

> suggéré que des trous noirs étaient apparus dans les premiers instants de l'Univers. Ils ont surtout considéré le cas de trous noirs de masse inférieure à celle d'une montagne. Ces trous noirs, parce qu'ils étaient petits, auraient subi un important phénomène d'évaporation par un processus quantique nommé rayonnement de Hawking (car Stephen Hawking en a prédit l'existence). Près de 13,8 milliards d'années plus tard (l'âge de l'Univers), ils auraient complètement disparu, ne laissant derrière eux que du rayonnement. Ils ne peuvent donc constituer actuellement la matière noire. Stephen Hawking et ses collègues ont aussi envisagé la possibilité de trous noirs primordiaux massifs, dont l'évaporation peut être négligée. Ils seraient donc encore présents dans l'Univers et pourraient constituer la matière manquante du cosmos.

L'idée que les trous noirs primordiaux massifs contribuent à la matière noire, voire représentent sa composante majeure, a été davantage développée dans les années 1990. Ce scénario s'appuyait sur les théories de l'inflation cosmique, idée proposée par le physicien américain Alan Guth au début des années 1980. L'inflation est une phase d'expansion prodigieuse qui aurait immédiatement suivi le Big Bang. Selon cette idée, en 10^{-35} seconde, tous points distants de moins d'un rayon atomique se sont retrouvés éloignés de quatre années-lumière, une dis-

alors comme de la matière noire et domineraient le contenu en matière de l'Univers actuel. Ce modèle prévoit une population de trous noirs dont la masse est déterminée par la quantité d'énergie présente au sein de la région qui s'effondre. De nombreux autres groupes de cosmologistes ont alors commencé à explorer ces idées avec différents modèles d'inflation.

En 2015, nous avons proposé un scénario, dans la continuité de celui de 1996, où les régions de surdensité s'effondrent à proximité les unes des autres, ce qui engendre des amas de trous noirs de masse variant dans une gamme allant de 0,01 à 10 000 masses solaires. En moins de 500 000 ans après le Big Bang, chaque amas aurait alors contenu des millions de trous noirs primordiaux dans un volume de quelques centaines d'années-lumière de diamètre seulement.

Grâce à ces amas, il est possible d'expliquer les détections de *Ligo* qui laissent penser que la rencontre et la fusion de deux trous noirs massifs ne sont pas si rares. Dans un tel amas, la densité de trous noirs est assez élevée pour que, de temps en temps, les trajectoires de deux trous noirs primordiaux se croisent et que ces objets deviennent gravitationnellement liés. Ils se mettent alors à décrire une spirale en se rapprochant l'un de l'autre sur une durée allant jusqu'à quelques millions d'années, qui s'achève avec leur coalescence.

En janvier 2015, dans le cadre de notre modèle, nous avons suggéré que *Ligo* pourrait détecter les ondes gravitationnelles produites par ces fusions de trous noirs primordiaux. Or, plus tard cette même année, *Ligo* a effectivement détecté une fusion de trous noirs dans la bonne gamme de masses. En mars 2016, en même temps que des chercheurs de l'université Johns-Hopkins, aux États-Unis, nous avons estimé le taux d'événements de fusion au sein des amas de trous noirs primordiaux. Si ces trous noirs forment la matière noire (ou une fraction importante de celle-ci), ces taux coïncident avec les limites expérimentales calculées à partir des données de *Ligo*.

Depuis 2016, *Ligo* ainsi que l'interféromètre *Virgo*, opérationnel depuis l'été 2017 dans sa version améliorée, ont détecté huit nouveaux signaux d'ondes gravitationnelles, émises lors de la fusion de deux trous noirs massifs (voir la figure page 71). Les masses des astres, de une à quelques dizaines de masses solaires, 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 dans 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, >

UNE GRANDE POPULATION DE TROUS NOIRS S'EST FORMÉE MOINS D'UNE SECONDE APRÈS L'INFLATION

tance comparable à celle qui sépare le Soleil de ses voisines stellaires les plus proches.

De même, des fluctuations quantiques infimes, qui apparaissent spontanément dans l'espace, ont été amplifiées à des échelles macroscopiques par la rapide expansion. Elles ont ensemencé l'Univers de régions présentant des surdensités de matière et d'énergie, à partir desquelles toutes les structures cosmiques ultérieures émergeront. Aussi surprenante que puisse paraître l'idée de l'inflation, les astrophysiciens observent ces fluctuations amplifiées dans le fond diffus cosmologique.

En 1996, l'un de nous (Juan García-Bellido), avec Andrei Linde, de l'université Stanford, et David Wands, de l'université de Portsmouth, au Royaume-Uni, a découvert un processus par lequel l'inflation amplifiait les fluctuations quantiques de façon à produire naturellement des régions très denses qui s'effondrent en formant une grande population de trous noirs moins d'une seconde après le Big Bang (voir l'encadré page 67). De tels trous noirs se comporteraient

> 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.

ÉCHAPPER AUX MACHOS

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.

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 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 sont possibles: par exemple, elles seraient bien présentes, mais difficiles à détecter car trop peu lumineuses; ou les simulations surestimenteraient 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 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

**Les signaux
détectés par Ligo
et Virgo sont sans
doute ceux
de la fusion
de trous noirs
primordiaux**

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 aussi une population de galaxies de taille intermédiaire, entre les naines et les