



LIGO
Scientific
Collaboration



GWTC-2 : un catalogue enrichi de détections d'ondes gravitationnelles

Daté du 29 octobre 2020. Retrouvez cet article en ligne et dans d'autres langues à l'adresse <https://www.ligo.org/science/Publication-O3aCatalog>.

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

**

*

Nous présentons ici GWTC-2 (en anglais : « Gravitational-Wave Transient Catalog 2 »), la nouvelle version du catalogue de détections d'ondes gravitationnelles détections par [LIGO](#) et [Virgo](#). Elle couvre la période allant du tout premier signal observé en 2015 jusqu'à la fin de O3a, la première moitié de la troisième campagne de prise de données commune LIGO-Virgo appelée « run O3 ». O3a a débuté le 1^{er} avril 2019 et s'est terminé le 1^{er} octobre de la même année : il a permis d'ajouter 39 événements aux 11 signaux d'ondes gravitationnelles confirmés qui formaient la première édition du catalogue : [GWTC-1](#). GWTC-2 compte donc au total 50 événements. Les découvertes effectuées lors du run O3a sont associées à une gamme très variée de paramètres astrophysiques et les sources associées sont interprétées comme des fusions de systèmes binaires de trous noirs (BBH : « binary black holes » en anglais), de systèmes binaires d'étoiles à neutrons (BNS : « Binary Neutron Stars » en anglais) et de systèmes mixtes étoile à neutrons + trou noir (NSBH : « Neutron Star Black Hole » en anglais).

Il est intéressant de noter que O3a a produit environ trois fois plus d'événements confirmés comme signaux d'ondes gravitationnelles que les deux premiers runs (O1 et O2) combinés. De plus, les trois détecteurs (deux pour LIGO, un pour Virgo) ont participé à l'ensemble du run O3a : en moyenne, au moins un des trois instruments était en fonctionnement 97% du temps et ce pourcentage est encore de 82% si la condition devient « au moins deux détecteurs sur trois ». Parmi les événements intéressants enregistrés pendant le run O3a, on peut citer la seconde observation d'un signal compatible avec la fusion d'un système BNS, les premières fusions d'astres avec des masses particulièrement différentes et un système BBH très massif, environ 150 fois la **masse du Soleil** au total. Dans ce résumé, nous décrivons les améliorations au niveau de LIGO et Virgo qui ont permis d'obtenir ces résultats pendant O3a avant de présenter l'impact des nouveaux événements en astrophysique.

Détecter des ondes gravitationnelles

Les 39 signaux accumulés pendant O3a sont le résultat combiné des améliorations apportées aux détecteurs [LIGO](#) et [Virgo](#), d'une meilleure qualité des données et des progrès des différentes méthodes de recherche d'ondes gravitationnelles. Sur le plan expérimental, les améliorations incluent l'augmentation de la puissance laser circulant dans les interféromètres, des meilleurs miroirs pour LIGO, une amélioration du contrôle de la lumière diffusée, et pour Virgo le retour à des suspensions « monolithiques » (les fils de suspension ne sont plus en métal mais en silice



fondue, la même matière que les miroirs eux-mêmes, ce qui diminue certains bruits de mesure) déjà testées il y a une dizaine d'années. De plus, les trois instruments ont bénéficié de la mise en service d'une technique d'optique quantique appelée « états compressés de la lumière » qui permet de contourner une limite imposée par la mécanique quantique et d'améliorer la sensibilité du détecteur à haute fréquence. Tous ces changements cumulés ont permis aux détecteurs d'atteindre une meilleure sensibilité et donc d'augmenter la distance jusqu'à laquelle ils peuvent détecter une source d'ondes gravitationnelles donnée. Nous explorons ainsi mieux et plus loin notre Univers. Ainsi, comme le montre la Figure 1, la valeur **médiane** de la distance jusqu'à laquelle un système BNS typique peut être détecté a augmenté de 60% environ entre O2 et O3a – moyenne calculée sur les trois détecteurs.

