

Il y a encore une dizaine d'années, les scientifiques pensaient que les phénomènes de gravitation quantique étaient hors de portée des expériences, de sorte qu'il était impossible d'obtenir le moindre indice empirique permettant d'en savoir plus sur la nature réelle de la gravité quantique. Or cette impression était en partie fautive, comme l'ont montré plusieurs expériences et observations récentes.

Au LHC (le Grand collisionneur de hadrons), au Cern, les physiciens accélèrent des protons à des vitesses proches de celle de la lumière pour les faire se percuter frontalement et ainsi produire des collisions à haute énergie d'où émergent des particules massives de très courte durée de vie. C'est ainsi qu'ils ont confirmé l'existence du boson de Higgs, en 2012, pièce jusque-là manquante du modèle standard de la physique des particules. Ce modèle, développé à partir des années 1960, décrit les particules fondamentales et leurs interactions, mais il ne tient pas compte de la gravitation et laisse ouvertes certaines questions théoriques.

CORDES ET SUPERSYMETRIE

Une grande partie de la communauté scientifique était convaincue, à partir d'arguments théoriques, qu'il était possible d'étendre de façon très simple et naturelle le modèle standard grâce à la supersymétrie (une symétrie hypothétique entre particules de spin entier et particules de spin demi-entier). Cette extension du modèle standard implique l'existence de nouvelles particules que l'on pensait être en mesure de produire et d'observer au LHC. En outre, la théorie des cordes repose sur la supersymétrie et une détection de la supersymétrie au LHC aurait été une indication intéressante en faveur de cette théorie. Or une telle détection n'a pas eu lieu. Mais déjà, les scénarios supersymétriques les plus naturels ont été exclus. Dès lors, l'absence de supersymétrie au LHC n'est pas une bonne nouvelle expérimentale pour la théorie des cordes.

La théorie des cordes et la gravitation quantique à boucles ne sont pas les seules pistes pour une gravité quantique. D'autres ont été explorées et ont parfois été mises en grande difficulté par l'expérience. Par exemple, en 2009, Petr Hořava, de l'université de Californie à Berkeley, a proposé un modèle de gravité quantique qui brise l'invariance de Lorentz, la symétrie mathématique par laquelle se traduit l'absence de référentiel privilégié en relativité restreinte.

Motivés par ces spéculations, les astronomes ont cherché les signes d'une brisure de l'invariance de Lorentz dans l'Univers, par

exemple dans la mesure de la vitesse de rayons cosmiques. Les résultats ont été nets : non seulement on n'a trouvé aucune indication d'une brisure de cette invariance, mais celle-ci a été confirmée jusqu'à des échelles d'énergie supérieures à celles qui sont caractéristiques de la gravitation quantique. La gravité de Hořava et toute la classe de modèles prédisant une brisure de l'invariance de Lorentz sont ainsi mises en difficulté.

Depuis 2015, une nouvelle fenêtre d'observation de l'Univers s'est ouverte. La détection par les collaborations *Ligo* et *Virgo* d'ondes gravitationnelles, des vibrations de l'espace-temps, ont été une confirmation éclatante de la relativité générale. Mais elle a fait davantage. En 2017, une détection simultanée des ondes gravitationnelles et électromagnétiques produites par la coalescence de deux étoiles à neutrons a montré que ces deux types d'ondes se propagent à la même vitesse (avec une très petite marge d'erreur). Ce résultat a mis en difficulté de nombreuses théories de gravité modifiée, concurrentes de la relativité générale.

Celles-ci avaient été proposées pour expliquer certaines observations comme l'expansion accélérée de l'Univers ou la matière noire, mais elles prévoient souvent que la vitesse des deux types d'ondes doit être différente. Encore une fois, la nature nous indique que certaines directions de recherche n'étaient pas les bonnes. Ce qui n'empêche pas que, pour le savoir, il fallait tout de même les explorer.

UNE VISION QUI SE PRÉCISE

Enfin, un résultat empirique important pour la gravité quantique vient de la cosmologie : la mesure de l'expansion accélérée de l'Univers. Cette dynamique est bien décrite par les équations de la relativité générale quand elles incluent une constante, la « constante cosmologique », qui prend dans ce cas une valeur positive. Mais dans la théorie des cordes, cette constante est naturellement négative, en contradiction avec les observations. Des tentatives d'adapter la théorie des cordes à une constante cosmologique positive existent, mais restent très controversées. Les expériences qui tranchent de façon définitive sont rares en science : en général, les hypothèses gagnent ou perdent en crédibilité en fonction de l'accumulation d'indices vérifiés ou non. Le fait que la constante cosmologique soit de signe contraire à ce que la théorie des cordes avait indiqué affaiblit la confiance que l'on peut avoir en cette piste.

Ces différents exemples de résultats observationnels et expérimentaux nous ont fait progresser sur ce que peut être la gravité quantique. ➤

L'INTRICATION EST UNE CONNEXION ÉTRANGE, SANS ÉQUIVALENT DANS LE MONDE ORDINAIRE

➤ Ainsi, les spécialistes de la théorie des cordes qui, dans les années 1980, pensaient résoudre rapidement le problème de la gravité quantique ont dû revoir leurs objectifs.

