

GW190521 : la collision de trous noirs la plus massive observée à ce jour

Daté du mercredi 2 septembre 2020. Retrouvez cet article en ligne et dans d'autres langues à l'adresse <https://www.ligo.org/science/Publication-GW190521>.

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

Qu'avons-nous observé ?

Le 21 mai 2019, les détecteurs [Advanced LIGO](#) et [Advanced Virgo](#) ont enregistré le passage d'une onde gravitationnelle produite par la fusion d'une paire de [trous noirs](#) extraordinaires. Ce signal, baptisé GW190521, était plus court et majoritairement émis à des [fréquences](#) plus basses que toutes les fusions de système binaire de trous noirs observées précédemment.

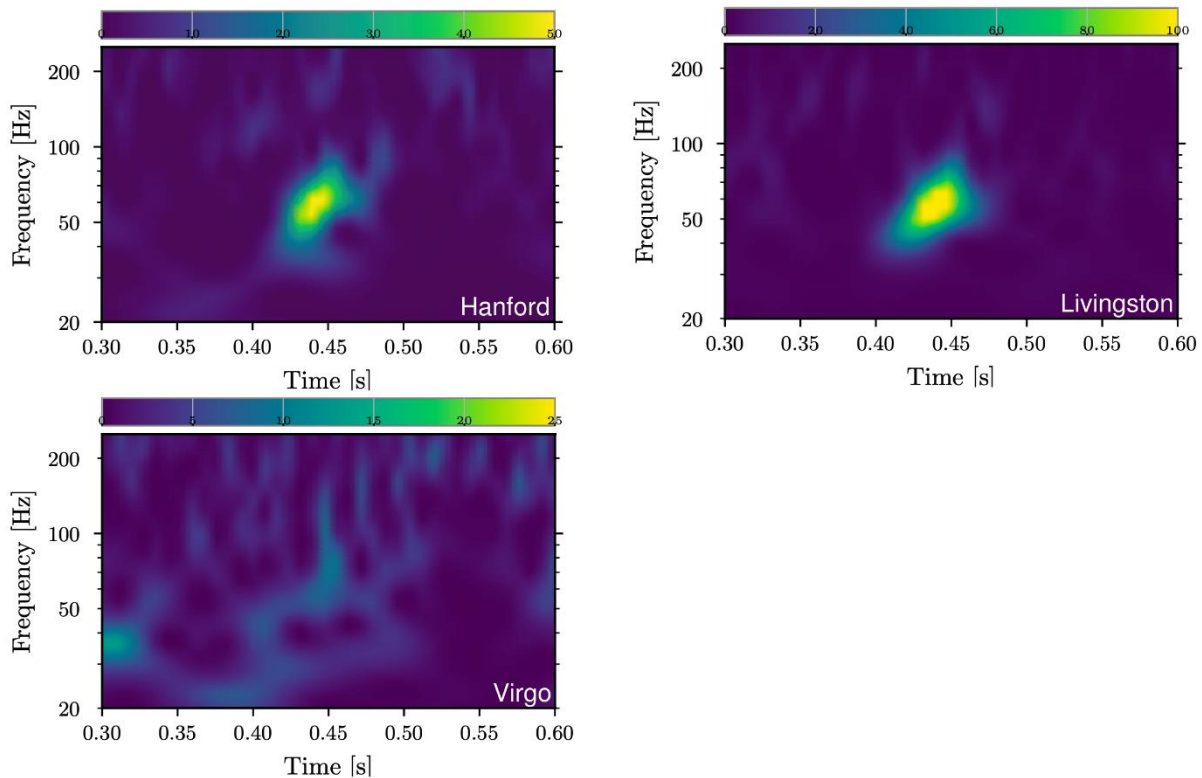


Figure 1 : Représentations temps-fréquence (ou spectrogrammes) des données contenant le signal GW190521, observé par les détecteurs LIGO Hanford (en haut à gauche), LIGO Livingston (en haut à droite) et Virgo (en bas). L'échelle des temps (axe horizontal, en secondes) a pour origine le 21 mai 2019 à 05h02 et 29 secondes heure de Paris (03 :02 :29 UTC). L'énergie présente dans chaque cellule donnée du plan temps-fréquence est représentée par une