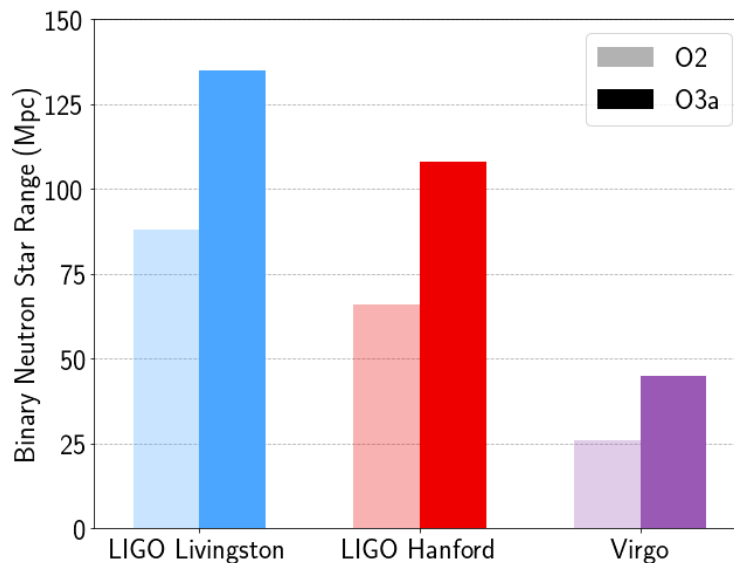


Figure 1 : Comparaison des médianes des distributions de la distance typique de détection d'un système BNS pendant les runs O2 (couleurs pâles) et O3a (couleurs vives) et pour les trois détecteurs. Cette distance se calcule à partir de la courbe de sensibilité de l'instrument, laquelle varie continuellement au cours du temps avec les bruits de mesure : la distance augmente (diminue) lorsque la sensibilité s'améliore (se dégrade). L'axe vertical est gradué en mégaparsecs (Mpc), une unité de distance adaptée à l'étude de l'Univers : 1 Mpc correspond environ à 3,26 millions d'années-lumière – ou $3,1 \times 10^{19}$ kilomètres.

Crédits : LIGO Virgo Collaboration / Eve Chase / Caitlin Rose / Northwestern / University of Wisconsin-Milwaukee.

Un autre ingrédient clef pour la découverte de sources d'ondes gravitationnelles est le processus d'amélioration des données brutes enregistrées par les détecteurs. Cette phase de [reconstruction des données](#) inclut leur calibration, la soustraction de certains bruits de mesure et la suppression partielle de bouffées de bruit transitoires, appelées « glitches » – voir plus bas. La première étape, la calibration, a lieu en temps réel : elle consiste à convertir les variations de puissance laser détectées en sortie d'un interféromètre en amplitude équivalente d'une possible onde gravitationnelle – le « **strain** », un nombre sans dimension. Ce sont ces canaux qui sont utilisés pour produire en quelques minutes les alertes sur de possibles détections, à destination des astronomes. Ultérieurement, ces données peuvent être recalibrées afin d'améliorer leur précision

(dans le jargon scientifique on parle de « réduction des erreurs systématiques ») et soustraire plus de sources de bruit afin de détecter des sources plus lointaines ou des signaux plus ténus.

