

Une nouvelle source d'ondes gravitationnelles : les systèmes binaires étoile à neutrons – trou noir

Daté du 29 juin 2021. Retrouvez cet article en ligne et dans d'autres langues à l'adresse <https://www.ligo.org/science/Publication-NSBH/index.php>.

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

**

*

Qu'avons-nous découvert ?

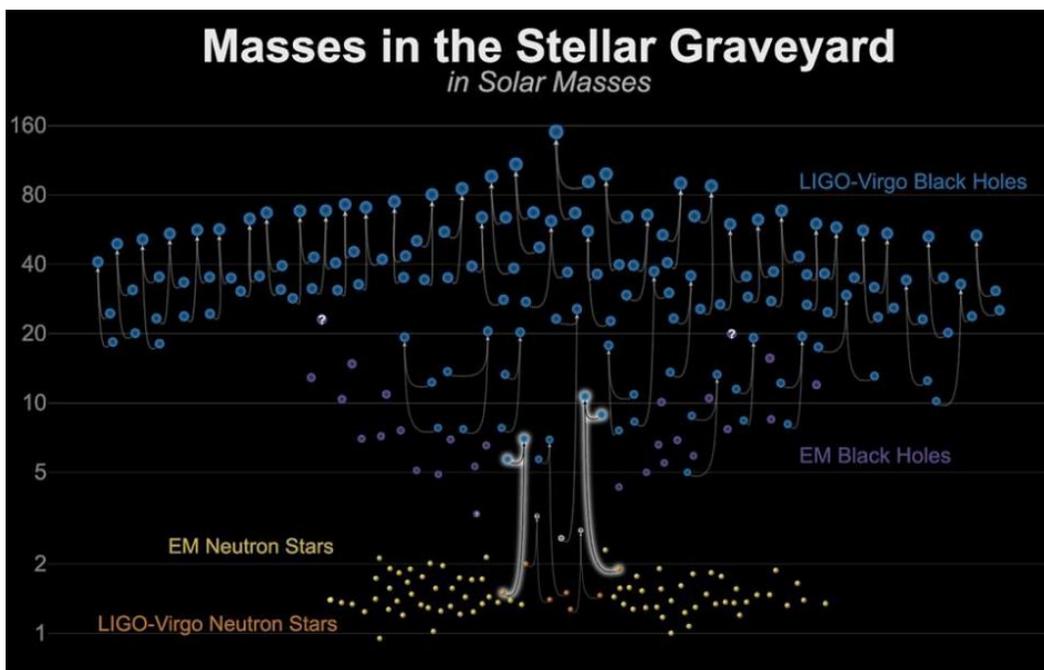


Figure 1 : Répartition des masses des étoiles à neutrons et des trous noirs mesurées à partir de leurs observations en ondes gravitationnelles ou via le **spectre électromagnétique**. Les points jaunes et violets représentent respectivement les mesures électromagnétiques d'étoiles à neutrons et de trous noirs tandis que les points oranges et bleus symbolisent les mesures basées sur des ondes gravitationnelles. Les deux signaux décrits dans le présent article, **GW200105** et **GW200115**, sont mis en évidence par des traits épais : il s'agit de fusions entre une étoile à neutrons et un trou noir.

Crédits : LIGO-Virgo & Frank Elavsky, Aaron Geller de la Northwestern University.

Le 5 janvier 2020, le [détecteur Advanced LIGO](#) de [Livingston](#) (État de Louisiane, USA) et le [détecteur Advanced Virgo](#) situé à Cascina (Italie) ont observé des ondes gravitationnelles probablement émises par un type de source entièrement nouveau. Elles ont été produites lors du final d'une valse mortelle dansée par des astres parmi les plus extrêmes que compte l'Univers :

