



GW190412 : La première observation d'un système binaire asymétrique de trous noirs

Daté du 20 avril 2020. Retrouvez cet article en ligne et dans d'autres langues à l'adresse <https://www.ligo.org/science/Publication-GW190412>.

Plus d'informations en français : <http://public.virgo-gw.eu/ressources-pedagogiques>.

Qu'avons-nous observé ?

Le 12 avril 2019, les collaborations [LIGO](#) et [Virgo](#) ont observé des ondes gravitationnelles produites par la fin du mouvement spiralant puis la fusion de deux **trous noirs**. Cet événement, appelé GW190412, a été observé par les trois détecteurs du réseau : les deux instruments [Advanced LIGO](#) (aux Etats-Unis : l'un à [Hanford, Washington](#) et l'autre à [Livingston, Louisiane](#)) et le détecteur [Advanced Virgo](#) (situé à Cascina, en Italie). GW190412 a été détecté peu après le début de la troisième campagne de prise de données LIGO-Virgo, appelée O3, qui a démarré le 1^{er} avril 2019 et a été suspendue le 27 mars 2020 à cause de la pandémie de Covid-19.

Alors que les deux masses sont compatibles avec celles des trous noirs précédemment observés par LIGO et Virgo, GW190412 est unique parce que c'est la première fusion de trous noirs où les masses des deux astres sont sensiblement différentes — l'un des trous noirs est plus de trois fois plus massif que l'autre. Cette asymétrie entre les masses modifie le signal d'onde gravitationnelle d'une manière telle qu'on peut ensuite mieux mesurer d'autres paramètres, comme la distance et l'**inclinaison** du système, le moment cinétique du trou noir le plus massif et la **précession** du système. De plus, les masses très différentes de GW190412 nous permettent de vérifier une prédiction fondamentale de la **Relativité Générale** d'Albert Einstein : celle qui stipule que les ondes gravitationnelles "vibrent" non seulement à une fréquence fondamentale, mais aussi à des fréquences multiples de celles-ci, appelées **multipôles** d'ordres plus élevés.

Comment savons-nous que GW190412 est un vrai signal d'onde gravitationnelle ?

GW190412 est un signal très puissant qui a été observé dans les trois détecteurs. Comme ceux-ci sont à plusieurs milliers de kilomètres les uns des autres, voir ce signal presque simultanément dans tous les instruments est une bonne indication de son origine astrophysique – par opposition à un artefact de bruit.

La décomposition temps-fréquence de GW190412, que nous appelons **spectrogramme**, est représentée sur la Figure 1. Même si ce signal est assez fort pour être visible « à l'œil nu » dans les données fournies par les détecteurs à Hanford et Livingston, nous utilisons une grande variété d'algorithmes pour analyser systématiquement les données, y dénicher des signaux d'ondes gravitationnelles et déterminer leur importance – ou « signification statistique ». La plupart des techniques reposent sur la méthode du **filtrage adapté**, qui compare les données enregistrées à des signaux simulés, prédits à partir de la Relativité Générale. Nous caractérisons

la probabilité qu'un signal résulte de bruit dans les détecteurs à travers son taux de fausse alarme. En utilisant des données prises entre les 8 et 18 avril, nous avons trouvé un taux de fausse alarme correspondant à un événement tous les 30 000 ans ! Ce taux s'améliorera encore au fur et à mesure que plus de données de O3 seront analysées. Nous avons également réalisé un certain nombre de vérifications pour chercher différents types de bruits instrumentaux ou environnementaux, et nous n'avons rien trouvé qui puisse atténuer la validité de la détection GW190412 ou modifier sensiblement l'analyse de son signal.

