



LIGO
Scientific
Collaboration



À la recherche d'ondes gravitationnelles cachées, produites par des sursauts gamma pendant O3a

Daté du 29 octobre 2019. Retrouvez cet article en ligne et dans d'autres langues à l'adresse <https://www.ligo.org/science/Publication-O3aGRB>.

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

**

*

Les **sursauts gamma** (en abrégé « GRBs » pour « Gamma-Ray bursts en anglais) sont des émissions extrêmement intenses de **rayons gamma**, des photons de haute énergie. Ils se produisent loin dans le cosmos et on en détecte environ un par jour. Les GRBs sont émis sous forme de jets de photons coniques et étroits ; ils sont si puissants qu'on peut détecter des sources situées à des milliards d'années-lumière.

Il y a au moins deux types d'événements astrophysiques qui peuvent donner naissance à un GRB. Les GRBs « longs » sont les plus courants (environ 70% du total). On a pu en associer certains à des explosions en **supernova** ce qui renforce l'idée que cette catégorie de signaux transitoires est due à des étoiles massives en fin de vie dont le noyau s'effondre sur lui-même sous l'effet de la gravité que les réactions nucléaires, éteintes, ne parviennent plus à compenser. Les GRBs produits de cette façon ont une durée qui va de quelques secondes à plusieurs minutes. Au contraire, les GRBs « courts » ont une durée plus limitée : de quelques millisecondes à quelques secondes au plus. On pense que la plupart de ces sursauts – voire tous – sont dus à la fusion de paires d'astres très denses, les **étoiles à neutrons**, ou à un **trou noir** qui déchiquette littéralement une étoile à neutrons qu'il est en train d'engloutir.

Pour les deux types de sursauts gamma, il est possible qu'une grande quantité de matière soit violemment accélérée d'une manière telle que des ondes gravitationnelles soient générées en association avec le GRB et se propagent jusqu'à la Terre. C'est par exemple ce qui s'est passé pour l'événement [GW170817](#), dont l'émission d'ondes gravitationnelles avait accompagné un GRB court dans une galaxie proche.

C'est pourquoi il est très important que les chercheurs d'ondes gravitationnelles surveillent les détections de GRBs publiées par [Fermi](#) et le [Neil Gehrels Swift Observatory](#), deux télescopes à rayons gamma embarqués sur des satellites en orbite autour de la Terre. Lorsque la détection d'un nouveau GRB est annoncée, nous pouvons vérifier si les données enregistrées par **LIGO** et **Virgo** contiennent une onde gravitationnelle en provenance de la même région du ciel et détectée au même moment. Cette approche – une recherche d'ondes gravitationnelles guidée par des observations indépendantes – devrait nous permettre de détecter des signaux faibles que nous aurions manqués sans ces informations supplémentaires.

Comment chasser les ondes gravitationnelles

Il y a deux méthodes principales pour chasser les ondes gravitationnelles. La première ne suppose rien sur la forme du signal cherché ; par contre, elle requiert la présence dudit signal dans les données LIGO et Virgo et que les formes d'ondes observées par les différents détecteurs soient compatibles. Ce type de technique pourrait donc aussi bien détecter les ondes gravitationnelles émises par une fusion d'étoiles à neutrons que lors de l'**effondrement gravitationnel d'une étoile massive**. Cette méthode de recherche *générique* est utilisée à chaque fois qu'un GRB est observé et que nos détecteurs enregistrent des données à ce moment-là. La seconde méthode ne s'intéresse qu'aux signaux qui ont une forme particulière, appelée « **chirp** » – « gazouillis » en français. Ceux-ci sont émis lorsque des paires d'astres compact très denses (trous noirs ou étoiles à neutrons) ont un mouvement en spirale l'un autour de l'autre avant de fusionner. C'est pourquoi cette méthode de recherche *ciblée* est mise en œuvre lorsque l'on pense être en présence d'un GRB court, produit lors d'une telle collision. En pratique, elle est choisie lorsque la durée du GRB est inférieure à quatre secondes, afin d'être sûr de ne laisser de côté aucun GRB court par erreur.

