

Alain Aspect,

la physique quantique et le prix Nobel

Perola Milman (perola.milman@cnrs.fr) et **Sara Ducci** (sara.ducci@u-paris.fr)

Laboratoire Matériaux et Phénomènes Quantiques (UMR 7162 CNRS et Université Paris-Cité)
10, rue Alice Domon et Léonie Duquet, 75013 Paris

Le prix Nobel de physique 2022 a couronné les expériences pionnières sur l'intrication, une des propriétés les plus intrigantes de la physique quantique. Aux côtés de John Clauser et Anton Zeilinger, figure notre collègue Alain Aspect, dont le travail avait déjà été reconnu par de nombreuses récompenses, comme la médaille d'or du CNRS en 2005 et le prix Wolf de physique en 2010.

Nous retraçons ici les grandes lignes du parcours qui lui a valu cette reconnaissance tant attendue, tout en présentant le contexte qui permet de mettre en valeur ses contributions passées et actuelles à l'enseignement et à la recherche.

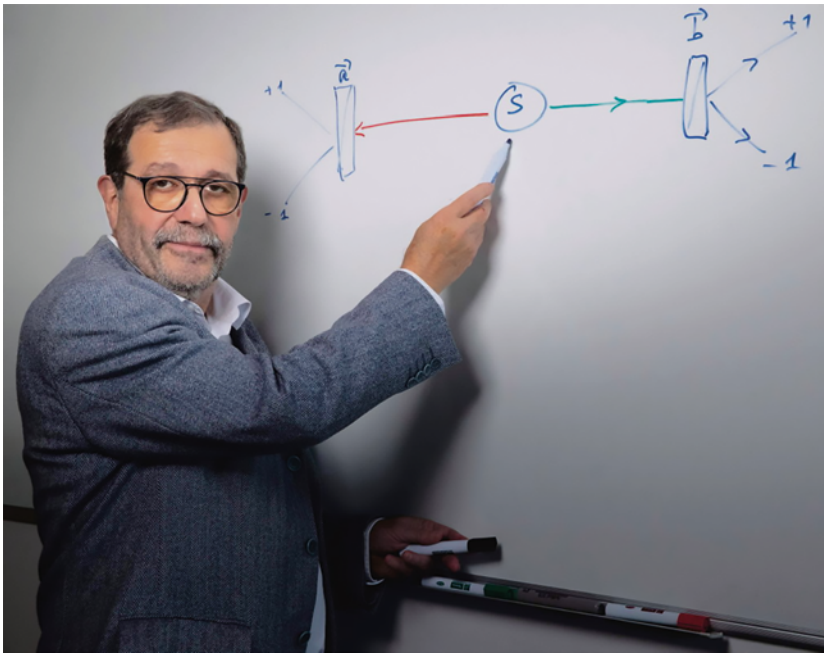
La théorie quantique est-elle complète ?

Nous savons tous qu'il est souvent très difficile, voire impossible, d'isoler les résultats scientifiques du contexte auquel ils sont associés et ce, tout particulièrement lorsque nous cherchons à comprendre l'émergence d'une révolution intellectuelle majeure, comme la physique quantique. Selon une célèbre citation attribuée à Niels Bohr, l'un des pionniers de l'interprétation la plus largement acceptée de la physique quantique : « Celui qui n'est pas choqué par la physique quantique ne l'a pas comprise ». Cependant, de nos jours, pour bon nombre de jeunes chercheurs, c'est plutôt cette citation qui suscite un certain étonnement ! Les principes fondamentaux de la physique quantique semblent si bien établis qu'ils sont désormais utilisés sans états d'âme par la communauté scientifique, servant de base par exemple à l'élaboration de nouveaux algorithmes mis en œuvre dans des dispositifs qui pourraient être à l'origine de futurs ordinateurs quantiques.

