

GW170104 : OBSERVATION DE LA FUSION D'UN SYSTÈME BINAIRE DE TROUS NOIRS DE 50 MASSES SOLAIRES À UN REDSHIFT DE 0,2

INTRODUCTION

En septembre 2015, les deux [détecteurs LIGO de seconde génération](#) ont enregistré le premier signal d'ondes gravitationnelles jamais observé directement, issu de la fusion de deux trous noirs massifs situés à plus d'un milliard d'années-lumière. Cette découverte, baptisée « [GW150914](#) » et annoncée conjointement par les collaborations [LIGO](#) et [Virgo](#), est survenue un siècle après la prédiction de l'existence des ondes gravitationnelles par Albert Einstein dans le cadre de la [théorie de la relativité générale](#). Elle a été suivie par un possible signal non confirmé en octobre (le « [candidat LVT151012](#) »), puis par une seconde fusion de [trous noirs](#) (« [GW151226](#) ») en décembre 2015.

Les détecteurs LIGO avancés ont démarré leur seconde phase de prise de données fin novembre 2016, après un arrêt programmé de dix mois environ pour améliorer encore leur sensibilité record. A peine un mois plus tard, une troisième fusion de trous noirs, « [GW170104](#) », était détectée. Cet article explique comment ce signal a été observé, ce qu'il nous apprend sur les trous noirs qui l'ont produit et comment cette nouvelle découverte [LIGO-Virgo](#) améliore nos connaissances sur la gravité et l'espace-temps.

DÉTECTION DU SIGNAL GW150914

L'événement GW170104 a été observé par les deux détecteurs LIGO avancés situés à Hanford dans l'état de Washington et à Livingston en Louisiane. Tout est parti d'une alerte automatique envoyée par un programme informatique qui analyse en temps réel les données enregistrées à Livingston. Des vérifications de l'état des détecteurs similaires à celles qui ont été menées pour les deux détéctions précédentes (voir [ici](#) et [là](#)) ont montré que les deux instruments fonctionnaient normalement au moment où les signaux ont été observés.

Les deux premiers graphiques de la Figure 1 montrent les données enregistrées par les interféromètres LIGO au moment de la fusion des deux trous noirs. Le signal GW170104 ressemble beaucoup à celui de GW150914 : dans les deux cas, on voit clairement la signature caractéristique « [en gazouillis](#) » attendue au moment de la coalescence de trous noirs : l'amplitude et la fréquence de l'onde gravitationnelle augmentent fortement tandis que les deux astres spiralent l'un vers l'autre à une vitesse de plus en plus grande.

A l'aide d'une technique de [traitement du signal](#) appelée « [filtrage adapté](#) » (voir également [ici](#) et [là](#)), les données de GW170104 ont été comparées à une série de formes d'ondes théoriques afin de trouver celle qui leur correspondait le mieux et d'obtenir des informations sur la source potentielle d'ondes gravitationnelles – comme la masse des deux astres et leur position dans le ciel. Les premières estimations grossières de ces paramètres ont été envoyées très rapidement dans le monde entier aux équipes d'astronomes partenaires de LIGO et de Virgo afin qu'elles puissent chercher des « [contreparties électromagnétiques](#) » à l'aide de leurs télescopes – c'est-à-dire des émissions de lumière qui pourraient être associées à l'émission d'ondes gravitationnelles. Pour en savoir plus sur la recherche de contreparties électromagnétiques pour l'événement GW 150914, vous pouvez lire [cet article](#).

DÉTERMINATION DES PROPRIÉTÉS DE L'ÉVÉNEMENT GW170114

Une analyse très détaillée des données par la méthode du filtrage adapté a été menée sur une période de plusieurs semaines à l'aide de supercalculateurs. Le premier objectif de ce travail était de mesurer la [signification statistique](#) de l'événement en calculant le [taux de fausses alarmes](#) associé, c'est-à-dire la fréquence avec laquelle on peut s'attendre à détecter dans les deux instruments LIGO un signal similaire à celui de GW170104 mais qui serait une coïncidence fortuite due à des « [fluctuations du bruit de mesure](#) » dans les interféromètres. Plus ce taux de fausses alarmes est bas et plus la probabilité que GW170104 soit un artefact est faible. Le lecteur trouvera plus de détails sur le calcul du taux de fausses alarmes [ici](#) et [là](#). L'analyse LIGO-Virgo a calculé un taux de fausses alarmes inférieur à 1 événement lié au bruit tous les 70 000 ans, une fréquence suffisamment rare pour pouvoir affirmer que GW170104 est presque certainement un vrai événement astrophysique !

