

À la recherche d'ondes gravitationnelles faibles émises lors de sursauts gamma pendant la prise de données O3b

Daté du 8 novembre 2021. Retrouvez cet article en ligne et dans d'autres langues à l'adresse <https://www.ligo.org/science/Publication-O3bGRB>.

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

Introduction

À ce jour, beaucoup de signaux d'ondes gravitationnelles ont été observés par les détecteurs LIGO et Virgo -- voir [cet article](#) pour une description du catalogue d'événements le plus récent, GWTC-3. Mais plus une onde gravitationnelle est faible et plus il est difficile de la découvrir, noyée dans le bruit de mesure. Être capable de trouver ces signaux ténus est donc un axe d'étude prioritaire pour réaliser de nouvelles découvertes. Une façon de les chercher consiste à utiliser des informations fournies par les télescopes qui observent le [spectre électromagnétique](#) (les différentes formes de lumière) pour obtenir des indices sur de possibles ondes gravitationnelles faibles qui se cacheraient dans nos données. L'analyse présentée ici utilise les observations de **sursauts gamma** (en anglais "gamma-ray burst", en abrégé GRBs) dans ce but précis.

Les sursauts gamma

Les sursauts gamma (GRBs dans la suite) sont des explosions formidables qui ont lieu dans le cosmos et qui peuvent émettre en quelques secondes sous forme de **rayons gamma** autant d'énergie que le Soleil le fera sur l'ensemble du spectre électromagnétique et pendant les dix milliards d'années de sa durée de vie. Cela signifie que les télescopes à rayons gamma peuvent détecter ces événements jusqu'à plusieurs milliards d'années-lumière de distance : un GRB est détecté chaque jour en moyenne. Nous portons une attention toute particulière aux dépêches que les astronomes experts en GRB envoient lors de chacune de leurs découvertes, car savoir quand et où dans le ciel un GRB particulier a eu lieu nous permet de nous concentrer sur cet événement et, espérons-le, de trouver un signal d'onde gravitationnelle associé qui serait passé inaperçu sans ce coup de projecteur.

Environ un tiers des GRBs durent moins de quelques secondes : ce sont les GRBs *courts*. Ils sont produits par la fusion de deux **étoiles à neutrons** (comme par exemple pour [les observations conjointes GW170817 et GRB 170817A](#)) ou peut-être par une étoile à neutrons en train de se disloquer alors qu'elle est engloutie par un **trou noir**. Ces événements cataclysmiques sont en fait le dénouement d'un processus très long pendant lequel les deux astres compacts orbitent l'un autour de l'autre tout en se rapprochant et en émettant des ondes gravitationnelles dont la forme caractéristique est connue et que l'on appelle des "chirps" -- un terme anglais que l'on pourrait traduire en français par "gazouillis" car ces signaux, une fois transformés en sons, ressemblent au

chant des oiseaux. Pour exploiter ce lien, des programmes informatiques dédiés ont été écrits pour chercher dans les données de LIGO et Virgo des chirps d'ondes gravitationnelles produits lors de GRBs courts.

Les deux tiers restants des GRBs durent de quelques secondes à quelques minutes. Ces GRBs *longs* sont produits lorsque des étoiles massives en fin de vie explosent et meurent : sous l'effet de leur propre masse, leurs noyaux implosent et forment des trous noirs tout en émettant une grande quantité d'énergie. Ces cataclysmes peuvent également produire des bouffées d'ondes gravitationnelles dont les caractéristiques sont difficiles à prédire. Même si nous ne savons pas bien à quoi ces signaux courts pourraient ressembler, d'autres programmes informatiques les cherchent dans nos données. Et comme ces méthodes ne supposent rien sur la forme des ondes gravitationnelles (on parle de recherche générique de signaux "non-modélisés"), elles peuvent être utilisées pour étudier les GRBs courts en plus des GRBs longs.

Qu'avons-nous trouvé ?