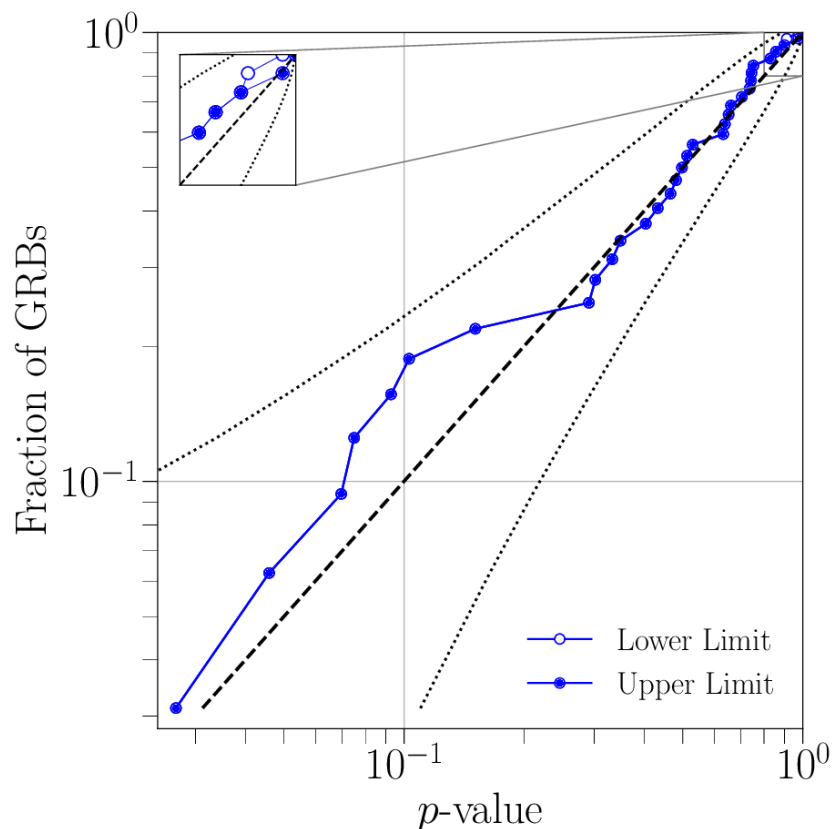


Figure 1 : La recherche ciblée sélectionne le meilleur candidat « signal d'ondes gravitationnelles » pour chaque GRB court et fournit également une estimation de son intensité. On utilise alors des données prises à d'autres moments (sans GRB) pour calculer la probabilité que ce candidat soit dû à une fluctuation du bruit de mesure et ne soit donc pas un vrai signal d'ondes gravitationnelles : c'est la « **p-value** ». Le graphique montre la répartition des p-values

des 32 candidats (les points bleus joints par des lignes) : l'axe horizontal donne la valeur de la p -value (inférieure à 1, en échelle logarithmique) tandis que l'axe vertical représente la fraction des candidats dont la p -value est inférieure à une valeur donnée (là-aussi une échelle logarithmique avec 1 pour valeur maximale et $1/32$ pour valeur minimale). La ligne pointillée noire en trait épais (qui est en fait la diagonale du graphique) montre la courbe idéale correspondant au cas où tous les candidats sont des fluctuations du bruit à des temps aléatoires (et qu'il n'y a pas d'onde gravitationnelle dans les données). Plus la p -value d'un candidat est élevée (c'est-à-dire plus le point est décalé vers la droite du graphique) et plus la probabilité qu'il soit dû au bruit est importante. Les deux lignes aux pointillés plus serrés qui forment une sorte de cône délimitent la région dans laquelle la distribution réelle peut fluctuer par rapport à la courbe idéale à cause du caractère aléatoire du bruit de mesure. On peut voir que tous les candidats sont à l'intérieur de cette zone, ce qui démontre que les résultats obtenus sont compatibles avec la présence de bruit de mesure uniquement.

