

# GW190425 : Le système binaire d'étoiles à neutrons le plus massif jamais détecté ?

Daté du 6 Janvier 2020. Retrouvez cet article en ligne et dans d'autres langues à l'adresse [ligo.org/science/Publication-GW190425](https://ligo.org/science/Publication-GW190425).



*Figure 1 : Représentation artistique du système binaire d'étoiles à neutrons en train de fusionner à l'origine du signal d'ondes gravitationnelles GW190425. Crédit : National Science Foundation/LIGO/Sonoma State University/A. Simonnet.*

## Qu'avons-nous trouvé ?

La [Collaboration Scientifique LIGO](#) et la [Collaboration Virgo](#) peuvent aujourd'hui annoncer que, le 25 avril 2019, des ondes gravitationnelles émises par la fusion de deux astres compacts ont été détectées. Cet événement a été baptisé GW190425. [LIGO](#) pilote deux détecteurs d'ondes gravitationnelles, l'un à [Hanford, dans l'État de Washington](#) et l'autre à [Livingston, en Louisiane](#). Au moment du signal GW190425, le détecteur LIGO-Hanford n'était momentanément pas en train de prendre des données, mais ce fort signal a été détecté par le détecteur LIGO-Livingston. Le [détecteur Virgo](#), situé à Cascina en Italie, était lui opérationnel mais, à cause d'une sensibilité moindre et du fait que la source de GW190425 se trouvait probablement dans une région du ciel moins visible pour Virgo que pour LIGO-Livingston, le signal observé n'était au-dessus du seuil

de détection que pour LIGO-Livingston. Les données de Virgo ont néanmoins servi pour la détermination des paramètres de la source de GW190425. La masse totale de ce système binaire a été mesurée entre 3,3 et 3,7 fois celle du Soleil. Etant donné cet intervalle de masses, le scénario le plus probable est que deux étoiles à neutrons sont entrées en collision à une distance approximative de 520 millions d'années-lumière. Toutefois, la masse de ce système binaire est significativement plus élevée que celles de tous les autres systèmes binaires d'étoiles à neutrons connus à ce jour.

## Un peu de contexte

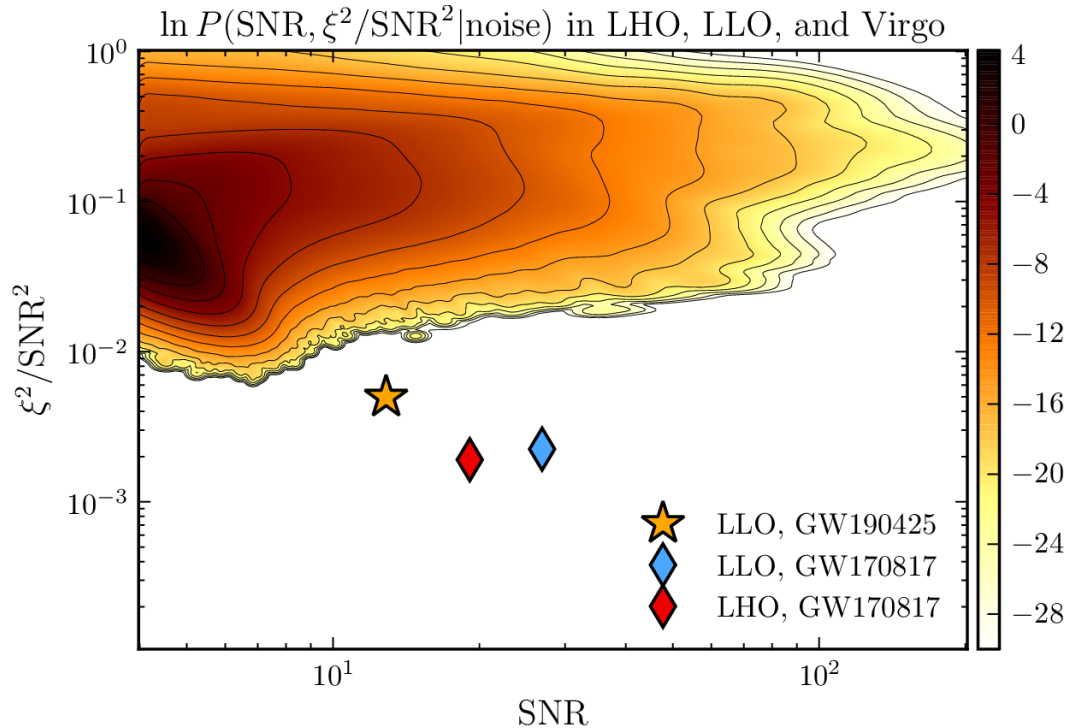
Le signal GW190425 a été détecté pendant la troisième période de prise de données commune des détecteurs Advanced Virgo et Advanced LIGO (le « run » O3), qui a commencé le 1<sup>er</sup> avril 2019 et qui se terminera le 30 avril 2020. Ce run a été précédé par deux autres : O1 (septembre 2015 – janvier 2016) et O2 (novembre 2016 – août 2017). Voir [ici](#) pour plus de détails. Entre les différents runs d'observation, les détecteurs sont améliorés et bénéficient d'avancées technologiques pour améliorer leur sensibilité.