Ainsi, dans notre époque déjà éloignée des premières discussions entourant les concepts clés de la mécanique quantique, nous risquons de ne pas saisir pleinement l'importance des travaux de recherche récompensés en 2022 par le prix Nobel de physique. C'est pourquoi nous décrivons dans les lignes qui suivent le parcours scientifique collectif ayant abouti à cette distinction, en mettant en lumière le rôle joué par notre collègue Alain Aspect (fig. 1). En effet, son travail a contribué à concrétiser des notions théoriques abstraites, les transformant en grandeurs physiques mesurables grâce à des protocoles expérimentaux aussi élaborés et créatifs que rigoureux.

Le débat sur l'interprétation de la physique quantique a suscité d'intenses discussions au début du XX^e siècle, impliquant des penseurs majeurs de divers domaines tels que les mathématiques, la philosophie et bien sûr la physique. L'interprétation de Copenhague, développée dans les années 1930, est la plus couramment utilisée de nos jours. Bien qu'Albert

“ [Dans l'article écrit en 1935,] Einstein avait pour objectif de démontrer que l'aspect fondamentalement probabiliste de la théorie quantique la rendait insuffisante en tant que description complète de la réalité physique.”



1. Alain Aspect devant un schéma de l'expérience permettant le test des inégalités de Bell, comme celui montré dans la figure 3.

Einstein n'ait pas directement contribué à sa création, il a joué le rôle important d'opposant de poids en la critiquant, en particulier son caractère probabiliste inhérent. En effet, la théorie quantique admet l'existence d'états physiques qui, bien qu'étant parfaitement déterminés, peuvent aboutir à différents résultats, distribués de manière aléatoire, lors de la mesure d'une quantité physique — comme par exemple la position d'une particule. Ses débats avec Bohr inspirèrent les célèbres phrases d'Einstein : « Dieu ne joue pas aux dés ! », et : « Est-ce que la Lune est là si personne ne la regarde ? », et donnèrent à Schrödinger l'idée de son paradoxe du chat ni mort ni vivant.

Einstein voulait démontrer que l'aspect fondamentalement probabiliste de la théorie quantique la rendait insuffisante en tant que description complète de la réalité physique. Son argumentation la plus célèbre a été élaborée en collaboration avec Boris Podolsky et Nathan Rosen, dans l'article "Can Quantum Mechanical Description

of Physical Reality Be Considered Complete?" écrit en 1935 [1] et traitant d'un système de deux particules corrélées dont on arriverait à mesurer les positions et impulsions respectives. Or, la théorie quantique stipule que les grandeurs position et impulsion sont complémentaires, ce qui signifie qu'il existe une limite fondamentale à la précision avec laquelle il est possible de les connaître simultanément. De cet article est né ce qui a été appelé le « paradoxe EPR », car les auteurs ont conclu que si les propriétés de ces deux particules corrélées étaient mesurées individuellement et localement (sans que les résultats puissent être transmis entre elles), les valeurs de leurs positions et de leurs impulsions seraient connues en même temps. Cela entraînerait une contradiction avec le principe d'incompatibilité mentionné précédemment, formalisé par les relations d'indétermination position-impulsion énoncées par Heisenberg. La réponse des auteurs à la question posée dans le titre de ce célèbre article, « La mécanique

quantique peut-elle être considérée comme complète ? », est donc négative, et ceci laisse la porte ouverte à la possibilité de compléter la théorie, par exemple avec des variables qui ont été appelées par la suite « variables cachées ».

L'article EPR est troublant pour différentes raisons, surtout à la lumière des connaissances d'aujourd'hui. L'argumentation employée est tellement décalée de l'interprétation de Copenhague qu'elle devient difficile à suivre pour quelqu'un avec la formation actuelle en physique quantique. En outre, on y observe un détail formel surprenant : il ne contient aucune référence à d'autres articles, car il présente une problématique entièrement nouvelle en physique. C'est peut-être pourquoi trente ans se sont passés entre sa publication et la formalisation mathématique de ce paradoxe, puis encore vingt ans avant qu'Alain Aspect et ses collègues parviennent à réfuter expérimentalement ce paradoxe de manière convaincante.

