



La lettre du Collège de France

40 | août 2015
La Lettre n° 40

La physique quantique

Entretien avec Anton Zeilinger

Anton Zeilinger



Édition électronique

URL : <https://journals.openedition.org/lettre-cdf/2107>

DOI : [10.4000/lettre-cdf.2107](https://doi.org/10.4000/lettre-cdf.2107)

ISSN : 2109-9219

Éditeur

Collège de France

Édition imprimée

Pagination : 42-45

ISSN : 1628-2329

Référence électronique

Anton Zeilinger, « La physique quantique », *La lettre du Collège de France* [En ligne], 40 | août 2015, mis en ligne le 03 septembre 2015, consulté le 17 août 2022. URL : <http://journals.openedition.org/lettre-cdf/2107> ; DOI : <https://doi.org/10.4000/lettre-cdf.2107>

Tous droits réservés



Entretien
avec Anton Zeilinger

La physique quantique

Anton Zeilinger, professeur à l'IQOQI (Institute for Quantum Optics and Quantum Information), et président de l'Académie des sciences d'Autriche a été invité par l'Assemblée des professeurs sur proposition de Serge Haroche et Jean Dalibard à donner deux conférences les 25 mars et 1^{er} avril 2015 : "Quantum Imaging and the Role of Information", "Quantum Entanglement in Higher Dimensions".

Cet entretien a été réalisé par Igor Dotsenko, membre du Laboratoire Kastler Brossel et de l'équipe du Pr Serge Haroche.

IGOR DOTSENKO : Nombre de médias de vulgarisation scientifique tentent régulièrement de faire comprendre l'essence de la théorie quantique à leurs lecteurs ou téléspectateurs. Comment expliqueriez-vous la physique quantique au grand public ? Sur quoi se fonde-t-elle ?

ANTON ZEILINGER : On assiste à un phénomène très intéressant : d'une manière générale, le grand public se passionne pour la physique quantique. Je pense que cela vient du fait que la physique quantique nous dit que la manière dont nous voyons les choses au quotidien est erronée. Un exemple d'hypothèse erronée : celle selon laquelle à tout moment, un objet doit se trouver à un endroit défini. Cette hypothèse n'est plus vraie. Certains disent qu'une particule peut être en deux endroits en même temps, ce qui est encore une mauvaise façon de dire les choses. La bonne manière de dire les choses, c'est de dire qu'il existe des situations dans lesquelles l'endroit où se trouve la particule est totalement indéfini ; et non seulement nous ne savons pas où est la particule, mais en quelque sorte, la particule elle-même ne sait pas où elle est. Il s'agit donc

d'une non-existence objective d'une caractéristique de la réalité. Et c'est ce qui est nouveau avec la physique quantique. Nous n'avons pas cela en physique classique. Et nous n'avons pas cela non plus dans la théorie de la relativité car là encore, on retrouve un temps bien défini, un espace bien défini, et ainsi de suite. Ça, c'est le premier point. Le second point, c'est que dans notre vie de tous les jours, nous voyons le monde par le prisme de notre pensée classique dans laquelle tout est déterminé par une cause : si une pierre me frappe à la tête, je sais que quelqu'un l'a lancée vers ma tête, ou quelque chose comme ça. Désormais, avec la physique quantique, nous avons appris que ces structures causales existent au niveau des grands ensembles, mais pas toujours au niveau des événements individuels. Prenons l'exemple de la radioactivité : le nombre d'atomes qui vont se décomposer dans les prochaines minutes est défini, certes. En revanche, ce qui n'est absolument pas défini – et ce pour quoi il n'existe ni explication, ni cause – c'est la raison pour laquelle tel atome va se décomposer à tel moment précis. C'est là un autre enseignement très intéressant de la mécanique quantique, à savoir les limites de la causalité pour chaque situation spécifique. La troisième chose que je voudrais dire, c'est que nous pouvons nous trouver dans une situation dans laquelle deux systèmes, séparés l'un de l'autre par une grande distance, sont connectés d'une manière nouvelle. C'est ce que l'on appelle "l'intrication" en français. Considérons deux particules qui entrent en collision, qui interagissent l'une avec l'autre, puis qui se renvoient à distance l'une de l'autre, comme deux boules de billard partant dans des directions opposées. Eh bien, ces deux particules quantiques partent elles aussi dans une direction opposée, mais la direction dans laquelle elles partent est non définie. Elles partent dans toutes les directions en même temps. Si je fais une mesure, je vais observer une particule à un endroit et à ce moment-là, l'autre particule change d'état : elle passe de l'état où elle pouvait être partout à celui où elle n'est qu'à un seul endroit. Et j'aurais tort de penser que je viens de montrer où cette particule était juste avant car je ne le sais pas. Et les particules non plus ne le savent



