



LIGO
Scientific
Collaboration



Les propriétés des populations d'astres compacts après la prise de données O3a de LIGO/Virgo

Daté du 29 octobre 2020. Retrouvez cet article en ligne et dans d'autres langues à l'adresse <https://www.ligo.org/science/Publication-O3aPopulations>.

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

**

*

À quoi ressemblent les trous noirs « typiques » ? Et combien y en-a-t-il ? Est-ce que leur population a changé à mesure que l'Univers évoluait ? Que peut-on apprendre de la formation des trous noirs à l'aide des ondes gravitationnelles ?

Notre catalogue de signaux d'ondes gravitationnelles vient de connaître sa deuxième édition (« GWTC-2 », pour « Gravitational-Wave Transient Catalog 2 » en anglais), enrichie des détections faites en analysant les données du « run » O3a. Avec cette mise à jour, nous avons plus que quadruplé le nombre d'événements détectés avec confiance et présentés dans le catalogue précédent – GWTC-1. Et, tout comme ce dernier avait révélé des populations de trous noirs nouvelles par rapport à celles déjà connues par des observations électromagnétiques et nous avait conduit à nous poser des questions sur leurs origines, le catalogue GWTC-2 apporte son lot de nouvelles interrogations sur les populations astrophysiques sous-jacentes et pousse dans leurs retranchements nos meilleures théories sur la formation des trous noirs.

Deux quantités, leur masse et leur moment angulaire propre (ou « spin ») suffisent à caractériser entièrement un trou noir astrophysique. La description d'un système binaire de trous noirs demande en plus de connaître l'orientation du spin de chaque astre par rapport au plan dans lequel les deux trous noirs évoluent ainsi que la distance les séparant de la Terre. À partir de cette dernière information, on accède au temps cosmologique où les deux trous noirs ont fusionné puisque nous savons que les ondes gravitationnelles voyagent à la vitesse de la lumière.

Les scientifiques ont proposé trois scénarios de formation possibles pour les systèmes binaires de trous noirs : « sur le terrain », « dynamique » et « primordial ». Les systèmes binaires primordiaux sont faits de trous noirs qui n'ont jamais été des étoiles. Ces astres se sont formés à partir de fluctuations de densité alors que l'Univers n'avait que quelques minutes, juste après le Big-bang. Les systèmes binaires « de terrain » contiennent des trous noirs qui représentent le dernier stade d'évolution d'étoiles massives qui se sont effondrées sous l'effet de leur propre gravité. Enfin, les systèmes binaires « dynamiques » sont composés de trous noirs qui se sont formés séparément, loin l'un de l'autre ; ce n'est que bien plus tard que l'environnement dense dans lequel ils évoluaient les a faits se rencontrer. Chacun de ces scénarios conduit à des populations de trous noirs dont les caractéristiques sont statistiquement différentes. Mesurer les distributions des

paramètres des sources observées peut donc aider à faire le tri entre ces familles de systèmes binaires de trous noirs. Par exemple, on s'attend à ce que les systèmes binaires dynamiques aient des spins désalignés (c'est-à-dire orientés dans des directions différentes) alors que les systèmes de terrain devraient avoir des spins alignés.

