



LIGO
Scientific
Collaboration



GW170608 : la fusion des deux trous noirs les plus légers détectée par LIGO et Virgo

Lors de la seconde campagne de prise de données LIGO-Virgo – appelée « O2 » pour « Observation run 2 » en anglais – le passage d’une onde gravitationnelle a été détecté le jeudi 8 juin 2017, à 4h01m16s heure de Paris. Avec le décalage horaire, c’était encore la soirée du mercredi 7 juin aux États-Unis où sont installés les deux détecteurs du « [Advanced Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory](#) » (le projet LIGO) qui ont observé le phénomène. L’un est situé à [Hanford dans l’état de Washington](#) (au nord-ouest des États-Unis), l’autre à [Livingston en Louisiane](#) (au sud-est, à 3 000 km de distance). Le signal d’ondes gravitationnelles a été émis par la fusion de deux trous noirs situés à environ 340 mégaparsecs – ou 1,1 milliards d’[années-lumière](#). Il s’agit sans doute du système de trous noirs le plus léger détecté jusqu’à maintenant par LIGO et Virgo : sa masse totale est la plus faible mesurée pour le moment.



Vues aériennes des deux détecteurs LIGO construits aux États-Unis : à gauche, celui de Livingston en Louisiane ; à droite, celui de Hanford dans l’état de Washington. Comme Virgo, chaque instrument est un interféromètre de Michelson laser géant dont les bras font quatre kilomètres de long (trois pour Virgo).

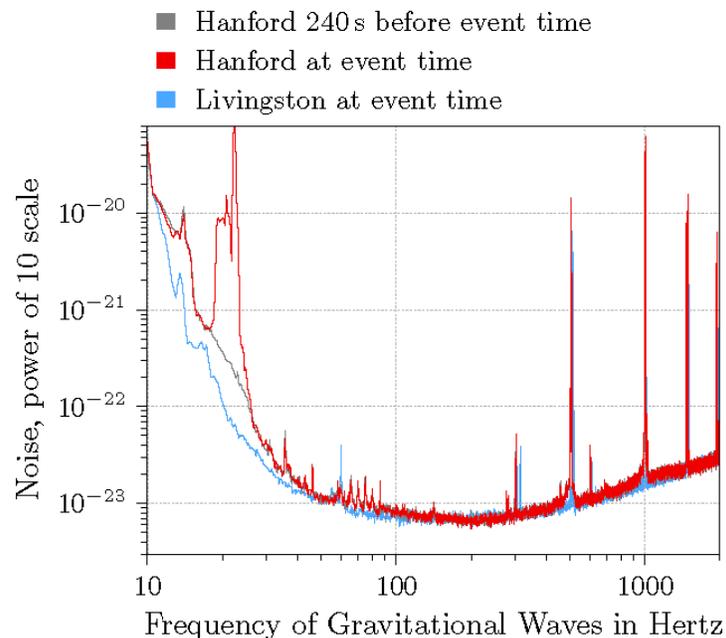
Trous noirs de masse stellaires

Les trous noirs sont des régions où l’espace-temps est si courbé que rien, pas même la lumière, ne peut s’en échapper. Ils sont créés lorsque des étoiles très massives en fin de vie s’effondrent sur elles-mêmes sous l’effet de leur propre poids : les réactions nucléaires de fusion, désormais éteintes, ne viennent plus contrebalancer l’action de la gravité. Avant cette annonce, les détections de quatre fusions de trous noirs avaient déjà été publiées par LIGO et Virgo : trois ([GW150914](#), [GW151226](#) et [GW170104](#)) avec uniquement des données des instruments LIGO et une quatrième ([GW170814](#), la fusion la plus récente des quatre, observée le 14 août 2017) avec également des données du détecteur [Virgo](#) (situé en Italie près de Pise), entré en fonction le 1^{er} août 2017. Les masses totales de ces systèmes allaient de 20-25 fois la [masse du Soleil](#) (pour GW151226) jusqu’à 60-65 masses solaires (GW150914).

Jusqu’à aujourd’hui, les systèmes binaires de trous noirs ont seulement été observés via les ondes gravitationnelles qu’ils produisent lorsqu’ils fusionnent. Néanmoins, on connaît (indirectement) d’autres trous noirs qui font partie de [systèmes binaires dont le second membre est une étoile](#). Ces systèmes émettent des [rayons X](#) qui peuvent être détectés par des satellites comme [Chandra](#) ; leurs trous noirs ont une masse comprise entre cinq et 20 fois celle du Soleil. GW170608 est avec GW151226 le second système de trous noirs détectés par LIGO et Virgo dont les masses sont comparables avec celles des trous noirs observés par rayons X – les autres trous noirs vus par ondes gravitationnelles sont plus lourds.