couleur, d'autant plus chaude que l'énergie est élevée : le signal apparaît en jaune-vert sur ces images. On peut noter sa durée extrêmement courte et sa fréquence pic (la fréquence dominante au moment de l'amplitude maximale) autour de 60 Hz. [Figure adaptée de la Figure 1 de [l'article annonçant la découverte de GW190521](#).]

La durée pendant laquelle un tel signal est visible dans des détecteurs comme Advanced LIGO et Advanced Virgo est inversement proportionnelle à la masse totale du système binaire qui fusionne. Dans le cas de GW190521, ce temps n'a été que d'environ 0,1 seconde, par exemple environ deux fois moins que pour [GW150914](#), la première fusion de deux trous noirs jamais détectée. De plus, la fréquence à laquelle le signal d'onde gravitationnelle atteint son maximum est également inversement proportionnelle à la masse totale du système. Pour GW190521, le pic en fréquence est autour de 60 Hz, là-aussi bien plus bas que pour GW150914 (environ 150 Hz). Dès le début, il était donc clair que LIGO et Virgo tenaient entre leurs « bras » une paire de trous noirs très lourds – voir Figure 1.

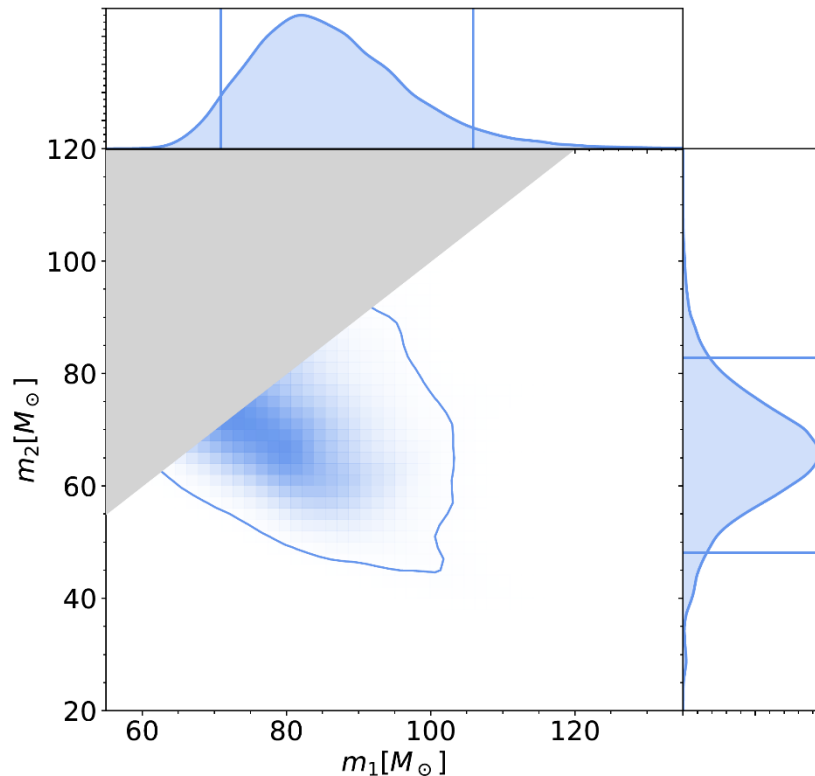


Figure 2 : Distributions de probabilité mesurées pour les masses des deux trous noirs dont la fusion a produit le signal d'onde gravitationnelle GW190521. L'analyse LIGO-Virgo des données conclut que les vraies masses de ces astres ont 90% de chance de se trouver à l'intérieur du contour bleu tracé sur le graphique bidimensionnel au centre de la Figure (et qui montre la distribution de probabilités conjointe des deux masses). Par convention, la masse « primaire » m_1 (axe des abscisses) est supposée plus grande que la masse « secondaire » m_2 (axe des ordonnées), ce qui explique pourquoi la région au-dessus de la diagonale est grisée – car interdite. Sur les côtés (en haut pour m_1 , à droite pour m_2) on peut voir les distributions de

