



LIGO
Scientific
Collaboration



Suche am gesamten Himmel nach kontinuierlichen Gravitationswellen von einzelnen Neutronensternen in Advanced-LIGO-Daten aus O2

Die Bemühungen Gravitationswellen zu beobachten, waren im September 2015 von Erfolg gekrönt, als LIGO ein Signal entdeckte, das beim Zusammenstoß zweier schwarzer Löcher entstand. Weitere Gravitationswellenereignisse wurden seitdem von den Advanced-LIGO- und Advanced-Virgo-Detektoren beobachtet. Bisher wurden in den Daten ihrer ersten beiden Beobachtungsläufe (O1 und O2) zehn Verschmelzungen zweier schwarzer Löcher und eine Verschmelzung von zwei Neutronensternen beobachtet. Zusätzlich zu diesen transienten (vorrübergehenden) Signalen, die Bruchteile von Sekunden bis zu einigen zehn Sekunden andauern, wird erwartet, dass es Quellen für kontinuierliche (anhaltende) quasi-sinusförmige Gravitationswellensignale gibt. Diese sind Gegenstand intensiver Untersuchungen. In diesem Artikel beschreiben wir die Ergebnisse einer Analyse, die darauf abzielt, den gesamten Himmel nach kontinuierlichen Gravitationswellen zu durchsuchen, die von einzelnen rotierenden Neutronensternen – eine der bekanntesten Quellen dieser Art – abgestrahlt werden.

Neutronensterne, die Überreste von Supernova-Explosionen massereicher Vorläufer-Sterne, sind äußerst kompakte Objekte mit Massen, die denen unserer Sonne ähneln und die zu einer Kugel mit einem Radius von etwa 10 km kollabiert sind. Sie können sich mehrere hundert Mal pro Sekunde drehen. Ein Neutronenstern kann kontinuierliche Gravitationswellen mit einer Frequenz ausstrahlen, die dem Doppelten seiner Rotationsfrequenz entspricht. Dies ist möglich, wenn er eine Asymmetrie bezüglich seiner Rotationsachse besitzt, z. B. wenn er einen „Berg“ auf der Oberfläche hat oder leicht von einer perfekten Kugelform abweicht. Nach aktuellen theoretischen Modellen wäre ein Berg auf einem Neutronenstern höchstens einige Zentimeter hoch und könnte aus seiner turbulenten Entstehung resultieren. Die Verformung friert in den ersten Sekunden nach seiner Geburt in seiner Kruste ein. Es können auch andere Verformungen des gesamten Neutronensterns auftreten, beispielsweise als Folge von starken inneren Magnetfeldern.

Unabhängig von ihrem Ursprung bestimmt die Größe der Asymmetrie die „Elliptizität“ eines Neutronensterns. Die Elliptizität ist ein wichtiger Parameter, da die Amplitude des Gravitationswellensignals linear mit dieser ansteigt, d. h. je größer die Asymmetrie oder die Erhebung ist, desto stärker ist die Gravitationswelle, die sie erzeugt. Eine Erhebung von wenigen Zentimetern entspricht einer Elliptizität von einigen Millionstel. Die Elliptizität eines Neutronensterns zu bestimmen, ist sehr schwierig. Wie hoch ein Berg sein kann, bevor er unter der extremen Schwerkraft eines Neutronensterns zusammenbricht, hängt von den Eigenschaften der Materie ab, aus der sich der Stern zusammensetzt. Die durch das Magnetfeld induzierte Verformung hängt auch von den Eigenschaften der sehr dichten Materie, der Stärke des Magnetfelds und auch seiner Zusammensetzung ab. Alle diese Variablen sind nicht sehr

