



LIGO  
Scientific  
Collaboration



## Étoiles à neutrons, supernovae et billard

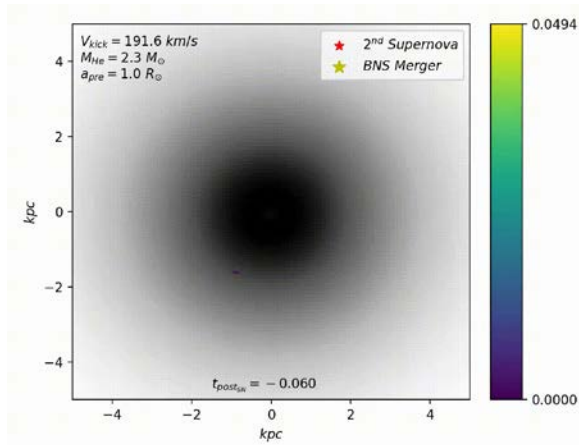
**Le 17 août 2017, les détecteurs LIGO et Virgo avancés ont détecté un signal d'ondes gravitationnelles, appelé GW170817, correspondant à la fusion d'un système binaire d'étoiles à neutrons. Les observations qui ont suivi ont permis de détecter les contreparties électromagnétiques du signal et de localiser sa source dans la [galaxie NGCC 4993](#). A partir de ces observations, on peut essayer de deviner comment ces étoiles à neutrons se sont formées.**

Nous savons que la fusion GW170817 s'est terminée par un grand « boum ». Les deux étoiles à neutrons ont orbité l'une autour de l'autre pendant longtemps, se sont rapprochées et ont accéléré leur mouvement avant de finalement fusionner, produisant un [feu d'artifice céleste](#) observé par de nombreux télescopes. Mais comment ce système binaire s'est-il formé ?

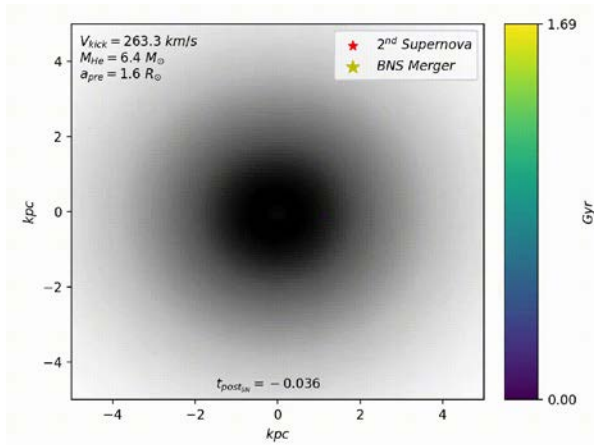
Les étoiles à neutrons sont des vestiges d'étoiles éteintes. Lorsqu'une étoile a épuisé son combustible nucléaire, elle n'est plus capable de conserver sa forme et s'effondre sur elle-même sous son propre poids. Le cœur de l'étoile se contracte fortement, émettant une énergie qui disperse dans le milieu interstellaire les couches externes de l'astre. Une étoile à neutrons se forme lorsque ce cœur est trop massif pour donner une [naine blanche](#) (ce qui arrivera à notre Soleil) mais trop léger pour se transformer en [trou noir](#). De grandes quantités d'énergie sont émises lorsque le cœur se transforme en étoile à neutrons, produisant une explosion puissante et lumineuse, appelée [supernova](#). L'histoire de notre système binaire d'étoiles à neutrons a donc commencé par deux explosions, un pour la naissance de chaque étoile à neutrons.

Lors d'une supernova, la matière peut ne pas être émise de manière uniforme dans toutes les directions, ce qui communique un recul à l'étoile à neutrons nouvellement formée qui peut être propulsée dans l'espace à plusieurs centaines de kilomètres par seconde. Nous avons donc remonté le temps à partir des données rassemblées pour l'événement GW170817 pour essayer de mesurer la force de l'impulsion reçue par les deux étoiles à neutrons.