probabilité « en cloche » de chacune des masses individuelles. Comme pour la distribution à deux dimensions, les lignes bleues (verticales pour m_1 et horizontales pour m_2) délimitent l'intervalle qui a 90% de chance de contenir la vraie masse de l'astre.

La Figure 2 montre le résultat de l'estimation des masses des deux trous noirs dont la fusion est à l'origine du signal GW190521. Le plus massif des deux astres compacts pesait environ 85 fois [la masse du Soleil](#) (symbole : M_{\odot}) tandis que son compagnon plus léger était aux environs de 66 M_{\odot} . Ils sont chacun bien plus lourds que tous les trous noirs dont les [fusions avaient été détectées par LIGO et Virgo jusqu'alors](#) – et le plus léger des deux astres formant le système binaire GW190521 est déjà plus massif que la plupart des trous noirs produits lors de ces fusions – voir Figure 3.

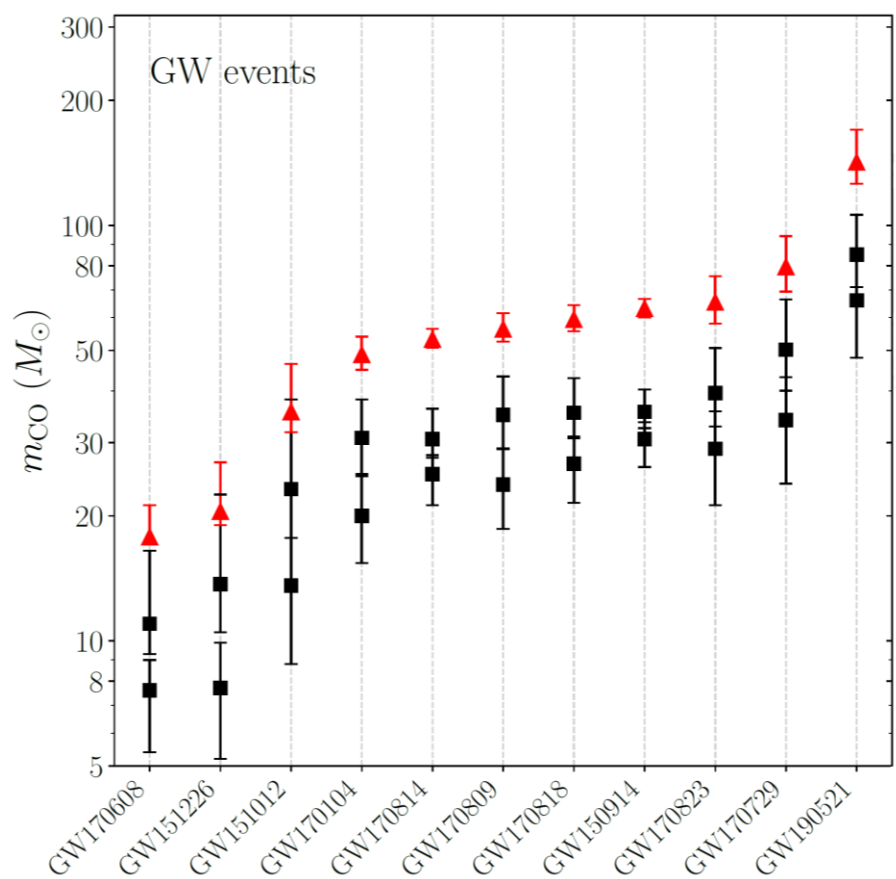


Figure 3 : Graphique comparant les masses des trous noirs primaires, secondaires et finaux pour le signal GW190521 (colonne la plus à droite) et les [événements détectés par LIGO et Virgo pendant les deux premiers « runs » scientifiques O1 et O2](#). Pour chaque événement, les masses des trous noirs du système binaire initial sont indiquées par des carrés noirs tandis que celle du trou noir formé par la fusion est représentée par un triangle rouge. Les barres verticales donnent l'incertitude associée à chaque masse mesurée. Les valeurs records de l'événement GW190521 ressortent clairement avec cette comparaison. [Cette figure est adaptée de la Figure 10 de [l'article scientifique décrivant les implications astrophysiques du signal GW190521](#).]



Pour GW190521, la masse du trou noir final a été estimée à environ $142 M_{\odot}$, ce qui le positionne largement en tête de la liste des trous noirs les plus gros détectés par LIGO et Virgo. Il y a une différence de $8 M_{\odot}$ entre cette masse et la somme des masses des deux astres qui formaient le système binaire initial : cette masse a été convertie en ondes gravitationnelles au cours du processus de fusion.

Pourquoi le signal GW190521 est-il si intéressant ?

Les masses extraordinairement élevées des deux trous noirs dont la fusion a produit le signal GW190521 ne sont pas juste un trophée dont on peut se vanter : elles défient notre compréhension des mécanismes de formation des trous noirs et représentent un banc d'essai unique pour comprendre les lois fondamentales de la gravitation.

