

> 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.

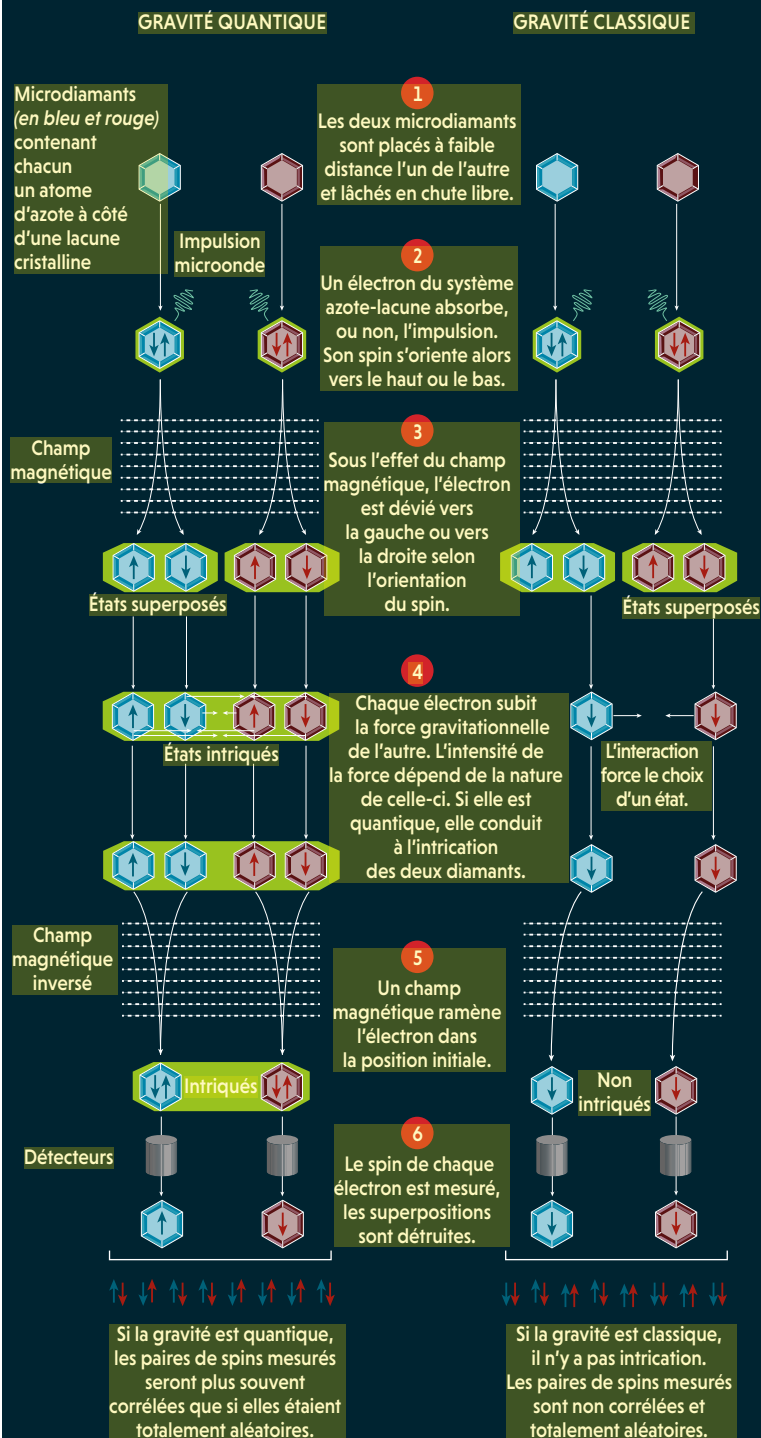
Cette situation semble en contradiction avec la relativité restreinte qui stipule qu'aucune information ne peut se propager plus vite que la lumière: en effet, dans l'expérience de pensée ci-dessus, de l'information (l'état de la particule 1 ou 2) semble échangée instantanément entre les deux particules. 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, a

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.



Orsay, et son équipe ont constaté sur un système de photons intriqués que les inégalités de Bell étaient effectivement violées et donc que la nature suivait 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, pionnier de l'étude de la non-localité quantique, 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

La méthode de Møller et Rosenfeld entraîne des difficultés avec la relativité

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 compatibles avec le théorème 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, le chat, et jusque sur les instruments de mesure. Or, comme voulait le souligner Schrödinger, ce phénomène est problématique puisqu'on n'observe pas les effets des 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 ainsi 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: les atomes conserveraient leur capacité à exister dans plusieurs états à la fois, mais le chat de Schrödinger serait contraint par les équations à être dans un état qui est soit la vie, soit la mort. 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 le théorème 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 modèle de Møller et Rosenfeld se compensent et s'annulent. L'aléa permet de rétablir la linéarité de l'équation et élimine la possibilité de transmettre des signaux plus rapides que la lumière.

Les plus connus de ces modèles de réduction dynamique sont le modèle GRW (voir l'encadré page 33), du nom de ses auteurs, les Italiens Giancarlo Ghirardi, Alberto Rimini et Tullio Weber, et le modèle DP, du physicien hongrois Lajos Diósi et du mathématicien anglais Roger Penrose.

Initialement, aucun de ces modèles n'incluait la force gravitationnelle; l'objectif était alors simplement de supprimer les superpositions. Ces tentatives ont aussi prouvé qu'il est possible de modifier l'équation de Schrödinger sans entrer en conflit avec le théorème de Gisin: il faut simplement ajouter la bonne quantité d'aléa.

Durant les vingt-cinq années qui ont suivi l'introduction de ces modèles de réduction ➤