Une réponse à l'article EPR a été immédiatement apportée par Niels Bohr, également en 1935 [2], qui a relevé plusieurs failles dans l'argumentation des auteurs, pointant par exemple que la connaissance de la position d'une particule par un observateur n'implique pas que cette quantité soit déterminée pour l'autre, à moins qu'une mesure soit faite. En outre, si l'observateur de la seconde particule décide de mesurer plutôt son impulsion, celle-ci reste indéterminée justement à cause de la mesure de la position sur la première particule. Bien que très convaincants, les arguments de Bohr ne constituent pas une preuve définitive et mesurable à la question posée, considérée par certains comme du ressort de l'épistémologie. À ce stade, les débats ne faisaient qu'émerger, et ils tournaient principalement autour de la formalisation de la notion de variables cachées d'une part, et de celle des corrélations décrites dans l'article EPR d'autre part. Ce type de corrélations a par ailleurs joué un rôle central dans l'argumentation de Bohr, et a été appelé « intrication » par Schrödinger dans sa recension des deux articles de 1935 [3].

>>>



2. John S. Bell (à droite) discutant avec Albert Messiah (à gauche) et Alain Aspect (au centre), lors d'une conférence en l'honneur d'Alfred Kastler en 1985.

>>>

Les moyens de communication et les technologies du début du XX^e siècle différaient considérablement de ceux d'aujourd'hui, ce qui a sans doute influencé le développement de la théorie quantique. Le concept de variables cachées, qui a joué un rôle central dans les travaux des lauréats du prix Nobel 2022, a suivi une trajectoire complexe au début du XX^e siècle, à cause entre autres de la publication en 1932 en allemand du livre de John von Neumann (traduit en anglais seulement en 1955), où l'auteur démontre l'incompatibilité entre une théorie des variables cachées et certains aspects de la structure mathématique de la physique quantique. Il semblerait que ce résultat ait été interprété par une partie de la communauté comme étant plus fort que ce qu'envisageait l'auteur lui-même. Il avait considéré que l'existence des variables cachées n'était pas impossible, mais que celles-ci sortaient du cadre formel de la théorie quantique, ce qui a brouillé les pistes en ce qui concerne la formalisation du débat initié par l'article EPR.

Un événement marquant dans la formalisation de l'idée de variables cachées (ou, plus précisément, d'une théorie déterministe compatible avec la physique quantique) a été la théorie de de Broglie-Bohm en 1952. Cette théorie non locale, élaborée à partir

de la combinaison d'idées développées par Louis de Broglie et reprises par David Bohm, montrait qu'il était possible d'attribuer des trajectoires parfaitement déterministes aux particules. Elle représentait une alternative à l'interprétation de Copenhague de la physique quantique et donnait une réalité physique à l'idée de variables cachées. Le même David Bohm avait proposé en 1951 une version simplifiée du « paradoxe EPR », qui n'utilisait plus des grandeurs prenant des valeurs continues comme position et impulsion, mais des mesures de quantités physiques dichotomiques, c'est-à-dire prenant seulement deux valeurs possibles. Il s'agissait en l'occurrence du spin, propriété intrinsèque de tous les systèmes quantiques. David Bohm proposa de réaliser des mesures sur une paire de fermions ayant chacun un spin $\frac{1}{2}$, générée par désintégration d'une particule de spin 1. La conservation du spin total lors de la désintégration est à l'origine des corrélations quantiques (ou « intrication ») entre les deux particules de la paire, conduisant ainsi à la production d'un état avec les propriétés annoncées dans l'article EPR.

Bien que ce type de système de spins puisse être contrôlé en laboratoire, il n'était pas suffisamment simple pour être utilisé dans les expériences de manière pratique. Cette idée a été développée en utilisant une autre propriété quantique dichotomique :

la polarisation des photons, particules beaucoup plus simples à manipuler. Cette configuration jouera un rôle majeur dans les développements expérimentaux.