Fabriquer de gros trous noirs

Les astronomes classent les trous noirs en fonction de leur masse. C'est légitime dans la mesure où les trous noirs qui se trouvent aux deux extrémités du spectre de masse (les plus légers et les plus lourds) se forment de manières très différentes.

- Tapis au centre de la plupart des grandes galaxies (voire de toutes), les [trous noirs « supermassifs »](#) ont des masses qui vont de plusieurs centaines de milliers à des milliards de masses solaires. Ainsi, notre galaxie, la Voie Lactée, abrite un [trou noir en son sein](#) qui pèse environ quatre millions de fois la masse du Soleil. La manière exacte dont ces trous noirs monstrueux se forment conserve une partie de ses mystères. Cependant, leur formation a probablement débuté lorsque l'Univers était beaucoup plus jeune, afin de laisser le temps à ces astres de grossir autant.
- À l'autre bout du spectre de masse se trouvent les [trous noirs « stellaires »](#) dont on pense qu'ils se forment suite à l'effondrement du cœur d'étoiles massives : les explosions de [supernovæ](#). Leurs masses sont comprises entre quelques masses solaires et quelques dizaines de masses solaires et toutes les fusions de trous noirs observées par LIGO et Virgo avant GW190521 ont été attribuées à des paires de trous noirs stellaires.
- Entre les trous noirs stellaires et les supermassifs on trouve la région encore énigmatique des [trous noirs « de masse intermédiaire »](#) dont les masses varient de 100 à environ 100 000 fois celle du Soleil. De tels trous noirs n'ont pas encore été observés de façon sûre mais on connaît plusieurs scénarios possibles pour leur formation. La chasse aux trous noirs de masse intermédiaire a connu un regain d'intérêt ces derniers temps, motivé par l'amélioration des capacités d'observation, tant des télescopes que des détecteurs d'ondes gravitationnelles.

En se basant sur notre compréhension théorique de la mécanique interne des étoiles massives et de la manière dont les trous noirs se forment, on pense que des trous noirs de masses comprises entre 65 et $120 M_{\odot}$ *ne peuvent pas être issus* de l'effondrement gravitationnel d'étoiles massives. Le signal GW190521 fait donc un peu figure d'intrus puisque la masse du trou noir le plus lourd qui a fusionné (le trou noir primaire) le place manifestement dans cette région – de plus, le trou noir final formé par la fusion entre lui dans la catégorie des trous noirs de masse intermédiaire.

