

> Depuis 2016, *Ligo* ainsi que l'interféromètre *Virgo*, opérationnel depuis l'été 2017 dans sa version améliorée, ont détecté quatre nouveaux signaux d'ondes gravitationnelles, émises lors de la fusion de deux trous noirs massifs (voir la figure page ci-contre). Les masses des astres renforcent l'idée d'une origine primordiale. Par ailleurs, dans un cas, les axes de rotation des trous noirs progéniteurs suggèrent que le système binaire se soit formé par capture plutôt que par l'évolution d'un système de deux étoiles préexistantes nées dans un même nuage de gaz. Or le scénario de la capture est privilégié par le cas des trous noirs primordiaux. Ces détections suggèrent que les trous noirs binaires seraient aussi beaucoup plus fréquents qu'on ne s'y attendait, conformément à notre scénario des trous noirs primordiaux massifs.

Pour l'instant, les données sont encore peu nombreuses. Si *Ligo* et *Virgo* ont effectivement détecté la fusion de certains membres d'une population cachée de trous noirs primordiaux massifs, nous devrions nous attendre à en détecter beaucoup d'autres dans les années à venir. Il sera possible d'établir une analyse statistique des masses et des autres caractéristiques (tels l'axe et la vitesse de rotation) des trous noirs progéniteurs de coalescences. Des données cruciales pour tester leur possible origine primordiale.

Un atout de notre modèle est qu'il échappe aux contraintes sur les machos établies par les relevés observationnels de microlentilles. Ces contraintes excluaient que les trous noirs de moins de 10 masses solaires constituent le principal ingrédient de la matière noire. Or, dans notre scénario, les trous noirs primordiaux couvrent une large gamme de masses et seule une petite fraction d'entre eux seraient visibles dans ces observations de microlentilles, l'essentiel restant invisible. En outre, si les trous noirs primordiaux sont effectivement regroupés en amas, la probabilité qu'un amas se trouve le long de la ligne de visée des relevés d'observations de microlentilles tombe à moins de 1/1000.

Pour détecter ces amas, il faudrait étendre la recherche des événements de microlentilles à d'autres régions du ciel, en traquant par exemple la lumière amplifiée des étoiles de la galaxie d'Andromède, voisine de la Voie lactée, ou même de quasars dans de lointaines galaxies. Les astronomes sonderaient ainsi un volume beaucoup plus important du halo galactique à la recherche des trous noirs primordiaux qui s'y cachent. Des observations récentes suggèrent que les machos de masse comprise entre un dixième de masse solaire et quelques masses solaires pourraient tout de même représenter environ 20% de la masse d'un halo de galaxie typique. Cette valeur concorde avec la gamme de masses de trous noirs primordiaux de notre scénario.

Pour résumer, la possibilité que la matière noire soit principalement constituée de trous noirs primordiaux n'est pas exclue. Par ailleurs, ce type de scénario pourrait résoudre plusieurs autres énigmes cosmiques liées à la matière noire et à la formation des galaxies.

UNE SOLUTION À PLUSIEURS PROBLÈMES

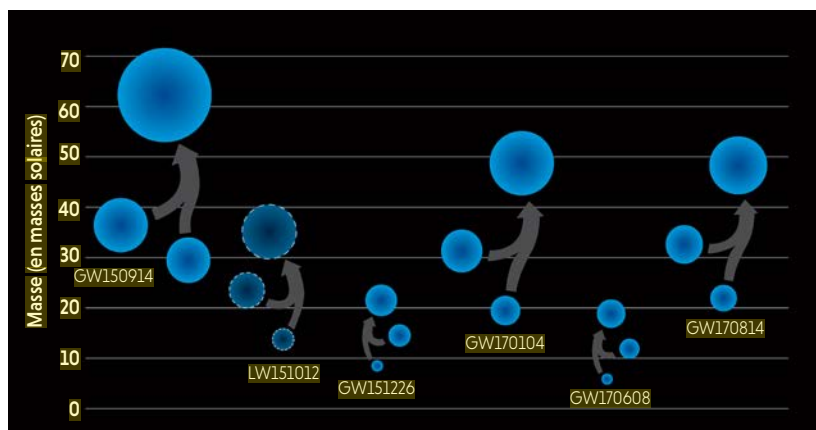
Les amas de trous noirs primordiaux pourraient régler le problème dit des galaxies naines, à savoir le manque apparent de petites galaxies satellites qui devraient théoriquement se former autour des galaxies massives telles que la Voie lactée. Des modélisations récentes de la distribution cosmique de matière noire reproduisent avec précision la structure à grande échelle de l'Univers observé : les amas de galaxies se forment dans d'immenses filaments de matière noire entourant de grandes régions vides de matière. Mais à plus petite échelle, ces simulations prédisent l'existence de nombreux minihalos de matière noire en

Les signaux détectés par *Ligo* et *Virgo* suggèrent qu'il s'agissait de trous noirs primordiaux

orbite autour des galaxies massives. Chacun de ces minihalos devrait abriter une galaxie naine, et il devrait y en avoir des centaines entourant la Voie lactée.

Or les astronomes ont trouvé beaucoup moins de galaxies naines que prévu. Plusieurs explications au problème des galaxies naines sont possibles : par exemple, elles seraient bien présentes, mais difficiles à détecter car trop peu lumineuses ; ou les simulations surestime- raient le nombre de ces galaxies naines, car elles ne reproduiraient pas correctement l'influence de la matière ordinaire sur la formation des galaxies naines.

