
«Sans physique quantique, pas d'ordinateur. Elle a bouleversé nos vies»

Alain Aspect, prix Nobel de physique

Trancher un vieux débat entre deux sommités de la physique quantique, Niels Bohr et Albert Einstein, telle est l'entreprise dans laquelle s'est lancé le physicien français Alain Aspect, il y a un demi-siècle. Il s'agissait de démontrer par l'expérimentation une réalité qui se cantonnait, à l'époque d'Einstein, au formalisme quantique, à savoir les outils mathématiques à la base de la théorie quantique.

Ses expériences ont permis, en 1982, d'invalider la vision quasi philosophique du monde défendue par Einstein. Ce faisant, Alain Aspect a mis en évidence une des propriétés les plus intrigantes de l'intrication quantique. Ses découvertes lui ont valu, entre autres, le prix Nobel de physique, reçu en 2022 aux côtés de l'Américain John Clauser et de l'Autrichien Anton Zeilinger.

En début d'année, Alain Aspect a publié *Si Einstein avait su* (1), un ouvrage accessible au grand public dans lequel il retrace ce qu'il appelle les deux grandes révolutions quantiques: les grandes découvertes jetant les bases de la physique quantique, pour la première, puis celles concernant l'intrication entre les particules, auxquelles il a contribué, pour la seconde.

Par
**Benjamin
Hermann**

Vous avez souvent été présenté comme «celui qui a donné tort à Einstein», mais vous n'appréciez pas cette formulation. Non seulement, vous l'admirez mais, en plus, c'est lui qui, en se trompant, vous a mis sur la bonne voie...

C'est même plus nuancé que cela. Je lui ai donné tort dans la vision qu'il avait du monde, mais il ne faut pas croire qu'il a commis une faute de raisonnement en tant que physicien dans ses équations. Par ailleurs, c'est lui qui a mis le doigt sur une propriété étonnante de la physique quantique: l'intrication. Quand deux particules ayant eu une interaction par le passé sont à distance, les résultats des mesures effectuées sur chacune des deux sont fortement corrélés. Pour simplifier, disons qu'on observe la couleur des yeux de jumeaux en n'ayant que deux possibilités: yeux clairs et yeux foncés. Si on trouve clair d'un côté, on va trouver clair de l'autre, et vice versa. Là, l'explication naturelle est que les jumeaux ont les mêmes chromosomes. Or, dans le calcul mathématique qui prévoit une forte corrélation pour la polarisation des photons, il n'y a pas de chromosomes. L'explication quantique, c'est un calcul abstrait qui se fait dans l'espace ...

A full-page photograph of two middle-aged men standing in front of a modern glass-walled building. Both men are wearing grey blazers over light-colored shirts and blue jeans. The man on the right is also wearing glasses and has a beard. They are both standing with their arms crossed. The background shows the glass facade of the building, which reflects the sky and other structures. A green circular graphic is in the top right corner.

Le grand
entretien

... mathématique, distinct de l'espace dans lequel nous vivons. Ce calcul dit que si vous trouvez «plus» d'un côté, vous trouverez «plus» de l'autre; si vous trouvez «moins» d'un côté, vous trouverez «moins» de l'autre. Einstein partait du principe que, tout de même, ces particules se trouvent dans le monde réel et c'est dans celui-ci qu'il faut donner une explication. Si elles sont à distance, je ne peux pas accepter cette corrélation très forte sans imaginer que ces deux particules aient une propriété commune. Or, comme le formalisme connu de la mécanique quantique ne met pas en jeu cette propriété commune, il en déduit que ces propriétés vont au-delà de ce que dit la physique quantique. Il considère qu'il faut la compléter. Il voit la physique quantique comme une espèce de théorie statistique qui ne décrit pas tous les détails microscopiques des choses. Quant à moi, ce que j'ai fait, ce sont des expériences prouvant que son interprétation ne tient pas.

Comment l'a-t-on su?

Parce qu'en 1964, le physicien John Bell a démontré qu'en suivant jusqu'au bout le raisonnement d'Einstein, il fallait prévoir des corrélations moins fortes que celles prévues par la physique quantique. Qu'a répondu Einstein? Rien du tout, puisque le travail de Bell est postérieur à sa mort, d'où le titre *Si Einstein avait su*. C'est pourquoi je me hasarde, dans le dernier chapitre, à imaginer la réaction d'Einstein face à ce résultat. En définitive, l'affaire est bien plus subtile que de dire qu'Einstein avait tort. Par ailleurs, il faut l'admirer pour sa perspicacité d'avoir relevé à quel point l'intrication est quelque chose d'incroyable.