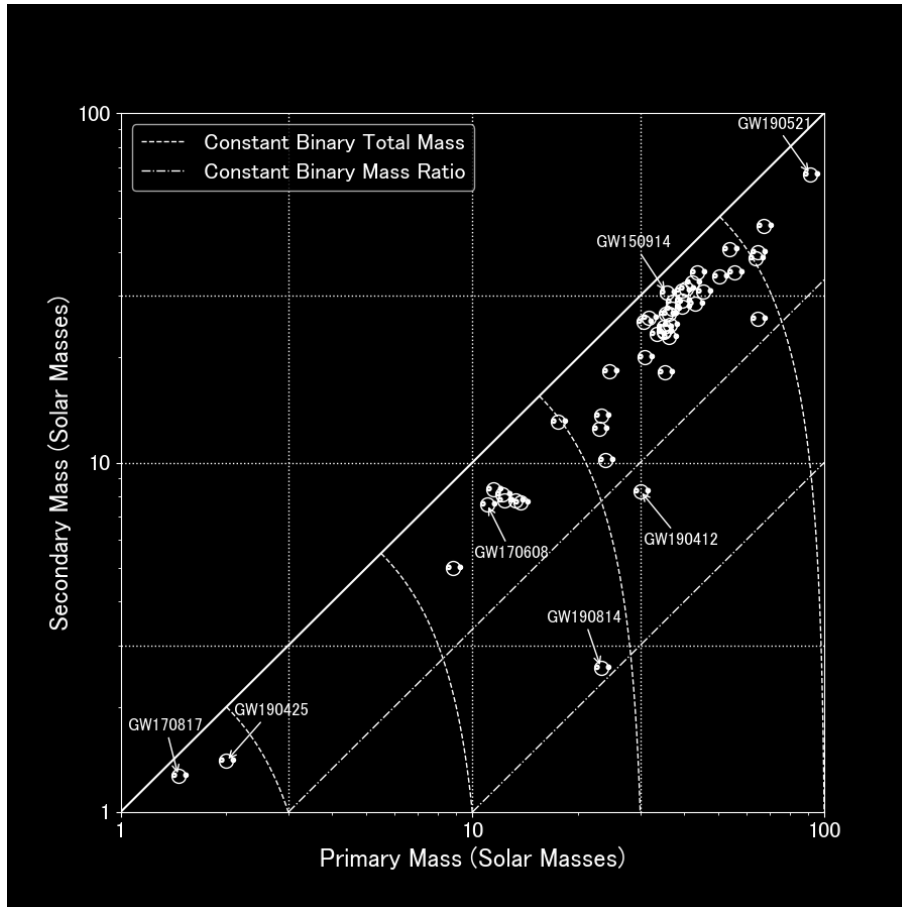


Figure 1 : Masses des astres des systèmes binaires observés pendant les runs O1, O2 et O3a qui ont été utilisés dans notre publication scientifique pour estimer les propriétés de la population d'astres compacts. Certains événements remarquables sont repérés sur le graphique par leur identifiant – les deux lettres « GW » suivie d'une date sous la forme « AnnéeMoisJour ».

Crédits : LIGO-Virgo Collaboration / IGFAE / Thomas Dent.

Les systèmes binaires de trous noirs rassemblés dans ce nouveau catalogue étendent la gamme de masses de l'édition précédente. Du côté des basses masses, ils remplissent un « vide » qui existait jusqu'alors entre les étoiles à neutrons les plus lourdes et la population de trous noirs stellaires. À l'autre extrémité du spectre de masse, on trouve des trous noirs au-delà de la coupure en masse prédite par le modèle de supernovæ par production de paires – le « mass gap » à haute masse. On mesure également certains spins non-nuls et au-moins partiellement opposés au moment angulaire global du système, des indices en faveur d'une composante dynamique dans la population de trous noirs. Ces informations, associées aux autres résultats principaux fournis par l'étude du catalogue, représentent des avancées significatives : elles permettront de se poser les bonnes questions sur les trous noirs qui peuplent notre Univers – et d'y répondre.



Le catalogue de sources d'ondes gravitationnelles transitoires GWTC-2

Les données du run O3a ont été enregistrées entre le 1^{er} avril et le 1^{er} octobre 2019 par les détecteurs Advanced LIGO (deux instruments) et Advanced Virgo. Durant cette période, 39 nouvelles fusions de systèmes binaires d'astres compacts ont été observées : un système binaire d'étoiles à neutrons, 36 systèmes binaires de trous noirs et deux possibles systèmes mixtes étoile à neutrons – trou noir. Si on leur ajoute les 11 événements du catalogue GWTC-1, on arrive à 50 détections au total, définies comme ayant toutes un taux de fausse alarme inférieur à deux par an. Pour augmenter la pureté de l'échantillon, l'analyse de la population des sources a été faite avec un taux de fausse alarme diminué à une par an : 47 candidats ont été conservés.

