

Mais cette approche ne dévoile rien d'une réalité qui serait sous-jacente aux résultats des mesures expérimentales. La physique quantique est une sorte de boîte noire. Dans cette vision dite de l'école de Copenhague, héritée de Niels Bohr, l'un des pères de la théorie quantique, on ne cherche pas à en dire plus. Le statut même de la fonction d'onde – objet réel ou simple outil de calcul? – n'est lui-même pas clair. Or si l'on veut savoir comment la matière quantique courbe l'espace-temps, on ne peut se contenter de ce mutisme. Nous devons spéculer sur la nature tangible sous-jacente aux prédictions quantiques et explorer d'autres interprétations de la physique quantique que celle de l'école de Copenhague (voir l'encadré page 30).

SUPERPOSITIONS D'ÉTATS

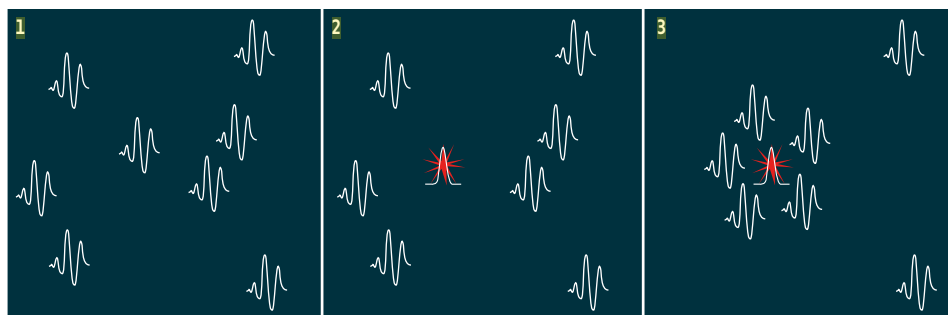
Une spécificité de la physique quantique, que l'on n'observe pas dans le monde classique, est le principe de superposition. Tant que la propriété d'un objet quantique (sa position, sa vitesse, son spin, etc.) n'a pas été mesurée, l'objet peut exister dans une superposition d'états correspondant à des valeurs différentes

de cette propriété. Du point de vue du formalisme, l'état quantique d'une particule peut, par exemple, mettre en jeu plusieurs positions différentes simultanément.

Schrödinger a illustré cette idée par un exemple macroscopique qu'il considérait absurde: un chat enfermé dans une boîte munie d'un dispositif déclenché par un événement aléatoire (la désintégration d'un atome), ce qui tuerait l'animal. Tant que la boîte reste fermée et son intérieur inaccessible à l'observateur, l'atome peut être dans une superposition de deux états, «désintégré» et «non désintégré». Mais cela impliquerait que le chat serait dans une superposition de deux états classiquement contradictoires, «mort» et «vivant». Cependant, il est impossible d'observer directement les superpositions. Elles sont détruites lorsqu'on réalise une mesure – en ouvrant la boîte, la superposition disparaît (on parle de réduction de la fonction d'onde) et le chat est alors soit vivant, soit mort.

On ignore donc si une superposition d'états existe vraiment où s'il s'agit seulement d'un outil intermédiaire de calcul. En 1962, le Danois Christian Møller et le Belge Léon Rosenfeld ont ➤

RÉDUCTION DYNAMIQUE PAR DES « FLASHS »



Les superpositions quantiques sont difficiles à interpréter pour une particule élémentaire. Mais la situation est encore plus gênante à l'échelle macroscopique. Comme l'a souligné Erwin Schrödinger avec son chat à la fois mort et vivant, les superpositions ne sont *a priori* pas confinées au microscopique. Si l'on applique l'équation de Schrödinger à des objets de la vie courante, constitués d'un grand nombre de particules, on obtient toujours des superpositions : la fonction d'onde du chat dans la boîte comprend aussi bien des configurations dans lesquelles il est mort que d'autres où il est vivant.

Les modèles de réduction dynamique visent à résoudre

ce problème en détruisant de façon aléatoire les superpositions macroscopiques, tout en conservant (à peu près) les superpositions microscopiques nécessaires pour expliquer les résultats expérimentaux.

En 1986, les Italiens Giancarlo Ghirardi, Alberto Rimini et Tullio Weber (GRW), proposent que la fonction d'onde d'une particule obéisse à l'équation de Schrödinger la plupart du temps, mais subisse parfois un « flash ». Avec une probabilité très faible, de sorte que l'événement se produit en moyenne moins de une fois par milliard d'années, la particule se matérialise en un endroit bien précis, nommé flash, autour duquel se resserre aussitôt

la fonction d'onde. Cette réduction brutale, qui modifie l'équation de Schrödinger, a un impact minime sur la dynamique microscopique, car une particule ne « flashe » presque jamais. En revanche, un objet macroscopique tel qu'un chat, contenant de l'ordre de 10^{23} atomes, voit chaque seconde des milliards de ses particules élémentaires se matérialiser en un flash. Une réalité « non superposée » émerge ainsi comme un tableau pointilliste.

