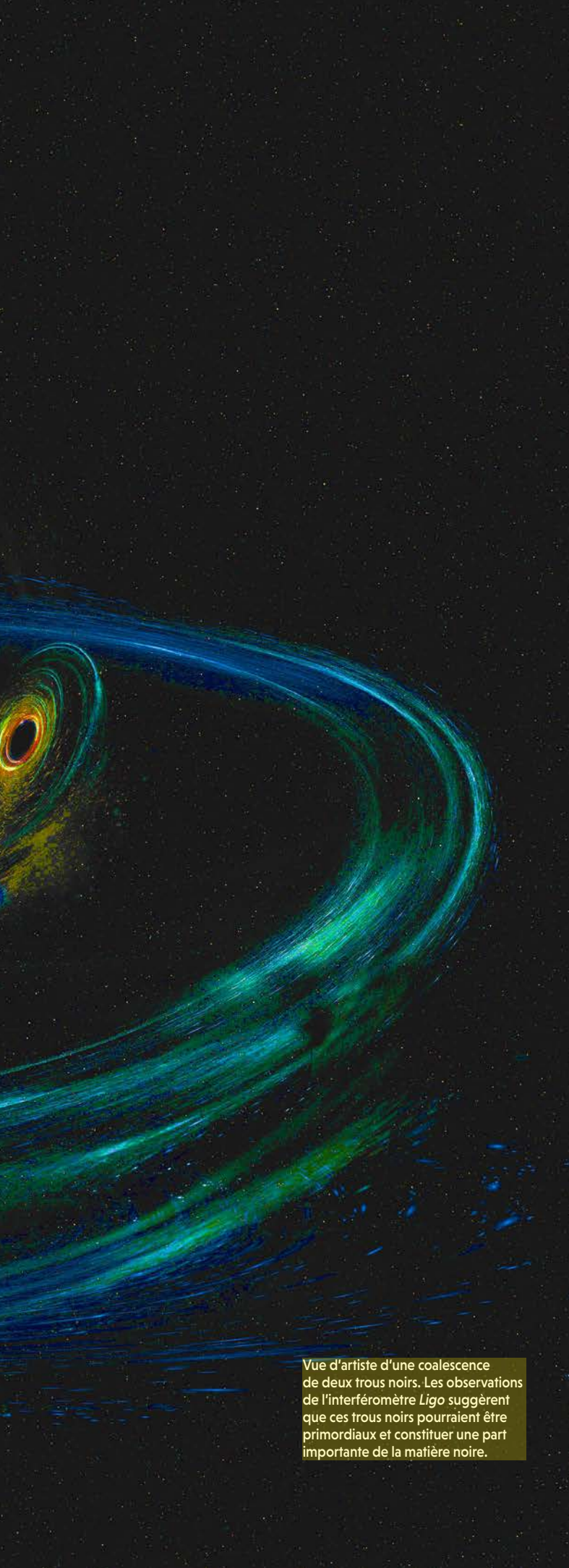




Vue d'artiste d'une coalescence de deux trous noirs. Les observations de l'interféromètre *Ligo* suggèrent que ces trous noirs pourraient être primordiaux et constituer une part importante de la matière noire.

© Ligo/Caltech/MIT/Sonoma State (Aurore Simonnet)

Il y a plus d'un milliard d'années, dans l'Univers lointain, deux trous noirs tournaient l'un autour de l'autre. Ils se sont rapprochés progressivement jusqu'à fusionner. Cette spirale mortelle s'est soldée par une collision d'une extrême violence. Le choc a secoué la trame de l'espace-temps, émettant des perturbations – des ondes gravitationnelles – qui se sont propagées à la vitesse de la lumière dans toutes les directions. En septembre 2015, après avoir parcouru plus d'un milliard d'années-lumière, ces ondes ont atteint la Terre et fait vibrer les interféromètres laser géants du complexe de détection *Ligo*, aux États-Unis. C'était la première fois que les physiciens détectaient directement des ondes gravitationnelles. Cette observation a confirmé de façon définitive leur existence, prédite un siècle auparavant par Albert Einstein.

LA SURPRISE DES ONDES GRAVITATIONNELLES

À partir de la forme du signal capté par *Ligo*, les physiciens ont calculé que chacun des deux trous noirs impliqués dans la fusion était environ trente fois plus massif que le Soleil. En d'autres termes, leur masse était le double ou le triple de celle des trous noirs ordinaires, qui naissent au cœur de l'explosion en supernova d'étoiles massives. Ces trous noirs étaient si lourds qu'il est difficile d'expliquer comment ils ont pu se former à partir d'étoiles.

De plus, même en admettant qu'ils sont nés de façon indépendante lors de la mort d'étoiles massives, il reste à expliquer comment ils ont pu se rencontrer dans l'immensité du cosmos et former un système binaire: un scénario qui semble très improbable.

Il est donc raisonnable de supposer que ces trous noirs massifs se sont formés par un autre mécanisme, plus exotique, ne faisant intervenir aucune étoile. Au-delà de la détection des ondes gravitationnelles, *Ligo* pourrait bien avoir mis au jour quelque chose d'encore plus extraordinaire: des trous noirs antérieurs à la formation des étoiles elles-mêmes.

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. Cette population cachée serait alors la solution à plusieurs énigmes de la cosmologie moderne.

En particulier, ces trous noirs primordiaux pourraient constituer tout ou partie de la matière noire, qui représente 85% de la matière de l'Univers. Bien qu'invisible et de nature inconnue, la matière noire a été imaginée pour servir de liant gravitationnel: elle assurerait la cohésion des galaxies et des amas ➤

> galactiques. Car il semble que les galaxies tournent trop vite pour être tenues gravitationnellement par la seule masse de la matière visible que nous observons dans ces galaxies. La matière noire apporterait le supplément d'attraction qui empêche les galaxies en rotation d'éjecter le gaz et les étoiles de leurs régions les plus externes.

Mais quelle est la nature de la matière noire? Les physiciens ont envisagé de nombreuses possibilités. Or les observations de *Ligo* suscitent un regain d'intérêt pour l'une de ces pistes, celle des trous noirs primordiaux. Les futures observations de *Ligo* et d'autres observatoires, tel *Virgo*, en Italie, mettront bientôt cette idée à l'épreuve, et notre compréhension de l'Univers pourrait alors connaître une révolution.

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 solutions pour la matière noire proposées dans les années 1980 et nommées *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 nommé 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 n'ayant rien donné. 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.

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

Plusieurs 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 trouvé aucune preuve que les machos constituaient une grande portion du halo galactique. Plus précisément, les physiciens ont exclu les machos de masses inférieures à environ 10 masses solaires comme constituants principaux de la matière noire. Et tandis que ces relevés étaient effectués, les scientifiques ont développé l'argumentaire en faveur d'une autre hypothèse, les *wimps* (*weakly interacting massive particles* ou «particules massives interagissant faiblement»).

LA CHUTE DES MACHOS, L'ASCENSION DES WIMPS

L'existence des wimps est motivée par les travaux en physique des particules. 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 recherches 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. >