Distribution de masses

On pense que la plupart des trous noirs sont les restes de l'effondrement gravitationnel d'étoiles qui se terminent par une explosion en supernova. Comme les masses des étoiles suivent une distribution en loi de puissance, il est naturel de s'attendre à ce que les masses des trous noirs suivent également une distribution de ce type.

Pour le catalogue GWTC-1, la distribution de masses « supposée réelle » (ou « sous-jacente ») était bien décrite par une loi de puissance dont l'exposant était compris entre -0,1 et 3,1 et tronquée avec une limite inférieure à $7,9 M_{\odot}$ et une limite supérieure autour de $42,0 M_{\odot}$. La limite inférieure de l'intervalle de masse était énigmatique et plutôt mal déterminée. Quant à la limite supérieure, elle s'expliquait par la prise en compte du phénomène de supernovæ par production de paires. Celui-ci a lieu lorsqu'une étoile massive atteint une densité suffisante pour produire des paires électron-positron, ce qui induit une baisse soudaine de la pression interne de l'étoile. L'effondrement et l'explosion qui s'ensuivent dispersent complètement la matière formant l'étoile, ne laissant aucun trou noir derrière eux. On pense que cette instabilité empêche la formation de trous noirs de masse comprise entre environ 50 et $150 M_{\odot}$ à partir de supernovæ.

La situation est complètement différente avec le nouveau catalogue GWTC-2. Le trou noir le plus léger est plus « petit » que ce que l'on pensait possible (sa masse est $2,3 M_{\odot}$ ou $6 M_{\odot}$, selon que l'astre compact le plus léger du système GW190814¹ est un trou noir ou une étoile à neutrons) tandis que le trou noir le plus massif est plus lourd ($55 M_{\odot}$, voire plus de $80 M_{\odot}$ si l'on inclut GW190521²). La distribution de masses maintenant préférée est une loi de puissance dont l'exposant est compris entre 2,00 et 2,73. Et, au-lieu de présenter une coupure nette à haute masse, la nouvelle distribution est mieux décrite en ajoutant une « courbe en cloche » qui atteint son maximum quelque part entre 28 et $38 M_{\odot}$. Comment expliquer ce pic ? Des environnements stellaires très denses, comme ceux qui se trouvent au cœur d'amas globulaires, pourraient

¹ Dont la masse mesurée est de 2,3 masses solaires.

² Un événement particulier dont l'un des trous noirs initiaux a une masse mesurée autour de $85 M_{\odot}$.

permettre à des trous noirs de passage de perturber le potentiel gravitationnel de systèmes binaires de trous noirs, les forçant à se rapprocher et donc augmentant leur taux de fusion – plus les deux astres compacts sont rapprochés et plus ils vont fusionner rapidement. On dit que ces systèmes binaires fusionnent par interactions dynamiques.