C'est un peu comme essayer de comprendre comment une boule de billard a été frappée en sachant qu'elle a fini dans la poche de coin. Peut-être qu'elle a été à peine effleurée par la queue parce qu'elle était juste à côté de cette poche. Ou, au contraire, elle a été frappée très fort et a rebondi plusieurs fois avant d'atteindre son but. Pour cette étude, on peut tenter de très nombreux coups et voir ceux qui fonctionnent. Pour GW170817, nous avons simulé un grand nombre de systèmes binaires, les avons fait démarrer de différents endroits dans la galaxie et leur avons donné des impulsions initiales variables. Leur évolution temporelle jusqu'à la fusion a été calculée et nous avons vu ceux dont la collision survenait à une distance du centre de la galaxie correspondant à l'observation de la contrepartie optique du système GW170817. Le système binaire pourrait avoir été formé tout près de là où il a fusionné et donc n'avoir reçu qu'une faible impulsion au départ ; mais il y a de moins en moins d'étoiles formées dans une galaxie à mesure que l'on s'éloigne de son centre. Le système binaire aurait également pu naître loin de là et recevoir une forte impulsion qui l'aurait fait beaucoup voyager ; mais, dans ce cas, les deux étoiles à neutrons auraient pu se séparer et donc ne jamais fusionner. Ou encore le système aurait pu avoir une faible impulsion initiale et se déplacer lentement mais longtemps – et donc parcourir une grande distance ; mais alors les deux étoiles à neutrons auraient dû être suffisamment éloignées au départ pour ne pas fusionner trop vite. En rassemblant tous ces différents scénarios, on peut calculer les probabilités de partir de telle ou telle situation initiale avec telle ou telle impulsion.

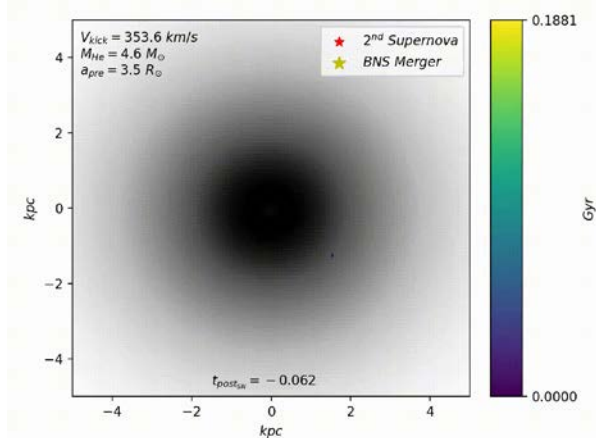


[http://www.ligo.org/science/Publication-GW170817Progenitor/images/191\\_movie.gif](http://www.ligo.org/science/Publication-GW170817Progenitor/images/191_movie.gif)



[http://www.ligo.org/science/Publication-GW170817Progenitor/images/263\\_movie.gif](http://www.ligo.org/science/Publication-GW170817Progenitor/images/263_movie.gif)

Figure 1 : Voir les gifs animés dont les liens sont donnés ici.



[http://www.ligo.org/science/Publication-GW170817Progenitor/images/353\\_movie.gif](http://www.ligo.org/science/Publication-GW170817Progenitor/images/353_movie.gif)

Exemples de simulations de la trajectoire de systèmes binaires d'étoiles à neutrons autour d'une galaxie dont les évolutions correspondent à nos observations de l'événement GW170817. La ligne montre le parcours du système binaire au sein de la galaxie ; le code de couleurs donne le temps restant jusqu'à la fusion, mesuré en milliards d'années ; l'étoile rouge marque l'emplacement de la seconde supernova ; la flèche indique la direction de l'impulsion initiale ; enfin, l'étoile jaune correspond au point où la fusion a lieu. On peut voir que certaines trajectoires sont simples (comme des frappes directes au billard) alors que d'autres sont plus compliquées (comme une boule de billard qui rebondirait sur de nombreux bords avant de finalement rejoindre la poche du coin).

