

GW151226: OBSERVATION DES ONDES GRAVITATIONNELLES EMISES PAR LA COALESCENCE D'UN SYSTEME BINAIRE DE TROUS NOIRS DE 22 MASSES SOLAIRES

Quelques mois après la [première détection](#) des [ondes gravitationnelles](#) (l'événement [GW150914](#), déjà la fusion de deux trous noirs), les détecteurs LIGO ([Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory](#)) ont observé des ondes gravitationnelles émises par une autre collision entre deux trous noirs. Le signal, appelé GW151226, a été détecté le 26 décembre 2015 à 03:38:53 [UTC](#).

Ce signal, émis à une distance d'environ 1,4 milliards d'[années-lumière](#), est un exemple de [coalescence d'un système binaire](#), où deux objets massifs et compacts fusionnent. Ces systèmes binaires sont une des nombreuses sources d'ondes gravitationnelles (OGs) que les détecteurs LIGO et Virgo recherchent. Les OGs sont des rides de la structure même de l'espace-temps qui emportent une partie de l'énergie du système binaire. Les deux astres spiralent l'un autour de l'autre, se rapprochent et finalement fusionnent. Les OGs ainsi produites [étirent et compriment](#) l'espace-temps à mesure qu'elles se propagent dans l'Univers. C'est ce phénomène qui peut être observé par les détecteurs avancés [LIGO](#) et [Virgo](#), et que l'on utilise pour obtenir des informations sur les sources de ces OGs.

GW151226 est la seconde observation irréfutable de la fusion d'un système binaire de deux trous noirs rendue publique par la Collaboration Scientifique LIGO et la collaboration Virgo. Ces événements marquent le début de l'astronomie en OGs, une nouvelle méthode prometteuse pour observer les événements les plus extrêmes de l'Univers.

LE SIGNAL

Comme pour la [première détection](#), GW151226 a été observé par les deux instruments "LIGO avancés" situés à Hanford (état de Washington) et Livingston (en Louisiane). La **Figure 1** montre les données enregistrées par les détecteurs lors de la dernière seconde précédant la fusion des deux trous noirs. Contrairement au premier événement qui ressortait clairement du "bruit de fond", le nouveau signal est invisible de prime abord dans les données. C'est parce son amplitude est plus faible et aussi parce qu'il s'étale sur une plus longue durée : environ 1 seconde au lieu de 0,2 seconde pour GW150914. Malgré l'impossibilité de voir cet événement à l'oeil, les programmes informatiques d'analyse l'ont clairement identifié.

COMMENT A-T-IL ÉTÉ DÉTECTÉ ?

La première indication de la présence d'une OG est venue d'un algorithme qui analyse les données en temps réel juste après leur enregistrement. GW151226 a ainsi été identifié comme un candidat OG prometteur à peine 70 secondes après le passage du signal sur Terre. Environ une minute plus tard, les premières estimations des paramètres de la source étaient disponibles. Cet algorithme utilise le [filtrage adapté](#) pour rechercher des OGs. Dans cette technique, les données sont comparées à un catalogue de formes d'ondes attendues pour la source recherchée (ici un système binaire de trous noirs). Si l'une de ces formes d'onde est trouvée au même instant dans les données des deux détecteurs, on a un candidat OG. Le filtrage adapté s'est révélé fondamental pour identifier et analyser le signal GW151226 qui était plus faible que celui de la première détection (GW150914). La **Figure 2** montre le résultat obtenu après plusieurs mois de travail par une méthode d'analyse basée sur cette même technique.

Ces analyses ne permettent pas d'estimer précisément les propriétés de la source – en particulier la masse des objets compacts, leur taux de rotation sur eux-mêmes, l'orientation du système binaire et sa position dans le ciel. Une [technique différente](#) est donc utilisée pour obtenir ces informations : on teste un grand nombre de combinaisons de paramètres en calculant à chaque fois la forme d'onde correspondante et on la compare au signal détecté. Cette approche permet de sélectionner les combinaisons de paramètres qui peuvent expliquer les observations et de calculer la probabilité que ces paramètres soient ceux de la vraie source. La **Figure 3** montre un très bon accord entre le signal d'OG reconstruit dans le détecteur Livingston en utilisant le jeu de paramètres les plus probables et une forme d'onde calculée numériquement à partir des équations d'Einstein de la [théorie de la relativité générale](#).