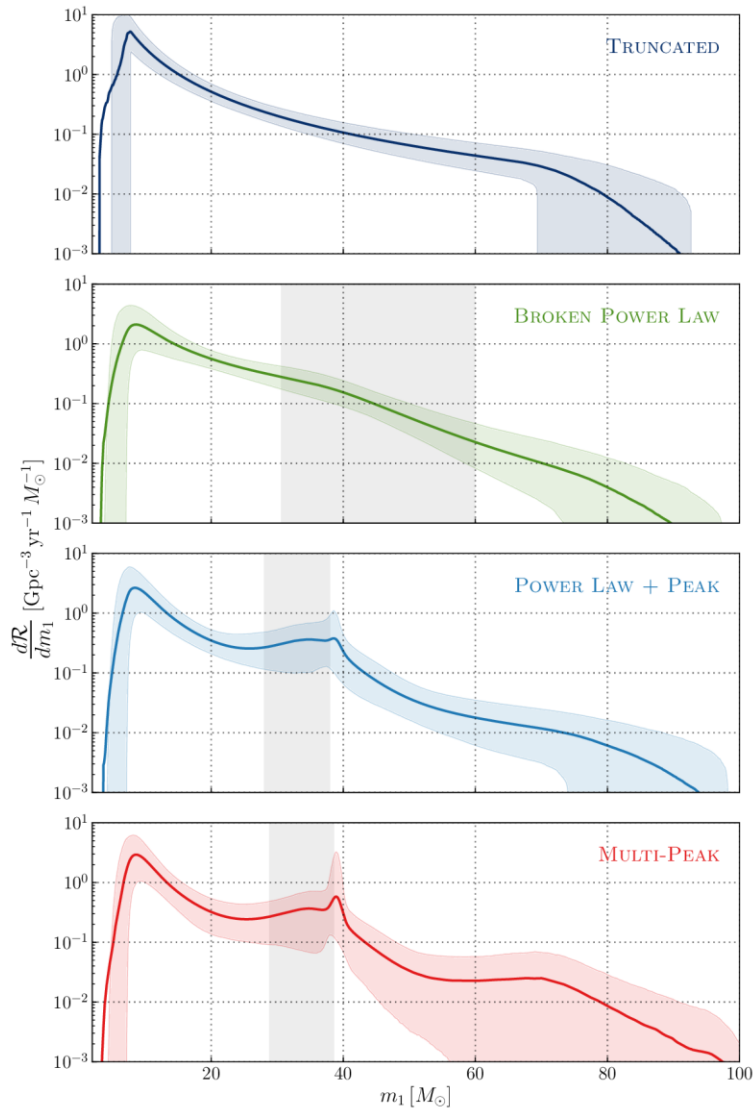


Figure 2 : Cette image compare les probabilités de mesurer une masse de trou noir donnée pour quatre hypothèses différentes sur la forme de la vraie distribution de masses. Pour chaque graphique, la courbe en trait plein correspond à la distribution moyenne tandis que les zones ombrées délimitent les intervalles à 90% de confiance. Les modèles dont la distribution ajustée présente un pic sont ceux qui décrivent le mieux les données. Il s'agit de la Figure 3 de la publication scientifique associée.

Ces interactions modèlent des distributions particulières pour les masses et les spins des trous noirs qui fusionnent ainsi. La conservation de la quantité de mouvement favorise d'une part les masses importantes avec des vitesses basses et d'autre part les masses faibles avec des vitesses plus



élevées, ce qui force les astres les plus lourds à se trouver sur des orbites proches du centre de l'amas. Les systèmes binaires les plus massifs se trouvent donc dans un environnement plus dense où ils ont une probabilité plus importante d'avoir des interactions dynamiques, ce qui augmente leur contribution à la distribution de masses des trous noirs qui fusionnent. Si des trous noirs produits par fusion dynamique fusionnent à leur tour, on peut se retrouver avec des astres dont les masses sont dans l'intervalle qui devrait être vide à cause de l'instabilité des supernovæ par production de paires. D'autres mécanismes de formation, comme ceux des trous noirs primordiaux, pourraient également produire des pics en forme de cloche dans la distribution en masse des trous noirs.

A contrario, si la coupure brutale en masse qui est la signature de l'instabilité par production de paires des supernovæ pouvait être adoucie et répartie sur une gamme de masses assez large, l'accumulation de trous noirs à haute masse aurait une explication qui ne nécessiterait pas de contribution des interactions dynamiques.

Chacun de ces différents scénarios de formation a été pris en compte en ajoutant une courbe en cloche en plus de la distribution de référence en loi de puissance. Le cas où plus d'un mécanisme aurait été à l'œuvre a été étudié en ajoutant des courbes en cloche supplémentaires à haute masse. La Figure 2 montre les différents modèles de populations astrophysiques qui ont été testés.