pas. Il n'y a pas de caractéristiques bien définies. Pour moi, ce sont là les propriétés générales de la mécanique quantique. Pour utiliser des mots plus savants, tout cela a trait à la superposition. Ce mot veut dire que diverses possibilités sont superposées selon un nouveau type de description que nous appelons l'état quantique. J'aimerais encore dire que je suis personnellement convaincu que ces phénomènes ne se limitent pas aux petits systèmes. Pour l'heure, ils le sont mais ce n'est qu'un problème technique et j'espère qu'à l'avenir, des jeunes gens brillants auront la possibilité d'observer ces phénomènes pour de très gros objets également.

I. D. : [La science comme moyen de comprendre la nature fait partie intégrante de la société humaine. Pensez-vous qu'il faille enseigner régulièrement les bases de la mécanique quantique à l'école ?](#)

A. Z. : Lorsque nous discutons de ce qui peut être enseigné à l'école, je dis toujours à mes collègues concernés que le message le plus important, la chose que chacun devrait savoir, y compris s'il n'a pas vocation à devenir scientifique, c'est à quel point nous décrivons très bien la nature, à quel niveau de précision nous pouvons calculer les choses. La science n'est pas juste une manière de parler de la nature : si vous montez dans un avion, vous faites confiance à la loi de Bernoulli ; quand vous allumez votre iPhone, vous utilisez de nombreuses technologies ; le niveau de précision est absolument fantastique. C'est le message le plus important : les sciences offrent une compréhension mathématique du monde.

C'est pour cela que je pense que l'on devrait également enseigner la physique quantique. Bien entendu, il est impossible de présenter la physique quantique de manière

formelle, mais on peut l'enseigner dans les écoles au niveau des phénomènes. Il suffit de dire aux enfants : "Voici des atomes radioactifs. Ils peuvent se décomposer, ou non". C'est comme cela qu'il faut en parler ! J'ai donné des cours à des enfants de 6 ou 7 ans. J'étais littéralement fasciné par leurs questions, qui étaient vraiment difficiles. Je pense que c'est important car il se pourrait bien que la prochaine étape soit l'émergence d'une théorie plus profonde. Et si c'est le cas, nous allons très probablement devoir modifier la manière fondamentale dont nous voyons les choses. Or, cela doit commencer très tôt et les enfants devraient donc apprendre ce que sont les faits.

I. D. : [Je souhaiterais aborder maintenant une question plus scientifique. Les physiciens sont-ils aujourd'hui satisfaits de leur compréhension de la mécanique quantique dont les bases mathématiques ont été développées il y a de nombreuses années ? Quelles sont les principales zones d'ombre de la théorie quantique aujourd'hui, si tant est qu'il y en ait ?](#)

A. Z. : La mécanique quantique donne une description extrêmement précise de nombreux phénomènes. Par exemple, le laser est décrit par la mécanique quantique. Toute la chimie est décrite par l'équation de Schrödinger, qui est une équation de mécanique quantique, etc. C'est extraordinairement précis. Le problème, c'est l'interprétation. Le problème est de savoir ce que tout cela signifie au niveau de notre vision du monde. Et nous assistons là à un phénomène intéressant, à savoir qu'il existe plusieurs écoles d'interprétation ; chacun est convaincu que son interprétation est la bonne et que les autres se trompent totalement. Cela mène même parfois à des bagarres fondées sur l'émotion.

Maintenant, qu'est-ce que cela signifie? Sans doute que nous n'avons pas découvert LA manière définitive de voir les choses. Cela signifie qu'il nous manque encore certaines clés pour voir le monde. Mon point de vue personnel est donc que nous devrions considérer ces débats autour des différentes interprétations comme une richesse qui, à un certain niveau, pourrait déboucher sur quelque chose de nouveau. Mais cela ne se produira que si nous abandonnons le débat philosophique et que nous allons aux conséquences, qui peuvent soit être vues dans le cadre de l'expérience, soit nous amener vers une nouvelle vision, plus profonde, qui ouvrira la voie à d'autres directions pour la science.

