

➤ mécanisme de formation, plus exotique, ne fait donc intervenir aucune étoile.

Bien que ces hypothétiques trous noirs primordiaux n'aient jamais été observés, certains modèles théoriques suggèrent qu'ils se seraient formés en grand nombre dans le plasma dense et brûlant qui remplissait le cosmos moins d'une seconde après le Big Bang.

Les deux trous noirs massifs à l'origine des ondes gravitationnelles détectées par *Ligo* seraient-ils de tels trous noirs primordiaux ? Les futures observations de *Ligo* et d'autres observatoires, tel *Virgo*, en Italie, mettront bientôt cette idée à l'épreuve. Notre compréhension de l'Univers pourrait alors connaître une révolution. Au-delà de la détection des ondes gravitationnelles, ce serait quelque chose d'encore plus extraordinaire !

LA MARCHÉ DES MACHOS

De prime abord, les trous noirs sont de bons candidats à la matière noire puisqu'ils n'émettent pas de lumière. De fait, ils appartiennent à une classe de candidats proposés dans les années 1980 et nommés « machos » (acronyme de *massive compact halo objects*). En plus des trous noirs, les machos incluent aussi les planètes et les naines brunes (étoiles trop peu massives pour déclencher les réactions de fusion de l'hydrogène). Présents à la fois dans les halos sphériques entourant les galaxies et à proximité du centre lumineux de chaque galaxie, les machos produiraient le surplus d'attraction gravitationnelle requis pour expliquer le mouvement du gaz et des étoiles.

Quelle que soit sa nature, machos ou autres, la matière noire se manifeste à différentes échelles dans l'Univers. Elle influe sur la dynamique des galaxies et des amas de galaxies, mais elle a aussi contribué à la naissance de ces structures. Elle a déterminé où et à quelle vitesse grandissent les galaxies ainsi que les amas et superamas de galaxies. Ces objets se sont en effet formés à partir de l'accumulation de gaz vers le centre de grands nuages de matière noire. Les cosmologistes ont cartographié avec précision la distribution spatiale de ces grumeaux de matière au moyen des relevés de galaxies. Et ils ont relié l'émergence de ces structures aux minuscules variations de température du fond diffus cosmologique, la lueur résiduelle du Big Bang qui imprègne tout l'Univers et dont les caractéristiques ont été mesurées avec précision.

Par ailleurs, la matière noire se manifeste aussi par des effets dérivés de la relativité générale. La masse diffuse de la matière noire des galaxies et des amas galactiques contribue à courber l'espace et à dévier la lumière des objets lointains, un phénomène de lentille gravitationnelle que les astronomes observent partout dans le ciel.

Si la plupart des physiciens sont convaincus que la matière noire existe bel et bien, l'hypothèse des machos est tombée en disgrâce il y a près d'une décennie, leur recherche expérimentale indirecte ayant fait chou blanc. En particulier, les astronomes les ont recherchés par le biais des effets de microlentille, une variante des lentilles gravitationnelles où un trou noir, une naine brune ou même une simple planète passe devant une étoile lointaine et amplifie momentanément la lumière de cet astre distant.

Aucun des programmes d'observation par microlentilles portant sur des millions d'étoiles des Grand et Petit Nuages de Magellan, les principales galaxies satellites de la Voie lactée, n'ont pu prouver que les machos constituaient une grande portion du halo galactique. Plus précisément, les physiciens ont exclu les machos de masses inférieures à 10 masses solaires comme constituants principaux de la matière noire. Et tandis que ces relevés étaient effectués, les scientifiques ont développé des arguments en faveur d'une autre hypothèse, les « wimps » (*weakly interacting massive particles* ou « particules massives interagissant faiblement »).

**De prime abord,
les trous noirs
sont de bons
candidats à la
matière noire**

Ces particules sont prédites de façon naturelle dans des extensions du modèle standard de la physique des particules, mais elles restent au moins aussi insaisissables que les machos. À ce jour, aucune détection n'a été confirmée, en dépit de décennies de recherche au moyen d'accélérateurs de particules, de détecteurs souterrains et de télescopes spatiaux. Les résultats négatifs s'accumulant pour les wimps, des chercheurs ont commencé à reconsidérer l'hypothèse des machos, en se concentrant en particulier sur les trous noirs primordiaux. Mais si ces objets peuplent en grand nombre l'Univers, il fallait expliquer comment ils ont pu échapper si longtemps à la détection.

