

étoile voisine ou avec un troisième trou noir issu d'une autre collision galactique.

Quand les deux trous noirs sont assez proches, la perte d'énergie par émission d'ondes gravitationnelles devient dominante et conduit finalement à la fusion des deux corps. C'est dans cette phase que le système est observable par un réseau de pulsars. Les émissions gravitationnelles des différents systèmes binaires de trous noirs massifs se cumulent pour former un «fond d'ondes stochastique» dont on pourra caractériser l'amplitude et la distribution spectrale d'énergie avec les réseaux de pulsars. On s'attend aussi à détecter ponctuellement quelques systèmes doubles, très massifs ou très proches, émerger de ce fond et produire ici et là, dans le spectre, des signaux individuels à des fréquences précises.

La forme du fond stochastique est difficile à prévoir, car de nombreux paramètres entrent en compte : la distribution statistique de la masse des galaxies, le taux de fusion de celles-ci, la relation entre la masse du trou noir central et celle des étoiles de la galaxie hôte, les densités centrales des étoiles et du gaz susceptibles d'accélérer le rapprochement des composantes du système binaire, et enfin la distribution statistique de l'excentricité des orbites des trous noirs. Ces paramètres ne sont pas tous bien connus. En outre, ils ont évolué au cours de l'histoire cosmique.

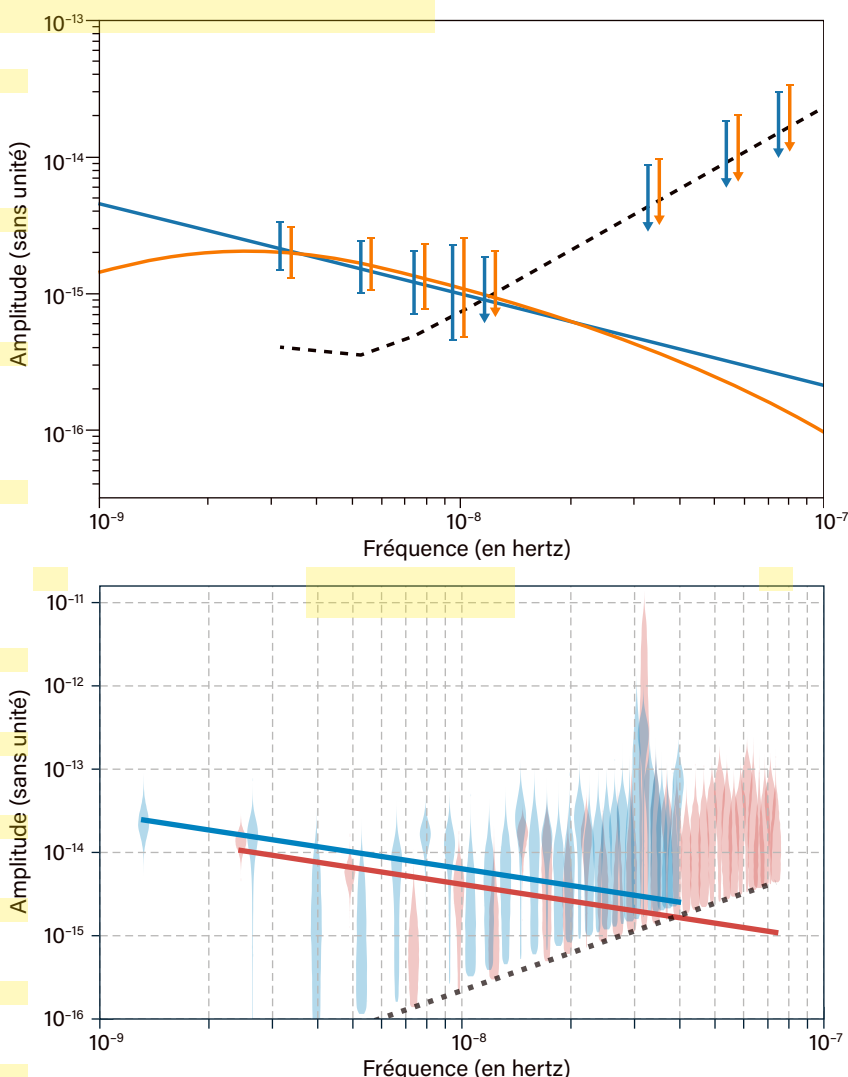
Dans le cas le plus simple d'une population de trous noirs binaires à orbites circulaires et n'interagissant que faiblement avec leur environnement, les simulations indiquent que la distribution spectrale du fond stochastique est décrite par une loi de puissance de la forme $Af^{-2/3}$, dont l'amplitude A se situe entre 10^{-16} et 10^{-14} , et où f est la fréquence de l'onde gravitationnelle (exprimée en années⁻¹). Il est fort probable que la forme du spectre réel s'écarte de cette vue idéalisée.