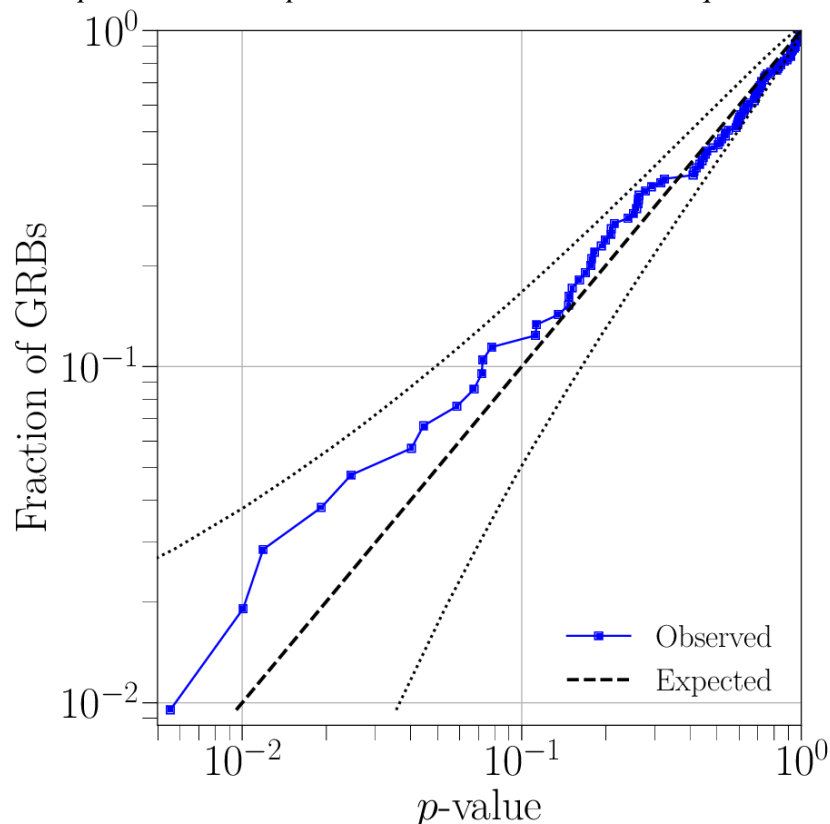


Figure 2 : Ce graphique montre les mêmes résultats que la Figure 1, mais cette fois-ci pour l'analyse générique qui a été appliquée à 105 GRBs.

Les résultats de la recherche d'ondes gravitationnelles associées à des GRBs pendant O3a

La campagne de prise de données commune LIGO-Virgo appelée O3a a démarré le 1^{er} avril 2019 pour s'achever le 1^{er} octobre de la même année. Au cours de cette période, 105 GRBs ont été étudiés avec la méthode de recherche générique tandis que la méthode de recherche ciblée a été

employée pour les 32 GRBs les plus courts. Aucune onde gravitationnelle associée à l'un de ces signaux n'a été détectée – voir les Figures 1 et 2 pour avoir plus de détails. Ce résultat négatif n'est pas complètement inattendu pour deux raisons. La première est que les GRBs produisent des faisceaux de rayons gamma très collimés (étroits) : la plupart de ces cônes n'atteignent donc pas la Terre et passent inaperçus. De plus, les sources des GRBs sont généralement très lointaines et donc hors de portée des détecteurs d'ondes gravitationnelles étant données leurs sensibilités actuelles.

