

Pas encore de montagne sur les pulsars millisecondes

Daté du 29 juillet 2020. Retrouvez cet article en ligne et dans d'autres langues à l'adresse <https://www.ligo.org/science/Publication-O3aMSPs>.

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

**

*

Depuis 2015, toutes les découvertes d'ondes gravitationnelles (OGs) proviennent de fusions de systèmes binaires de trous noirs et d'étoiles à neutrons détectées par **LIGO** et **Virgo**. Cependant, ces systèmes ne sont pas les seules sources d'OGs prédites : les étoiles à neutrons en rotation sont par exemple d'autres sources très prometteuses. Ces astres sont connus pour tourner rapidement sur eux-mêmes mais ralentissent au cours du temps, en partie à cause de l'émission attendue d'OGs. Ce « **spin-down** » (terme anglais qu'on pourrait traduire par « ralentissement du mouvement de toupie ») est extrêmement lent ; par conséquent, la fréquence de rotation de l'étoile à neutrons reste pratiquement constante durant le temps d'observation pendant lequel le signal est recherché. Nous qualifions donc ces OGs de « continues » car elles sont émises en permanence et à une fréquence fixe. Durant les **périodes de prises de données** LIGO-Virgo (appelées « **runs** ») précédentes, des **limites supérieures** significatives ont déjà pu être placées sur l'**amplitude des ondes gravitationnelles** émises par des étoiles à neutrons en rotation rapide sur elles-mêmes. La figure 1 montre une vue d'artiste d'une étoile à neutrons dans un système double.

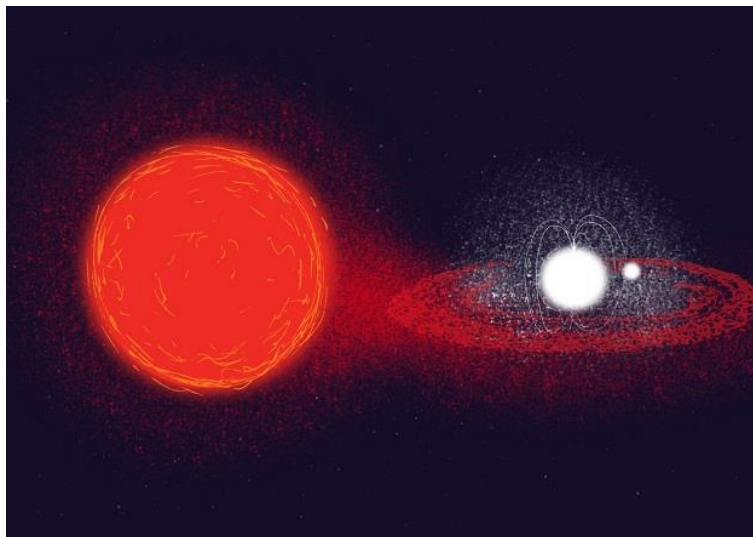


Figure 1 : Vue d'artiste du pulsar milliseconde PSR J1023+0038 (l'astre blanc sur la droite entouré de ses lignes de champ magnétique). Très dense, il extrait par gravitation de la matière de son étoile compagne (représentée en rouge sur la gauche) via un disque d'accrétion (également visible en rouge). Source : Agence Spatiale Européenne (ESA).



Les pulsars sont des étoiles à neutrons en rotation rapide particulières qui, tels des phares, balayent le cosmos de leurs émissions électromagnétiques (ondes radio et rayons X). Pour certains pulsars, la Terre est sur la trajectoire de ces émissions qui sont détectées sous forme de bouffées qui arrivent avec une régularité incroyable, faisant de ces astres de véritables horloges. Les instants où ces bouffées arrivent sur Terre peuvent être mesurés avec une très grande précision et donc également la rotation du pulsar sur lui-même. Les variations de la fréquence du mouvement de rotation et l'effet de spin-down font varier légèrement la période des bouffées électromagnétiques détectées. Les mécanismes physiques responsables de ces effets ne sont pas complètement compris : détecter les OGs émises par des pulsars pourrait aider à expliquer ces changements.