une **étoile à neutrons** (« NS », pour « Neutron Star » en anglais) et un **trou noir** (« BH », pour « Black Hole » en anglais). LIGO et Virgo ont détecté les dernières orbites de la phase dite « **spiralante** » du système, suivies par la fusion des deux astres. Chose étonnante, à peine dix jours plus tard, un second signal émis par le même type de source – fin de la phase spiralante puis fusion d’un système binaire étoile à neutrons + trou noir – a été détecté, cette fois par les deux détecteurs LIGO (celui de Livingston et également celui de [Hanford](#)) et le détecteur Virgo. C’est la première fois que des ondes gravitationnelles issues d’un système binaire « mixte », une étoile à neutrons et un trou noir (« NS-BH ») sont observées (voir Figure 1). Jusque-là, tous les systèmes binaires observés étaient composés soit de deux trous noirs, soit de deux étoiles à neutrons. Ces deux nouvelles découvertes ont été respectivement baptisées **GW200105** et **GW200115** – d’après la date d’enregistrement du signal.

L’existence de systèmes binaires NS-BH avait été prédite il y a plusieurs dizaines d’années mais aucune observation convaincante d’une telle configuration n’avait été rapportée jusqu’à nos deux découvertes de janvier 2020. Grâce aux deux nouvelles détections, les trois types de **systèmes binaires compacts** que l’on peut former à partir de trous noirs et d’étoiles à neutrons – « BBH » (système binaire de trous noirs), « BNS » (système binaire d’étoiles à neutrons) et NS-BH donc – ont maintenant été observés. Les signaux GW200105 et GW200115 s’inscrivent dans une série d’observations de systèmes binaires compacts – passées, présentes et futures – qui apportent un nouvel éclairage sur la naissance, la vie et la mort des étoiles, ainsi que sur les environnements au sein desquels elles se forment dans le cosmos.

Détecter ces ondes gravitationnelles

La recherche dans les données d’ondes gravitationnelles dont la forme – c’est-à-dire l’évolution en fonction du temps – est connue est basée sur la méthode dite du « **filtrage adapté** » (en anglais « [matched filtering](#) »). Elle compare les données enregistrées par les détecteurs avec les signaux prédits par la **théorie de la Relativité Générale** d’Einstein. Cette technique d’analyse permet de séparer les ondes gravitationnelles du bruit de mesure, de la même façon que notre oreille parvient à distinguer les instruments individuellement lorsque nous écoutons un morceau de musique.

GW200115 a une probabilité très élevée d’être un signal d’ondes gravitationnelles d’origine astrophysique : le nombre estimé de fausses détections similaires (dues aux fluctuations du bruit de mesure) est inférieur à **1 / 100 000 ans**. Par contre, l’origine astrophysique du signal GW200105 est plus difficile à établir d’un point de vue statistique mais il se démarque clairement de tous les effets dus au bruit observés jusqu’à maintenant ; le nombre estimé de détections similaires dues au bruit de mesure est inférieur à **1 / 2,8 ans**.

Les fusions de systèmes binaires NS-BH peuvent en principe émettre de la lumière dans une vaste gamme du **spectre électromagnétique**. Malheureusement, les positions des deux sources dans le ciel n’ont été mesurées que de manière très imparfaite : les régions du ciel délimitées par les analyses mesurent entre 2 400 et 29 000 fois la taille de la pleine lune. Ces résultats, combinés avec le fait que les sources sont très éloignées (voir ci-après) font qu’il était très peu probable de découvrir d’éventuelles contreparties optiques des signaux d’ondes gravitationnelles et,

effectivement, aucune n'a été observée. Dans le futur, d'autres fusions de systèmes binaires NS-BH pourraient induire un signal électromagnétique détectable et révéler ainsi comment le trou noir met en pièce l'étoile à neutrons sous l'effet des forces de marée. Une telle observation nous renseignerait alors sur les propriétés extrêmes de la matière nucléaire dont les étoiles à neutrons sont formées.