Pour plus d'informations sur ces animations, voir la Figure 4 de [l'article scientifique associé](#).

Les résultats de nos simulations forment un ensemble de paramètres « équilibrés » et qui « collent » bien avec nos observations. Au moment de la seconde supernova, l'orbite du système binaire avait à peu près deux fois la [taille de notre Soleil](#) (ce qui n'est pas grand pour des étoiles) : si les deux étoiles avaient été plus proches, elles auraient fusionné plus tôt ; tandis que si elles avaient été plus éloignées, la collision n'aurait pas encore eu lieu. A ce même instant, le système binaire était situé à environ deux kiloparsecs (soit sept mille années-lumière, ou encore cent milliards de fois le rayon du Soleil) du centre de sa galaxie hôte. Plus d'étoiles se forment plus près du centre mais c'est ensuite plus difficile de

s'échapper de cette zone pour atteindre l'endroit où la contrepartie électromagnétique a été observée. L'impulsion de la seconde supernova était d'environ 300 kilomètres par seconde – des reculs plus forts sont peu vraisemblables car ils auraient brisé la cohésion du système binaire. Enfin, pour donner la bonne impulsion de départ et pour modifier l'orbite du système, la seconde supernova a probablement été produite par une étoile qui pesait environ trois fois la masse du Soleil. Il s'agit ici de premiers résultats basés sur une fusion d'étoiles à neutrons ; à mesure que de nouvelles collisions de ce type seront observées, nos connaissances sur la matière formant les étoiles à neutrons et sur ce qui se passe exactement lors de l'explosion d'une supernova progresseront.

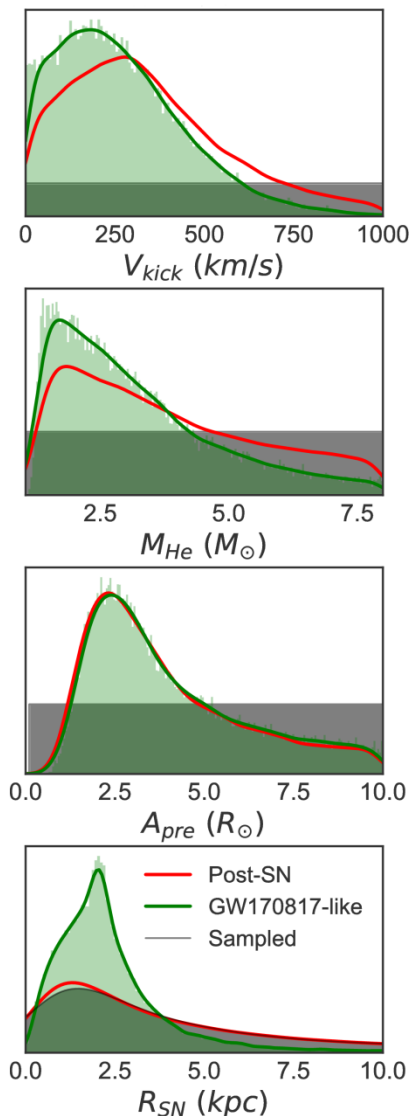


Figure 2 : Estimations des propriétés de la seconde supernova et du système binaire ; en haut : la valeur de l'impulsion initiale de la seconde supernova ; en-dessous : la masse de l'étoile avant son effondrement gravitationnel ; puis la distance entre la supernova et l'autre astre ; enfin, en bas, la distance du système binaire par rapport au centre galactique. Les bandes colorées en gris montrent les distributions de ces variables pour tous les systèmes binaires que nous avons simulés (c'est-à-dire toutes les boules de billard que nous avons frappées). Les lignes rouges montrent les distributions de la fraction de systèmes binaires qui fusionnent après l'explosion des deux supernovae (toutes les boules qui arrivent dans une poche du billard). Enfin, les lignes vertes montrent les distributions de tous les systèmes binaires qui fusionnent à un emplacement dans la galaxie similaire à celui où GW170817 a été observé (toutes les boules qui finissent dans la bonne poche). Pour plus de détails, voir la Figure 5 de [l'article scientifique correspondant](#).

