

Mit Gravitationswellen-Beobachtungen mehr über extrem dichte Materie erfahren

Einführung

Die Gravitationswellen, die LIGO und Virgo bisher nachweisen, entstanden entweder durch verschmelzende Schwarze Löcher oder Neutronensterne. Die meisten nachgewiesenen Ereignisse stammen von zwei verschmelzenden Schwarzen Löchern, aber ein Ereignis, GW170817 genannt, stammt wahrscheinlich von der Verschmelzung von zwei Neutronensternen. Im Gegensatz zu verschmelzenden Schwarzen Löchern begleitete in diesem Fall eine Fülle astronomischer Beobachtungen in allen Wellenlängen – von Gammastrahlen bis hin zu Radiowellen – die Gravitationswellen-Beobachtung.

Neutronensternverschmelzungen sind besonders interessant, da Neutronensterne aus Materie bestehen, die auf unglaublich hohe Dichten komprimiert ist, die sich auf der Erde nicht untersuchen lassen. Die Massedichte innerhalb eines Neutronensterns kann diejenige von Wasser auf der Erde um den Faktor 1.000.000.000.000.000 (oder eine Million Milliarden) überschreiten. Das Verhalten dieser dichten Materie wird durch die sogenannte Zustandsgleichung für Neutronensterne beschrieben. Für die Zustandsgleichung gibt es verschiedene theoretische Vorhersagen, die jedoch alle auf Annäherungen und Annahmen basieren. Etwas über die Zustandsgleichung für Materie unter extremen Bedingungen in Neutronensternen zu erfahren ist sehr wichtig, um das Feld der Kernphysik voranzubringen.

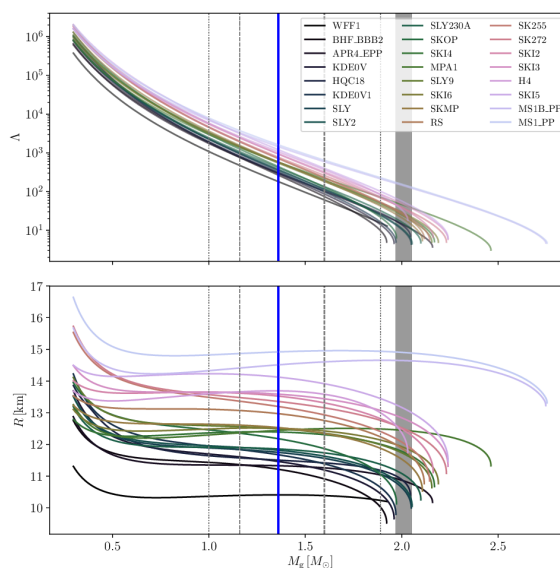


Abb. 1: Vorhersagen der Eigenschaften von Neutronensternen basierend auf verschiedenen theoretischen Modellen, die extrem dichte Materie beschreiben. Die horizontale Achse entspricht der Masse eines Neutronensterns in Einheiten einer Sonnenmasse. In der oberen Abbildung gibt die vertikale Achse an, wie stark sich ein Neutronenstern beim Umlauf eines anderen massereichen kompakten Objekts verformt, wobei größere Werte stärkere Verformung bedeuten. In der unteren Hälfte stellt die vertikale Achse den Radius eines Neutronensterns dar. Es ist beachtenswert, dass Neutronensterne mehr wiegen als unsere Sonne, aber einen Durchmesser von nur zehn Kilometern haben.

Gravitationswellen von kollidierenden Neutronensternen

Was können wir also aus GW170817 über das Verhalten von extrem dichter Materie lernen? Bei Neutronensternen, die einander umkreisen, hängt die genaue Form des Gravitationswellensignals sowohl von deren Massen als auch von ihrer sogenannten Verformbarkeit durch Gezeitenkräfte ab. Diese beschreibt, wie stark ein Objekt durch die Gezeitenkräfte verformt wird, die entstehen, wenn sich zwei massereiche Objekte umkreisen. So umkreisen sich beispielsweise Erde und Mond, was zu Gezeiten in unseren Ozeanen führt (daher der Name „Gezeitenkraft“). Die Verformung der Erde wirkt sich auch auf die Umlaufbahn des Mondes aus, der sich über Milliarden von Jahren von der Erde entfernt hat. In den Bahnen der Neutronensterne spielen Gezeiteneffekte ebenfalls eine Rolle. Sobald die Sterne nahe beieinander sind – kurz vor dem Verschmelzen – könnten diese Effekte stark genug sein, um das Schrumpfen der Umlaufbahn, das durch die Abstrahlung von Gravitationswellen aus dem System verursacht wird, leicht zu verändern.

