

Suche nach kontinuierlichen Gravitationswellen von Pulsaren bei zwei Frequenzen

Inzwischen wurde eine Vielzahl von Gravitationswellen-Signalen von Verschmelzungen kompakter Objekte nachgewiesen. Diese Signale waren jedoch alle flüchtige Ereignisse und konnten nur für kurze Zeit von den LIGO- und Virgo-Detektoren beobachtet werden, bevor sie verschmolzen (die Verschmelzung zweier Neutronensterne dauert einige Dutzend Sekunden und die eines Doppelsystems schwarzer Löcher passiert in Sekunden oder Bruchteilen davon). Diese Quellen waren sehr weit entfernt, weit jenseits unserer eigenen Galaxie, der Milchstraße. Die Signale zeigten eine charakteristische „Chirp“-Form, bei der die Frequenz und die Amplitude über die kurze Dauer des Signals ansteigen. Wir suchen aber auch nach ganz anderen Signalen – zum Beispiel Quellen, die immer ausstrahlen (d.h. kontinuierlich sind) und eine annähernd konstante (oder monochromatische) Frequenz haben, wie ein reiner Ton.

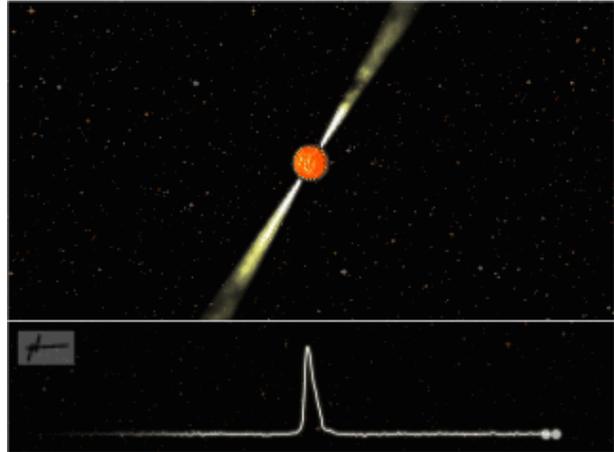


Abb. 1: Künstlerische Darstellung eines Pulsars. Bildnachweis: Joeri van Leeuwen, Lizenz: CC-BY-AS

Gravitationswellenquellen, die in unserer kosmischen Nachbarschaft kontinuierliche Signale liefern könnten, sind schnell rotierende kompakte Objekte wie Neutronensterne. Wir wissen, dass diese Objekte existieren, seit sie erstmals als Pulsare beobachtet wurden, und wir haben bereits das Gravitationswellensignal beobachtet, das beim Verschmelzen zweier Neutronensterne entsteht. Es sind die kollabierten Kerne massereicher Sterne, denen der Treibstoff ausgegangen ist, und die eine Supernova-Explosion durchlaufen haben. Mit einer Masse von etwas mehr als der der Sonne (ca. $2,8 \cdot 10^{30}$ Kilogramm), die in eine Kugel mit einem Radius von 10 Kilometer gepackt ist, sind Neutronensterne etwa 40 Billionen Mal dichter als Blei. Ein Teelöffel Neutronensternmaterial würde auf der Erde etwa 10 Millionen Tonnen wiegen, das entspricht dem Gewicht eines kleinen Berges. Neutronensterne drehen sich außerdem sehr schnell, einige an ihrer Oberflächen mit bis zu ca. 10 % der Lichtgeschwindigkeit. Diese Sterne sind also wirklich sehr extreme Objekte! Nach aktuellem Kenntnisstand kommt ihre gepulste Emission von Strahlenkegeln an den Magnetpolen der Sterne, die wie die Lichter eines Leuchtturms wirken. Wenn die Magnet- und Rotationsachse des Neutronensterns nicht in dieselbe Richtung zeigen, wird ein Aufleuchten beobachtet, wenn der Strahl einmal pro Neutronenstern-Umdrehung die Erde überstreicht.