Afin de générer des OGs, un pulsar doit être asymétrique autour de son axe de rotation, par exemple la présence de « montagnes » à sa surface. Plusieurs origines sont possibles pour de telles déformations : elles pourraient avoir été « figées » dans la croûte ou le noyau de l'étoile à neutrons lorsque cette dernière est née d'une supernova ; ou bien dues à l'accumulation de matière tombant sur l'étoile à neutrons ; ou encore causées et préservées par les forces magnétiques extrêmement intenses qui y règnent. Les modèles prédisent que les OGs sont émises à une fréquence égale à une ou deux fois la fréquence de rotation de l'étoile : cela dépend du mécanisme d'émission. Deux cas peuvent aboutir à la première relation (fréquence des OGs = fréquence de rotation de l'étoile) : lorsque l'étoile à neutrons oscille en tournant ; ou bien lorsqu'elle possède un noyau supraconducteur qui n'est pas entièrement fixé à la croûte : les distributions internes de densité correspondantes sont alors désalignées, ce qui produit l'asymétrie recherchée. Lorsque l'étoile à neutrons est déformée de manière asymétrique, on obtient la seconde relation : la fréquence des OGs est le double de celle de la rotation de l'astre,

La recherche d'OGs décrite dans cet article ne présuppose aucun mécanisme particulier de formation. Nous cherchons plutôt à mesurer un signal continu quelconque et ensuite, dans le cas d'une détection, à le relier à un processus précis. Sur la base d'observations en ondes radio, de rayons-X et de rayons gamma réalisées par des astronomes, la position dans le ciel, la fréquence, le spin-down et même la variation du spin-down sont connues pour beaucoup de pulsars, ce qui est très utile pour la recherche d'OGs – toutes les caractéristiques du signal sont connues ... à l'exception de son amplitude ! Pour ces pulsars, un objectif important est de dépasser leur « **limite de spin-down** » ; c'est-à-dire d'avoir une méthode d'analyse des données **sensible** à une amplitude d'OG plus petite que celle prédite quand on suppose le scénario le plus extrême, c'est-à-dire que toute l'énergie de rotation perdue par l'étoile à neutrons est transformée en OGs. Quand une recherche atteint ce niveau de sensibilité, elle sonde alors vraiment des mécanismes d'émission physiquement plausibles et offre une véritable chance de détecter des OGs.

L'analyse présentée ici utilise les données enregistrées pendant trois runs LIGO-Virgo – O1 (2015-2016), O2 (2016-2017) et la première partie de O3, d'avril à septembre 2019 -- pour contraindre l'émission d'OGs de cinq pulsars à une ou deux fois la fréquence de rotation de chaque astre. Bien qu'aucun signal n'ait été détecté, nous avons atteint une sensibilité qui nous permet de voir « sous » la limite de spin-down pour deux de ces pulsars et ce pour la première fois ! Il est important de remarquer qu'il s'agit de « pulsar milliseconde », ce qui signifie qu'ils tournent très rapidement sur eux-mêmes. Et, puisque l'émission d'OGs devient plus efficace à haute fréquence, produire

des OGs détectables ne nécessite pas une grande asymétrie. Ainsi, nous avons calculé que l'équateur du pulsar J0711-6830, situé à quelques 358 années-lumière de la Terre, est un cercle parfait à l'épaisseur d'un cheveu humain près ! Sinon son signal d'OGs aurait été détecté.