Les propriétés des deux sources d'ondes gravitationnelles

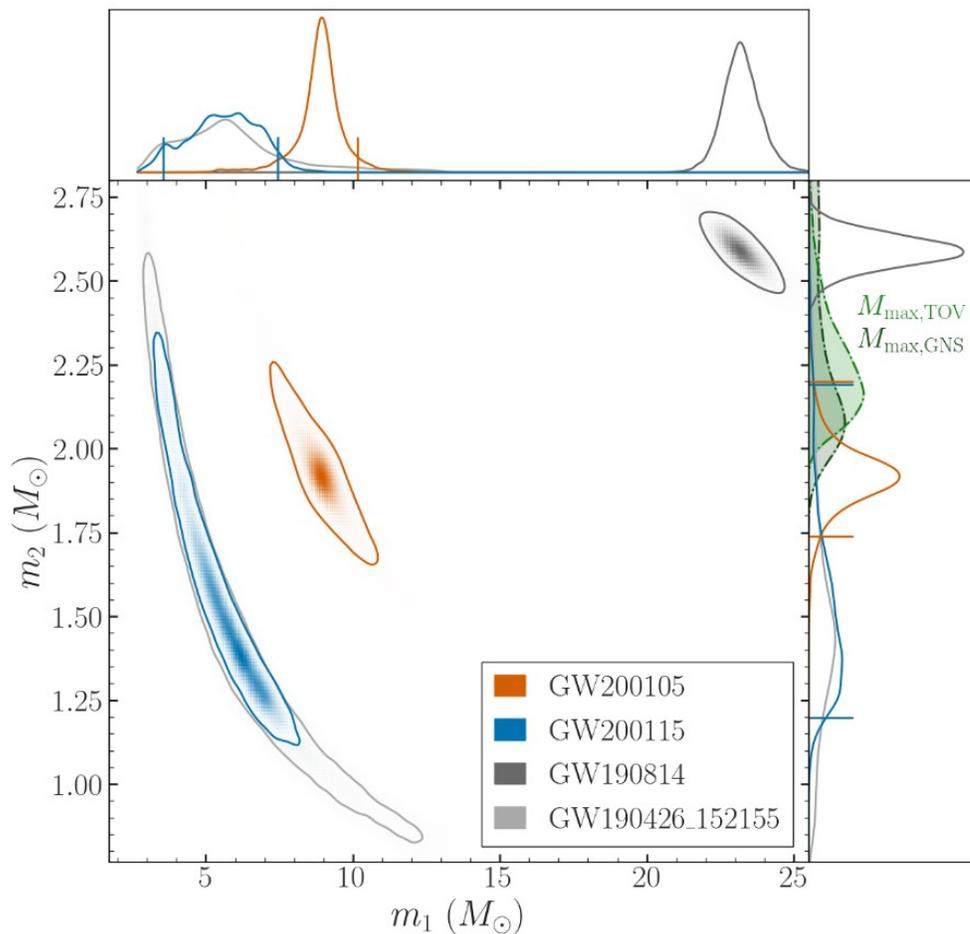


Figure 2 : Ce diagramme résume nos mesures des masses des astres dont les fusions ont produit les signaux d'ondes gravitationnelles GW200105 et GW200115. L'axe horizontal mesure la masse de l'astre le plus lourd du système (le trou noir) tandis que l'axe vertical donne celle de l'astre le plus léger (l'étoile à neutrons). Les surfaces colorées (en orange pour le premier événement, en bleu pour le second) indiquent les combinaisons de masses qui sont compatibles avec les données enregistrées. Plus la couleur est soutenue et plus la probabilité que ces deux masses soient les bonnes est élevée.

La projection au-dessus du graphique principal se concentre sur la masse des trous noirs : par exemple, la courbe bleue nous apprend que le trou noir du système binaire GW200115 avait une masse comprise entre $3,5 M_{\odot}$ et $7,5 M_{\odot}$. La projection sur la droite du graphique fournit les mêmes informations pour la masse des étoiles à neutrons : par exemple, la courbe orange indique que l'étoile à neutrons du système binaire GW200105 avait une masse comprise entre $1,75 M_{\odot}$ et $2,2 M_{\odot}$. La région colorée en différents tons de vert sur la droite représente la distribution de masse des étoiles à neutrons connues. En tenant compte des incertitudes liées à leur mesure, la masse des composants les plus légers observés est compatible avec celle attendues pour des étoiles à neutrons.

