

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.

Cependant, au moins deux situations motivent la recherche d'une théorie quantique de la gravitation. Sans une telle théorie, il semble

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.

UNE THÉORIE CHER PAYÉE

Cependant, les succès de la théorie des cordes 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 que l'on s'intéresse à d'autres pistes.

Après tout, si parvenir à une formulation quantique de la gravitation est 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 où cohabiteraient 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, à l'inverse des autres forces).

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

La relativité générale décrit, nous l'avons vu, 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 Stephen Hawking, Roger Penrose, Robert Wald... à partir des années 1970. ➤

A PRIORI, SANS UNE THÉORIE QUANTIQUE DE LA GRAVITÉ, IL SEMBLE IMPOSSIBLE DE SAVOIR CE QUI S'EST PASSÉ AU DÉBUT DE L'UNIVERS

impossible de savoir ce qui s'est passé au moment du Big Bang, ou encore aujourd'hui au centre des trous noirs. 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 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 une formulation quantique de la gravitation en utilisant la quantification canonique. Mais cette approche fonctionnait mal et entraînait des difficultés techniques et conceptuelles qui semblaient insurmontables. Notamment, des notions *a priori* triviales comme le temps ou la causalité deviennent difficiles à comprendre et même à définir.

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

> 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 s'interroger sur certains concepts très fondamentaux: qu'est-ce que la masse gravitationnelle en physique quantique? Comment se crée un champ gravitationnel? Sur ces questions, 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.

SUPERPOSITIONS D'ÉTATS

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.

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...) 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. Le célèbre chat de Schrödinger illustre cette idée.

Cependant, il est impossible d'observer directement les superpositions. Elles sont détruites lorsqu'on réalise une mesure. 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 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 l'article d'Albert Einstein, Boris Podolsky et Nathan Rosen publié en 1935 sur, selon eux, l'impossible intrication (*voir Pas d'échappatoire pour l'intrication, par R. Hanson, page 26*). Einstein et ses deux coauteurs en concluaient que la superposition est un artefact de modélisation, et qu'il n'y a 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 qui stipule qu'aucune information ne peut se propager plus vite que la lumière. Einstein jugeait cette solution inacceptable. L'histoire, en la personne de John Stewart Bell et Alain Aspect lui ont donné tort: la nature suit 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, 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