

L'ESSENTIEL

- > La plupart des physiciens pensent que la physique quantique et la relativité générale ne peuvent être conciliées que dans le contexte d'une théorie quantique de la gravitation.
- > Les principales pistes que sont la théorie des cordes ou la gravitation quantique à boucles n'ont pas encore obtenu de résultats satisfaisants.
- > Une autre voie est celle de la « gravitation semi-classique », où cette force resterait de nature classique. Des modèles développés récemment montrent que cette approche peut fonctionner.
- > Des expériences pour tester directement la nature quantique ou classique de la gravitation pourraient voir le jour d'ici à une dizaine d'années.

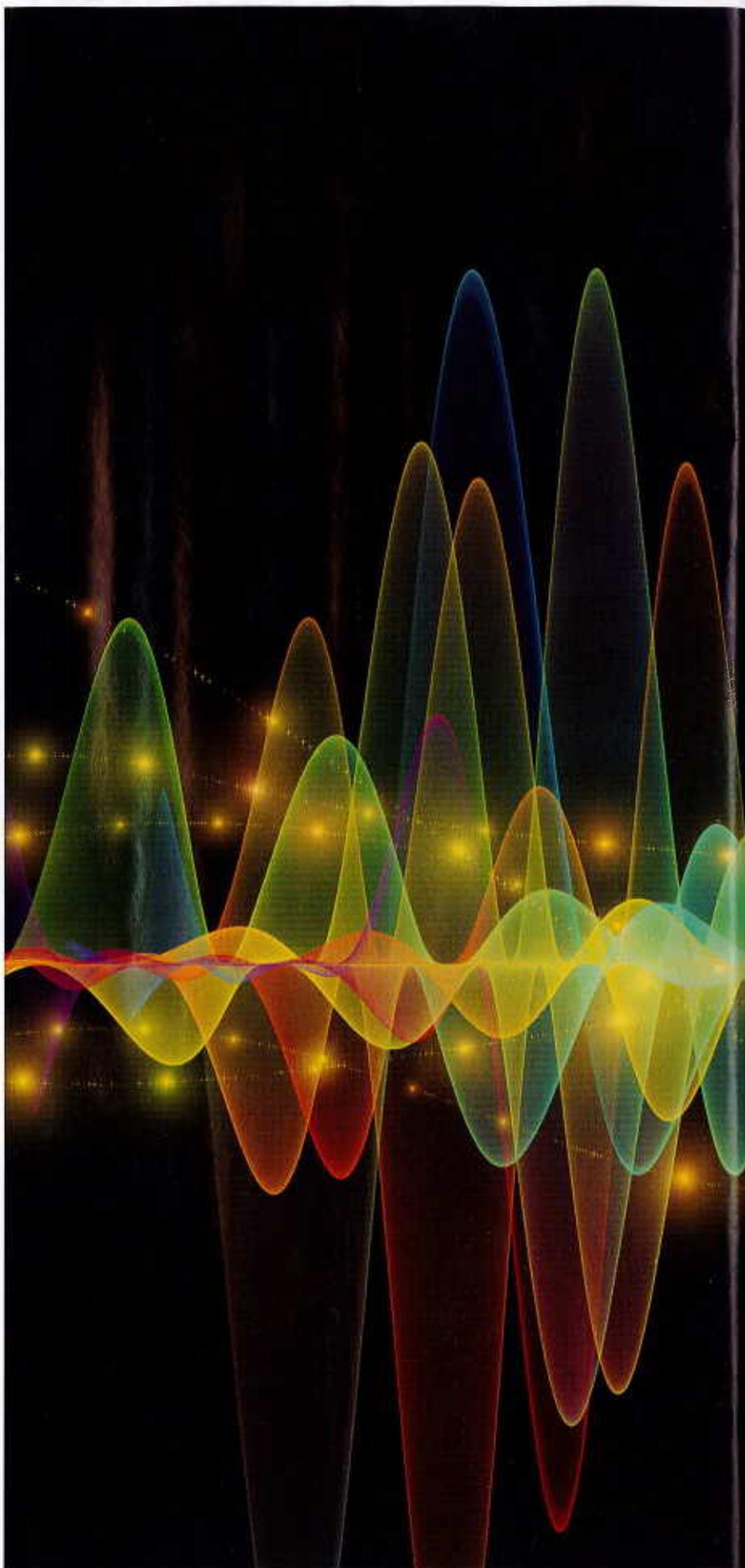
L'AUTEUR



ANTOINE TILLOY
physicien à l'institut Max-Planck d'optique
quantique, près de Munich, en Allemagne

