



I (De gauche à droite) Alain Aspect, John Clauser et Anton Zeilinger

Le prix Nobel de physique 2022 décerné à Alain Aspect, John Clauser et Anton Zeilinger

Marc Leconte

Membre émérite de la SEE

Le prix Nobel de physique 2022 a été attribué à trois chercheurs, Alain Aspect, de l'université Paris-Saclay et de l'École polytechnique, John Clauser, du laboratoire américain Lawrence-Berkeley, et Anton Zeilinger, de l'université de Vienne, en Autriche. La motivation du comité Nobel indique qu'à l'aide d'expériences révolutionnaires, Alain Aspect, John Clauser et Anton Zeilinger ont démontré le potentiel d'investigation et de contrôle des particules qui sont dans des états intriqués. Ce qui arrive à une particule dans une paire intriquée détermine ce qui arrive à l'autre, même si elles sont vraiment trop éloignées pour interagir. Le développement d'outils expérimentaux par les lauréats a jeté les bases d'une nouvelle ère de la technologie quantique.

Cette récompense qui peut sembler tardive vient couronner une série d'expériences qui tentaient de résoudre une controverse célèbre entre Albert Einstein et Niels Bohr datant de 1935. Le comité Nobel avait il y a 10 ans couronné Serge Haroche et David Wineland pour les premières applications de la *deuxième révolution quantique*. Le prix de cette année complète ce palmarès de manière plus rétroactive en mettant en avant cette deuxième révolution opérée par la mise en évidence et l'existence de l'intrication quantique.

L'expérience de pensée EPR

Pour bien situer l'apport des nouveaux prix Nobel, il nous faut procéder à un retour en arrière, remonter à Einstein et à un article fondamental de l'histoire des sciences. En effet, plus de 70 ans après sa publication, l'article d'Einstein, Podolsky et Rosen (EPR) de 1935 est toujours cité des centaines de fois chaque année dans la littérature

scientifique ce qui est la caractéristique des articles fondateurs. Cet article est la dernière action d'Einstein à l'encontre de la théorie quantique car il ne s'exprimera plus ensuite sur ce sujet. Mais longtemps, la majorité des physiciens n'a guère accordé d'attention au raisonnement de l'article EPR. Ils le considéraient intéressant sur le plan historique, mais sans intérêt dans le contexte de la mécanique quantique moderne et bien souvent l'argument a été mal compris ou complètement déformé y compris par les plus grands physiciens de l'époque. Par exemple Max Born ne pouvait s'empêcher de penser qu'Einstein se cantonnait dans un rejet obstiné de l'indéterminisme et c'est d'ailleurs la célèbre phrase « Dieu ne joue pas aux dés » qui est associée à Einstein. L'argument EPR est issu des célèbres discussions du congrès Solvay de 1927 entre Einstein et Bohr. Einstein tentait d'élaborer des schémas d'expériences de pensée prouvant que la mécanique quantique contenait des contradictions internes.

Rétrospectivement il convient de reconnaître le rôle essentiel d'Einstein dans l'élaboration des concepts et de l'interprétation de la mécanique quantique car ses nombreuses objections ont contribué à l'élaboration du point de vue dit de Copenhague. Par la suite Einstein a changé de point de vue et a cherché à montrer que la mécanique quantique est non pas inexacte ou incohérente mais incomplète car l'article EPR déploie une nouvelle argumentation. Son titre d'abord « *Peut-on considérer que la mécanique quantique donne de la réalité physique une description complète ?* » puis le début de l'article énonce deux questions : la théorie est-elle correcte et est-elle complète, et expose ensuite une définition exhaustive de la réalité : « *Si, sans perturber le système en aucune façon, nous pouvons prédire avec certitude la valeur d'une grandeur physique, alors il existe un élément de la réalité physique correspondant à cette grandeur physique* ». Les auteurs considèrent ensuite deux systèmes (particules) 1 et 2 ayant interagis à un moment donné et effectuent une mesure de position sur le premier système et indiquent alors que « *le deuxième système ne peut être le siège d'aucun changement réel qui serait la conséquence de quelque chose que l'on aurait fait au premier système* » ce qui peut être considéré comme un principe de localité. Afin de montrer l'incomplétude, de la théorie, EPR ajoute que la position du deuxième système est connue alors qu'il n'a pas été perturbé par une mesure. Or cette réalité n'est pas décrite dans le formalisme de la mécanique quantique par la fonction d'onde, par conséquent la description de la réalité par la fonction d'onde est incomplète. Si les propriétés du deuxième système peuvent être déterminées sans le perturber, alors les propriétés préexistent alors qu'elles ne sont pas décrites par la fonction d'onde.

EPR ne pouvait admettre que la réduction de la fonction d'onde opérée par la mesure du système 1 s'appliquât également au système 2. La conclusion était donc que la mécanique quantique était incomplète mais EPR ne pouvait indiquer qu'une telle théorie pouvait exister. L'article a donné lieu à un grand nombre de commentaires de nature philosophique sur les définitions que don-

nait Einstein de la réalité mais cela n'a pas affecté le développement de la physique quantique et le débat semblait rester au niveau épistémologique et ne perturbait pas les physiciens d'autant qu'il s'agissait d'une expérience de pensée. Mais EPR avait mis en évidence une situation dans laquelle deux systèmes étaient décrits comme le disait l'article par une même réalité, ce que Schrödinger en 1935 dans un article complémentaire appela *intrication*.