Le troisième graphique de la Figure 1 montre une comparaison entre la forme d'onde théorique la plus ressemblante (et sélectionnée par la méthode du filtrage adapté) et les deux séries de données (exprimées en « [amplitude d'ondes gravitationnelles équivalente](#) », c'est-à-dire un [signal](#) montrant la variation relative de distance entre deux points de l'espace-temps lors du passage de l'onde gravitationnelle) enregistrées par les instruments LIGO au moment de la détection de la fusion de trous noirs GW170104. Enfin, le graphique du bas montre la différence entre les données enregistrées et la meilleure forme d'onde. Ces signaux résiduels sont faibles : le modèle sélectionné décrit très bien les données.

Des analyses complémentaires nécessitant des supercalculateurs ont ensuite permis d'obtenir des valeurs estimées plus précises pour les [paramètres](#) de l'événement GW170104 : les masses des deux astres compacts qui ont fusionné, la distance entre la Terre et le système binaire, la position de ce dernier dans le ciel, l'orientation du plan orbital associé, ainsi que des contraintes sur les mouvements de rotation propre des trous noirs et sur une possible [précession](#) de leurs orbites. Cette étude nécessite de tester avec soin des millions de jeux de paramètres différents en comparant la forme d'onde générée pour chaque combinaison avec les signaux mesurés par les détecteurs LIGO. Des informations supplémentaires sur la manière dont les paramètres d'une onde gravitationnelle sont estimés peuvent être trouvés [ici](#) et [là](#).

FIGURES EXTRAITES DE LA PUBLICATION

Pour avoir plus d'informations sur ces figures, vous pouvez lire l'article scientifique publié par LIGO et Virgo, disponible [ici](#).

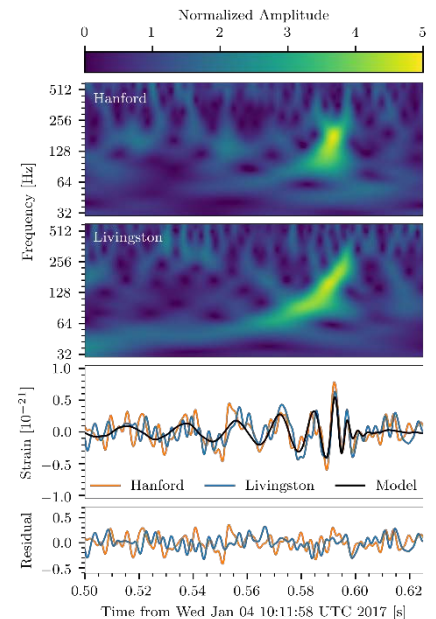


Figure 1 : Les deux graphiques du haut montrent l'évolution de la fréquence instantanée du signal mesuré par chacun des détecteurs LIGO pendant environ 1 dixième de seconde au moment de la détection de l'événement GW170104. La force, ou amplitude, du signal est représentée par la couleur des pixels sur les cartes temps-fréquence. Le troisième graphique compare la forme d'onde du meilleur modèle de fusion de trous noirs (courbe noire) avec les signaux mesurés. Les données ont été ajustées pour tenir compte de la différence de trois millisecondes entre les temps d'arrivée de l'onde gravitationnelle dans les détecteurs LIGO, ainsi que de la différence d'orientation des bras des interféromètres. Le graphique du bas montre la différence entre les signaux mesurés et la meilleure forme d'onde : ces résidus ne présentent aucune structure particulière, signe que le modèle décrit bien les données.



