

➤ Bien que les calculs ne soient pas faciles, ce formalisme a été utilisé dans divers cas limites, pour calculer par exemple les propriétés d'atomes froids dans le champ gravitationnel terrestre ou pour prédire l'existence d'un rayonnement extrêmement faible (pas encore détecté) émis par les trous noirs, le rayonnement dit «de Hawking».

À l'inverse, nous n'avons aucune idée de la façon dont la matière décrite par la physique quantique courbe en retour l'espace-temps. Comprendre cette influence demande de s'interroger sur certains concepts très fondamentaux : qu'est-ce que la masse gravitationnelle en physique quantique ? Comment se crée un champ gravitationnel ? Sur ces questions, la physique quantique, dans son approche usuelle, est muette.

En revanche, cette théorie permet de faire des prédictions précises. Les informations disponibles sur un système quantique sont contenues dans un objet mathématique, la fonction d'onde du système. Dans les années 1920, les physiciens ont énoncé un ensemble de règles simples qui, à partir de la fonction d'onde, permettent de calculer et prévoir les résultats d'une mesure (ou plutôt leur probabilité) lors d'une expérience.

SUPERPOSITIONS D'ÉTATS

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.

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...) 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. Le célèbre chat de Schrödinger illustre cette idée.

Cependant, il est impossible d'observer directement les superpositions. Elles sont détruites lorsqu'on réalise une mesure. 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 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 l'article d'Albert Einstein, Boris Podolsky et Nathan Rosen publié en 1935 sur, selon eux, l'impossible intrication (voir *Pas d'échappatoire pour l'intrication*, par R. Hanson, page 26). Einstein et ses deux coauteurs en concluaient que la superposition est un artefact de modélisation, et qu'il n'y a 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 qui stipule qu'aucune information ne peut se propager plus vite que la lumière. Einstein jugeait cette solution inacceptable. L'histoire, en la personne de John Stewart Bell et Alain Aspect lui ont donné tort : la nature suit bien les prédictions quantiques et leur caractère non local.

Les conséquences de la non-localité sont-elles une menace pour la relativité restreinte ? Bizarrement, en apparence seulement. Les équations de la physique quantique conspirent à maintenir la non-localité sous une forme bénigne : elle est inexploitable pour transmettre de l'information et reste donc compatible avec la relativité restreinte.

En revanche, si l'on utilise la méthode de Møller et Rosenfeld pour intégrer une force gravitationnelle classique à la physique quantique, la situation devient problématique. Cette approche brise la linéarité de l'équation de Schrödinger, équation fondamentale qui régit l'évolution temporelle de la fonction d'onde d'un système quantique. En 1989, Nicolas Gisin, physicien genevois, fit remarquer que la non-linéarité a, de façon générale, une conséquence fatale : se propageant à d'autres éléments mathématiques de la théorie, elle est exploitable pour transmettre de l'information

plus vite que la lumière. Cet argument a disqualifié la proposition de Møller et Rosenfeld ainsi que toutes les approches similaires.

La question devient alors : existe-t-il une façon de coupler un espace-temps classique à de la matière quantique sans que la non-localité mette à mal les principes de la relativité restreinte ? Existe-t-il des modifications de la physique quantique contournant l'objection de Nicolas Gisin ? Dès 1984, Nicolas Gisin lui-même avait construit un modèle rudimentaire modifiant la physique quantique sans briser la relativité restreinte, en ajoutant aux équations un terme fondamentalement aléatoire. Ce modèle préfigurait les modifications de la physique quantique dites d'*objective collapse* en anglais ou « de réduction dynamique ».

Avant de chercher à les appliquer à la gravitation, les physiciens ont étudié les modèles de réduction dynamique pour résoudre un problème lié aux superpositions d'états. Dans l'exemple du chat de Schrödinger, la superposition d'états d'un atome se répercute sur un objet macroscopique et jusque sur les instruments de mesure. Or, soulignait Schrödinger, ce phénomène est problématique puisqu'on n'observe pas de superpositions à l'échelle macroscopique. Les

partisans de l'école de Copenhague écartaient cette difficulté en postulant que les instruments de mesure étaient de nature différente, intrinsèquement classique, et qu'ils réduisaient automatiquement les superpositions à leur contact. Mais cette distinction entre monde quantique et instruments de mesure classiques est arbitraire, les instruments étant eux-mêmes faits d'atomes.

SUPPRIMER LES SUPERPOSITIONS

À partir de la fin des années 1980, les physiciens ont exploré la possibilité que la physique quantique ne soit qu'une approximation d'une théorie plus fondamentale, dans laquelle les superpositions à l'échelle macroscopique sont impossibles. Qu'elles soient réelles ou de purs artefacts du formalisme, les superpositions resteraient confinées au monde microscopique. L'idée est d'ajouter dans l'équation de Schrödinger des termes garantissant que les superpositions se réduisent à un état unique lorsque le système devient grand. Cependant, pour respecter la remarque de Gisin, la seule façon de modifier l'équation est d'ajouter des termes de nature aléatoire : en les choisissant judicieusement, les non-linéarités problématiques comme celles qui émergeaient dans le

RÉDUCTION 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.

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 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.

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).

