

La téléportation quantique

Copie d'une particule à distance.

Albert Einstein, fondateur de la relativité, n'admettait pas l'idée d'une action instantanée à distance. Or la mécanique quantique prévoit des actions de ce type. De nombreuses expériences confirment aujourd'hui que, dans une paire de photons dont les états quantiques sont corrélés, la mesure de l'état d'un photon entraîne instantanément une modification de l'état de l'autre photon, quel que soit leur éloignement.

Une paire de photons corrélés peut être représentée par une paire de cartes, l'une noire, l'autre rouge. Donnons ces cartes retournées à deux voyageurs qui s'éloignent. Le premier voyageur décide de retourner sa carte et trouve une carte rouge. Nécessairement, l'autre carte est noire. On comprend que si le premier voyageur ne prévient pas le second de la couleur de sa carte, ce dernier ne peut pas savoir qu'il la verra noire s'il la retourne. Comme le résultat de la mesure du premier voyageur est imprévisible (il aurait pu avoir une carte noire) et que le premier voyageur ne communique pas avec le second à une vitesse infinie, le second ne peut recevoir instantanément l'information.

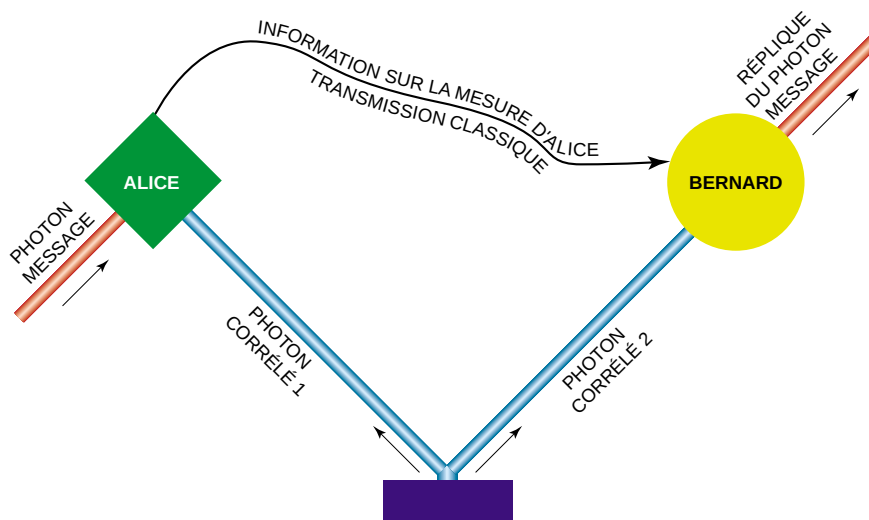
Le corrélation quantique diffère cependant de cette analogie classique :

la couleur de la carte est n'importe quel mélange de rouge et de noir et cette couleur n'est pas fixée tant que la carte n'est pas retournée ; puis, lorsque la carte est retournée, elle affiche une couleur, qui détermine la couleur opposée de l'autre carte (par exemple, rouge + noir pour la première carte devient, pour la seconde carte, rouge – noir).

Le résultat d'une mesure quantique étant fondamentalement impossible à prédire, cette action à distance, non locale, ne peut être utilisée pour propager une information déterminée plus vite que la lumière. Il est néanmoins possible d'utiliser les corrélations pour «téléporter» un photon à quelques centimètres de distance, comme viennent de le faire Anton Zeilinger et ses collègues de l'Université d'Innsbruck.

Imaginons qu'Alice veuille envoyer un message à son ami Bernard, à l'aide d'un canal de téléportation constitué d'une paire de photons corrélés émis par une source extérieure ; Alice et Bernard reçoivent chacun un élément de la paire. Lorsque le photon que détient Alice est modifié, le photon que détient Bernard est modifié instantanément. Ce lien invisible entre Alice et Bernard est fragile : pour maintenir la corrélation, les photons doivent être isolés de leur environnement.

Une tierce personne donne à Alice un photon dont l'état constitue le message. Selon les lois de la mécanique quantique, Alice ne peut connaître le message car toute mesure modifie l'état quantique du système mesuré. Dans ces conditions, comment Alice peut-elle transmettre le message à Bernard ?



Pour téléporter un photon message entre Alice et Bernard, on utilise une paire de photons corrélés. Alice reçoit le photon message et le premier photon corrélé de la paire. Lorsque ces photons arrivent en même temps, elle peut mesurer l'état quantique de la combinaison des deux particules. Cette mesure perturbe le photon corrélé 1. Comme le photon 2 est corrélé au photon 1, son état est instantanément modifié. Alice transmet alors classiquement à Bernard l'information sur la mesure effectuée. À l'aide de cette information, Bernard modifie son photon corrélé de sorte qu'il devienne une réplique exacte du photon message.

Alice mélange de manière indiscernable le photon message et le photon de la paire qu'elle détient. Ce système peut être dans quatre états quantiques possibles. Dans l'expérience réalisée à Innsbruck, Alice ne peut connaître l'état du système que lorsque celui-ci est dans l'un des quatre états. Quand elle fait la mesure et que le système est effectivement dans cet état favorable, elle connaît l'état du système. Au cours de sa mesure, le système est perturbé et le message est irrémédiablement détruit. Cependant, en raison de la corrélation de la paire de photons, la photon de Bernard est instantanément modifié, conformément à la mesure d'Alice.

Bernard ignore toutefois que son photon a été modifié et ne sait encore rien du message. Alice lui transmet alors, par un moyen de télécommunication classique, le résultat de sa mesure (qui à lui seul est insuffisant pour reconstruire le message). Grâce à l'information sur cette dernière, Bernard peut effectuer une expérience pour transformer le photon corrélé qu'il a reçu en un photon identique au photon message. Comme les photons sont indiscernables, sauf par leur état, le photon message que détenait Alice a été «téléporté» à Bernard. Notons cependant que, pour reproduire le message, Bernard a eu recours au résultat de la mesure d'Alice, transmis via un moyen de communication classique, de sorte que la copie de la particule peut se faire au mieux à la vitesse de la lumière.

L'expérience ne fonctionne que lorsqu'Alice reçoit simultanément sur son détecteur le photon message et le photon corrélé, émis indépendamment, ce qui se produit seulement pour une faible fraction des paires reçues. De surcroît, nous avons vu que l'information acquise par Alice, dans la mesure du système composé des deux photons, n'est suffisante pour reconstituer le message que dans un cas sur quatre. C'est un peu comme si, dans *Star Trek*, lors de la téléportation de Monsieur Spock, seuls un quart de ses atomes, pris au hasard, étaient téléportés.

Si cette expérience confirme une nouvelle fois la non-localité de la mécanique quantique, son intérêt pratique est limité. D'une part, un moyen de communication classique est nécessaire, ce qui empêche la simultanéité. D'autre part, seuls des photons ont été ainsi téléportés. Toutefois, on entrevoit maintenant la téléportation d'atomes, ce qui serait plus intéressant, et ces résultats pourraient être utilisés dans le domaine de la cryptographie quantique, une technique de transmission de messages dont la confidentialité est absolue.