C'est pendant le run O2 que LIGO et Virgo détectèrent pour la première fois des ondes gravitationnelles provenant de la coalescence de deux étoiles à neutrons, un événement connu sous le nom de [GW170817](#). Cette collision a aussi produit des signaux [détectés sur l'ensemble du spectre électromagnétique](#). GW190425 est probablement notre seconde détection d'ondes gravitationnelles issues d'une coalescence d'étoiles à neutrons. À ce jour, aucune contrepartie (ni optique ni signal de neutrino) n'a été identifiée comme associée à GW190425. Ceci n'est pas très surprenant car la source est plus éloignée que celle de GW170817 et le signal électromagnétique attendu est donc plus faible. Mais la principale raison expliquant cette absence de détection pourrait être le fait que la source de GW190425 est mal localisée : la région délimitée par les analyses couvre 16% du ciel. C'est une zone de recherche immense pour les télescopes !

## Pourquoi nous savons que GW190425 est bien d'origine astrophysique

Plusieurs programmes de recherche LIGO-Virgo ont pour but de détecter des ondes gravitationnelles provenant de la coalescence d'astres compacts. Ils comparent les données enregistrées avec des signaux théoriques prédits à partir de la [théorie de la relativité générale](#) en utilisant la technique dite du « [filtrage adapté](#) » ou filtrage de Wiener. Ces analyses ont ainsi identifié le signal GW190425 dans les données du détecteur LIGO-Livingston. Ensuite, il a fallu calculer la signification statistique de l'événement, c'est-à-dire évaluer le taux auquel un signal similaire apparaît par hasard dans les données, étant données les caractéristiques du bruit de mesure. Cette quantité s'appelle le « taux de fausses alarmes ». Pour l'estimer, il faut comparer la

force du signal GW190425 avec la distribution statistique du bruit de fond. Celle-ci est obtenue en appliquant la même procédure de recherche aux données enregistrées pendant 169,5 jours pour les runs O1 et O2 et pendant 50 jours du run O3, séparément pour les trois détecteurs LIGO-Livingston, LIGO-Hanford et Virgo. Le résultat est un taux de fausses alarmes de 1 / 69 000 ans pour GW190425. En effet, la Figure 2 montre bien que ce signal ressort du bruit de fond combiné obtenu à partir des 219,5 jours de données – tout comme d’ailleurs GW170817, l’autre détection confirmée.



