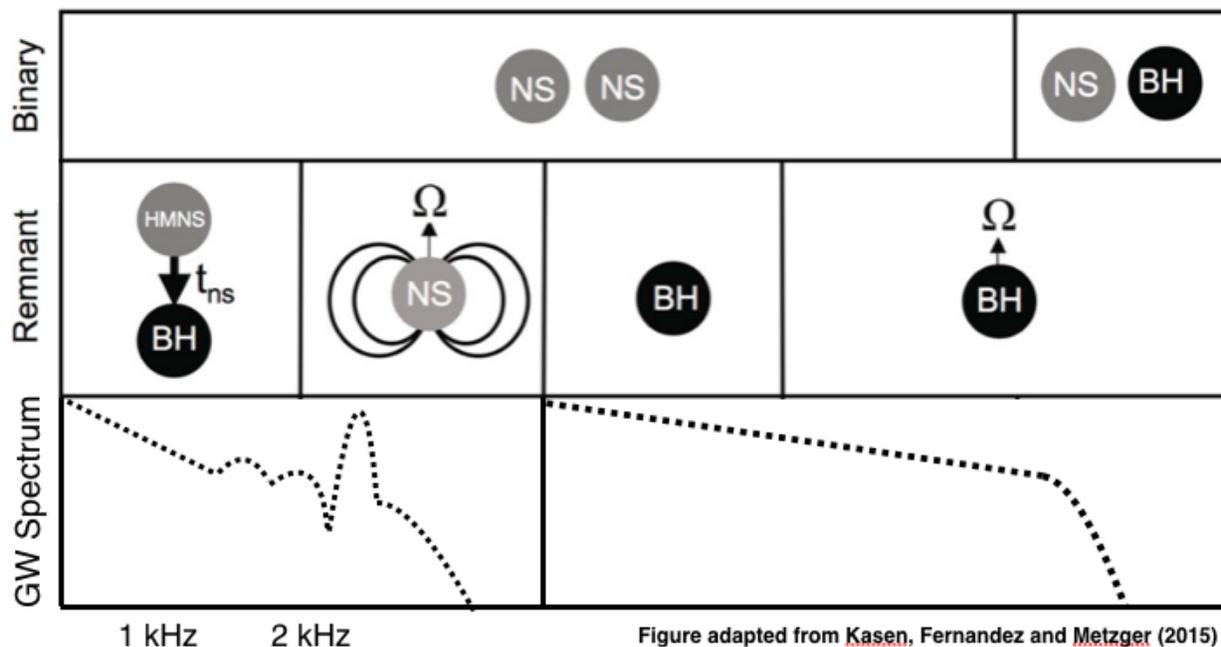


À la recherche de l'étoile à neutrons ou du trou noir produit par l'événement GW170817

Suite à la détection de la [fusion de deux étoiles à neutrons](#) par les détecteurs d'ondes gravitationnelles LIGO et Virgo, il est naturel de se demander quel astre a été formé par ce cataclysme. Quatre scénarios sont possibles : (i) la formation immédiate d'un trou noir ; (ii) la formation d'une étoile à neutrons « hyper massive » qui s'effondre sur elle-même en moins d'une seconde pour donner un trou noir ; (iii) la formation d'une étoile à neutrons « super massive » qui donne également un trou noir, mais après une durée bien plus longue ; (iv) la formation d'une étoile à neutrons stable.

Ce sont la masse de l'astre résultant de la fusion ainsi que la composition et les propriétés de la matière dont sont faites les étoiles à neutrons qui font pencher la balance vers l'une ou l'autre de ces hypothèses. Etant données les masses des étoiles à neutrons avant qu'elles ne fusionnent (mesurées à partir du signal d'ondes gravitationnelles détecté) et en faisant certaines hypothèses sur leur « compacité », l'évolution la plus vraisemblable est que l'astre formé par la fusion était une étoile à neutrons hyper massive – mais les autres hypothèses, bien que moins probables, ne peuvent pas être exclues. L'analyse des données présentées ici cherche les ondes gravitationnelles émises par l'objet final. Et bien que cette recherche ait été infructueuse, elle jette les bases pour des analyses futures réalisées lorsque les sensibilités des détecteurs auront encore été améliorées et alors que l'on aura peut-être eu la chance d'observer une fusion d'étoiles à neutron encore plus proche dans l'Univers.



