



LIGO
Scientific
Collaboration



Le fond symphonique des ondes gravitationnelles produites par les fusions d'étoiles à neutrons et de trous noirs

Introduction

L'ère de l'astronomie en ondes gravitationnelles a commencé avec la détection par les instruments « [Advanced LIGO](#) » d'une première fusion de deux trous noirs, [l'événement GW150914](#). Trois autres fusions de trous noirs ont été publiées depuis : les événements [GW151226](#), [GW170104](#) et [GW170814](#). Le plus récent a été détecté conjointement par les instruments Advanced LIGO et « [Advanced Virgo](#) ». Le 17 août 2017, LIGO et Virgo ont observé ensemble une source d'ondes gravitationnelles entièrement nouvelle : la collision de deux étoiles à neutrons. Cette fusion, dénommée [GW170817](#), nous en apprend beaucoup sur notre Univers. Elle nous permet de tester notre compréhension de la gravitation, d'en savoir plus sur la manière dont la matière se comporte à des températures et pressions incroyables et même d'apprendre comment une partie des éléments chimiques les plus lourds est produite.

Le fond stochastique d'ondes gravitationnelles

Tout comme un microphone ne retransmet que les voix les plus proches, LIGO et Virgo sont sensibles aux fusions d'étoiles à neutrons ou de trous noirs qui surviennent relativement « près » de nous – à l'échelle de l'Univers ! Mais, au-delà des sources assez proches pour être détectées, il y en a beaucoup d'autres qui passent inaperçues car elles sont trop lointaines. Avec les détecteurs actuels, il est impossible d'observer individuellement ces collisions. Mais, prises dans leur ensemble, elles forment un « fond stochastique » d'ondes gravitationnelles. Et, comme un microphone peut également être sensible aux murmures du public, LIGO et Virgo pourront peut-être détecter le bruit de fond issu de la superposition aléatoire de ces signaux lointains.

Les premières fusions de trous noirs détectées par LIGO et Virgo nous ont permis d'estimer la force (ou, plutôt, la [densité d'énergie](#)) du fond stochastique d'ondes gravitationnelles dû aux collisions entre trous noirs (voir par exemple [ici](#) et [là](#), deux articles en anglais). Maintenant, forts de la première observation d'une fusion de deux étoiles à neutrons, nous pouvons également estimer le niveau auquel les collisions entre étoiles à neutrons contribuent au fond stochastique. La Figure 1 montre nos estimations pour la force totale du fond stochastique d'ondes gravitationnelles (courbe bleue) et pour les contributions individuelles des fusions d'étoiles à neutrons (en rouge) et de trous noirs (en vert). Bien que les fusions entre étoiles à neutrons produisent un signal plus faible que celles entre trous noirs, on pense qu'il s'en produit beaucoup plus. En définitive, les deux sources d'ondes gravitationnelles contribuent de manière à peu près égale au fond stochastique d'ondes gravitationnelles. La Figure 1 présente également les sensibilités actuelle et futures des détecteurs LIGO et Virgo (courbes noires). Graphiquement, si le fond stochastique est au-dessus d'une des courbes noires, il devrait être détectable par des instruments disposant de cette sensibilité. On voit donc que lorsque les détecteurs seront les plus sensibles (c'est-à-dire quand ils auront atteint leurs objectifs en termes de sensibilité, définis lors de la conception des instruments) ils auront une chance de détecter ce signal !