Pour Carlo Rovelli, chercheur au centre de physique théorique de Luminy, près de Marseille, «le problème de la gravitation quantique n'est rien de moins que le problème de trouver la nouvelle description cohérente du monde, qui amènerait enfin la révolution scientifique du xx^e siècle à sa conclusion.»

La révolution en question est celle de l'avènement de deux théories: la physique quantique, qui porte notamment sur le comportement des particules à l'échelle microscopique, et la relativité générale, qui décrit l'espace-temps et la gravitation. Ces deux théories ont bouleversé notre vision du monde, des plus petites aux plus grandes échelles. Mais les réunir dans «une nouvelle description cohérente», comme l'évoque Carlo Rovelli, est encore hors de portée. Jusqu'ici, toutes les tentatives visant à élaborer une théorie quantique de la gravitation, ou «gravité quantique» pour faire court, ont été décevantes. Mais cette synthèse est-elle vraiment >



Et si la gravité n'était pas quantique?

Les tentatives d'échafauder une théorie quantique de la gravitation ont jusqu'ici échoué. Des physiciens explorent une autre voie, où cette force resterait de nature classique. Mais cela implique de repenser les fondements de la physique quantique.

Dans certaines interprétations de la physique quantique, dites de réduction dynamique, les particules se matérialisent lors de « flashes ». Dans de tels modèles, on peut inclure la gravitation sans avoir besoin d'en établir une formulation quantique.

COMMENT INTERPRÉTER LA PHYSIQUE QUANTIQUE ?

La théorie quantique est constituée d'un ensemble de lois et de règles qui permettent de calculer avec succès et précision les probabilités d'obtenir différents résultats lors d'une expérience. Mais ce formalisme mathématique ne dit rien de la réalité sous-jacente. En particulier quelle est la nature, et la signification, de la fonction d'onde, l'un des ingrédients clés de la physique quantique ? Et de façon plus générale, que se passe-t-il dans

le monde quantique ? Qu'est-ce qui est réel ? Toute théorie de la gravitation de type semi-classique, qui concilierait la force gravitationnelle classique et les autres interactions fondamentales quantiques, exige de répondre à ces questions afin que l'on puisse définir une notion concrète de masse gravitationnelle. Il existe des dizaines d'interprétations de la physique quantique, plus ou moins radicales, dont je présente ici les plus abouties. **A. T.**

INTERPRÉTATION DE COPENHAGUE



L'interprétation de Copenhague est l'approche historique, influencée par le physicien danois Niels Bohr et ses collaborateurs. Elle existe en de nombreuses variantes qui donnent à la fonction d'onde des statuts subtilement différents. Aujourd'hui, on identifie en général cette interprétation à celle figurant dans les manuels actuels, même si la version modernisée s'éloigne en partie des idées parfois confuses de Bohr. Dans cette interprétation dite orthodoxe, la question même du statut de la fonction d'onde n'est pas pertinente, car considérée

comme métaphysique plutôt que physique. Inspirée par la philosophie positiviste, l'approche orthodoxe considère en effet plus généralement qu'une théorie physique doit se limiter à prédire la statistique de résultats expérimentaux, toute autre discussion étant au mieux superflue, au pire hérétique. En 1989, le physicien américain David Mermin, critique de cette philosophie, a résumé l'interprétation de Copenhague en un slogan frustrant destiné aux étudiants : *shut up and calculate* (« tais-toi et calcule »).

Mais s'interdire par principe ou par modestie de poser la question de la réalité

ne la fait pas disparaître pour autant. Exaltés par le succès de leur approche minimaliste, certains fondateurs de la physique quantique ont fait l'erreur de la croire inévitable.

