



LA CHRONIQUE DE
GÉRALD BRONNER

JÉRUSALEM ET LE PARADOXE DE NEWCOMB

**La décision du président américain concernant Jérusalem
a-t-elle été influencée par les  vang listes ? Si oui,
elle est sous le coup d'un paradoxe soulevé en 1960.**



Reconnaître
Jérusalem
comme
capitale de
l'état d'Israël,
une décision
annonciatrice
de la fin des
temps ?

D'entre toutes les décisions qu'aura prises Donald Trump, la reconnaissance de Jérusalem comme capitale d'Israël sera peut-être l'une des plus lourdes de conséquences. Beaucoup de spécialistes s'accordent à dire que les  vang listes américains sont pour quelque chose dans cette décision, parce qu'ils constituent 26% de la population de leur pays et votent massivement pour le parti républicain.

Pourquoi ce mouvement religieux trouve-t-il désirable que Jérusalem soit la capitale d'Israël ? S'inspirant d'une lecture littérale de la Bible, 82% d'entre eux (selon une étude du Pew Research Center) considèrent que la terre d'Israël a été donnée au peuple juif par Dieu lui-même. De plus, ces groupes de croyants sont significativement millénaristes, c'est-à-dire qu'ils croient en la survenue d' v nements qui aboutiront à la fin des temps. Selon un sondage du même centre de recherches, 58% d'entre eux se déclarent persuadés que Jésus reviendra sur Terre avant 2050. Il ne faut donc pas lambiner.

Or l'un des signes avant-coureurs de cette apocalypse tant désirée est justement le regroupement du peuple juif sur la terre qu'il considère sainte. Et c'est là qu'un paradoxe, passé inaperçu, commence.

En effet, Dieu est censé avoir décidé de toute éternité la date de l'apocalypse, mais attendre ses signes annonciateurs

**Attendre les signes
annonciateurs
d'un  v nement n'est pas
la même chose que
les provoquer soi-même**

n'est pas tout à fait la même chose que les provoquer soi-même. Comment imaginer qu'une action au présent (comme la décision sur Jérusalem) puisse influencer la réalisation d'une prédiction faite dans le passé ?

La situation rappelle le paradoxe de Newcomb, une expérience de pensée imaginée en 1960 par le physicien américain William Newcomb, mais vraiment analys e pour la première fois par le philosophe américain Robert Nozick dans un article de 1969. Elle met en scène le dilemme d'un individu confronté à un être omniscient et à deux boîtes opaques A et B. Le joueur devra choisir soit de les ouvrir toutes deux, soit d'ouvrir uniquement la boîte A. Le devin dépose 1 000 euros dans la boîte B. Dans la boîte A, il introduit 1 million d'euros s'il prévoit que le joueur n'ouvrira que la boîte A, mais n'y dépose rien s'il prévoit que le joueur ouvrira les deux boîtes.

Le dilemme est donc le suivant : au moment où le joueur décide d'ouvrir une ou deux boîtes, l'argent a déjà été placé ; il paraît donc rationnel d'ouvrir les deux, car le contenu des deux boîtes sera toujours supérieur à celui d'une seule. Mais puisque le devin connaît l'avenir, il aura pris sa décision en fonction de celle du joueur, qui risque alors de n'empocher que 1 000 euros... Celui-ci peut donc être conduit à penser que le choix fait au présent a pu influencer celui du devin dans le passé. Il reste que, au moment de choisir, la prédiction a été faite : n'est-il pas rationnel d'ouvrir les deux boîtes dans ce cas ? Mais alors, le devin ne le saura-t-il pas nécessairement ?

On peut raisonner ainsi indéfiniment. Ce paradoxe soulève en fait la question d'une inversion de la chaîne causale habituelle : ici, le présent détermine causalement le passé.