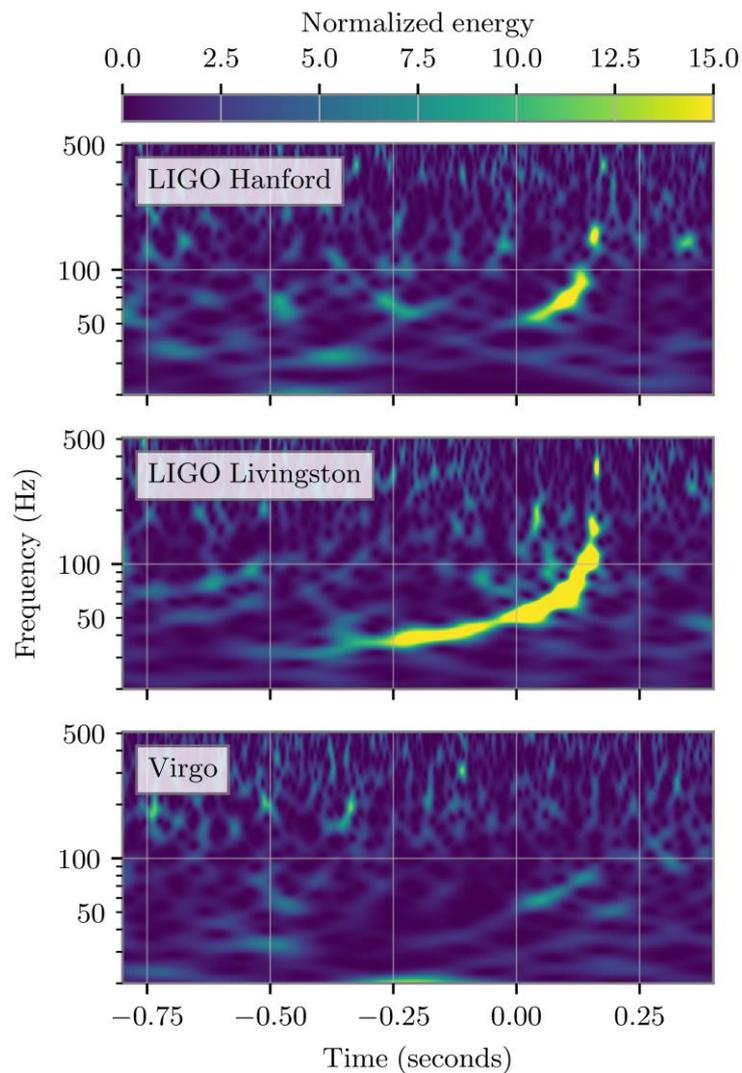


Figure 1 : Le spectrogramme de GW190412 dans les trois détecteurs d'ondes gravitationnelles. L'axe horizontal donne le temps par rapport à la fusion (0.00), et l'axe vertical la fréquence du signal. La couleur représente la quantité d'énergie à une certaine fréquence et à un temps donné : plus la couleur est chaude et plus l'énergie est élevée. Le « chirp » familier apparaît sous la forme d'une augmentation au cours du temps de la fréquence instantanée et de l'énergie du signal, qui résulte de l'augmentation de la puissance de l'onde gravitationnelle rayonnée au fur et à mesure que les orbites des deux trous noirs se rapprochent (phase dite « spiralante ») et finissent par fusionner.

Les Propriétés de GW190412

Les masses individuelles des deux trous noirs de GW190412 sont compatibles avec celles qui ont été mesurées lors des précédentes campagnes d'observation O1 et O2 : l'un des trous noirs pèse environ 30 fois la masse du Soleil, et l'autre environ 8 fois. Cependant, le rapport de masses de GW190412, défini comme la masse du trou noir le plus léger divisée par celle du trou noir le plus massif, diffère de ceux de toutes les fusions que nous avons détectées auparavant. Alors que pour les dix fusions de trous noirs observées lors de O1 et O2 le rapport des masses était compatible avec 1 (deux astres de même masse), le trou noir le plus massif de GW190412 a une masse plus de trois fois supérieure à celle de son compagnon.