Le physicien allemand Werner Heisenberg, par exemple, écrivait en 1958 : « L'idée d'un monde extérieur objectif, dont les constituants élémentaires existent de la même façon que les pierres et les arbres existent, indépendamment de l'observation, est impossible. » Heureusement, les physiciens n'ont jamais prouvé une telle chose ! La question reste aujourd'hui plus que jamais ouverte.

MONDES MULTIPLES



Proposée par l'Américain Hugh Everett en 1956, l'interprétation des mondes multiples a pour objectif de donner une description du réel sans rien ajouter à la fonction d'onde ni modifier sa dynamique. La fonction d'onde décrit naïvement une réalité superposée, qui s'étend des particules microscopiques aux objets macroscopiques et même à l'Univers dans sa globalité. L'interprétation des mondes multiples décrète que les superpositions d'états sont réelles et que ces états existent simultanément : par exemple, à chaque mesure, un univers où le chat de Schrödinger est vivant se sépare d'un autre où il est mort. La théorie de la décohérence, développée par Dieter Zeh en 1970, explique que cette approche est en principe compatible avec l'impression de vivre dans un univers unique : une fois que deux univers deviennent suffisamment différents, ils n'interagissent plus entre eux, et évoluent de façon parallèle, invisibles l'un pour l'autre.

MÉCANIQUE BOHMIENNE



Introduite par le physicien américain David Bohm en 1952, mais ébauchée par le Français Louis de Broglie dès 1927, la mécanique bohmiennne (ou théorie de l'onde pilote) est une reconstruction plutôt qu'une interprétation de la physique quantique. Dans cette théorie, la réalité est constituée de particules ponctuelles qui sont guidées de façon déterministe par la fonction d'onde, ou onde pilote, qui a un statut de loi fondamentale. Ce qui constitue la réalité est simple (des particules), et la subtilité quantique est tout entière dans la dynamique de l'onde pilote. En 1993, les physiciens Detlef Dürr, Sheldon Goldstein et Nino Zanghì ont établi que les prédictions empiriques de la mécanique bohmiennne étaient identiques à celles de l'approche orthodoxe.

MODÈLES DE RÉDUCTION DYNAMIQUE



L'objectif des modèles de réduction dynamique est de modifier légèrement la dynamique de la fonction d'onde pour détruire les superpositions macroscopiques et ainsi forcer la réalité à choisir un unique univers, évitant ainsi l'explosion ontologique de l'interprétation des mondes multiples d'Everett. Le prix à payer est une infime modification des prédictions de la physique quantique, à ce jour non observée. Dans le modèle de Giancarlo Ghirardi, Alberto Rimini et Tullio Weber, proposé en 1986, cette modification prend la forme d'un effondrement de la fonction d'onde, rare, aléatoire et spontané en un point de l'espace. La réduction de la fonction d'onde, qui se faisait uniquement lors de la mesure d'un observateur dans l'interprétation de Copenhague, se fait ici de façon naturelle. Dans cette approche, on peut postuler que ces instants de réduction, nommés *flashes*, où la particule se matérialise, sont la seule réalité.

QBISME



En 2001, Carlton Caves, Christopher Fuchs et Rüdiger Schack ont proposé le « QBisme » (ou bayésianisme quantique) : la fonction d'onde est un outil mathématique qui encode les croyances réévaluables de l'observateur sur le système quantique étudié. Une telle vision purement statistique de la fonction d'onde, bien que séduisante, est incompatible avec la non-localité quantique. Le prix à payer pour éviter la contradiction est de renoncer à la notion de réalité objective, même pour les résultats de mesures, qui deviennent eux aussi subjectifs, dépendants de l'observateur. Pour Christopher Fuchs, la réalité est participative : créée par et pour l'observateur. Anticipé par David Mermin, le QBisme demande d'accepter que « la Lune n'est démontrablement pas là quand on ne la regarde pas ».

> nécessaire? Et si oui, la gravité quantique est-elle la seule façon d'y parvenir? Des physiciens dont je fais partie explorent une autre piste qui consiste à concilier relativité générale et physique quantique sans pour autant imposer une formulation quantique de la gravitation.