C'est exactement à cette forme de causalité inversée que s'abandonnent ceux d'entre les millénaristes qui cherchent à provoquer la fin des temps en affichant les signes. Ceux-ci ne sont que les effets de la décision divine, mais deviennent obscurément, dans l'esprit des croyants, les éléments déclencheurs des  v nements attendus. Tous ces prêcheurs d'apocalypse, qu'ils s'agitent aux  tats-Unis ou en Syrie, cherchent à remonter la pente naturelle de la causalité et sont embourbés, sans le savoir, dans le paradoxe de Newcomb. ■

GÉRALD BRONNER est professeur de sociologie à l'université Paris-Diderot.

les conférences

février 2018

accès gratuit

colloque

Milieux polaires et biomimétisme

vendredi 2 février de 14h à 18h

samedi 3 février de 9h30 à 18h

Les espèces vivantes qui ont pu s'adapter aux conditions extrêmes des régions polaires ont développé tout un arsenal de réponses morphologiques, physiologiques et comportementales, qui inspirent la technologie.

EN PARTENARIAT AVEC



LES PARTENAIRES DU COLLOQUE



AVEC LE SOUTIEN DE



© Rémy Marion / Pôles d'images

table ronde

Virtuelle ou augmentée, quelles réalités ?

mercredi 14 février à 18h

D'abord ludiques, les technologies de réalité virtuelle et de réalité augmentée touchent de nombreux domaines : la chirurgie, l'industrie, la formation, la culture....

Avec Alain Berthoz, David Cage, François Garnier, Gael Kuhn, Serge Tisseron.

EN PARTENARIAT AVEC



AVEC LE SOUTIEN DE



© re:publica Flickr

L'ESSENTIEL

> L'hypothétique matière noire assure, par sa masse, la cohésion gravitationnelle des galaxies. Mais sa nature reste inconnue.

> Elle pourrait être constituée de particules interagissant très peu avec la matière ordinaire, les wimps. Mais aucun wimp n'a été détecté jusqu'ici.

> Des trous noirs « primordiaux », formés peu de temps après le Big Bang, constituent un autre candidat au titre de matière noire.

> Les détecteurs d'ondes gravitationnelles ont mis en évidence des trous noirs dont les caractéristiques s'accordent avec cette hypothèse.

LES AUTEURS



JUAN GARCÍA-BELLIDO
physicien théoricien
et professeur à l'Institut
de physique théorique
de Madrid, en Espagne