Les inégalités de Bell et leurs échappatoires

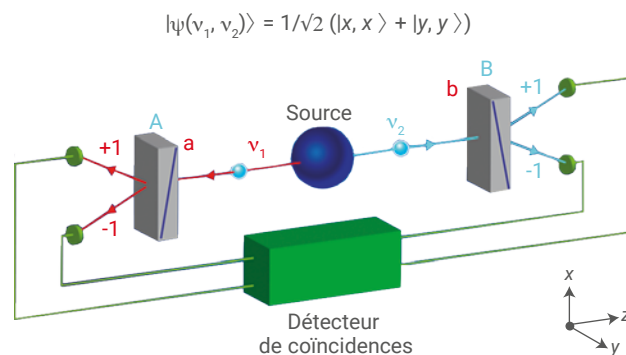
Que ce soit avec le spin ou avec la polarisation des photons, c'est à partir de la lecture des travaux de Bohm, entre autres, que le physicien irlandais John S. Bell (1928-1990) a formalisé en 1964 les principes d'un test expérimental des critiques exposées dans l'article EPR [4]. Ce test utilisait les corrélations entre des mesures de quantités physiques — comme la polarisation ou le spin sur différentes directions de l'espace — réalisées simultanément sur chacune des particules d'une paire. À partir des résultats de ces mesures, Bell (fig. 2) a identifié un paramètre (appelé aujourd'hui paramètre de Bell) pour lequel les prédictions de toute théorie à variables cachées locales (*i.e.* une théorie dans laquelle les événements lointains — c'est-à-dire en dehors du cône de lumière — n'ont pas d'effet instantané sur les événements locaux) donnent des résultats ne pouvant jamais dépasser une certaine valeur : ce sont les fameuses « inégalités de Bell ». Ainsi, si une expérience viole cette limite, l'hypothèse d'existence de variables cachées locales est réfutée. Quant aux prédictions théoriques de la physique quantique, elles montraient qu'une telle violation était possible en utilisant des états intriqués : Bell déplace donc la question d'un débat philosophique à un test expérimental.

Pour simplifier davantage la proposition de Bell en vue de sa réalisation expérimentale, John Clauser a collaboré avec Horne, Shimony et Holt pour déduire d'autres inégalités dans le même esprit que celle de Bell, les inégalités CHSH [5]. Ces chercheurs ont montré qu'il était possible de réduire à quatre le nombre de directions différentes de polarisation des photons mesurées (deux pour chaque particule), afin d'obtenir une inégalité encore plus réaliste expérimentalement. Clauser a rapidement testé ces inégalités en laboratoire, avec les premiers résultats obtenus en 1972. Cependant, bien que

les résultats aient suggéré une violation de l'inégalité, ils étaient affectés de grandes incertitudes expérimentales qui faisaient que cette violation ne pouvait pas être confirmée. En outre, les conditions idéalisées par Bell n'étaient pas réunies, et l'influence d'un observateur sur l'autre ou bien des biais dus aux choix des quantités mesurées ne pouvaient pas être exclus. Et c'est à ce moment qu'une équipe française, avec Alain Aspect en tête, commence à s'intéresser à la question.

Le défi était de réaliser de la façon la plus rigoureuse possible la situation particulière identifiée par Bell, dans laquelle la théorie de la mécanique quantique et la localité portent à des résultats contradictoires. Pour cela, il faut disposer d'une source générant des photons intriqués en polarisation et avec des fréquences ν_1 et ν_2 . Cela signifie, par exemple, que la mesure d'un photon ayant une polarisation H implique que l'autre aura également une polarisation H , et de même si les photons sont mesurés avec une polarisation V (voir la figure 3, où H correspond à une polarisation linéaire selon y , et V selon x). Jusqu'ici, on dirait qu'il n'y a rien de surprenant, car nous observons fréquemment de telles corrélations dans notre vie quotidienne, par exemple entre les chaussures rangées dans l'armoire par paires : si on en retire une au hasard, la gauche, nous savons que celle qui reste est la droite. La particularité des états intriqués est que même si, au lieu de choisir de mesurer la polarisation selon les directions H et V , nous décidons de le faire selon d'autres directions, comme les directions diagonale et antidiagonale, ou circulaire droite et gauche, nous observerons toujours une corrélation parfaite entre les polarisations des deux photons. Cette situation n'a pas d'analogue en physique classique, et une de ses conséquences est que les deux photons ne peuvent pas être considérés séparément, mais comme un tout. Du point de vue mathématique, l'état de polarisation du système de ces deux particules intriquées s'écrit comme la superposition cohérente de deux états possibles :