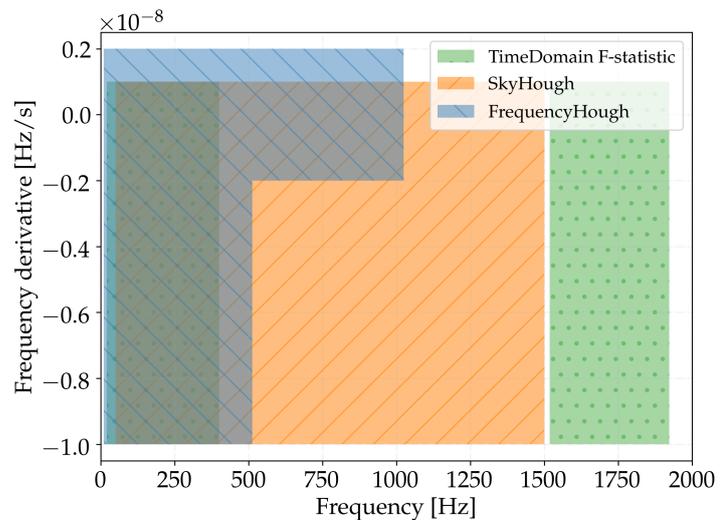


Abb. 1: Jede Suche deckt einen anderen Teil des Parameterraums ab, wobei sich einige überlappen.

genau bekannt.

Etwa 2500 Neutronensterne lassen sich derzeit durch ihre Emission elektromagnetischer Strahlung (EM), hauptsächlich im Radio-, Gamma- und Röntgenbereich beobachten. Astronom*innen können diese Neutronensterne beobachten, da ein „Strahl“ von EM-Strahlung beim Drehen des Sterns über die Erde streicht (wie ein Leuchtturmstrahl, der den Leuchtturm sichtbar macht, wenn er über Ihre Augen streicht). Astronom*innen schätzen jedoch, dass in der Milchstraße 100 Millionen oder mehr Neutronensterne existieren. Die meisten sind im Bereich der EM-Strahlung nicht sichtbar, weil sie entweder zu schwach sind oder ihre Strahlungskegel nicht auf die Erde gerichtet sind (und wir sie folglich nicht sehen). Wenn jedoch einige dieser unsichtbaren Neutronensterne Asymmetrien aufweisen, können sie Gravitationswellen aussenden, die mit den aktuellen Gravitationswellendetektoren nachgewiesen werden könnten. Unsere Suche wurde entwickelt, um Signale von diesen Objekten zu aufzuspüren.

Das Finden solcher in den Daten vergrabenen Signale ist schwierig. Das von einem asymmetrischen, rotierenden Neutronenstern abgegebene Signal ist im Prinzip sinusförmig, aber viele Faktoren verändern das am Detektor empfangene Signal. Zum einen verschiebt der Doppler-Effekt, der durch die Bewegung des Detektors verursacht wird (wenn sich die Erde um ihre Achse dreht und dabei um die Sonne läuft), die Signalfrequenz mit der Zeit. Diese Frequenzmodulation hängt von den relativen Positionen der Quelle und des Detektors, der Rotationsfrequenz des Neutronensterns, der Tageszeit und vom Tag des Jahres ab (d. h. wo sich die Erde in einer Umlaufbahn um die Sonne befindet). Um die Sache noch komplizierter zu machen, verliert ein Neutronenstern Rotationsenergie durch die Emission von Gravitationswellen und elektromagnetischer Strahlung, was zu einer allmählichen Verringerung der Signalfrequenz führt, welche als Spin-Down bezeichnet wird.

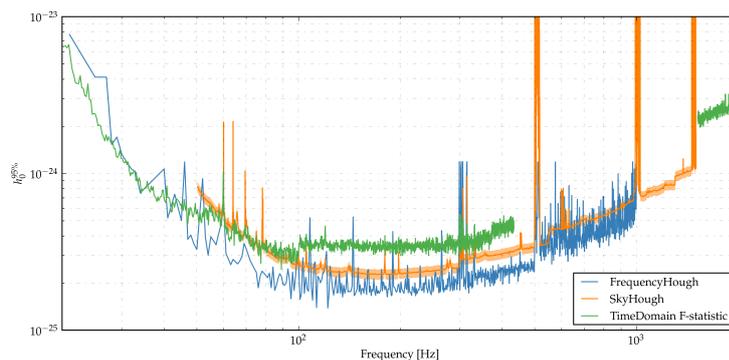


Abb. 2: Obergrenzen der Signalamplitude in Abhängigkeit von der Frequenz. Die verschiedenen Symbole/Farben entsprechen den Obergrenzen, die durch die drei verschiedenen Analysemethoden berechnet wurden.