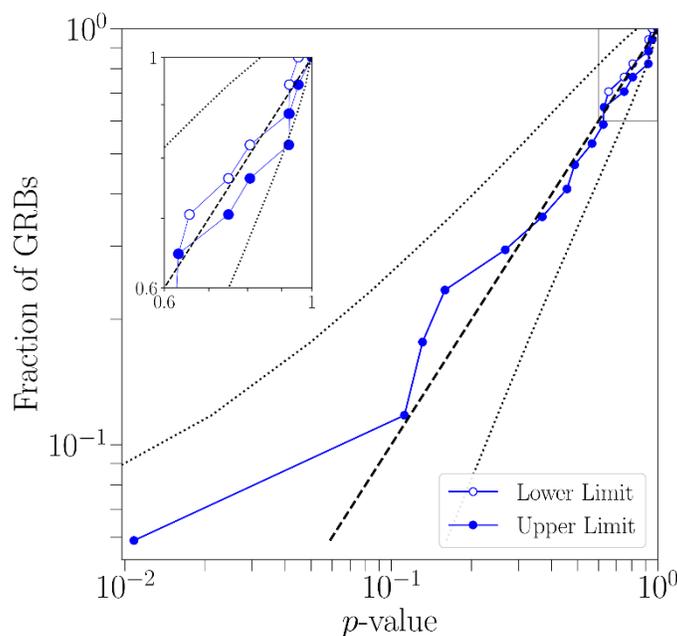


Figure 1 : Distribution cumulative des valeur-p (point bleus) des meilleurs candidats onde gravitationnelle trouvés pour chacun des 17 GRBs courts analysés par la recherche de signaux chirp. Plus la valeur-p est faible et plus le candidat se démarque du bruit de fond -- et donc plus il pourrait être un vrai signal en provenance du cosmos. Par contre, même si tous ces candidats sont en fait des fluctuations du bruit, certains auront des valeur-p petites par hasard. Dans cette hypothèse, les valeur-p aléatoires devraient se répartir le long de la ligne en tirets noirs, avec seulement 10% de chance de déborder au-delà des lignes noires pointillées. Puisque les points bleus sont tous largement à l'intérieur du cône en pointillés, les valeur-p mesurées n'ont rien de surprenant et sont compatibles avec des fluctuations dues au hasard.

Entre le 1er novembre 2019 et le 27 mars 2020, les télescopes à rayons gamma embarqués sur les satellites Swift et Fermi ont observés 108 GRBs. Sur ce total, 86 se sont produits alors que des détecteurs du réseau LIGO-Virgo fonctionnaient et enregistraient des données de bonne qualité. Et 17 d’entre eux étaient des GRBs courts. Tous ont été étudiés mais, malheureusement, aucune onde gravitationnelle n’a été observée en coïncidence. Ce résultat n’est pas complètement inattendu dans la mesure où la plupart des sources de GRBs sont très éloignées.

