



LIGO
Scientific
Collaboration



GW170817 : Observation d'ondes gravitationnelles émises lors de la coalescence d'un système binaire d'étoiles à neutrons

Le 17 août 2017 à 12:41:04 UTC (14:41:04 heure de Paris) le réseau de détecteurs d'ondes gravitationnelles LIGO-Virgo a enregistré un signal d'ondes gravitationnelles émis par la coalescence de deux astres compacts appelés « étoiles à neutrons ». Cet événement est survenu seulement trois jours après la première détection conjointe LIGO-Virgo d'une fusion de trous noirs, GW170814 (voir le [résumé de l'article scientifique](#)).

La détection de signaux d'ondes gravitationnelles émis lors de la fusion d'étoiles à neutrons était attendue car les étoiles à neutrons sont des astres communs dans l'Univers, et parce que les télescopes radio avaient déjà détecté des systèmes binaires d'étoiles à neutrons. L'exemple le plus célèbre est le pulsar binaire découvert par Hulse et Taylor en 1974. En mesurant son orbite depuis 40 ans, les radioastronomes ont montré que les deux étoiles spiralent l'une vers l'autre. D'ici 300 millions d'années environ, elles fusionneront en émettant un signal similaire à celui observé par LIGO-Virgo pour GW170817.

Au moment de l'événement GW170817, le réseau de détecteurs LIGO-Virgo était engagé dans sa deuxième prise de données (appelée « O2 »), que les détecteurs LIGO avaient démarrée le 30 novembre 2016 et que Virgo venait de rejoindre le 1^{er} août 2017. Disposer de plusieurs détecteurs permet de localiser la source d'un signal dans le ciel, avec une précision qui s'améliore lorsque le nombre de détecteurs augmente. Pour cet événement, la source a été localisée dans une zone allongée (appelée boîte d'erreur), large de 2 degrés et longue de 15 degrés environ, couvrant une surface de 28 degrés carrés (visuellement, cela correspond à peu près à la forme et à la taille d'une banane tenue à bout de bras). La zone du ciel correspond à la constellation de l'Hydre, à proximité de l'étoile Psi Hydrae, visible à l'œil nu.

D'autres signaux pour une astronomie multi-messagers

À peine 1,8 seconde après le signal enregistré par les détecteurs d'ondes gravitationnelles, un sursaut gamma appelé GRB 170817A a été détecté par l'instrument GBM du satellite Fermi. Des signaux intenses comme GW170817 ou GRB 170817A jouent le rôle d'alertes qui déclenchent d'autres observations astronomiques. Dans ce cas précis, les signaux d'ondes gravitationnelles et de rayons gamma ont engendré l'envoi d'alertes à la communauté des astronomes, suscitant une campagne de suivi qui a donné lieu à de multiples observations de la lumière éphémère émise par l'événement, situé près de la galaxie NGC 4993.

Le signal d'ondes gravitationnelles

Les ondes gravitationnelles émises par un couple d'étoiles à neutrons peuvent être visibles dans les détecteurs pendant une minute ou plus. Dans le cas de GW170817, 100 secondes avant leur fusion, les deux étoiles à neutrons étaient séparées d'environ 400 km, tout en tournant l'une autour de l'autre 12 fois par seconde. L'émission d'ondes gravitationnelles rapproche les étoiles à neutrons à chaque tour, occasionnant un rétrécissement de l'orbite et une augmentation de la fréquence de rotation, un phénomène appelé coalescence. Le processus s'accélère jusqu'à ce que les étoiles fusionnent pour former un astre unique.

Pour visualiser le signal détecté, il est commode de représenter les données des détecteurs sous la forme de spectrogrammes. Dans cette visualisation en couleur, l'axe horizontal représente le temps et

l'axe vertical la fréquence (croissante de bas en haut) des fluctuations mesurées par le détecteur. Pour une coalescence d'étoiles à neutrons, le spectrogramme se présente sous la forme d'une longue ligne, initialement assez plate et peu marquée, puis qui s'affirme en montant progressivement, jusqu'à l'escalade finale juste avant la fusion des deux étoiles.

