

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.

L'AUTEUR



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

P

our Carlo Rovelli, du 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 la physique quantique et de la relativité générale. Ces deux théories ont bouleversé notre vision du monde, des plus petites aux plus grandes échelles. Mais les réunir dans «une nouvelle description cohérente», est encore hors de portée. Jusqu'ici, toutes les tentatives visant à élaborer une théorie quantique de la gravitation, ou «gravité quantique», ont été décevantes. Mais cette synthèse est-elle vraiment nécessaire? Et si oui, la gravité quantique est-elle la seule façon d'y parvenir? Des physiciens 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. 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: 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 dans le noyau atomique, et l'interaction faible, qui se manifeste notamment dans la radioactivité bêta.

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

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

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

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. ➤