

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.

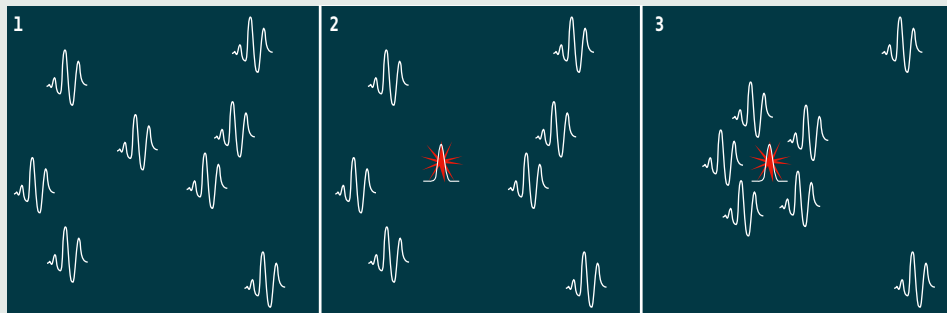
En 1986, les Italiens Giancarlo Ghirardi, Alberto Rimini et Tullio Weber (GRW), proposent que la fonction d'onde d'une particule obéisse à l'équation de Schrödinger la plupart du temps, mais subisse parfois un « flash ». Avec une probabilité très faible, de sorte que l'événement

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.

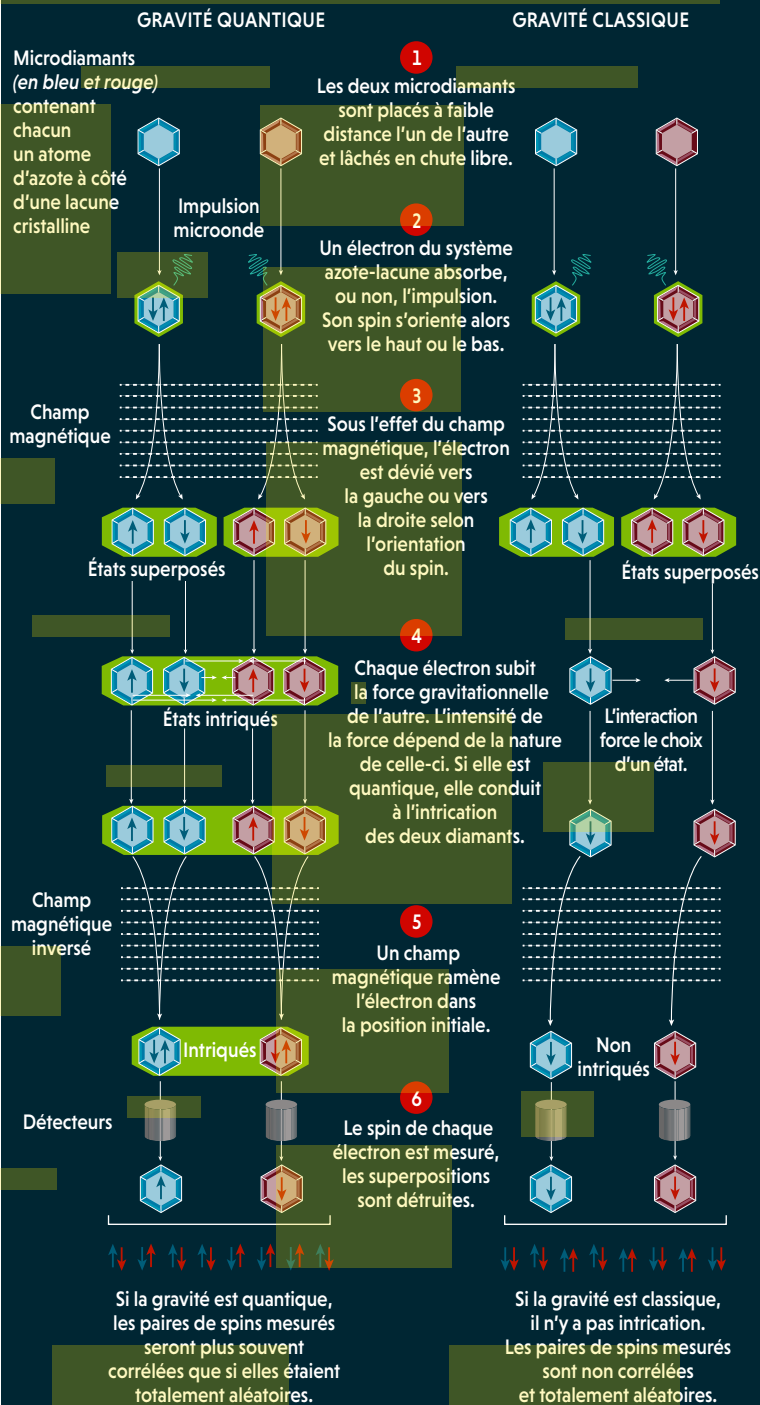
S'il résout le problème des superpositions, le modèle GRW est *ad hoc* et ajoute de nouveaux paramètres fondamentaux à la physique sans intuition quant à leur origine. Peu de physiciens pensent que GRW est la solution aux problèmes conceptuels de la physique quantique. Les expériences cherchant à mesurer 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).



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.



➤ 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 précédente), du nom des Italiens Giancarlo Ghirardi, Alberto Rimini et Tullio Weber, et le modèle DP, du Hongrois Lajos Diósi et de l'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 en respectant la limite 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 dynamique, l'idée d'y inclure la gravitation est restée peu discutée. Les physiciens pensaient que les prédictions seraient de toute façon impossibles à tester expérimentalement. Mais vers 2010, les chercheurs ont envisagé la possibilité d'explorer le caractère quantique de la gravitation grâce à des expériences à basse énergie exploitant finement les superpositions quantiques.

UNE GRAVITATION IRRÉALISTE

Du côté théorique, la situation était embarrassante: on ne disposait pas de théorie de gravité semi-classique cohérente qui puisse être comparée aux résultats des expériences futures. En pratique, les théoriciens étaient contraints d'utiliser l'approche (incohérente) de Møller et Rosenfeld en croisant les doigts pour que ses prédictions soient à peu près valables dans des situations simples. Faute de mieux, on se servait d'une théorie que l'on savait fautive pour estimer des ordres de grandeur et guider le choix des expériences futures.

En 2014, les physiciens Dvir Kafri et Jacob Taylor, de l'université du Maryland, avec Gerard Milburn, de l'université de Californie à Santa Barbara, ont développé un premier modèle simplifié de gravité semi-classique. Mais la force gravitationnelle n'était pas réaliste, même dans le cas non relativiste où l'on considère des vitesses faibles: elle ne reproduisait pas l'expression newtonienne d'une force proportionnelle à l'inverse du carré de la distance. Cependant, par construction, le modèle est cohérent. Et s'il ne décrit pas une force réaliste, ce résultat est un grand pas en avant. Pouvaient-on aller plus loin?

Au début de 2015, en exploitant la même intuition que Dvir Kafri et ses collègues et en la fusionnant avec les constructions historiques des modèles de réduction dynamique des années 1990, j'ai construit, avec Lajos Diósi, un modèle complet reproduisant la bonne force gravitationnelle (newtonienne). Notre modèle ne fonctionne que pour des vitesses faibles, ce