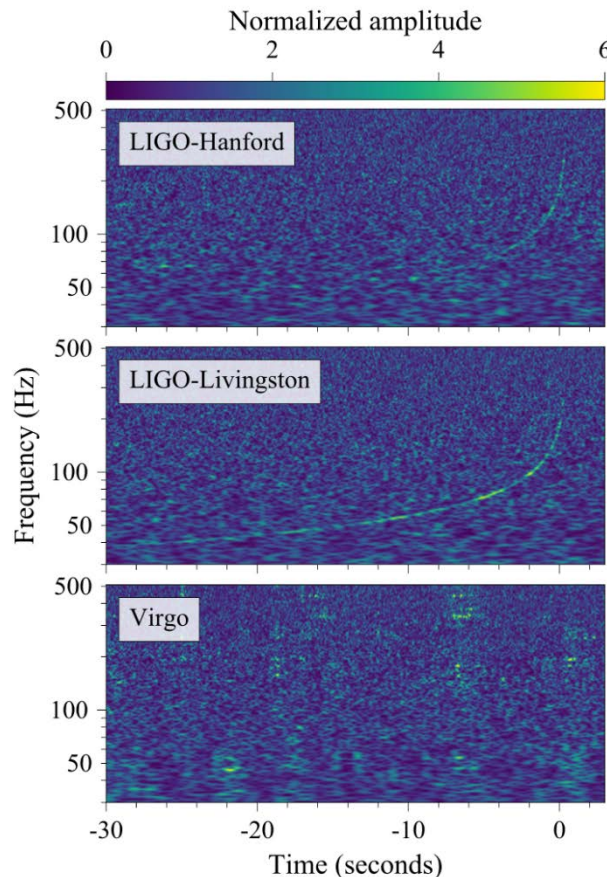


Figure 1 : Spectrogrammes du signal GW170817 dans chacun des détecteurs LIGO et Virgo. L'axe horizontal représente le temps et l'axe vertical la fréquence. Le signal de coalescence évolue des basses fréquences vers les hautes fréquences, de plus en plus rapidement. Le bruit transitoire superposé au signal a été excisé dans le spectrogramme de LIGO-Livingston et n'est donc pas visible sur cette figure.

Le signal est clairement visible dans les spectrogrammes des deux détecteurs LIGO, mais pas dans celui du détecteur Virgo. C'est un aspect important pour la localisation dans le ciel. Chaque détecteur a des angles morts où il ne peut pas voir les signaux aussi bien que dans d'autres régions du ciel. Le fait que le signal soit clairement visible dans les deux LIGO mais pas dans Virgo impliquait que la source était située dans une zone peu favorable pour Virgo à ce moment-là, une indication extrêmement précieuse pour la localiser.

Nettoyage des données

Initialement, les algorithmes automatisés n'ont pas détecté le signal dans les données de LIGO-Livingston, bien que celui-ci soit visible à l'œil nu. Ce problème était dû à l'apparition soudaine d'un bruit se superposant au signal d'ondes gravitationnelles – analogue à l'irruption de parasites lorsqu'on écoute

la radio. Ce bruit transitoire a dû être excisé des données pour pouvoir en extraire le signal, grâce à une procédure minutieuse qui retire le bruit sans toucher au signal.

