

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



ÉLIMINER TOUTES LES ÉCHAPPATOIRES

La physique quantique décrit un univers qui entre en conflit avec notre intuition de la réalité. Certains scientifiques, en particulier Albert Einstein, ont espéré que des théories alternatives incluant des variables dites « cachées », qui agissent en coulisses, feraient disparaître certaines des implications les plus déroutantes de la théorie quantique. Jusqu'à récemment, aucune expérience n'a pu exclure de façon indiscutable les variables cachées locales, mais le tableau a changé en 2015.

Les objections d'Einstein à la physique quantique reposaient sur deux principes fondamentaux : le réalisme et la localité.

Le réalisme est la notion selon laquelle les objets ont des propriétés déterminées : une pomme, par exemple, est rouge, ou jaune. La localité est l'idée selon laquelle les objets n'interagissent qu'avec leur environnement direct ; les influences ne peuvent se propager plus vite que la lumière.



Mais la théorie quantique brosse de la réalité un tableau beaucoup plus étrange que cela.



Selon la physique quantique, une particule peut être dans deux états à la fois (dans une superposition d'états).

Par exemple, une pomme quantique...



...peut ne pas être rouge ou...



...jaune mais...



...une superposition des deux.

Les particules peuvent même être intriquées. Comme si c'était un système fait d'une pomme rouge et d'une pomme jaune, mais sans que chaque pomme ait une couleur définie avant d'être vue.

Si l'on observe une pomme quantique d'une paire intriquée et qu'on la trouve rouge, l'autre devient instantanément jaune, quelle que soit leur distance mutuelle.

Einstein n'admettait pas ce phénomène, qu'il qualifiait de « fantomatique action à distance ». Pour éviter d'invoquer des influences se propageant plus vite que la lumière, il supposait l'existence de variables cachées locales, inconnues des observateurs et censées contrôler cette intrication.



En 1964, John Bell a découvert que la théorie quantique donne des prédictions différentes des théories faisant intervenir des variables cachées locales. Il a trouvé un moyen de tester l'existence de celles-ci.

Le test de Bell : Deux observateurs feraient des mesures séparées de deux particules censées être intriquées. Bell a calculé la corrélation maximale qu'il pourrait y avoir entre les mesures des deux observateurs si des variables locales, limitées par la vitesse de la lumière, étaient impliquées.



Les chercheurs ont rapidement commencé à mettre en œuvre le test. Mais il restait deux failles qui laissaient un peu de marge pour d'éventuelles variables cachées.



1. Faille de localité

Les stations de mesure sont assez proches pour que les deux particules s'échangent des signaux à des vitesses inférieures à la lumière pendant le test.

2. Faille de détection

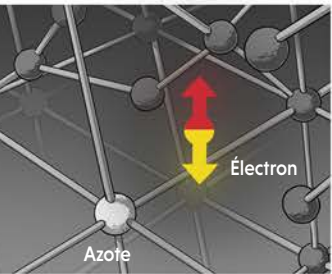
Les détecteurs ne peuvent mesurer qu'une partie des particules intriquées.

En 2015, plusieurs groupes de scientifiques ont conçu des versions du test de Bell qui éliminent les deux échappatoires. L'une d'elles, à l'université de technologie de Delft, a pour point de départ deux minuscules diamants.



Dans le réseau cristallin presque parfait du diamant, il existe occasionnellement un défaut : un atome d'azote.

Dans certains endroits, à côté d'un tel atome d'azote, il manque un atome de carbone, un « défaut » qui se comporte comme un piège à électrons.



Les électrons sont dotés d'un spin...

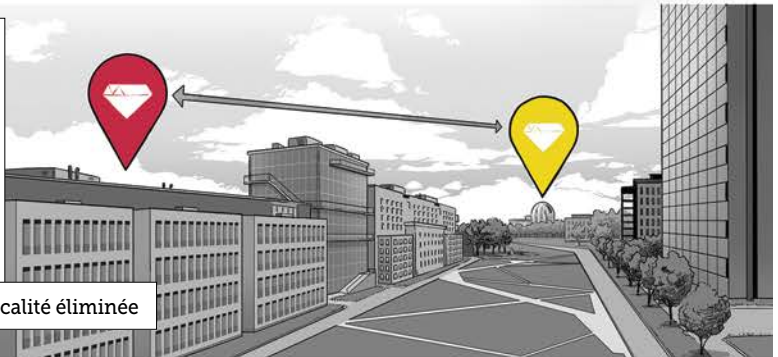
Haut Bas



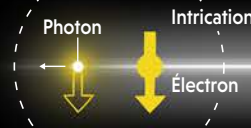
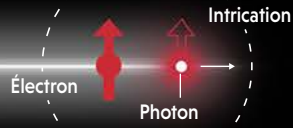
Ou en superposition, à la fois haut et bas

En utilisant deux électrons, dans deux diamants séparés de 1 280 mètres, les scientifiques sont sûrs qu'il n'y a pas assez de temps pour un échange de signal, même à la vitesse de la lumière, dans l'intervalle de temps qui sépare le choix d'orientation des détecteurs et la mesure des spins des électrons.

Faille de localité éliminée

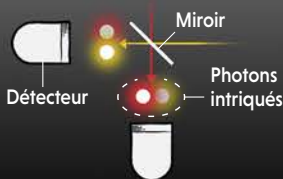


Avec des lasers, les physiciens excitent les électrons, qui émettent alors des photons intriqués avec leur état de spin.



Ces photons traversent le campus jusqu'à ce qu'ils se rencontrent dans un détecteur.

Quand les photons se rencontrent, ils s'intriquent. Par extension, leurs électrons respectifs (qui sont plus faciles à détecter et mesurer que les photons) s'intriquent eux aussi.



Faille de détection éliminée

Pour la première fois, un test de Bell sans faille



À Delft, les physiciens ont effectué 245 mesures portant sur une paire d'électrons intriqués. Ils ont mesuré leurs spins dans chaque cas et ont trouvé que 80 % étaient corrélés, soit beaucoup plus qu'on n'obtiendrait avec des variables cachées locales. D'autres expériences ont donné des résultats similaires.

Ces résultats prouvent de façon définitive que des variables cachées locales ne peuvent pas expliquer les conséquences de l'intrication.

Une conclusion s'impose : le monde est vraiment étrange.

