

Schmalbandsuche nach Gravitationswellen von bekannten Pulsaren in LIGO-O2-Daten

Während der ersten beiden Beobachtungsläufe (O1 und O2) der Advanced-LIGO- und Advanced-Virgo-Detektoren haben wir mehrere Gravitationswellensignale entdeckt: zehn von Verschmelzungen Schwarzer Löcher und eines von einer Verschmelzung zweier Neutronensterne. Weitere Informationen finden Sie unter <https://www.ligo.org/science/outreach.php> und <https://www.ligo.org/science/Publication-O2Catalog/index.php>. Verschmelzungen kompakter Doppelsysteme sind nicht die einzigen nachweisbaren Quellen von Gravitationswellen. Weitere wichtige Quellen sind verformte, einzelne Neutronensterne. Wenn Sie bereits wissen, was Neutronensterne und Pulsare sind, können Sie zum Abschnitt „Analyse“ springen.

Diese Art astrophysikalischer Objekte entsteht nach dem Tod eines massereichen Sterns in einem katastrophalen Ereignis, das als Supernova-Explosion bekannt ist. Neutronensterne zeichnen sich durch sehr starke Magnetfelder und eine Dichte ähnlich der eines Atomkerns aus. Ihre Masse kann zwischen dem Ein- und Zweifachen der Masse unserer Sonne (ca. $2 \cdot 10^{30}$ kg) liegen, ist aber in einer Kugel mit einem Radius von nur etwa 10 Kilometern verpackt. Dies bedeutet, dass die massereichsten Neutronensterne einige Dutzend Billionen Male dichter als Blei sind. Ein Teelöffel Neutronensternmaterial hätte eine Masse, die in etwa der eines großen Bergs entspricht.

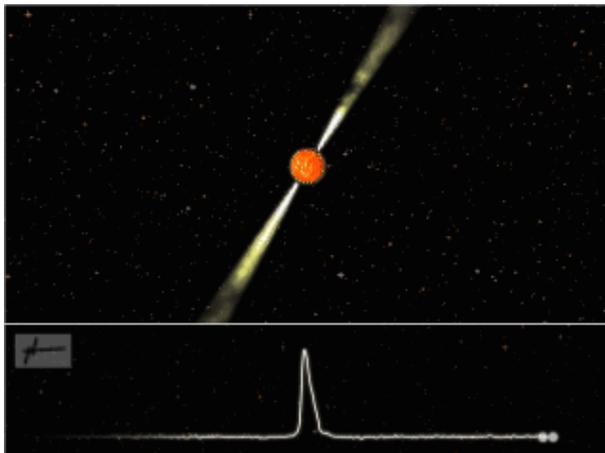


Abb. 1: Künstlerische Darstellung eines Pulsars. (Bildnachweis: Joeri van Leeuwen. Lizenz: CC-BY-AS.) Der untere Bildteil zeigt die gepulste Emission, die unsere Partner-Teleskope als sogenannten „Leuchtturmeffekt“ beobachten.

Sichtlinie eines Beobachters schwenkt; siehe erste Abbildung). Bei dieser Art von Neutronenstern, die als Pulsar bezeichnet wird, kann man die Rotationsfrequenz aus der Frequenz der beobachteten Pulse ermitteln.

Einsteins Allgemeine Relativitätstheorie sagt voraus, dass Gravitationswellen abgestrahlt werden, wenn massereiche Objekte asymmetrisch beschleunigt werden. Ein symmetrisches Objekt wie eine perfekt runde Kugel strahlt keine Gravitationswellen ab, auch wenn sie sich schnell dreht. Neutronensterne mögen den vollkommensten Kugeln des Universums nahe kommen, aber selbst sie sind keine absolut perfekten Kugeln. Jede Abweichung von einer perfekt symmetrischen Kugel führt zu Gravitationswellen. Wir verwenden die Elliptizität als quantitatives Maß für die Abweichung eines Neutronensterns von einer perfekten Kugel. Wenn beispielsweise ein Neutronenstern einen kleinen „Berg“ auf der Kruste an seiner Oberfläche hat, der einen Zentimeter über dem mittleren Radius von 10 Kilometern liegt, führt das zu einer Elliptizität von etwa 10^{-6} (einem Millionstel), und Gravitationswellen werden abgestrahlt.

