

des étoiles (plusieurs dizaines de fois celle du Soleil), et leur origine n'est pas encore claire. Ils sont peut-être 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 se transformer en trous blancs 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 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.

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 10^4 et 10^9 tonnes, 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).

TROUS BLANCS POUR 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, cette composante majeure de l'Univers dont la 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.

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 10000 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 expulsant une grande partie de leur masse sous forme de rayonnement. Un tel événement émettrait de grandes quantités de rayons cosmiques, des 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 proviennent de la transformation d'un trou noir en trou blanc.

Une signature nous permettrait de reconnaître les signaux venant des trous blancs: un décalage vers le rouge «aplatis». Deux phénomènes contribuent à décaler les longueurs d'onde de la lumière d'un astre lointain vers le rouge: l'expansion de l'Univers 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 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, art. 241301, 2018.

C. ROVELLI ET F. VIDOTTO, Small black/white hole stability and dark matter, *Universe*, vol. 4, art. 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, art. 104020, 2015.

C. ROVELLI ET F. VIDOTTO, Planck stars, *Int. J. Mod. Phys. D*, vol. 23, art. 1442026, 2014.

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