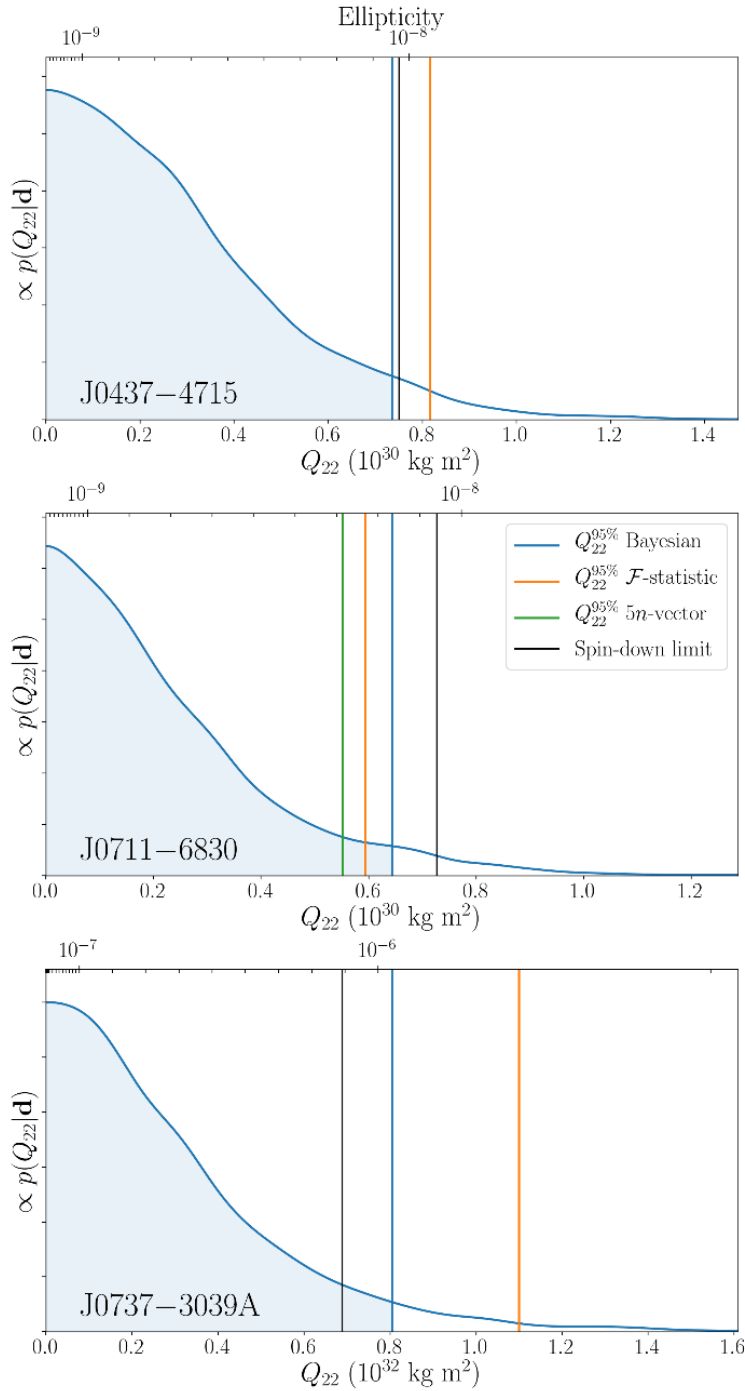


Figure 2 : Contraintes sur le niveau de déformation – exprimé en terme de moment quadrupolaire de la masse Q_{22} (axe des abscisses au-dessous des graphiques) ou d'ellipticité (axe des abscisses au-dessus des graphiques) – de trois pulsars recyclés, obtenues à partir des

nouvelles observations LIGO-Virgo. Les courbes représentées sur chaque graphique sont des distributions de postérieurs Bayésiens : la région en dessous d'une courbe donnée et comprise entre deux valeurs du moment quadrupolaire ou de l'ellipticité mesure la probabilité que la vraie valeur de ce paramètre se trouve dans cet intervalle – pour les données enregistrées et le modèle choisi pour les décrire. Les lignes verticales noires représentent les limites du spin-down et les lignes verticales colorées la limite en-dessous de laquelle le vrai niveau de déformation a 95% de chance de se trouver. Chaque ligne colorée correspond à une analyse différente.

Lorsque les limites supérieures à 95% de confiance du niveau de déformation (les lignes colorées) sont « à gauche » (c'est-à-dire plus petites) que la ligne noire, on dit que la limite de spin-down est battue.