$$|\psi(\nu_1, \nu_2)\rangle = (1/\sqrt{2}) (|H, H\rangle + |V, V\rangle)$$



© APS/Alan Stonebraker.

3. Schéma de principe pour tester les inégalités de Bell.

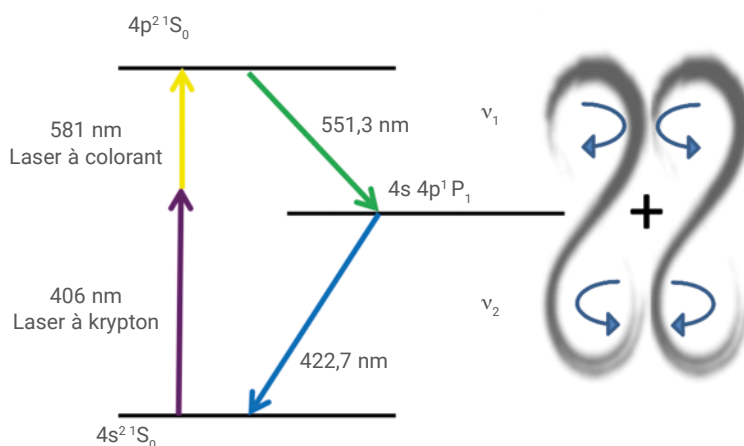
Une source produit des paires de photons intriqués en polarisation, qui sont envoyés vers deux polariseurs A et B. Chaque polariseur possède deux canaux de sortie, étiquetés +1 et -1. Un photon de fréquence ν_1 , polarisé parallèlement (perpendiculairement) à a , émergera en +1 (-1) en A. De même, un photon de fréquence ν_2 , polarisé parallèlement (perpendiculairement) à b , émergera en +1 (-1) en B. Dans le texte, nous avons indiqué par H la direction selon y , et par V la direction selon x . Un test de Bell consiste à mesurer les corrélations entre les résultats de mesure de chaque côté et à comparer les résultats avec les inégalités de Bell. Pour réaliser un test de Bell « idéal », les réglages des polariseurs doivent être modifiés de façon aléatoire pendant que les photons sont « en vol » entre la source et les polariseurs, et l'efficacité des détecteurs doit être supérieure à $2/3$.

Les expériences de l'Institut d'Optique

Le développement d'une source telle que celle décrite ci-dessus est en soi un exploit, car la production de paires de photons intriqués implique la coexistence de deux processus de génération, indiscernables entre eux. La stratégie d'Alain Aspect et son équipe a été d'utiliser un processus de « cascade atomique », où un atome de calcium est excité par deux lasers et

réémet par la suite deux photons qui ont des polarisations orthogonales et des longueurs d'onde différentes, chacune associée à une transition atomique différente (fig. 4). Cette émission se fait de sorte qu'il ne soit pas possible d'associer une polarisation à une longueur d'onde — ou à une transition — *i.e.*, le photon émis par la première transition peut avoir une polarisation, par exemple H , et celui émis par la deuxième transition une

>>>



4. Schéma de production de paires de photons intriqués par cascade atomique.

Dans les expériences du groupe d'Aspect, des atomes de calcium, pompés sélectivement dans le niveau supérieur par l'absorption non linéaire de deux photons, émettent deux photons corrélés en polarisation grâce aux règles de conservation du moment angulaire. Si le photon de longueur d'onde 551,3 nm a une polarisation circulaire droite, son jumeau à 422,7 nm a une polarisation circulaire gauche, et vice-versa.

