



LIGO  
Scientific  
Collaboration



## Prédire les suites de la fusion d'étoiles à neutrons qui a produit l'événement GW170817

La source du signal d'ondes gravitationnelles GW170817, très probablement une fusion de deux étoiles à neutrons, a également été détectée dans le spectre électromagnétique : c'est la première observation multi-messagers associant ondes gravitationnelles et lumière. Dans cet article, nous nous intéressons à la matière qui a été éjectée lorsque les deux étoiles à neutrons ont fusionné. On s'attend à ce que cette matière soit le théâtre de « processus-r » de nucléosynthèse et qu'une émission de lumière brillante, appelée « kilonova », ait lieu. Un tel phénomène a d'ailleurs été observé par les astronomes pour GW170817. On peut étudier la matière émise à partir des données d'ondes gravitationnelles en utilisant des simulations de fusions d'étoiles à neutrons. Plus précisément, on prend comme paramètres de ces modèles les masses des étoiles à neutrons mesurées pour l'événement GW170817 et on estime ensuite la quantité de matière éjectée de manière *dynamique*, pendant la fusion. Selon les simulations, entre un millième et un centième de la masse du Soleil a été émis au cours du phénomène. Cette information sert ensuite à prédire l'évolution en termes de brillance et de couleur de la lumière émise par la kilonova. De plus, ces prédictions associées à l'estimation du taux de fusion d'étoiles à neutrons obtenue à partir de l'observation de GW170817 permettent de quantifier la contribution de ces événements à l'abondance des éléments chimiques lourds dans l'Univers – comme l'or !

### Introduction

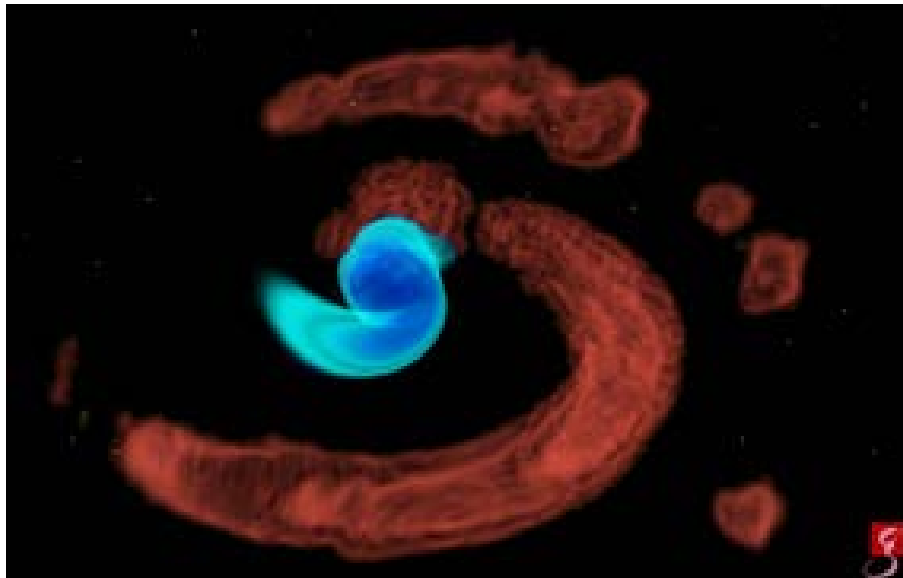
Le signal GW170817, issu de la fusion de deux [étoiles à neutrons](#) (EN), se démarque des précédentes détections d'ondes gravitationnelles qui concernaient des fusions de [trous noirs](#) car elle met en jeu non seulement la physique de l'espace-temps courbé mais aussi celle de la matière très dense. En particulier, la matière riche en neutrons impliquée dans la collision entre ENs peut produire une « contrepartie » (c'est-à-dire une émission) électromagnétique (EM). Une partie de cette matière est éjectée au cours de la fusion et subit des [processus-r](#) de nucléosynthèse. Ces réactions nucléaires conduisent à une émission intense de lumière, appelée [kilonova](#) et qui a d'ailleurs été observée par de nombreux télescopes pour l'événement GW170817 – pour plus d'informations, voir le [résumé de l'article scientifique sur les observations multi-messagers](#). En utilisant uniquement les données des détecteurs d'ondes gravitationnelles LIGO et Virgo sur le signal GW170817, on peut contraindre les propriétés de la masse émise lors de la fusion et les comparer avec les observations EM.

