



LIGO
Scientific
Collaboration



Obere Grenzen für die Gezeiten-Instabilität in p - und g -Moden mittels GW170817

Mit dem ersten Nachweis von Gravitationswellen von der Verschmelzung zweier Neutronensterne durch die LIGO- und Virgo-Detektoren (GW170817) und der Entdeckung des elektromagnetischen Gegenstücks der Verschmelzung hat ein sehr spannendes Zeitalter der Gravitationswellenastronomie und der Astrophysik der Neutronensterne begonnen. Zu den zahlreichen wissenschaftlichen Erkenntnissen, die die Beobachtung einer Neutronensternverschmelzung liefert, gehört die hochinteressante Möglichkeit etwas über die Eigenschaften der Materie im Kern des Neutronensterns zu erfahren, dessen Dichte um ein Vielfaches höher ist als die eines Atomkerns. Dessen rätselhafte „Zustandsgleichung“ zu verstehen, ist seit vielen Jahrzehnten Ziel von Astrophysiker*innen und Kernphysiker*innen. GW170817 war ein so starkes Signal, dass sich interessante Informationen über die Zustandsgleichung von Neutronensternen erhalten lassen.

Die Zustandsgleichung hinterlässt ihre Fingerabdrücke in Gravitationswellensignalen aufgrund von Gezeiteneffekten. Die beiden Sterne eines Doppelsystems erzeugen gegenseitig aneinander Gezeiten. Diese Gezeiten verzerren die Form der Sterne und verändern die Rate (Geschwindigkeit), mit der sich die beiden Sterne spiralförmig annähern. Die Stärke dieses Effekts hängt von den Eigenschaften ihrer Kerne und der Zustandsgleichung ab. Durch genaues Messen der Rate, mit der sie sich annähern, können Beobachtungen von Gravitationswellen Informationen über die Zustandsgleichung liefern.

Die genauen Auswirkungen von Gezeitenkräften hängen nicht nur von der Zustandsgleichung, sondern auch von der komplizierten Fluidynamik ab, die durch die Gezeiten im Inneren des Neutronensterns angeregt wird. Anhand von GW170817 untersuchten wir mögliche Auswirkungen einer vorhergesagten Gezeiten-Instabilität, die auch als „ p - g -Instabilität“ bezeichnet wird. Es ist eine nicht-lineare hydrodynamische Instabilität, bei der die Gezeiten zwei Moden anregen: eine niederfrequente durch Auftrieb aufrecht erhaltene g -Mode (wie die, die auf der Oberfläche eines Teichs angeregt wird, wenn ein Kiesel hineingeworfen wird) und eine hochfrequente durch Druck aufrecht erhaltene p -Mode (eine Schallwelle). Die Instabilität findet innerhalb des inneren Neutronensternkerns statt, wo die Schichtung wenig ausgeprägt ist und die Scherung aufgrund des Gezeitenstroms besonders anfällig für Instabilitäten ist. Da die Eigenfrequenz der p -Mode viel höher ist als die der Gezeiten, ist das p - g -Modenpaar nicht resonant mit den Gezeiten. Im Gegensatz zu resonanten Instabilitäten entzieht ein instabiles p - g -Paar kontinuierlich Energie aus der Umlaufbahn des Doppelsystems, selbst nachdem sich die Umlauffrequenz deutlich geändert hat.

Es gibt viele potentiell instabile p - g -Modenpaare, von denen jedes bei einer anderen Frequenz instabil wird und mit einer anderen Rate wächst. Obwohl erhebliche Unsicherheiten hinsichtlich der Anzahl instabiler Paare, ihrer exakten Wachstumsraten und ihrer Sättigung bestehen, lassen Schätzungen darauf schließen, dass ihre Effekte mit derzeitigen Detektoren messbar sein könnten. Ein solcher

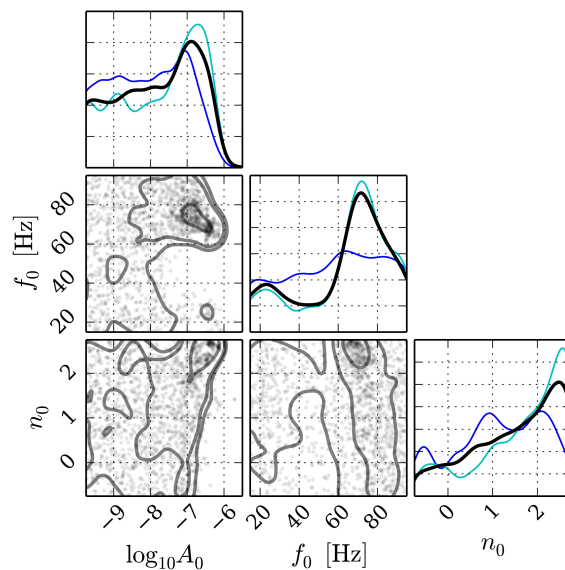


Abb. 1: Diese Abbildung zeigt die relative Baysesche Wahrscheinlichkeit zwischen verschiedenen möglichen nichtlinearen Gezeitenverhalten. Der Amplitudenparameter $\log_{10}(A_0)$ enthält zwar einen Spitzenwert, der stimmt jedoch völlig mit dem überein, was Rauschen in etwa 50 % der Fälle vollkommen zufällig verursachen kann. f_0 ist die Sättigungsfrequenz (in Hertz) und n_0 ist der Spektralindex.

Nachweis böte eine neue Möglichkeit, das Innere von Neutronensternen anders als mit Messungen ihrer Gezeitenverformbarkeit zu untersuchen.