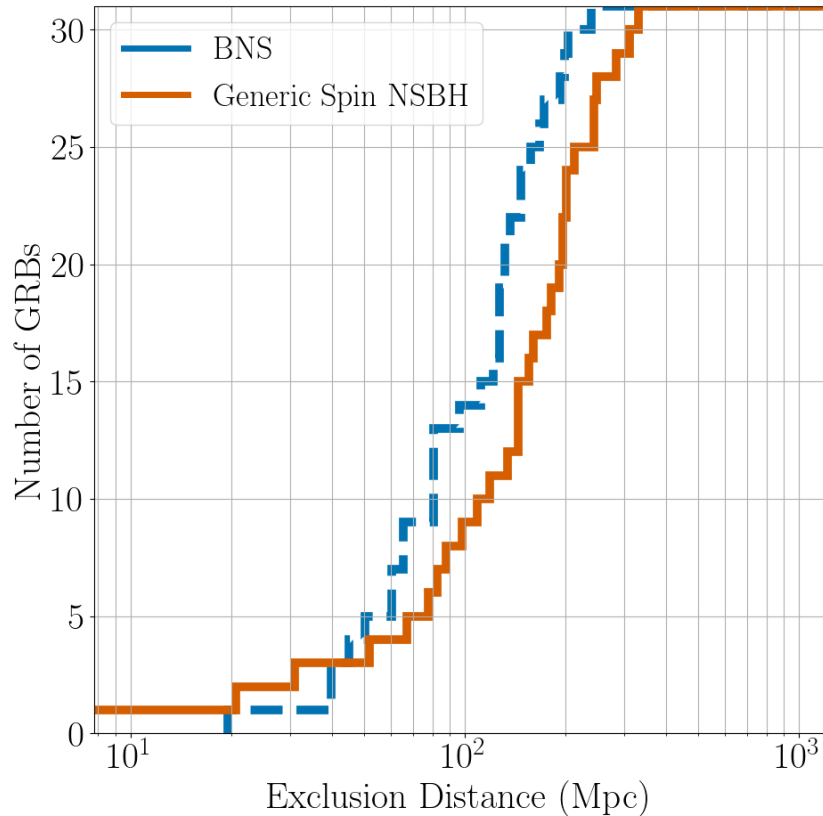


Figure 3 : Ce graphique montre la répartition des distances d'exclusion des GRBs obtenues avec l'analyse ciblée pour deux types de sources. L'axe horizontal, en échelle logarithmique, donne la distance d'exclusion en mégaparsecs (Mpc) tandis que l'axe vertical, en échelle linéaire, compte le nombre de GRBs dont la distance d'exclusion est inférieure à une valeur donnée. La ligne pointillée bleue correspond au cas de fusions d'étoiles à neutrons (acronyme « BNS » en anglais) tandis que la ligne continue orange illustre le cas de systèmes binaires « hybrides » : un trou noir et une étoile à neutrons (« NSBH »). Pour chaque modèle de signal d'ondes gravitationnelles, la distance d'exclusion est la distance la plus faible à laquelle la source du GRB pourrait se trouver sans que le signal n'ait été détecté. On l'estime en injectant de faux signaux dans les données enregistrées autour du temps d'arrivée du GRB étudié. La distance d'exclusion est la distance la plus faible à partir de laquelle moins de 90% des signaux simulés sont retrouvés par l'analyse.

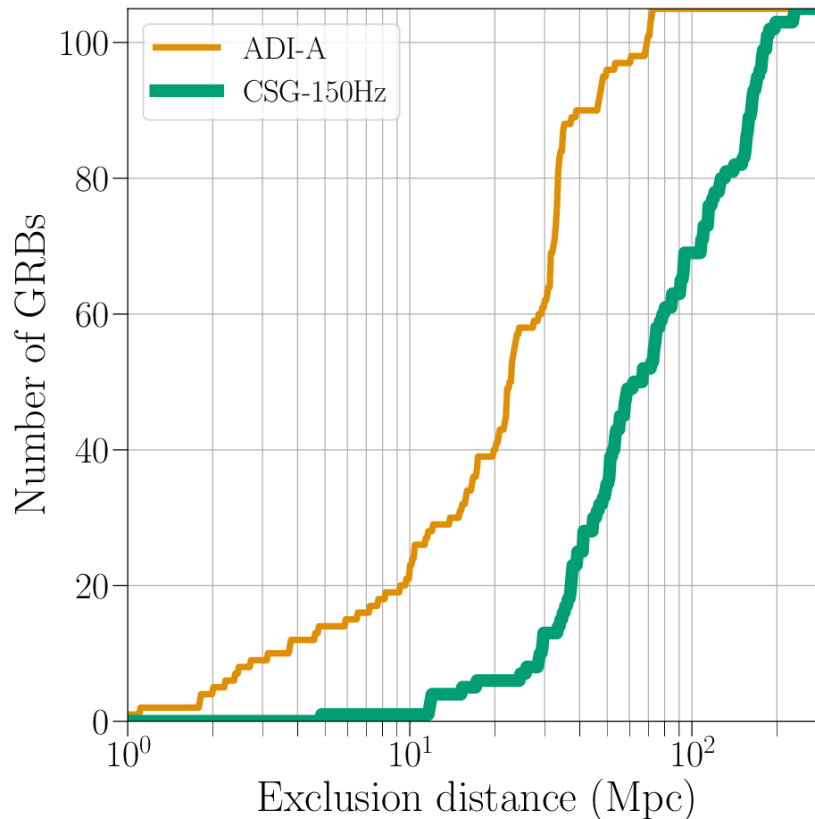


Figure 4 : Il s'agit du même type de graphique que la Figure 3, mais cette fois-ci pour la méthode d'analyse générique qui ne suppose pas que les signaux d'ondes gravitationnelles sont des chirps. Dans ce cas-là, les faux signaux injectés correspondent à deux mécanismes possibles pour les GRBs. Le premier modèle, appelé ADI-A (courbe orange), simule l'émission d'ondes gravitationnelles par un gros morceau de matière dans un disque d'accrétion autour d'un trou noir. Le second modèle, CSG (courbe verte), traite le cas où la forme d'onde gravitationnelle est un signal oscillant qui s'amortit rapidement (un « sinus gaussien » dans le jargon scientifique), une approximation générique simple pour une bouffée d'ondes gravitationnelles.