Neutronensterne drehen sich normalerweise zwischen 0,25-mal und 4-mal pro Sekunde um ihre Achse. Einige von ihnen, wie z. B. der bekannte Krebsnebel-Pulsar, die in der Regel jünger und heller sind, drehen sich zwischen 20 und 60 Mal pro Sekunde oder noch schneller. Es gibt auch eine andere Gruppe von Pulsaren, die Millisekunden-Pulsaren, die sich sogar hunderte Male pro Sekunde drehen können und sich normalerweise in einem Doppelsystem befinden. Um eine Vorstellung davon zu bekommen, wie schnell sich diese Sterne drehen, können wir diese Zahlen mit der Drehfrequenz der Sonne vergleichen, die sich etwa alle 24 Tage einmal dreht.

Viele Neutronensterne lassen sich mit erd- oder weltraumgestützten Teleskopen durch ihre elektromagnetische Strahlung im Radio-, Röntgen- und Gammastrahlenbereich beobachten. Ihre Abstrahlung ähnelt stark der eines Leuchtturms (d. h. periodische Pulse, wenn der Lichtstrahl über die

Beobachtungen zeigen, dass sich die Rotation der Pulsare nach und nach verlangsamt (typischerweise um etwa eine Umdrehung pro Sekunde alle 1000 Jahre oder länger!). Theoretisch lässt sich ein Bruchteil des entsprechenden Rotationsenergieverlustes durch die Abstrahlung von Gravitationswellen erklären. Die maximale Stärke von Gravitationswellen, die unter Berücksichtigung der Energieerhaltung abgestrahlt werden könnten, wird als Spin-Down-Grenze bezeichnet. Der Nachweis von Gravitationswellen, die von Neutronensternen abgestrahlt werden, wird uns daher helfen, die Frage „Wie viel Energie verliert der Stern durch Gravitationswellen?“ zu beantworten. Dies wiederum wird uns helfen zu verstehen, wie stark ein typischer Neutronenstern von der perfekten Kugelform abweicht.

Leider erwartet man, dass Gravitationswellen von Neutronensternen sehr schwach sind; es scheint, dass diese Signale aufgrund der Empfindlichkeit der Detektoren während des O2-Beobachtungslaufs noch kein hinreichend hohes Signal-zu-Rausch-Verhältnis aufweisen, um beobachtet zu werden.

Analyse

Die optimale Methode, um ein Gravitationswellen-Signal vom Detektorrauschen zu trennen, nennt man Optimalfilter. Dabei vergleichen wir die Daten mit theoretischen oder simulierten Vorlagen (Templates) für die erwarteten Gravitationswellenformen. Für rotierende Neutronensterne werden die Templates durch zwei wesentliche physikalische Eigenschaften (oder *Parameter*) des Sterns beschrieben: die Rotationsgeschwindigkeit (Frequenz) des Sterns und deren Änderungsrate (Spin-Down-Rate). Insbesondere sind die Templates im Wesentlichen sinusförmige Wellenformen mit einer Frequenz, die dem Doppelten der Frequenz der elektromagnetischen Pulse entspricht; allerdings ändert sich diese Frequenz leicht im Laufe der Zeit aufgrund des Spin-Downs und der Detektorbewegung relativ zum Stern. Im Prinzip können wir nach einem bestimmten Pulsar suchen, indem wir ein Template mit der Frequenz und Spin-Down-Rate verwenden, die wir finden, indem wir den Pulsar mit unseren Partner-Teleskopen beobachten. Allerdings würde schon eine kleine Abweichung dieser beiden Parameter ausreichen, um einen Nachweis von Gravitationswellen zu verhindern. Es gibt Gründe zu der Annahme, dass es tatsächlich zu kleinen Abweichungen kommen kann; z. B. kann die tatsächliche Frequenz aufgrund der Eigenschaften der Materie im schnell rotierenden Stern oder aufgrund unvollkommener Messungen der elektromagnetischen Pulse vom vorhergesagten Wert abweichen. Um dies zu berücksichtigen, verwenden wir Gravitationswellen-Templates mit Frequenzen in einem schmalen Band um die aus den elektromagnetischen Pulsen abgeleitete Frequenz. Wir nennen dies eine „schmalbandige Suche“.

