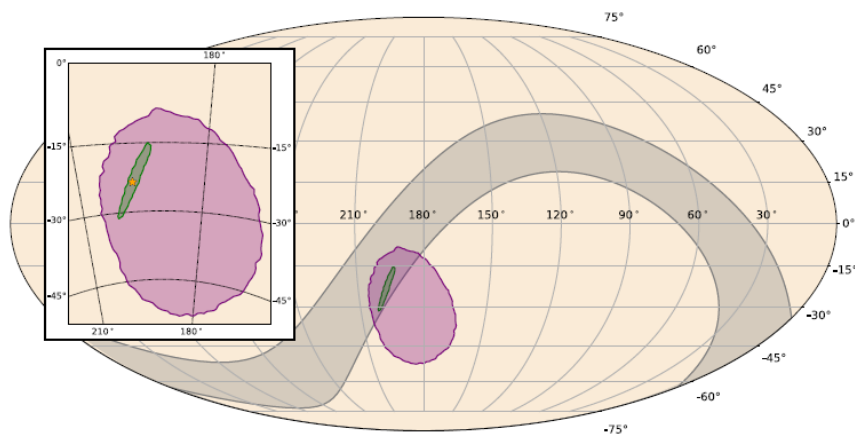


## Ondes gravitationnelles et rayons gamma émis lors de la fusion d'un système binaire d'étoiles à neutrons : GW170817 et GRB 170817A

Le signal d'ondes gravitationnelles GW170817 a été détecté le 17 août 2017 par les observatoires LIGO et Virgo. C'est le premier attribué à la fusion de deux étoiles à neutrons. À peine 1,8 seconde plus tard, les instruments Fermi Gamma-ray Burst Monitor (GBM) et Anticoïncidence Shield for the SPectrometer for the INTErnational Gamma-Ray Astrophysics Laboratory (INTEGRAL SPI-ACS) embarqués sur les satellites Fermi et INTEGRAL ont détecté un sursaut gamma court, GRB 170817A. Cela faisait des décennies que les astronomes soupçonnaient que les sursauts gamma courts étaient produits par la fusion de deux étoiles à neutrons ou d'une étoile à neutrons et un trou noir. L'observation combinée de GW170817 et GRB 170817A apporte la première preuve qu'une collision d'étoiles à neutrons peut effectivement produire des sursauts gamma courts.

### Introduction

Les sursauts gamma (GRBs, d'après l'acronyme anglais) font partie des événements les plus énergétiques observés dans la nature. Ils émettent typiquement autant d'énergie en quelques secondes que notre Soleil pendant les 10 milliards d'années de sa vie d'étoile. Ils se produisent approximativement une fois par jour et proviennent de directions aléatoires dans le ciel. Leur durée va d'une fraction de seconde à des milliers de secondes. Toutefois, on les classe généralement en deux catégories d'après leur durée (plus de 2 secondes ou moins), bien que d'autres paramètres entrent aussi en ligne de compte pour cette classification. Les GRBs longs (> 2 secondes) sont produits par l'effondrement du cœur d'étoiles massives en rotation rapide sur elles-mêmes. Nous avons désormais la preuve que les GRBs courts (< 2 secondes) sont dus à la fusion de deux étoiles à neutrons, et peut-être aussi (mais cela n'a pas encore été observé directement) à la fusion d'une étoile à neutrons et un trou noir.