„Optimalfiltern“ basiert. Eine Optimal-Filterung wird verwendet, um nach vorübergehenden Signalen zu suchen, die bei der Verschmelzung eines Doppelsystems abgestrahlt werden. Dies erfordert jedoch eine genaue Kenntnis der Quellparameter. Die Filterung beruht auf unserer Fähigkeit, dieses schwache Signal, das sich während dieser Zeit in den Detektoren verändert, mit äußerster Genauigkeit zu folgen. So maximiert die Filterung die gesammelte Signalenergie, welche mit wachsender Beobachtungszeit relativ zum Detektorrauschen zunimmt. Im Gegensatz zur Optimal-Filterung modellieren hierarchische Methoden die Signalentwicklung weniger genau. Dies macht die Suche weniger empfindlich, aber robuster in Bezug auf Unsicherheiten des Signalmodells und aus rechnerischer Sicht machbar, obwohl die Neutronensternparameter nahezu vollkommen unbekannt sind.

Mit hierarchischen Methoden wird der gesamte Datensatz in Zeitabschnitte von etwa 30 Minuten bis zu etwa sechs Tagen unterteilt (dies ist viel länger als die Dauer der transienten Signale). Jedes Segment wird dann unabhängig analysiert und die Informationen aus den verschiedenen Segmenten werden zu einer „Nachweisstatistik“ (eine Zahl für jeden Satz von untersuchten Parameterwerten) zusammengefasst. Diese wird verwendet, um zu schätzen, wie sich das Ergebnis mit der Annahme verträgt, dass die Daten aus reinem Rauschen bestehen (d. h. kein Gravitationswellensignal vorhanden ist). Wenn für einen bestimmten Parametersatz die Nachweisstatistik nicht mit der Rauschhypothese kompatibel ist, wird eine verfeinerte Suche um diesen Satz von Werten durchgeführt, um ihn als Gravitationswellenkandidaten zu bestätigen oder widerlegen.

Ausgehend von einer Reihe möglicher Parameter der Quelle, nämlich der Position am Himmel, der Rotationsfrequenz und der Spin-Down-Rate, kann die abgestrahlte Gravitationswellenform theoretisch vorhergesagt werden. Ohne die Rotationsfrequenz, die Spin-Down-Rate und die Himmelsposition zu kennen, ist jedoch eine enorme Anzahl von Signalwellenformen möglich, was die Suche äußerst komplex und rechenintensiv macht. Diese ist daher nur durch Anwendung sogenannter hierarchischer Methoden realisierbar. Hierarchische Suchmethoden sind nicht so empfindlich wie das beste Verfahren, das auf

Eine Hauptkomplikation bei diesem Verfahren besteht darin, dass die Detektordaten typischerweise mehrere Störungen enthalten, die wie Gravitationswellenkandidaten aussehen, obwohl dies nicht der Fall ist. Diese werden „Spektrallinien“ genannt, da sie auf ein bestimmtes sehr schmales Frequenzband beschränkt auftreten. Ein wichtiger Teil dieser Analyse besteht darin, solche Rauschartefakte zu identifizieren und gegen sie ein Veto einzulegen, das sie von weiteren Untersuchungen ausschließt.