A l'époque d'Einstein, le débat se déroule face à Niels Bohr, le maître à penser de l'école de Copenhague.

Ils ont des conceptions différentes du monde, de la réalité physique. Pour Niels Bohr, la réalité physique ne peut pas être attribuée à un objet sans préciser l'instrument avec lequel on le mesure. Pour Einstein, un objet possède des propriétés indépendamment de la façon dont on l'observe, d'où un certain nombre de citations amusantes de sa part, comme «j'aime à penser que la lune est là, même quand je ne la regarde pas». Personnellement, je suis un einsteinien convaincu, je pense que les objets ont une réalité physique indépendante du contexte. Mais beaucoup de gens, dans la lignée de l'école de Copenhague, pensent que ça n'a pas d'intérêt de parler de la réalité physique sans préciser avec quel appareil on la mesure.

La controverse scientifique entre Einstein et Bohr s'est en partie déroulée lors d'un congrès Solvay, à l'hôtel Métropole, à Bruxelles.

Il y eut deux débats. Le premier, en 1927 au congrès Solvay, est un débat célèbre qui ne portait pas sur l'intrication, mais sur une particule unique et rien qu'une particule unique. Einstein a essayé de démontrer qu'on pouvait mesurer à la fois la vitesse et la position d'une particule mieux que ce qu'autorisait le formalisme quantique. Sa conclusion était que ce formalisme devait être complété. Là, Bohr a répliqué

avec un raisonnement de physicien. En résumé, il lui a dit «mon cher Albert, tu oublies de prendre en compte le fait que l'appareil que tu utilises pour mesurer est lui-même quantique». Son raisonnement est impeccable, Einstein n'insiste pas. Le second débat débute en 1935. Cette fois, il s'agit bien d'intrication. Il est essentiel de faire la distinction entre les deux débats, notamment parce que quand j'ai entamé mon travail en 1974, beaucoup me disaient que ça n'avait aucun intérêt, parce que Bohr avait répondu de manière satisfaisante à Einstein. Or, si sa démonstration était impeccable en 1927, celle de 1935 ne l'était pas. Son argumentation n'était plus purement scientifique, mais plutôt épistémologique, sur la nature de la réalité physique.

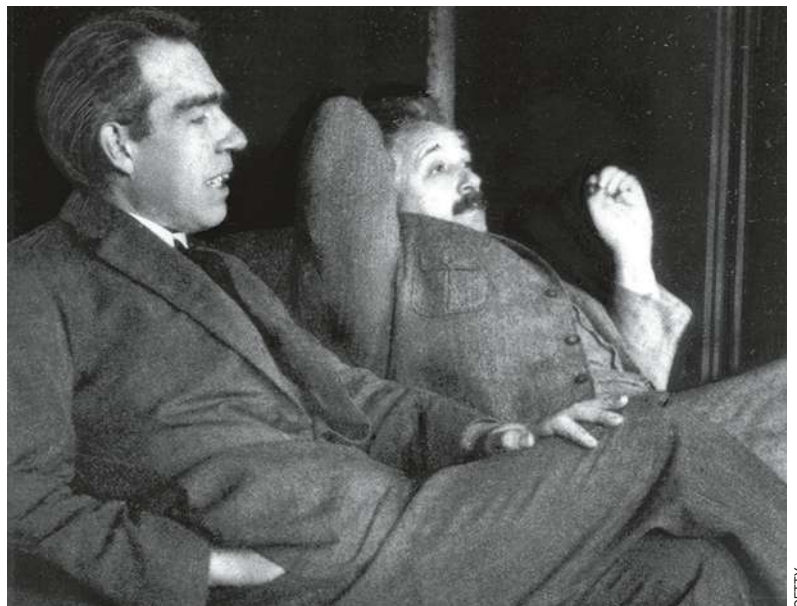
Einstein n'a pas été convaincu?

La réponse de 1935, il ne l'a jamais acceptée.

Pour toute personne non rompue à la physique quantique, qu'une relation subsiste entre deux particules qui ont été en contact, mais qui sont séparées, semble étrange. Comme si des informations s'échangeaient instantanément entre elles. Or, qu'une information circule entre deux particules plus rapidement que la vitesse de la lumière n'est pas possible. C'est Einstein lui-même qui l'a démontré, n'est-ce pas?