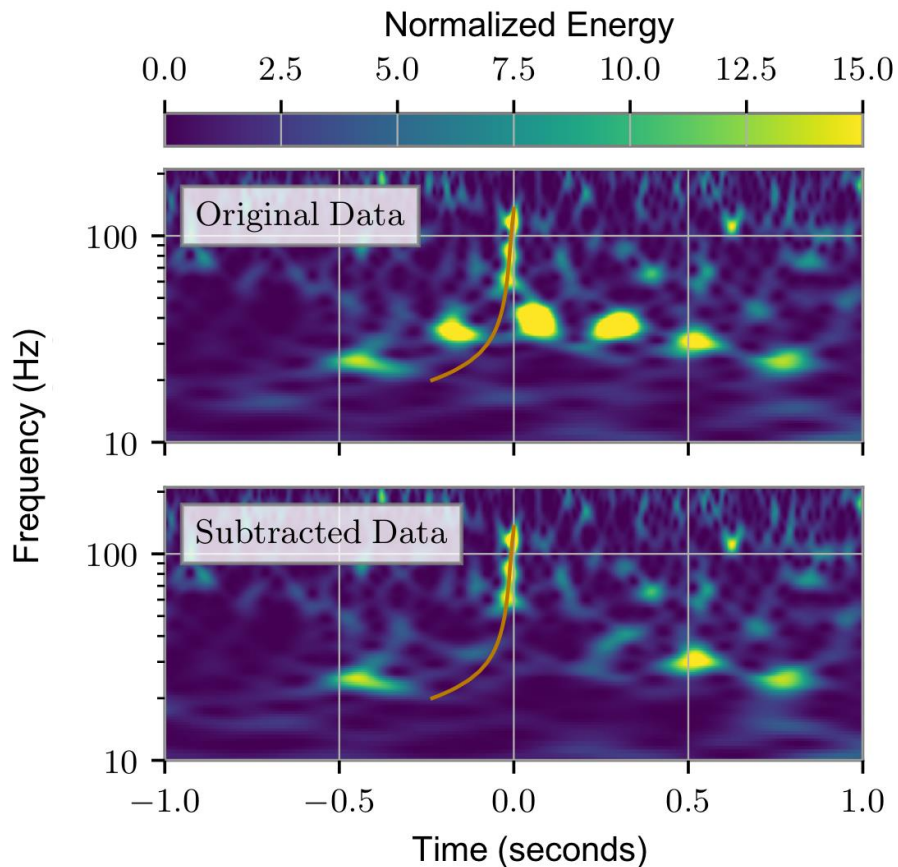


Figure 2 : Représentation temps-fréquence de l'événement GW190701_203306 (détecté le 1^{er} juillet 2019) avant (image du haut) et après (image du bas) soustraction de glitches. Qu'il soit dû à un signal d'ondes gravitationnelles (indiqué par la courbe orange superposée aux données) ou à un glitch, un excès d'énergie par rapport au bruit de fond attendu à un instant donné et dans une bande de fréquence particulière est représenté par une couleur chaude sur ces diagrammes. Dans cet exemple, une bouffée de lumière diffusée dans le détecteur LIGO Livingston avait créé un train de glitches autour de 40 Hz qui encadraient le signal. Les plus proches ont été éliminés presque complètement sans altérer le reste des données.

Figure adaptée de la Figure 5 de [l'article scientifique GWTC-2](#).

Lorsqu'on analyse les données des détecteurs d'ondes gravitationnelles, les « glitches » sont le problème de qualité des données le plus commun que l'on rencontre. Ce sont des excès de bruit qui « polluent » les données pour une courte durée et qui peuvent ressembler à un vrai signal d'origine astrophysique. Pour certains d'entre-eux on connaît leur origine : vibration d'un élément mécanique ou lumière laser parasite qui arrive sur un détecteur au mauvais endroit par exemple. D'autres sont mystérieux, en particulier la catégorie des « bips » (« blips » en anglais), courts en temps mais étendus en fréquence. Une méthode pour identifier et classer des glitches dans les données de Virgo et de LIGO est d'utiliser la plate-forme internet « [Gravity Spy](#) » qui fonctionne grâce à l'aide de milliers d'internautes qui réalisent leur propre classification des glitches que le



site leur propose de trier : cliquer ici pour les rejoindre. Des projets similaires également basés sur la science participative sont en cours de développement dans de nombreux laboratoires, notamment à EGO dans le cadre de [projets européens](#). Lorsqu'un glitch suffisamment fort (et donc susceptible d'avoir un impact sur l'analyse des données) est identifié à proximité d'un signal candidat pour être une onde gravitationnelle, il est soustrait de manière contrôlée – un exemple d'une telle soustraction est donné sur la Figure 2. Ainsi huit des 39 événements détectés pendant le run O3a ont bénéficié d'une telle soustraction de glitch avant que les paramètres de la source associée ne soient estimés.