Visitez nos sites internet :

<http://www.ligo.org>

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

On peut calculer l'incertitude sur les paramètres du modèle utilisé pour décrire l'événement GW170104 – soit paramètre par paramètre, soit pour des combinaisons de ces paramètres. Par exemple, la Figure 2 montre les résultats obtenus pour les masses des deux objets compacts qui ont fusionné, voisines de 30 fois et de 20 fois la masse du Soleil. Ces valeurs élevées démontrent que GW170104 est bien le résultat de la fusion de deux trous noirs. En comparant ces masses à l'estimation de celle du trou noir final, on en déduit qu'une énergie équivalente à celle contenue dans deux masses solaires a été émise sous forme d'ondes gravitationnelles lors du processus de fusion. Au paroxysme du phénomène, l'espace d'un court instant, la puissance émise dépassait largement la luminosité totale de l'ensemble des étoiles de toutes les galaxies de l'Univers observable.

Le calcul montre que la source de l'événement GW170104 était probablement deux fois plus lointaine que celle de GW150914, à environ 3 milliards d'années-lumière. En fait, GW170104 est si éloigné que les ondes gravitationnelles émises avaient été étirées d'environ 20% quand elles sont arrivées sur Terre – à cause de [l'expansion de l'Univers](#) : c'est un phénomène bien connu, appelé « [décalage cosmologique vers le rouge](#) » et que l'on rencontre d'ordinaire quand on observe la lumière émise par des galaxies très lointaines.

Un tableau donnant la meilleure combinaison de paramètres pour GW170104 est inclus dans l'article publié pour rendre compte de la découverte ; on le trouve également dans cette fiche d'informations.

QUE GW170104 NOUS APPREND-IL ?

La population des trous noirs stellaires

GW170104 est la troisième détection directe confirmée d'ondes gravitationnelles et le quatrième membre (si on inclut le candidat non confirmé LVT151012) de la famille toujours plus nombreuse des systèmes binaires de trous noirs stellaires dont on a mesuré directement les masses. La Figure 2 compare également les masses des trous noirs de GW170104 avec ceux des trois autres événements : on voit que GW170104 s'intercale entre GW150914 et LVT151012. De plus, cette nouvelle détection a permis d'améliorer un peu notre estimation de la fréquence à laquelle les systèmes binaires de trous noirs fusionnent dans l'Univers. Bien que l'incertitude sur ce taux soit encore élevée, il pose déjà des problèmes à certains modèles astrophysiques qui décrivent la formation de trous noirs et leur fusion.

Un autre test est fourni par les mesures du [mouvement de rotation propre des trous noirs](#) – en effet, les modèles théoriques font des prédictions différentes sur le parallélisme des axes de rotation des deux trous noirs dans un système binaire. Bien que ces paramètres ne soient pas encore très contraints, les observations actuelles semblent indiquer un possible désalignement entre les axes de rotation des deux astres compacts.

Tests de la relativité générale

Disposer d'une troisième détection confirmée d'une onde gravitationnelle a également permis d'améliorer notre capacité à tester certains aspects fondamentaux de la relativité générale (RG). En combinant ces nouveaux résultats avec ceux des événements GW150914 et GW151226, on compare les formes d'onde observées avec celles prédites par la RG et on cherche des écarts significatifs entre ces différents signaux. Les résultats de cette étude sont en accord avec ceux obtenus jusqu'à maintenant (voir [ici](#) et [là](#)) : une fois de plus, la théorie d'Einstein a brillamment passé son examen !

L'éloignement de la source de GW170104 nous a également permis de tester d'autres prédictions de la RG : le fait que les ondes gravitationnelles se propagent à la vitesse de la lumière et qu'elles ne subissent aucune distorsion sur leur parcours – hormis un étirement global causé par l'expansion de l'Univers. Lorsque des ondes traversent un milieu, elles peuvent a priori y subir une [dispersion](#) : elles en ressortent plus « étalées » car les ondes de fréquence différentes s'y sont propagées à des vitesses différentes. On rencontre ce phénomène dans la vie de tous les jours, par exemple lors de l'apparition d'un [arc-en-ciel](#) (chaque couleur correspond à une gamme de fréquences différente). Au contraire, les ondes sonores ne subissent presque pas de dispersion lorsqu'elles se propagent dans une salle de concert. Sinon, le public d'un orchestre philharmonique entendrait décalées flûtes et contrebasses !

Selon la RG, les ondes gravitationnelles émises par GW170104 n'auraient pas dû subir de dispersion bien qu'elles aient voyagé sur des milliards d'années-lumière pour nous rejoindre. Pour tester cette hypothèse, nous avons introduit un modèle simple pour la dispersion, en accord avec certaines théories alternatives de la RG selon lesquelles ce phénomène devrait se produire. Et nous avons comparé ses prédictions avec les observations de GW170104, à nouveau combinées avec les résultats de GW150914 et GW151226.