Ce dernier point mérite d'être nuancé. La position d'Einstein est celle du réalisme local, c'est-à-dire le fait que, d'une part, on attribue à un objet une réalité physique indépendante de l'appareil de mesure (le réalisme) et, d'autre part, qu'entre ces deux objets séparés, les réalités physiques sont indépendantes l'une de l'autre (la localité). En fait, il faut renoncer à un de ces deux éléments. Ce qu'il est important de comprendre, c'est que le formalisme mathématique de la physique quantique fonctionne à tous les coups. Personne n'a remis cela en question. Les calculs, qui sont impeccables, se font dans des espaces mathématiques abstraits. Ce qui est bizarre, c'est qu'il semble y avoir un lien instantané entre deux particules intriquées.

Alain Aspect a tranché un débat scientifique entre Niels Bohr et Albert Einstein. Au détriment de ce dernier...



«Je lutte contre cette idée que les sciences ne seraient ni importantes ni intéressantes.»

Ce qu'on peut démontrer en utilisant les lois de la physique quantique, c'est qu'on ne peut pas utiliser cette apparente interaction instantanée pour transmettre un signal utilisable plus vite que la lumière. «Utilisable», ça veut par exemple dire que j'appuie sur un bouton et que plus loin, une lampe s'allume, une bombe explose ou que sais-je. Ayant beaucoup lu Einstein, je pense que ce à quoi il tenait le plus, c'est à l'idée que les objets aient une réalité physique indépendante. Je pense qu'il aurait accepté l'idée d'une espèce d'interaction instantanée, sachant qu'on ne peut pas l'utiliser pour une action réelle et concrète. C'est mon point de vue, celui de John Bell aussi. Il me semble qu'Einstein aurait pu l'adopter. Ou alors il était tellement intelligent qu'il aurait peut-être trouvé une troisième solution.

Ce point de vue que vos découvertes vous permettent de défendre est donc celui de la «non-localité quantique».
Oui. La non-localité quantique n'est pas qu'une lubie de chercheur. Elle me permet de comprendre des technologies quantiques, comme la cryptographie quantique ou la téléportation quantique. On parle bien ici de téléportation d'information quantique, pas de matière. Si j'accepte la non-localité quantique, je peux avoir une bonne intuition du phénomène.

Entre Einstein et vous, l'apport du physicien nord-irlandais John Bell est déterminante. En 1964, il a formulé ce qu'on appelle «les inégalités de Bell», sur lesquelles vous vous êtes basé pour vos recherches. De quoi s'agit-il?

Bell a eu ce coup de génie de prendre au sérieux l'idée d'Einstein selon laquelle il fallait compléter la mécanique quantique. Lorsque deux particules – en l'occurrence deux photons, pour mes expériences – partent de la source, elles ont une propriété en commun. On peut faire des calculs statistiques sur cette propriété. Bell a démontré qu'il y a une limite supérieure aux corrélations observables. Mais cette limite est dépassée par les prévisions quantiques, si on choisit judicieusement les angles entre les polariseurs utilisés. En faisant mes expériences, j'ai pu démontrer qu'en effet, on dépasse la limite indiquée par Bell, ce qui est en parfait accord avec ce que prévoit le formalisme quantique, donc en désaccord avec le réalisme local d'Einstein.

C'est en découvrant ces inégalités de Bell que vous avez accepté le défi, en quelque sorte?

Plus que cela. J'étais à la recherche d'un sujet de thèse qui me passionne vraiment. En lisant l'article de Bell, j'ai constaté qu'on pouvait trancher par une expérience ce débat entre Bohr et Einstein, ces deux héros de la physique. Les bras m'en sont tombés, j'étais bouleversé. On était en 1974. De premières expériences avaient déjà été menées à Berkeley et à Harvard, il fallait donc que j'aille un cran plus loin. J'ai trouvé un défi dans l'article de Bell: changer les orientations des polariseurs pendant que les photons se propagent. Les autres ne l'avaient pas fait. Ça allait devenir mon projet.

Comment expliquer qu'en physique quantique, il soit techniquement si délicat de mettre en œuvre des expériences?

Pour comprendre, il suffit de se référer à ce qu'est une expérience de pensée. Einstein en a fait toute sa vie. On imagine une situation idéalisée, sans savoir si elle est réalisable expérimentalement. La seule chose qu'on lui demande, c'est d'obéir aux lois connues de la physique. Einstein a imaginé une situation d'intrication entre deux particules, sans s'imaginer qu'on pourrait un jour la mettre en œuvre. L'étonnement, ce n'est pas la complexité, mais qu'un jour on y arrive. Cela demande une série d'étapes, un enchaînement de progrès conceptuels et techniques, bâtis les uns sur les autres. Ils ne se sont d'ailleurs pas arrêtés après mon expérience.