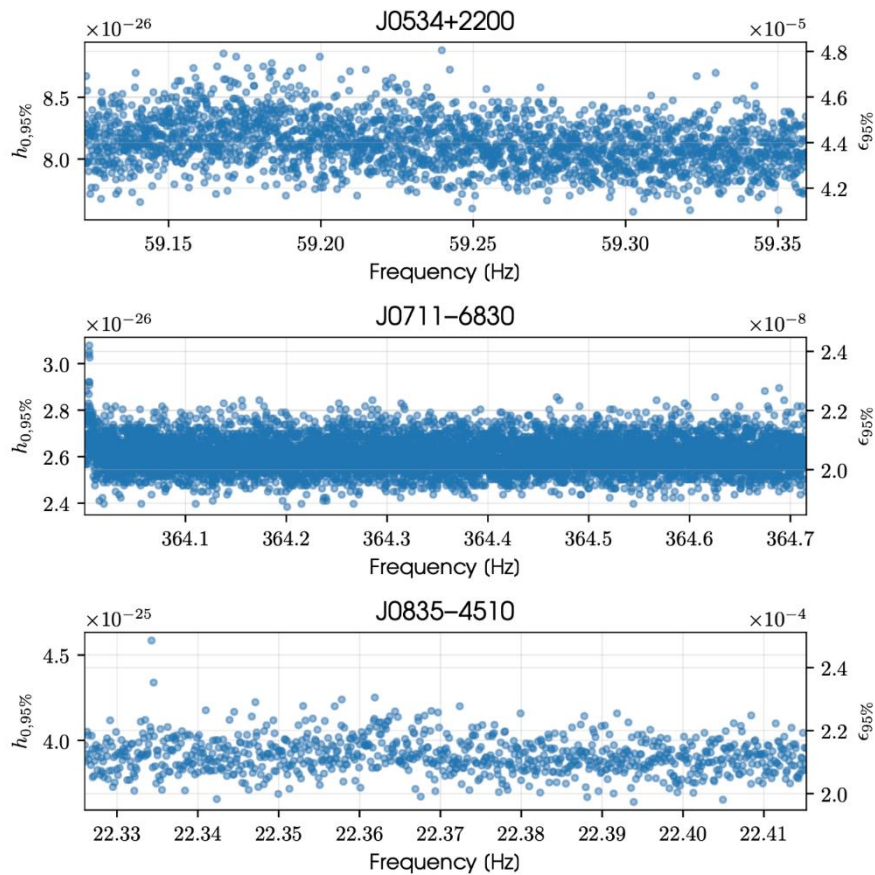


Figure 3 : Limites supérieures à 95% de confiance obtenues pour l'amplitude des OGs émises (axes des ordonnées de gauche) ou l'ellipticité de l'étoile à neutrons (axes des ordonnées de droite), en fonction de la fréquence d'émission de l'OG (axe des abscisses). Ces résultats ont été obtenus avec une analyse dite « à bande de fréquence étroite » pour trois pulsars : de haut en bas, le pulsar du Crabe, le pulsar milliseconde pour lequel la limite de spin-down vient d'être dépassée et le pulsar Vela.

Ces limites supérieures peuvent être observées plus en détails sur les figures 2 et 3. Pour des pulsars plus lents, comme ceux du Crabe et de Vela, des déformations plus marquées sont nécessaires pour générer des signaux détectables. Or, de petites déformations ont plus de chance de se former et de



résister à la gravité extrêmement forte de l'étoile à neutrons que les grandes. Dépasser la limite de spin-down pour les pulsars milliseconde est donc un événement très important pour l'astronomie en ondes gravitationnelles.