L'observation par LIGO et Virgo du signal GW190521 suggère soit que des étoiles *peuvent* former des trous noirs plus massifs, soit qu'*une partie* des trous noirs détectés se sont formés différemment – peut-être suite à des fusions antérieures entre des paires de trous noirs plus légers : ceci ouvrirait la voie à la formation d'un trou noir encore plus massif lors d'une *autre* fusion de deux trous noirs à venir. Un tel scénario basé sur des fusions successives nécessite que les trous noirs se forment dans des environnements particuliers où ils sont présents en quantité suffisante pour que les processus de fusion aient lieu. Par exemple des [amas stellaires](#) denses ou les disques de [noyaux actifs de galaxie](#) selon les astronomes.

Le signal GW190521 suggère également que la région des trous noirs de masse intermédiaire pourrait être en partie peuplée de trous noirs issus de fusions de systèmes binaires de trous noirs. Les trous noirs supermassifs pourraient également se former de cette manière.

Tester notre compréhension de la gravitation

Notre compréhension théorique de la manière dont la gravitation fonctionne est basée sur la [Théorie de la Relativité Générale](#) d'Einstein – en abrégé « RG ». Ainsi, les chercheurs se servent de la RG pour prédire la forme des signaux d'ondes gravitationnelles émis lors de la fusion de systèmes binaires de trous noirs. Et ces prédictions sont utilisées pour faciliter l'analyse des données enregistrées par LIGO et Virgo. Inversement, les découvertes d'ondes gravitationnelles permettent de tester la théorie et de chercher des différences entre prédictions et observations qui pourraient nous guider vers d'autres théories de la gravitation qui sont des [alternatives à la RG](#) (lien Wikipédia en anglais).

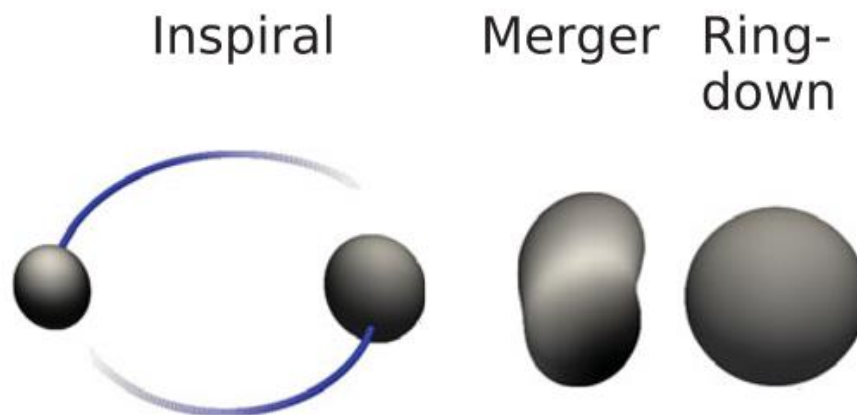


Figure 4 : Schéma illustrant les trois phases successives du signal d'onde gravitationnelle émis lors de la fusion d'un système binaire de trous noirs. De gauche à droite : la phase spiralante – « inspiral » en anglais – au cours de laquelle les deux astres tournent l'un autour de l'autre ; la fusion proprement dite (« merger ») ; enfin la phase d'amortissement – « ring-down » – qui voit le trou noir formé par la collision revenir à l'équilibre.



Utiliser les ondes gravitationnelles comme « laboratoire » n'est pas nouveau : les observations des précédentes fusions de systèmes binaires de trous noirs par LIGO et Virgo ont été utilisées pour [tester notre compréhension de la RG](#) (résumé en anglais). En quoi la détection GW190521 est-elle différente ?

