

Albert Einstein joua un rôle majeur dans la naissance de la physique quantique au tout début du xx^e siècle. Mais il n'adhéra jamais à l'interprétation du formalisme quantique développée vers 1925 à Copenhague par Niels Bohr et ses disciples.

Einstein essaya d'abord de trouver une contradiction dans les relations d'incertitude de Heisenberg, qui concernaient le comportement de particules quantiques individuelles. Après les échecs de ces tentatives, contrées par Niels Bohr au congrès Solvay de 1927, il souleva en 1935 une nouvelle objection concernant cette fois des paires de particules. Avec Boris Podolsky et Nathan Rosen, il écrivit un article mettant en cause le caractère complet de la mécanique quantique.

Cet article se fondait sur le cas de deux particules dans un état quantique qualifié aujourd'hui d'intriqué, une situation dont Einstein et ses coauteurs venaient de découvrir la possibilité théorique. Dans cet état, le formalisme quantique prédit de fortes corrélations entre les résultats des mesures effectuées sur chacune des deux particules. Ces corrélations persistent même à des distances suffisamment grandes pour que les mesures ne puissent s'influencer mutuellement, sauf si cette influence s'exerce à une vitesse supérieure à celle de la lumière.

DES VARIABLES CACHÉES ?

Einstein ne pouvait accepter une telle «mystérieuse action à distance» («*spooky action at a distance*», en anglais), et il conclut que la seule interprétation raisonnable de ces corrélations consistait à admettre que chaque particule transporte avec elle, localement, les propriétés qui vont déterminer le résultat des mesures. Les deux particules ayant été préparées dans la même source, ces propriétés sont corrélées dès l'émission, et on ne s'étonne pas que les mesures soient elles-mêmes corrélées.

Pour raisonnable qu'elle soit, cette interprétation n'a aucune contrepartie dans le formalisme quantique, qui ne laisse pas de place pour des propriétés individuelles des particules intriquées, et Einstein conclut son article en suggérant qu'il faut donc compléter le formalisme quantique. Bohr s'opposa à cette conclusion, convaincu que le formalisme quantique perdrait sa cohérence interne si on lui ajoutait de nouveaux paramètres (nommés parfois «variables cachées»).

À ce stade, le conflit ne portait que sur l'interprétation des prédictions quantiques et ne remettait pas celles-ci en cause. La situation changea radicalement en 1964 lorsque le physicien John Stewart Bell, de la division théorique du Cern, à Genève, découvrit que

certaines prédictions de la mécanique quantique sont en contradiction avec la conception réaliste locale du monde défendue par Einstein, dans laquelle chaque particule porte, localement, un ensemble de paramètres définissant sa réalité physique. Il devenait alors possible de trancher entre les deux visions du monde à partir de mesures expérimentales.

Dans une telle expérience, deux photons sont émis par la même source et partent dans des directions opposées vers deux polariseurs éloignés l'un de l'autre (voir la figure page 33). Pour un état intriqué en polarisation, la mécanique quantique prédit que les résultats des mesures de polarisation sur les deux photons sont fortement corrélés. Dans l'esprit du réalisme local, il existe donc une propriété commune aux deux photons, attribuée lors de l'émission de la paire, et déterminant le résultat des mesures. Par un calcul élémentaire, Bell montra alors qu'il existe des contraintes sur les corrélations prévues par n'importe quel modèle réaliste local. Or ces contraintes, explicitées dans les fameuses «inégalités de Bell», ne sont pas respectées par les prédictions quantiques pour certains jeux d'orientations des polariseurs.

La découverte de Bell a déplacé le débat du domaine de l'épistémologie vers celui de la physique expérimentale : il suffit de mesurer les corrélations observées dans des orientations bien choisies pour savoir si elles sont en accord avec les prédictions quantiques, ou si au contraire elles respectent les inégalités de Bell et confirment le caractère réaliste local de la nature.

Il ne fallut que quelques années pour que soit conçu un schéma pratique de test des inégalités de Bell avec des photons. Entre 1972 et 1976, trois expériences furent menées dans les universités de Berkeley, Harvard et Texas A&M. Après quelques résultats contradictoires, les résultats convergèrent sur un accord avec la mécanique quantique, et une violation significative des inégalités de Bell. Mais ces expériences étaient loin du schéma idéal, et plusieurs échappatoires restaient ouvertes pour interpréter ces résultats par un modèle réaliste local, dans l'esprit des idées d'Einstein.