>>>

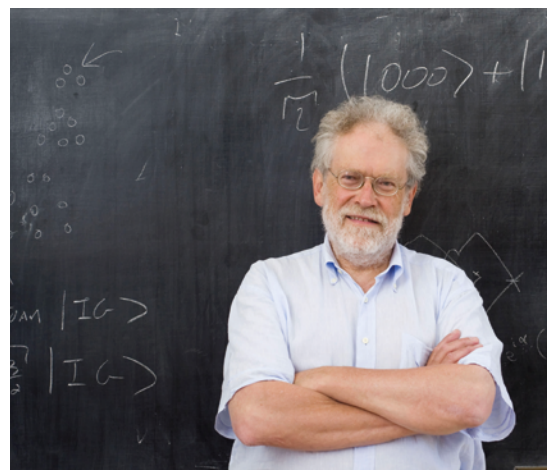
polarisation V , ou bien l'inverse : le photon émis par la première transition a une polarisation V et celui émis par la deuxième transition une polarisation H . Ces deux ordres d'émission possibles, qui associent des polarisations aux transitions atomiques de deux manières différentes, c'est ce que nous qualifions de processus indiscernables qui sont à l'origine de la possibilité de création d'intrication. Alain Aspect a apporté une contribution décisive à cette étape de l'expérience en utilisant des techniques innovantes d'excitation atomique par laser, très avancées pour l'époque, ce qui a permis la génération très efficace de photons. En conséquence, l'expérience menée à l'Institut d'Optique a permis d'accumuler davantage de données en moins de temps, évitant ainsi les problèmes de dérive du dispositif expérimental et augmentant significativement la précision des mesures par rapport aux trois expériences réalisées précédemment par les équipes de Clauser et de Fry et Thompson.

Pour observer la violation des inégalités de Bell dans la version CHSH (voir p. 8), les mesures de polarisation doivent être effectuées sur l'état produit par la source selon différentes directions, deux pour chaque photon, comme introduit précédemment. Cette démarche peut sembler simple, mais nous ne devons pas oublier que les inégalités de Bell cherchent à exclure toute possibilité d'échappatoire créée par des théories basées sur des variables cachées locales. Comment pouvons-nous être certains, par exemple, que la direction des polariseurs n'a pas influencé la source de photons ? Pour éliminer toute possibilité de « tricherie », il faut garantir qu'il n'y a pas de communication entre les détecteurs qui mesurent chaque photon ni entre les détecteurs et la source de photons. Cela se réalise en veillant à ce que ces détecteurs soient suffisamment éloignés l'un de l'autre et de la source, de sorte que ni les résultats des mesures ni les directions de mesure ne puissent être transmis. Autrement, des stratégies d'adaptation des mesures auraient pu être imaginées des deux côtés afin de simuler des violations fallacieuses des inégalités. Exiger que la distance entre

les détecteurs empêche toute communication des résultats de mesure entre eux revient à exiger que les deux mesures aient lieu à un intervalle de temps tel que la transmission d'un signal voyageant à la vitesse de la lumière entre les détecteurs soit impossible. Dans les premières expériences, cette distance se limitait à 6 mètres. Le même type de contrainte s'applique également au choix de la direction de mesure, car il serait envisageable qu'une relation classique entre les polariseurs de chaque observateur entraîne une violation des inégalités de Bell dans un contexte classique. C'est pourquoi les deux directions de mesure doivent changer de manière aléatoire et suffisamment rapide pour écarter toute hypothèse en faveur de la transmission d'un signal classique.