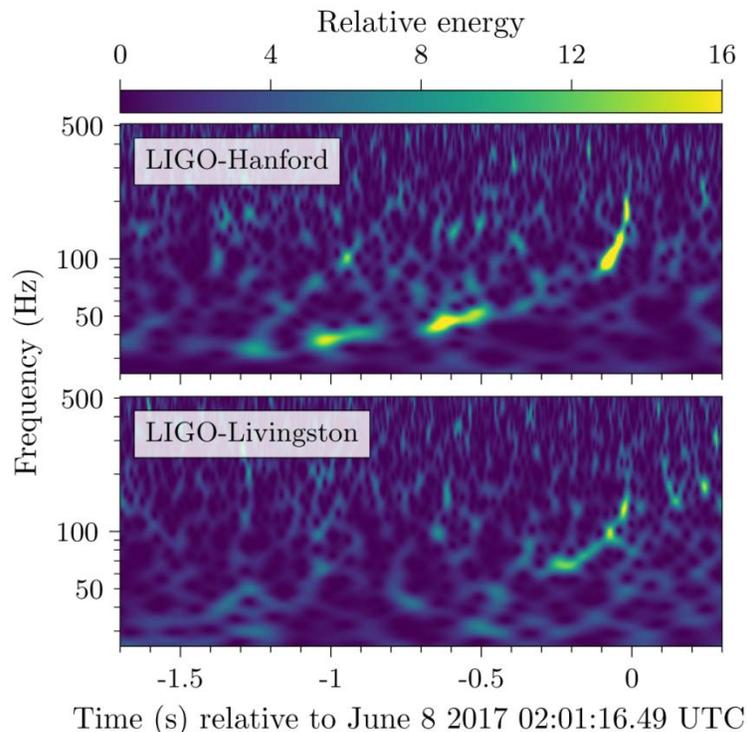
Les détecteurs LIGO

Comme le détecteur européen Virgo, les [instruments LIGO](#) mesurent avec précision les variations de longueurs de deux « bras » très longs (quatre kilomètres chacun ; trois kilomètres pour Virgo) induites par le passage d'ondes gravitationnelles. Un faisceau laser est séparé en deux par un miroir incliné à 45 degrés (appelé « lame séparatrice ») ; les deux faisceaux se propagent dans les bras kilométriques des détecteurs ; ils y sont réfléchis par des miroirs et y font de nombreux allers-retours avant d'en ressortir et de se recombinaison avec l'autre faisceau sur la séparatrice. Ce phénomène, appelé interférence, est semblable au « mélange » de deux vagues qui se rejoignent à la surface d'un étang. On peut s'arranger pour que, en l'absence d'onde gravitationnelle, les maxima d'un faisceau laser (les « crêtes » des vagues dans l'analogie décrite à la phrase précédente) compensent les minima de l'autre faisceau (les « creux » des vagues) pour essentiellement ne produire aucune lumière en sortie du détecteur. Par contre, lorsque les longueurs des bras de l'instrument varient (par exemple sous l'effet d'une onde gravitationnelle), les deux faisceaux vont se désaccorder : les crêtes et les creux ne vont plus coïncider et donc une puissance lumineuse plus importante sera détectée en sortie. La mesure de cette variation de puissance renseigne de manière très précise sur la différence de longueur relative entre les deux bras de l'instrument.



Sensibilité des détecteurs LIGO (Hanford et Livingston), exprimée en termes de niveau de bruit équivalent (sur l'axe vertical, en échelle logarithmique) en fonction de la fréquence (sur l'axe horizontal, également en échelle logarithmique). Il y a deux courbes pour LIGO Hanford : la rouge montre le bruit du détecteur au moment de l'événement GW170608, alors qu'une mesure de routine dégradant temporairement la sensibilité du détecteur à basse fréquence était en cours, tandis que la courbe grise correspond à des données prises quatre minutes avant le passage de l'onde gravitationnelle. L'excès de bruit entre 20 et 30 Hz, induit par le test sur les miroirs, est bien visible en comparant les deux courbes. Enfin, la courbe bleue montre le bruit de mesure du détecteur LIGO Livingston. Ce graphique est une adaptation de la Figure 4 de [l'article scientifique](#) sur GW170608.