Dès les années 1970, les physiciens Stephen Hawking, Bernard Carr et George Chapline ont ➤

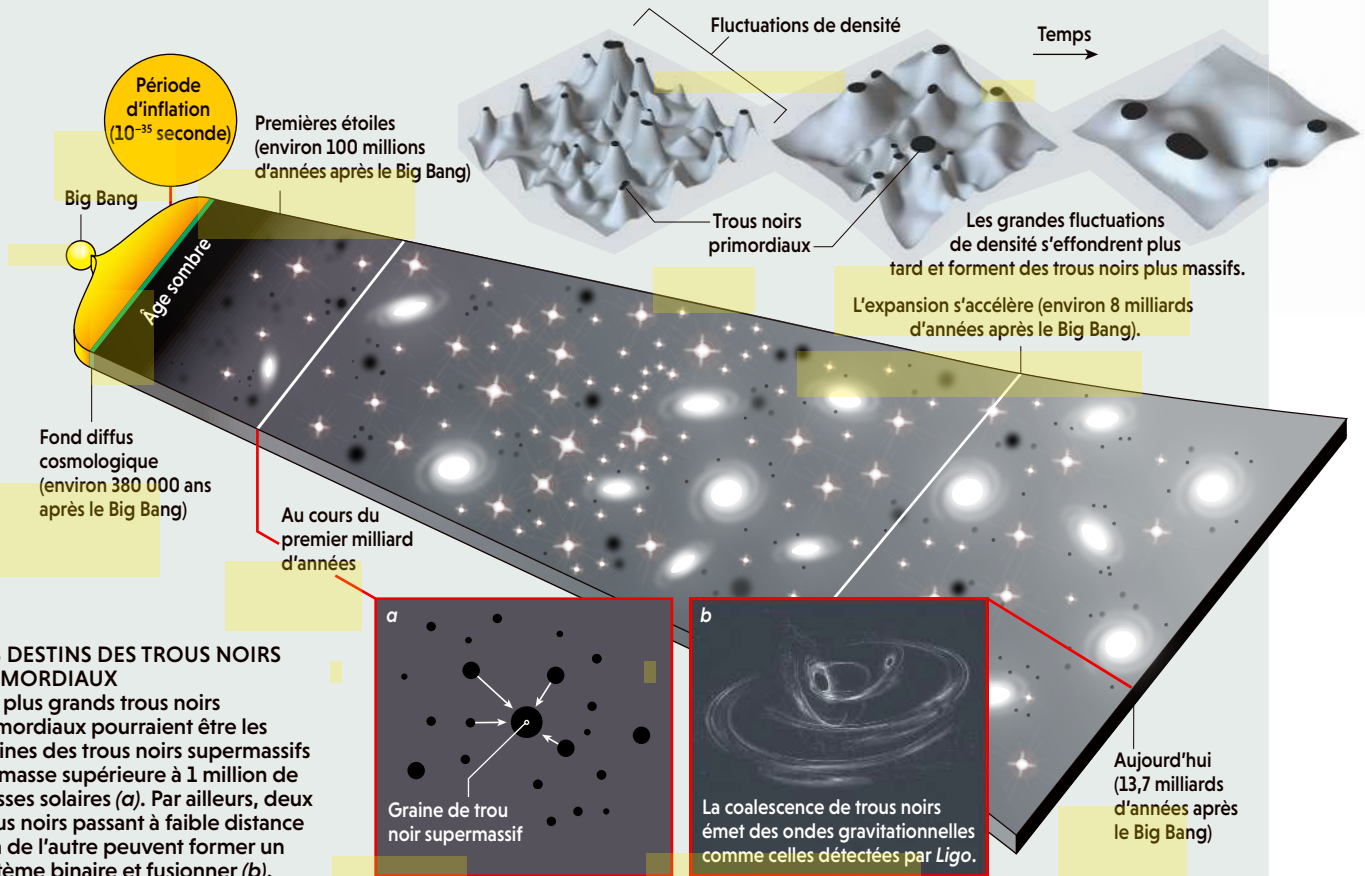
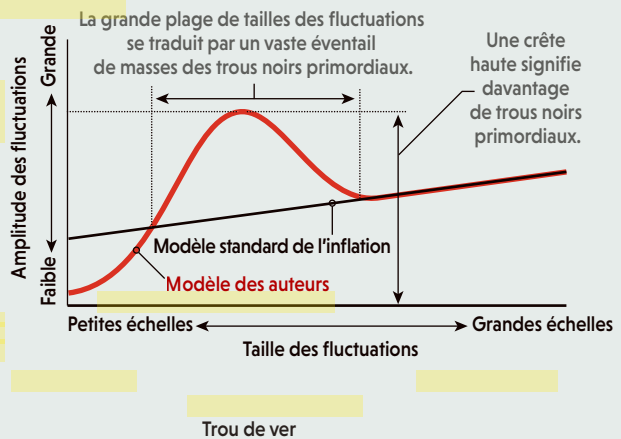
LES TROUS NOIRS NÉS DU BIG BANG