Glossaire

- **Amplitude de l'onde gravitationnelle** : c'est une quantité sans dimension qui mesure la variation relative de la séparation entre deux points de mesure, due à la déformation de l'espace-temps causé par le passage d'une OG. Cette amplitude décroît comme l'inverse de la distance : comme les sources d'OG détectées sont très distantes, l'amplitude du signal est très faible lorsqu'il arrive sur Terre (typiquement plus petit que 10^{-21}), même si le phénomène qui lui a donné naissance peut avoir été très violent (comme par exemple la fusion de deux astres compacts, trous noirs ou étoiles à neutrons).
- **LIGO** : Le Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory (« Observatoire d'ondes gravitationnelles par interférométrie laser »), en abrégé LIGO, est un ensemble de deux détecteurs d'ondes gravitationnelles construits aux États-Unis. Le premier se trouve près de Livingston en Louisiane tandis que le deuxième est proche de Hanford dans l'État de Washington. Ces deux instruments sont des interféromètres laser géants dont les deux bras perpendiculaires mesurent 4 km de long. Le défi consiste à mesurer d'infimes changements dans la longueur des bras qui pourraient être dus au passage d'une OG.
- **Virgo** : Le troisième détecteur d'ondes gravitationnelles du réseau global d'instruments, situé près de Pise en Italie. Comme les détecteurs LIGO, il s'agit également d'un interféromètre laser géant, doté de bras de 3 km de long.
- **Limite supérieure** : Valeur maximum qu'une quantité physique que l'on cherche à mesurer peut prendre tout en restant compatible avec les observations. Par exemple l'amplitude maximale de l'onde gravitationnelle qu'un pulsar peut avoir émise en sachant que le signal correspondant n'a pas été découvert par LIGO-Virgo. Une limite supérieure ne peut pas être déterminée de façon absolue, elle est toujours associée à un niveau de confiance. Ainsi, une limite supérieure à 95% de niveau de confiance signifie que la quantité inconnue a 95 chances sur 100 d'être plus faible que cette valeur.
- **OG** : abréviation de « onde gravitationnelle »
- **Période de prise de données** ou « **run** » : Les périodes pendant lesquelles les détecteurs LIGO et Virgo enregistrent des données. Par exemple 11 mois pour le run O3 : avril-septembre 2019, puis novembre 2019-mars 2020.
- **Pulsar milliseconde** : Un pulsar tournant rapidement sur lui-même avec une période de rotation de moins de 30 millisecondes et un spin-down très faible.



- **Pulsar recyclé** : Un pulsar qui ne tourne pas forcément suffisamment vite que pour être qualifié de pulsar milliseconde mais qui a acquis une grande vitesse de rotation par accrétion de matière issue d'une étoile compagnon.
- **Sensibilité** : La variation du niveau de bruit de mesure du détecteur en fonction de la fréquence. Cette quantité permet d'estimer la capacité de l'instrument à détecter un signal donné. Diminuer le niveau de bruit revient à pouvoir détecter des signaux plus faible : on dit que la sensibilité s'améliore.
- **Spin-down** : Les pulsars sont des étoiles à neutrons en rotation dont la fréquence de rotation (appelée « spin » en anglais) décroît au-cours du temps à cause d'une perte d'énergie. La période de rotation augmente, le mouvement de « toupie » du pulsar ralentit.
- **Limite de spin-down** : Valeur limite supérieure pour l'amplitude des ondes gravitationnelles issues d'un pulsar. Cette limite est obtenue sous l'hypothèse que l'énergie cinétique de rotation perdue par l'étoile (mécanisme de spin-down) est entièrement émise sous forme d'OGs. Ce calcul nécessite de connaître précisément la distance du pulsar, une quantité dont l'incertitude peut être grande (jusqu'à un facteur 2). En réalité, nous savons que la perte d'énergie du pulsar doit avoir d'autres causes, par exemple les radiations magnétiques dipolaires. La limite de spin-down est donc une borne supérieure pour l'amplitude des OGs émises par une étoile à neutrons donnée.

Pour en savoir plus

- Visitez nos sites internet : ligo.org, virgo-gw.eu



- L'article scientifique complet est accessible gratuitement via le lien suivant : <https://arxiv.org/abs/2007.14251>