### Estimation de la masse éjectée par la fusion

On peut prédire la quantité de matière émise lors de la fusion d'étoiles à neutrons en utilisant des simulations numériques qui résolvent les [équations d'Einstein](#) (lesquelles font le lien entre courbure de l'espace-temps et densités de masse et d'énergie) ainsi que les équations d'hydrodynamique relativiste (qui décrivent la matière des ENs) et, dans certains cas, d'autres équations qui prennent en compte la présence d'un champ magnétique ou les émissions de [neutrinos](#). Ces simulations montrent que la quantité de matière éjectée dépend de nombreux paramètres : en premier lieu les masses des ENs, leurs tailles et la manière dont la matière est liée gravitationnellement dans ces astres. Techniquement, on parle de « compacité » (c'est-à-dire de la taille de l'étoile à neutrons rapportée à sa masse) et « d'énergie de liaison » (la quantité d'énergie qu'il faudrait apporter pour disloquer complètement l'astre). Pour cette étude, nous utilisons une formule qui donne la masse totale éjectée en fonction de ces propriétés des ENs et qui a été calibrée en utilisant les résultats d'une centaine de simulations numériques de

fusions d'étoiles à neutrons. Ces prédictions prennent uniquement en compte la matière éjectée *dynamiquement* pendant la phase la plus violente de la fusion. De la matière supplémentaire peut être éjectée sur des temps plus longs après la fusion, par des vents stellaires issus du disque de matière qui entoure l'astre produit par la fusion (étoile à neutrons ou trou noir, mystère ...). Mais cette contribution n'est pas incluse dans les simulations à partir desquelles la formule numérique a été ajustée et donc elle n'apparaît pas dans cette étude.

Les masses des étoiles à neutrons du système binaire GW170817 sont calculées à partir des signaux d'ondes gravitationnelles observés. A partir de ces masses, on peut en déduire les compacités des astres et leur énergie de liaison en utilisant une équation d'état qui décrit le comportement à grande échelle de la matière dans une étoile à neutrons (voir le [résumé scientifique de l'article décrivant la détection de GW170817](#) pour plus d'informations). Comme la matière des étoiles à neutrons est bien plus dense que n'importe quelle forme de matière que l'on peut étudier en laboratoire (à l'exception des collisions à haute énergie entre particules), l'équation d'état n'est connue qu'avec des incertitudes. Il faut donc prendre en compte toute une gamme de prédictions théoriques. Sinon, on peut utiliser les mesures des déformations de marée des étoiles à neutrons fournies par l'analyse des signaux d'ondes gravitationnelles pour estimer leur compacité et leur énergie de liaison en comparant les données aux prédictions fournies par une série d'équations d'état. Comme expliqué dans le [résumé scientifique de la détection de GW170817](#), les déformations de marée nous disent comment une étoile à neutrons se déforme sous l'action de la gravité de l'autre, ce qui nous renseigne sur sa propre structure interne.



*Vue d'artiste d'une simulation de la fusion de deux étoiles à neutrons dont les masses correspondent à celles estimées pour l'événement GW170817. Crédits : T. Dietrich, S. Ossokine, H. Pfeiffer, A. Buonanno/Max Planck Institute for Gravitational Physics/BAM Collaboration.*

### **Courbes de lumière**

En fonction de la quantité de masse éjectée par le système d'étoiles à neutrons et de la manière dont ce phénomène se déroule, la kilonova aura un spectre d'émission électromagnétique différent. Nous utilisons trois modèles différents pour calculer en fonction de la masse éjectée les signaux dans le visible et dans l'infrarouge proche (appelés génériquement « courbes de lumière »), susceptibles d'être

observés. Les astronomes qui ont suivi la contrepartie électromagnétique de l'événement GW170817 peuvent alors comparer leurs mesures avec ces prédictions pour tester ces modèles et valider (ou pas) l'hypothèse que la matière est principalement éjectée de manière dynamique. Grâce à GW170817, on peut faire ces comparaisons pour la première fois, une des nombreuses voies de recherche excitantes ouvertes par cet événement fondateur pour l'astronomie multi-messagers avec ondes gravitationnelles !