Enfin, cette figure inclut également les mesures des masses des astres dont la fusion a produit deux signaux d'ondes gravitationnelles détectés précédemment : GW190814, probablement la fusion d'un trou noir de $23 M_{\odot}$ avec un autre trou noir de $2,5 M_{\odot}$ (le plus léger jamais observé) et GW190426_152155, un signal qui pourrait également être une fusion NS-BH mais qui est si faible qu'il n'est pas possible d'affirmer que son origine est astrophysique.

Les signaux d'ondes gravitationnelles emportent avec eux une quantité considérable d'informations sur les sources qui les ont produites : par exemple les masses des astres compacts qui ont fusionné. Ainsi, le trou noir et l'étoile à neutrons qui ont généré le signal GW200105 étaient respectivement environ 8,9 fois et 1,9 fois plus massifs que notre Soleil (dont la masse est notée M_{\odot}). Cette fusion a eu lieu il y a environ huit cent millions d'années, soit des centaines de millions d'années avant l'apparition des dinosaures. Pour l'événement GW200115, les masses du trou noir et de l'étoile à neutrons étaient environ $5,7 M_{\odot}$ et $1,5 M_{\odot}$ et leur fusion s'est produite il y a près d'un milliard d'années. Les estimations des masses des deux systèmes sont résumées sur la Figure 2 ci-dessus.

Nos mesures montrent que le spin du trou noir du système binaire GW200105 (c'est-à-dire une mesure de la rapidité avec laquelle il tournait sur lui-même) était compris entre 0 et 30% du spin maximal autorisé pour les trous noirs. Le spin du trou noir de GW200115 valait entre 0 et 80% du spin maximum. Par contre, nous n'avons aucune information sur l'éventuel spin des étoiles à neutrons, les mesures n'étant pas sensibles à ce paramètre (voir Figure 3 ci-dessous).

Pourquoi pensons-nous que nous avons observé des systèmes binaires NS-BH ? Pour produire les ondes gravitationnelles détectées, les astres qui ont fusionné devaient être très compacts et très denses par rapport aux étoiles typiques – faute de quoi ils auraient éclaté en morceaux avant de rentrer en collision. La masse de l'astre le plus lourd de chacun des systèmes binaires vaut respectivement $8,9 M_{\odot}$ et $5,8 M_{\odot}$: il ne peut donc s'agir que de trous noirs. Les masses des astres les plus légers sont environ $1,9 M_{\odot}$ et $1,5 M_{\odot}$, bien en dessous de celles de tous les trous noirs connus. Par contre, elles sont en accord avec celles des étoiles à neutrons connues, que ce soient celles qui sont observées dans la Voie Lactée ou bien celles détectées en ondes gravitationnelles – par exemple l'événement [GW170817](#). Les masses des deux trous noirs sont en accord avec les prédictions des modèles décrivant la formation des étoiles et leur évolution.

