

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 >

➤ 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.

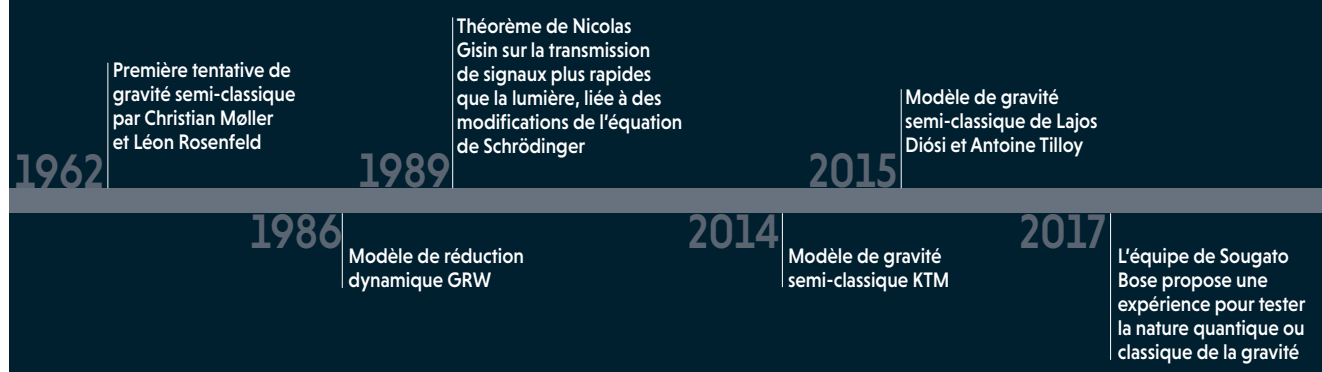
Du côté théorique, la situation était embarrassante: on ne disposait pas de théorie de gravité semi-classique cohérente qui puisse être comparée aux résultats des expériences futures. En pratique, les théoriciens étaient

modèle ne fonctionne que pour des vitesses faibles, ce qui est néanmoins suffisant pour traiter toutes les expériences de laboratoire à basse énergie.

Quelle est l'idée du modèle? Rappelons que la difficulté de la gravité semi-classique consiste à extraire de la physique quantique une grandeur que l'on peut définir comme la masse (ou l'énergie) servant de source à un champ gravitationnel classique (sans superposition d'états).

Dans l'approche standard, le seul objet dont on dispose est la fonction d'onde. Dans les approches de réduction dynamique comme le modèle GRW, l'évolution de la fonction

Vers une théorie de la gravité semi-classique



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 qu'ils obtenaient dans leur modèle 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. Peut-on aller plus loin et reproduire la bonne force?

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 (proportionnelle à l'inverse du carré de la distance). Notre

d'onde de chaque particule (dictée par l'équation de Schrödinger) est interrompue de façon aléatoire. C'est ce qu'on nomme un «flash», c'est-à-dire un point de l'espace-temps où la superposition est détruite. Le terme de «flash» a été choisi pour mettre en valeur l'aspect éphémère du phénomène (et n'a rien à voir avec une émission de lumière).

COMME UN FILM DE 24 IMAGES PAR SECONDE

Dans notre modèle, la particule devient réelle à l'instant et l'endroit précis du flash. Elle se matérialise et acquiert une masse (celle-ci est reliée à la masse usuelle de la particule, qu'il faut voir comme une sorte de moyenne entre les moments où la particule subit un flash et ceux, hors flash, où elle n'est pas matérialisée). Au moment du flash, la particule crée donc un champ gravitationnel. La particule attire alors vers elle la fonction d'onde du reste du système ou, dit de façon un peu abusive, toutes les autres particules du système. Puis une autre particule se matérialise par un flash et attire vers elle la fonction d'onde du reste, etc. Entre chaque flash, l'évolution quantique usuelle reprend le relais. La gravité se manifeste ainsi de façon saccadée.

Si cette dynamique semble en contradiction avec l'impression que nous avons d'une force