DE PREMIERS INDICES PROMETTEURS

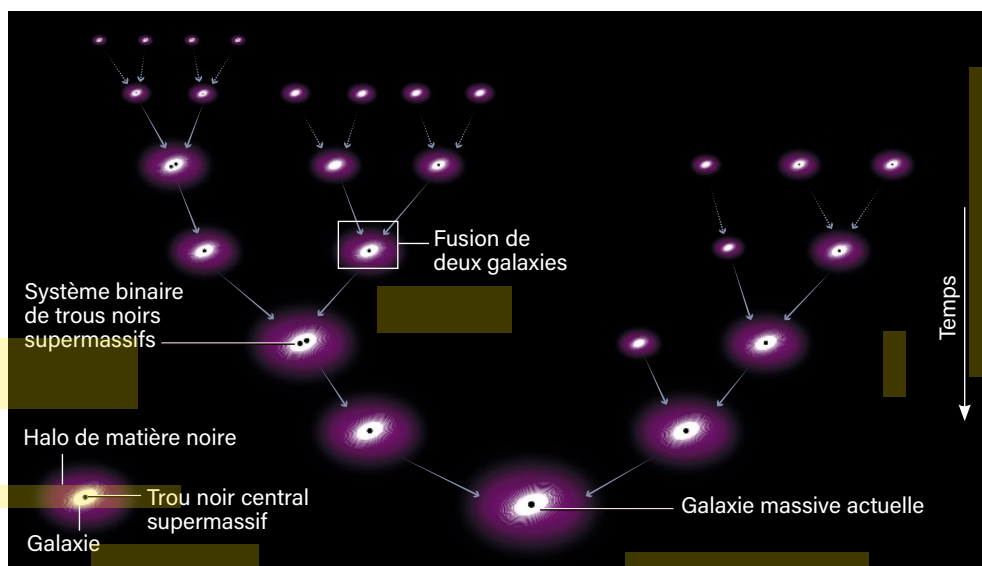
Nous pouvons tester différentes hypothèses grâce aux données observationnelles. On sait par exemple que la friction dynamique avec les étoiles et le gaz ou bien la présence systématique de plus grandes excentricités initiales des orbites accélèrent la coalescence des deux trous noirs et donc dépeuplent la zone des plus basses fréquences gravitationnelles, en créant un «coude» dans la distribution spectrale détectable par les réseaux de chronométrie de pulsars (voir la figure du haut ci-contre). Dit autrement, il y aurait moins de systèmes binaires en rotation très lente que prévu par le cas simple. Nous nous attendons aussi à une inflexion aux hautes fréquences avec une chute d'intensité qui reflète un nombre plus faible de sources très massives contribuant au fond stochastique.

L'amplitude moyenne A mesurée nous renseignera sur le taux de fusions des galaxies et sur le rapport de masse entre le trou noir central et la galaxie hôte.

Depuis la fin des années 2000, trois consortiums internationaux (européen EPTA, australien PPTA et américain NANOGrav) travaillent sur la détection des ondes gravitationnelles en collectant des données de chronométrie de pulsars sur le long terme, en améliorant l'instrumentation et la sensibilité des radiotélescopes et en développant des modèles d'analyse de plus en plus complexes, qui intègrent un maximum d'informations sur les effets systématiques et les biais potentiels.



Le spectre (en haut) indique l'amplitude du signal des ondes gravitationnelles en fonction de la fréquence de ces dernières. Le modèle le plus simple conduit à une droite (en bleu), tandis qu'un autre modèle prenant en compte divers effets physiques mène à une forme plus complexe (en orange). La ligne pointillée noire (sur les deux figures) représente le seuil de détection d'un réseau de pulsars millisecondes qui atteint une sensibilité de 4×10^{-16} . Lorsque cette ligne passe sous le spectre, il est alors possible de détecter le signal et d'estimer les paramètres du spectre. Sur la figure du bas sont représentées les données actuelles des expériences NANOGrav (en rouge) et EPTA (en bleu). Au-dessous d'une fréquence de 6×10^{-9} hertz, les points de mesure se détachent de la ligne pointillée (à gauche de la figure), comme attendu dans le cas de la détection d'un signal gravitationnel à basse fréquence. À des fréquences plus élevées, les instruments ont enregistré surtout du bruit.



Scénario de la formation hiérarchique des galaxies. Contenues dans des halos de matière noire qui fusionnent, les galaxies primordiales entrent en collision et produisent des structures de plus en plus massives. Les trous noirs qui occupent leur centre forment des systèmes binaires, sources d'ondes gravitationnelles jusqu'au moment de leur coalescence.