Dessin montrant les quatre scénarios possibles lors de la fusion d'un système double d'étoiles à neutrons : (i) un effondrement direct en trou noir (BH) ; (ii) la formation d'une étoile à neutrons hyper massive (HMNS) qui s'effondre rapidement sur elle-même pour donner un trou noir ; (iii) la formation d'une étoile à neutrons super massive (SMNS) qui met beaucoup plus de temps à s'effondrer sur elle-même en un trou noir ; (iv) la formation d'une étoile à neutrons stables. La partie basse de la figure compare les spectres en fréquence que pourrait émettre sous forme d'ondes gravitationnelles l'objet nouvellement formé.



LIGO
Scientific
Collaboration



Quels signaux pourrait-on observer ?

Les simulations numériques du phénomène prédisent que l'astre produit lors de la fusion de deux étoiles à neutrons devrait également émettre des ondes gravitationnelles. Immédiatement (moins d'une seconde) après la fusion, on s'attend à un signal dans une gamme de fréquence couvrant à peu près l'intervalle 1 000 – 4 000 Hz. Son amplitude et sa fréquence dépendent de la quantité de matière encore présente après la fusion ainsi de la compacité de l'objet nouvellement créé. C'est pour cette raison que la détection d'un tel signal « post-fusion » pourrait nous donner des informations sur le système initial de deux étoiles à neutrons qui seraient quasiment inaccessibles autrement. De plus, certains scénarios prédisent une émission d'ondes gravitationnelles bien plus longue : entre 100 et 100 000 secondes. Ces phénomènes sont moins bien connus que l'émission courte d'ondes gravitationnelles qui suit la fusion. Et donc la probabilité de les détecter à l'aide de LIGO et Virgo varie très largement (de plusieurs ordres de grandeur) d'un modèle à l'autre. Comme on ne sait pas quel mécanisme a prédominé pour GW170817 – émission plutôt courte ou plutôt longue – des stratégies différentes sont utilisées pour rechercher tous les signaux possibles.

Comment cherche-t-on les signaux émis par cet astre ?

Pour cette recherche, le fait que la découverte de la fusion des deux étoiles à neutrons ait été « [multi-messagers](#) » est un atout important : en particulier, on connaît avec précision la position de la source dans le ciel puisque sa contrepartie optique a été observée par de nombreux télescopes. Et donc, plutôt que de balayer l'ensemble du ciel, l'analyse peut se concentrer sur une direction particulière, ce qui réduit la puissance de calcul nécessaire pour la mener à bien et diminue la probabilité que nos algorithmes se trompent et prennent des fluctuations aléatoires du bruit de mesure pour un signal potentiel d'ondes gravitationnelles.

Les méthodes numériques utilisées ont été choisies pour rechercher de manière générique tous types de signaux présents dans l'ensemble des détecteurs d'ondes gravitationnelles utilisés pour cette analyse. Ils ne sont pas optimisés pour un modèle de signal particulier, bien qu'une telle stratégie puisse *éventuellement* améliorer de futures recherches. Fondamentalement, ces algorithmes cherchent des structures dans des [spectrogrammes](#) – des cartes colorées à deux dimensions représentant les données des détecteurs : le temps sur l'axe des abscisses (horizontal) et la fréquence des fluctuations enregistrées sur l'axe des ordonnées (vertical). Contrairement au cas des signaux de type [chirp](#) (« [gazouillis en français](#) ») émis lors de la phase spirale qui précède la fusion des deux astres compacts, les structures cherchées ici sont produites *après* la fusion. Elles ont également une forme et des fréquences caractéristiques différentes.