COMMENT ÊTRE SÛR QU'IL S'AGIT BIEN D'UN VRAI ÉVÉNEMENT ?

Comme pour la première détection, [de très nombreuses vérifications](#) ont été menées au niveau des détecteurs pour s'assurer qu'aucun effet instrumental et qu'aucune perturbation liée à l'environnement ne pouvaient avoir produit le signal détecté. Tout a été envisagé, [de réfrigérateurs défectueux jusqu'à des impacts de foudre très lointains](#) ! Aucun phénomène susceptible d'avoir causé le signal GW151226 n'a été identifié au moment où il a été détecté.

FIGURES EXTRAITES DE LA PUBLICATION

Pour plus d'informations sur la manière dont ces figures ont été produites et sur leur contenu, voir l'article publié dans [Physical Review Letters](#).

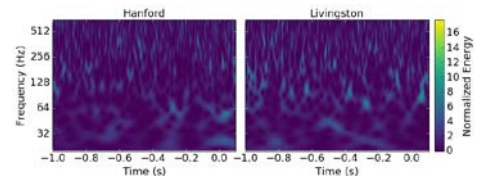


Figure 1 : adaptée de la figure 1 de l'article publié. L'événement GW151226 observé par les deux détecteurs LIGO avancés : Hanford (à gauche) et Livingston (à droite). Ces deux images montrent les données enregistrées par les détecteurs dans la seconde qui a précédé la fusion et représentées dans le "plan temps (en secondes) - fréquence (en Hz, ou nombre de cycles par seconde)". Pour être certain qu'une vraie OG a été observée, les données des détecteurs sont comparées à un annuaire de formes d'onde attendues pour des systèmes binaires. Cette méthode permet de trouver des signaux faibles, enfouis dans le bruit et impossibles à voir à l'oeil. La version animée de cette image montre les données avec et sans le signal reconstruit, qui apparaît ainsi "en creux". Comme pour GW150914, l'amplitude et la fréquence du signal augmentent avec le temps.

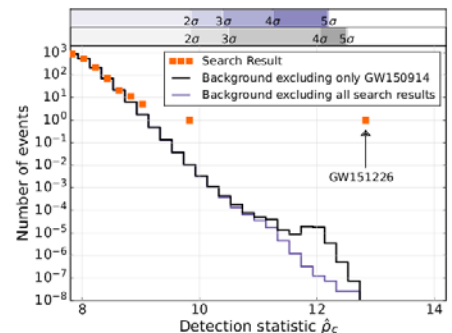


Figure 2 : adaptée de la figure 2 de l'article publié. Le résultat de la recherche de systèmes binaires de trous noirs montre la signification statistique de l'événement GW151226 quand on le compare au "bruit de fond" dû aux fluctuations du bruit de mesure dans les deux instruments. GW151226 se détache clairement de tous les autres événements détectés (carrés oranges) et des fausses coïncidences dues au bruit de fond (courbes en trait plein).

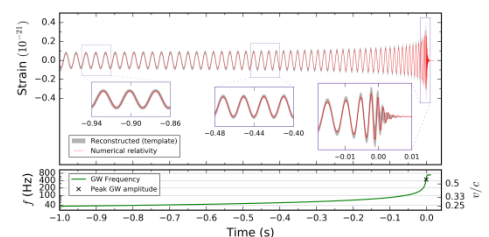


Figure 3 : adaptée de la figure 3 de l'article publié. Le cadre du haut compare le signal gravitationnel reconstruit dans le détecteur Livingston (bande grise) avec une forme d'onde calculée à l'aide d'une simulation numérique (ligne rouge). L'origine des temps correspond à l'instant de la fusion des deux trous noirs. Le panneau du bas montre l'évolution de la fréquence de l'OG avec le temps (axe vertical de gauche, en hertz) : elle augmente à mesure que les trous noirs se rapprochent. On peut convertir cette fréquence en vitesse orbitale du système (axe vertical de droite, exprimée en fraction de la vitesse de la lumière c). La croix noire correspond à l'instant où l'amplitude du signal est la plus importante, approximativement le moment où les deux trous noirs ont fusionné.



ET DONC QU'AVONS-NOUS VU ?

