

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. ➤

> Dans les années 1950, inspiré par la théorie de l'onde pilote de Louis de Broglie, proposée en 1927, le physicien américain David Bohm a développé une interprétation de la physique quantique reposant sur la dualité onde-corpuscule. La particule a ici une position toujours bien définie et elle est guidée par une onde qui est décrite par l'équation de Schrödinger. Cette vision est à la fois réaliste et déterministe. À la même époque, son compatriote Hugh Everett a imaginé une théorie dite «des mondes multiples». La fonction d'onde ne s'effondre jamais, lors d'une mesure, chaque état se réalise dans un monde différent.

### UN AMI QUANTIQUE

En 1961, Eugene Wigner, un des spécialistes de la physique quantique (il a obtenu le prix Nobel en 1963 pour ses travaux sur la théorie de l'atome et des particules élémentaires), a proposé une expérience de pensée connue sous le nom de «l'ami de Wigner». Dans cette expérience, Wigner a poussé l'expérience du chat de Schrödinger un peu plus loin. Il voulait mettre en évidence certaines incohérences de la théorie quand il s'agit des observateurs et souligner l'importance, selon lui, de la différence entre un instrument de mesure et un observateur doté de conscience. L'idée est de remplacer le chat par un observateur, le fameux «ami de Wigner», qui réalise une mesure sur un atome et d'ajouter un second observateur à l'extérieur du système qui s'intéresse au système «atome + ami de Wigner», c'est «Wigner» lui-même.

Dans cette expérience, l'ami de Wigner, dans son laboratoire, mesure le spin de l'atome (vers le haut ou vers le bas). Wigner, lui, se trouve à l'extérieur du laboratoire sans savoir quel est le résultat. Initialement, l'atome est dans un état superposé de spin

«haut» et spin «bas», jusqu'au moment où l'ami réalise sa mesure. L'atome est alors dans un état bien défini. Wigner ne peut décrire le système «ami + laboratoire» qu'avec les informations limitées auxquelles il a accès. Pour lui, son ami est dans une superposition de deux états: «l'ami a mesuré un spin haut» et «l'ami a mesuré un spin bas». Bien sûr quand il ouvre la porte, la fonction d'onde s'effondre et les points de vue de Wigner et de son ami deviennent cohérents entre eux.

Mais ce qui est paradoxal (on parle du paradoxe de Wigner) est que pendant un certain temps, Wigner et son ami avaient une vision contradictoire de la situation: pour l'ami, l'atome était dans un état bien défini (celui obtenu par sa propre mesure); pour Wigner, l'atome était dans une superposition d'états. Quand l'effondrement de la fonction d'onde a-t-il vraiment lieu, au moment où l'ami fait sa mesure ou quand Wigner ouvre la porte? L'ami peut même dire à Wigner qu'il a réalisé une mesure (sans lui donner la réponse) et donc Wigner sait que pour son ami l'état est bien défini mais ce n'est toujours pas le cas pour lui.

Ce raisonnement semble indiquer soit qu'il n'y a pas de réalité objective en physique quantique puisque deux personnes peuvent avoir des visions contradictoires du monde, soit qu'il y a un problème à utiliser les outils de la physique quantique (la superposition des états) sur un observateur comme l'ami de Wigner.

Dans l'interprétation de l'école de Copenhague, l'observateur est macroscopique et ne peut donc pas être dans un état de superposition. La fonction d'onde s'effondre dès la mesure de l'ami de Wigner, qui, en principe, ne devrait pas être décrit par Wigner dans une superposition d'états. «D'un point de vue mathématique, le problème apparaît dès lors

## UN « PILE OU FACE » INCERTAIN

L'ami d'Alice dans son labo



- 1 L'ami d'Alice lance une pièce et prépare un électron en fonction du résultat.
  - « Face »: il prépare un électron avec un spin « bas ».
  - 2 « Pile »: il prépare un électron avec des spins « haut » et « bas » superposés.

L'amie de Bob dans son labo



- 2 L'ami d'Alice envoie la particule à l'amie de Bob.
- 3 L'amie de Bob mesure le spin de l'électron.



- 4 Alice mesure le système « ami + labo » et en déduit le résultat du lancer de pièce.



- 5 Bob mesure le système « ami + labo » et en déduit le résultat du lancer de pièce.

RÉSULTAT. Alice et Bob comparent leurs conclusions: ils sont parfois en désaccord sur l'issue du lancer de pièce.