Ce sont les «échappatoires», ces imperfections de votre expérience, qui ont pu être fermées par la suite?

Il y avait plusieurs défauts dans mon expérience, des échappatoires qui ont été progressivement refermées, encore une fois grâce à des avancées technologiques. Une des plus spectaculaires, c'est le fait qu'un moyen a été trouvé pour émettre des photons intriqués dans des directions bien précises. On peut les injecter dans des fibres optiques, ce qui permet d'effectuer des mesures de photons séparés de centaines de mètres, voire de kilomètres. Entretemps, un collègue chinois a pu démontrer l'intrication à plus de 1.000 kilomètres. Un autre progrès a été réalisé dans les détecteurs, quasiment parfaits, détectant la totalité des photons. La troisième échappatoire, que certains ont envisagée, est celle du superdéterminisme. Là, on sort de la physique pour entrer dans la métaphysique. C'est l'idée que, même en confiant les réglages des appareils à des générateurs de nombres aléatoires ou à des humains, ces réglages seraient prédéterminés, comme écrits d'avance. Personnellement, je pense que si on avance des arguments comme ceux-là, ça ne sert à rien de faire de la physique.

Au-delà de la physique quantique, votre livre parle-t-il aussi d'un sujet plus large? Celui de la science et des conditions d'élaboration du savoir...

Bien sûr, mais il ne faut quand même pas négliger l'importance de la physique quantique. Les deux grandes révolutions du XX^e siècle sont la relativité et la physique quantique. La première n'a eu qu'un ...



**«Le formalisme
mathématique
de la physique
quantique fonctionne
à tous les coups.
Personne n'a remis
cela en question.»**

... impact notable sur nos vies, l'énergie nucléaire, alors que la seconde les a bouleversées par de nombreuses applications. Sans physique quantique, pas de transistor, pas de laser, pas d'ordinateur, etc. Elle a autant bouleversé nos sociétés que l'invention de la machine à vapeur un siècle plus tôt. Mais la différence avec tout ce qui a précédé en physique, c'est que les calculs quantiques ne se passent pas dans notre espace.

Qu'est-ce que cela signifie?

Prenez la mécanique de Newton, qui décrit le mouvement des planètes, ou le mouvement de n'importe quel projectile. Ça se passe dans notre espace. A chaque instant, je peux vous dire où se trouve le projectile, sa vitesse, son accélération, etc. La physique quantique, elle, se situe dans un espace abstrait. C'est ce qui la rend si étrange. C'est également ce qui rend si stupéfiant le fait que des esprits comme Heisenberg ou Schrödinger aient découvert leurs équations dès 1925. C'est du génie. J'aime raconter quels étaient les problèmes qui se posaient aux physiciens au début du XX^e siècle. En bricolant, ils sont progressivement arrivés à introduire des idées: le quantification de Planck en 1900, le photon d'Einstein en 1905, l'atome de Bohr en 1913, etc. Ça se constitue petit à petit puis, d'un seul coup, en 1925, on a un ensemble d'équations qui rendent compte de tout. C'est fascinant. La seconde partie du livre est consacrée à mes propres expériences, aussi pour montrer la réalité d'un expérimentateur au quotidien, avec ses problèmes à surmonter, ses solutions à trouver. On peut appeler cela du bricolage, mais ce bricolage suppose une profonde connaissance de la physique en amont. Un autre élément que je veux mettre en lumière, c'est le fait qu'on n'est pas omniscient. La quasi-totalité des techniques mises en jeu dans mon expérience, je l'ai apprise auprès de collègues qui m'ont expliqué ce dont j'avais besoin ou prêté du matériel.

Cet exercice de pédagogie est-il indispensable à une époque où la science semble malmenée?

Quand je fais des conférences, je constate que cela suscite de l'intérêt. Il y a un public pour la science. Ce qui m'inquiète le plus, en revanche, c'est une certaine défiance des jeunes qui pensent que la science est coupable des problèmes actuels de la planète. Je leur réponds qu'ils ont raison d'être inquiets mais qu'ils ne résoudront pas les problèmes de la planète sans connaître la science. Cela m'agace aussi d'entendre des responsables politiques et autres leaders d'opinion qui proclament fièrement nuls en maths et en sciences. Se vanteraient-ils d'avoir été nuls en littérature ou en langue française? Je lutte contre cette idée que les sciences ne seraient ni importantes ni intéressantes.

