

UN UNIVERS REBONDISSANT

Dans l'Univers, les galaxies s'éloignent les unes des autres, entraînées par l'expansion de l'espace-temps. Dès lors, si l'on remonte le temps, ces structures se rapprochent les unes des autres, la matière s'accumule et la densité augmente jusqu'à devenir infinie il y a 13,7 milliards d'années, ce qui marque le début de l'Univers. Mais on atteint là les limites de la relativité générale. Pour décrire correctement l'Univers à cette époque, il est nécessaire de prendre en compte les effets quantiques de l'espace-temps, ce qui nécessite une théorie quantique de la gravitation.

La théorie dite de gravité quantique à boucles est l'une des pistes explorées. Une conséquence de cette approche est que l'espace-temps est discret : il prend

la forme d'un maillage discontinu avec des quanta d'espace-temps, analogues aux quanta d'énergie que s'échangent les particules en physique quantique. La taille de ces quanta est de l'ordre de la longueur de Planck, soit environ 10^{-35} mètre.

La structure discrète de l'espace-temps modifie le comportement de la gravitation. Les quanta d'espace-temps ne peuvent accumuler qu'une quantité finie d'énergie. Dès lors, quand la densité d'énergie devient trop élevée, comme au cœur d'un trou noir ou au début de l'Univers, la gravitation devient répulsive.

Dans ce cadre, il n'est plus possible qu'une singularité se forme, ni dans un trou noir ni au début de l'Univers. La conséquence est aussi que l'Univers dans lequel nous vivons n'est pas apparu

Dans le cadre de la gravité quantique à boucles, l'Univers serait né d'un pré-Univers qui se serait contracté puis aurait rebondi.

de rien. En 2007, Martin Bojowald, à l'université d'État de Pennsylvanie, a proposé qu'un pré-Univers se serait effondré sur lui-même. Sa densité aurait atteint la valeur critique où la gravitation devient répulsive. Le pré-Univers aurait alors rebondi pour donner naissance à notre Univers. Le Big Bang serait l'instant de ce rebond.

Cette idée de rebond se retrouve dans d'autres approches quantiques de la gravitation, comme la théorie des cordes. Il est cependant très difficile de la tester, car le rebond a effacé toute trace du pré-Univers. Mais selon Carlo Rovelli et ses collègues, certains trous blancs seraient nés dans le pré-Univers et auraient traversé le rebond. Une idée très spéculative, mais qui offre une piste intéressante pour comprendre l'Univers.

➤ aussi un parallèle intéressant avec le scénario de l'Univers en rebond également proposé dans le cadre de la gravité quantique à boucles (voir l'encadré ci-dessus). Mais cette théorie implique-t-elle que le ciel est truffé de trous blancs et, si oui, peut-on les voir?

La réponse est : peut-être. Parmi les trous noirs que l'on a détectés, on distingue plusieurs catégories. La première est formée des trous noirs supermassifs (de l'ordre de 1 million de masses solaires) qui se nichent au centre des galaxies spirales. La deuxième est représentée par plusieurs trous noirs détectés grâce aux antennes gravitationnelles *Ligo* et *Virgo* : ces corps ont des masses supérieures à celles des étoiles (plusieurs dizaines de fois celles du Soleil), et leur origine n'est pas encore claire. Ils auraient connu une croissance accélérée durant les millions d'années de leur existence ou ils seraient plus anciens, c'est-à-dire qu'ils seraient des trous noirs « primordiaux », nés dans les débuts tumultueux de l'Univers. La troisième catégorie de trous noirs est constituée des restes de l'effondrement d'une étoile massive en fin de vie. Dans les trois cas, les trous noirs sont trop massifs pour avoir une chance de se transformer en trou blanc par effet tunnel aujourd'hui.

Seuls des trous noirs vraiment petits ont une chance non négligeable de subir cette transformation quantique. Or de tels astres pourraient bien eux aussi peupler le cosmos. Ils seraient nés peu de temps après le Big Bang, quand l'Univers était très dense, chaud et en expansion rapide. Des fluctuations de densité auraient provoqué des accumulations localisées de matière amenant à la formation de trous noirs de masses très variées. Nous n'avons pas une idée précise du nombre de ces trous noirs apparus dans les premiers instants de l'Univers, d'où la difficulté de faire des prédictions sur les populations de trous blancs.

UNE DURÉE DE VIE À GÉOMÉTRIE VARIABLE

Autre obstacle : dans le cadre de la gravité quantique à boucles, la durée de vie d'un trou noir dépend du rayonnement de Hawking et de la probabilité de transformation en trou blanc par effet tunnel. Elle n'est pas encore déterminée avec précision. Les calculs sont complexes et nécessitent des approximations pour être menés à leur terme. En l'état, nous pouvons extraire des calculs une borne supérieure sur la durée de vie quand nous prenons juste en compte l'évaporation de Hawking (le trou noir perd alors toute sa

masse par cet effet) et une borne inférieure, si l'on prend seulement en compte la probabilité de transformation par l'effet tunnel. Il est alors possible de tirer quelques conclusions.