Pour y parvenir, ils sont amenés à repenser les fondements de la physique quantique. Cette théorie a été développée à partir des années 1920 et 1930 sous l'impulsion de Niels Bohr, Louis de Broglie, Werner Heisenberg, Erwin Schrödinger, Paul Dirac et d'autres. Au cours de la seconde moitié du xx^e siècle, elle a conduit au développement de la théorie quantique des champs, qui intègre dans un ensemble cohérent le «modèle standard de la physique des particules», trois des quatre interactions fondamentales. Celles-ci sont l'électromagnétisme, qui agit entre photons et particules dotées d'une charge électrique, l'interaction forte, qui assure la cohésion des protons et des neutrons (les composants du noyau atomique), et l'interaction faible, qui se manifeste notamment dans la radioactivité bêta.

La quatrième interaction fondamentale, la gravitation, est décrite par une théorie très différente de la physique quantique: la relativité générale, introduite en 1915 par Albert Einstein. Dans cette théorie, la matière et l'espace-temps interagissent pour donner ce

dans les expériences menées dans les accélérateurs de particules.

DES THÉORIES INCOMPATIBLES

Ainsi, à son niveau le plus fondamental, l'Univers semble régi par deux mécaniques distinctes, deux ensembles de lois *a priori* incompatibles tant les notions et objets de ces théories sont différents. Dans leurs domaines d'application respectifs, ces deux théories sont d'une efficacité redoutable. Mais relativité générale et physique quantique ne semblent pas pouvoir être utilisées simultanément, en tout cas pas sans modification. Que se passe-t-il, par exemple, dans une situation où les effets dus à la physique quantique sont importants, mais où la force gravitationnelle domine? La réponse simple est que l'on ne sait pas. Le problème n'est pas que l'on ne sait pas effectuer les calculs, mais que l'on n'a même pas de cadre théorique approprié.

Les situations où il faudrait utiliser à la fois la physique quantique et la relativité générale sont rares dans la nature. Nous n'avons donc pas de résultats expérimentaux pour nous indiquer ce qui s'y passe. Cette situation est due au fait que la gravitation est une force extrêmement faible, qui ne domine les trois autres que pour les objets massifs et étendus. Or les effets quantiques tendent, eux, à se brouiller lorsque la taille des objets considérés augmente.

Néanmoins, au moins deux situations motivent la recherche d'une théorie quantique de la gravitation. Sans une telle théorie, il semble impossible de savoir ce qui s'est passé au début de l'Univers, au moment du Big Bang, ou au centre des trous noirs, ces objets d'une extrême densité qui déforment l'espace-temps au point que même la lumière ne peut s'en échapper. Dans ces deux cas, où la gravitation est très forte, la relativité générale prédit l'existence de singularités, c'est-à-dire des grandeurs physiques infinies. C'est là un signal clair que cette théorie est insuffisante, à elle seule, pour décrire ces situations: les effets de la physique quantique y sont importants et doivent être pris en compte.

Dès lors, comment construire une théorie globale combinant physique quantique et relativité générale? Une première piste naturelle est la «quantification canonique». Cette technique formelle permet de produire une version quantique d'une théorie physique dont on ne connaît qu'une formulation «classique». En 1927, le physicien anglais Paul Dirac a introduit et appliqué avec succès cette méthode à l'électromagnétisme. Avec ses raffinements successifs, cette approche a conduit à l'intégration des trois interactions non gravitationnelles au sein du modèle standard.

En 1967, les Américains John Wheeler et Bryce DeWitt ont tenté d'obtenir une formulation quantique de la gravitation en utilisant la quantification canonique. Mais cette approche >

A priori, sans une théorie quantique de la gravité, il semble impossible de savoir ce qui s'est passé au début de l'Univers

que l'on perçoit comme la force gravitationnelle: la matière (et l'énergie) courbe l'espace-temps et son mouvement est, en retour, déterminé par le «relief» de l'espace-temps.