Si les trous noirs primordiaux en amas constituaient l'essentiel de la matière noire, ils seraient très nombreux dans les minihalos entourant la Voie lactée. Ils engloutiraient alors une fraction de la matière ordinaire et réduiraient ainsi la formation d'étoiles dans



Les interféromètres laser géants *Ligo* et *Virgo* ont détecté cinq coalescences de trous noirs (et peut-être une sixième, en pointillés). La masse des trous noirs progéniteurs est de l'ordre de la dizaine de fois celle du Soleil, ce qui suggère que ces corps ont une origine primordiale plutôt que stellaire.

les minihalos. De plus, même si ces minihalos formaient beaucoup d'étoiles, ces astres pourraient facilement être éjectés par des rencontres rapprochées avec des trous noirs primordiaux massifs. Ces deux effets réduiraient fortement la brillance des galaxies satellites et les rendraient très difficiles à détecter sans l'aide de caméras à grand champ d'une extrême sensibilité.

Heureusement, de telles caméras existent aujourd'hui, et les astronomes ont ainsi découvert des dizaines de galaxies naines extrêmement peu lumineuses autour de la Voie lactée. Ces objets semblent héberger jusqu'à des centaines de fois plus de matière noire que d'étoiles lumineuses, et notre modèle prédit qu'il devrait y en avoir des milliers supplémentaires en orbite autour de la Voie lactée.

Les simulations de formation des galaxies prédisent également une population de galaxies de taille intermédiaire, entre les galaxies naines et les galaxies massives. De tels objets seraient assez gros pour former facilement des étoiles et seraient aisément visibles. Pourtant, ils n'ont pas été trouvés par les astronomes qui fouillent les environs de la Voie lactée. Ce problème a une solution semblable à celui des galaxies naines manquantes : les trous noirs primordiaux massifs présents au cœur des galaxies de taille intermédiaire bloqueraient la formation des étoiles en raison de l'accrétion du gaz et éjecteraient les astres formés. Ces galaxies intermédiaires seraient donc invisibles pour la plupart des relevés.

Les trous noirs primordiaux résoudraient également la question de l'origine des trous noirs supermassifs. Ces monstres pèsent des millions, voire des milliards, de masses solaires. On les trouve au centre des quasars et des galaxies massives très tôt dans l'histoire de l'Univers, moins d'un milliard d'années après le Big Bang. Pourtant, si ces trous noirs supermassifs se sont formés et ont grossi à partir de trous noirs nés de l'explosion des premières étoiles de l'Univers et à la suite de leurs fusions

successives, ils n'ont pas pu acquérir une masse aussi gigantesque en un temps si court.

Dans notre scénario, même si la plupart des trous noirs primordiaux ne dépassent pas quelques dizaines de masses solaires, il en reste une petite fraction qui sont beaucoup plus lourds, entre quelques centaines et quelques dizaines de milliers de masses solaires. Nés moins d'une seconde après le Big Bang, ces objets monstrueux agiraient comme des graines pour la formation des premières galaxies et quasars, et l'accrétion de matière ainsi que l'absorption de trous noirs moins massifs permettrait d'atteindre rapidement les caractéristiques des trous noirs supermassifs.

Ces trous noirs primordiaux pourraient aussi rendre compte de l'existence de trous noirs de taille intermédiaire (entre 1 000 et 1 million de masses solaires) dont on soupçonne l'existence au centre des galaxies naines et des amas globulaires d'étoiles. Ainsi, les trous noirs primordiaux pourraient être le chaînon manquant entre les trous noirs classiques de masse stellaire et les trous noirs supermassifs.

Les preuves observationnelles de ce scénario s'accumulent : des détections récentes de sources de rayons X étonnamment abondantes dans l'Univers primordial s'expliqueraient par de grandes quantités de trous noirs primordiaux produisant des rayons X tandis qu'ils se gavent de gaz, moins d'un milliard d'années après le Big Bang.

Ainsi, les trous noirs primordiaux massifs constituent des candidats prometteurs pour la matière noire et apportent des réponses à de nombreux autres problèmes qui tracassent les cosmologistes depuis longtemps. Mais il est trop tôt pour conclure. D'autres hypothèses sont encore possibles, et de nouvelles observations fort attendues pourraient en éliminer certaines. Dans les années à venir, plusieurs observations pourraient mettre à l'épreuve le scénario des trous noirs primordiaux (voir l'encadré page 30). Elles incluent la détection des galaxies naines d'ultrafaible luminosité, l'influence des trous noirs primordiaux massifs sur la position des étoiles dans la Voie lactée, la cartographie de l'hydrogène neutre au cours de la première époque de formation stellaire et l'étude des distorsions du fond diffus cosmologique.

Outre ces expériences, nous disposons désormais avec les interféromètres laser géants (*Virgo*, *Ligo*, mais aussi ceux en construction, *Kagra*, au Japon, *Ligo India*, en Inde, et le projet européen *Einstein Telescope*) d'un nouvel outil pour démêler les énigmes cosmiques. L'ensemble de toutes ces observations pourrait confirmer l'existence de trous noirs primordiaux et leur possible lien avec la matière manquante de l'Univers. D'ici à quelques années, nous leverons peut-être le voile sur le mystère de la matière noire. ■

BIBLIOGRAPHIE

S. Clesse et J. García-Bellido, **The clustering of massive primordial black holes as dark matter : measuring their mass distribution with Advanced LIGO**, *Physics of the Dark Universe*, vol. 15, pp. 142-147, 2017.

N. Deruelle et J.-P. Lasota, **L'astronomie gravitationnelle est née**, *Pour la Science*, n° 481, novembre 2017.

S. Clesse et J. García-Bellido, **Massive primordial black holes from hybrid inflation as dark matter and the seeds of galaxies**, *Phys. Rev. D*, vol. 92, 023524, 2015.