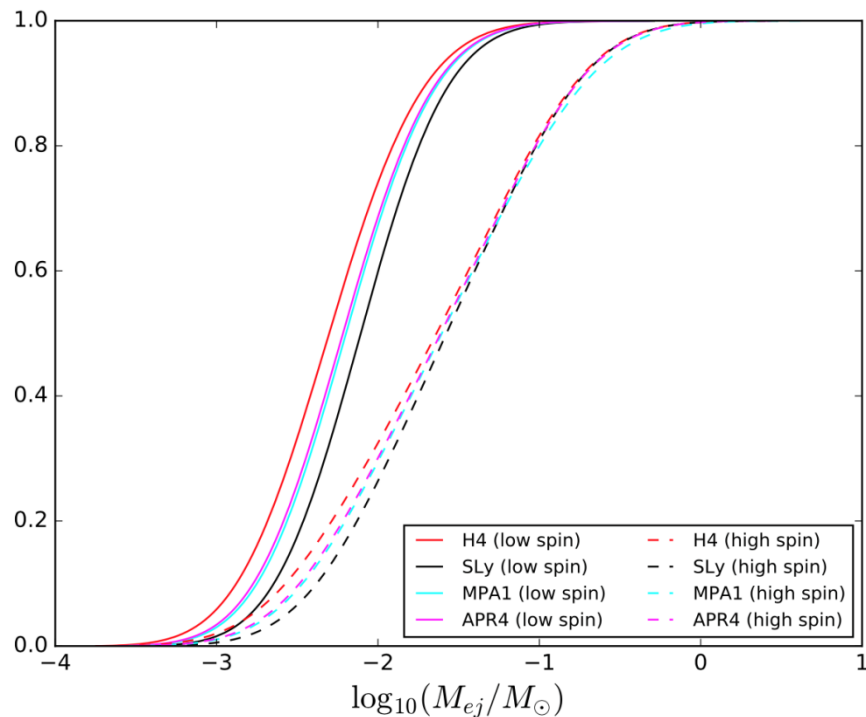


Figure 1 : Ces courbes montrent, pour différents modèles, la probabilité (entre 0 et 1, donnée sur l'axe vertical du graphique) qu'une quantité de matière inférieure à la valeur reportée sur l'axe horizontal (en échelle logarithmique et exprimée en unité de la masse du Soleil : 0  $\leftrightarrow$  éjection d'une masse solaire ; -1  $\leftrightarrow$  un dixième de masse solaire ; -2  $\leftrightarrow$  un centième ; -3  $\leftrightarrow$  un millième, etc.) ait été éjectée au cours de la fusion GW170817. Les courbes en trait plein supposent que les étoiles à neutrons n'avaient pas (ou peu) de mouvement de rotation propre (« spin » en anglais) tandis que les courbes pointillées correspondent à des valeurs élevées du spin. Les couleurs permettent de séparer différentes hypothèses sur la compacité et l'énergie de liaison des étoiles à neutrons. Dans le cas des faibles spins, la matière éjectée ne peut pas excéder environ un pourcent de la masse du Soleil. Ce graphique est la Figure 1 de [l'article scientifique correspondant](#).

### Le « Processus-r »

Les processus de capture rapide (d'où le « r ») de neutrons sont une manière de créer des éléments chimiques plus lourds que le fer et il a été suggéré que les fusions d'ENs pourraient être la source des éléments créés par processus-r que l'on rencontre dans notre Galaxie aujourd'hui, y compris ceux présents sur Terre. On pense que les supernovæ contribuent également aux abondances de ces éléments mais on ne sait pas si des fusions d'étoiles à neutrons ou des supernovæ sont les processus dominants. Si les fusions d'ENs sont à l'origine de l'ensemble des éléments observés, elles doivent

éjecter une quantité substantielle de matière sensible aux processus-r et se produire relativement souvent dans l'Univers. A partir des données d'ondes gravitationnelles pour GW170817, on obtient des contraintes sur à la fois la masse éjectée et le taux d'ENs, qui peuvent ensuite être utilisées pour estimer la contribution des ENs à l'abondance des éléments produits par processus-r. En supposant que toutes les fusions d'ENs ont des propriétés similaires à celles de l'événement GW170817, on trouve que si environ 10% de la masse éjectée dynamiquement est convertie en éléments lourds par processus-r, les fusions d'ENs pourrait rendre compte de l'ensemble des abondances observées. Les détections futures en ondes gravitationnelles d'autres fusions d'ENs aideront à résoudre le mystère de l'origine des éléments plus lourds que le fer dans l'Univers, une question ouverte depuis longtemps.