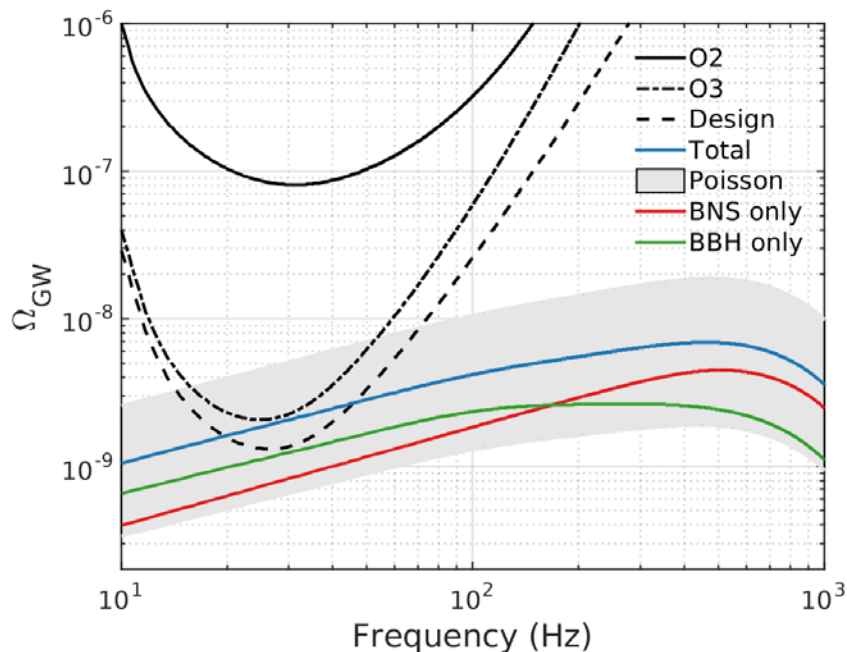


Figure 1 : Ce graphique montre la force du fond stochastique prédit pour les fusions d'étoiles à neutrons (en rouge) et de trous noirs (en vert) et en combinant ces deux types de sources (en bleu). Comme nous ne savons pas exactement à quelles fréquences les étoiles à neutrons et les trous noirs entrent en collision dans l'Univers, le niveau du fond stochastique est connu avec une certaine incertitude, représentée par la bande grise étiquetée « Poisson » dans la légende. Ce graphique présente également les sensibilités des détecteurs LIGO et Virgo lors des « runs » de prise de données O2 (terminé le 25 août 2017) et O3 (qui devrait démarrer fin 2018) ainsi que lorsqu'ils auront atteint les niveaux de sensibilité prévus lors de leur conception (ce qui prendra quelques années de plus). Les courbes de sensibilité pour O3 et au-delà mordent largement sur la « bande d'incertitude » et passent même sous notre meilleure prédiction actuelle pour la force du fond stochastique d'ondes gravitationnelles. Cela signifie que LIGO et Virgo pourraient bientôt réussir à détecter ce signal.

Que peut-on déduire de ces informations ?

Tout d'abord, que le fond stochastique pourrait être environ deux fois plus fort que les niveaux estimés jusqu'à présent. Cela voudrait dire que sa détection pourrait intervenir bien plus rapidement que prévu : ce n'est peut-être qu'une affaire de quelques années ! Cette possibilité est illustrée par la Figure 2 qui montre comment une quantité appelée « rapport signal sur bruit » (ou SNR en conservant l'acronyme anglais) augmente à mesure que les détecteurs enregistrent de nouvelles données. Le SNR mesure la force du fond stochastique par rapport au niveau du bruit aléatoire dans les détecteurs LIGO et Virgo. Un SNR très faible signifie que le signal cherché est encore largement enfoui dans le bruit (et donc indétectable) alors qu'un SNR élevé rend sa détection très vraisemblable. Le graphique montre que l'on pourrait obtenir un SNR de 3 (le seuil traditionnellement utilisé pour parler « d'une indication de signal » : pas encore une détection, mais sur la bonne voie) après environ 40 mois de prise de données. Avec seulement les observations de quelques fusions de trous noirs et d'une fusion d'étoiles à neutrons, l'énergie réelle du fond stochastique n'est pas encore connue avec précision. Cette incertitude est représentée par les bandes grises sur les Figures 1 et 2 : même si le calcul prédit une valeur pour la force

du fond stochastique, son vrai niveau peut se trouver n'importe où dans ces bandes. Dans le futur, LIGO et Virgo détecteront un nombre croissant de fusions de trous noirs et d'étoiles à neutrons, ce qui permettra d'améliorer la précision de l'estimation de la force du fond stochastique – et donc de mieux prédire le temps qu'il faudra pour le découvrir.