Or, un coup de génie d'Alain Aspect, le premier à s'intéresser à trouver une manière d'écarter cette possibilité, a été, d'abord, de remplacer le mouvement rapide des polariseurs par un aiguillage des photons, de sorte que, de façon aléatoire, ils soient envoyés soit à un polariseur orienté selon une direction, soit à l'autre. Cet aiguillage est, pour tous les effets, équivalent au changement d'orientation des polariseurs, avec l'avantage de pouvoir se faire plus rapidement, de façon à éliminer la possibilité de l'échappatoire associée à l'envoi d'information par les détecteurs. Il convient de noter également que la réalisation physique d'un tel aiguillage avec des cristaux s'est révélée impossible à l'époque, et qu'Alain Aspect a dû développer un système basé sur l'effet acousto-optique de l'eau pour le mettre en place. Cet effet fait que les photons sont déviés de façon différente selon l'application d'ondes acoustiques dans un milieu qu'ils traversent (en l'occurrence, l'eau).

Grâce à ces développements extraordinaires, Alain Aspect et ses collègues Philippe Grangier, Gérard Roger et, plus tard, Jean Dalibard, sont parvenus à montrer de façon claire et indiscutable la violation des inégalités de Bell, ce qui exclut la possibilité de l'existence de variables cachées locales expliquant le comportement quantique [6].



5. Anton Zeilinger.

Nous avons passé jusqu'à présent sous silence une autre difficulté potentielle (également à l'origine d'une possible échappatoire) : si l'efficacité de détection est trop faible, nous pourrions ne détecter que les événements qui confirment la validité de la théorie quantique, laissant ainsi non détectés ceux qui, s'ils l'étaient, donneraient raison aux explications déterministes et à la théorie des variables cachées. En effet, cette échappatoire, largement discutée par la communauté, a été éliminée en même temps que celle de localité discutée plus haut, pour la première fois en 2015 par trois équipes différentes, dont celle d'Anton Zeilinger [7]. Pour parvenir à cet exploit, les équipes en question ont utilisé des détecteurs avec une haute efficacité de détection (supérieure à 90%), basés sur la supraconductivité. Anton Zeilinger (fig. 5) a par ailleurs contribué au domaine en identifiant d'autres types de tests expérimentaux, montrant qu'une description classique de la réalité est incompatible avec des expériences. Il a également été à la tête de grands projets qui ont permis la téléportation (c'est-à-dire le transfert de l'état quantique d'un système vers un autre système similaire et distant, sans transporter le système lui-même) entre deux îles distantes de 144 km dans l'archipel des Canaries, et l'échange entre l'Europe et la Chine d'une clé de cryptage sécurisée par les lois de la mécanique quantique en utilisant un satellite avec une source de photons intriqués embarquée.

De la violation des inégalités de Bell à l'information quantique

Aujourd'hui, l'expérience de violation des inégalités de Bell est réalisée dans de nombreux laboratoires à travers le monde, et peu de chercheurs doutent de l'importance de son rôle ainsi que de ce qu'elle permet de démontrer et de comprendre. D'ailleurs, l'importance des retombées de cette expérience ne cesse de croître, notamment avec le développement de l'information quantique, qui utilise certaines propriétés de superposition et l'intrication pour le traitement et la transmission d'information, potentiellement plus efficace que les protocoles actuels dits « classiques ». L'écart entre les mesures de corrélations faites avec les inégalités de Bell et la limite classique est aussi une mesure de la qualité de l'intrication des états et de leur potentiel pour implémenter des protocoles en information quantique. Par exemple, il a été démontré que la violation des inégalités de Bell est une condition nécessaire pour établir des clés cryptographiques sûres, et qu'elle intervient dans le concept de téléportation quantique et dans l'avantage quantique offert par certains algorithmes de calcul et de simulation qui peuvent se révéler plus efficaces que leurs analogues classiques. Par ailleurs, les dispositifs expérimentaux permettant la génération d'intrication se sont diversifiés et simplifiés, et ils peuvent maintenant être intégrés dans des circuits optiques et électroniques miniaturisés sur puce, compatibles avec des technologies existantes et présentant de bonnes performances. Cette phase de la physique des objets quantiques individuels, qui sort des laboratoires pour être utilisée pour la construction de dispositifs, est ce que beaucoup appellent aujourd'hui la « seconde révolution quantique ».