Die Empfindlichkeit, welche die Advanced-Interferometer-Detektoren während des etwa 9-monatigen O2-Beobachtungslaufs erreichten, ermöglichte die empfindlichste Ganzhimmelssuche, die jemals durchgeführt wurde. Sie umspannt Gravitationswellenfrequenzen zwischen 20 Hz und 1922 Hz und einen Spin-Down-Bereich von $-1 \cdot 10^{-8}$ Hz/s bis $2 \cdot 10^{-9}$ Hz/s. In unserer Publikation werden die Ergebnisse dieser Suche beschrieben, die mit drei unabhängigen hierarchischen Methoden (FrequencyHough, SkyHough und TimeDomainFstat) durchgeführt wurden. Jede Methode deckt einen anderen Teil des Parameterraums ab (wie in Abbildung 1 dargestellt), verwendete unterschiedliche Zeitspannen für die Datensegmente und Datenreinigungsverfahren, um die Auswirkung von Rauschen in den Daten zu verringern, und nutzte unterschiedliche Techniken zur Nachverfolgung möglicher Kandidaten.

Unsere Analysen ergaben keine Hinweise auf kontinuierliche Gravitationswellen in den Daten. Wir haben jedoch die obere Grenzen für die Signalamplitude berechnet, d. h. Grenzen dafür, wie stark ein Signal sein könnte ohne erkannt zu werden (Abbildung 2). Beispielsweise können wir bei einer Frequenz von etwa 150 Hz das Vorhandensein von Signalen mit einer Gravitationswellen-Verformungsamplitude von ca. $1,7 \cdot 10^{-25}$ oder höher mit einer statistischen Sicherheit von 95 % ausschließen. Abbildung 3 zeigt die sogenannte „astrophysikalische Reichweite“ der Suche, die das Verhältnis zwischen Frequenz, Spin-Down und Entfernung einer potenziell nachweisbaren Quelle darstellt. Zum Beispiel wäre in unseren Analysen eine Quelle mit einer Elliptizität von mehr als $2 \cdot 10^{-7}$, die ein Signal bei 1000 Hz oder mehr aussendet, erkennbar gewesen, wenn sie näher als 1000 Parsec gewesen wäre und der Betrag des durch Gravitationswellen induzierten Spin-Down größer als etwa $5 \cdot 10^{-10}$ Hz/s war.

Die in dieser Veröffentlichung präsentierten Ergebnisse stellen eine signifikante Verbesserung bezüglich der Obergrenzen im Vergleich zu früheren Analysen in einem großen Teil des Parameterraums dar (siehe z. B. hier). Obwohl kein Signal nachgewiesen wurde, sind unsere Ergebnisse aus astrophysikalischer Sicht dennoch interessant und geben Aufschluss über die Eigenschaften galaktischer Neutronensterne. Zum einen scheint es, dass wir das Vorhandensein von schnell rotierenden Neutronensternen in unsere Nähe (d. h. innerhalb von 100 Parsec um der Erde) mit einer Elliptizität von mehr als 10^{-8} ausschließen können; dies ist nur ein Hundertstel des Maximalwerts, den solche Objekte nach aktuellen Modellen haben können.

Wenn die Empfindlichkeit der Advanced-LIGO und Advanced-Virgo-Detektoren weiter zunimmt und andere Detektoren auf der Erde sich dem Netzwerk anschließen, werden wir in der Lage sein, Gravitationswellen von kleineren Sternverformungen nachzuweisen und einen größeren Teil unserer Galaxie zu untersuchen. Die Wahrscheinlichkeit, kontinuierliche Gravitationswellensignale zu finden, die von schnell rotierenden Neutronensternen ausgesendet werden, wird daher erheblich zunehmen. Der Nach-