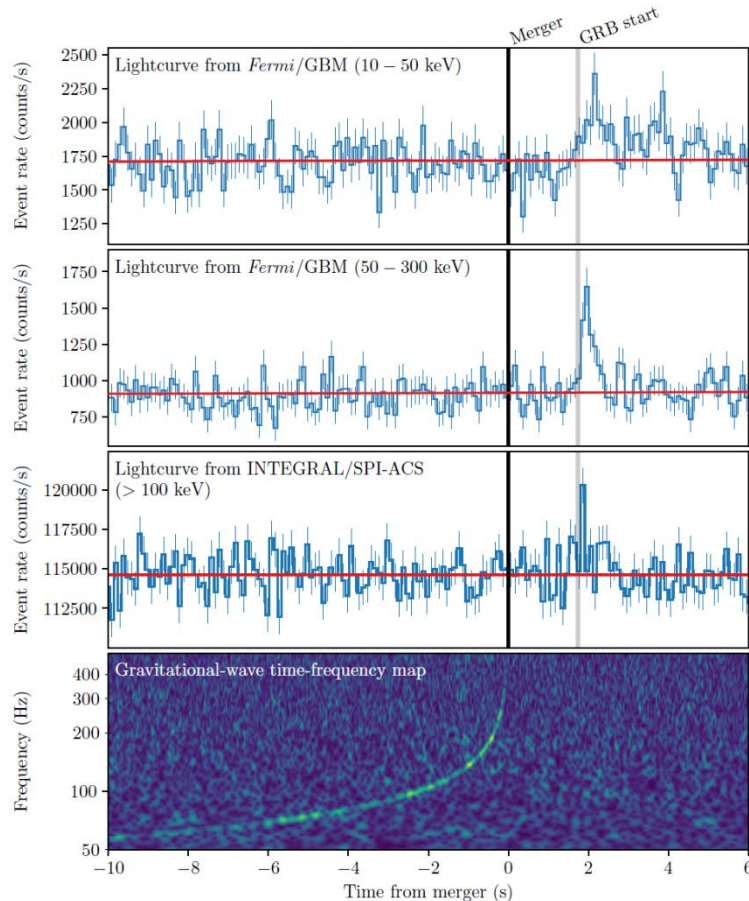


**Figure 1** : Localisation finale de la source à l'origine de GW170817 et GRB 170817A. Les contours définissent des zones à 90% de niveau de confiance. Le contour produit par LIGO-Virgo est représenté en vert. Le contour déterminé par Fermi-GBM est superposé en violet. L'anneau déduit des informations temporelles de Fermi et INTEGRAL est grisé. Dans l'encart, la position du signal optique transitoire est également indiquée par une étoile jaune. Les axes représentent l'ascension droite et la déclinaison dans le système de coordonnées équatorial.

### Ondes gravitationnelles et rayons gamma

**Les ondes gravitationnelles observées** : Les deux détecteurs LIGO et le détecteur Virgo ont observé les ondes gravitationnelles avec un rapport signal sur bruit combiné de 32,4, ce qui en fait le signal le

plus fort enregistré à ce jour. L'analyse des données a montré que le signal correspond à la coalescence de deux étoiles à neutrons, avec des masses comprises entre 0,86 et 2,26 fois la masse du Soleil, à une distance d'environ cent-trente millions d'années-lumière. GW170817 est donc la source d'ondes gravitationnelles la plus proche jamais observée. La triangulation entre les trois détecteurs a permis de localiser la source dans une région du ciel couvrant 28 degrés carrés, à un niveau de confiance de 90% ; il s'agit de la meilleure localisation réalisée par LIGO-Virgo à ce jour, illustrée sur la Figure 1. L'évolution temps-fréquence du signal GW170817 est représentée dans la partie basse de la Figure 2.



**Figure 2** : Détection conjointe de GW170817 et GRB 170817A. Premier panneau : Somme des courbes de lumière des détecteurs au iodure de sodium (NaI) numéros 1, 2 et 5 pour GRB 170817A entre 10 et 50 keV, dans des intervalles de 100 ms alignés sur ceux d'INTEGRAL SPI-ACS. L'estimation du bruit de fond est superposée en rouge. Deuxième panneau : Même graphique que le premier panneau, mais dans la gamme d'énergie 50 – 300 keV. Troisième panneau : Courbe de lumière d'INTEGRAL SPI-ACS dans une gamme d'énergie commençant approximativement à 100 keV et s'étendant jusqu'à au moins 80 MeV. Quatrième panneau : Carte temps-fréquence de GW170817 obtenue en combinant de manière cohérente les données de LIGO-Hanford et LIGO-Livingston.

**Le sursaut gamma observé** : L'émission de rayons gamma a été détectée indépendamment par Fermi-GBM et INTEGRAL, deux observatoires de rayons gamma en orbite autour de la Terre. GRB 170817A a été détecté automatiquement par Fermi-GBM dans trois de ses 12 détecteurs en cristaux d'iodure de sodium (NaI) ; le signal fait apparaître deux composantes apparemment distinctes. La première, qui dure environ une demi-seconde, présente les caractéristiques typiques d'un GRB court et est montrée dans le deuxième panneau de la Figure 2. Elle est ensuite suivie par une émission plus faible à plus basse énergie, qui dure quelques secondes. D'après ses caractéristiques, GRB 170817A a



trois fois plus de chances d'être un GRB court qu'un GRB long. Fermi-GBM a localisé GRB 170817A (à un niveau de confiance de 90%) dans une région du ciel de 1100 degrés carrés. Les analyses de routine menées par INTEGRAL SPI-ACS à la recherche de sursauts courts ont également identifié GRB 170817A, comme indiqué dans le troisième panneau de la Figure 2. Il arrive fréquemment que des GRBs courts soient détectés conjointement par Fermi-GBM et INTEGRAL SPI-ACS ; il n'y a donc pas de doute qu'il s'agit bien ici du même GRB. La différence de temps d'arrivée de GRB 170817A dans INTEGRAL SPI-ACS et dans Fermi-GBM permet de localiser la source, ce qui est montré sur la Figure 1, avec les localisations obtenues par Fermi-GBM et LIGO-Virgo.

Bien que les régions du ciel déterminées par les détecteurs d'ondes gravitationnelles et par les satellites gamma se recouvrent et malgré la quasi-simultanéité des deux signaux, on peut se demander si GW170817 et GRB 170817A proviennent bien de la même source. En fait, le calcul montre que la probabilité que deux événements indépendants coïncident ainsi dans l'espace et le temps de manière fortuite est de 1 sur 20 millions. Il est donc extrêmement probable que les deux signaux soient dus à la fusion du même système de deux étoiles à neutrons.