Enfin, alors que chaque système binaire du catalogue GWTC-1 était composé de deux astres de masses comparables (on dit que les systèmes avaient des rapports de masses proches de 1), la nouvelle édition GWTC-2 contient deux événements, GW190814 et GW190412, dont les rapports de masses sont sans ambiguïté différents de 1. GW190814 se démarque à la fois au niveau de la masse de l'astre le plus léger du système et du rapport de masses : il semble donc être représentatif d'une nouvelle population.

Distribution de spins

En pratique, on utilise deux paramètres phénoménologiques pour décrire les formes d'ondes gravitationnelles : le spin effectif de précession et le spin effectif. La première quantité décrit la précession du plan orbital induite par les spins des astres compacts tandis que la seconde rend compte de la manière dont l'évolution du système vers la fusion est accélérée ou ralentie par l'alignement des spins des trous noirs par rapport au moment angulaire global.

On s'attend à ce que les systèmes binaires de trous noirs de terrain contiennent des astres dont les spins sont presque alignés alors que les systèmes binaires formés de manière dynamique devraient plutôt être désalignés. En conséquence, les fusions de systèmes dynamiques devraient présenter une précession et environ la moitié d'entre-eux devraient avoir des spins anti-alignés.

Alors que les événements du catalogue GWTC-1 ne présentaient pas de caractéristique allant dans le sens d'un tel phénomène, nous voyons des indices d'une possible précession dans ceux de la nouvelle édition. De plus, au-delà d'une préférence globale pour des spins faibles et alignés avec le moment angulaire orbital, le catalogue GWTC-2 montre qu'entre 2% et 50% des systèmes binaires de trous noirs détectés ont des spins anti-alignés – cette tendance reste valable même si

l'on retire GW190814 du catalogue, l'évènement qui ressemble le moins aux autres, quelle que soit la manière dont on les compare.

Les spins de systèmes binaires formés par des trous noirs eux-mêmes issus de fusions précédentes devraient avoir hérité l'essentiel de leurs caractéristiques du moment angulaire orbital des systèmes originaux. Ainsi, une preuve tangible de l'existence d'un processus de formation dynamique serait d'identifier des distributions de spin qui varient pour des populations en masse différentes. Aucune indication en ce sens n'est visible dans le catalogue GWTC-2.

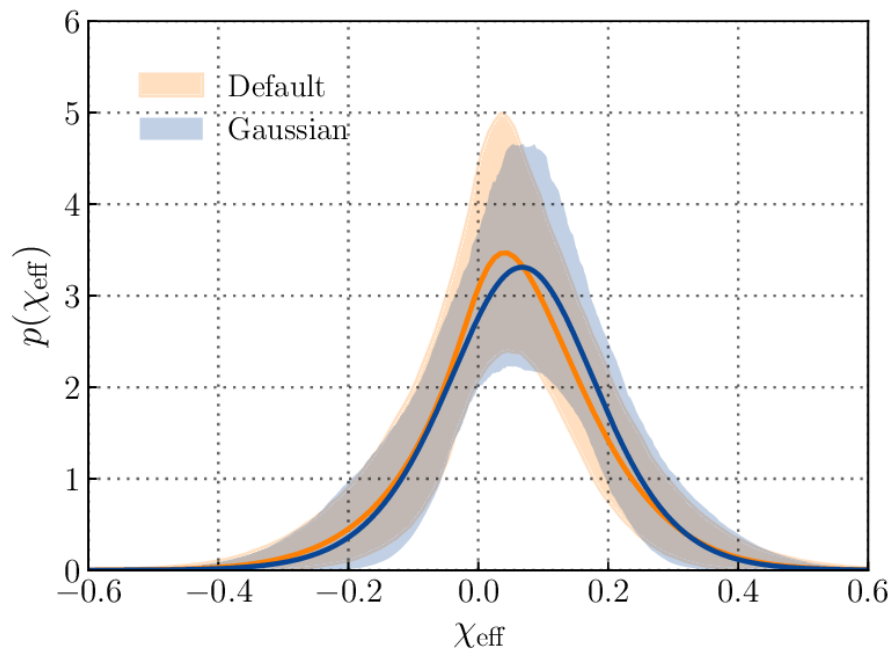


Figure 3 : Ce graphique montre la distribution du paramètre de spin effectif χ_{eff} pour deux modèles différents. On peut voir que, même si la plupart des spins sont alignés avec le moment orbital angulaire, une partie non négligeable des astres ont leur spin qui tourne dans la direction opposée.