Um Gravitationswellen zu erzeugen, muss ein Pulsar eine nicht symmetrische Verformung aufweisen – z. B. einen „Berg“, der nicht auf der Rotationsachse liegt. Es gibt verschiedene Ideen, wie sich ein derart verformter Stern bilden könnte. Die Verformung könnte in der Kruste oder im Kern des Sterns entstanden sein, nachdem er als Supernova geboren wurde. Sie könnte auch aus Material bestehen, das auf den Stern fällt, oder sie könnte durch extrem starke innere Magnetfelder erzeugt und aufrechterhalten werden. Aufgrund der enormen Anziehungskraft auf der Oberfläche des Sterns muss das Material des „Berges“ sehr stabil sein, um nicht platt gedrückt zu werden. Auf der Erde könnte ein Berg aus Wackelpudding zum Beispiel nicht sehr hoch werden, bevor er unter seinem eigenen Gewicht auseinander fließen würde; aber ein Berg aus massivem Gestein kann so hoch oder höher sein als der Mount Everest. Für einen Pulsar mit einer Kruste aus „normalem“ Neutronensternmaterial (stark verformte Atomkerne, freie Elektronen und Neutronen) beträgt die maximale Verformung etwa 10 Zentimeter. Für einen „Berg“ ist das nicht sehr hoch (auf der Erde entspräche dies einem Hügel von etwa 50 Metern Höhe). Wenn der Stern aus exotischeren Materialien besteht, z. B. ein Quarkstern ist,

kann er möglicherweise einen Berg von 10 Meter Höhe tragen. Die Berggröße kann auch als Elliptizität (ϵ) des Sterns ausgedrückt werden, die ein grobes Maß für die Größe der Verformung als Bruchteil des Radius des Sterns darstellt.

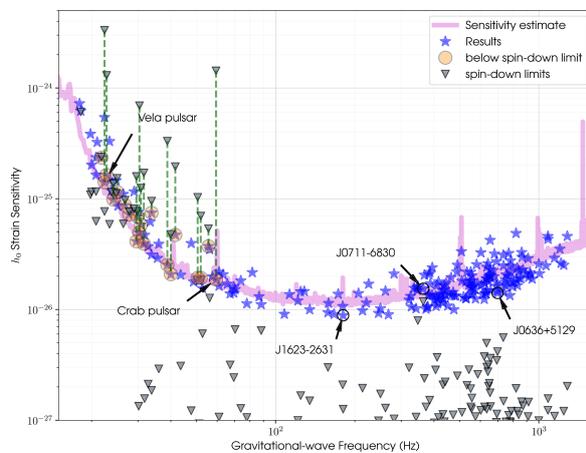


Abb. 2: Die Sterne in diesem Diagramm zeigen die Obergrenzen der Gravitationswellenamplitude für 221 Pulsare unter Verwendung von Daten aus dem ersten und zweiten Advanced LIGO-Beobachtungslauf. Die Dreiecke zeigen die Spin-Down-Grenzen für diese Sterne. Die Pulsare, für die unsere Beobachtungen die Spin-Down Grenzen unterschritten haben, sind durch Kreise hervorgehoben. Die zugrunde liegende Kurve gibt eine Schätzung der erwarteten Empfindlichkeit des Beobachtungslaufs.

nachweisbar sein könnten. Wir wissen jedoch, dass die Spin-Down-Grenze eine naive Obergrenze ist, da ein großer Teil des Spin-Downs auch auf andere Mechanismen wie die magnetische Dipolstrahlung zurückgeführt werden kann.