Nous avons d'abord cherché des signaux courts et à haute fréquence. Aucune onde gravitationnelle postérieure à la fusion n'a été détectée. Pour le cas de signaux plus longs, la stratégie suivie est similaire, même si toutes les durées possibles n'ont pas encore été étudiées. Pour l'instant, nous avons utilisés des lots de données indépendants qui faisaient jusqu'à 500 secondes. Ces analyses de durées « intermédiaires » dans deux bandes de fréquence différentes (de 30 Hz à 2 kHz et de 2 kHz à 4 kHz) n'ont pas non plus permis de détecter un signal d'ondes gravitationnelles.

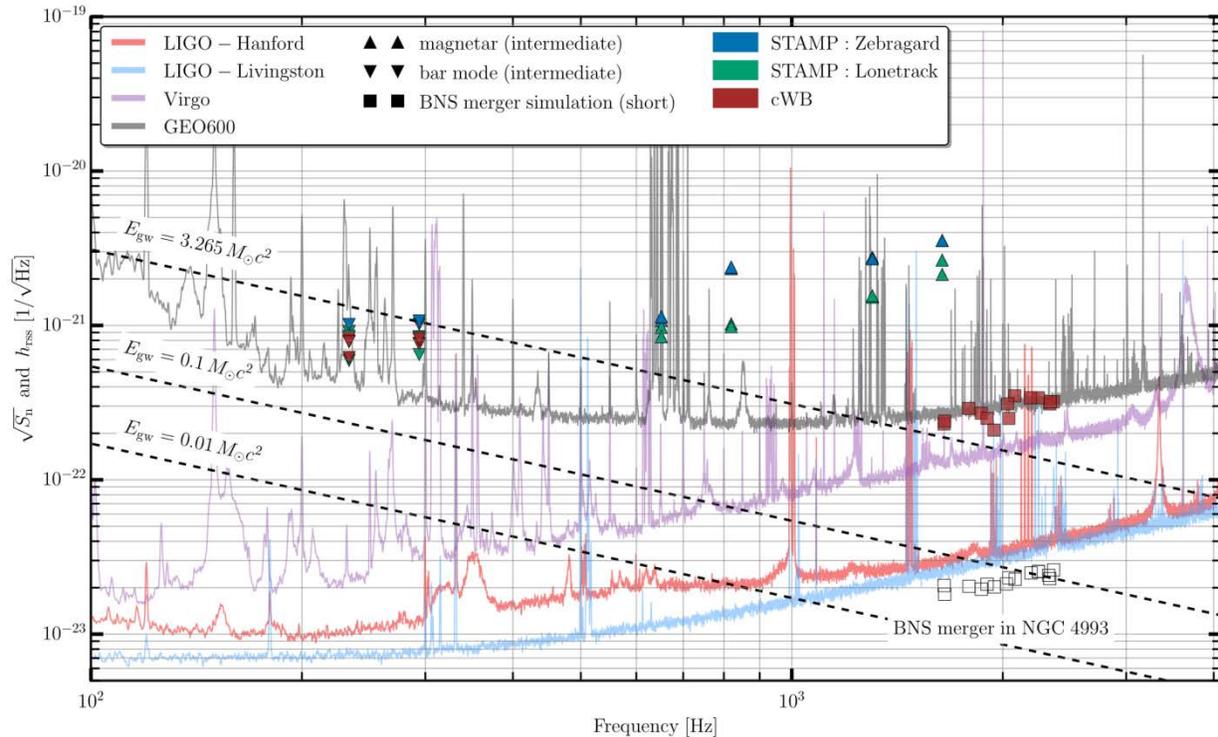


Figure 1 : Comparaison des spectres de bruit des différents détecteurs (courbes colorées en trait continu) et des amplitudes minimales d’ondes gravitationnelles requises pour détecter au moins la moitié des signaux simulés d’un type donné (marqueurs colorés en forme de triangles ou de carrés). Si l’on suppose que les ondes gravitationnelles sont principalement émises à une fréquence donnée, les lignes pointillées noires relient cette fréquence à l’amplitude du signal généré, pour trois valeurs différentes de l’énergie totale convertie sous forme d’ondes gravitationnelles. De bas en haut : $1/100^{\text{ème}}$ de masse solaire, $1/10^{\text{ème}}$ de masse solaire et 3,265 masses solaires, c’est-à-dire l’énergie maximale disponible avant la fusion des deux étoiles à neutrons. Le signal physique ne peut pas se trouver au-dessus de cette dernière courbe puisque sa production nécessiterait plus d’énergie que celle dont le système dispose ! Enfin, les carrés noirs vides en bas à droite montrent des prédictions réalistes pour l’amplitude des signaux d’ondes gravitationnelles courts – durée inférieure à la seconde.

Que peut-on conclure de cette étude ?

Et bien on peut utiliser le fait qu’aucun signal n’a été détecté pour contraindre la quantité maximale d’énergie émise sous forme d’ondes gravitationnelles après la fusion des deux étoiles à neutrons. Pour cela, on ajoute aux données de faux signaux simulés, prédits par les modèles étudiés et on refait tourner les analyses sur ces données modifiées. On peut alors estimer la quantité d’énergie qui aurait dû être émise pour détecter de tels signaux avec une probabilité élevée. Dans la plupart des cas, on trouve que la recherche était sensible à une gamme d’énergies supérieures à l’énergie totale disponible au départ dans le système. Cela nous motive pour améliorer nos algorithmes et pour analyser de futures données une fois que la sensibilité des détecteurs se sera améliorée. Parmi les pistes d’amélioration étudiées figurent la possibilité d’inclure des informations obtenues à partir de la phase spirale qui précède la fusion et qui pourraient permettre de mieux prédire la forme du signal attendu après ladite fusion. Ou