La nuit du 7 au 8 juin 2017, le détecteur LIGO Livingston fonctionnait bien et avait une bonne sensibilité. Par contre, le détecteur LIGO Hanford avait lui une sensibilité moins bonne et les scientifiques étaient en train de réaliser sur son appareillage un test routinier pour mesurer la position du faisceau laser sur les miroirs. Cette action avait pour effet de dégrader de manière importante la sensibilité du détecteur pour des fréquences inférieures à 30 Hz, mais la laissait essentiellement inchangée au-dessus de cette fréquence. La sensibilité des deux détecteurs LIGO est représentée sur la Figure 1 : l'excès de bruit en-dessous de 30 Hz à Hanford est clairement visible sur ces courbes – la sensibilité d'un détecteur est d'autant meilleure que les valeurs prises par la courbe sont basses. En juin 2017, le détecteur européen Virgo était encore en phase de démarrage – il devait rejoindre les deux détecteurs LIGO pour une prise de données commune le 1^{er} août suivant. Au moment du passage de l'onde gravitationnelle GW170608, sa sensibilité n'était pas encore suffisante pour contribuer à cette détection.

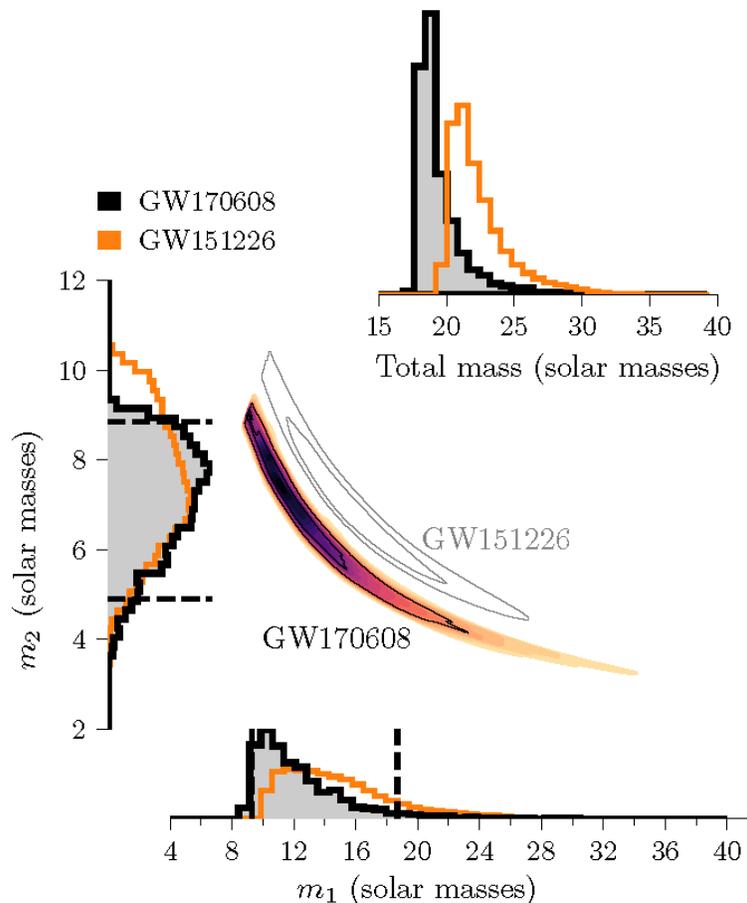


Répartition de l'énergie présente dans les données des détecteurs LIGO en fonction du temps (axe horizontal, en secondes) et de la fréquence (axe vertical en échelle logarithmique, en Hz). Plus la couleur est chaude (du bleu foncé au jaune vif) et plus la quantité d'énergie à une fréquence donnée et à un instant donné est importante. La courbe bleu pâle-jaune bien visible dans les données de LIGO-Hanford et que l'on devine dans les données de LIGO-Livingston correspond au signal laissé par l'onde gravitationnelle GW170608 lors de son passage sur Terre. Ces images sont adaptées de la Figure 1 de [l'article scientifique](#) sur GW170608.

Le signal d'ondes gravitationnelles GW170608

Peu après 21h en heure locale le mercredi 7 juin 2017, un signal caractéristique de type « [chirp](#) » – « gazouillis » en français – dont l'amplitude et la fréquence caractéristique augmentent au cours du temps, est détecté automatiquement dans les données du détecteur LIGO Livingston. Ce signal est visible

sur la Figure 2 qui montre comment l'énergie présente dans les données des deux instruments LIGO se distribue en termes de fréquence et en fonction du temps. Les données de LIGO Hanford n'ont pas été analysées immédiatement à cause de la mesure qui était en cours sur cet appareillage ; par contre, une fois le signal de l'autre détecteur connu, elles l'ont été et le même signal a été observé pour des fréquences supérieures à 30 Hz. Un signal de type chirp est caractéristique d'un système formé de deux objets massifs en orbite l'un autour de l'autre et qui finissent par entrer en collision.