La relativité générale est utile dans les situations où la gravitation domine, c'est-à-dire principalement en astrophysique et en cosmologie. La physique quantique, plus précisément le modèle standard, s'applique plutôt dans des situations où la gravitation est négligeable en comparaison des autres forces, ce qui est le cas

> fonctionnait mal et entraînait des difficultés techniques et conceptuelles qui semblaient insurmontables. Notamment, la théorie que l'on obtient par quantification canonique est «non renormalisable», c'est-à-dire qu'elle fait apparaître dans les calculs des infinis dont on ne peut se débarrasser. De façon plus philosophique, et en admettant que ce point technique soit contournable, des notions *a priori* triviales comme le temps ou la causalité deviennent difficiles à comprendre et même à définir.

DES CORDES ET DES BOUCLES

Ce premier échec a motivé des approches plus exotiques et élaborées, comme la «gravité quantique à boucles», qui est un raffinement de l'approche canonique et dont Carlo Rovelli est l'un des auteurs, ou la théorie des cordes, qui s'en éloigne plus radicalement. Cette dernière, qui est probablement la voie la plus explorée et la plus aboutie, fait l'objet d'études intenses depuis environ quarante ans. Dans cette approche, les objets fondamentaux ne sont pas des particules ponctuelles, mais de minuscules cordes vibrantes. Parmi les nombreux aspects intéressants de cette théorie, un résultat prometteur du point de vue d'une gravité quantique est qu'elle décrit un mode de vibration (d'une corde) qui serait associé au graviton, la particule médiatrice de la force gravitationnelle lorsqu'on suppose que celle-ci est de nature quantique.

Cependant, si la théorie des cordes contourne la non-renormalisabilité de l'approche canonique, ses succès se paient par une complexité mathématique extrême, au point que l'on ne dispose pas d'une définition mathématique générale de la théorie. En pratique, les physiciens ont un ensemble d'approximations dont on conjecture qu'elles sont les limites d'une théorie sous-jacente (la théorie M) qui reste à expliciter. La théorie des cordes souffre aussi d'un excès de flexibilité. Un choix judicieux de conditions initiales permettrait d'obtenir à peu près n'importe quelle prédiction, ce qui met en question la réfutabilité de la théorie. Ces difficultés justifient *a minima* que l'on s'intéresse à d'autres pistes.

Après tout, si parvenir à une formulation quantique de la gravitation se révèle aussi difficile, c'est peut-être parce que la gravité diffère, par nature, des autres forces. Aucun principe n'interdit *a priori* de construire une théorie globale faisant cohabiter la relativité générale et la physique quantique en gardant une formulation classique de la gravité. L'idée est moins esthétique – la gravitation serait alors fondamentalement différente des autres interactions – mais l'Univers fait peu de cas de nos canons de beauté. On parle alors de gravité semi-classique («semi» car la gravité n'est pas quantique, tandis que les autres forces le sont).

À quelles contraintes une telle théorie est-elle soumise? Elle doit continuer à décrire la

La théorie des cordes est extrêmement complexe et souffre d'un excès de flexibilité

force gravitationnelle de la même façon que la relativité générale, mais avec une subtilité supplémentaire: la matière doit obéir par ailleurs aux lois de la physique quantique.

Comme on l'a déjà dit, la relativité générale décrit la gravitation comme le résultat d'une interaction dynamique entre matière et espace-temps: la courbure de l'espace-temps détermine le mouvement de la matière, tandis que, simultanément, la matière déforme le relief de l'espace-temps. Dans cette double dynamique, il est assez simple d'adapter les équations de la physique quantique pour prendre en compte une courbure donnée *a priori*: c'est la théorie quantique des champs en espace courbe, sur laquelle ont travaillé des chercheurs comme Bill Unruh, Stephen Hawking, Roger Penrose et Robert Wald à partir des années 1970.

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 se poser des questions très fondamentales sur certains concepts: qu'est-ce que la masse gravitationnelle en physique quantique? Comment se crée un champ gravitationnel? Etc. Là-dessus, 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.