Jusqu'à présent, les études s'accordaient sur le fait que l'amplitude du fond stochastique d'ondes gravitationnelles ne dépassait pas 3×10^{-15} . Elles avaient ainsi établi des limites supérieures, mais pas encore enregistré de détections. En 2021, ces trois groupes ont annoncé des résultats concernant une possible première détection, sous la forme d'un signal commun à l'ensemble des pulsars utilisés, avec une amplitude comprise entre $2,2$ et $3,0 \times 10^{-15}$ et un spectre parfaitement cohérent avec celui attendu pour une population de trous noirs binaires supermassifs (voir la figure du bas page 43).

Ces résultats sont préliminaires et sont à prendre avec précaution. En effet, aucune des trois collaborations n'a encore mis en évidence la signature spatiale (la courbe de Hellings et Downs), preuve décisive d'un signal gravitationnel. Cependant, la concordance des résultats obtenus avec trois jeux de données indépendants, issus de radiotélescopes différents et avec des méthodes d'analyse concurrentes, permet d'exclure que ce signal soit d'origine purement instrumentale ou résulte par exemple d'un mauvais traitement de l'empreinte du milieu interstellaire.

D'éventuels effets systématiques dus aux références utilisées, le temps atomique international ou les éphémérides planétaires, ont aussi été écartés de façon robuste. Enfin, la mise en commun de toutes les données en un échantillon mondial unique dans le cadre de l'IPTA montre que la vraisemblance du signal augmente de façon importante, ce qui est encore un signe de sa cohérence. Les astronomes ont donc très envie d'y croire, mais restent prudents quant à la détection proprement dite d'un tel signal gravitationnel à basse fréquence.

En effet, la question ne pourra être tranchée qu'une fois que l'on aura détecté de façon convaincante cette fameuse signature spatiale.

Chaque collaboration espère fournir sa propre preuve indépendante d'ici à un an, soit pour l'été 2022. Pour le groupe européen, il s'agira de passer d'un échantillon constitué actuellement des 6 pulsars les plus stables (observés sur vingt-cinq ans avec cinq radiotélescopes différents) à un échantillon des 25 meilleurs pulsars sélectionnés de façon à offrir une couverture spatiale optimale. Avec un tel échantillon, si la détection d'un signal gravitationnel à environ $2,5 \times 10^{-15}$ devait être confirmée, il sera possible d'identifier la signature spatiale tant attendue avec un haut niveau de confiance.

Si cette première mesure du fond d'ondes gravitationnelles se confirme, que nous apprendra-t-elle? Avant tout, elle ouvrira un nouveau champ d'investigation pour l'astrophysique des trous noirs binaires supermassifs. Comme nous l'avons vu, la forme du spectre dépend de nombreuses caractéristiques astrophysiques. Elle apportera donc des contraintes importantes sur les scénarios de formation et d'évolution des galaxies et des grandes structures de l'Univers. Les premiers chiffres donnent déjà potentiellement des limites sur le taux de fusion des trous noirs binaires, taux qui serait compris entre 10^{-5} et 2×10^{-4} événements par mégaparsec cube et par an (1 mégaparsec est égal à environ 3,3 millions d'années-lumière), en accord avec d'autres observations. Cela correspondrait à une fusion tous les 100 000 ans dans un volume comparable à celui du Groupe local, l'amas de galaxies où se trouve la Voie lactée.

L'astronomie des ondes gravitationnelles a fait ses premières découvertes il y a à peine six ans et a déjà montré sa richesse pour explorer l'Univers. Elle devrait bientôt franchir une nouvelle étape en ouvrant la voie à l'étude de processus aussi vertigineux que la fusion de trous noirs supermassifs lors de la collision de galaxies. ■

BIBLIOGRAPHIE

S. Chen *et al.*, **Common-red-signal analysis with 24-yr high-precision timing of the European Pulsar Timing Array : Inferences in the stochastic gravitational-wave background search**, *MNRAS*, en cours de publication, 2021.

H. Middleton *et al.*, **Massive black hole binary systems and the NANOGrav 12.5 yr results**, *MNRAS Letters*, vol. 502(1), pp. L99-L103, 2021.

Z. Arzoumanian *et al.*, **The NANOGrav 12.5 yr Data Set : Search for an Isotropic Stochastic Gravitational-wave Background**, *The Astrophysical Journal Letters*, vol. 905, article L34, 2020.

S. Bailly, **La détection des ondes gravitationnelles : une nouvelle fenêtre sur l'Univers**, *Pour la Science*, n° 462, avril 2016.