Anhand eines phänomenologischen Modells analysierten wir den Einfluss der Instabilität auf die Änderung der Phase des Gravitationswellensignal mit der Zeit in Abhängigkeit von drei Parametern pro Neutronenstern: der Gesamt- p - g -Amplitude, der Sättigungsfrequenz und dem Spektralindex. Wir haben den Bayes-Faktor berechnet, indem wir unser p - g -Modell mit einem Standardmodell ohne diese Instabilität verglichen haben. Unsere Analyse ergab Bayes-Faktoren von ungefähr Eins. Das bedeutet, dass das beobachtete Signal mit den Wellenformmodellen übereinstimmt, die den p - g -Effekt nicht beinhalten. Andererseits bedeutet es, dass das p - g -Modell die Daten genauso gut beschreibt. Indem wir simulierte Signale ohne p - g -Effekte erzeugen und sie mit dem p - g -Modell untersuchen, haben wir gezeigt, dass es mit einer Wahrscheinlichkeit von etwa 50 % möglich ist, ähnliche Bayes-Faktoren zu erhalten, auch wenn die p - g -Effekte nicht vorhanden sind.

Nach unseren Untersuchungen ist die p - g -Amplitude für Neutronensterne mit 1,4-facher Sonnenmasse auf weniger als einige Zehntel des theoretischen Maximums beschränkt. Dies deutet darauf hin, dass es weniger als einige hundert angeregte Moden gibt, vorausgesetzt, dass sie alle durch einen als Wellenbrechen bekannten Prozess gesättigt sind. Theoretische Obergrenzen legen nahe, dass weniger als 1000 Moden durch Wellenbrechen gesättigt sind. Somit schließen die gemessenen Randbedingungen nur Extremwerte der p - g -Parameter aus. Dies bedeutet, dass die Instabilität eine Energie von weniger als 10^{51} Erg über das gesamte Signal während der Annäherung der Neutronensterne verbraucht, was weniger als ein paar Prozent der Energie sind, die insgesamt als Gravitationswellen abgestrahlt wird.

In Zukunft sollte es mit weiteren mit GW170817 vergleichbaren Signalen möglich sein, die Obergrenzen für die p - g -Amplitude um etwa einen Faktor fünf zu verbessern. Um noch stärkere Obergrenzen zu erhalten, sind wahrscheinlich viele weitere Signalnachweise erforderlich. Zukünftige Messungen werden auch von einem besseren Verständnis der Sättigung der Instabilität profitieren. Bisher gab es nur detaillierte theoretische Studien zur Schwelle und Wachstumsrate der Instabilität, nicht zu ihrer Sättigung. Infolgedessen können wir uns der Genauigkeit unseres phänomenologischen Modells nicht sicher sein. Trotzdem verspricht die Zukunft für p - g -Untersuchungen angesichts der zunehmenden Empfindlichkeit der LIGO- und Virgo-Detektoren sehr spannend zu werden. Bleiben Sie auf dem Laufenden, wenn weitere Signalnachweise hinzukommen!

Glossar

Bayes-Faktor: Das Wahrscheinlichkeitsverhältnis zweier unterschiedlicher Hypothesen. Er kann verwendet werden, um zu bestimmen, ob die Daten eine Hypothese der anderen vorziehen

Instabilität: Ein Zustand, der gegenüber kleinen Änderungen nicht stabil ist, wie beispielsweise ein Stift, der auf der Spitze balanciert wird.

Neutronenstern: Extrem dichtes Objekt, das überwiegend aus Neutronen besteht und nach der Supernova-Explosion eines massereichen Sterns zurück bleibt.

Phänomenologisches Modell: Ein Modell mit Parametern, das nicht zwangsläufig direkt aus grundlegenden physikalischen Prinzipien abgeleitet ist.

Schichtung: Die Bildung unterschiedlicher Schichten in Teilen des Neutronensterns, beispielsweise eine äußere Kruste.

Spektralindex: Ein Modellparameter, der beschreibt, wie die Sättigungsenergie der Moden von der Frequenz abhängt.

Zustandsgleichung: Bei Neutronensternen beschreibt diese Gleichung den Zusammenhang zwischen Dichte und Druck der Materie.

Weiterführende Informationen

- Besuchen Sie unsere Webseiten: www.ligo.org, www.virgo-gw.eu.
- Kostenloser arXiv-Vorabdruck, der die Details der vollständigen Analyse und der Ergebnisse beschreibt unter <https://arxiv.org/abs/1808.08676>.
- Veröffentlichte Version des Artikels: Physical Review Letters 122, 061104 (Veröffentlicht am 13. Februar 2019)

Lesen Sie weitere Artikel über die GW170817-Entdeckung:

- Multi-messenger Observations of a Binary Neutron Star Merger
- GW170817: Observation of Gravitational Waves from a Binary Neutron Star Inspiral
- Gravitational Waves and Gamma-rays from a Binary Neutron Star Merger: GW170817 and GRB 170817A
- A Gravitational-wave Standard Siren Measurement of the Hubble Constant
- Search for Post-merger Gravitational Waves from the Remnant of the Binary Neutron Star Merger GW170817
- Estimating the Contribution of Dynamical Ejecta in the Kilonova Associated with GW170817
- On the Progenitor of Binary Neutron Star Merger GW170817
- GW170817: Implications for the Stochastic Gravitational-Wave Background from Compact Binary Coalescences
- Search for High-energy Neutrinos from Binary Neutron Star Merger GW170817 with ANTARES, IceCube, and the Pierre Auger Observatory
- GW170817: Measurements of neutron star radii and the equation of state
- Tests of General Relativity with GW170817
- Model comparison from LIGO-Virgo data on GW170817's binary components and consequences for the merger remnant