L'identification de candidats ondes gravitationnelles s'effectue lors de deux étapes principales, chacune correspondant à des échelles de temps bien différentes. Tout d'abord, plusieurs algorithmes de recherche traitent en parallèle les données dès que ces dernières sont disponibles. Leur but est d'envoyer des [alertes publiques](#) en quelques minutes. Des semaines ou des mois plus tard, les données sont analysées de nouveau et de manière plus détaillée pour produire la liste finale des événements qui seront répertoriés dans la prochaine édition du catalogue GWTC. Cette ré-analyse bénéficie d'une meilleure calibration, d'informations plus complètes sur la qualité des données et des améliorations apportées aux méthodes qui mesurent la signification statistique de chaque candidat – c'est-à-dire la probabilité qu'il soit associé à un vrai signal astrophysique. La sélection finale se fait sur le taux de fausses alarmes en choisissant un seuil de deux par an : un candidat dont le taux de fausses alarmes est en-dessous de ce seuil est promu au rang d'évènement ; au-dessus, il est rejeté et considéré comme une fluctuation du bruit de mesure des détecteurs. Sur les 39 événements détectés pendant le run O3a, 26 ont fait l'objet d'une alerte publique temps réel tandis que les 13 autres apparaissent pour la première fois dans le catalogue GWTC-2.

Cette seconde édition du catalogue introduit une nouvelle convention pour le nommage des détections d'ondes gravitationnelles. La convention précédente basée sur la date de la détection (concaténation, dans cet ordre, de l'année, du mois et du jour de la détection : par exemple GW150914 pour la première détection enregistrée le 14 septembre 2015) reste valable pour les signaux déjà publiés, y compris les plus récents d'entre-eux : GW190412, GW190425, GW190521 et GW190814. Par contre, les événements supplémentaires du nouveau catalogue voient l'heure de leur détection (en temps universel, ou « UTC ») ajoutée à la date. Par exemple, l'évènement GW190701_203306 illustré sur la Figure 2 a été observé à 20h33 et 6 secondes UTC (il était deux heures plus tard à Paris en heure locale) le 1^{er} juillet 2019. Avec cette nouvelle convention, il est possible de distinguer deux événements enregistrés le même jour, ce qui s'est produit trois fois pendant O3a.

Mesurer les paramètres astrophysiques des événements

L'**estimation des paramètres** astrophysiques d'un signal d'ondes gravitationnelles donné permet de mesurer les propriétés de la source associée. Les paramètres *externes* (ou *extrinsèques*) décrivent la source par rapport à nous qui l'observons sur Terre : sa distance, sa position dans le ciel au moment de l'arrivée de l'onde gravitationnelle et enfin l'orientation du plan de l'orbite du système binaire par rapport à la ligne de visée entre la source et la Terre. Les paramètres *intrinsèques* décrivent les propriétés de la source, comme les masses et les spins (paramètre de rotation propre) de chaque **astre compact**. En combinant toutes ces informations, on peut calculer



des formes d'ondes gravitationnelles qui estiment la variation du signal en fonction du temps. Ces prédictions sont finalement comparées aux données enregistrées par les détecteurs LIGO et Virgo en tenant compte des différents niveaux de bruit de mesure. Ces techniques fournissent pour chaque paramètre un [intervalle de confiance](#) à 90% qui délimite les valeurs numériques qui sont le plus en accord avec les mesures.

Ainsi, les 39 événements du nouveau catalogue couvrent une gamme de masses étendue qui est riche d'enseignements sur l'histoire et la formation des trous noirs et des étoiles à neutrons qui peuplent l'Univers. Le signal d'ondes gravitationnelles émis par un système binaire bien avant qu'il ne fusionne dépend principalement d'une combinaison particulière des masses de deux astres qui le composent : la « **masse chirp** ». D'autres paramètres de masse sont la masse totale du système (la somme des masses des deux astres compacts) et le **rapport de masses** (la masse de l'astre compact le plus léger divisée par celle de l'astre le plus lourd, un nombre compris entre 0 et 1 par convention).

Mesurer les paramètres astrophysiques des événements

La Figure 3 illustre la grande variété des masses des astres compacts du catalogue GWTC-2, qui vont d'étoiles à neutrons d'1,4 masses solaires à un trou noir d'environ 150 masses solaires. Les Figures 4 et 5 mettent en avant huit événements particuliers, dont quatre sont décrits dans des publications séparées. Par ordre chronologique de détection :