Les premiers trous noirs de l'Univers sont peut-être apparus aux premiers instants du temps cosmique, quand tout n'était encore qu'un épais plasma bouillonnant de particules élémentaires. Dans les années 1970, des physiciens

théoriciens ont suggéré que des régions un peu plus denses de ce plasma pouvaient s'effondrer sous l'effet de leur propre gravité moins d'une seconde après le Big Bang, formant les trous noirs dits primordiaux, qui allaient dès lors

façonner la structure de l'Univers en expansion. Puisqu'ils n'émettent aucune lumière, les trous noirs primordiaux sont des candidats naturels (quoique difficiles à détecter) à la matière noire.

LES TROUS NOIRS PRIMORDIAUX se forment regroupés dans des amas. L'inflation (la phase d'expansion accélérée de l'Univers moins d'une seconde après le Big Bang) aurait amplifié, jusqu'à des échelles immenses, les fluctuations quantiques qui apparaissent spontanément dans le cosmos. Ces fluctuations ont ensuite donné naissance à de vastes zones présentant une surdensité de matière. Ces régions se sont effondrées sous leur propre gravité pour donner naissance aux trous noirs primordiaux. Le modèle inflationnaire des auteurs prédit les caractéristiques des fluctuations amplifiées et des zones de surdensité (voir ci-contre). Ils montrent que les trous noirs primordiaux se forment regroupés en amas. Et la masse de chacun de ces trous noirs primordiaux serait comprise entre 0,01 et 10 000 masses solaires. Environ 500 000 ans après le Big Bang, un amas pouvait s'étendre sur des centaines d'années-lumière et contenir des millions de trous noirs primordiaux. En fusionnant, en s'éparpillant et en se nourrissant de gaz ordinaire et de poussière, les trous noirs primordiaux de ces amas ont orchestré la croissance des galaxies et des amas galactiques.



LES DESTINS DES TROUS NOIRS PRIMORDIAUX

Les plus grands trous noirs primordiaux pourraient être les graines des trous noirs supermassifs de masse supérieure à 1 million de masses solaires (a). Par ailleurs, deux trous noirs passant à faible distance l'un de l'autre peuvent former un système binaire et fusionner (b).

COMMENT TESTER L'HYPOTHÈSE DES TROUS NOIRS PRIMORDIAUX ?

DIFFÉRENTES STRATÉGIES D'OBSERVATION SONT POSSIBLES.