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

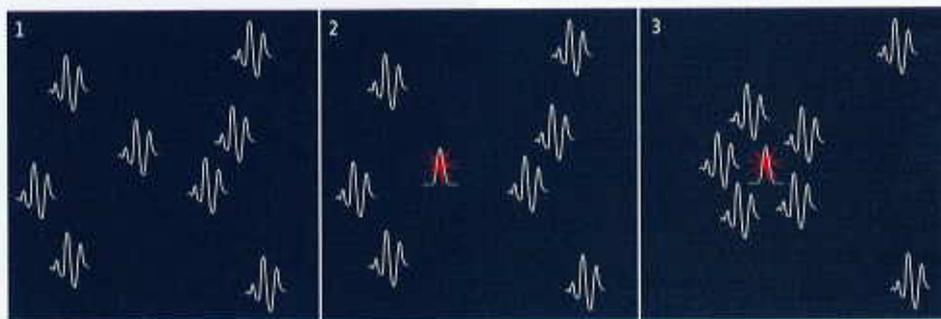
Une spécificité de la physique quantique, que l'on n'observe pas dans le monde classique, est le principe de superposition. Tant que la propriété d'un objet quantique (sa position, sa vitesse, son spin, etc.) n'a pas été mesurée, l'objet peut exister dans une superposition d'états correspondant à des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

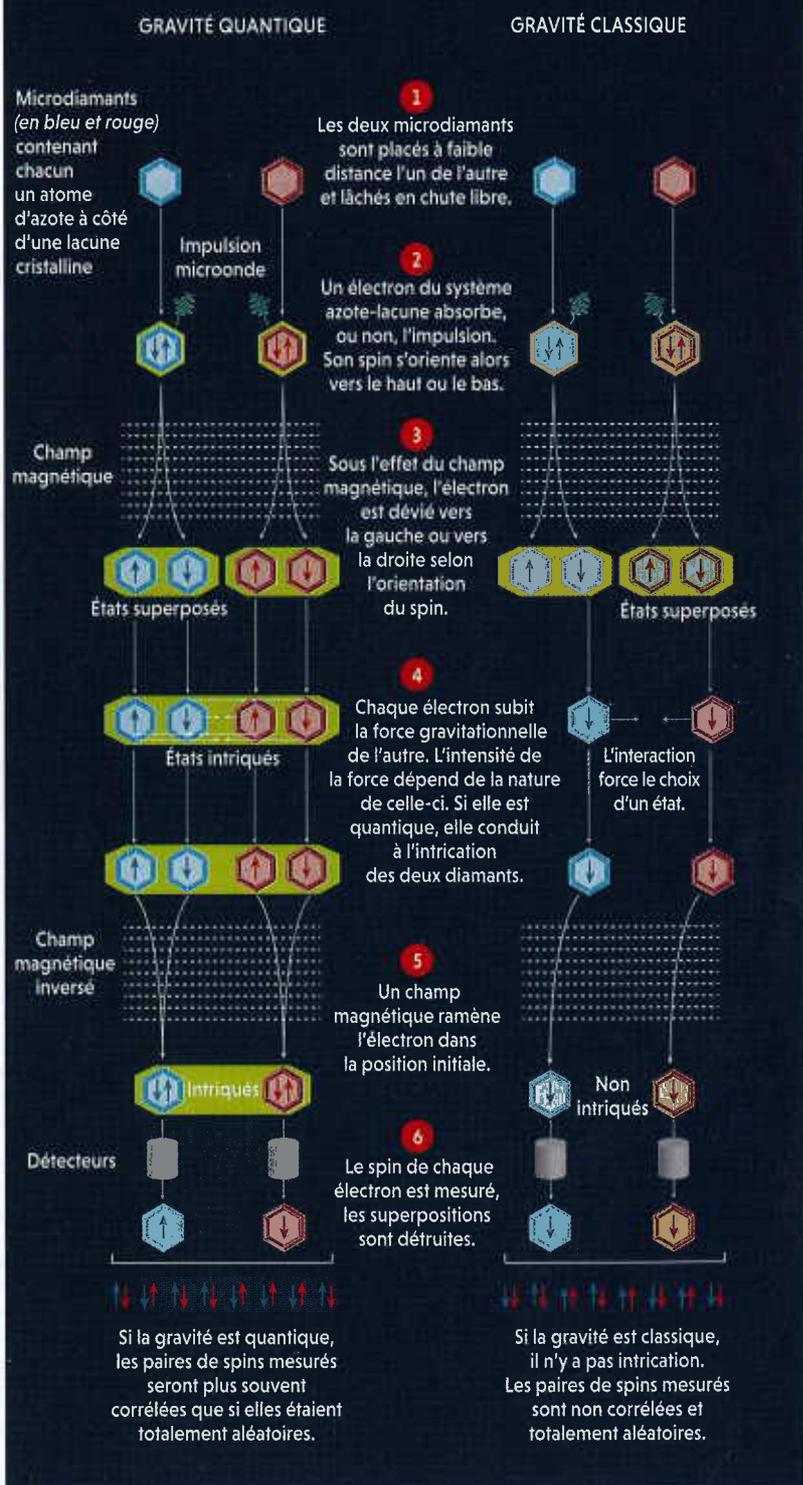
Cette situation semble en contradiction avec la relativité restreinte qui stipule qu'aucune information ne peut se propager plus vite que la lumière: en effet, dans l'expérience de pensée ci-dessus, de l'information (l'état de la particule 1 ou 2) semble échangée instantanément entre les deux particules.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



