

➤ 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 10000 masses solaires. En moins de 500000 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 apparaissaient 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