À chaque fois que la recherche d'une contrepartie « ondes gravitationnelles » à un GRB est bredouille, on estime la distance jusqu'à laquelle différents types de signaux auraient été détectés de manière fiable par les instruments à l'instant du GRB. Cette étude se fait en ajoutant de faux signaux simulés aux vraies données et en comptant lesquels sont détectés par les mêmes méthodes de recherche que celles qui scannent les données. Pour chaque GRB étudié individuellement, cela permet de conclure que s'il a produit une onde gravitationnelle d'un type particulier, alors sa source est plus lointaine que la « distance d'exclusion » calculée à l'aide de la simulation décrite à la phrase précédente. En effet, si la source avait été plus proche, elle aurait certainement été détectée. Mis ensemble, les résultats de toutes ces recherches indépendantes permettent d'obtenir la distribution de cette distance d'exclusion – voir Figures 3 et 4.

L'exemple du GRB 190610A

Pour une grande partie des GRBs, la distance de la source n'est pas connue. Néanmoins, nos analyses peuvent amener des contraintes intéressantes, comme le montre l'exemple du GRB 190610A. Pour ce sursaut, l'analyse ciblée appliquée au cas d'une fusion de deux étoiles à neutrons conclut que la source devrait se trouver à au moins 63 Mpc de la Terre, c'est-à-dire à environ 200 millions d' **années-lumière**. Or ce GRB a été localisé avec précision (voir Figure 5) : il provient d'une direction très proche d'une galaxie située à 165 Mpc (environ 600 millions d'années-lumière). On ne peut donc pas exclure le fait qu'une collision entre deux étoiles à neutrons se soit produite dans cette galaxie et ait généré le GRB 190610A.

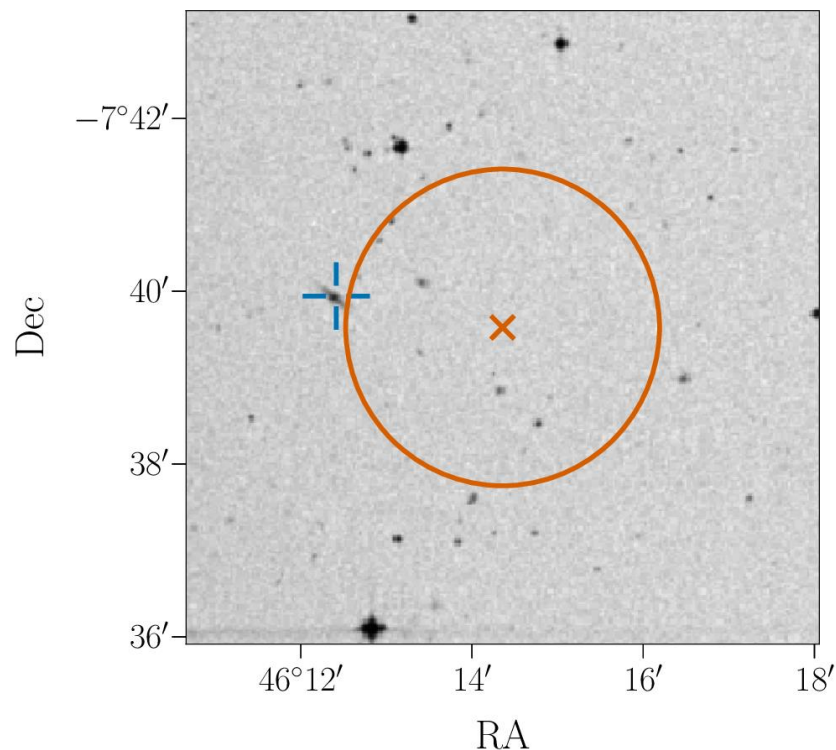


Figure 5 : Cette photo d'une très petite région du ciel montre, en orange, le contour de la « boîte d'erreur » associée à la localisation du GRB 190610A. Ce sursaut gamma aurait pu se produire dans une galaxie située à 165 Mpc (environ 600 millions d'années-lumière), indiquée par la mire bleue sur la gauche du cercle. Cette galaxie est au-delà de notre distance d'exclusion pour ce GRB : on ne peut donc pas exclure cette possibilité.