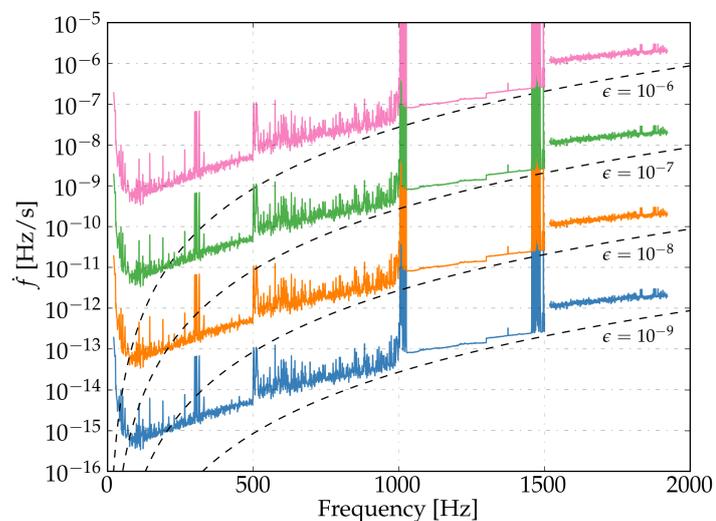


Abb. 3: Die astrophysikalische Reichweite der hier gezeigten Suche ist eine Beziehung zwischen der Frequenzänderung (Spin-Down bzw. Spin-Up) und der Frequenz eines Gravitationswellensignals, das von einer nachweisbaren Quelle ausgesendet wird, die sich in verschiedenen Entfernungen befindet. Von unten nach oben gesehen entsprechen die vier Kurven einem Abstand von 10 Parsec, 100 Parsec, 1000 Parsec bzw. 10.000 Parsec. Die gestrichelten Linien sind Linien konstanter Elliptizität. In unseren Analysen wäre ein Neutronenstern mit einer Elliptizität von mehr als $5 \cdot 10^{-7}$, der ein Signal bei 500 Hz aussendet bei Abständen von weniger als ca. 1000 Parsec nachweisbar, wenn der Betrag der durch Gravitationswellen induzierten Frequenzänderung größer wäre als etwa $5 \cdot 10^{-11}$ Hz/s ist.

weis dieser Signale wird eine neue „Tür“ zur Erforschung dieser faszinierenden kompakten Objekte öffnen. Die Detektoren werden dann zu echten Laboratorien der Astrophysik und Grundlagenphysik werden. Dies ermöglicht genaue Untersuchungen der Eigenschaften der Sterne und ihres inneren Aufbaus. In der Tat ist die Beständigkeit ein wesentliches Merkmal, das kontinuierliche Gravitationswellen von den vorübergehenden unterscheidet: Sobald eine Quelle erkannt wurde, kann sie beliebig lange beobachtet werden. Dies ermöglicht es uns, die statistische Sicherheit immer weiter zu erhöhen und die Eigenschaften der Sterne mit sehr hoher Genauigkeit zu messen. Auf diese Weise erhalten wir eine Fülle von Informationen, die wir auf keine andere Weise erhalten könnten.

Glossar

Betrag: Der Betrag einer Zahl x , angegeben als $|x|$, ist sein nicht negativer Wert, unabhängig von seinem Vorzeichen.

Elliptizität: Die Elliptizität kann grob als das Verhältnis zwischen der Größe der Verformung, Δr (oder der Höhe des „Bergs“ auf der Oberfläche des Sterns) im Verhältnis zum Radius des Sterns, r , beschrieben werden :
 $\varepsilon \propto \Delta r / r$.

Parameterraum: Das am Detektor ankommende Gravitationswellensignal kann anhand einiger Parameter beschrieben werden: der Position der Quelle am Himmel, der Signalfrequenz und der Spin-Down-Rate. Bei einer Suche am gesamten Himmel, wie sie in diesem Artikel beschrieben wird, sind diese Parameter im Voraus nicht bekannt. Der Parameterraum besteht aus dem gesamten Bereich möglicher Werte für die von der Suche abgedeckten Parameter.

Spin-Down: Pulsare sind rotierende Neutronensterne, deren Rotationsgeschwindigkeit im Allgemeinen mit der Zeit abnimmt (was einer Zunahme der Rotationsperiode entspricht). Diese Verlangsamung der Rotationsgeschwindigkeit des Neutronensterns wird als Spin-Down bezeichnet.

Weiterführende Informationen

Kostenloser Vorabdruck der Veröffentlichung, der die Details der gesamten Analyse und die Ergebnisse beschreibt: „All-sky search for continuous gravitational waves from isolated neutron stars using Advanced LIGO O2 data“ von B. P. Abbott, et al. unter <https://arxiv.org/abs/1903.01901>.