Wie beim „Leuchtturm“-Modell für elektromagnetische Emission, erwarten wir Gravitationswellensignale bei einer Frequenz, die mit der Rotation zusammenhängt – typischerweise beim Doppelten der Rotationsfrequenz. Es gibt etwas mehr als 450 bekannte Pulsare (siehe den Pulsarkatalog der Australia Telescope National Facility) die sich so schnell drehen, dass ihre Gravitationswellenabstrahlung im empfindlichen Frequenzband der aktuellen Advanced-LIGO- und Virgo-Detektoren (rund 20 Hertz bis 2000 Hertz) läge. In Kombination mit unseren früheren Untersuchungen (hier und hier zusammengefasst) wurden Daten aus den LIGO- und Virgo- Gravitationswellen-Observatorien verwendet, um nach Gravitationswellensignalen von 271 Pulsaren zu suchen. Dabei haben wir die Spin-Down-Grenze für acht von ihnen unterschritten.

Es besteht auch die Möglichkeit, dass Neutronensterne Gravitationswellen mit ihrer Rotationsfrequenz aussenden. Wenn ein Stern präzediert, d.h. seine Rotationsachse sich selbst bewegt und er wie ein schwankender Kreisel taumelt, dann träte eine solche Abstrahlung auf. Es gibt jedoch keine belastbaren Beobachtungsnachweise dafür, dass Pulsare präzedieren. Stattdessen gibt es eine andere Möglichkeit, ohne Präzession die Emission bei der Rotationsfrequenz zu erklären. Wenn der Stern einen supraleitenden Kern hat, der nicht fest mit der Sternkruste verbunden ist, und die Trägheitsmomente nicht parallel ausgerichtet sind, könnte eine solche Emission vorliegen.

In dieser neuen Analyse haben wir nach Signalen von insgesamt 221 Pulsaren gesucht, wobei wir kombinierte Daten des ersten und zweiten Beobachtungslaufs von den Advanced-LIGO- und Virgo-Detektoren (O1 bzw. O2) verwendet wurden. Bei der Suche wurden zwei Emissionsmodelle angenommen: eines mit der doppelten Rotationsfrequenz, und das andere, welches eine Emission bei der ein- und zweifachen Rotationsfrequenz ermöglicht. Dies ist das erste Mal, dass die LIGO-Scientific-Kollaboration und die Virgo-Kollaboration eine Suche nach Emissionen bestimmter Pulsare sowohl mit der einfachen als auch der doppelten Rotationsfrequenz durchgeführt haben. Um die bestmögliche Empfindlichkeit zu erzielen, haben wir Informationen zu diesen Pulsaren verwendet, die aus Radio-, Röntgen- und Gammastrahlenbeobachtungen gewonnen wurden. Darunter sind sehr genaue Kenntnisse über die

Wenn wir einige logische Annahmen treffen, können wir die maximale Amplitude der Gravitationswellen abschätzen, die von den meisten Pulsaren ausgesendet werden. Dazu wenden wir den Energieerhaltungssatz an. Pulsare drehen sich mit der Zeit langsamer (als „Spin-Down“ bezeichnet). Diese Spin-Downs nehmen sehr viel Zeit in Anspruch, und selbst Objekte mit sehr schnellen Spin-Downs drehen sich im Laufe eines Jahres nur um weniger als ein Hundertstel Hertz langsamer (das entspricht einer Zunahme ihre Rotationsperioden um weniger als zehn Mikrosekunden). Angesichts des großen Trägheitsmoments der Sterne bedeutet dies jedoch immer einen sehr großen Verlust an Rotationsenergie, der einer Leistung von 10^{31} Watt oder dem Zehntausendfachen der Leuchtkraft der Sonne entspricht. Wenn wir annehmen, dass all diese Energie durch das Aussenden von Gravitationswellen verloren geht, können wir die Amplitude berechnen, die diese Wellen bei Ankunft auf der Erde haben würden. Dies wird als „Spin-Down-Grenze“ bezeichnet. Wenn unsere Suche empfindlich genug ist, um diese Grenze zu unterschreiten, betreten wir interessantes Neuland, in dem Gravitationswellen

Himmelspositionen der Pulsare, ihre Rotationsfrequenzen und wie sich diese im Laufe der Zeit ändern. Diese Informationen haben es uns ermöglicht, jedes potenzielle Gravitationswellensignal in unseren Daten über die gesamte Länge des wissenschaftlichen Messlaufs genau zu verfolgen (eine Suchmethode, die als „kohärente Integration“ bezeichnet wird).