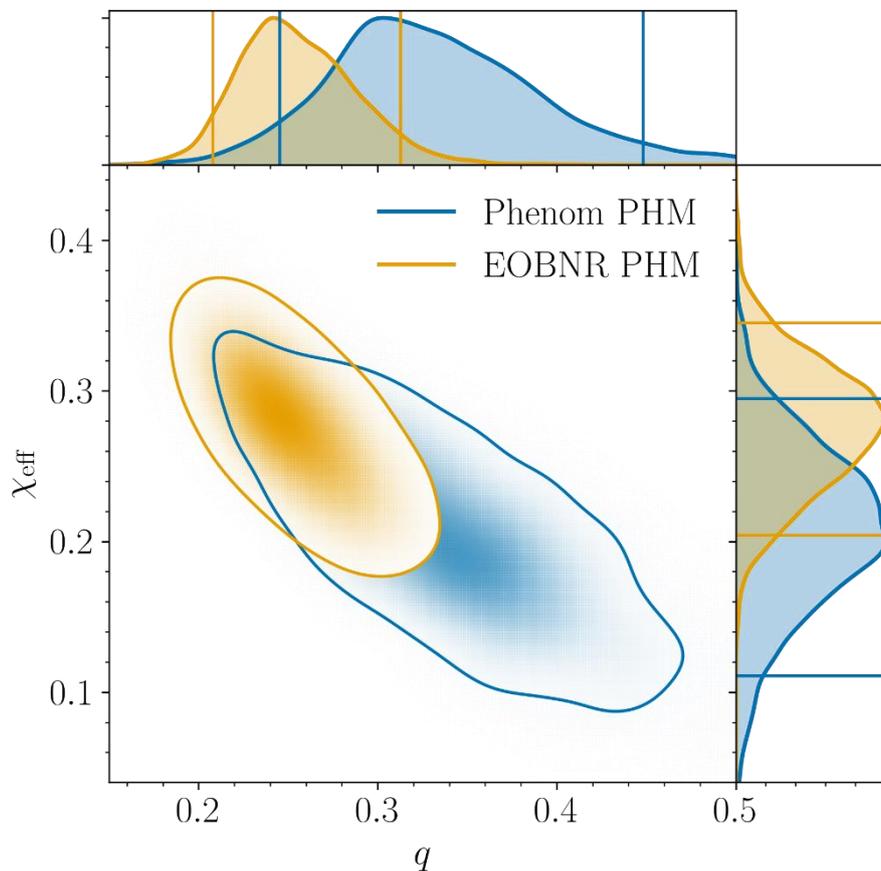


Figure 2 : Le rapport de masses estimé (q) et le moment cinétique effectif (χ_{eff}) de GW190412. Les contours orange et bleu montrent les distributions de ces deux paramètres, estimées en utilisant deux modèles de **formes d'ondes**, basés sur des approximations légèrement différentes pour calculer le signal attendu en Relativité Générale.

Les masses très différentes de GW190412 sont à l'origine d'une asymétrie dans l'émission d'ondes gravitationnelles qui nous aide à mieux estimer certains paramètres du système. Nous trouvons ainsi que le **moment cinétique effectif** du système est positif, ce qui indique qu'au moins l'un des deux trous noirs avait un mouvement de rotation autour d'un axe proche de la normale au plan de l'orbite du système. Un résultat important est que, grâce aux masses différentes de GW190412, nous pouvons pour la première fois mettre des contraintes fortes sur le moment cinétique du trou noir le plus massif, dont nous estimons la rotation à environ 40%



LIGO
Scientific
Collaboration



de la valeur maximale autorisée par la Relativité Générale. Le moment cinétique effectif du système et le rapport des masses estimés pour GW190412 sont représentés sur la Figure 2. Nous voyons également des indications d'une possible précession du système, même si ces effets sont trop faibles pour être totalement confirmés. Enfin, les masses différentes servent également à lever l'ambiguïté entre la distance et l'inclinaison du système par rapport à la Terre, ce qui permet une estimation plus précise de ces deux paramètres. La fusion GW190412 s'est ainsi produite à presque 2,5 milliards d'années-lumière de la Terre !

Entendre le bruissement des harmoniques du signal d'ondes gravitationnelles

Les caractéristiques uniques du signal GW190412 permettent également d'observer une propriété fondamentale des ondes gravitationnelles. Après les travaux pionniers d'Einstein, des études postérieures de Newman, Penrose, Thorne et de nombreux autres physiciens ont montré que le rayonnement en ondes gravitationnelles des systèmes binaires d'astres compacts était essentiellement **quadrupolaire**. Ce rayonnement quadrupolaire peut être vu comme le son principal qu'on entend quand on pince une corde de guitare. Cependant, de la même façon que pour les instruments de musique, il est prédit que le rayonnement en ondes gravitationnelles peut également « retentir » à des fréquences supérieures. Ces « harmoniques » supérieures ou multipôles d'ordres supérieurs sont très difficiles à distinguer quand les trous noirs qui fusionnent ont des masses semblables. A contrario, les masses très différentes du système GW190412 permettent de mieux « entendre » ces signaux ténus dans les ondes gravitationnelles émises. Les données confirment, avec un rapport supérieur à 1000 contre 1, l'hypothèse qu'il y a des harmoniques supérieures dans le signal. Dans le futur, l'intensité relative des multipôles permettra peut-être de mieux mesurer les propriétés des fusions de trous noirs.

Un certain nombre de tests ont également été effectués pour vérifier que GW190412 est compatible avec la Relativité Générale. Nous n'avons trouvé aucun désaccord, confirmant ainsi une fois de plus la théorie d'Einstein de la gravitation.

Comment former une binaire asymétrique de trous noirs ?

Chaque campagne d'observation du réseau constitué des détecteurs Advanced LIGO et Advanced Virgo a apporté de nouvelles informations excitantes sur la zoologie des systèmes binaires d'astres compacts. En tant que premier **système binaire** de trous noirs avec des masses sensiblement différentes, GW190412 nous fournit des informations importantes dans notre compréhension des populations de ces astres. L'observation de cet unique événement nous indique que des systèmes de trous noirs avec des masses différentes sont relativement courants, et que nous devons nous attendre à en observer bien d'autres dans le futur.