Le signal d'onde gravitationnelle produit par la fusion de deux trous noirs passe par [trois phases successives](#) détaillées sur la Figure 4. Tout d'abord la phase spirale durant laquelle les deux astres sont bien séparés et orbitent l'un autour de l'autre ; ensuite, la fusion proprement dite où les deux trous noirs entrent en collision ; enfin la phase d'amortissement pendant laquelle le trou noir nouvellement formé « sonne » comme une cloche avant d'atteindre un état final stable.

Comme indiqué plus haut, les signaux de fusions de trous noirs sont observables dans les données de LIGO et de Virgo pendant des durées variables et piquent à des fréquences différentes en fonction de la masse des deux astres compacts. En conséquence, les détecteurs sont sensibles à différentes parties du signal d'onde gravitationnelle selon la masse du système binaire. Ainsi, les phases « spirale » et « fusion » sont observées le plus clairement pour les trous noirs légers. A contrario, les masses bien plus élevées des astres dont la fusion a produit le signal GW190521 donnent l'opportunité d'étudier la fin de la phase de fusion et la phase d'amortissement.

La RG a passé tous les tests basés sur les données de GW190521 – comme pour toutes les fusions de trous noirs observés jusqu'à maintenant. L'un de ces tests a consisté à analyser séparément la partie « amortissement » du signal et à vérifier si les résultats étaient compatibles avec ceux obtenus pour les parties « spirale » et « fusion ». D'autres tests ont porté sur la recherche de caractéristiques supplémentaires du signal d'onde gravitationnelle dont l'existence est prédite par certaines théories alternatives de la gravitation. Ou encore sur l'examen d'hypothèses autres qu'un système binaire de trous noirs pour la source du signal GW190521. Aucun de ces tests ne s'est trouvé en contradiction avec l'interprétation selon laquelle l'onde gravitationnelle est due à la fusion de deux trous noirs gouvernée par les lois physiques de la RG.

En conclusion

Le signal GW190521 est une observation d'onde gravitationnelle exceptionnelle qui repousse les limites de nos connaissances sur la formation des trous noirs et offre un nouvel angle d'étude de la gravitation dans des conditions extrêmes. Il suggère aussi l'existence d'une population de systèmes binaires de trous noirs massifs qui pourrait être découverte lors de [futurs campagnes de prises de données](#) (lien en anglais) associant LIGO ([LIGO-India](#) inclus), Virgo et [KAGRA](#) au Japon.

Sonder la région « haute masse » de la population de trous noirs stellaires nous aidera à nous faire une image plus claire des processus qui produisent des trous noirs et les environnements dans lesquels ils se trouvent. Pour le moment, le signal GW190521 peut profiter de sa position tout en haut de l'échelle des fusions de trous noirs observés mais il n'aura peut-être pas le loisir de fanfaronner trop longtemps. En effet, LIGO, Virgo et KAGRA vont continuer à sonder le cosmos pour y chercher des signaux d'onde gravitationnelle avec une sensibilité toujours meilleure. Les détecteurs du futur seront également bien plus sensibles, en particulier dans le domaine des basses



LIGO
Scientific
Collaboration



fréquences où de nombreux trous noirs très lourds devraient se cacher. Parmi eux : [Einstein Telescope](#) et [Cosmic Explorer](#) sur terre ou [LISA](#) dans l'espace. Les records sont faits pour être battus !

Pour en savoir plus

- Visitez nos sites internet : ligo.org, virgo-gw.eu



- Lisez l'annonce de cette découverte sur les sites internet de
 - Virgo : <http://www.virgo-gw.eu/GW190521> (cliquez sur le drapeau tricolore pour la version française) et
 - LIGO : <http://www.ligo.org/detections/GW190521/pr-english.pdf>
- Les deux articles scientifiques sont accessibles gratuitement via les liens suivants : <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.125.101102> et <https://doi.org/10.3847/2041-8213/aba493>.
- Données LIGO et Virgo publiques autour de l'événement GW190521, disponibles sur le site internet du Gravitational-Wave Open Science Centre : https://www.gw-openscience.org/eventapi/html/O3_Discovery_Papers.