Il s'agit de la Figure 11 de la publication scientifique associée.

Evolution du taux de fusion en fonction du redshift

On pense que l'Univers est en expansion homogène depuis le Big-bang. Cet étirement entraîne tout avec lui, y compris les ondes électromagnétiques et les ondes gravitationnelles. Lorsqu'une onde s'étire, sa fréquence change. Pour la lumière visible, cela revient à changer sa couleur qui se décale du bleu vers le rouge : c'est pour cela qu'on parle de « décalage vers le rouge » – « redshift » en anglais. Plus l'astre observé est lointain, plus le taux d'expansion qu'il subit est important et plus son redshift est grand. Ainsi, le redshift est une autre manière de mesurer les distances dans le cosmos – ainsi que les durées, puisque les vitesses de propagation de la lumière et des ondes gravitationnelles sont constantes (et égales). Donc, plus un système binaire a un redshift élevé et plus sa fusion s'est produite il y a longtemps.

Mesurer l'évolution en fonction du redshift du taux de fusion des systèmes binaires de trous noirs et la comparer avec celle du taux de formation des étoiles permet de mieux comprendre comment les systèmes binaires compacts se forment. Imaginons un cube dont le côté soit égal à 1000 fois la distance qui nous sépare de la galaxie d'Andromède : dans un tel volume, environ 11 fusions de systèmes binaires de trous noirs se produisent chaque année. Comme le montre la Figure 4, ce taux est compatible à la fois avec une population de systèmes binaires qui n'évolue pas au cours du temps cosmologique et avec l'évolution du taux de formation des étoiles. Dans le même cube et pendant la même durée (un an), le nombre de fusions d'étoiles à neutrons est égal à 150 environ. C'est moins que le taux estimé à partir du catalogue GWTC-1. Cela s'explique par le fait que GWTC-2 ne contient qu'un seul événement compatible avec la fusion de deux étoiles à neutrons alors que l'observation du cosmos pendant le run O3a a été plus poussée.