I. D. : *On peut voir le physicien moderne comme un "ingénieur quantique", essayant d'appliquer des lois et des règles connues pour construire des systèmes et des structures quantiques de plus en plus complexes. Mais y a-t-il quelque chose de plus fondamental derrière ces inventions?*

A. Z. : Au cours des dernières décennies, nous avons assisté à un phénomène très intéressant. Différentes personnes ont commencé à mener des expériences sur des phénomènes fondamentaux en physique quantique, et ces expériences n'étaient motivées que par la curiosité, voire par des considérations philosophiques, car en mécanique quantique, les prédictions sont contre-intuitives. Elles sont mathématiquement précises, mais contre-intuitives. Donc ces expériences ont démarré, et elles ont confirmé la mécanique quantique.

Vous pourriez donc me demander : "pourquoi avez-vous fait ces expériences?". Eh bien elles ont eu des conséquences intéressantes car tout à coup, elles ont ouvert les esprits des gens qui ont commencé à se poser la question de ce qu'on allait bien pouvoir faire avec cela. Il y a une très grosse différence entre apprendre quelque chose dans un livre et en prendre conscience dans un laboratoire, dans le cadre d'une véritable expérience. Je l'ai constaté moi-même lorsque nous avons mené l'expérience de diffraction de neutrons par deux fentes il y a trente ans. Les résultats étaient clairs, mais il y a ensuite eu des débats; même des physiciens très célèbres ont dit "C'est vraiment comme cela que ça fonctionne?", "Vous ne trouvez pas cela intéressant?". C'est comme cela que l'on ouvre l'esprit des gens pour la prochaine étape, puis pour l'étape suivante, et ainsi de suite.

Aujourd'hui, nous en sommes au point où nous avons mené ces expériences fondamentales qui, j'en suis absolument convaincu, vont déboucher sur une nouvelle technologie, une technologie quantique de l'information, vers de nouveaux ordinateurs. Je suis convaincu que c'est ce vers quoi nous allons car il n'existe aucune raison fondamentale qui rendrait cela impossible. Certes, c'est un peu difficile, mais ça c'est une autre histoire. Un jour, cela arrivera.

D'un autre côté, tout cela a également aiguisé notre intuition de ce qui est réellement intéressant en physique quantique et de ce qui en établit les véritables fondations. Aujourd'hui, nous voyons émerger de nouvelles écoles. De jeunes théoriciens travaillent sur ce que l'on appelle la reconstruction de la mécanique quantique. Quels sont les principes de base à partir desquels nous pouvons dériver cette théorie moderne? Et là, il y a quelques avancées. Nous avons l'espoir de pouvoir établir la physique quantique sur des bases conceptuelles plus solides, ce qui va nous ouvrir l'esprit et nous permettre d'aller plus loin.

I. D. : *À la fin du XIX^e siècle, il ne semblait rester que quelques questions "mineures" auxquelles les physiciens n'avaient pas répondu. Mais ce sont précisément ces quelques questions sans réponse qui ont donné naissance à la physique quantique. Selon vous, quelle est la question la plus pressante aujourd'hui qui pourrait, une nouvelle fois, révolutionner la manière dont nous comprenons la nature ?*

A. Z. : Si l'on considère le statut des sciences aujourd'hui, c'est l'une des plus grandes réussites de l'humanité. C'est fantastique; les sciences ont complètement changé nos vies, d'une manière immédiate; beaucoup d'entre nous ne serions plus en vie sans les progrès des sciences, de la médecine, etc. La question est de savoir où nous en sommes. Considérons simplement l'histoire: les sciences modernes ont commencé avec Galilée ou Newton, des gens comme ça. Cela remonte donc à 300 ou 400 ans, ce qui n'est rien à l'aune de l'histoire de l'humanité. Il me paraît donc fort peu probable que nous ayons tout découvert. Donc, si quelqu'un pense – et cela arrive – que nous sommes proches de la "Théorie du Tout", alors ma réaction est de dire "Nous devrions sans doute rêver plus pour imaginer de nombreuses possibilités".

Si vous me posez la question des points non élucidés, il en reste encore beaucoup. L'exemple le plus célèbre est celui de l'unification des deux meilleures théories dont nous disposons en termes de profondeur conceptuelle, à savoir la théorie de la relativité et la mécanique quantique. Ces deux théories sont encore séparées. Pourquoi cela pose-t-il un problème? Parce qu'il existe en fait des contradictions entre ces deux théories. Dans la théorie de la relativité, nous avons un espace et un temps bien définis; en mécanique quantique, nous apprenons que les masses peuvent être superposées en différents lieux, ce qui signifie que l'espace ne peut pas être bien défini à certains niveaux. Le fait que certains des physiciens les plus brillants aient travaillé sur ce problème depuis plus de 80 ans et n'aient toujours pas trouvé de solution, indique que nous devons aller très en profondeur pour trouver la solution. Si quelqu'un la trouve, ce sera quelque chose d'extrêmement important, et elle se situera probablement dans une direction où personne n'avait pensé aller la chercher. Cela s'est déjà produit. Je pense que ce sera en fait comme avec Einstein, que personne ne connaissait auparavant. N'importe quel jeune physicien peut apporter sa pierre, à condition qu'il soit placé dans le bon contexte et qu'il reçoive la bonne formation.