- [GW190412](#) : le premier système BBH clairement asymétrique (c'est-à-dire dont les masses des composants sont significativement différentes), ce qui a permis de mettre en évidence les [harmoniques](#) supérieurs du signal d'ondes gravitationnelles.
- [GW190425](#) : la seconde source compatible avec la fusion d'un système BNS – après [GW170817](#).
- [GW190426_152155](#) : un signal émis par un système léger, soit un NSBH, soit un BBH.
- [GW190514_065416](#) : un système BBH dont la rotation propre globale est la plus faible de tous les événements O3a.
- [GW190517_055101](#) : un système BBH dont la rotation propre globale est la plus forte de tous les événements O3a.
- [GW190521](#) : un système BBH dont la masse totale dépasse 150 fois celle du Soleil.
- [GW190814](#) : un système très asymétrique et énigmatique : la fusion d'un trou noir de 23 masses solaires avec un objet compact pesant 2,6 masses solaires qui est soit le trou noir le plus léger soit l'étoile à neutrons la plus massive jamais détecté.
- [GW190924_021846](#) : probablement le système BBH le plus léger, avec deux trous noirs de l'ordre de trois masses solaires chacun.

De plus, le catalogue GWTC-2 inclut des événements dans une région à basse masse (entre 2,5 et 5 masses solaires, une zone située grosso modo entre les étoiles à neutrons les plus lourdes et les trous noirs les plus légers), appelée en anglais « lower mass gap » et qui était vierge de toute source connue jusqu'alors. Ainsi, les scientifiques ont cherché pendant de nombreuses années à expliquer sur le plan théorique ce défaut d'observations. Au contraire, le run O3a a fourni des astres compacts

qui appartiennent potentiellement à cette région en masse, par exemple les astres les plus légers des systèmes binaires GW190814 et GW190924_021846.

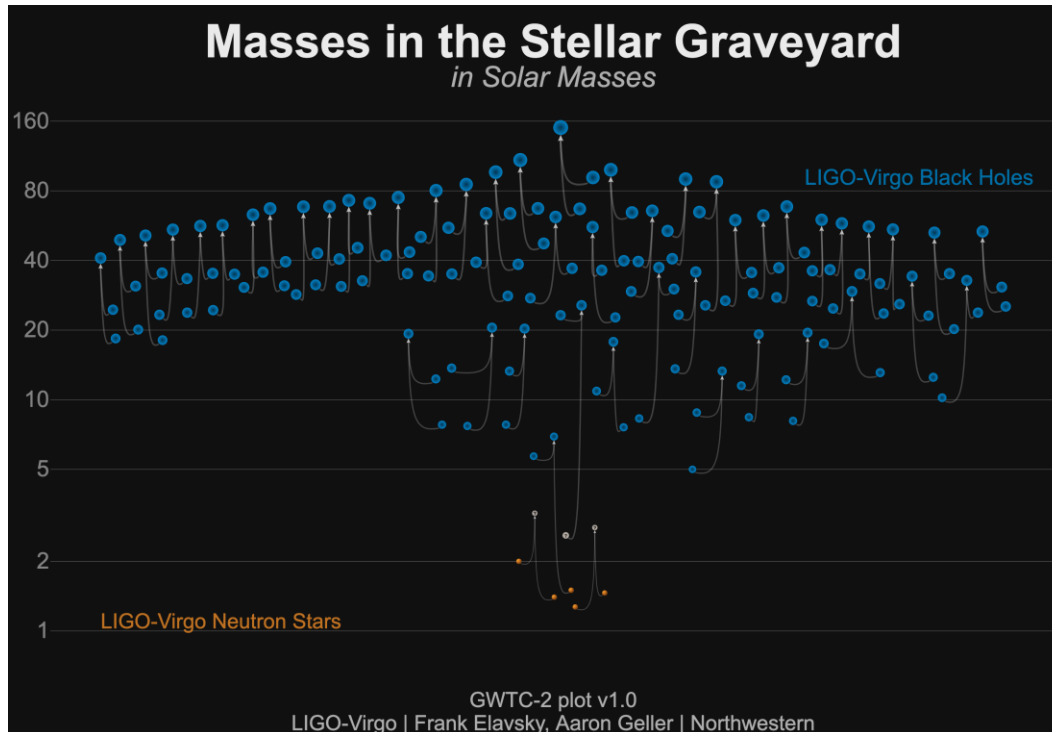


Figure 3 : Le tableau de chasses de GWTC-2 : la collection des masses d'astres compacts très divers détectés en ondes gravitationnelles. Le graphique inclut des trous noirs (en bleu), des étoiles à neutrons (en orange) ainsi que des astres dont la nature est incertaine (en gris). Chaque fusion d'un système binaire compact est représentée par trois astres sur la figure : les deux présents initialement et qui fusionnent ainsi que l'astre résultant de la fusion. (Crédits : LIGO Virgo Collaboration / Frank Elavsky, Aaron Geller / Northwestern)