En se basant sur la physique de l'évolution stellaire, des astronomes ont élaboré des modèles expliquant comment les trous noirs se forment dans l'Univers et quelles sont leurs masses et leurs autres propriétés. Même si la plupart des modèles prédisent que les systèmes binaires avec des masses semblables devraient être les plus courants, beaucoup prédisent aussi un nombre appréciable de systèmes tels que GW190412, avec des masses clairement différentes.



Typiquement, on s'attend à ce que de tels systèmes se forment dix fois moins souvent que ceux dont les masses sont comparables. L'observation de GW190412 n'est néanmoins pas une surprise, étant donné que nous avons maintenant détecté nettement plus de dix événements. En continuant à améliorer notre sensibilité aux ondes gravitationnelles et à agrandir notre catalogue de fusions de systèmes binaires compacts, nous attendons à observer de nombreux systèmes similaires, qui amélioreront notre compréhension de l'évolution stellaire, de la formation de systèmes binaires compacts et de la physique fondamentale.

Glossaire

- **Chirp** : Ce mot anglais – « gazouillis » en français – désigne la forme caractéristique du signal d'onde gravitationnelle généré lors de la fusion d'un système binaire d'étoiles compacts. La fréquence et l'amplitude de ce signal augmentent à mesure que l'on s'approche de la fusion, formant une sorte de « croissant » (ou « banane », selon les goûts) sur les spectrogrammes. Le nom « chirp » vient du fait que si l'on convertit ce signal en son – ce qui est possible puisque les fréquences en jeu sont audibles pour l'oreille humaine – on obtient quelque chose qui ressemble à un gazouillis d'oiseau. Voir également [Wikipédia](#).
- **Filtrage adapté** : Une technique pour extraire des signaux enfouis dans des données bruitées. Des calques de formes d'ondes gravitationnelles calculés à partir de la Relativité Générale sont comparés à des jeux de données et une alerte se déclenche quand des motifs semblables à ces « patrons » sont trouvés.
- **Forme d'onde** : Un signal théorique d'onde gravitationnelles, calculé en utilisant des approximations de la Relativité Générale d'Einstein.
- **Inclinaison** : Inclinaison de l'orbite des trous noirs par rapport à l'axe de visée depuis la Terre.
- **Moment cinétique effectif** : Le paramètre le mieux mesuré parmi ceux reliés au moment cinétique dans un signal d'onde gravitationnelle. Formellement, il s'agit d'une moyenne (pondérée par les masses) de la projection de chacun des moments cinétiques individuels sur la direction perpendiculaire au plan de l'orbite des deux trous noirs.
- **Multipôles d'ordres supérieurs** : L'émission d'ondes gravitationnelles peut être décrite comme une somme d'[harmoniques sphériques](#). Les multipôles d'ordres plus élevés sont les termes de ce développement au-delà du terme quadrupolaire prédominant.
- **Précession** : A cause de la conservation du moment cinétique, quand des trous noirs sont en rotation dans une direction différente de la normale au plan de l'orbite du système binaire, celui-ci va tourner (on dit : « précesser ») autour du moment cinétique total.
- **Quadrupôle** : Le terme multipolaire le plus important dans l'émission d'ondes gravitationnelles par un système binaire compact. Si l'on pense à ces ondes comme des « sons dans l'espace-temps », l'émission quadrupolaire est la note fondamentale. Le nom fait référence au diagramme d'émission du signal dans différentes directions : en comparaison, une banale antenne radio a une émission essentiellement dipolaire.
- **Relativité Générale** : La théorie de la gravitation proposée par Albert Einstein en 1915. Selon cette théorie, l'espace est semblable à une matière malléable qui se courbe en

présence de matière ou d'énergie, et les astres suivent des trajectoires sur cet espace courbé.

- **Spectrogramme** : Une représentation temps-fréquence-énergie d'un enregistrement temporel de données. À un instant donné, l'intensité des différentes fréquences est représentée par des couleurs.
- **Système binaire d'astres compacts** : Un système composé de deux vestiges stellaires, étoiles à neutrons ou trous noirs.
- **Trou noir** : Un objet si compact que même la lumière ne peut s'échapper de son attraction gravitationnelle.

Pour en savoir plus

- Visitez nos sites internet : ligo.org, virgo-gw.eu



- Lisez l'annonce de cette découverte sur les sites internet de
 - Virgo : virgo-gw.eu/GW190412 (cliquez sur le drapeau tricolore pour la version française) et
 - LIGO : <https://www.ligo.caltech.edu/news/ligo20200420>.
- L'article scientifique complet est accessible gratuitement via le lien suivant : <https://dcc.ligo.org/LIGO-P190412/public>.