bien faire des recherches plus spécialisées, basées sur les formes d'ondes prédites par des modèles spécifiques pour les signaux post-fusion. Des analyses cherchant des signaux encore plus longs sont également prévues ; elles utiliseront l'ensemble des données disponibles sans les diviser en segments indépendants de 500 secondes.

Glossaire

- **Compacité** : Un astre est d'autant plus compact qu'il concentre sa masse dans un petit volume. La compacité est un nombre compris entre 0 et 1 : plus il est élevé et plus l'astre se rapproche d'un trou noir, le seul corps céleste à avoir une compacité de 1. Par comparaison, les compacités du Soleil et de la Terre sont de l'ordre de 1 / (1 million) et de 1 / (1 milliard) respectivement, ce qui montre que ces deux astres sont bien plus gros que ne le seraient des trous noirs de la même masse.
- **Trou noir** : Une région de l'espace-temps située autour d'une masse très compacte dont la gravité est si intense que rien, pas même la lumière, ne peut s'en échapper.
- **Étoile à neutrons** : Un astre extrêmement dense résultant de l'effondrement sur elle-même d'une étoile massive.
- **Étoile à neutrons hyper massive** : Une étoile à neutrons qui s'effondre sur elle-même pour former un trou noir en moins d'une seconde ; seules des inhomogénéités particulières au niveau de sa température ou de son mouvement de rotation propre peuvent créer – pour une courte durée – un tel astre.
- **Étoile à neutrons super massive** : Une étoile à neutrons qui s'effondre sur elle-même pour former un trou noir lors d'un processus qui dure entre 10 et 1 000 secondes ; elle n'existe que tant qu'elle tourne suffisamment rapidement sur elle-même et ce mouvement de rotation ralentit au cours du temps.
- **Astronomie multi-messagers** : C'est une branche de l'astronomie qui cherche à combiner les informations fournies par différents signaux – ou « messagers » –, comme par exemple les ondes gravitationnelles, les ondes électromagnétiques et les neutrinos.

Pour en savoir plus

- Le [preprint](#) de l'article qui décrit en détail les analyses des données ainsi que les résultats obtenus.
- Voir également http://public.virgo-gw.eu/gw170817_fr.



Visiter nos sites internet :

<http://www.ligo.org>

<http://www.virgo-gw.eu>