L'influence d'Alain Aspect sur la communauté scientifique

L'influence d'Alain Aspect a largement dépassé celle des exploits réalisés par les expériences des années 1980. Pendant son passage à l'école normale supérieure de Paris et au Laboratoire de Spectroscopie Hertzienne — aujourd'hui Laboratoire Kastler Brossel — Alain Aspect s'est spécialisé dans les méthodes de refroidissement atomique (qui ont valu le prix Nobel en 1997 à Claude Cohen-Tannoudji). Elles sont essentielles pour permettre aux atomes de présenter des propriétés similaires à celles des systèmes optiques. Il a ainsi été à l'origine de nombreuses expériences où certains concepts de la physique quantique, originellement démontrés seulement avec des photons, ont été reproduits avec des atomes présentant un comportement collectif, tel que les condensats de Bose-Einstein. Parmi ces expériences, on peut citer l'effet Hong-Ou-Mandel de regroupement de bosons et la localisation par interférence.

À partir des années 2000, Alain Aspect s'est également engagé dans le développement du domaine de l'information quantique en France, pour ensuite devenir l'un des plus grands promoteurs des technologies quantiques, en participant à la fondation de l'entreprise Pasqal, dédiée aux simulations quantiques utilisant des systèmes atomiques.

Par ailleurs, tout au long de sa carrière, Alain Aspect a joué un rôle majeur dans l'établissement des bases de la physique quantique en France et à l'étranger, non seulement à travers ses recherches, mais aussi par son enseignement et ses talents d'orateur. Ses activités et sa personnalité, ouverte et chaleureuse, ont eu un fort impact sur

la vision et la structuration de ce domaine de recherche et de la communauté de chercheurs sur plusieurs générations.

“ L'importance des retombées de l'expérience [de violation des inégalités de Bell] ne cesse de croître, notamment avec le développement de l'information quantique. ”

Merci

L'aventure dans laquelle s'inscrit le prix Nobel de 2022 nous montre l'importance du travail collectif, de contributions de scientifiques aux profils variés, de la recherche désintéressée qui ne se satisfait pas d'une théorie qui laisse des questions sans réponse et ne se limite pas à s'attaquer à des sujets à la mode. Cette recherche demande du temps (cinq ans séparent les débuts des travaux d'Alain Aspect des premiers résultats satisfaisants), des ressources humaines et financières, du courage et de la ténacité, de l'audace, de la passion pour la transmission du savoir, et une vaste communauté de collègues, confirmés ou en devenir, pour évaluer et alimenter les discussions de façon à la fois rigoureuse et autonome.

Merci et félicitations, Alain ! ■

1
2
3

- 1• A. Einstein, B. Podolski et N. Rosen, *Physical Review* **47** (1935) 777.
- 2• N. Bohr, *Physical Review* **48** (1935) 696.
- 3• E. Schrödinger, *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society* **31** (1935) 555.
- 4• J.S. Bell, *Physical Review* **48** (1964) 195.

- 5• J.F. Clauser, M.A. Horne, A. Shimony et R.A. Holt, *Phys. Rev. Lett.*, **23** (1969) 880.
- 6• A. Aspect, P. Grangier et G. Roger, *Phys. Rev. Lett.* **49** (1982) 91 ; A. Aspect, J. Dalibard et G. Roger, *Phys. Rev. Lett.* **49** (1982) 1804.
- 7• A. Aspect, *Physics, Viewpoint* **8** (2015) 123.



- M. Kumar, *Le grand roman de la physique quantique*, Ed. Flammarion, collection Champs Sciences (2020).
- Websérie « Intrication Quantique », réalisée par Hugo Cayla. www.youtube.com/@photonsjumeaux4395