La première de ces failles, et, comme Bell l'a écrit, la plus fondamentale, est «l'échappatoire de localité». Il faut, pour démontrer les inégalités de Bell, supposer que la mesure par un polariseur n'est pas influencée par l'orientation de l'autre polariseur, éloigné du premier. Cette condition de localité est raisonnable, mais dans un débat où l'on envisage des phénomènes nouveaux, il serait préférable de fonder cette hypothèse sur une loi fondamentale. C'est ce que Bell avait proposé dès 1964, en faisant remarquer que si l'orientation de chaque polariseur était modifiée rapidement pendant que

L'AUTEUR



ALAIN ASPECT
directeur
de recherche
émérite au CNRS
et professeur
à l'Institut d'optique
et à l'École
polytechnique,
à Palaiseau

➤ les photons se propageaient de la source aux polariseurs, alors la causalité relativiste – le fait qu’aucune influence ne peut se propager plus vite que la lumière – empêcherait qu’un polariseur puisse « connaître » l’orientation de l’autre au moment de la mesure.

LE VERDICT DE L'EXPÉRIENCE

C’est ce schéma que Philippe Grangier, Gérard Roger, Jean Dalibard et moi avons mis en œuvre à l’Institut d’optique en 1981-1982.

L'Europe va investir des centaines de millions d'euros dans les technologies quantiques

Une première expérience, avec des polariseurs fixes, a conduit à une violation sans précédent des inégalités de Bell (par plus de 40 écarts-types). Puis nous avons développé des commutateurs optiques permettant de modifier toutes les 10 nanosecondes la direction de mesure de polarisation, alors que le temps de vol des photons entre la source et les polariseurs, séparés de 6 mètres, était de 20 nanosecondes. L’expérience donna des résultats sans ambiguïté : les inégalités de Bell étaient violées

même lorsque les orientations des polariseurs étaient modifiées pendant le temps de propagation des photons.

Ce résultat fut confirmé en 1998 par l’équipe de Greg Weihs et Anton Zeilinger, à Innsbruck, en Autriche. En utilisant des photons intriqués injectés dans des fibres optiques, ils purent placer les polariseurs à 400 mètres de la source, et choisir l’orientation du polariseur avec un générateur de nombres aléatoires, pendant le temps de vol des photons.

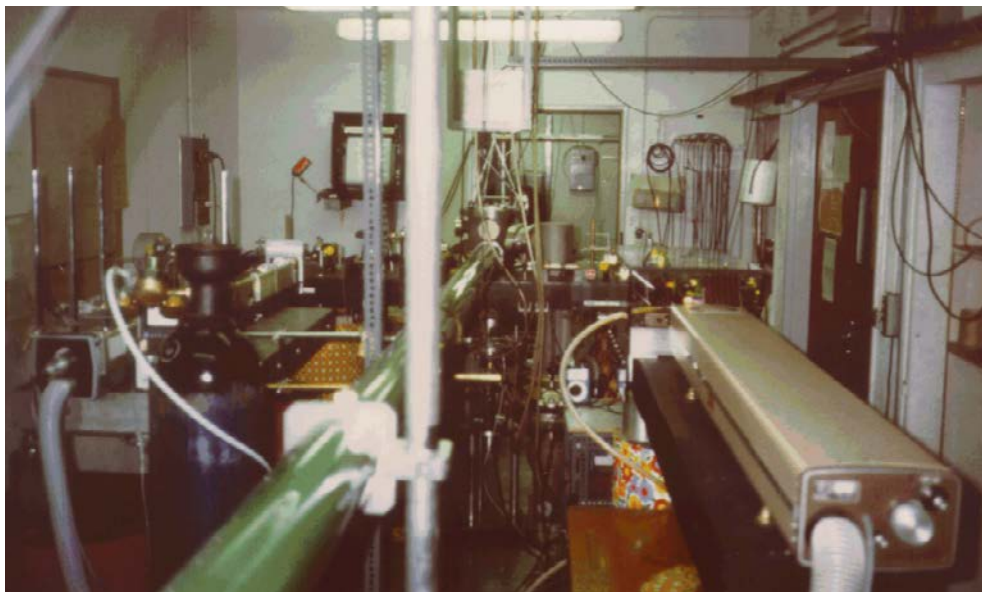
Au même moment, l’équipe de Nicolas Gisin, à Genève, utilisait le réseau commercial de fibres optiques de Swiss Telecom pour montrer que les photons restaient intriqués à plusieurs dizaines de kilomètres l’un de l’autre.