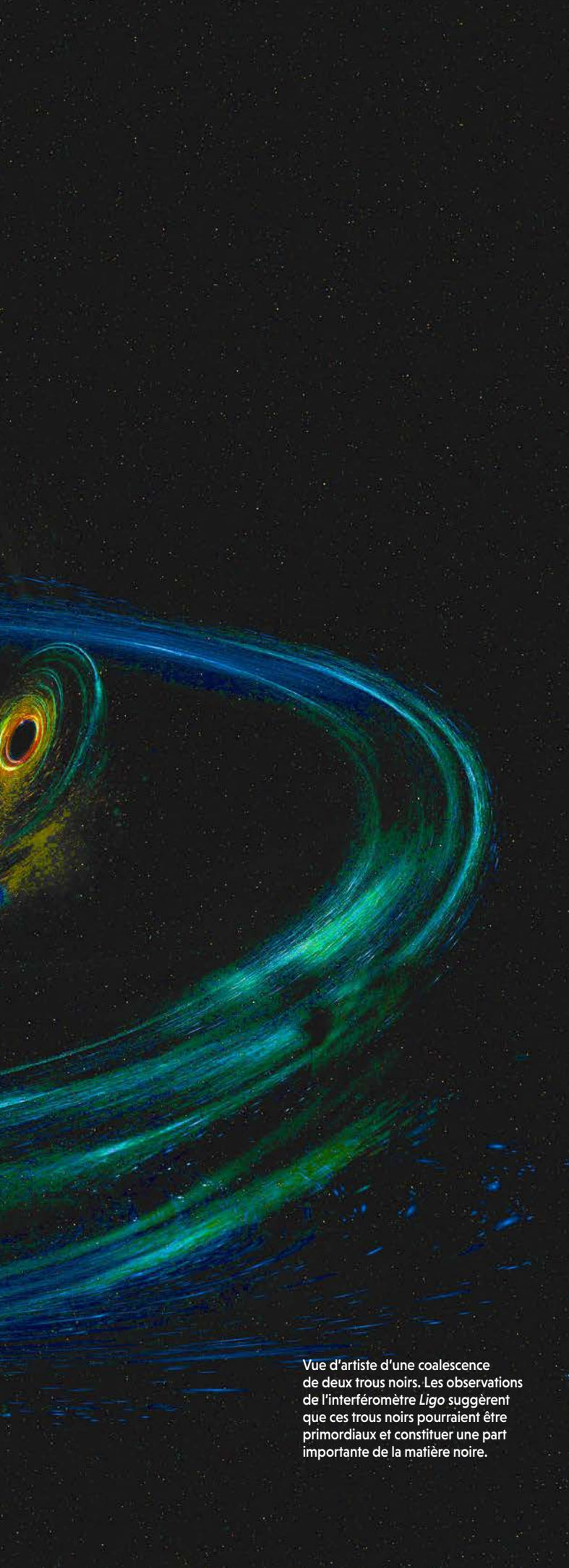


SÉBASTIEN CLESSE
chargé de recherche FNRS
à l'université de Namur
et à l'université catholique
de Louvain, en Belgique

Matière noire

la piste des trous noirs

De quoi est faite la masse manquante de l'Univers ? Des observations récentes appuient l'hypothèse des trous noirs primordiaux, des objets nés moins d'une seconde après le Big Bang, bien avant les étoiles.



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. >

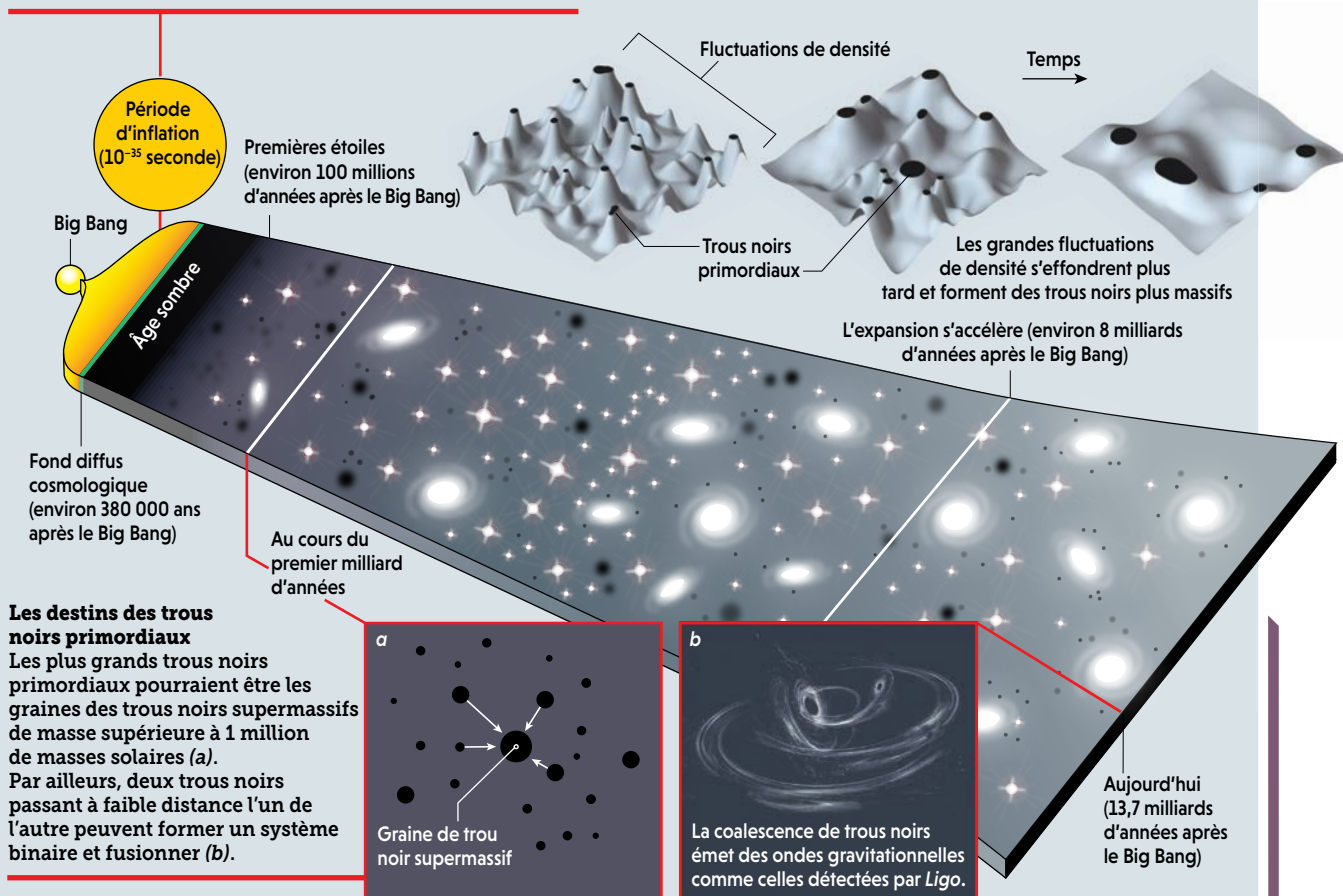
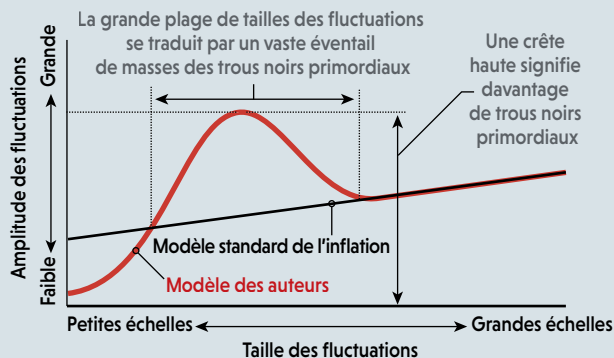
LES TROUS NOIRS NÉS DU BIG BANG