Le graphique principal montre la distribution de probabilité (à deux dimensions) des masses des trous noirs initiaux, m_1 et m_2 , exprimées en multiples de la masse du Soleil. La distribution de masse du trou noir le plus lourd (m_1) est représentée sur l'axe horizontal tandis que celle du trou noir le plus léger (m_2) apparaît sur l'axe vertical. L'image montre également la distribution de probabilité bidimensionnelle du système binaire de trous noirs GW151226, jusque-là le plus léger observé. L'encart en haut à droite donne la distribution de probabilité de la masse totale du système binaire (m_1+m_2) pour les événements GW170608 et GW151226. Ces graphiques sont adaptés de la Figure 2 de [l'article scientifique](#) sur GW170608.

A partir du taux de variation de la fréquence du signal en fonction du temps, on a pu mesurer les masses des deux composants du système détectées : environ 12 et sept fois la masse du Soleil. Ces masses indiquent que ces objets sont certainement des trous noirs ; elles sont comparables à celles de



LIGO
Scientific
Collaboration



l'événement GW151226 et à celles estimées pour les systèmes binaires X. La Figure ci-dessus montre les « gammes de masse » auxquelles appartiennent vraisemblablement les deux trous noirs initiaux de GW170608 (séparément pour chaque trou noir sur les axes du graphique ; de manière combinée pour les deux masses sous forme d'une surface) ainsi que le résultat d'un ajustement similaire pour GW151226. Cette comparaison montre qu'il est vraisemblable que GW170608 soit le système binaire de trous noirs détecté par LIGO et Virgo avec la masse totale la plus faible. Le plus léger des deux trous noirs – qui a une masse d'environ sept fois celle du Soleil – est l'un des trous noirs les plus petits détectés à l'aide des ondes gravitationnelles.

Les masses des trous noirs individuels de l'événement GW170608 donnent aux scientifiques des indices sur l'environnement dans lequel ces astres se sont formés. Lorsque des étoiles massives arrivent en fin de vie, elles perdent beaucoup de leur masse sous l'effet de [vents stellaires](#) – des flots de gaz émis sous la pression du rayonnement de l'étoile. Plus une étoile contient d'éléments « lourds » comme le carbone ou l'azote et plus elle va perdre de matière avant de s'effondrer sur elle-même pour former un trou noir. Ainsi, les étoiles à l'origine des trous noirs de GW170608 ont pu contenir des quantités assez importantes de ces deux éléments, par rapport aux « progéniteurs » des trous noirs plus massifs qui formaient les autres systèmes binaires de trous noirs détectés par LIGO et Virgo – notamment GW150914.

La différence entre les temps d'arrivée du signal à Hanford et Livingston (de l'ordre de sept millisecondes) a permis de localiser la source de GW170608 dans le ciel avec une précision de plusieurs centaines de degrés carrés. Une alerte donnant cette information a été rapidement envoyée aux télescopes partenaires qui ont pu ainsi balayer cette région du ciel (très étendue) pour y rechercher de possibles contreparties électromagnétiques (c'est-à-dire des signaux lumineux, visibles ou dans d'autres gammes de longueurs d'onde). Aucune n'a été détectée, en accord avec les modèles actuels de fusions de trous noirs stellaires qui ne prévoient pas d'émission lumineuse associée.

L'amplitude des signaux détectés renseigne sur la distance entre la Terre et le système binaire de trous noirs : environ 340 mégaparsecs, soit 1,1 milliards d'années-lumière. Leur forme a été comparée au résultat de simulations numériques basées sur les équations d'Einstein décrivant la gravitation en termes de courbure de l'espace-temps. Au niveau de précision permis par les bruits de mesure des instruments, aucun écart entre prédiction et observation n'a été observé. Ainsi, ce nouveau signal renforce l'idée que la [théorie de la relativité générale](#) décrit avec précision la gravitation dans notre Univers.

Pour en savoir plus

- Le [preprint](#) de l'article scientifique publié par LIGO et Virgo.
- Voir <http://www.virgo-gw.eu/#news>.



Visiter nos sites internet :
<http://www.ligo.org>
<http://www.virgo-gw.eu>