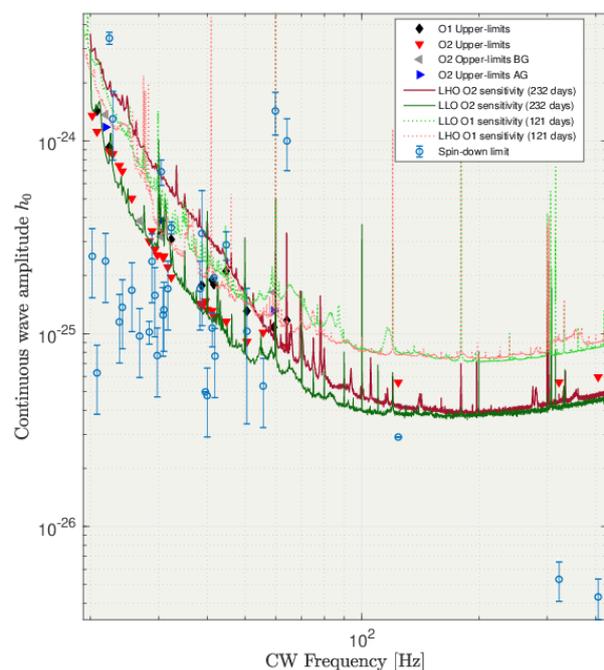


Abb. 2: Vertikale Achse: Amplitude kontinuierlicher Gravitationswellen, horizontale Achse: Gesuchte Frequenzen der Gravitationswellen. Die verschiedenen Kurven zeigen die geschätzte Suchempfindlichkeit für O1- und O2-Schmalbandsuchen, während die verschiedenen Marker Obergrenzen darstellen, die wir in diesen Suchen für einzelne Pulsare ermittelt haben. Die Fehlerbalken entsprechen den Unsicherheiten bei dem Abstand des Pulsars zur Erde und entsprechen einem Konfidenzintervall von 68,3%.

In unserer vorherigen schmalbandigen Suche in O1-Daten haben wir 11 bekannte Pulsare ins Visier genommen, bei denen wir erwarteten, eine informative obere Grenze für die Gravitationswellenabstrahlung ermitteln zu können. Mit der verbesserten Empfindlichkeit und der längeren Beobachtungszeit von O2 haben wir unsere Zielliste erweitern können. Wir untersuchen nun alle Radiopulsare, bei denen wir anhand einer ersten Schätzung der Suchempfindlichkeit erwarten konnten, die Spin-Down-Grenze zu unterschreiten oder ihr zumindest bis auf einen Faktor von höchstens 10 nahe zu kommen. Diesen Faktor wählten wir, da die Abstände zu den Pulsaren (die zur Berechnung der erwarteten Amplituden der Gravitationswellen benötigt werden) große Messfehler aufweisen können (die wiederum zur Berechnung der erwarteten Amplituden der Gravitationswellen benötigt werden). Zu den neuen Zielen gehören niederfrequente Radiopulsare wie J0940-5428 und J1747-2809 sowie einige Millisekunden-Pulsare (mit

einer Drehfrequenz von mehr als 100 Hz) wie J1300+1240 und J2124-3358.

Leider finden wir keinen Hinweis auf Gravitationswellensignale von diesen Pulsaren. Dieses Ergebnis ist nicht verwunderlich für die Pulsare, deren Spin-Down-Grenzwerte unterhalb der Detektorempfindlichkeit liegen (angenommen, die Abstände zu den Pulsaren stimmen). Andererseits konnten wir bei anderen Pulsaren obere Grenzen der Gravitationswellen-Abstrahlung setzen, die unterhalb der Spin-Down-Grenze liegen. Diese schränken damit die Energie ein, die tatsächlich in Gravitationswellen abgestrahlt wird.

Wir können Obergrenzen der Gravitationswellen-Amplitude und, unter der Annahme eines Abstandswertes, auch der Elliptizität des entsprechenden Sterns berechnen. Liegt die Obergrenze unter der Spin-Down-Grenze, bedeutet dies, dass wir die Gravitationswellen-Abstrahlung mit unserer Suche begrenzen. Mit anderen Worten, wenn ein Neutronenstern Gravitationswellen stärker als unsere Obergrenze ausgestrahlt hätte, dann hätten wir es in 95 % der Fälle erkannt. Mit der O1-Schmalbandsuche haben wir die Gravitationswellen-Emission bereits für mehrere Pulsare in einem schmalen Frequenzband begrenzt, aber mit der O2-Suche erhöhen wir die Anzahl der Pulsare, für die wir Grenzwerte für die Gravitationswellen-Emission festgelegt haben, drastisch. Tatsächlich konnten wir nun die Gravitationswellen-Abstrahlung einiger der Pulsare begrenzen, für die wir die Spin-Down-Grenze in O1 nicht unterschritten hatten; dazu zählen z. B. J1400-6325, J1813-1246, J1833-1034 (der zweit-energetischste Pulsar nach dem Krebsnebelpulsar) und J1952+3252. Darüber hinaus haben wir die Gravitationswellen-Abstrahlung für neue, in dieser Suche berücksichtigte Ziele wie J0940-5428 und J1747-2809 begrenzt. Am wichtigsten ist, dass wir bei dieser schmalbandigen Suche die Gravitationswellen-Energie für die Pulsare J1400-6325, J1833-1034 und J1747-2809 erstmals eingeschränkt haben.