Les inégalités de Bell

En 1935, lors de la publication de l'article EPR, la mécanique quantique allait de succès en succès et la plupart des physiciens ignoraient ce débat qui leur paraissait académique, l'adhésion à l'une ou l'autre des positions pouvant apparaître comme une option personnelle ou une position épistémologique sans aucune conséquence pratique sur la mise en œuvre du formalisme quantique, ce qu'Einstein lui-même ne contestait pas. Trente ans après, en 1964, la publication d'un court article de John Bell allait modifier radicalement la situation. Reprenant l'argumentation EPR, Bell réussit à traduire en termes mathématiques l'expérience de pensée en y ajoutant des paramètres supplémentaires explicites pouvant être assimilés, dans le raisonnement d'Einstein et de ses collègues, à des variables cachées. Le grand apport de Bell a été de concevoir et démontrer un théorème qui définit des relations (inégalités) que doivent respecter les mesures d'états intriqués dans une théorie locale à variables cachées qui étaient implicites dans l'article. Si des corrélations peuvent être expliquées de façon classique dans un phénomène alors elles ne peuvent dépasser un certain niveau de corrélation. Or le formalisme quantique prévoyait qu'il y avait des situations pour lesquelles les corrélations étaient plus fortes ce qui entraînait une violation des inégalités. Bell proposait de tester les états de spin de photons plutôt que la vitesse et la position de l'argument EPR par des expériences sur des états de spin. C'était un grand progrès dans la mesure où il n'y avait eu que des expériences de pensée irréalisables qui ne permettaient pas de trancher le débat de manière définitive.

Expériences de John Clauser et violation des inégalités de Bell

Plusieurs tentatives ont été tentées dans divers laboratoires de physique dans le monde mais les difficultés de réalisation étaient encore très nombreuses dans les années 1970. En 1969, J. Clauser, M. Horne, A. Shimony et R. Holt démontrèrent dans un article que la paire de photons visibles produits dans la désexcitation d'un atome sautant de niveau en niveau constituait un bon candidat pour une source de photons intriqués. Des expériences furent menées, mais la faible intensité des sources rendait les expériences difficiles à réaliser ce qui expliquait que les premiers résultats aient été contradictoires. Le développement des lasers permit de mettre au point de nouvelles sources de photons intriqués, de plus grande intensité, et d'utiliser des schémas d'expériences plus proches de l'expérience de pensée. En 1972, John Clauser et Stuart Freedman mirent en œuvre l'expérience avec comme source des atomes de calcium et confirmèrent une violation des inégalités de Bell. Cependant, cette expérience pionnière avait des limites. En particulier, en fixant les angles des polariseurs, comment prouver que le système ne s'arrange pas pour produire des corrélations fortes connaissant la configuration en place ?

L'expérience d'Alain Aspect

Avec le développement des lasers, il devint possible au début des années 1980 de mettre au point une nouvelle source de paires de photons intriqués beaucoup plus intense et de mettre en œuvre des schémas proches de l'expérience de pensée. Ainsi Alain Aspect et son équipe ont pu mettre au point une expérience proche du schéma idéal suggéré par Bell, dans lequel les orientations des polariseurs devaient être modifiées aléatoirement à une cadence assez élevée pour que la relativité interdise toute dépendance directe avec le choix de l'orientation des deux polariseurs. La réalisation de ce schéma idéal a été accomplie en 1982. Comme il n'était pas question de modifier mécaniquement l'orientation des po-