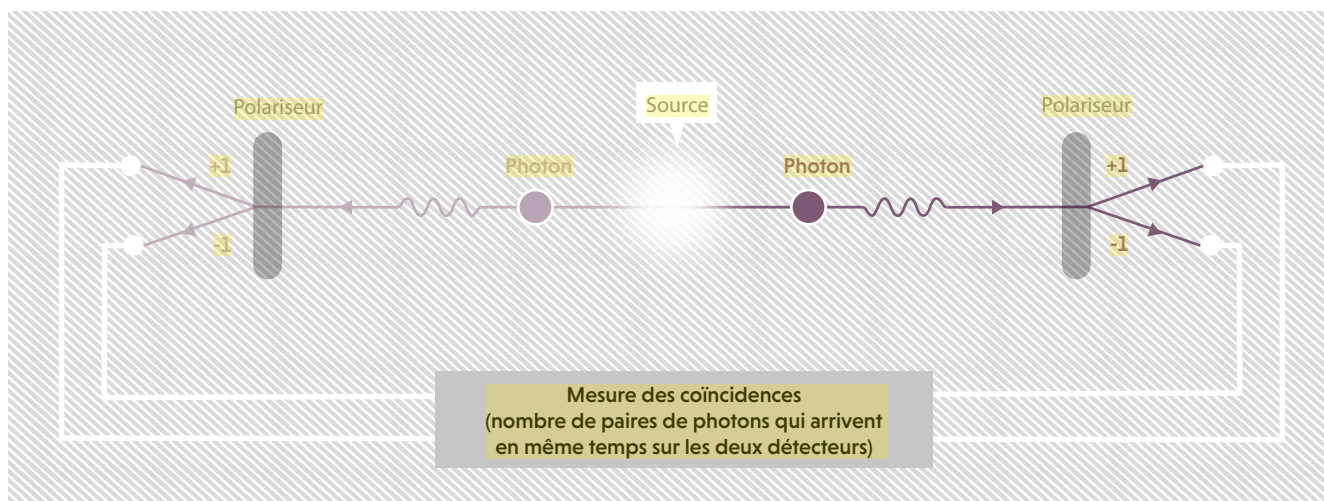
Mais il restait une échappatoire, moins fondamentale selon Bell, mais logiquement acceptable ; elle était liée au fait que, dans toutes ces expériences, les détecteurs n’enregistraient qu’une petite fraction des photons. L’interprétation des expériences exigeait alors d’admettre l’hypothèse de « l’échantillonnage représentatif », c’est-à-dire que l’ensemble des photons détectés donnait une représentation non biaisée de la totalité des photons. Le développement de détecteurs ayant des rendements proches de 100% a permis de clore sans ambiguïté cette échappatoire, en 2013.

Enfin, en 2015, trois équipes (celles de Ronald Hanson, à l’université de Delft, aux Pays-Bas, d’Anton Zeilinger, à l’université de Vienne, en Autriche, et de Lynden Shalm, au NIST de Boulder, aux États-Unis) ont réussi à fermer simultanément les deux échappatoires, mettant un point final au débat. La mécanique quantique sort victorieuse, et l’on doit renoncer à la vision réaliste locale du monde défendue par Einstein.

L’observation expérimentale de la violation des inégalités de Bell a eu deux conséquences

Cette photo d’époque montre le dispositif de l’expérience de 1982. On distingue les trois lasers utilisés pour exciter des atomes qui vont réémettre les paires de photons intriqués. Chaque photon se propage dans un tuyau destiné à éviter les perturbations dues aux turbulences de l’air, avant d’être soumis à la mesure de polarisation. On voit ici l’un de ces tuyaux (en vert), long de 6 mètres.