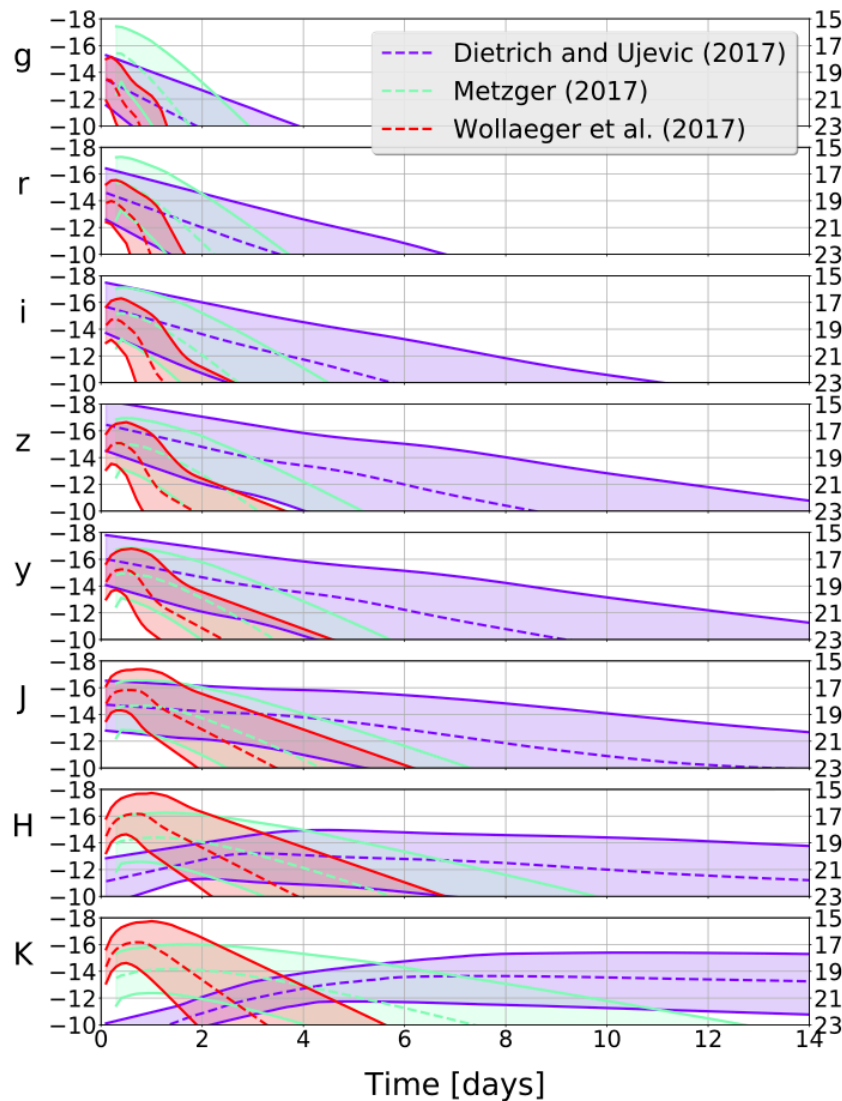


Figure 2 : Les courbes de lumière présentées ci-dessus montrent la quantité de lumière détectée sur Terre en provenance de la kilonova créée par la matière émise par la fusion d'étoiles à neutrons GW170817. Chaque graphique donne la brillance prédite pour la source (sous forme de magnitude, représentée sur

l'axe vertical) en fonction du temps écoulé depuis la fusion (en jours, sur l'axe horizontal) et pour une « couleur » (ou « filtre », une gamme de longueurs d'ondes observables par un télescope donné). De haut en bas, on va du bleu/vert à l'infrarouge proche. Cette image est la Figure 3 de [l'article scientifique correspondant](#).