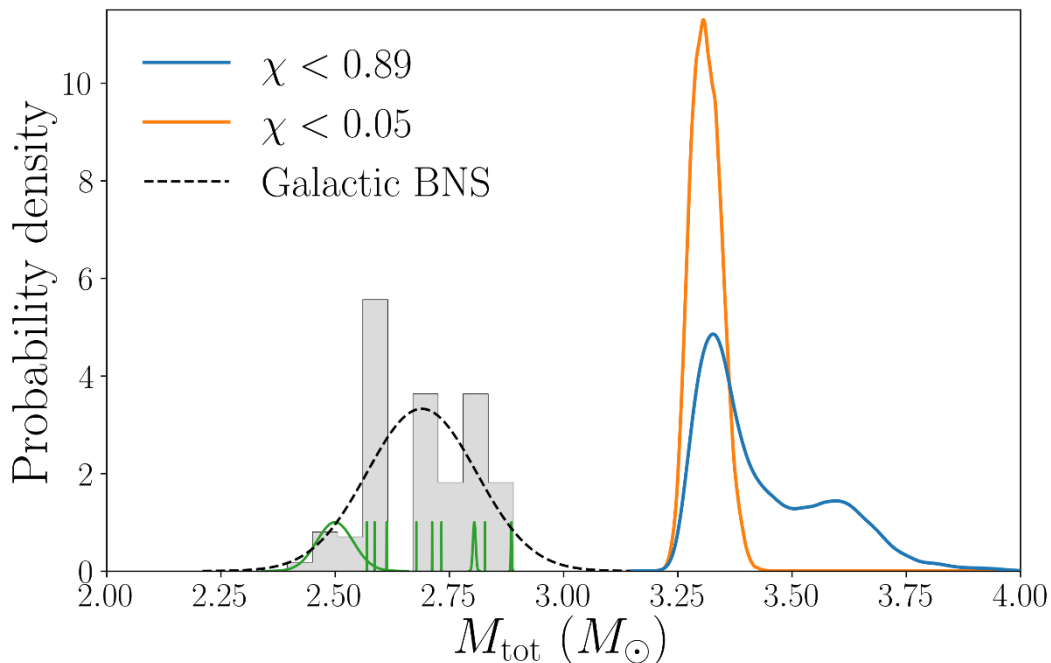
**Figure 2 :** Ce graphique montre la distribution de probabilité à deux variables – SNR et  $\xi^2/\text{SNR}^2$  – du bruit de fond, combinée pour LIGO-Hanford (LHO), LIGO-Livingston (LLO) et Virgo. Le rapport signal sur bruit (SNR, en anglais « signal-to-noise ratio ») mesure la force du signal relativement au niveau de bruit de mesure tandis que le paramètre  $\xi^2$  quantifie la manière dont la série temporelle du signal observé ressemble à la forme d’onde attendue pour la fusion d’un système double d’astres compacts. Les deux axes et le code de couleur utilisé pour modéliser la densité de probabilité du bruit de fond dans la région des systèmes doubles d’étoiles à neutrons sont logarithmiques. Le bruit de fond a été estimé en utilisant les données enregistrées durant 169,5 jours pendant les runs O1 et O2 et 50 jours pendant le run O3. Il n’y a pas de bruit de fond à l’emplacement du signal GW190425 (symbolisé par une étoile dorée) : celui-ci se détache donc bien du bruit de fond. Pour comparaison, le signal GW170817 enregistré indépendamment par les détecteurs LLO et LHO est indiqué par des losanges bleu et rouge.

En plus de ces analyses, GW190425 a passé d’autres vérifications, [comme toutes les détections précédentes](#). Ces méthodes testent la possibilité qu’un bruit au niveau du détecteur, rare et bref,

puisse avoir produit un tel signal à LIGO-Livingston. Aucune contamination, ni environnementale ni instrumentale, n'a été identifiée pour l'événement GW190425.

## Pourquoi le signal GW190425 est-il si intéressant ?

L'étude de ce signal a établi que la masse du plus lourd des deux astres compacts est comprise entre 1,61 et 2,52 fois la masse du Soleil tandis que la masse de l'autre corps se situe entre 1,12 et 1,68 fois celle du Soleil. Ces masses sont comparables à celles mesurées pour d'autres étoiles à neutrons et elles sont aussi compatibles avec les prédictions obtenues à partir de simulations d'explosions de [supernovæ](#). L'étoile à neutrons la plus massive identifiée à partir d'observations dans le domaine électromagnétique ([PSR J0740+6620](#)) a une masse comprise entre 2,05 et 2,24 fois celle du Soleil. Dans le cas de GW190425, nous ne pouvons pas exclure que l'un des astres, ou même les deux soient des trous noirs. Cependant, l'interprétation la plus vraisemblable est bien que les deux astres aient été des étoiles à neutrons. Si c'est effectivement le cas, que pouvons-nous en déduire pour GW190425 ?



**Figure 3 :** Les courbes bleue et orange montrent la distribution de probabilité de la masse totale du système binaire GW190425 pour deux hypothèses concernant les périodes de rotation propres des astres compacts. L'histogramme gris comprend les masses totales de dix systèmes binaires connus dans la Galaxie et qui devraient fusionner en un temps inférieur à l'âge de l'Univers. Une [distribution normale](#) (la courbe pointillée noire) est ajustée sur cet histogramme. Les courbes vertes montrent les distributions de masse totale pour chacun des 10 systèmes galactiques, ajustées pour avoir toutes une ordonnée maximale égale à 1.

Par certains aspects, GW190425 se distingue des autres systèmes binaires d'étoiles à neutrons de notre Galaxie. Alors que la masse de chaque astre pris séparément est comparable à celles des étoiles à neutrons connues, la masse totale du système est très différente. La Figure 3 montre la distribution de la masse totale des 10 systèmes galactiques découverts à ce jour et qui devraient fusionner dans un temps inférieur à l'âge de l'Univers : une [loi normale](#) a été ajustée sur cet histogramme. On constate que la masse totale moyenne de ces systèmes vaut 2,69 fois celle du Soleil, alors que la masse totale du système binaire GW190425 est à peu près 3,4 fois celle du Soleil, c'est-à-dire à 5 [écarts-type](#) de la moyenne galactique. Cela suggère que GW190425 a dû se former différemment des systèmes binaires galactiques connus.