Perspectives

Bien que le run O3a n'ait pas produit de nouvelle coïncidence entre un GRB et un signal d'ondes gravitationnelles (GW170817 est le premier exemple observé d'une telle association), des programmes ambitieux sont en cours pour rendre les détecteurs LIGO et Virgo plus performants. À mesure que leurs sensibilités s'amélioreront, nous aurons toujours plus de chances de détecter les contreparties ondes gravitationnelles de GRBs. Et la combinaison des informations fournies par ces deux messagers très différents pourra amener des avancées majeures au niveau de la



compréhension des mécanismes de formation et des propriétés des énigmatiques sursauts de rayons gamma.

Glossaire

- **Année-lumière** : Une unité de longueur correspondant à la distance parcourue en une année et dans le vide par la lumière. Elle correspond à environ 9 460,730 milliards de kilomètres.
- **Chirp** : Un chirp (que l'on pourrait traduire par « gazouillis » en français) est le nom que l'on donne à la forme du signal d'onde gravitationnelle que l'on observe lorsqu'une paire de deux astres compacts, trous noirs ou étoiles à neutrons, ont un mouvement de spirale l'un vers l'autre avant de fusionner. La fréquence et l'amplitude d'un chirp augmentent avec le temps, un peu comme le chant d'un oiseau.
- **Effondrement du cœur d'une étoile massive** : Les étoiles massives produisent du fer lors des réactions de fusion nucléaire en leur sein. Ce fer migre vers le centre de l'étoile où il forme son cœur. Lorsqu'il dépasse un certain poids, ce cœur de fer s'effondre sur lui-même sous l'effet de son propre poids et de la pression extérieure, ce qui conduit à l'effondrement de l'étoile toute entière.
- **Étoile à neutrons** : Le vestige, extrêmement dense, de l'effondrement d'une étoile massive. Une étoile à neutrons typique a une masse environ 500 000 fois plus importante que celle de la Terre, mais concentrée dans un volume de seulement 30 km de diamètre.
- **LIGO** : Le « Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory » se compose de deux détecteurs interférométriques d'ondes gravitationnelles dont les bras perpendiculaires font 4 kilomètres de long. Distants d'environ 3 000 km, ces instruments se trouvent à Hanford dans l'Etat de Washington et à Livingston en Louisiane.
- **Mégaparsec (Mpc)** : Une unité de longueur adaptée aux distances cosmologiques, égale à environ 3,26 millions d'années-lumière.
- **P-value** : Une manière de quantifier la signification statistique d'une mesure particulière. En gros, calculer une p-value permet de répondre à la question : quelle est la probabilité que le résultat soit dû au bruit de fond ? Ainsi, plus la p-value est faible, plus le candidat a de chances d'être un vrai signal d'ondes gravitationnelles.
- **Radiations électromagnétiques** : Toutes les formes de « lumière » dont seule une petite partie est visible par l'œil humain. En balayant le spectre électromagnétique du rayonnement le moins énergétique au plus énergétique, on trouve successivement : les ondes radio, l'infrarouge, le visible, l'ultraviolet, les rayons X et les rayons gamma.
- **Rayons gamma** : La région la plus énergétique du spectre électromagnétique.
- **Supernova** : Une explosion violente dans le cosmos, qui se manifeste souvent sous la forme d'un nouvel astre brillant dans le ciel et dont la lumière s'estompe peu à peu. Ainsi, une supernova peut être temporairement aussi brillante que l'ensemble de sa galaxie hôte. Il y a différents types de supernovæ : certaines issues de l'effondrement d'étoiles massives, d'autres dues à la fusion de deux naines blanches.
- **Sursauts gamma** : Des bouffées brèves de photons très énergétiques appelés rayons gamma. Ces GRBs peuvent durer jusqu'à quelques dizaines de secondes.



- **Trou noir** : Une région de l'espace-temps due à la présence d'un astre extrêmement compact (dense) et où la gravité est si intense que rien, pas même la lumière, ne peut en sortir une fois entrée à l'intérieur.
- **Virgo** : Virgo est un détecteur interférométrique d'ondes gravitationnelles (bras de 3 km) situé à Cascina, près de Pise, en Italie.

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 : <https://www.ligo.caltech.edu/news/ligo20201028>.
- L'article scientifique complet, *Search for Gravitational Waves Associated with Gamma-Ray Bursts Detected by Fermi and Swift During the LIGO-Virgo Run O3a*, est accessible gratuitement [ici](#).
- 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](#)
 - [Population Properties of Compact Objects from the Second LIGO-Virgo Gravitational-Wave Transient Catalog](#)
 - [Tests of General Relativity with Binary Black Holes from the second LIGO-Virgo Gravitational-Wave Transient Catalog](#)