

Fiche 1

Le débat Bohr-Einstein et l'intrication quantique à l'épreuve de l'expérience

En physique quantique, la valeur d'une observable¹ comme la position ou la vitesse d'une particule n'est généralement prédite que de façon statistique, par la probabilité de trouver telle ou telle valeur. Niels Bohr, l'un des fondateurs de la mécanique quantique tient pour fondamental le caractère probabiliste des prédictions de cette théorie. Pour Albert Einstein, au contraire, l'impossibilité de prédire les résultats des mesures autrement qu'en termes probabilistes est selon lui la preuve que la théorie quantique est « *incomplète* », qu'elle oublie de prendre en compte certains aspects de la réalité. Le débat est engagé.

Pour mettre à l'épreuve les principes de la physique quantique, Albert Einstein, Boris Podolsky et Nathan Rosen proposent en 1935 une expérience de pensée (dite « EPR », d'après les initiales des auteurs). L'argument est le suivant : les lois de la mécanique quantique permettent la formation de paires de particules « intriquées », ayant interagi dans le passé puis s'étant éloignées l'une de l'autre, et pour lesquelles la mesure des propriétés de l'une permet de connaître instantanément les propriétés de l'autre, quelle que soit la distance qui les sépare. Lorsqu'on effectue une mesure sur l'une des particules intriquées, tout se passe comme si sa jumelle le sentait immédiatement et adoptait un état physique correspondant à celui trouvé pour sa partenaire.

Pour Einstein, inventeur de la relativité qui stipule qu'aucun effet ne peut se propager plus vite que la lumière, cette description mettant en jeu une modification instantanée à distance est inacceptable. Il conclut que si les deux particules ont des propriétés similaires au moment de la mesure, c'est qu'elles ont acquis ces propriétés lors de leur interaction initiale, et qu'elles les ont conservées après leur séparation. Cette conclusion revient à compléter le formalisme de la mécanique quantique, et elle est immédiatement contestée par Niels Bohr. Le débat entre les deux physiciens durera pendant plus de 20 ans jusqu'à leur mort.

Le verdict de l'expérience

En 1964, John Bell, théoricien irlandais travaillant au CERN – le Laboratoire européen pour la physique des particules à Genève - montre que les positions respectives de Niels Bohr et d'Albert Einstein conduisent à des prédictions différentes. Il écrit des inégalités qui, appliquées aux résultats de mesures bien choisies portant sur des particules intriquées, permettraient de trancher le débat.

Prenant la relève de travaux pionniers réalisés aux Etats Unis, Alain Aspect entreprend en 1975, à l'Institut d'optique d'Orsay, la construction d'une source de paires de photons intriqués d'une efficacité sans précédent, grâce à l'utilisation d'une excitation laser à deux photons, méthode développée à Paris (Laboratoire Kastler Brossel – ENS Paris/CNRS/Université Paris VI) par Bernard Cagnac et ses élèves. Cette source lui permettra, avec ses collaborateurs Philippe Grangier, Jean Dalibard, et Gérard Roger, de réaliser en 1982 des tests des inégalités de Bell dans des situations très proches des expériences de pensée idéales sur lesquelles raisonnent les théoriciens. Les résultats violent de façon très nette les inégalités de Bell, et sont en excellent accord avec les prédictions quantiques. Il n'existe donc pas de modèle dans l'esprit des conceptions dites « réalistes locales » d'Einstein, pour décrire *les particules intriquées*. On ne peut se les représenter

¹ En physique quantique, une observable décrit une quantité physique mesurable. Pour la définir, on doit préciser comment se fait l'observation.

comme deux systèmes distincts portant deux copies identiques d'un ensemble de paramètres déterminant la totalité des propriétés physiques ; il faut admettre qu'il s'agit d'un système unique, « inséparable », décrit par un état quantique global.

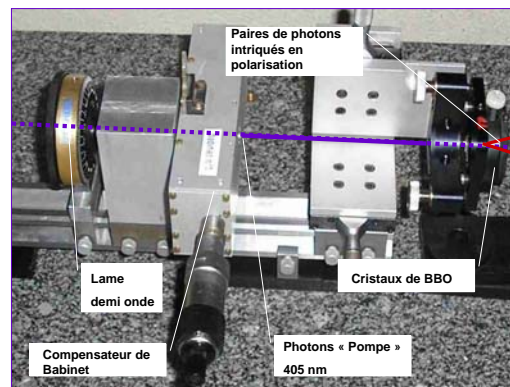
Des propriétés à la base des travaux sur l'ordinateur quantique

Grâce à cette nouvelle source, Alain Aspect et Philippe Grangier seront capables dès 1985 de maîtriser l'émission de photons uniques et de mettre en évidence des propriétés quantiques, sans équivalent classique, de la lumière ainsi obtenue.

Les propriétés quantiques des paires de photons intriqués et des photons uniques sont aujourd'hui utilisées pour réaliser des opérations de transmission sécurisée de l'information par *cryptographie quantique*. Dans ces méthodes, la sécurité de la transmission est garantie par les lois fondamentales de la physique quantique, et ne repose pas, comme les méthodes classiques de cryptographie, sur l'hypothèse que l'adversaire (celui qui cherche à déchiffrer le message secret) a un niveau de connaissances mathématiques, ou de développement informatique, qui ne dépasse pas l'état de l'art actuel. Le phénomène d'intrication est également à la base des travaux sur *l'ordinateur quantique* qui pourrait, s'il était un jour réalisé, avoir une puissance de calcul exponentiellement plus grande que celle des ordinateurs classiques. Ces recherches en information quantique sont susceptibles d'avoir un impact considérable dans le domaine de la sécurité des communications, par exemple sur la « toile ».



L'expérience de test des inégalités de Bell d'Orsay (1982). La source de paires de photons intriqués comportait plusieurs lasers, et un jet atomique se propageant dans une enceinte atomique que l'on distingue au centre. Les mesures se faisaient après 6 mètres de propagation de part et d'autre de cette source. © Groupe d'optique atomique /LCFIO



Une source moderne de paires de photons intriqués (2004). Cette source, développée au laboratoire de travaux pratiques de SupOptique, comporte un jeu de cristaux non linéaires excités par un laser à semi conducteur violet. Elle tient sur une vingtaine de centimètres, et est incomparablement plus simple que la source utilisée en 1982. Les photons intriqués émis par ce type de source peuvent être injectés dans des fibres optiques et propagés à des dizaines de kilomètres tout en restant assez corrélés pour violer les inégalités de Bell. C'est ce type de dispositif qui est utilisé dans les systèmes de cryptographie quantique. © Lionel Jacobowicz/Ecole supérieure d'optique