Comme le montre la Figure 4, l'événement GW190521 est le poids lourd du run O3a : il est presque deux fois plus massif que GW170729 qui détenait ce record pour l'édition précédente du catalogue, [GWTC-1](#). De plus, le système GW190521 inclut probablement le trou noir initial le plus lourd jamais détecté en onde gravitationnelle : plus de 90 masses solaires. Plusieurs autres événements du nouveau catalogue affichent une masse totale au-dessus de 100 masses solaires, en particulier GW190519_153544, GW190602_175927 et GW190706_222641.

Le catalogue GWTC-2 comprend également des systèmes nettement plus asymétriques que toutes les sources du catalogue GWTC-1. Par exemple GW190412 et GW190814 dont les signaux ont dans les deux cas été émis par la fusion d'un trou noir avec un compagnon plus léger. De telles fusions asymétriques amplifient la contribution des harmoniques d'ordres supérieurs du signal d'ondes gravitationnelles, comme le montre la détection de l'événement [GW190412](#). Le nouveau catalogue contient également beaucoup d'autres premières pour l'astronomie en ondes gravitationnelles. Citons ainsi la source la plus distante jamais observée ainsi que la présence de neuf événements localisés avec précision dans une zone couvrant moins d'un pourcent du ciel.

Les mesures de rotation propre (en anglais, « spin ») peuvent apporter des informations supplémentaires sur le passé et l'évolution des systèmes doubles d'astres compacts. La rotation propre est reliée au [moment angulaire](#) de l'astre et varie entre « pas de rotation du tout » et « rotation maximale permise ». En général, les analyses mesurent les rotations propres via un paramètre appelé « spin aligné effectif » qui est une combinaison particulière des spins des deux astres compacts sur le point de fusionner. La Figure 5 montre, pour chaque événement du run O3a, l'estimation conjointe du couple (masse chirp ; paramètre de spin). Un paramètre de spin négatif signifie que les spins des astres du système binaire ne sont pas alignés, ce qui pourrait signifier que ledit système s'est formé dans un environnement dense comme un [amas globulaire](#). Sur la figure, on peut voir que GW190517_055101, dont le contour est représenté en couleur, est le système qui a le paramètre de spin le plus élevé. Le catalogue GWTC-2 ne contient pas d'évènement pour lequel le paramètre de spin est manifestement négatif ; néanmoins, le système GW190514 est probablement celui qui a le paramètre de spin le plus faible. De plus, les spins peuvent donner des informations sur une éventuelle [précession](#) du système binaire associé ; un tel comportement n'est pas exclu pour certains événements du catalogue : GW190412 et GW190521.