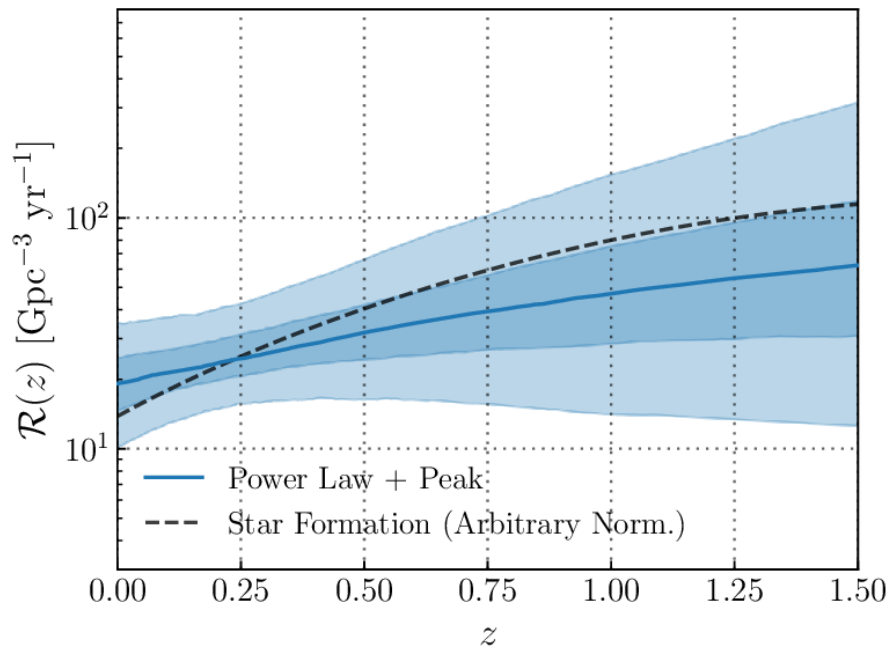


Figure 4 : La densité du taux de fusion en fonction du décalage vers le rouge (z , « redshift » en anglais), ajustée au modèle « Evolution en loi de puissance ». La ligne en trait bleu continu montre la densité médiane tandis que les régions colorées, foncée / claire délimitent, à chaque valeur de z , l'intervalle de confiance à $1\sigma/2\sigma$. Les données favorisent légèrement une évolution du taux de fusion en fonction du redshift mais elles sont aussi compatibles avec une distribution « plate » – c'est-à-dire sans évolution.

Cette Figure est la Figure 14 de l'article scientifique associé.

Des questions qui restent en suspens

Même si une image plus claire des propriétés des populations de systèmes binaires compacts émerge peu à peu, il reste des questions clés qui n'ont pas encore de réponse. Comment décrire précisément l'écart par rapport à une loi de puissance de la distribution mesurée pour les masses



LIGO
Scientific
Collaboration



des trous noirs des systèmes binaires observés et quelle est l'origine physique de cette déviation ? D'où viennent les systèmes binaires de trous noirs détectés qui appartiennent au « mass gap » ? De fusions en chaîne, d'étoiles produisant des vestiges plus lourds que ceux permis par la théorie des supernovæ par production de paires, d'autres phénomènes encore inconnus ? Est-ce que l'observation de spins anti-alignés est une indication de fusions dynamiques ? Cette hypothèse pourrait être confirmée par l'observation de systèmes binaires excentriques dont on s'attend à l'existence en cas de fusions dynamiques. Une détection certaine de fusions de systèmes binaires hiérarchiques (caractérisés par des masses et des spins élevés) mettrait en lumière la contribution de ces sources dans la gamme de fréquences accessibles à LIGO et Virgo.

**

*

Glossaire

- **Distribution en loi de puissance** : La probabilité p qu'un trou noir donné ait une masse m est proportionnelle à la valeur de cette masse élevée à une certaine puissance α :

$$p(m) \propto m^\alpha$$

α est l'exposant de la loi de puissance : il contrôle la rapidité avec laquelle la probabilité varie en fonction de la masse du trou noir.

- **Explosion de supernova** : Une explosion très lumineuse et très brève qui se produit au cours des dernières étapes de l'évolution d'une étoile massive qui a épuisé son combustible nucléaire.
- **Masse solaire M_\odot** : La masse du Soleil est une unité de masse commune en astronomie.
- **Spin** : Le moment angulaire d'un trou noir autour de son centre de masse, caractérisé par un nombre, la vitesse de rotation de l'astre et une direction, l'axe de rotation du trou noir.

Pour en savoir plus

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



- Lisez l'annonce des découvertes du run O3a sur les sites internet de
 - Virgo : <https://www.virgo-gw.eu/GWTC-2> (cliquez sur le drapeau tricolore pour la version française) et



LIGO
Scientific
Collaboration



- LIGO : <https://www.ligo.caltech.edu/news/ligo20201028>.
- L'article scientifique complet, *Population Properties of Compact Objects from the Second LIGO-Virgo Gravitational-Wave Transient Catalog*, est accessible gratuitement [ici](#).
- 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.
- Les trois autres articles mis en ligne le même jour sur le serveur de prépublications en ligne arXiv sont :
 - [GWTC-2: Compact Binary Coalescences Observed by LIGO and Virgo During the First Half of the Third Observing Run](#)
 - [Tests of General Relativity with Binary Black Holes from the second LIGO-Virgo Gravitational-Wave Transient Catalog](#)
 - [Search for Gravitational Waves Associated with Gamma-Ray Bursts Detected by Fermi and Swift During the LIGO-Virgo Run O3a](#)