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 apparaissaient 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 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 infra-

En se gavant de matière, les trous noirs primordiaux émettent des rayons X

rouge 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.



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.

> Dès les années 1970, les physiciens Stephen Hawking, Bernard Carr et George Chapline ont 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 distance comparable à celle qui sépare le Soleil de ses voisins stellaires les plus proches.

De la même façon, 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.

DES TROUS NOIRS NÉS DE L'INFLATION

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 29). De tels trous noirs se comporteraient 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.

Une grande population de trous noirs s'est formée moins d'une seconde après l'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 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

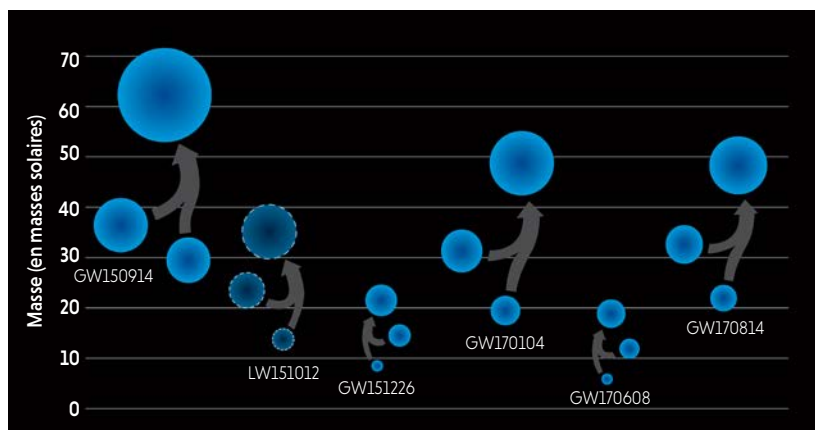
Les amas de trous noirs primordiaux pourraient régler le problème dit des galaxies naines, à savoir le manque apparent de petites galaxies satellites qui devraient théoriquement se former autour des galaxies massives telles que la Voie lactée. Des modélisations récentes de la distribution cosmique de 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.

BENOÎT FAMAHEY

est chargé de recherche au CNRS et travaille à l'observatoire astronomique de Strasbourg, où il est responsable de l'équipe Galhecos. Ses recherches portent sur la détermination du potentiel gravitationnel des galaxies et sur le problème de la masse manquante.



La matière noire pourrait être très différente de ce que l'on pensait

Peut-on se passer de l'hypothèse de la matière noire ? Sinon, de quoi celle-ci est faite ? Les récentes observations malmènent les principales pistes suivies pour résoudre cette grande énigme de l'astrophysique. Avec Benoît Famaey, tour d'horizon du problème et des issues possibles.