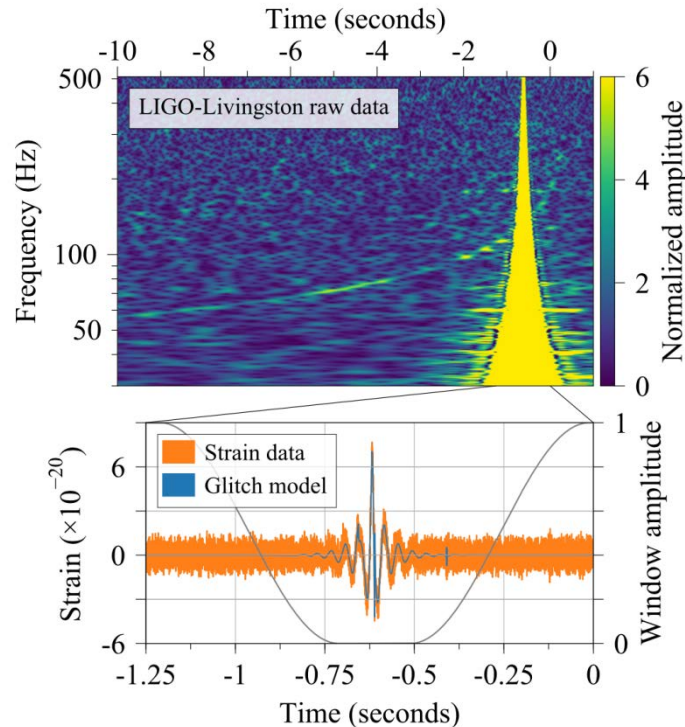


Figure 2 : En haut, le spectrogramme montre le bruit transitoire dans les données de LIGO-Livingston (en jaune vif) qui se superpose au signal de coalescence, lequel est clairement visible par ailleurs. En bas, le signal mesuré par le détecteur en fonction du temps, au moment de la survenue du bruit transitoire, très bref (un quart de seconde environ) mais très intense. L'excision du bruit transitoire ramène le signal au niveau de la courbe orange, qui représente le bruit de mesure toujours présent dans les détecteurs.

Les bruits transitoires surviennent fréquemment dans les détecteurs d'ondes gravitationnelles, par exemple toutes les quelques heures à LIGO pour des bruits analogues à celui qui a entaché les données de GW170817. Les personnes intéressées par ces aspects sont encouragées à rejoindre le projet de science citoyenne [GravitySpy](#). Dans ce projet, des volontaires partout dans le monde examinent des spectrogrammes des données de LIGO et aident à identifier et classer les bruits transitoires. Ces informations sont utilisées par les scientifiques pour mieux comprendre le comportement des détecteurs et améliorer les procédures d'analyse.

Propriétés de la source

Chaque source engendre un signal d'ondes gravitationnelles différent, en fonction des propriétés astrophysiques du système. Les plus importantes sont les masses des astres individuels, la vitesse à laquelle ils tournent sur eux-mêmes, leur capacité à se comprimer ou se déformer, la taille de l'orbite et son inclinaison par rapport à notre ligne de mire, etc. C'est l'ensemble de ces propriétés qui définit la forme générale, l'intensité, et l'évolution temporelle des ondes gravitationnelles. En mesurant le signal de manière aussi détaillée que possible, on peut remonter aux propriétés de la source astrophysique.