S'il résout le problème des superpositions, le modèle GRW est *ad hoc* et ajoute de nouveaux paramètres fondamentaux à la physique (tels que la fréquence à laquelle les particules flashent) sans intuition quant à leur origine. Peu de physiciens pensent que GRW est la solution aux

problèmes conceptuels de la physique quantique. Les expériences cherchant à mesurer la stabilité de superpositions dans des systèmes de plus en plus gros devraient le réfuter bientôt.

Ce modèle permet néanmoins d'explorer des moyens d'introduire une force gravitationnelle classique. Dans le modèle développé par Antoine Tilloy et Lajos Diósi en 2015, au sein d'un système de particules (1, représentées de façon abusive chacune par une fonction d'onde, au lieu d'une fonction d'onde pour l'ensemble du système), une particule subit un flash (2, en rouge). Elle acquiert une masse et crée un champ gravitationnel qui attire les fonctions d'onde des autres particules (3).

➤ proposé de supposer qu'une superposition d'états est une entité bien réelle et contribue donc à courber l'espace-temps (qui, lui, reste bien unique, sans superposition). Ils ont ainsi spéculé que l'énergie de tous les états composant la superposition courbe l'espace-temps. Mais cette proposition de Møller et Rosenfeld soulève des difficultés conceptuelles. Il existe plusieurs façons de les mettre en évidence. Celle que nous allons présenter n'est pas celle qui a été utilisée historiquement, mais elle est la plus simple et la plus générale.

UNE INTRICATION NON LOCALE

Pour comprendre l'argument, il faut remonter à un article d'Albert Einstein, Boris Podolsky et Nathan Rosen publié en 1935. Dans cet article, ces chercheurs ont considéré un système de deux particules dans un état superposé de la forme: «particule 1 immobile, particule 2 en mouvement» et «particule 1 en mouvement, particule 2 immobile». Cet état est dit intriqué, car les états individuels des deux particules sont intimement liés: la mesure de la vitesse de la particule 1 fixe instantanément l'état (immobile ou en mouvement) de la particule 2, même si elles sont très éloignées l'une de l'autre.

Cette situation semble en contradiction avec la relativité restreinte qui stipule qu'aucune information ne peut se propager plus vite que la lumière: en effet, dans l'expérience de pensée ci-dessus, de l'information (l'état de la particule 1 ou 2) semble échangée instantanément entre les deux particules. Einstein et ses deux coauteurs en concluaient que la superposition initiale était un artefact de modélisation, et qu'il n'y avait en fait qu'une seule réalité, prédéterminée avant même la mesure. La superposition, présente dans le formalisme quantique, ne serait qu'une conséquence de notre ignorance. Il manquerait ainsi des variables (parfois dites cachées) qui spécifieraient de façon plus précise l'état des particules. Dès lors, le formalisme de la physique quantique serait incomplet car améliorable, manquant de spécifier un résultat pourtant prédéterminé.

Si, en revanche, les résultats ne sont pas déterminés avant la mesure, il faut admettre que la physique quantique implique l'existence d'interactions non locales, indépendantes de la distance séparant les particules et donc non contraintes par la relativité restreinte. Einstein jugeait cette solution inacceptable.

En 1964, au Cern, le physicien nord-irlandais John Stewart Bell a réexaminé l'expérience de pensée de 1935. Il a défini des inégalités (les inégalités de Bell) que doit vérifier toute théorie locale. Et comme la physique quantique, telle qu'elle est formulée, est non locale, les inégalités doivent être violées si cette théorie est correcte. Or cela a pu être testé expérimentalement. En 1982, Alain Aspect, de l'Institut d'optique, à

VERS UN TEST EXPÉRIMENTAL ?

Une nouvelle expérience a été proposée pour sonder le caractère quantique de la force gravitationnelle. Elle sera peut-être réalisable d'ici à quelques années. Elle repose sur deux microdiamants, mis chacun dans une superposition quantique de deux états. En rapprochant les deux diamants l'un de l'autre, la force de gravitation devrait intriquer ces états si cette force est de nature quantique. Si elle est fondamentalement classique, les chercheurs n'observeront pas de phénomène d'intrication.