Dans les expériences de 1982 de l'équipe d'Alain Aspect, une source émet des paires de photons intriqués. Chaque photon est dirigé vers un dispositif qui en mesure la polarisation selon des directions qui sont modifiées pendant la propagation des photons. Les résultats des mesures simultanées (en coïncidence) sur les deux photons sont enregistrés et soumis au test de Bell.

importantes sur la physique des trois dernières décennies. L'une est conceptuelle: nous avons dû accepter la révolution quantique dans son aspect le plus contre-intuitif, la non-localité quantique. L'autre est plus concrète: nous avons assisté au développement de technologies quantiques fondées sur l'intrication, au cœur de la seconde révolution quantique.

C'est à Einstein lui-même, à son corps défendant, que nous devons l'idée de non-localité quantique. En 1949, dans sa réponse à Bohr dans le livre *Albert Einstein: philosopher-scientist*, Einstein revient sur le raisonnement EPR. Il conclut que les seules façons de réfuter sa conclusion (que chaque particule, ou système – notés ici S1 et S2 –, a sa propre réalité physique locale) seraient «soit de supposer que la mesure sur S1 change (par télépathie [ce sont les mots écrits par Einstein, pour discréditer cette possibilité]) la situation réelle de S2, soit de refuser l'indépendance des situations réelles de deux systèmes séparés l'un de l'autre spatialement». Einstein raisonne ici par l'absurde et écrit que «les deux alternatives [lui] semblent inacceptables».

Mais après la violation expérimentale des inégalités de Bell, c'est à la conclusion d'Einstein qu'il faut renoncer, et on doit admettre l'une ou l'autre des deux hypothèses qu'il considérait absurdes, qui sont en fait deux façons de voir la non-localité quantique: (i) il peut y avoir une influence instantanée de la mesure en S1 sur le système séparé S2; (ii) les systèmes S1 et S2, bien que séparés spatialement, n'ont pas des situations réelles indépendantes. (Quand Einstein parle de séparation spatiale, il faut le comprendre au sens relativiste: aucun signal voyageant à une vitesse inférieure à celle de la lumière ne peut relier deux événements séparés spatialement.)

On peut faire remonter les premières idées sur les technologies quantiques à un article de Richard Feynman, au début des années 1980.

Prenant conscience du caractère extraordinaire de l'intrication, révélé par la violation des inégalités de Bell, il a suggéré qu'un ordinateur quantique, formé de bits quantiques intriqués, serait exponentiellement plus puissant que les ordinateurs classiques. Avec le développement de techniques expérimentales de plus en plus élaborées visant à maîtriser l'intrication, les premières démonstrations de calcul quantique élémentaire ont déjà été publiées.

L'ÈRE DE L'INFORMATION QUANTIQUE

Par ailleurs, l'utilisation de sources de photons uniques ou intriqués, initialement développées pour tester les fondements de la mécanique quantique, a permis des démonstrations spectaculaires de transmission d'information dont la sécurité repose sur les fondements de la mécanique quantique: c'est la fameuse cryptographie quantique.

Aujourd'hui, la communauté européenne a décidé d'investir des centaines de millions d'euros dans le développement des technologies quantiques, en stimulant la collaboration entre laboratoires académiques et industriels, tandis que la Chine fait un effort analogue, voire plus important. Aux États-Unis, cette recherche est menée grâce aux sommes considérables investies par les compagnies privées Google, Intel, Microsoft, donnant l'exemple à des sociétés européennes, comme Atos, qui viennent de se lancer dans la course.

Quand on se retourne sur cette histoire, on voit une discussion sur les fondements être tranchée par des expériences, dont les succès ont stimulé les idées sur l'information, le calcul et la métrologie quantiques. Saurons-nous leur donner une forme utilisable pour des applications qui pourraient changer la société? La réponse sera expérimentale. Fondamentale ou appliquée, la science a besoin des expériences pour progresser. ■

BIBLIOGRAPHIE

A. Aspect, **Le débat Einstein-Bohr est clos**, *Dossier Pour la Science*, n° 93, oct.-déc. 2016.

A. Aspect *et al.*, **Experimental realization of Einstein-Podolsky-Rosen-Bohm Gedankenexperiment: A new violation of Bell's inequalities**, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 49, pp. 91-94, 1982.

A. Aspect *et al.*, **Experimental test of Bell's inequalities using time-varying analyzers**, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 49, pp. 1804-1807, 1982.

N. Bohr, **Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete?**, *Phys. Rev.*, vol. 48, pp. 696-702, 1935.

A. Einstein *et al.*, **Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete?**, *Phys. Rev.*, vol. 47, pp. 777-780, 1935.