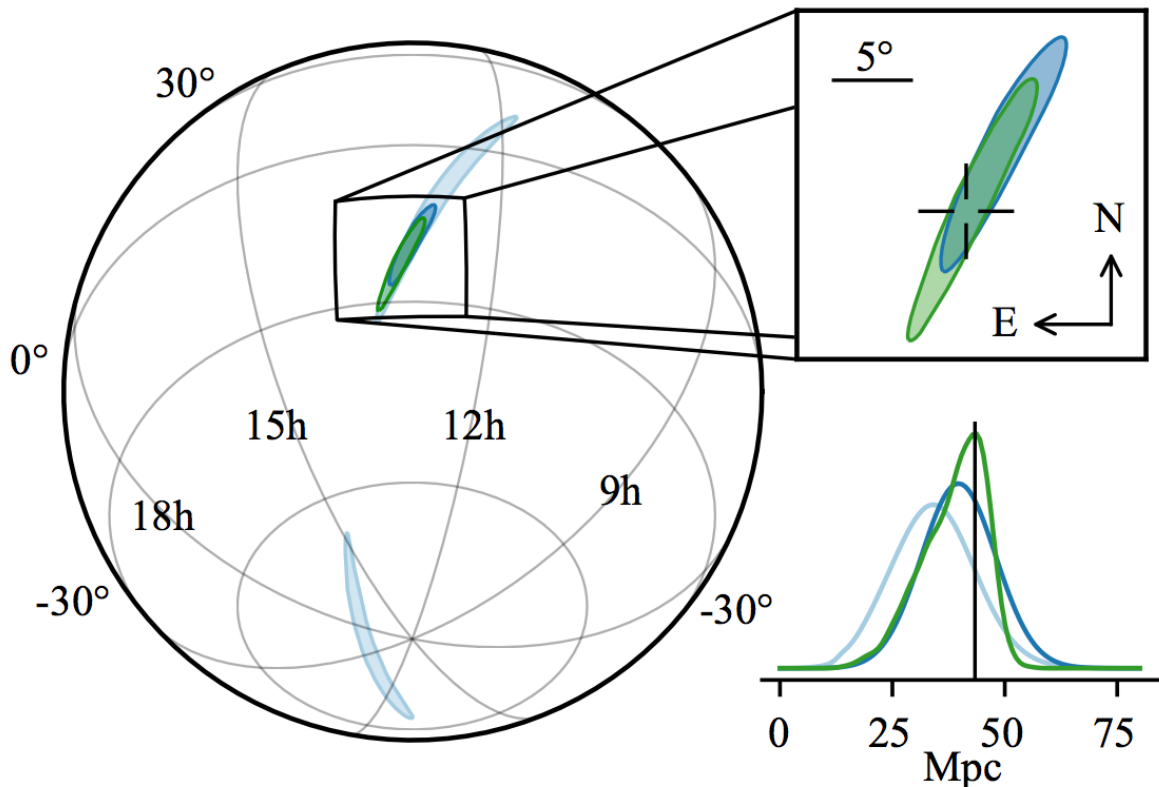


Figure 3 : Carte du ciel indiquant la position de la source GW170817 telle que déterminée par LIGO et Virgo. Les zones bleue et verte représentent la localisation obtenue avec deux algorithmes différents. La croix indique la position de la galaxie NGC 4993, dans la constellation de l'Hydre. Le graphe en bas à droite montre notre estimation de la distance de la source mesurée à partir des données d'ondes gravitationnelles.

Ce processus n'est pas parfait, car les signaux ne sont pas mesurés avec une précision infinie. En conséquence, les valeurs que nous déduisons pour les propriétés du système binaire d'étoiles à neutrons sont données sous la forme d'intervalles qui décrivent relativement bien la source. Les scientifiques parlent souvent de « barres d'erreur » à propos de ces intervalles ; dans les analyses menées par la collaboration LIGO-Virgo on parle de « distributions a posteriori ».

D'après l'analyse du signal d'ondes gravitationnelles, les masses des astres individuels se situent entre 0,86 et 2,26 fois la masse du Soleil. On ne peut pas très bien mesurer les vitesses de rotation pour cet événement, d'autant que celles-ci affectent le signal de façon similaire à l'effet des masses. Si on suppose que les astres tournent lentement sur eux-mêmes, alors les données indiquent des masses entre 1,17 et 1,60 fois la masse du Soleil. Dans un cas comme dans l'autre, ces masses sont compatibles avec les masses de toutes les étoiles à neutrons connues à ce jour, ce qui est une des raisons pour lesquelles nous pensons qu'il s'agit d'un système binaire d'étoiles à neutrons.