Mit dieser Suche konnten wir keine Hinweise auf Gravitationswellenabstrahlung von Pulsaren bei den zuvor genannten Frequenzen feststellen. Aufgrund des längeren Beobachtungslaufs und der erhöhten Detektorempfindlichkeit im Vergleich zu O1, haben wir jedoch die bisher besten Obergrenzen ermittelt, und für 20 Pulsare haben diese Beobachtungen Grenzen für die Amplitude der Gravitationswellen erzeugt (unter Verwendung von drei weitgehend unabhängigen statistischen Methoden), die unterhalb der Spin-Down-Grenze liegen. Zwei der Pulsare, die aufgrund ihrer großen Spin-Downs seit langem für die Suche nach Gravitationswellen von Interesse sind, sind der Pulsar im Krebsnebel und der Vela-Pulsar. Für diese Pulsare haben wir nun die Spin-Down-Grenze um den Faktor 70 bzw. 20 unterschritten. Daraus lässt sich ableiten, dass weniger als 0,02 % bzw. 0,2 % ihres beobachteten Energieverlusts auf die Abstrahlung von Gravitationswellen zurückzuführen sind. Wir können auch die Elliptizität der Sterne begrenzen und sagen, dass der Krebsnebel-Pulsar keine „Berge“ aufweist, die höher als ca. 3 Zentimeter sind, und dass der Vela-Pulsar keine hat, die höher als ca. 20 Zentimeter sind. Unter den anderen Pulsaren fanden wir 32 weitere, die innerhalb des Zehnfachen der Spin-Down-Grenze liegen. Allein aufgrund der Gravitationswellendaten können wir die Größe der „Berge“ für einige von diesen auf unter 0,1 Millimeter begrenzen, obwohl die Spin-Down-Grenze für diese Pulsare strikter ist.

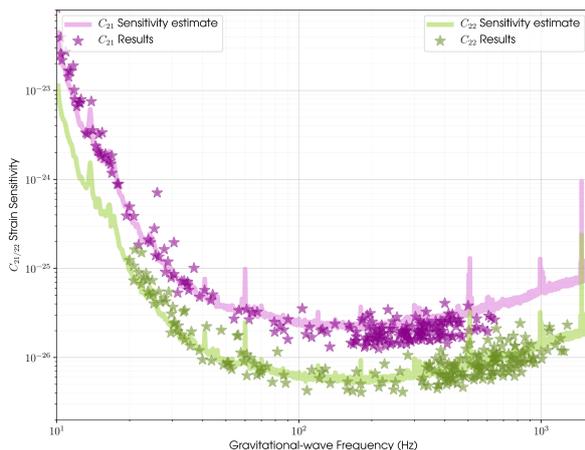


Abb. 4: Violette und grüne Sterne in dieser Abbildung zeigen die Obergrenzen der Gravitationswellenamplitude von 221 Pulsaren für Gravitationswellen-Abstrahlung beim Ein- bzw. Zweifachen der Rotationsfrequenz unter Verwendung der Daten aus dem ersten und zweiten Advanced LIGO-Beobachtungslauf. Die zugrunde liegenden Kurven geben Schätzungen der erwarteten Empfindlichkeit der Läufe für Suchen bei beiden Frequenzen an.