1. Détection de nouvelles ondes gravitationnelles

Les détecteurs d'ondes gravitationnelles tels que *Ligo* (*Laser interferometer gravitational-wave observatory*), aux États-Unis, et *Virgo*, en Italie, ont montré leur efficacité pour détecter des fusions de trous noirs. Le nombre étonnamment grand de fusions de trous noirs massifs détectées suggère que ces objets pourraient avoir une origine primordiale, mais cela n'est pas une preuve suffisante que les trous noirs primordiaux constituent la matière noire. Une telle preuve ne pourrait être obtenue qu'avec la corroboration d'autres observations. La détection d'un trou noir de masse inférieure à la limite dite de Chandrasekhar (1,45 masse solaire), au-dessous de laquelle les étoiles ne peuvent pas produire de trou noir, serait la manifestation indéniable d'une origine primordiale. Et justement, *Ligo* pourrait très bientôt atteindre la sensibilité nécessaire pour détecter un tel trou noir si son compagnon est plus massif (plus de 10 masses solaires). Enfin, à l'échelle cosmologique, des systèmes binaires de trous noirs abondants devraient produire un fond diffus d'ondes gravitationnelles, qui pourrait être détecté par le futur observatoire spatial *Lisa* (*Laser interferometer space antenna*) et par d'autres expériences fondées sur l'observation des pulsars.

2. Découverte de nouvelles galaxies naines de luminosité ultrafaible

En 2015, des astronomes travaillant sur les données de la collaboration DES (*Dark energy survey*, «relevé de l'énergie sombre») ont découvert des dizaines de galaxies naines de luminosité ultrafaible dans le halo galactique. Cette découverte suggère qu'il pourrait y avoir en orbite autour de la Voie lactée des centaines de ces galaxies naines dominées par la matière



L'interféromètre laser géant, *Virgo*, en Italie, a détecté ses premières ondes gravitationnelles issues de la coalescence de trous noirs à l'été 2017. Il fonctionne de concert avec *Ligo*, aux États-Unis.

noire. Elles sont susceptibles d'être détectées en grand nombre par de futurs observatoires spatiaux, comme la mission *Euclid* de l'Agence spatiale européenne (ESA) et le télescope *WFIRST* (*Wide-field infrared survey telescope*, «télescope de relevé infrarouge à grand champ») de la Nasa. Si la matière noire est constituée de trous noirs primordiaux, la plupart d'entre eux pourraient se trouver dans ces galaxies naines, voire dans des amas plus petits et plus denses.

3. Mesure des variations de position des étoiles

La mission en cours *Gaia*, de l'ESA, mesure la position et la vitesse d'environ un milliard d'étoiles de la Voie lactée avec une précision inégalée. Ces mesures pourraient révéler la présence de nombreux trous noirs massifs isolés par le biais de minuscules perturbations que ces objets exercent sur le mouvement des étoiles voisines. Par ailleurs, les populations d'étoiles binaires à grande séparation (c'est-à-dire assez éloignées l'une de l'autre) devraient être moins nombreuses que prévu, car les trous noirs qui s'en approchent les détruiraient.

4. Cartographie de l'hydrogène neutre cosmique

Avant et pendant la formation des premières étoiles, l'Univers était

essentiellement composé d'hydrogène neutre, qui émet un rayonnement caractéristique, à une longueur d'onde radio de 21 centimètres. Dès 2020, le radiotélescope SKA (*Square kilometre array*) – qui devrait être le plus grand jamais construit – commencera à réaliser une carte du ciel entier à cette longueur d'onde. L'accrétion de matière par les trous noirs primordiaux produit un rayonnement X intense, ionisant l'hydrogène neutre environnant et imprimant des signatures sur cette carte du ciel à 21 centimètres. Le SKA devrait ainsi détecter la présence de trous noirs primordiaux massifs.

5. Exploration des distorsions du fond diffus cosmologique

Les rayons X issus des trous noirs primordiaux qui se gavent de gaz et de poussière dans l'Univers primordial devraient également induire des distorsions dans le spectre du fond diffus cosmologique. L'importance de cet effet est encore controversée, en particulier dans les modèles où les trous noirs primordiaux sont regroupés en amas denses. Leurs signatures sur le fond diffus cosmologique pourraient néanmoins être détectées par de futurs instruments et ainsi contraindre fortement les modèles de matière noire correspondant à des trous noirs primordiaux.

**EN SE GAVANT
DE MATIÈRE,
LES TROUS NOIRS
PRIMORDIAUX
ÉMETTENT
DES RAYONS X**

➤ 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 voisins 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