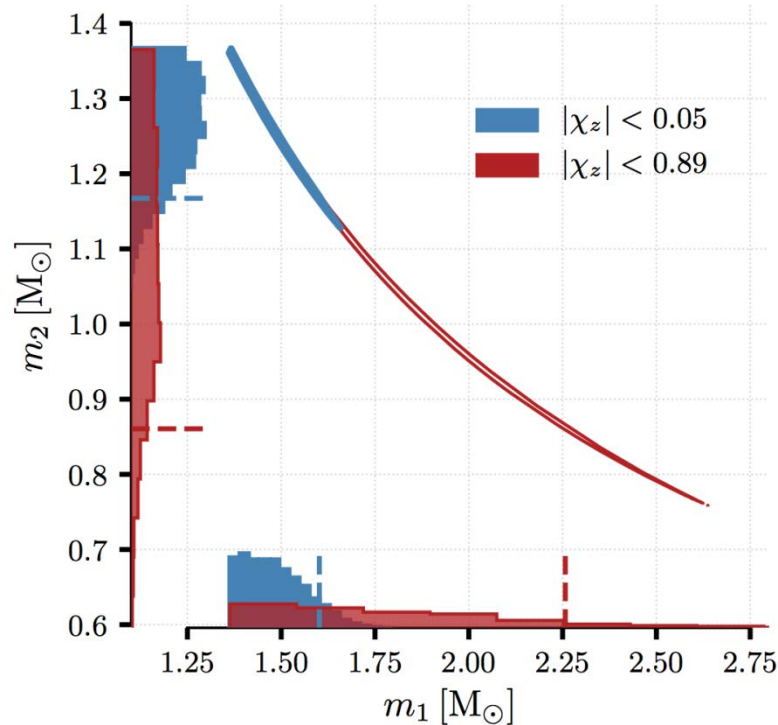


Figure 4 : Cette figure montre nos estimations de la masse des deux astres du système binaire. Les valeurs à l'intérieur de la bande diagonale sont permises. Pour chacun de ces points, on peut lire les valeurs des masses individuelles correspondantes sur l'axe horizontal et l'axe vertical. Les couleurs indiquent les résultats obtenus dans l'hypothèse de vitesses de rotation faibles (bleu) ou élevées (rouge).

Une autre propriété qu'il est possible de mesurer est la distance de la source (ou, de manière plus correcte en langage d'astronome, la « distance de luminosité »). La valeur déduite pour le signal d'ondes gravitationnelles est 40 mégaparsecs (environ 130 millions d'années-lumière), ce qui correspond à la distance de NGC4993. En combinant cette mesure de distance avec les observations de la galaxie dans le spectre électromagnétique, on peut pour la première fois utiliser une nouvelle méthode pour mesurer la constante de Hubble.

Les étoiles à neutrons sont constituées d'une matière extrêmement dense, qui ne se comporte pas comme celle dont les objets ordinaires rencontrés sur Terre sont faits. Les observations astrophysiques représentent donc un laboratoire pour étudier cette matière super-dense. Les physiciens tentent de décrire celle-ci à travers une relation, appelée « équation d'état », entre la pression et la densité – un peu comme la « loi des gaz parfaits » $PV=nRT$. Il y a de nombreuses possibilités pour l'équation d'état, et un objectif est d'identifier celle qui décrit le mieux les étoiles à neutrons. Ce sont la masse et l'équation d'état d'une étoile à neutrons qui déterminent sa taille, et la manière dont son potentiel gravitationnel change lorsque l'étoile est comprimée par la gravité de l'autre étoile autour de laquelle elle orbite (ce qu'on appelle des « effets de marée »). Ces effets peuvent modifier le signal d'ondes gravitationnelles. L'analyse de GW170817 nous apporte des limites intéressantes sur les effets de marée dans les étoiles à neutrons, mais ne nous permet pas de dire quelle est la bonne équation d'état.

