

> 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

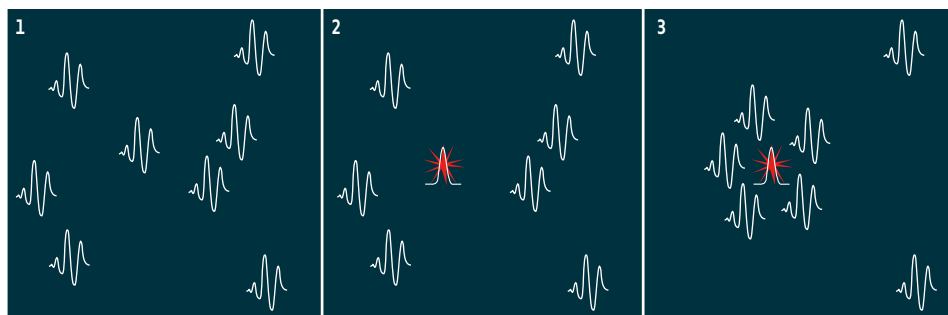
Une spécificité de la physique quantique, que l'on n'observe pas dans le monde classique, est le principe de superposition. Tant que la propriété d'un objet quantique (sa position, sa vitesse, son spin, etc.) n'a pas été mesurée, l'objet peut exister dans une superposition d'états correspondant à des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