Si la durée de vie est longue, seuls les plus petits trous noirs primordiaux, de masses comprises entre 10^7 et 10^{12} kilogrammes (ce qui correspond à des masses comprises entre celle du *Titanic* et dix fois celle du barrage des Trois-Gorges, en Chine), sont devenus blancs et seraient observables aujourd'hui. Dans ce cas, la plupart des trous blancs dans le ciel sont de taille minimale (de l'ordre de la longueur de Planck, environ 10^{-35} mètre).

DES TROUS BLANCS POUR LA MATIÈRE NOIRE ?

Ce résultat est une possibilité intéressante, dans la mesure où de tels trous blancs sont assez stables : grâce à des effets quantiques qui les empêchent de perdre toute la matière qu'ils contiennent, leur durée de vie est comparable à celle de l'Univers. Ils contribueraient alors à la matière noire, une composante de l'Univers qui représente cinq à six fois la part de la matière ordinaire, composée d'atomes. De nombreuses observations indirectes attestent de la présence de cette matière noire, mais sa nature reste à déterminer. La plupart des hypothèses envisagées, les « candidats » à la matière noire, impliquent des modifications des lois de la physique bien établies. Par exemple, elles reposent sur des théories qui prédisent l'existence de nouvelles entités, comme les particules supersymétriques ; mais les expériences de détection de ces particules ont échoué à les observer, ce qui met en doute la validité de ces théories.

Le scénario de petits trous blancs (et noirs) constituant la matière noire est relativement peu contraint par les observations. Dans la région entourant le Système solaire, la densité de matière noire serait de 0,01 masse solaire par parsec cube (Proxima du Centaure, l'étoile la plus proche du Soleil, se trouve à 1,3 parsec). Pour satisfaire à cette valeur, il suffirait d'un trou blanc par 10 000 kilomètres cubes.

Si, à l'inverse, la durée de vie des trous noirs est courte, les corps d'origine primordiale se transformant par effet tunnel actuellement auraient une masse comparable à celle d'une petite planète et exploseraient violemment, en transformant une grande partie de leur masse en rayonnement. Un tel événement émettrait de grandes quantités de rayons cosmiques sous la forme de signaux très brefs dans la gamme des microondes ou des ondes radio. Or plusieurs types de phénomènes astrophysiques transitoires restent mal compris, parmi lesquels les sursauts gamma ou les sursauts radio rapides. Diverses explications ont été proposées, mais il n'est pas impossible qu'une fraction de ces événements

Observer la naissance de trous blancs serait une façon de voir la gravité quantique en action

proviennent de la transformation d'un trou noir en trou blanc.

Il existe une signature qui nous permettrait de reconnaître les signaux venant des trous blancs : un décalage vers le rouge, ou *redshift*, « aplati ». Deux phénomènes contribuent à décaler les longueurs d'onde de la lumière d'un astre lointain vers le rouge : l'expansion de l'Univers (plus la lumière vient de loin, et donc de l'Univers jeune, plus elle est décalée vers le rouge) et le décalage gravitationnel (plus l'astre qui émet le rayonnement est massif, plus sa lumière subit un décalage vers le rouge). Or les premiers trous noirs à devenir blancs étaient plus légers que ceux qui se sont transformés plus tard. En conséquence, leur décalage vers le rouge gravitationnel est moindre, mais l'effet de l'expansion est plus fort. En fin de compte, on observerait un « *redshift* aplati » que l'on pourra peut-être mettre en évidence grâce à des analyses statistiques, en accumulant de grandes quantités de données sur les rayons cosmiques ou les sursauts radio rapides.

La découverte d'une preuve de l'existence des trous blancs (dans les rayons cosmiques ou la matière noire) serait une avancée spectaculaire dans notre compréhension du monde. Observer la naissance de trous blancs serait une façon de voir la gravité quantique en action. On ouvrirait ainsi une fenêtre sur l'un des problèmes les plus importants de la physique théorique : comprendre les aspects quantiques de l'espace-temps.

Les idées récentes sur les trous blancs éclairent sous un nouveau jour de nombreux aspects de la physique théorique et de la cosmologie. Pour l'instant, l'hypothèse de la transformation de trous noirs en trous blancs n'a été que peu explorée et de nombreuses questions associées restent ouvertes. Et elles le resteront tant que nous n'aurons pas réussi à identifier un trou blanc. Espérons que cela prendra moins de temps que celui qui a été nécessaire pour nous convaincre de l'existence des trous noirs ! ■

BIBLIOGRAPHIE

A. Ashtekar et al., **Quantum transfiguration of Kruskal black holes**, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 121, 241301, 2018.

C. Rovelli et F. Vidotto, **Small black/white hole stability and dark matter**, *Universe*, vol. 4, 127, 2018.

H. M. Haggard et C. Rovelli, **Quantum-gravity effects outside the horizon spark black to white hole tunneling**, *Phys. Rev. D*, vol. 92, 104020, 2015.

C. Rovelli et F. Vidotto, **Planck stars**, *Int. J. Mod. Phys. D*, vol. 23, 1442026, 2014.

M. Bojowald, **L'Univers rebondissant**, *Pour la Science*, n° 375, janvier 2009.