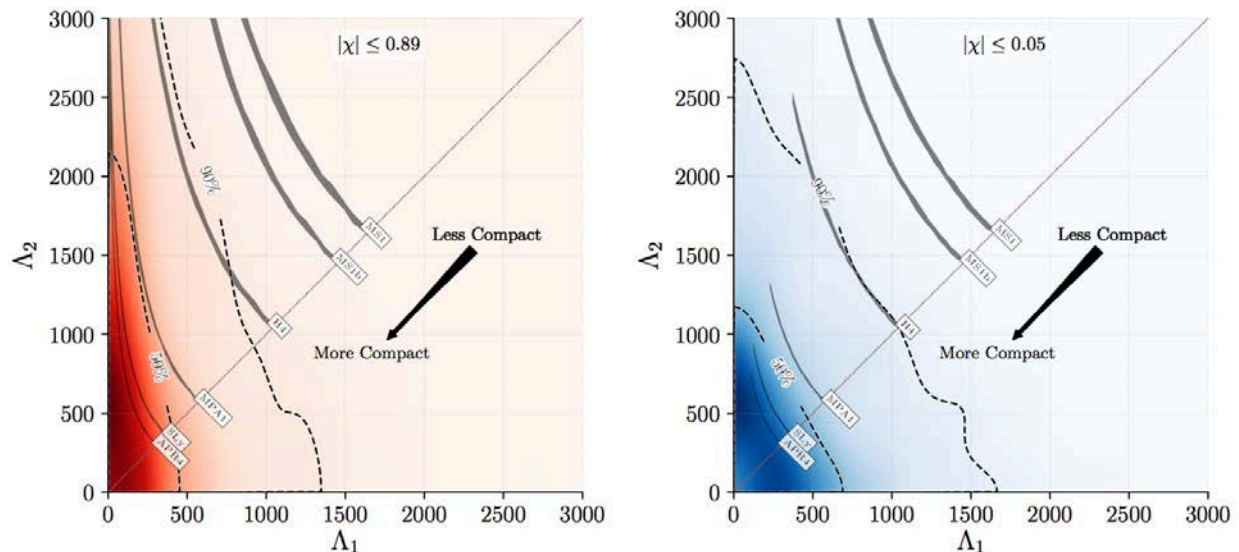


Figure 5 : Ces figures montrent la sensibilité des étoiles à neutrons aux effets de marée. Chaque axe correspond à l'un des deux astres et indique sa capacité à se déformer. Les lignes pointillées indiquent où le système GW170817 pourrait se situer, en dessous et à gauche de ces lignes à 90% et 50% de probabilité. Les résultats sont présentés dans l'hypothèse de vitesses de rotation élevées (en rouge à gauche) ou faibles (en bleu à droite).

Des questions ouvertes

Comme dans toutes les découvertes importantes, nous avons appris beaucoup de choses avec l'événement GW170817, mais il reste encore de nombreuses questions en suspens. Les principales interrogations concernent la nature des trois astres (les deux qui sont entrés en collision et le résultat de la fusion). Le signal électromagnétique associé nous indique qu'au moins l'un des deux astres du système binaire est une étoile à neutrons, mais il ne signifie pas pour autant que les deux le soient. Bien que chacun ait une masse similaire à celle des étoiles à neutrons connues, il est néanmoins possible que l'un des deux composants soit un trou noir. Les astronomes n'ont jamais vu de trou noir aussi léger qu'une étoile à neutrons, mais on n'a pas non plus de preuve que cela n'existe pas. GW170817 pourrait donc être un système binaire constitué d'une étoile à neutrons et d'un trou noir. L'autre question non résolue concerne ce que le système est devenu après la fusion. Il y a deux possibilités : soit une étoile à neutrons hyper-massive (il s'agirait de l'étoile à neutrons la plus lourde connue à ce jour), soit un trou noir (ce serait le trou noir le plus léger jamais observé), deux possibilités aussi fascinantes l'une que l'autre. Nos données ne permettent pas de les départager ; nous sommes seulement capables de dire que l'astre final a une masse d'environ 2,74 fois la masse du Soleil.

Glossaire

- **Trou noir** : Une région de l'espace-temps déformée par un objet extrêmement compact et où la gravité qui y règne est si intense que rien, pas même la lumière, ne peut en sortir.
- **Rayons gamma** : Radiation (émission de lumière) dans la gamme d'énergie la plus haute du spectre électromagnétique.
- **Etoile à neutrons** : Astre extrêmement dense, vestige d'une étoile massive après son effondrement.

Pour en savoir plus

- Voir http://public.virgo-gw.eu/gw170817_fr



Visiter nos sites internet :

<http://www.ligo.org>

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