Glossar

Beobachtungslauf: Ein Zeitraum, in dem Beobachtungsdaten aufgezeichnet werden. Die für diese Analyse verwendeten Daten stammen aus dem zweiten Advanced-LIGO-Beobachtungslauf von Dezember 2016 bis August 2017.

Elliptizität: Ein Maß für die Asymmetrie des Neutronensterns um seine Rotationsachse. Grob misst sie, um wie viel der Neutronenstern von seiner perfekten Kugelform abweicht, gemessen als Bruchteil des Sternradius. Da Neutronensterne so extrem dichte Objekte sind, erwarten wir sehr geringe Abweichungen von der perfekten Kugelgestalt. Bei normaler Neutronenstern-Materie beträgt die maximale Verformung, die die Neutronensternkruste aufweisen könnte, etwa 10 Zentimeter.

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

Neutronenstern: Der extrem dichte Überrest des Kerns eines massereichen Sterns, geboren in einer Supernova-Explosion.

Obergrenze: Eine Aussage über den Maximalwert, den eine Größe haben kann, um noch verträglich mit den Messdaten zu sein. Hier ist diese Größe die maximale intrinsische Gravitationswellen-Amplitude eines gegebenen kontinuierlichen Signals, das auf der Erde ankommt. Wir verwenden eine 95 %-Grenze, d.h. wenn man Daten mit einem Signal fester Amplitude betrachtet, hätten wir es in 95 % der Fälle nachgewiesen.

Optimalfilter: Datenanalyseverfahren, das die Korrelation der Daten mit einer simulierten Wellenform nutzt, um zu versuchen, das im Detektorrauschen verborgene Signal zu identifizieren.

Pulsare: Neutronensterne, die sich durch die von ihnen ausgesandten Pulse elektromagnetischer Strahlung (meist im Radiobereich) beobachten lassen. Ein großer Teil der Neutronensterne, deren Existenz wir annehmen kann nicht als Pulsare beobachtet werden; entweder weil sie gar keine elektromagnetische Strahlung aussenden oder weil diese nicht in Richtung der Erde abgestrahlt wird.

Spin-Down: Pulsare sind rotierende Neutronensterne, deren Rotationsgeschwindigkeit im Allgemeinen mit der Zeit abnimmt (was einer Erhöhung der Rotationsperiode entspricht). Diese Verlangsamung der Rotationsgeschwindigkeit des Neutronensterns wird als Spin-down bezeichnet. Ein Teil dieses Rotationsenergieverlustes könnte auf die Abstrahlung von Gravitationswellen zurückzuführen sein.

Weiterführende Informationen

Volltext der in diesem Artikel beschriebenen O2-Schmalbandsuche „Narrow-band search for gravitational waves from known pulsars using the second LIGO observing run“ von B. P. Abbott, et al.

(LIGO- und Virgo-Kollaborationen): Kostenloser Vorabdruck unter <https://arxiv.org/abs/1902.08442> oder Peer-Review-Artikel unter <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.99.122002>.

Volltext der O₁-Schmalbandsuche „First narrow-band search for continuous gravitational waves from known pulsars in advanced detector data“ von B. P. Abbott, et al. (LIGO- und Virgo-Kollaborationen): Kostenloser Vorabdruck unter <https://arxiv.org/abs/1710.02327> oder Peer-Review-Artikel unter <https://journals.aps.org/prd/abstract/10.1103/PhysRevD.96.122006>.

Veröffentlichung, die das Verfahren für die Schmalbandsuche beschreibt „Method for narrow-band search of continuous gravitational wave signals“, von P. Astone et al.: Kostenloser Vorabdruck unter <https://arxiv.org/abs/1403.1484> oder Peer-Review-Artikel unter <https://journals.aps.org/prd/abstract/10.1103/PhysRevD.89.062008>.

Veröffentlichung, die die Implementierung des Schmalbandalgorithmus beschreibt „An improved algorithm for narrow-band searches of continuous gravitational waves“ von S. Mastrogiovanni et al.: Kostenloser Vorabdruck unter <https://arxiv.org/abs/1703.03493> oder Peer-Review-Artikel unter <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6382/aa744f>.