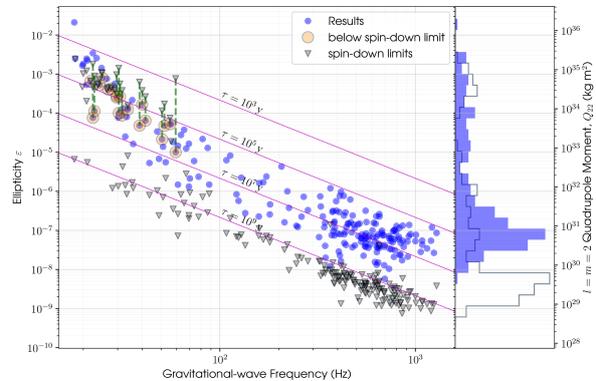


Abb. 3: Die gefüllten Kreise zeigen Obergrenzen in Bezug auf die Elliptizitäten ϵ der Sterne, während die Dreiecke die entsprechenden Spin-Down-Grenzen angeben. Die Elliptizität kann unter Verwendung von $25 \cdot (\epsilon / 10^{-4}) \text{ cm}$ grob in eine „Berg“-Größe umgewandelt werden (siehe Gravitational wave constraints on the shape of neutron stars für weitere Einzelheiten). Die diagonalen Linien zeigen die Elliptizitäten an, die erforderlich wären, wenn ein Stern ein bestimmtes charakteristisches Alter hätte, und seine Energie nur durch Gravitationsstrahlung verloren ginge.

Die Pulsare, welche die Spin-Down-Grenze unterschritten haben, sind alle relativ jung (Tausende bis Zehntausende Jahre alt) und haben eine stark abnehmende Rotationsgeschwindigkeit. Daher haben sie im Allgemeinen eine große Spin-Down-Energie. Dies bedeutet, dass eine große Menge an Energie zur Verfügung steht, so dass ein erheblicher Teil davon in die Emission von Gravitationswellen fließen kann; umgekehrt müssten die Sterne aber ziemlich stark verformt sein, damit dies geschehen kann. Die Größe der erforderlichen Berge liegt in der Nähe der zulässigen Höchstwerte oder darüber. Die Mehrheit der Pulsare in unserer Suche sind jedoch sehr viel ältere Millisekundenpulsare. Diese Sterne drehen sich tatsächlich schneller als ihre jüngeren Kollegen! Der Grund dafür ist, dass sie auf schnelle Rotationsraten beschleunigt wurden, indem sie einem Begleitstern den Drehimpuls stahlen. Sie befinden sich entweder in einem Doppelsternsystem oder waren Teil davon, und haben Material von ihrem Begleiter aufgenommen. Dadurch hat ihre Rotationsgeschwindigkeit zugenommen. Durch diesen Vorgang weisen sie außerdem eine viel langsamere Abnahme der Rotationsgeschwindigkeit auf,

was höchstwahrscheinlich auf eine starke Verringerung der externen Magnetfeldstärke zurückzuführen ist. Diese Pulsare haben daher eine geringere Spin-Down-Grenze als jüngere Pulsare, und weniger Energie steht zur Verfügung um in die Emission von Gravitationswellen zu fließen. Die Emission von Gravitationswellen an ihrer Spin-Down-Grenze würde jedoch nur kleine Berge (weniger als etwa 0,1 Millimeter) erfordern, dies ist mit unterschiedlichen Theorien vereinbar.

In unserer aktuellen Analyse gibt es 41 Millisekunden-Pulsare, bei denen die beobachteten Grenzen innerhalb des Zehnfachen ihrer Spin-Down-Grenze liegt. Für einen von diesen, J0711-6830, der in einer Entfernung von etwa 360 Lichtjahren zu den am nächsten liegenden Pulsaren zählt, liegt unser Ergebnis nur um den Faktor 1,3 über seiner Spin-Down-Grenze. Bei einigen dieser Pulsare könnte uns der bevorstehende dritte Beobachtungslauf der LIGO- und Virgo-Observatorien es uns ermöglichen, mehrere dieser Grenzen zu unterschreiten, wodurch wir die Möglichkeit haben, Sterne mit sehr geringen Verformungen zu untersuchen.

Glossar

Beobachtungslauf: Beobachtungszeitraum, in dem Gravitationswellendetektoren Daten erfassen.

Charakteristisches Alter: Das „Alter“ eines Pulsars, das anhand seiner aktuellen Frequenz und seiner Spin-Down-Rate bestimmt wird, und der Annahme über die Mechanismen, die ihn verlangsamen, d.h. durch Abstrahlung von Gravitationswellen.