Vous n'aimez pas non plus quand on affirme que «la science, c'est le doute».

Des gens le disent, en effet, considérant que tous les avis sont permis. Mais la science n'est pas le doute. Le doute apparaît lorsqu'un nouveau sujet émerge, qu'on cherche à le comprendre. Là, plusieurs solutions sont envisagées, c'est le débat scientifique. Puis à un moment, la majorité des scientifiques tombent

Bio express

1947

Naissance et enfance à Astaffort, près d'Agen (sud-ouest de la France).

1965

Etudiant à l'Ecole normale supérieure (ENS) de Cachan (aujourd'hui ENS Paris-Saclay) et à l'université Paris-Sud.

1971

Professeur à l'Ecole normale supérieure de Yaoundé (Cameroun).

1974

Maître-assistant à l'ENS de Cachan. Lancement de la thèse de doctorat.

1982

Résultats de «l'expérience d'Aspect» tranchant un débat entre Niels Bohr et Albert Einstein.

2022

Prix Nobel de physique aux côtés de John Clauser et Anton Zeilinger, «pour les expériences avec des photons intriqués établissant les violations des inégalités de Bell et ouvrant une voie pionnière vers l'informatique quantique».

d'accord. C'est le consensus autour d'un fait scientifique établi. Les équations de Maxwell établies au XIX^e siècle régissent les propriétés des ondes électromagnétiques dont on se sert pour la radio, la télévision, les téléphones portables. Il n'y a pas de doute: ces ondes sont comme Maxwell les a décrites. J'aime transmettre ce message sur la méthode scientifique, qui est robuste. Elle attaque un problème, il y a des discussions scientifiques, puis un consensus.

Les découvertes autour de l'intrication quantique annoncent-elles une autre révolution dans notre quotidien?

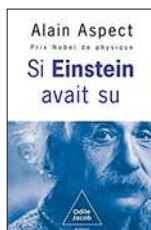
L'histoire nous montre que ça prend des décennies. Le transistor a été inventé en 1947, alors qu'on avait déjà toute la théorie en 1925. On peut avoir l'idée au moment où la technologie n'est pas encore vraiment au point. Si vous êtes trop en amont, c'est une expérience de pensée. Si vous êtes juste un peu en avance, vous pouvez dire «la technologie n'est pas suffisante, mais le pas pour y arriver n'est plus impensable». Dans les technologies quantiques, ce pas n'est pas incroyable, mais il est encore grand. L'ordinateur quantique dont on rêve requiert encore un très grand pas, même si on identifie les chemins pour y parvenir.

Les technologies quantiques à venir peuvent faire peur, mais peuvent-elles aussi apporter des solutions à des problèmes extrêmement complexes?

Je ne pense pas qu'il faille avoir peur, pas plus qu'il fallait craindre le transistor. Comme toute technologie, on peut en faire un bon ou un mauvais usage. L'ordinateur quantique, s'il fonctionne comme on en rêve, devrait permettre de résoudre des problèmes inaccessibles aux ordinateurs classiques, de mettre au point de nouveaux médicaments ou matériaux, de mieux équilibrer le réseau électrique d'un pays, etc. Il permettra de résoudre des problèmes insolubles à ce jour, mais qui ne sont pas d'une nature fondamentalement différente. Il ne faut pas négliger une autre façon d'envisager l'avantage quantique: résoudre des problèmes accessibles aux gros ordinateurs actuels mais en dépensant beaucoup moins d'électricité.

Même lorsqu'on a reçu les honneurs, y compris la reconnaissance suprême du prix Nobel, reste-t-on pleinement fasciné, curieux et intrigué par ce qui reste à découvrir?

Oh oui! Dans mon domaine, j'aimerais quand même savoir si un jour, on arrivera à construire l'ordinateur quantique idéal, celui dont on aura réussi à corriger les erreurs en temps réel. Je ne sais pas si je le verrai de mon vivant, mais ça me fascine. Il y a beaucoup de problèmes physiques hors de mon domaine. Mais dans ceux que je crois comprendre, il y a la fameuse question de la matière noire, dont on a toutes les raisons de penser qu'elle est là, sans qu'on arrive à l'observer. C'est un mystère excitant. Si j'étais jeune, c'est peut-être dans ce domaine que j'irais travailler. ●



(1) *Si Einstein avait su*, par Alain Aspect, Odile Jacob, 368 p.