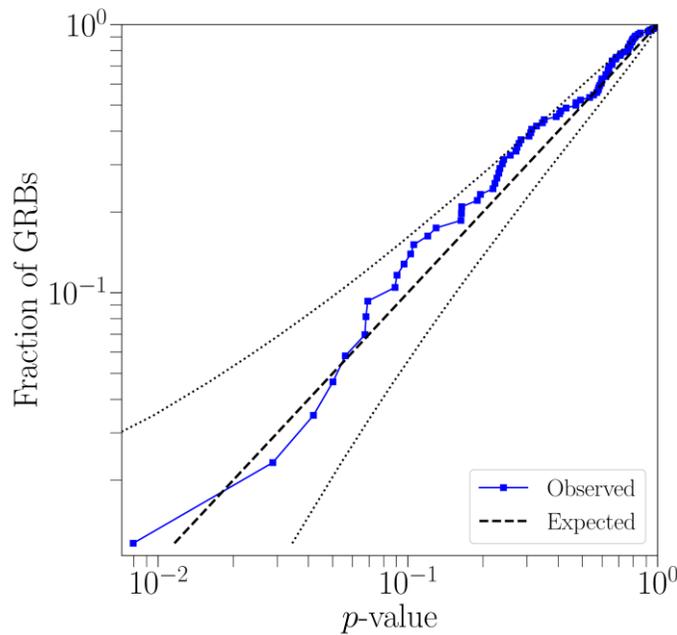


Figure 2 : *Distribution cumulative des valeur-p (point bleus) des meilleurs candidats onde gravitationnelle trouvés pour chacun des 86 GRBs analysés par la méthode de recherche de signaux d’onde gravitationnelle non modélisés. Comme dans le cas de la Figure 1, les valeur-p sont approximativement distribuées le long de la ligne en tirets et à l’intérieur des lignes pointillées. La conclusion là-aussi est que ces valeurs sont compatibles avec des fluctuations dues au hasard.*

Pour chaque analyse, nous avons utilisé un segment de données de taille limitée incluant l’instant où le GRB a été détecté. Pour la recherche de chirps, la fenêtre d’analyse dure six secondes tandis qu’elle s’étend sur au moins 660 secondes pour la recherche de bouffées d’ondes gravitationnelles dont la forme n’est pas modélisée. Dans les deux cas, l’analyse commence par identifier le signal candidat onde gravitationnelle le plus prometteur dans le lot de données, puis le compare avec les résultats obtenus sur d’autres lots de données “témoins”, enregistrés à des moments où on ne s’attend pas à trouver d’onde gravitationnelle -- puisqu’aucun signal électromagnétique (GRB ou autre) n’a été observé dans ces intervalles de temps. Cela permet d’estimer la probabilité que le candidat sélectionné soit simplement dû à des fluctuations courantes du bruit de mesure (largement dominant dans les données). Cette probabilité est représentée par un nombre, la **valeur-p**. Plus elle est élevée et plus le candidat ressemble à du bruit de fond ; au contraire, plus elle est faible et plus le candidat est prometteur pour être un vrai signal d’onde gravitationnelle. Aucun des candidats analysés dans le cadre de l’étude présentée ici n’a une **valeur-p** très faible. Et, pris tous ensemble, ces candidats sont parfaitement compatibles avec une série de fluctuations aléatoires du bruit de

mesure. Tout cela fait que nous ne pensons pas avoir détecté de nouveaux signaux d'ondes gravitationnelles.