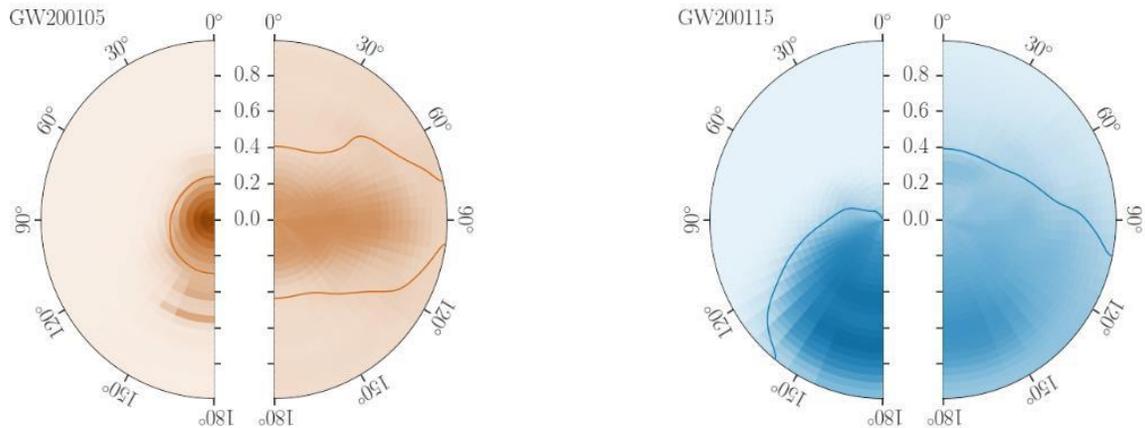


Figure 3 : Représentation des mesures de l'intensité et de la direction du spin du trou noir (demi-disque de gauche) et de l'étoile à neutron (demi-disque de droite) pour les systèmes binaires GW200105 (en orange, à gauche) et GW200115 (en bleu, à droite). Le rayon du demi-disque mesure le rapport entre le spin mesuré et le spin maximum des trous noirs – et varie donc entre 0 (pas de spin) et 1 (fréquence de rotation maximale). La direction du spin est, elle, représentée par un angle qui varie entre 0° (l'astre tourne sur lui-même dans le même sens que celui du mouvement orbital du système binaire) et 180° (l'astre tourne sur lui-même dans le sens opposé). La gamme de couleurs, de la plus foncée à la plus claire, renseigne sur la probabilité qu'un couple (intensité, angle) donné soit le bon. L'hémisphère le plus à gauche montre une probabilité accrue autour de son centre ce qui indique que le spin du trou noir du système GW200105 est probablement faible. Le code couleur du troisième hémisphère privilégie la région inférieure, ce qui indique que le trou noir du système binaire GW200115 pourrait avoir tourné sur lui-même dans le sens opposé au mouvement orbital.

Comment ces systèmes binaires se sont-ils formés et à quelle fréquence ces fusions se produisent-elles dans l'Univers ?

Comment ces systèmes binaires NS-BH se sont-ils formés ? Il y a deux scénarios principaux. Le premier commence avec deux étoiles orbitant déjà l'une autour de l'autre. Ces étoiles ont des masses telles que, lorsqu'elles vieillissent, elles finissent par exploser en supernova : l'une de ces étoiles devient un trou noir et l'autre une étoile à neutrons. On parle alors de « l'évolution d'un système binaire isolé ». L'autre possibilité est que les trous noirs et les étoiles à neutrons se soient formés séparément lors d'explosions de supernova indépendantes ; ce n'est qu'ensuite qu'ils se sont rencontrés. Ce scénario « d'interaction dynamique » ne peut se produire que dans des environnements denses en étoiles comme les **amas globulaires**. L'orientation du spin du trou noir donne des indices pour choisir un modèle plutôt que l'autre. Dans le cas de l'évolution d'un système binaire isolé, la rotation du trou noir a tendance à s'aligner avec celle du système binaire – ce qui revient à dire que l'étoile à neutrons orbite dans le plan équatorial du trou noir. Au contraire, le scénario d'interaction dynamique ne privilégie aucune direction particulière pour

l'axe de rotation du trou noir : l'orbite de l'étoile à neutrons a une orientation quelconque par rapport au plan équatorial du trou noir.

Le spin estimé du trou noir du système GW200105 ne permet pas de choisir un scénario plutôt que l'autre. Par contre, pour GW200115, nous avons trouvé que la rotation du trou noir est probablement opposée à celle du système binaire. Par exemple, si l'étoile à neutrons orbite autour du trou noir dans le sens horaire, le trou noir tourne sur lui-même dans le sens anti-horaire. C'est un indice en faveur de la formation de la source du signal GW200115 dans un environnement dense, comme un amas globulaire.

Combien de systèmes binaires NS-BH se forment-ils dans l'Univers en un temps donné ? L'observation de ces deux premiers systèmes binaires montre que leur taux de formation est compris entre 5 et 15 par an dans un volume d'Univers d'un milliard d'années-lumière de rayon. Un tel taux ne permet pas de privilégier un scénario de formation par rapport à l'autre.