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.

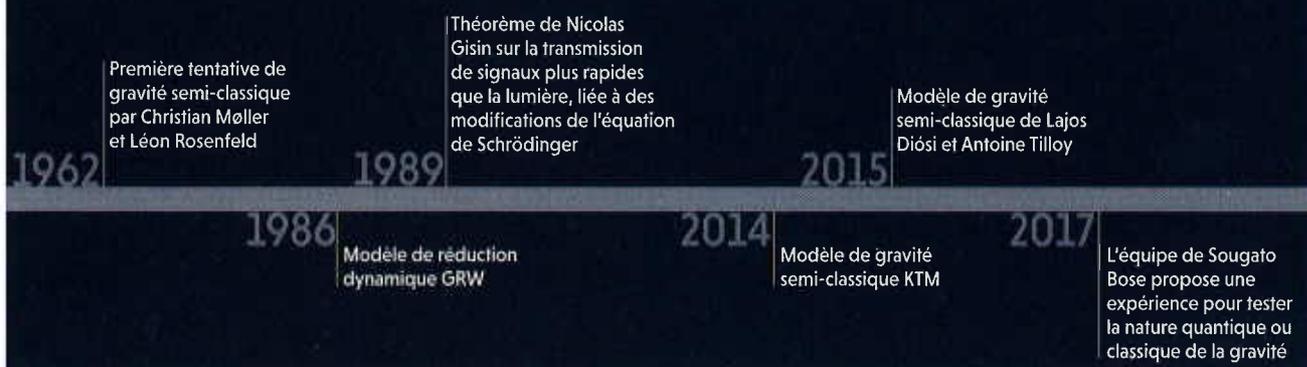
Du côté théorique, la situation était embarrassante: on ne disposait pas de théorie de gravité semi-classique cohérente qui puisse être comparée aux résultats des expériences futures. En pratique, les théoriciens étaient

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

gravitationnelle continue, elle est compatible avec les contraintes expérimentales actuelles. Cela s'explique par la faiblesse de la gravitation. Entre deux particules élémentaires, cette force est bien trop petite pour être détectable. Elle n'est observable qu'avec des objets macroscopiques, et même une balle de golf, constituée

variantes où, par exemple, chaque flash a une certaine extension spatiale, ou subsiste au-delà de l'instant de son apparition. Cela modifie les prédictions quantitatives, qu'il sera intéressant de confronter avec les expériences. Cette flexibilité pourrait cependant devenir une faiblesse: si tout résultat expérimental est explicable *a posteriori* en changeant le modèle à la marge, l'approche globale perdra son caractère prédictif. Ainsi, alors que le problème initial était l'impossibilité apparente de construire un seul modèle de gravité semi-classique cohérent, on risque de se retrouver au contraire avec trop de solutions.