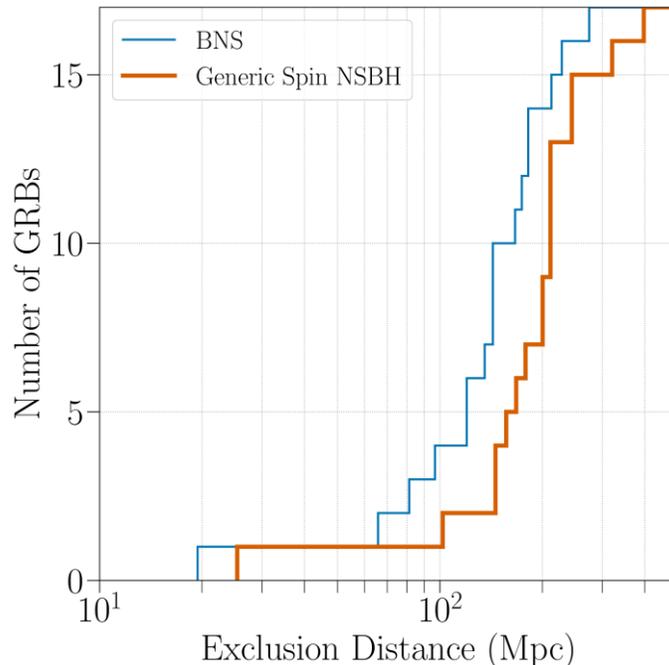


Figure 3 : Distribution cumulative des distances d'exclusion obtenues avec la méthode de recherche de chirps, pour deux modèles différents du signal d'onde gravitationnelle. La distance d'exclusion est une estimation de la distance minimale à laquelle la sources d'un GRB devrait se trouver, étant donné qu'aucune onde gravitationnelle n'a été détectée. Les détecteurs d'ondes gravitationnelles ne sont pas sensibles de la même manière dans toutes les directions et ils n'étaient pas forcément tous en train de prendre des données chaque fois qu'un GRB a été détecté, ce qui explique que la distance d'exclusion puisse varier de manière importante d'un GRB à l'autre pour le même modèle de signal. La ligne bleue en trait fin montre que, pour le cas de fusions de systèmes binaires d'étoiles à neutrons, la distance d'exclusion varie entre 20 et presque 300 mégaparsecs (Mpc), pour une valeur médiane de 149 Mpc (c'est-à-dire que la distance d'exclusion est plus petite que 149 Mpc pour la moitié des GRBs et plus grande pour l'autre moitié). Les systèmes étoile à neutrons - trou noir sont plus massifs et leur fusion peut donc produire des ondes gravitationnelles plus intenses. C'est pourquoi ils doivent être plus éloignés pour que leurs signaux ne soient pas détectables, comme le montre la courbe orange en trait épais : la distance d'exclusion médiane vaut 207 Mpc dans ce cas.

Comme cette recherche a été infructueuse nous pouvons nous poser la question suivante : à quelle distance devait être au minimum la source de chacun de ces GRBs pour qu'on ne détecte aucun des signaux qui auraient pu être produits ? Il convient ici de rappeler que l'amplitude d'une onde gravitationnelle est inversement proportionnelle à la distance de la source. On peut estimer cette "distance d'exclusion" en ajoutant à la main dans les données de faux signaux. On fait varier la distance de la source (et donc l'amplitude du signal) et on regarde jusqu'à quelle distance on les détecte de manière fiable. Si l'on répète la même procédure pour plusieurs types de signaux

simulés on obtient une distance d'exclusion différente pour chaque famille de signaux car les analyses de données ont des sensibilités différentes selon le signal cherché.

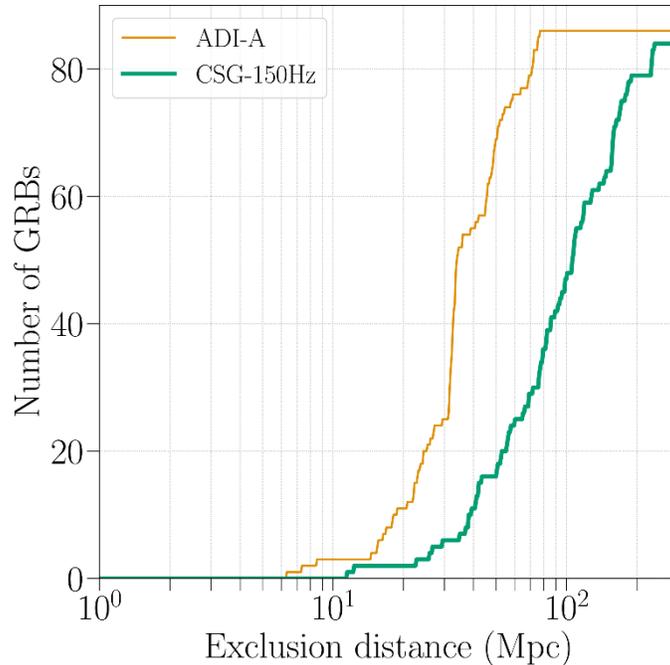


Figure 4 : Distribution cumulative des distances d'exclusion obtenues avec la méthode de recherche de signaux d'ondes gravitationnelles non modélisés. Comme sur la Figure 3, les distances d'exclusion sont obtenues pour deux sources particulières : une instabilité de disque d'accrétion (ADI-A) en trait orange fin et un sinus gaussien avec une polarisation circulaire (CSG-150Hz) en trait vert épais. Un disque d'accrétion est une accumulation de matière en rotation autour d'un trou noir, peu à peu "avalée" par ce dernier. Si des champs magnétiques rendent ce disque inhomogène voire grumeleux, il peut émettre des ondes gravitationnelles lorsqu'il tourne autour du trou noir. Un signal CSG est un modèle simple d'onde gravitationnelle émise par une étoile qui s'effondre sur elle-même. Les distances d'exclusion médianes obtenues sont 34 Mpc pour ADI-A et 92 Mpc pour CSG-150Hz.