Elliptizität: Sie stellt näherungsweise das Verhältnis zwischen der Deformation, oder dem „Berg“ mit Höhe Δr , und dem Radius des Sterns r , dar, also $\varepsilon \approx \Delta r/r$. Genau genommen ist es das Verhältnis der Differenz zwischen zwei Trägheitsmomenten um zueinander senkrechte Achsen und dem dritten Hauptträgheitsmoment um eine dazu senkrecht stehende Achse.

Empfindlichkeit: Eine Beschreibung der Fähigkeit eines Detektors, ein Signal nachzuweisen. Detektoren mit geringerem Rauschen können schwächere Signale nachweisen und haben daher eine höhere (oder bessere) Empfindlichkeit.

LIGO: Das Laser Interferometric Gravitational Wave Observatory (LIGO) ist ein Paar US-amerikanischer Gravitationswellendetektoren. Einer liegt in der Nähe von Livingston, Louisiana, und der andere in der Nähe von Hanford, Washington. Beide Detektoren sind große Laserinterferometer mit je zwei 4 Kilometer langen Armen, die versuchen, Änderungen der relativen Armlänge zu messen, die durch eine vorbeiziehende Gravitationswelle verursacht wird.

Obergrenze: Eine Angabe des Maximalwerts, den eine Größe haben kann, sodass sie mit den Daten übereinstimmt. Die Größe die uns interessiert, ist die gegebene maximale intrinsische Gravitationswellenamplitude eines kontinuierlichen Wellensignals, das auf der Erde ankommt. Wir verwenden eine Konfidenzgrenze von 95 %, d.h. es besteht eine 95 %-ige Wahrscheinlichkeit, dass in gegebenen Daten die Größe unter dieser Grenze liegt.

Spin-down: Pulsare sind rotierende Neutronensterne, deren Rotationsgeschwindigkeit mit der Zeit abnimmt (was einer Zunahme der Rotationsperiode entspricht).

Spin-down-Grenze: Diese Grenze für die Amplitude der Gravitationswellen eines Pulsars basiert auf der Annahme, dass die gesamte kinetische Rotationsenergie, die der Stern während des Spin-Downs (abnehmende Rotationsgeschwindigkeit) verliert, Gravitationsstrahlung darstellt. Dies setzt einen genau bekannte Entfernung zum Pulsar voraus, wohingegen die Entfernung zu Pulsaren in Realität bis zu einem Faktor von etwa zwei unsicher sein kann. Wir wissen jedoch, dass Pulsare auf andere Weise Energie verlieren, wobei als Hauptmechanismus die magnetische Dipolstrahlung angenommen wird.

Strain: Relative Änderung des Abstands zwischen zwei Messpunkten aufgrund der Verformung der Raumzeit durch eine vorbeiziehende Gravitationswelle. Die typische Deformation durch Gravitationswellen, die die Erde erreicht, ist sehr gering (kleiner als 10^{-23} bei LIGO-Messungen).

Virgo: Ein Gravitationswellendetektor in der Nähe von Pisa in Italien. Wie LIGO ist es ein Laserinterferometer, jedoch mit 3 km langen Armen.

Weiterführende Informationen

Kostenloser Vorabdruck der Veröffentlichung, in der die Details der vollständigen Analyse und die Ergebnisse beschrieben sind: „Searches for Gravitational Waves from Known Pulsars at Two Harmonics in 2015-2017 LIGO Data“ von B. P. Abbott et al.

Ein schöner Übersichtsartikel zu Pulsaren von Michael Kramer: Pulsars, EAS Publications Series, Band 15, 2005, S. 219-241 (kostenloser Vorabdruck des Übersichtsartikels)

Kapitel 6 des Buches Essential Radio Astronomy von J. Condon & S. Ransom behandelt Pulsare und ist online frei verfügbar.

NASAs „Imagine the Universe!“ Seite zu Pulsaren