La Figure 3 résume les contraintes obtenues sur l'amplitude du phénomène éventuel de dispersion pour différentes valeurs d'un paramètre du modèle, appelé α . On voit que seule une très faible dispersion est permise pour maintenir l'accord avec les observations, ce qui signifie que la RG (dans le cadre de laquelle il n'y a aucune dispersion) a passé avec succès un test supplémentaire. De plus, dans le cas particulier $\alpha=0$, le résultat obtenu peut être converti en une limite supérieure sur la masse d'un hypothétique [graviton](#) – une particule quantique dont les ondes gravitationnelles seraient formées, tout comme les ondes électromagnétiques sont constituées de photons. Notre nouvelle limite sur la masse du graviton, basée sur les trois détections confirmées, améliore par plus de 50% le résultat que nous avons publié précédemment.

ET ENSUITE ?

La seconde période de prise de données des détecteurs LIGO avancés doit se poursuivre jusqu'au mois d'août et le [détecteur Virgo](#) avancé devrait le rejoindre prochainement. A mesure que le nombre de détecteurs cherchant de concert les ondes gravitationnelles au sein d'un réseau mondial augmente, nous devrions en apprendre plus sur les modèles de formation des trous noirs de masses stellaires et nous pourrions pousser la relativité générale dans ses derniers tranchements.

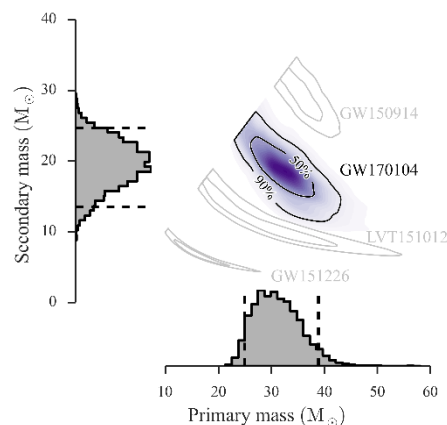


Figure 2 : Cette image montre les masses de trous noirs (exprimées en multiples de la masse du Soleil) qui sont compatibles avec l'événement GW170104. Les contours dans la partie supérieure et à droite de l'image délimitent les paires de masses de trous noirs qui sont permises. Plus la couleur est foncée et plus la combinaison a une probabilité élevée d'être correcte. Les « montagnes » grises sur les côtés (appelées histogrammes) montrent la distribution de probabilité de chaque masse prise séparément ; ces distributions sont maximales pour 30 et 20 masses solaires. Les contours de probabilité pour les paires de masses des trous noirs des trois autres événements sont également tracés en gris pâle.

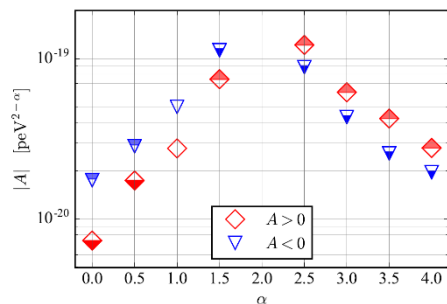


Figure 3 : Limites supérieures sur l'amplitude du paramètre de dispersion A , permises par les données de l'événement GW170104 en fonction de la valeur de l'autre paramètres du modèle α . Le modèle permet à A de prendre des valeurs positives et négatives et l'on voit que des contraintes similaires sont obtenues dans les deux cas. La relativité générale prédit pour A une valeur exactement égale à 0.

POUR EN SAVOIR PLUS :

Epreuves des articles LIGO-Virgo disponibles gratuitement sur le [serveur de preprint arXiv](#).

[Site internet](#) de la Collaboration Scientifique LIGO

[Site internet](#) du projet LIGO avancé

Des [informations](#) sur les technologies des détecteurs LIGO avancés

[Site internet](#) scientifique de la collaboration Virgo

Des [informations](#) sur le détecteur Virgo avancé

[LIGO Open Science Center](#) : données publiques de LIGO, dont celles de l'événement GW170104