L'approche de la gravitation quantique à boucles a été moins ébranlée par ces données récentes. Cependant, les chercheurs travaillant sur cette piste sont moins nombreux et il faut encore fournir un effort considérable pour obtenir des prédictions quantitatives susceptibles d'être confrontées aux expériences.

En particulier, deux phénomènes concentrent une grande partie de l'attention des physiciens. D'abord, la théorie suggère que le Big Bang aurait été un «grand rebond» (*big bounce* en anglais), un résultat obtenu en 2007 par Martin Bojowald, aujourd'hui à l'université d'État de Pennsylvanie. Suivant cette idée, un préunivers aurait été en contraction, s'effondrant sur lui-même. Mais à cause du caractère discret de l'espace, lorsqu'une densité critique a été atteinte, un rebond aurait inversé la dynamique et renvoyé l'Univers en expansion. Le cosmos ne serait donc pas né d'une singularité de densité infinie.

REBONDIR EN TROU BLANC

Suivant une idée similaire, les trous noirs pourraient eux aussi «rebondir» en se transformant en «trous blancs» (des objets prédits par la relativité générale et encore non observés). L'un de nous (Carlo Rovelli) et ses collègues travaillent activement à déterminer des signatures observationnelles de ces rebonds, en particulier dans le fond diffus cosmologique (le rayonnement émis par l'Univers quand il n'avait que 380 000 ans) et dans les rayons cosmiques. Les éventuels trous blancs produits par des trous noirs primordiaux pourraient même être une composante de la mystérieuse matière noire.

Quelle que soit la formulation correcte de la théorie de la gravitation quantique, elle est, en tout cas... quantique! Elle héritera donc des difficultés conceptuelles de la physique quantique, qui seront peut-être même exacerbées. Car ce ne sont pas seulement les particules qui pourront se trouver dans une superposition d'états ou en intrication, mais aussi la géométrie de l'espace-temps elle-même.

Sur la question de l'interprétation de la physique quantique la plus adaptée à la gravité quantique, comme on pouvait s'y attendre, les théoriciens sont divisés. L'idée des mondes multiples est populaire chez une partie des «cordistes», tandis que l'idée que la physique quantique révèle une structure relationnelle de la réalité a plutôt les faveurs des partisans de la théorie des boucles, historiquement plus proche de la relativité générale, laquelle a déjà un fort contenu «relationnel».

Un petit nombre de théoriciens explorent aussi l'idée que la connexion entre les deux problèmes puisse être plus profonde. Par exemple, le physicien et mathématicien britannique Roger Penrose a suggéré que la réduction dynamique puisse être un phénomène d'origine gravitationnel. Cette idée repose sur un fait étrange et intrigant: l'échelle de longueur naturellement associée à la gravitation quantique (la «longueur de Planck») est extrêmement petite et l'échelle d'énergie (l'«énergie de Planck») est extrêmement grande, mais l'échelle de masse naturellement associée à la gravitation quantique (la «masse de Planck») est de l'ordre du microgramme, valeur curieusement proche de celle qui distingue les systèmes «petits» (où les effets quantiques sont manifestes) des systèmes «grands», au comportement classique, non quantique. S'agit-il d'une coïncidence ou de l'indice d'un lien profond entre la gravitation et le problème de l'interprétation de la physique quantique? Nous ne le savons pas encore.

UNE NOUVELLE GÉNÉRATION D'EXPÉRIENCES

Des indices utiles pourraient venir d'expériences en laboratoire qui sont à l'étude et seront peut-être réalisées dans un futur proche. Trois équipes ont ainsi récemment proposé des protocoles qui mettront à l'épreuve la nature quantique de la force gravitationnelle. Le groupe autour de Markus Aspelmeyer, de l'université de Vienne, en Autriche, et Sugato Bose, de l'University College, à Londres, et indépendamment Chiara Marletto et Vlatko Vedral, de l'université d'Oxford, ont proposé des expériences capables de mettre en évidence une superposition quantique de deux géométries différentes de l'espace-temps.

L'idée est d'observer l'intrication quantique de deux particules après avoir mis chacune d'elles dans une configuration qui serait la superposition quantique de deux positions différentes. L'intrication serait alors causée par la superposition quantique de deux versions de la géométrie de l'espace-temps, dues aux différentes positions des particules.

Si l'expérience devait montrer que l'espace-temps ne peut pas se mettre dans une superposition quantique d'états, cela indiquerait une relation nouvelle et profonde entre gravitation et quantique, peut-être dans le prolongement des idées suggérées par Roger Penrose. Si, au contraire, dans le cas que nous pensons le plus probable, l'effet d'intrication est observé, alors celui-ci témoignerait que notre monde n'est pas dessiné sur la toile d'un espace-temps donné: il serait lui-même sujet aux mystères de la physique quantique. ■

BIBLIOGRAPHIE

F. LALOË, *Comprenons-nous vraiment la mécanique quantique?*, EDP Sciences/CNRS (2^e édition), 2018.

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*, E. N. Zalta (ed.), 2016.

C. ROVELLI, *Par-delà le visible : la réalité du monde physique et la gravité quantique*, Odile Jacob, 2015.