

> 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 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 ce qu'on a nommé 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.

Le théorème de Bell fournit ainsi des inégalités qui posent une limite supérieure aux corrélations qu'il est possible d'avoir dans n'importe quelle théorie locale à variables cachées. Si les données expérimentales dépassent cette limite (en d'autres termes, si elles «violent» les inégalités de Bell), cela signifie que les théories à variables cachées ne décrivent pas la nature.

Peu après la publication de Bell, le physicien John Clauser, de l'université de Californie à Berkeley, et ses collègues ont trouvé des inégalités similaires, mais plus faciles à tester dans des expériences. Les chercheurs ont effectué les premières mesures à la fin des années 1960,

LIBRE ARBITRE ET SUPER- DÉTERMINISME

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 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 un 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



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.

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.

et, depuis, les expériences n'ont cessé de se rapprocher du dispositif idéal proposé par Bell. Les expériences ont trouvé des corrélations qui violent l'inégalité de Bell, ce qui éliminait les théories locales à variables cachées. Mais jusqu'en 2015, toutes ces expériences reposaient sur une ou plusieurs hypothèses *ad hoc* à cause d'imperfections des dispositifs. Ces hypothèses comportaient des failles que les théories locales à variables cachées pouvaient en principe exploiter pour réussir le test.

Grâce à l'intrication quantique, il est possible de créer des générateurs de nombres vraiment aléatoires

Dans presque toutes les expériences de ce type au xx^e siècle, les scientifiques ont produit des photons intriqués à partir d'une source, et les ont envoyés dans des stations de mesure (représentant Alice et Bernard). Ces dernières enregistraient la polarisation d'un photon de la paire, c'est-à-dire la direction dans laquelle oscille le champ électrique du photon. Les chercheurs calculaient alors les corrélations moyennes entre les résultats des deux stations et examinaient si les inégalités de Bell étaient respectées ou violées.

Dans les premières expériences, les mesures étaient effectuées selon des directions fixes. Dans ce cas, une interaction avait le temps de s'établir entre les dispositifs et créer d'éventuelles corrélations. Autrement dit, des signaux cachés indiqueraient à Bernard, sans voyager plus vite que la lumière, quelle direction Alice a utilisée pour mesurer son photon. Cette «échappatoire (ou faille) de localité» signifie qu'une théorie locale à variables cachées obtiendrait les mêmes corrélations que la théorie quantique. En 1982, Alain Aspect, de l'Institut d'optique, à Orsay, et ses collègues ont effectué un test amélioré dans lequel les photons étaient envoyés à deux extrémités d'une pièce. Pendant que ces photons intriqués étaient en vol, l'angle de polarisation du dispositif de mesure changeait périodiquement. À la fin des années 1990, Anton

Zeilinger, aujourd'hui à l'université de Vienne, et son équipe ont perfectionné cette stratégie en utilisant des directions de mesure de polarisation vraiment aléatoires (et non simplement périodiques) et déterminées juste avant que les mesures n'aient lieu. Si les signaux cachés existent, ils devraient se propager plus vite que la lumière pour influencer sur ces mesures. La faille de localité était hermétiquement comblée.

Mais ces expériences présentaient un inconvénient de taille: il est difficile de travailler avec des photons, particules qui peuvent se perdre en vol ou tout simplement ne pas être vues par les détecteurs. La plupart du temps, une mesure ne donnait pas de résultat, car les photons se perdaient en chemin. Les expérimentateurs étaient obligés d'éliminer les mesures ratées et de supposer que les mesures réussies étaient représentatives de l'ensemble des paires intriquées (l'«hypothèse d'échantillonnage sans biais»). Sans cette supposition, il est impossible de garantir que l'ajout des photons perdus ne donne pas un résultat compatible avec les théories à variables cachées.

Les scientifiques ont éliminé cette échappatoire de détection au début de ce siècle, en abandonnant les photons au profit d'autres systèmes intriqués et mesurés avec une bonne efficacité: des ions piégés, des atomes et des circuits supraconducteurs. Le problème est que, dans ces cas, les contraintes techniques imposaient que les particules soient assez proches, ce qui laissait ouverte la faille de localité. Un test de Bell pour lequel toutes les échappatoires seraient supprimées est devenu l'un des grands défis de la science quantique.

Grâce aux progrès réalisés dans le contrôle et la mesure des systèmes quantiques, il est devenu possible en 2015 d'effectuer un test de Bell avec un dispositif idéal, ce qu'on appelle un test de Bell sans échappatoire (ou sans faille). En fait, en peu de temps, quatre groupes différents de physiciens ont trouvé des résultats violant les inégalités de Bell tout en éliminant les deux échappatoires. Ces expériences ont ainsi fourni des preuves indiscutables qui réfutent les théories locales à variables cachées.

ÉLIMINER LES FAILLES

L'un d'entre nous (Ronald Hanson) a effectué avec ses collègues la première expérience éliminant toutes les échappatoires à l'université de technologie de Delft, aux Pays-Bas (*voir la photo page 55 et l'encadré pages 56 et 57*). Nous avons intriqué les spins de deux électrons présents chacun dans un défaut cristallin d'un diamant, c'est-à-dire dans un site où il manque un atome de carbone. Les deux électrons intriqués étaient dans des laboratoires situés de part et d'autre du campus, et pour être sûrs qu'aucune communication n'était possible entre les deux, nous avons utilisé un générateur de nombres ➤