Il y a deux manières de former un système double à partir d'étoiles à neutrons. La première s'appelle le « le canal d'évolution de [binaires isolées à enveloppe commune](#) » : les deux étoiles d'un système binaire préexistant arrivent en fin de vie et explosent en supernova l'une après l'autre, sans interagir avec d'autres astres compacts. La seconde est le « canal de formation dynamique » : dans ce scénario, un système binaire formé de deux étoiles à neutrons ou d'une étoile à neutrons et d'une [étoile de la séquence principale](#) par exemple est présent au départ. Une autre étoile à neutrons se joint alors à ce système dont elle éjecte l'étoile la moins massive, produisant ainsi un système avec juste deux étoiles à neutrons. Une origine dynamique est peu vraisemblable pour GW190425 car on pense que ce processus ne contribue que faiblement au taux de coalescence de systèmes binaires d'étoiles à neutrons. Si le système binaire GW190425 s'est formé de manière isolée, cela pourrait indiquer que les étoiles à neutrons sont nées d'étoiles de faible [métallicité](#). Ou bien que, lorsque la première explosion de supernova a eu lieu et a créé une étoile à neutrons, une partie de la masse de l'autre étoile (celle qui n'a pas encore explosé en supernova) ait pu être transférée vers l'étoile à neutrons juste née, la rendant ainsi plus massive. Dans un cas comme dans l'autre, la découverte de GW190425 suggère qu'il y a une population de systèmes binaires d'étoiles à neutrons avec des périodes orbitales inférieures à une heure et qui ne sont pas actuellement détectables par les observations dans le spectre électromagnétique.

Un objectif de l'analyse du signal GW190425 était de déterminer la vitesse de rotation des étoiles à neutrons sur elles-mêmes. Malheureusement, les résultats n'ont pas été concluants. Ils sont compatibles avec les deux systèmes binaires d'étoiles à neutrons ayant les plus grandes vitesses de rotation propre et qui devraient fusionner en un temps inférieur à l'âge de l'Univers, PSR J0737-3039A/B et PSR J1946+2052. Ce dernier système contient un pulsar dont la période de rotation est de seulement 17 ms.

En supposant que la source du signal GW190425 soit effectivement un système binaire d'étoiles à neutrons et en combinant cette détection avec l'autre système que nous avons observé (GW170817), on peut estimer le nombre d'étoiles à neutrons qui entrent en collision dans un volume donné d'Univers chaque année : le taux de coalescence d'étoiles à neutrons est compris entre 250 and 2810 par gigaparsec cube et par an.



GW190425 est potentiellement la seconde observation d'un système binaire d'étoiles à neutrons : elle nous a apporté de nouvelles informations sur ces astres étranges.

## POUR EN SAVOIR PLUS

- Visitez nos sites internet : [ligo.org](http://ligo.org), [virgo-gw.eu](http://virgo-gw.eu)
- Lisez les communiqués de presse LIGO ([ligo.caltech.edu/news/ligo20200106](http://ligo.caltech.edu/news/ligo20200106)) et Virgo ([virgo-gw.eu/GW190425](http://virgo-gw.eu/GW190425)) au sujet de cette découverte.
- Vous pouvez aussi lire l'article scientifique complet à l'un des liens suivants : [dcc.ligo.org/P190425/public/main](http://dcc.ligo.org/P190425/public/main)

## Glossaire

- **Objet compact** : Un terme fourre-tout pour les objets stellaires très denses et très petits tels que les étoiles à neutrons et les trous noirs. Très petit est à prendre dans le contexte astronomique ! Ces astres ont tous une masse excédant celle du Soleil, mais concentrée dans un rayon allant de quelques kilomètres à quelques dizaines de kilomètres.
- **Système binaire** : Un système avec deux astres en orbite l'un autour de l'autre.
- **Etoile à neutrons** : Astre extrêmement compact qui peut être produit lors de l'effondrement gravitationnel d'une étoile très massive qui a épuisé son combustible nucléaire.
- **Trou noir** : Une région d'espace-temps au voisinage d'une masse très compacte et où la gravité est tellement intense que tout y reste confiné : même la lumière ne peut pas en partir.
- **Pulsar** : Une étoile à neutrons dont des bouffées de radiation électromagnétiques sont détectées (généralement dans le domaine radio). Une grande partie des étoiles à neutrons ne sont pas vues comme des pulsars, soit parce que leur émission est trop faible, soit parce que leurs bouffées d'ondes électromagnétiques ne sont pas émises en direction de la Terre.