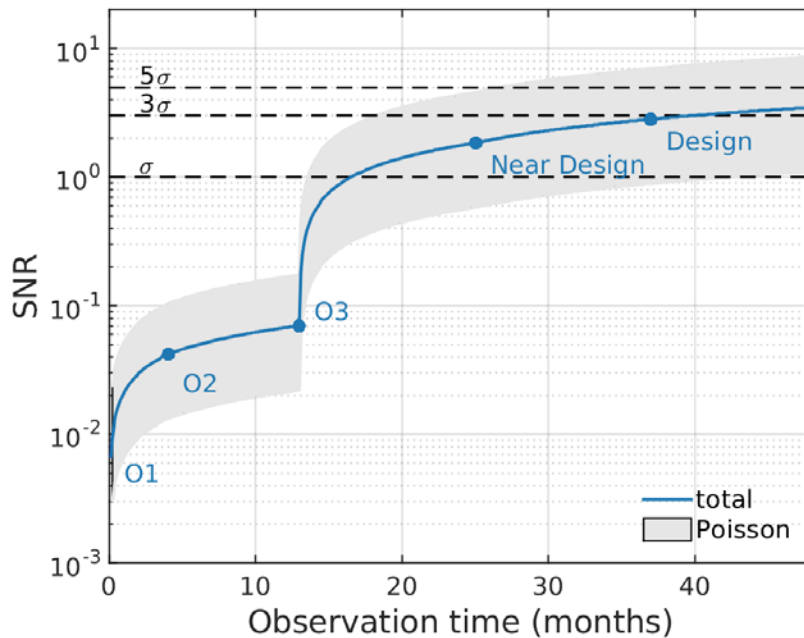


Figure 2 : Ce graphique montre comment le rapport signal-sur-bruit (SNR) du fond stochastique d'ondes gravitationnelles augmente avec le temps d'observation (c'est-à-dire le temps pendant lequel les détecteurs enregistrent des données). Le SNR quantifie la force du fond stochastique détecté par rapport au bruit de mesure aléatoire des instruments. Comme dans la Figure 1 ci-dessus, les incertitudes sur la force du fond stochastique sont à l'origine de la bande grise identifiée comme « Poisson » dans la légende. Notre prédiction est que le fond stochastique total sera probablement détecté avec un SNR significatif ($SNR = 3$) après environ 40 mois d'observation une fois que les détecteurs LIGO et Virgo auront atteint leur sensibilité nominale, c'est-à-dire vers 2022-2024. Dans l'hypothèse la plus optimiste, ce fond stochastique pourrait être observé après seulement 18 mois d'observations, c'est-à-dire pendant le run O3 (2018-2019). Les disques pleins indiquent le début de chaque run de prise de données.

De plus, même si les contributions des fusions de trous noirs et des fusions d'étoiles à neutrons au fond stochastique ont des intensités similaires, elles « sonnent très différemment à l'oreille ». En effet, les fusions de trous noirs (comme GW150914 par exemple) sont fortes, courtes et plutôt rares. Quand on combine beaucoup de ces signaux, on obtient quelque chose qui se rapproche du bruit que font des grains de maïs quand ils se transforment en popcorn dans un four micro-ondes – on parle d'ailleurs de « bruit de fond popcorn » dans le jargon scientifique. Au contraire, les signaux de fusions d'étoiles à neutrons sont longs, plus faibles et assez communs ce qui fait que plusieurs de ces signaux peuvent se mélanger à un instant donné. Le fond stochastique dû aux fusions d'étoiles à neutrons ressemble donc plus à un « bruit blanc » – c'est-à-dire à un murmure continu, sans temps morts ni claquements secs. La différence entre ces deux situations est illustrée sur la Figure 3 qui compare deux signaux stochastiques possibles pour un ensemble de beaucoup de fusions d'étoiles à neutrons lointaines (courbe rouge) avec

le cas d'un grand nombre de fusions de trous noirs (courbe verte). Vous pouvez également écouter la [« bande-son »](#) du fond stochastique combiné.

