spins selon le même axe et trouvent donc des résultats anticorrélés à 100%: ainsi, pour l'axe vertical, si Alice mesure «haut», alors Bernard mesure toujours «bas», et inversement. En revanche, si Alice et Bernard mesurent le long d'axes différents, les corrélations entre les résultats sont plus complexes, et c'est là qu'apparaissent les différences entre la théorie quantique et les théories à variables cachées.

Bell a montré que pour certains ensembles de directions, les corrélations entre les mesures d'Alice et de Bernard seraient plus fortes en physique quantique que dans toute théorie locale à variables cachées. Mathématiquement, ces différences s'expriment par les «inégalités de Bell». Elles sont dues au fait que les variables cachées ne peuvent pas s'influencer plus vite que la vitesse de la lumière, et sont donc moins efficaces pour coordonner leurs efforts: les corrélations sont limitées. En physique quantique, les spins de deux électrons intriqués existent conjointement dans un unique état qui peut s'étendre sur de longues distances. Grâce à l'intrication, la théorie quantique prédit des corrélations jusqu'à 40% plus fortes que celles des théories à variables cachées.

>