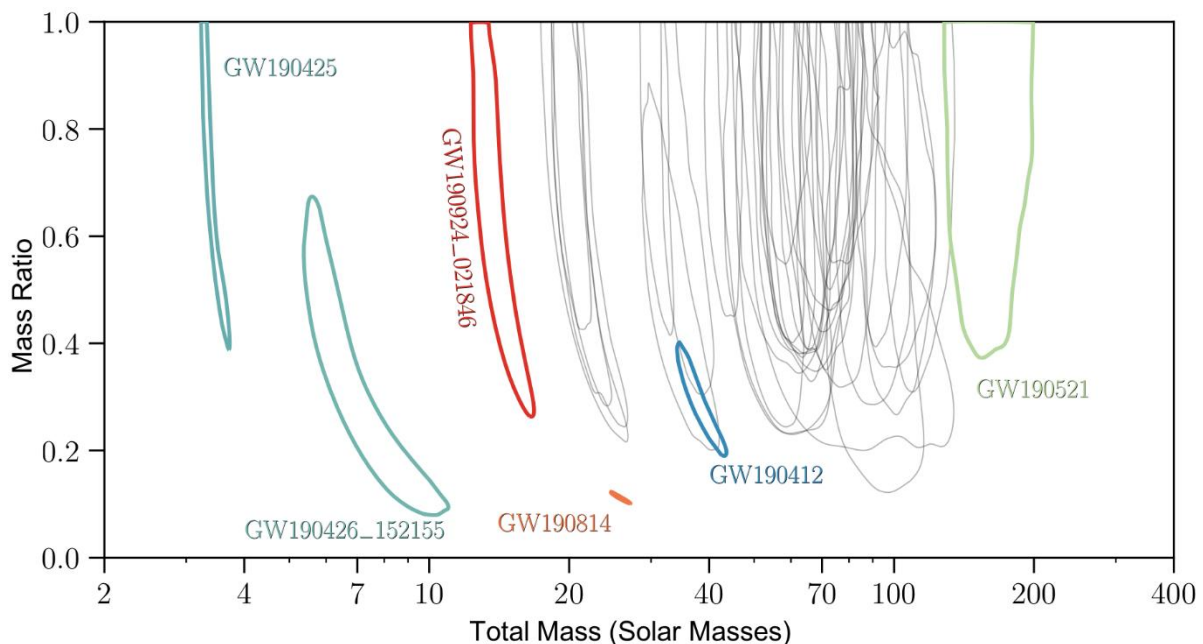


Figure 4 : Contours à 90% de confiance dans le plan masse totale (axe des abscisses) – rapport de masses (axe des ordonnées) pour tous les événements du run O3a. Six événements particuliers sont mis en valeur en couleurs, les autres contours étant gris.

Figure adaptée de la figure 6 de [l'article scientifique GWTC-2](#).

Un futur prometteur pour l'astronomie en ondes gravitationnelles

Aussi étonnant que cela puisse paraître, détecter des ondes gravitationnelles est aujourd'hui presque un processus routinier, alors que cinq ans à peine se sont écoulés depuis leur [première](#)

[détection](#) en septembre 2015. Avec 50 détections d’ondes gravitationnelles dans notre besace, nous pouvons maintenant mieux étudier les populations de trous noirs et d’étoiles à neutrons dans l’Univers (voir [ce résumé](#)). Ces nouveaux événements nous permettent également d’améliorer notre compréhension de la théorie de la Relativité Générale (voir [ce résumé](#)).

Le futur de l’astronomie en ondes gravitationnelles apparaît comme encore plus prometteur avec l’ajout de 39 nouvelles détections associées aux six premiers mois de la prise de données O3. L’analyse des données enregistrées lors de la seconde partie du run, appelée O3b, est en cours et donnera lieu à une nouvelle édition augmentée de notre catalogue GWTC. Depuis la fin de O3, les détecteurs sont engagés dans une nouvelle phase d’amélioration qui les rendra plus sensibles et augmentera leur champ d’observation lors du futur run O4 qui commencera en 2022. En parallèle de ces progrès instrumentaux et en attendant la construction de nouveaux détecteurs, la communauté scientifique des ondes gravitationnelles continuera à étudier les caractéristiques des astres compacts, trous noirs et étoiles à neutrons, qui peuplent notre Univers.

