

➤ expérience mettait en évidence des contradictions dans la théorie quantique. Comment devait-on comprendre ce résultat, et quelles conséquences pouvait-il avoir sur l'interprétation de la physique quantique? Bien que conçue au départ comme une expérience de pensée, une version de cette idée a été mise en œuvre en laboratoire en 2019 sous l'impulsion de Massimiliano Proietti, de l'université Heriot-Watt, à Édimbourg, et ses collègues. Comprenons-nous alors mieux? Pas sûr...

UNE THÉORIE EFFICACE

Au vu de ces questions théoriques et presque philosophiques, la physique quantique semble être incomplète, encore à construire. En effet, son statut est étrange et peut-être unique dans l'histoire des sciences. Dès sa naissance dans les années 1920, elle s'est imposée comme la théorie rendant le mieux compte des phénomènes à l'échelle microscopique. Dans les années 1940, le physicien américain Richard Feynman et d'autres ont utilisé la physique quantique pour décrire les interactions de la matière et de la lumière. En un mot, elle est une théorie testée avec une précision inégalée et jamais mise en défaut par l'expérience. Aujourd'hui encore, elle s'impose et est omniprésente dans les technologies des objets de notre quotidien: ordinateurs, téléphones, fibres optiques, etc.

Pourtant, cette théorie, si efficace, reste muette sur de nombreuses questions concernant sa nature profonde. Elle repose en effet

sur des axiomes et des définitions dont l'origine ou les justifications ne sont pas toujours très claires.

Pour avancer sur ces questions et mieux comprendre les fondements de la physique quantique, les chercheurs se sont parfois appuyés sur des expériences de pensée, notamment pour tenter d'y trouver des failles, c'est en particulier le cas d'Erwin Schrödinger et de son chat ou encore d'Albert Einstein et son paradoxe EPR (du nom de ses inventeurs en 1935: Einstein, Nathan Rosen et Boris Podolsky) sur l'intrication quantique (voir *Pas d'échappatoire pour l'intrication*, par R. Hanson, page 26).

UN FLOU QUANTIQUE

Pour comprendre l'enjeu de ces différentes expériences de pensée, il faut revenir à la question de la mesure en physique quantique et au rôle de l'observateur. Concrètement, un système quantique est décrit par un objet mathématique nommé «fonction d'onde». Souvent, on considère que celle-ci n'indique pas quel est l'état du système à un moment donné, mais permet de calculer les probabilités d'obtenir un résultat donné lors d'une mesure. Ainsi, si l'on s'intéresse à la position d'une particule, et parce que la fonction d'onde est spatialement étendue, on aura une certaine chance de trouver la particule à tel endroit ou à tel autre. Avant la mesure, la particule n'a pas de position définie, on a une sorte de «flou quantique» et seule la mesure «matérialise» cette position.

De façon plus générale, une fonction d'onde regroupe tous les états accessibles au système. Celui-ci est dit dans une «superposition d'états». Par exemple, prenons un électron dont le spin (une propriété purement quantique) peut être orienté vers le haut ou vers le bas. Alors l'électron peut être dans une superposition de l'état «haut» et de l'état «bas». Si on veut maintenant mesurer le spin de la particule, cette opération a un impact radical sur le système: la fonction d'onde «s'effondre», c'est-à-dire que l'observateur ne constate qu'un seul de ces deux états. L'électron reste dans l'état mesuré soit «haut» soit «bas».

Par rapport à notre expérience de tous les jours, le phénomène de superposition quantique est difficile à comprendre. On pourrait avoir l'impression que le fait de lancer un dé dans une boîte fermée conduirait à une superposition des états «le dé est égal à 1», «le dé est égal à 2»... Si on ouvre la boîte avec le dé, on révèle un état préexistant. Ce n'est cependant pas la même chose que la superposition quantique, car il est possible de réaliser certaines mesures (la physique quantique permet de mesurer l'intérieur de



Eugene Wigner, physicien théoricien américain d'origine hongroise, a été l'un des fondateurs de la théorie quantique. Il a reçu le prix Nobel de physique en 1963.

la boîte sans simplement l'ouvrir) dont le résultat ne peut s'expliquer que par le formalisme quantique. Il est difficile de se faire une représentation mentale correcte de la superposition tant elle lutte avec notre intuition de tous les jours. Pourtant, à l'échelle microscopique, la superposition des états est un phénomène incontestable.