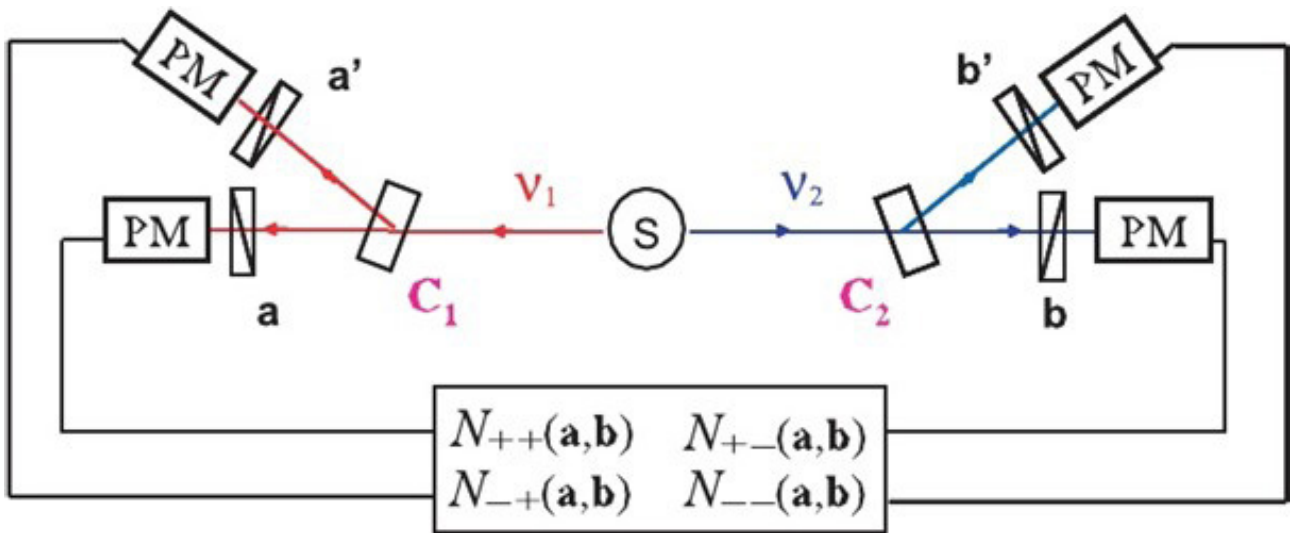


Figure 1 : Expérience avec polariseurs variables. Dans cette expérience, le commutateur optique rapide C1 permet d'aiguiller le photon 1 soit vers un polariseur orienté suivant a, soit vers un polariseur orienté suivant a' : l'ensemble est équivalent à un polariseur unique basculant rapidement (toutes les 10 nanosecondes environ) entre a et a'. Un système analogue réalise un polariseur variable basculant entre b et b', pour analyser 2. Les deux commutateurs étant distants de 12 mètres, les changements d'orientation sont séparés au sens relativiste (source : A. Aspect, J. Dalibard et G. Roger, 1982).

... polariseurs en quelques nanosecondes parce que ces derniers n'auraient pas résisté, A. Aspect, J. Dalibard et G. Roger ont contourné la difficulté en développant des « commutateurs optiques » rapides capables soit de laisser passer la lumière, soit de l'aiguiller vers une seconde voie de sortie (figure 1).

Les résultats de cette dernière configuration ont abouti à une violation convaincante des inégalités de Bell (par 6 écarts-type). C'était un résultat inattendu pour une majorité de physiciens qui pensait que l'expérience montrerait le caractère incomplet de la mécanique quantique, or ce fut le contraire qui arriva ce qui peut faire comparer l'expérience d'Aspect à l'expérience de Michelson et Morley destinée à mettre en évidence le mouvement de la Terre dans l'éther. Dans les deux cas, il fallait changer de paradigme et accepter la réalité de l'intrication et du caractère non local ou non séparable de la représentation quantique pour la première et de l'inutilité de l'éther pour la deuxième.

Les confirmations d'Anton Zeilinger

Vers la fin des années 1980, on commença en effet à développer une troisième génération de sources de paires de photons intriqués, basées sur des effets d'optique non linéaire dans des cristaux anisotropes.

La maîtrise de la direction d'émission des photons intriqués fut un progrès déterminant car cela permettait d'injecter les photons de chaque paire dans deux fibres optiques dirigées vers des directions opposées. Ainsi des expériences ont été réalisées sur des distances de source à détecteur de plusieurs centaines de mètres, voire de dizaines de kilomètres comme dans l'expérience de Genève qui utilisait le réseau commercial de fibres optiques de la compagnie suisse de télécommunications. Il devient possible compte tenu des distances sources et mesures de choisir de façon totalement aléatoire l'orientation de chaque polariseur durant le temps de propagation des photons depuis la source. Une telle expérience, a été réalisée à Innsbruck en 1999 par G. Weihs, T. Jennewein, C. Simon, H. Weinfurter et A. Zeilinger, confirmant de manière complète la violation des inégalités de Bell. Par la suite Anton Zeilinger a développé des protocoles de cryptographie quantique en air libre entre station sol et satellite utilisant la téléportation quantique permise grâce à l'intrication de paires de photons.

Conclusion

Les chercheurs récompensés par le prix Nobel de physique 2022 sont ainsi les artisans de ce qu'on appelle la deuxième révolution quantique, la première

datant des années 50 marquant la découverte et les applications du transistor et du laser. L'argument EPR mettait à jour une propriété étrange non classique que Schrödinger dénomma « *entanglement* », intrication en français, dont il indiqua immédiatement que c'était une propriété fondamentale de la mécanique quantique. Mais EPR était une expérience de pensée et cette propriété ne fut l'objet d'aucune recherche avant les années 60 avec John Bell. C'est donc les grands expérimentateurs qui sont honorés aujourd'hui. La mécanique quantique apparaît depuis lors comme une forteresse imprenable dont les propriétés sont bien souvent contraires au sens commun. L'intrication avec la superposition d'état sont utilisés aujourd'hui par l'informatique quantique ainsi que par la cryptographie quantique.

Sources

« Einstein aujourd'hui ». Alain Aspect, François Bouchet, Eric Brunet, Claude Cohen Tannoudji, Jean Dalibard, Thibault Damour, Olivier Darrigol, Bernard Derrida, Philippe Grangier, Frank Laloë, EDP Sciences CNRS Editions 2011.

Comprenons-nous vraiment la mécanique quantique ? Frank Laloë, CNRS Editions EDP science.