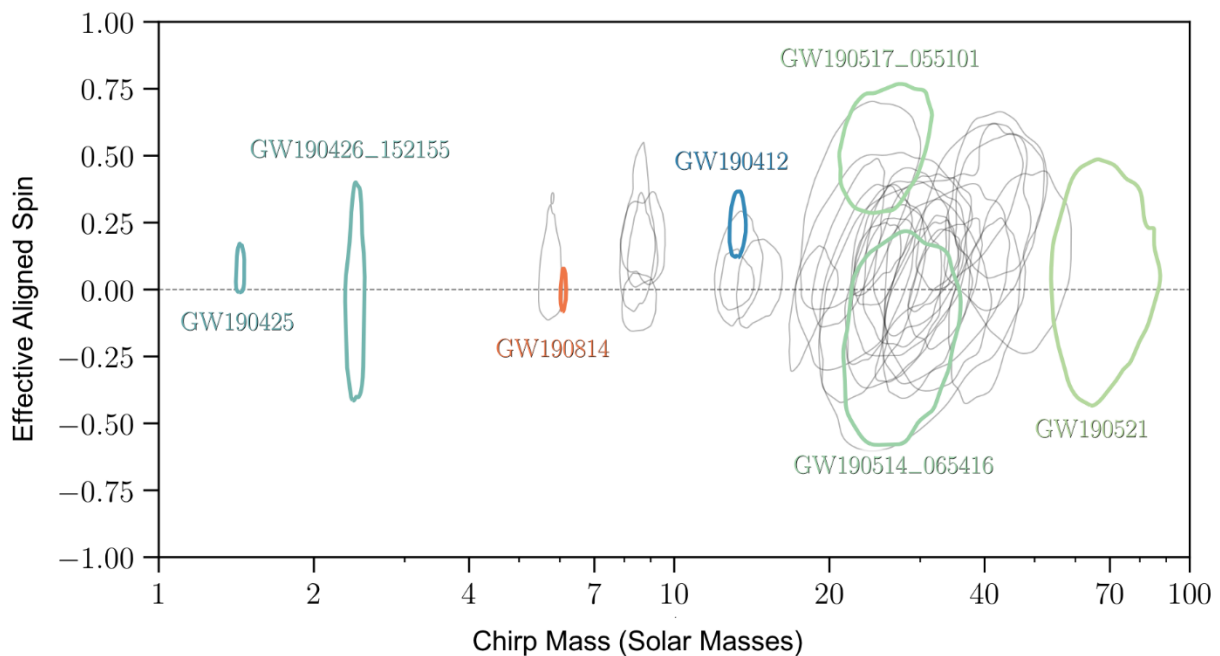


Figure 5 : Contours à 90% de confiance des paires (masse chirp ; paramètre de spin) pour tous les événements détectés pendant le run O3a. Certaines sources sont désignées par leur nom et ont leur contour tracé en couleur.

Figure adaptée de la Figure 7 de [l’article scientifique GWTC-2](#).

Glossaire

- **Astre compact** : un corps astrophysique dont la masse est concentrée dans un petit volume – au sens de la Relativité Générale, pour simplifier un corps très dense – comme un trou noir (l’astre le plus compact possible), une étoile à neutrons ou une naine blanche.



- **Estimation des paramètres** : une méthode d'analyse statistique qui permet d'estimer les paramètres astrophysiques d'une source d'ondes gravitationnelles à partir des signaux enregistrés dans les différents détecteurs.
- **Masse chirp** : une combinaison mathématique des masses des deux astres compacts du système binaire qui fusionne. Cette quantité est elle-même homogène à une masse (c'est-à-dire qu'elle s'exprime en masses solaires), ce qui explique la première partie de son nom. La deuxième vient du fait que ce paramètre décrit la manière dont la fréquence de l'onde gravitationnelle augmente au cours du temps pour les systèmes binaires légers. Ce signal, converti en son, produit une sorte de « gazouillis » : « chirp » en anglais.
- **Masse solaire** : la masse du Soleil (environ 2×10^{30} kg) ; c'est une unité de masse bien adaptée aux observations astronomiques.
- **Médiane** : la valeur qui se trouve exactement « au-milieu » d'une distribution de probabilités. La probabilité d'être inférieur à la médiane vaut 50%, tout comme celle d'être supérieur à la médiane.
- **Rapport de masses** : pour un système binaire, le rapport entre la masse de l'astre le plus léger et celle de l'astre le plus lourd.
- **Strain** : La variation relative de longueur des bras du détecteur, due à la déformation de l'espace-temps causée par le passage d'une onde gravitationnelle. Le « strain » est donc égal au changement de longueur divisé par la longueur nominale des bras.

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 : <https://www.virgo-gw.eu/GWTC-2> (cliquez sur le drapeau tricolore pour la version française) et
 - LIGO : <https://www.ligo.caltech.edu/news/ligo20201028>.
- L'article scientifique complet est accessible gratuitement [en ligne](#).
- Les données des 39 événements découverts lors du run O3a sont disponibles sur le portail du GWOSC : <https://www.gw-openscience.org/eventapi/html/GWTC-2>. Le site internet « Gravitational Wave Open Science Center » offre de nombreuses ressources (documentation sur le domaine, exemples de programmes informatiques et tutoriels) pour aider à l'exploration de ces lots de données publiques.