Une tout autre façon d'aborder le problème de la gravité classique ou quantique est de rechercher des signatures expérimentales qui permettraient de tester la pertinence de la gravité semi-classique indépendamment du modèle. En 2017, une équipe d'expérimentateurs et de théoriciens, menés par Sougato Bose, à l'University College de Londres, ont répondu précisément à ce défi. Ils ont proposé une expérience permettant de conclure quant au caractère quantique ou non de la gravitation.

Pour ce faire, ils exploitent une différence qualitative entre toutes les approches semi-classiques cohérentes et une hypothétique théorie quantique. L'idée est d'intriquer une fonction d'onde *via* la force gravitationnelle (voir la figure page 34). Cela n'est possible que si cette force est de nature quantique. Si la force gravitationnelle n'est pas quantique, on n'observera pas d'intrication.

UNE RÉPONSE D'ICI À QUELQUES ANNÉES ?

La difficulté de l'expérience de Bose est de trouver une configuration telle que toutes les autres forces, notamment la force de Casimir, liée aux fluctuations électromagnétiques du vide, sont bien négligeables devant la gravité. La surprise est que les avancées techniques requises sont assez raisonnables en termes de microfabrication, de contrôle quantique des systèmes... Des défis, certes, mais sans commune mesure avec celui d'un accélérateur de particules grand comme le Système solaire, qui semble indispensable pour détecter directement des gravitons.

Dans les années 1980, les physiciens pensaient que la nature quantique ou classique de la gravité était une question théorique. Elle sera peut-être expérimentale dans un futur proche. Le résultat le plus intéressant serait de découvrir que la gravité n'est pas quantique. Cela irait à contre-courant de ce que pensent la majorité des physiciens et des efforts consentis ces soixante dernières années. À l'inverse, si la gravité est quantique, une théorie de la gravité quantique n'en deviendra que plus indispensable. ■

Un objet du quotidien d'environ 10^{23} atomes subirait des milliards de flashes par milliseconde

pourtant de plus de 10^{23} atomes, produit une force gravitationnelle à peine détectable.

Dans cette balle ou dans tout objet macroscopique, les milliards de flashes et d'à-coups gravitationnels qui apparaissent chaque milliseconde donnent aux observateurs l'impression d'un champ gravitationnel évoluant de façon douce et continue. Le phénomène est analogue à la persistance rétinienne, grâce à laquelle une succession de 24 images statiques par seconde nous fait apparaître un mouvement fluide et non saccadé.

Un tel modèle, où les flashes sont la source de la force gravitationnelle, présente un certain nombre de signatures expérimentales potentiellement détectables. Par exemple, chaque flash ajoute de l'énergie cinétique aux particules. Cette petite augmentation d'énergie serait observable sous la forme d'un réchauffement mesurable, par exemple, dans des condensats d'atomes ultrafroids.

Faut-il croire à ce modèle? Probablement pas: rappelons qu'il ne fonctionne que dans le régime non relativiste. Il sera intéressant de le réfuter par des expériences pour tester les limites de la physique quantique. Mais en développant ce modèle, notre objectif était surtout de fournir un contre-exemple à l'affirmation selon laquelle une théorie hybride, où la gravité serait classique, est impossible à construire. Disposer d'un modèle cohérent, même s'il est *in fine* réfuté, permet de prouver que la question de la quantification de la gravité est bien empirique et se tranchera par l'expérience.

Ce modèle peut aussi servir de point de départ pour construire de nombreuses

BIBLIOGRAPHIE

F. Laloe, **Comprenons-nous vraiment la mécanique quantique ?**, EDP Sciences (2^e éd.), 2018.

A. Tilloy, **Ghirardi-Rimini-Weber model with massive flashes**, *Phys. Rev. D*, vol. 97(2), 021502, 2017.

S. Bose et al., **A spin entanglement witness for quantum gravity**, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 119(24), article 240401, 2017.

G. Ghirardi, **Collapse theories**, *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, Edward N. Zalta (ed.), 2016.

N. Gisin, **Stochastic quantum dynamics and relativity**, *Helv. Phys. Acta*, vol. 62, pp. 363-371, 1989.