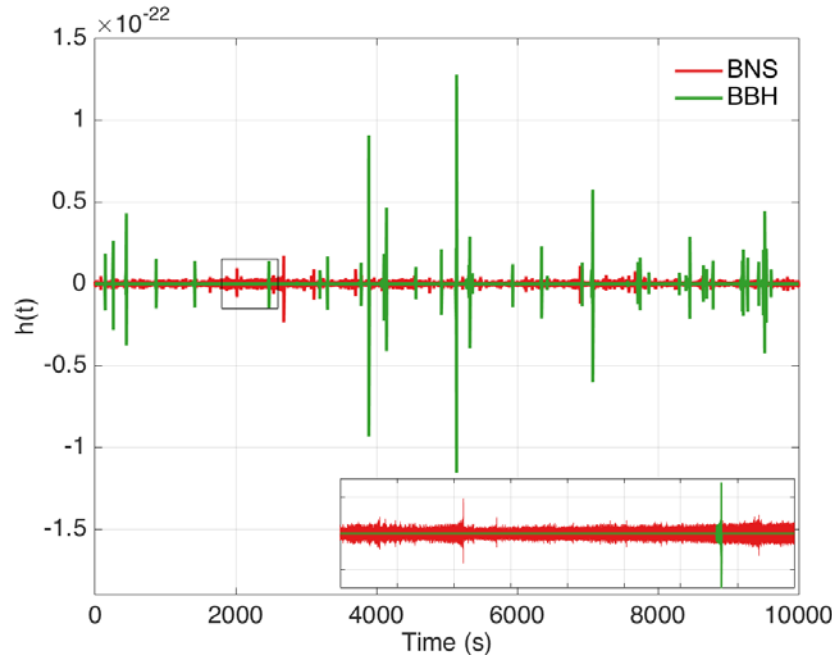


Figure 3 : Une simulation de signaux du fond stochastique d'ondes gravitationnelles sur une période de 10 000 secondes. Les signaux issus de fusions de trous noirs sont en vert alors que ceux de fusions d'étoiles à neutrons sont en rouge. Le graphique en encart est un zoom sur la région comprise entre 1800 et 2600 secondes. On peut y voir un exemple de signal « popcorn » (en vert) produit par une fusion de trous noirs : un signal très court et fort, bien séparé de ceux qui le précèdent et le suivent. Au contraire, la contribution des fusions d'étoiles à neutrons (en rouge) contient de nombreux signaux qui se recouvrent : elle apparaît donc comme une bande continue sans variation forte. Il est important de garder en tête qu'il s'agit d'une simulation du type de signaux auxquels on peut s'attendre : le fond stochastique d'ondes gravitationnelles est aléatoire et donc son évolution exacte en fonction du temps ne peut pas être prédite à l'avance. Ce [fichier audio](#) permet d'entendre le résultat de la combinaison des deux fonds stochastiques : fusions d'étoiles à neutrons et de trous noirs.

Conclusion

En plus des événements les plus forts et les plus proches de l'Univers local, les instruments Advanced LIGO et Advanced Virgo pourront peut-être également détecter un fond stochastique produit par la combinaison de signaux d'ondes gravitationnelles plus lointains et plus faibles. Grâce à la première détection historique d'une fusion d'étoiles à neutrons (l'événement GW170817) nous avons pu estimer la contribution à ce fond stochastique des autres fusions d'étoiles à neutrons qui doivent survenir ailleurs dans l'Univers. Nous en avons déduit que le fond stochastique était plus fort que ce à quoi nous nous attendions, et assez fort pour peut-être être détecté par LIGO et Virgo dans un futur proche !

Glossaire

- **[Etoile à neutrons](#)** : Une étoile à neutrons est un astre extrêmement dense produit par l'effondrement gravitationnel d'une étoile massive. Les étoiles à neutrons sont les corps formés de

matière les plus denses connus dans l'Univers : une cuillère à café d'étoile à neutrons pèse plus lourd que tous les êtres humains qui peuplent actuellement la Terre !

- **Trou noir** : Une région de l'espace-temps où la gravité est si intense que rien, pas même la lumière, ne peut s'en échapper.
- **BBH** : Acronyme anglais pour « Binary Black Hole », un système double formé de deux trous noirs en orbite l'un autour de l'autre.
- **BNS** : Acronyme anglais pour « Binary Neutron Star », un système double formé de deux étoiles à neutrons en orbite l'une autour de l'autre.
- **Stochastique** : Se dit d'un phénomène aléatoire que l'on peut analyser de manière statistique mais dont on ne peut pas prédire l'évolution temporelle précise.
- **Fond stochastique d'ondes gravitationnelles** : Un signal d'ondes gravitationnelles formé par la combinaison des signaux émis par une multitude sources indétectables individuellement. Cela se produit pour les sources trop lointaines ou lorsque trop de signaux arrivent au même moment, un peu comme un murmure sourd et inintelligible provenant d'une foule rassemblée.
- **Run OX (« O1 », « O2 », « O3 », etc.)** : C'est une période planifiée longtemps à l'avance pendant laquelle les détecteurs LIGO et Virgo enregistrent des données pour rechercher des ondes gravitationnelles. On trouvera [ici](#) (article en anglais) plus d'informations sur ces campagnes de prises de données.
- **Rapport signal-sur-bruit (SNR)** : Le rapport signal-sur-bruit (en abrégé « SNR », de l'anglais « Signal to Noise Ratio ») donne le niveau de confiance statistique avec lequel un signal a été détecté ... ou pas. Si le SNR est faible, la détection n'est pas probante ; par contre, plus il est fort et plus la détection est probable.
- **Fond « popcorn »** : Le fond stochastique particulier produit par les fusions de systèmes binaires de trous noirs. Chaque signal de fusion est court, plutôt fort et bien séparé en temps des précédents et des suivants. Ces signaux arrivent sur Terre de manière aléatoire, produisant un fond stochastique qui « sonne » comme la transformation de grains de maïs en popcorn.

Pour en savoir plus

- Le [preprint](#) de l'article scientifique publié par LIGO et Virgo.
- Voir http://public.virgo-gw.eu/gw170817_fr



Visiter nos sites internet :

<http://www.ligo.org>

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