Glossaire

- **Amas globulaire** : Un groupe très dense d'étoiles, dont la cohésion est assurée par la gravitation.
- **Année-lumière** : Une unité de longueur correspondant à la distance que la lumière parcourt dans le vide en une année. Une année-lumière vaut environ 9,46 milliers de milliards de kilomètres (ou environ 5,88 milliers de milliards de miles).
- **Étoile à neutrons** : Un état final possible pour une étoile massive qui a atteint la fin de sa vie. Lorsqu'une étoile massive a épuisé son combustible nucléaire, elle meurt lors d'un événement cataclysmique : une explosion en supernova qui donne souvent naissance à une étoile à neutrons. Il s'agit d'un astre si massif et dense que ses atomes ne peuvent pas maintenir leur structure (noyau chargé positivement entouré d'un nuage d'électrons chargés négativement) qui nous est familière sur Terre. Ces étoiles sont un peu plus massives que notre Soleil mais elles ne font que quelques dizaines de kilomètres de diamètre.
- **Filtrage adapté** : Une technique d'analyse du signal pour détecter des signaux noyés dans des données bruitées mais dont la forme est connue. Les données sont passées au travers de calques qui reproduisent l'évolution temporelle des ondes gravitationnelles, calculée à l'aide de la Relativité Générale. Ces calques agissent comme le tamis d'un orpailleur qui retient de fines pépites d'or : ils permettent d'extraire des données un signal, même ténu, à condition qu'il leur ressemble.
- **M_{\odot} (masse solaire)** : La masse du Soleil, environ 2×10^{30} kilogrammes. La masse solaire est une unité de masse adaptée à l'astronomie.
- **Phase spirale** : Le mouvement orbital des deux astres qui composent un système binaire, par exemple une étoile à neutrons et un trou noir. À mesure que le système binaire perd de l'énergie en émettant des ondes gravitationnelles, les deux astres orbitent de plus en plus rapidement et se rapprochent jusqu'à fusionner.
- **Spectre électromagnétique** : La lumière visible couvre une gamme de couleurs allant du rouge au violet mais celles-ci se prolongent au-delà de la plage à laquelle nos yeux sont

sensibles. Au-delà de la lumière rouge se trouvent l'infrarouge, puis les micro-ondes et enfin les ondes radio. De manière similaire, on trouve l'ultraviolet, puis les rayons X et enfin les rayons gamma au-delà du violet. L'ensemble de toutes ces « couleurs » forme le spectre électromagnétique et les astronomes utilisent chacune de ces bandes pour en apprendre plus sur notre Univers. Toute radiation électromagnétique se présente sous la forme d'une onde – c'est-à-dire une oscillation des champs électriques et magnétiques – dont la fréquence (ou la longueur d'onde) définit sa place dans le spectre électromagnétique.

- **Système binaire compact** : Un système formé de deux astres compacts descendants d'étoiles et liés gravitationnellement. Par exemple une étoile à neutrons et un trou noir en orbite l'un autour de l'autre et très proches.
- **Théorie de la Relativité Générale** : La théorie de la gravitation proposée par Albert Einstein en 1915. Dans ce cadre, l'espace et le temps forment une trame malléable qui se déforme en présence de matière ou d'énergie et cette courbure définit la trajectoire des objets (planètes, étoiles, rayons lumineux, etc.) qui se déplacent au sein de cet « espace-temps ».
- **Trou noir** : Une région de l'espace-temps dans laquelle la gravitation est si intense qu'elle empêche tout, y compris la lumière, d'en sortir. Il y a différentes tailles de trous noirs : les trous noirs stellaires se forment lors d'effondrements d'étoiles en fin de vie et leurs masses varient de quelques masses solaires à 65 masses solaires environ. Les trous noirs de masse intermédiaire ont une masse comprise entre une centaine et environ un million de masses solaires. Finalement, les trous noirs supermassifs peuvent aller au-delà du milliard de masses solaires.

Pour en savoir plus

- Visitez nos sites internet : ligo.org virgo-gw.eu gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en



- Lisez l'annonce de cette découverte sur les sites internet de
 - Virgo : <https://www.virgo-gw.eu/nsbh> (cliquez sur le drapeau tricolore pour la version française) et
 - LIGO : <https://www.ligo.org/news/index.php#NSBH2020>.
- L'article scientifique complet est accessible gratuitement via le lien suivant : <https://iopscience.iop.org/article/10.3847/2041-8213/ac082e>.