

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.

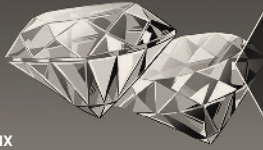
1. Faille de localité

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

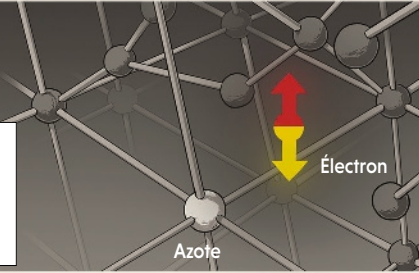
Les détecteurs ne peuvent mesurer qu'une partie des particules intriquées.

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.

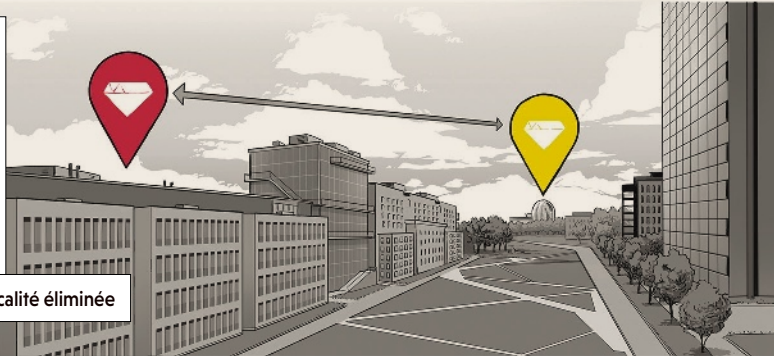


Les électrons sont dotés d'un spin...

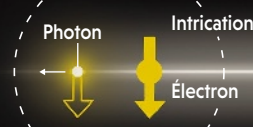
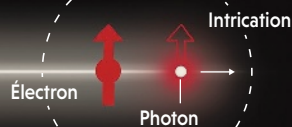
Haut Bas
↑ ↓ ↑ ↓
Ou en superposition, à la fois **haut** et **bas**

En utilisant deux électrons, dans deux diamants séparés de 1280 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

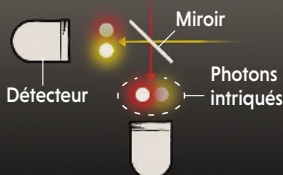


Avec des lasers, les physiciens excitent les électrons, qui émettent alors des photons intriqués avec leur état de spin.



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

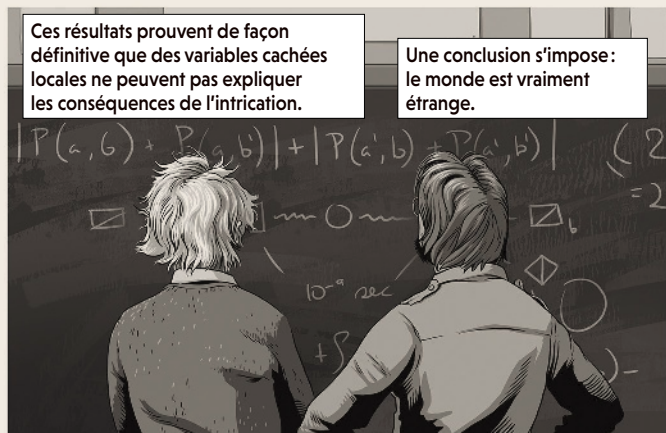
Pour la première fois, un test de Bell sans faille



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.



➤ traitons la perte de photons en amont. De cette façon, nous éliminons la faille de détection, parce que nous n'excluons aucun résultat des tests de Bell sur des électrons intriqués. La perte de photons liée à la grande distance de séparation ne limite donc pas la qualité de l'intrication, mais, en revanche, elle réduit de façon drastique le nombre d'événements à notre disposition pour le test de Bell – quelques-uns par heure.

Après plusieurs semaines de mesures en juin 2015, nous avons trouvé que l'inégalité de Bell était violée à hauteur de 20%, en accord avec les prédictions de la théorie quantique. La probabilité d'obtenir par hasard un tel résultat dans le cadre d'un modèle à variables cachées locales (et en admettant que les dispositifs aient conspiré en utilisant toutes les données disponibles) était de 3,9%. Lors d'une deuxième série de mesures en décembre 2015, nous avons trouvé un taux similaire de violation des inégalités de Bell.