En comparant des millions de formes d'onde aux données, on peut trouver les combinaisons de paramètres du système binaire qui décrivent le mieux le signal. La **Figure 4** montre le résultat obtenu pour les masses des deux astres : il y a 99% de chances que la masse du plus petit objet compact soit supérieure à 4,5 fois la masse du Soleil, une valeur bien supérieure aux prédictions théoriques pour la masse d'une [étoile à neutrons](#). Ainsi, nous sommes presque certains d'avoir observé un système binaire de trous noirs ! Les distributions des masses des deux trous noirs sont centrées à environ 14 et 8 fois la masse du Soleil. Après la fusion, le trou noir résultant a une masse d'environ 21 fois celle du Soleil.

Les trous noirs peuvent être [en rotation](#) sur eux-mêmes – tout comme la Terre tourne sur son axe, ce qui produit l'alternance de jours et de nuits. Cet axe de rotation peut aussi être incliné par rapport au mouvement orbital de l'astre, le phénomène à l'origine des saisons sur Terre. Les vitesses de rotation (en anglais "spin magnitude") et les inclinaisons de leurs axes de rotation ("spin tilt") impactent la durée du signal observé. Si les "mouvements de toupie" ("spin") sont forts et dans le même sens que celui des deux trous noirs en orbite, ces derniers peuvent se rapprocher très près avant de fusionner. A contrario, si les trous noirs tournent sur eux-mêmes dans le sens opposé au mouvement orbital, ils vont fusionner à une plus grande distance ce qui raccourcira le signal d'OG. Lorsque le mouvement orbital et les mouvements de toupie ne sont pas alignés, le système oscille : on parle de "précession du spin".

La Figure 5 montre les combinaisons de "spin magnitudes" et de "spin tilts" qui peuvent expliquer les données. On observe que le plus massif des deux trous noirs initiaux (appelé "primaire") tournait probablement sur lui-même dans la même direction que le mouvement orbital. Par contre, on ne sait pas si son axe de rotation était incliné. Ce graphique montre également qu'il est impossible de mettre la moindre contrainte sur le "spin" du trou noir initial le plus léger. Après la fusion, le trou noir final est également en rotation sur lui-même, à une vitesse de l'ordre de 70% du maximum possible.

La masse du trou noir final est plus faible que la somme des masses des deux trous noirs initiaux : l'équivalent de la masse de notre Soleil a été directement convertie en OGs pendant les derniers instants de la phase spirale et lors de la fusion. A son paroxysme, la puissance émise sous forme d'OGs par le système binaire était plus élevée que l'ensemble de la puissance lumineuse (ce que les astronomes appellent la [luminosité](#)) émise par les étoiles de toutes les galaxies de l'Univers visible !

On peut également déduire des mesures que la fusion s'est déroulée à une distance d'environ 1,4 milliard d'[années-lumière](#). Ces ondes gravitationnelles ont donc parcouru une distance similaire à celles qui sont venues de la première source détectée, GW150914.

On peut utiliser la différence de temps d'arrivée des OGs dans chaque instrument pour "triangler" la position de la source dans le ciel. Mais, avec seulement les deux détecteurs LIGO en fonctionnement, cette estimation est très grossière : la zone délimitée mesure environ 850 [degrés carrés](#) sur le ciel, environ 4 000 fois la taille de la pleine Lune. La précision de la méthode sera très nettement améliorée lorsque plus d'interféromètres géants (dont Virgo) seront en fonctionnement – vous pouvez consulter cet [article](#) pour en savoir plus.

Le signal GW151226 est resté environ une seconde dans la bande de fréquence dans laquelle les détecteurs sont sensibles – à peine 0,2 s dans le cas de GW150914. Les masses plus faibles des trous noirs du système binaire expliquent pourquoi la phase spirale de la coalescence a pu être observée plus longtemps, ce qui a permis d'améliorer les contraintes sur les tests de violation de la relativité générale. Tous les résultats obtenus sont en accord avec cette théorie.

QUELLES CONSÉQUENCES POUR L'ASTROPHYSIQUE ?

GW151226 est la première observation directe d'un système binaire de trous noirs dans cette gamme de masses. Comme on s'attend à ce que ces systèmes n'émettent aucune lumière, les OGs sont les seuls moyens de les découvrir. On peut néanmoins comparer ces observations avec celles obtenues par d'autres méthodes, complètement indépendantes. Ainsi, les masses des trous noirs (initiaux et final) mesurées pour GW151226 sont en accord avec celles basées sur l'étude des [systèmes binaires X](#).