La mesure, et donc l'action d'un observateur, a un effet irrémédiable sur un système quantique, il détruit l'effet de superposition et fait qu'on ne voit que des états bien définis. Mais la mesure et l'action de l'observateur sur la destruction de l'effet de superposition soulèvent de nombreuses questions. Avant la mesure, l'évolution du système est décrite par l'équation de Schrödinger, une équation parfaitement déterministe et réversible. En revanche, la mesure est une opération qui introduit une irréversibilité brutale dans le système. Et elle est fondamentalement aléatoire en reposant sur des lois probabilistes. Comment s'opère exactement cette transition lors de la mesure?

Autre problème, dans la formulation de la physique quantique, rien n'empêche le phénomène de superposition de se propager des échelles microscopiques à des systèmes de plus en plus grands. Par exemple, partant d'un électron dans l'état superposé «haut» et «bas», si l'on utilise un instrument de mesure pour déterminer l'orientation du spin, on peut considérer le système «électron + appareil de mesure» comme un ensemble qui interagit et devient lui-même superposé: «l'instrument a mesuré l'électron dans l'état haut» et «l'instrument a mesuré l'électron dans l'état bas». On pourrait utiliser un autre appareil plus grand pour mesurer cet instrument, et la superposition devrait encore se propager. Or on n'observe pas ce phénomène à l'échelle macroscopique: comment cette chaîne s'arrête-t-elle?

Dans la vision très orthodoxe de l'école de Copenhague, prônée par ses pères fondateurs le Danois Niels Bohr et l'Allemand Werner Heisenberg – que le physicien américain David Mermin a caricaturé par une remarque célèbre: «Tais-toi et calcule» –, l'intrication s'arrête à l'échelle de l'observateur, c'est-à-dire un système assez complexe et grand qui ne peut pas être en superposition. On parle de «coupure de Heisenberg». Selon cette approche, il n'est pas possible d'appliquer les outils de la physique quantique à un observateur ou tout système macroscopique.

Cette limite entre le système quantique mesuré d'un côté et l'observateur de l'autre semble pourtant assez arbitraire. Comment s'établit cette frontière? Quels critères

L'IDÉE QU'UN CHAT PUISSE ÊTRE DANS UNE SUPERPOSITION D'ÉTATS SEMBLAIT ABSURDE POUR SCHRÖDINGER

définissent un observateur? La théorie quantique ne fournit aucune réponse. Est-ce uniquement une question de taille? La réponse est délicate. En 2019, l'équipe de Markus Arndt, de l'université de Vienne, en Autriche, a démontré que si on contrôle parfaitement un système il est possible d'observer des effets de superposition pour des molécules contenant pas moins de 2000 atomes. À ce stade, l'obstacle semble donc surtout technique.

L'ABSURDE CHAT

Erwin Schrödinger avait identifié ce problème et n'était pas très satisfait de la situation. Il l'a illustré avec son expérience de pensée du chat dans sa boîte que nous avons décrite. Pour un observateur à l'extérieur de la boîte, tant qu'il ne regarde pas ce qui se passe à l'intérieur, la fonction d'onde qui décrit l'atome radioactif est une superposition des états «intact» et «désintégré», mais qu'en est-il du chat? Son état se retrouve intriqué avec celui de l'atome (ce qui signifie qu'on ne peut pas les décrire indépendamment l'un de l'autre), l'ensemble «atome + chat» est donc dans une superposition d'états «atome intact, chat vivant» et «atome désintégré, chat mort». Évidemment quand l'observateur ouvre la boîte, le chat est soit «vivant» soit «mort». Cette idée qu'un système aussi macroscopique qu'un chat puisse être dans une superposition d'états semblait absurde pour Schrödinger.

En outre, s'il n'y a pas d'observateur pour provoquer l'effondrement de la fonction d'onde, le chat reste-t-il dans une superposition d'états? Et si l'on étend la question à l'ensemble de l'Univers, celui-ci ne pourrait jamais être dans un état bien défini. L'observateur semble donc indispensable. Einstein, opposé à cette idée et fervent partisan d'une réalité objective de la nature, s'en était ému: «Pensez-vous que la Lune n'existe que si quelqu'un la regarde?»

La formulation de la physique quantique offre peu de moyens de répondre à ces interrogations. Or, à l'exception d'une poignée de chercheurs, peu de personnes se sont intéressées à l'interprétation de la physique quantique jusqu'à la Seconde Guerre mondiale. La vision de l'école de Copenhague s'était imposée: la physique quantique est avant tout une collection d'outils permettant de calculer les probabilités d'obtenir un certain résultat lors d'une mesure, un point c'est tout.

Malgré l'efficacité redoutable de cette vision opérationnelle de la physique quantique, des physiciens ont commencé à critiquer l'interprétation de Copenhague après la guerre. Était-il possible d'en formuler d'autres? Oui. ➤