### Glossaire

- **Ondes gravitationnelles** : Ce sont des ondulations qui compriment et étirent l'espace-temps et qui sont créés par les accélérations d'objets massifs. Leur existence est une prédiction de la théorie de la



LIGO  
Scientific  
Collaboration



relativité générale d'Einstein. Tout comme les ondes électromagnétiques, elles voyagent à la [vitesse de la lumière](#). Si vous n'avez encore jamais entendu parler des ondes gravitationnelles, vous êtes au bon endroit ! Pour en savoir plus, lisez nos autres articles sur les ondes gravitationnelles dont les premiers signaux ont été observés depuis deux ans par LIGO et Virgo. Chaque détection a son petit nom : « GW » (pour « Gravitational Wave », « Onde Gravitationnelle » en français) suivi de la date d'observation au format « aa/mm/jj » (année-mois-jour) ; par exemple GW150914 pour le premier signal enregistré le 14 septembre 2015.

- **Ondes électromagnétiques** : Ce sont des ondulations des champs électromagnétiques. Leur existence est une prédiction de la théorie de l'électromagnétisme de Maxwell. Tout comme les ondes gravitationnelles, les ondes électromagnétiques peuvent être utilisées pour faire de l'astronomie. On appelle souvent « lumière » les ondes électromagnétiques. La lumière visible va du rouge au violet mais au-delà des couleurs de l'arc en ciel il y a d'autres types d'ondes électromagnétiques, invisibles à l'œil. En deçà du rouge, il y a ce qu'on nomme l'infrarouge, puis les micro-ondes et enfin les ondes radio. A l'autre bout du spectre, au-delà du violet, on trouve l'ultraviolet, les rayons X et les rayons gamma. Chaque gamme de longueur d'onde issue du [spectre électromagnétique](#) nous donne des informations sur des propriétés différentes de notre Univers. Depuis longtemps LIGO et Virgo avaient prévu l'intérêt de partager leurs détections avec de nombreux télescopes du monde entier, afin d'en apprendre le plus possible sur les sources de nos signaux.

- **Etoile à neutrons** : Les restes très denses d'une étoile qui s'est effondrée sur elle-même. On pense que la masse des étoiles à neutrons varie entre une et trois fois [celle de notre Soleil](#). Les masses-limites possibles ne sont pas encore connues avec précision mais nos connaissances devraient progresser à mesure que d'autres détections du même type sont enregistrées. La masse maximale possible pour une étoile à neutrons dépend des propriétés de la matière dont elle est faite. C'est un type de matière très particulier, semblable à celle dont les noyaux atomiques sont composés mais en beaucoup plus gros : une étoile à neutrons a la taille d'une grande ville.

- **Supernova** : Il s'agit de l'explosion violente d'une étoile qui produit rapidement un objet lumineux dont la brillance diminue ensuite. Une supernova peut même être (fugacement) plus brillante que l'ensemble de sa galaxie hôte. Il existe de nombreux types de supernovae. Certaines sont issues de [l'effondrement d'étoiles massives](#) tandis que d'autres pourraient provenir de la collision de deux naines blanches. Une supernova a été observée dans notre Galaxie en [1054](#). Il s'agissait dans ce cas de l'effondrement d'une étoile massive : ces couches externes ont été balayées et ont formé la [nébuleuse du Crabe](#) ; tandis que le cœur subsiste sous la forme d'une étoile à neutrons : le [pulsar du Crabe](#).

#### Pour en savoir plus

- Le [preprint](#) de l'article scientifique publié par LIGO et Virgo.
- 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>