Que nous apprend l'absence de détection pour les GRBs courts ?

Les GRBs courts restent une catégorie de phénomènes astronomiques mal connue. Par exemple, leur luminosité varie de manière très importante d'un événement à l'autre et l'on ne connaît ni la fréquence des GRBs courts les plus ténus, ni même jusqu'à quel point les GRBs courts peuvent être faibles. En effet, la plupart des GRBs qui semblent faibles pourraient simplement être plus distants qu'on ne le pense. Pour en apprendre plus sur ce sujet, on peut combiner les résultats de la recherche de signaux "chirp" les plus récents (pour la prise de données O3b donc : 11/2019 → 03/2020) avec ceux obtenus en analysant les prises de données précédentes : O1 (09/2015 → 01/2016), O2 (11/2016 → 08/2017) et O3a (04/2019 → 10/2019).

Plus un GRB court est faible et plus sa source doit être proche pour qu'il soit détecté par nos télescopes. Et plus elle est proche, et plus la détection d'une contrepartie onde gravitationnelle qui pourrait avoir émise lors de ce phénomène est probable. Et donc, plus il y a de faibles GRBs courts dans l'absolu et plus une association GRB - ondes gravitationnelles devrait être détectée souvent. En prenant en compte le nombre total de GRBs analysés plus le fait que, à l'exception de l'événement GW170817, aucune de ces associations n'a été observée, nous pouvons mieux estimer la fraction des GRBs courts les plus faibles et donc estimer le taux global de GRBs courts (indépendamment de leur luminosité) dans notre Univers local. Le résultat est que ce taux est en accord avec le taux de fusions de systèmes binaires d'étoiles à neutrons calculé à partir des détections d'ondes gravitationnelles ; nous prédisons également que la prochaine période de prise de données O4 pourrait permettre d'observer une détection conjointe GRB + ondes gravitationnelles par an.

Glossaire

- **Étoile à neutrons** : Un vestige extrêmement dense du noyau d'une étoile après sa mort ; une étoile à neutrons a une masse typique comprise entre une et deux fois celle du Soleil, pour un diamètre de seulement une vingtaine de kilomètres.
- **Mégaparsec (Mpc)** : Une unité de distance utilisée en astronomie. 1 Mpc = 1 million de parsecs = 3,26 millions d'années-lumière.
- **valeur-p** : Une mesure de la signification statistique d'un résultat, c'est-à-dire de la "confiance" que l'on peut avoir en lui. Une *valeur-p* peut donc être utilisée pour quantifier le fait que le résultat d'une expérience, d'une observation ou d'une mesure, soit dû à une fluctuation aléatoire.
- **Rayons gamma** : Les ondes électromagnétiques les plus énergétiques, caractérisées par une faible longueur d'onde.
- **Sursaut gamma (GRB)** : Des bouffées de rayons gamma en provenance du cosmos qui durent entre une fraction de seconde et plusieurs minutes.
- **Trou noir** : Une région de l'espace-temps où la gravitation est si forte que rien ne peut s'en échapper, pas même la lumière.

Pour en savoir plus

- Visitez nos sites internet
 - [LIGO](#)
 - [Virgo](#)
 - [KAGRA](#)



- Liens vers les communiqués de presse
 - [Virgo Website GWTC-3 news](#)
 - <https://www.ligo.org/news/index.php#GWTC3>
- Lisez gratuitement l'article scientifique complet [ici](#)
- Les données de O3b rendues publiques sont disponibles via le portail internet www.gw-openscience.org/GWTC-3.