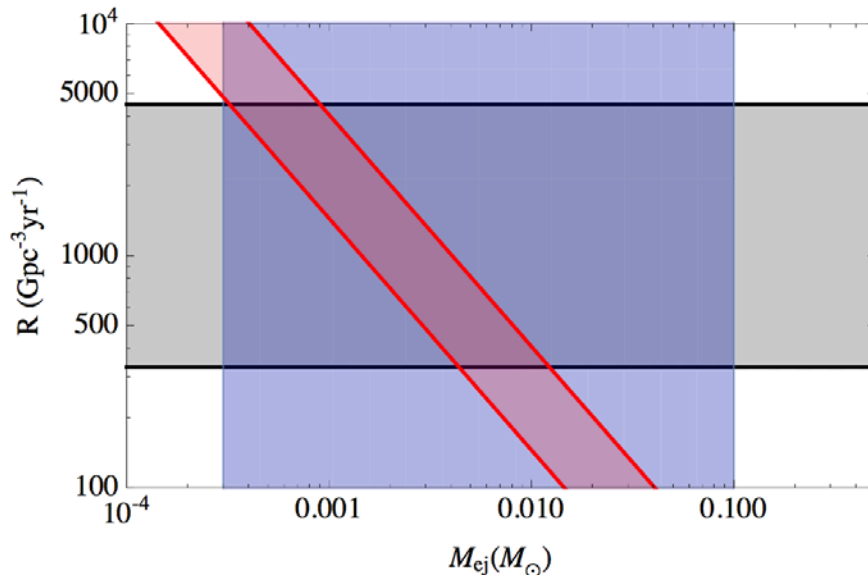


Figure 3 : Ce graphique montre comment les fusions d'étoiles à neutrons pourraient être la source principale de certains éléments chimiques lourds. L'axe vertical montre le « taux d'occurrence » de ces fusions, c'est-à-dire la fréquence à laquelle elles arrivent chaque année dans un volume d'espace d'un gigaparsec-cube. L'axe horizontal donne lui la quantité de matière éjectée lors de la fusion de systèmes binaires comparables à GW170817 (à nouveau en échelle logarithmique et rapportée à la masse du Soleil). La bande grise horizontale donne la fourchette de taux calculée à partir de l'événement unique GW170817 tandis que la bande verticale bleue délimite les valeurs que les astronomes jugent réalistes pour la quantité de matière éjectée, basées sur les observations de sources brillantes réalisées avec leurs télescopes. Enfin, la bande rouge qui traverse largement la région de recouvrement entre les bandes grise et bleue montre la relation qui doit exister entre taux d'occurrence et quantité de matière éjectée pour que les abondances observées aujourd'hui soient imputées en totalité aux fusions d'étoiles à neutrons.

Puisque les trois bandes se recouvrent, il est possible que les fusions d'étoiles à neutrons soient le principal producteur d'éléments chimiques lourds. Les futures observations qui viendront s'ajouter au signal GW170817 permettront d'affiner ou de réfuter ce scénario. Ce graphique est la Figure 1 de [l'article scientifique correspondant](#).

## Glossaire

- **Processus-r** : des processus de capture rapide de neutrons. Une manière de produire des éléments chimiques plus lourds que le fer est de partir d'éléments plus légers qui absorbent une grande quantité de neutrons, formant ainsi des isotopes radioactifs instables. Certains des neutrons se désintègrent alors en protons (par [radioactivité bêta](#) moins) et le processus se poursuit jusqu'à la formation d'isotopes stables.
- **Courbe de lumière** : L'évolution de la brillance électromagnétique d'une source, en fonction du temps et pour un filtre de couleur donné.



LIGO  
Scientific  
Collaboration



- **Astronomie multi-messenger** : L'utilisation conjointe de données issues de télescopes électromagnétiques, de détecteurs de particules (chargées ou neutres) et de détecteurs d'ondes gravitationnelles pour en apprendre plus sur l'astrophysique (astres et phénomènes peuplant l'Univers).

**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>