Les systèmes binaires de trous noirs peuvent se former de plusieurs façons. Par exemple à partir de deux étoiles massives déjà liées avant de se transformer en trous noirs une fois leur combustible épuisé. Ou bien dans des régions denses de l'Univers, riches en étoiles et où deux astres isolés auraient pu interagir et former à terme un système binaire. Les propriétés de la source du signal GW151226 sont compatibles avec ces deux scénarios de formation : il est possible de favoriser un par rapport à l'autre.

Cependant les événements GW151226 et GW150914 montrent qu'il pourrait y avoir dans l'Univers bien plus de systèmes binaires de trous noirs qu'attendus. Ces premières détections marquent une étape importante dans la compréhension de cette population de systèmes binaires, qui était complètement invisible pour nous jusqu'à maintenant.

EN RESUMÉ

La **Collaboration Scientifique LIGO** et la **Collaboration Virgo** ont observé la coalescence d'un second système binaire de trous noirs, détecté par les détecteurs LIGO avancés. Les événements GW151226 et GW150914 montrent la présence de systèmes binaires de trous noirs dans l'Univers. Les premières observations directes des OGs ont donc permis de confirmer l'existence des trous noirs et fournissent un nouvel angle de vue sur les mystères de l'Univers. C'est vraiment le début de l'ère de l'astronomie gravitationnelle !

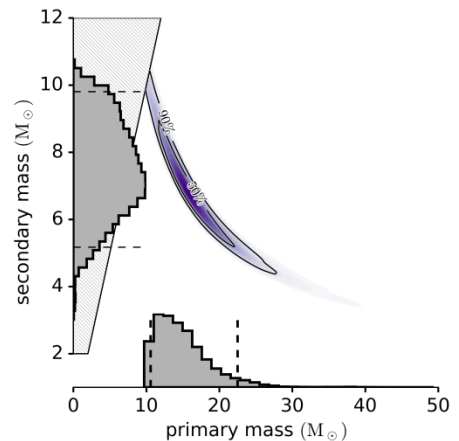


Figure 4 : adaptée de la figure 4 de l'article publié. Cette image montre les combinaisons des masses des trous noirs (en unité de la masse du Soleil) qui permettent de reproduire les données observées. Le trou noir le plus massif (primaire) est en abscisse et le moins massif (secondaire) en ordonnées. Les régions les plus foncées correspondent aux combinaisons de masses les plus probables. Le contour à 90% (50%) délimite la région où la bonne combinaison de masses a 90% (50%) de chances de se trouver.

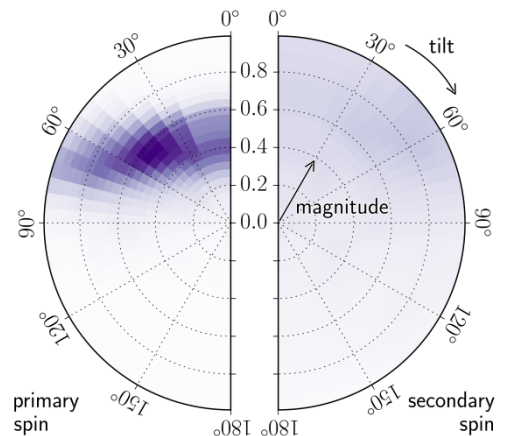


Figure 5 : adaptée de la figure 4 de la publication. Cette image donne des informations sur le mouvement de toupie ("spin") de chacun des deux trous noirs initiaux : à gauche le plus massif ("primaire"), à droite le plus léger ("secondaire"). Les deux demi-disques montrent à la fois la rapidité de ce mouvement (la "magnitude") et l'angle de l'axe de rotation par rapport à l'axe du mouvement orbital (le "tilt"). Comme pour la figure 4, les configurations les plus probables apparaissent plus foncées. On peut contraindre le spin du trou noir primaire mais on ne peut rien conclure pour le trou noir secondaire.

POUR EN SAVOIR PLUS

La page d'accueil de la Collaboration Scientifique LIGO : <http://www.ligo.org>

La page d'accueil de la collaboration Virgo : <http://www.virgo-gw.eu>

Le "LIGO Open Science Center" où les données de l'événement GW151226 peuvent être téléchargées : <https://losc.ligo.org>