La même année, trois autres groupes ont effectué des tests de Bell sans échappatoire. En

septembre, l'équipe de l'institut américain des normes et de la technologie (NIST), dirigée par l'un d'entre nous (Krister Shalm), et celle d'Anton Zeilinger ont utilisé des photons intriqués. Peu après, Harald Weinfurter, de l'université Ludwig-Maximilian, à Munich, et ses collègues ont utilisé des atomes de rubidium distants de 400 mètres dans un protocole similaire à celui du groupe de Ronald Hanson.

Les équipes du NIST et de Vienne ont intriqué les états de polarisation de deux photons au moyen de lasers intenses dirigés sur un matériau cristallin particulier. Très rarement (environ une fois pour 1 milliard de photons pénétrant dans le cristal), un photon émis par un laser interagissait d'une façon particulière en donnant naissance à une paire de photons dont les états de polarisation étaient intriqués. Avec des lasers assez puissants, les chercheurs ont produit des dizaines de milliers de paires de photons intriqués par seconde. On envoyait alors ces photons vers des stations séparées (de 184 mètres dans

LIBRE ARBITRE ET SUPERDÉTERMINISME

En 2015, plusieurs équipes, dont celles des auteurs, ont réalisé les premiers tests de Bell prenant en compte à la fois la faille de localité et celle de détection. Elles ont conclu que la physique quantique est complète et fondamentalement non locale. Mais la nature peut-elle encore comploter pour truquer ces résultats ? Il existe en effet une autre échappatoire : la faille de libre arbitre de l'expérimentateur sur le réglage des dispositifs de mesure. Il est envisageable que des variables cachées ou un autre phénomène du passé aient une action causale sur la configuration des détecteurs. Si les choix des physiciens pour l'orientation des polariseurs sont limités d'une façon ou d'une autre, les résultats seraient biaisés. Dans les expériences de 2015, les chercheurs écartaient cette hypothèse en supposant que, si variables cachées il y a, elles n'émergent qu'avec la paire de photons intriqués et ne peuvent donc pas influencer causalement sur les systèmes de détection. Cependant, le formalisme sous-jacent aux inégalités de Bell ne précise pas où et quand les variables cachées intervenant dans l'expérience seraient créées. Pour écarter cette hypothèse d'un « complot de la nature » sur la configuration des détecteurs, l'idée est de définir la direction de polarisation mesurée par les instruments à partir d'événements survenus dans un passé



Lors d'une expérience sur le test de Bell, une équipe de physiciens a utilisé la lumière de plusieurs étoiles de la Voie lactée pour choisir la configuration des détecteurs de leur expérience.

lointain, comme la lumière émise par des étoiles distantes. En 2017, Anton Zeilinger et son équipe, à l'université de Vienne, ont utilisé une source de photons intriqués envoyés vers deux détecteurs distants de plus de 1 kilomètre. La configuration des deux polariseurs est contrôlée par deux télescopes pointant chacun sur une étoile distante de plus de 500 années-lumière. Les photons captés en provenant d'une telle étoile et émis il y a plusieurs centaines d'années ont une longueur d'onde propre. Cette dernière est utilisée pour sélectionner une des deux configurations possibles pour chaque instrument, selon qu'elle est supérieure à 700 nanomètres (« rouge »), ou inférieure (« bleue »). Les mesures conduisent à une violation des inégalités

de Bell, tout en contrôlant en partie la faille de libre arbitre. En effet, si un mécanisme impliquant les variables cachées a exploité cette échappatoire, il doit avoir agi il y a plus de 500 ans ! En utilisant des sources lumineuses de plus en plus lointaines – étoiles, quasars ou même le fond diffus cosmologique – il sera possible de repousser d'autant les limites sur cette échappatoire. Cependant, la faille ne pourra jamais être complètement éliminée... En poussant à l'extrême ce raisonnement, cela conduit à l'idée de superdéterminisme, qui suppose l'absence totale de libre arbitre dans un monde où tout est prédéterminé depuis le début de l'Univers. Cependant, la plupart des physiciens rejettent cette idée, qui n'est pas réfutable.