### **Que déduit-on de cette observation conjointe ?**

L'observation conjointe des ondes gravitationnelles et du GRB offre une occasion sans précédent d'étudier les mécanismes à l'œuvre dans les GRBs courts et permet de sonder un certain nombre de concepts de physique fondamentale, ainsi que les propriétés des étoiles à neutrons qui sont entrées en collision. Ces études sont faites à partir de (1) l'écart d'1,7 seconde entre GW170817 et GRB 170817A, (2) les 130 millions d'années-lumière traversées par les deux signaux, et (3) le moment où on s'attend à ce que chacun des signaux soit émis pendant la fusion.

La théorie de la gravitation en vigueur actuellement, la Relativité Générale, prédit que les vitesses de propagation des ondes gravitationnelles et des rayons gamma ou de la lumière sont identiques. Simplement à partir du retard entre les deux signaux, on peut mesurer la différence entre les vitesses de la gravitation et de la lumière. La différence relative est très proche de zéro, puisqu'elle se situe entre  $-0.0000000000000003$  et  $0.0000000000000007$  ! On a aussi pu tester plus avant le principe d'équivalence et l'invariance de Lorentz, deux des piliers qui sous-tendent la théorie d'Einstein.

### **GRB 170817A est-il un GRB ordinaire ?**

GRB 170817A est 100 fois plus proche que les GRBs typiquement observés par Fermi-GBM. Il est également beaucoup moins brillant, ou « sous-lumineux », par rapport à la population des autres GRBs courts ou longs. Cela signifie que GRB 170817A est moins énergétique, entre cent et un million de fois moins que les autres GRBs courts. Comme on pense que l'émission de rayons gamma dans les GRBs se fait sous forme de faisceau, une explication possible pour la faible luminosité de ce GRB est que la Terre se soit trouvée au bord du faisceau. Une autre possibilité est que la luminosité ne soit pas uniforme dans le faisceau. Cependant, la faible luminosité de GRB 170817A combinée à sa distance relativement proche de la Terre soulève la question suivante : existe-t-il une population de GRBs proches et peu brillants qui auraient été manqués jusqu'à présent (en raison de la sensibilité limitée des détecteurs de rayons gamma), ou considérés par erreur comme plus lointains qu'ils ne le sont réellement (en raison d'erreurs dans la détermination de la galaxie d'où ils proviennent), ou tout simplement parce que leur distance n'est pas connue (ce qui est le cas de la plupart des GRBs courts) ? De futures observations conjointes de rayons gamma et d'ondes gravitationnelles permettront de répondre à ces questions.

### **Combien d'observations conjointes peut-on escompter dans les années à venir ?**

GRB 170817A marque le début des observations conjointes d'ondes gravitationnelles et de rayons gamma qui vont permettre de déchiffrer la physique étonnante à l'œuvre dans les étoiles à neutrons et les sursauts gamma. LIGO et Virgo sont actuellement dans une phase d'amélioration des



LIGO  
Scientific  
Collaboration



détecteurs pour faire progresser leurs performances. Etant donné la sensibilité attendue de ces détecteurs lors de la prochaine prise de données (prévue à partir de fin 2018), entre 1 et 50 signaux d'ondes gravitationnelles émis par des fusions de systèmes binaires d'étoiles à neutrons sont attendus chaque année. Et entre 0,1 et 1,4 observation conjointe avec Fermi-GBM par an pourrait être observée. Lorsque les détecteurs d'ondes gravitationnelles atteindront leur sensibilité nominale (vers 2020), le nombre de signaux d'ondes gravitationnelles détectables devrait atteindre 6 à 120 par an, et le nombre de détections communes avec Fermi-GBM 0,3 à 1,7 par an.

Le réseau global de détecteurs d'ondes gravitationnelles et d'observatoires de rayons gamma à grand champ de vue, tels que Fermi-GBM et INTEGRAL SPI-ACS, sera essentiel pour le futur de l'astronomie ondes gravitationnelles plus GRB.

### Glossaire

- **Rayons gamma** : Radiation (émission de lumière) dans la gamme d'énergie la plus haute du spectre électromagnétique.
- **Etoile à neutrons** : Astre extrêmement dense, vestige d'une étoile massive après son effondrement. Une étoile à neutrons typique a une masse 500 000 fois supérieure à celle de la Terre, mais son diamètre n'est que d'environ 30 km.
- **Trou noir** : Une région de l'espace-temps déformée par un objet extrêmement compact et où la gravité qui y règne est si intense que rien, pas même la lumière, ne peut en sortir.
- **Rapport signal sur bruit** : Rapport entre la puissance du signal et la puissance du bruit de mesure, une quantité utilisée pour comparer le niveau du signal avec celui des sources de bruit qui pourraient le contaminer.

### Pour en savoir plus

- Voir [http://public.virgo-gw.eu/gw170817\\_fr](http://public.virgo-gw.eu/gw170817_fr)



Visiter nos sites internet :

<http://www.ligo.org>

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