Autre chose: les questions d'énergie noire et de matière noire. Je serais surpris que nous les découvriions en ayant recours à nos méthodes habituelles. Vous savez, la matière noire et l'explication de l'énergie noire ont un peu le même parfum que l'éther dans la bonne vieille théorie de l'électrodynamique. Peut-être ai-je tort, peut-être ai-je raison. Mais là encore, si c'est vrai, nous devons regarder le monde d'une manière différente; je ne parle pas de petites adaptations de la théorie de la gravitation. Il faudra que ce soit quelque chose de beaucoup plus profond.

En mécanique quantique, nous avons un défi à relever; c'est ce que certaines personnes appellent le "paradoxe de la mesure": le fait qu'à l'observation, l'état quantique, qui présente toutes ces possibilités, change et nous n'ayons en fin de course qu'un seul résultat de mesure spécifique. Je fais partie de ceux qui pensent que cela est en dehors de la physique. Cela ne peut pas être décrit par la physique car la physique est une théorie qui évolue dans le temps de manière unitaire. Mais j'ai également le sentiment que cela nous apprend quelque chose sur le rôle de l'observation et de l'information. Peut-être existe-t-il des situations pour lesquelles nous devons reconsidérer le dualisme cartésien entre la *res cogitans* et la *res extensa*, entre l'observateur et

la chose observée. Peut-être existe-t-il des choses que nous ne comprenons pas encore. Mais je voudrais ajouter un point qui est très important pour moi. Lorsque l'on aborde ces sujets, les gens font souvent le lien avec des idées ésotériques très étranges, "tout est la plénitude du tout", etc. Je ne crois pas à cela. Je parle de questions scientifiques précises, auxquelles il est possible de trouver une réponse – je l'espère – grâce à la recherche scientifique que mèneront les générations à venir. Et j'espère être encore en vie le jour où quelqu'un aura une vraie belle idée!

I. D. : [Durant votre carrière, vous avez beaucoup voyagé, d'abord en tant que scientifique, puis en tant que président de l'Académie des sciences autrichienne. Vous avez eu l'occasion de rencontrer d'autres scientifiques et différents décisionnaires au plus haut niveau, vous avez pu constater les différentes pratiques et traditions de recherche, à la fois dans et à l'extérieur des universités occidentales. Pour reprendre les mots d'un essai publié récemment sur ce sujet, il semble qu'il y ait plusieurs "versions de la liberté de chercher"¹. Diriez-vous que cette valeur continue d'avoir une signification universelle à l'ère de la mondialisation ?](#)

A. Z. : La liberté de chercher est pour moi la base la plus importante, sinon fondamentale, pour tout ce que nous faisons. Pourquoi est-elle si importante? Tout simplement parce que lorsqu'on arrive aux frontières de la science, personne ne sait quelles sont les bonnes et les mauvaises questions; personne ne sait d'où viendra le progrès. Si vous commencez à filtrer les questions en limitant la liberté de chercher, alors vous filtrez nécessairement la qualité des travaux réalisés. Je fais partie de ceux qui pensent vraiment que la science est l'un des outils dont nous disposons pour améliorer le sort de l'humanité. Pour cela, nous devons pouvoir poser toutes les questions, ouvertement. Je pense que c'est un défi pour tous les systèmes politiques. Même les systèmes occidentaux connaissent quelques difficultés avec la liberté de chercher. Et pour moi, la devise du Collège de France, *Docet Omnia*, est la bonne devise. On y enseigne tout. Il n'y a aucune limite à ce qui peut être enseigné. Il ne devrait pas y avoir de jugement sur ce que sont les bonnes ou les mauvaises connaissances, sur la bonne ou la mauvaise manière de faire de la recherche... Et je suis certain qu'à long terme, nous parviendrons à un accord universel là-dessus, car c'est absolument capital. ■



– [Retrouvez les vidéos des conférences du Pr Anton Zeilinger sur le site \[www.college-de-france.fr\]\(http://www.college-de-france.fr\), à la page du Pr Serge Haroche.](#)

1. FISH, Stanley Eugene, 2014. *Versions of academic freedom: from professionalism to revolution*. Chicago : The University of Chicago Press. Rice University Campbell lectures.