Die Messung der Gezeitenverformbarkeit ist nicht einfach, da die Auswirkung auf das Gravitationswell-

lensignal gering ist und das Eigenrauschen des Detektors es bereits schwierig gestaltet Gravitationswellen überhaupt nachzuweisen. Die Situation ist ähnlich zum Hören eines Radiosenders, der so weit weg ist, dass er sich fast im Rauschen verliert. Selbst wenn das Rauschen zu stark ist, um einzelne Wörter in einem Lied zu erkennen, würden statistische Methoden es dennoch ermöglichen die Wahrscheinlichkeit dafür zu beurteilen, wie wahrscheinlich es ist, dass ein bestimmtes Lied gespielt wird. In dieser Analogie entspräche dem Versuch die Gezeiten-Effekte nachzuweisen die Frage, wie wahrscheinlich es ist, dass die Originalversion des Lieds im Vergleich zu einer Cover-Version abgespielt wird; eine Aufgabe, die umso schwieriger wird, je ähnlicher die beiden Versionen sind.

Was wir untersucht haben

In der vorliegenden Arbeit nahmen wir verfügbare theoretische Modelle für die Zustandsgleichung und berechneten daraus die Verformbarkeit von Neutronensternen durch Gezeitenkräfte in Abhängigkeit von der Masse. Basierend auf diesen Berechnungen führt jedes Modell einer Zustandsgleichung dann zu einer leicht unterschiedlichen Vorhersage des Gravitationswellensignals der Verschmelzung zweier Neutronensterne. Wir analysierten das Gravitationswellensignal GW170817 und berechneten die Wahrscheinlichkeiten, mit denen die einzelnen Modelle für die Zustandsgleichung korrekt sind, im Vergleich zueinander.

Was wir gelernt haben

Wir haben festgestellt, dass nur diejenigen Zustandsgleichungsmodelle unwahrscheinlich sind, welche die größten Gezeiteneffekte vorhersagen. Bei den übrigen Modellen sind die Gezeiteneffekte zu klein, um sie voneinander zu unterscheiden. Wenn wir nur das Gravitationswellensignal betrachten, können wir nicht unterscheiden, ob GW170817 eine Verschmelzung von zwei Neutronensternen oder zwei schwarzen Löchern oder die Verschmelzung von einem schwarzen Loch und einem Neutronenstern war. Allerdings lassen sich die gleichzeitigen Beobachtungen elektromagnetischer Signale nicht durch zwei verschmelzende Schwarze Löcher erklären, und auch die aus dem Signal abgeleiteten Massen sind geringer als diejenigen beobachteter Schwarzer Löcher.

Neben der Gezeitenverformbarkeit bestimmt die Zustandsgleichung auch, wie massereich ein Neutronenstern sein kann, ohne dass er zu einem Schwarzen Loch zusammenbricht. Diese Frage ist relevant für das Ergebnis der Neutronensternkollision: sie kann entweder zu einem Schwarzen Loch oder einem einzelnen Neutronenstern führen. Letzterer kann dann auch nach einer gewissen Zeit zu einem Schwarzen Loch zusammenfallen. Gravitationswellen vom entstandenen Objekt ließen sich mit der aktuellen Detektorempfindlichkeit nicht beobachten. Das Signal aus der Phase des Aufeinanderzufallens liefert jedoch Informationen über die Gesamtmasse. Damit untersuchten wir die Konsequenzen jedes Zustandsgleichungsmodells für das Ergebnis der Verschmelzung. Auf diese Weise stellten wir fest, dass diejenigen Zustandsgleichungsmodelle, die das Signal GW170817 besser beschreiben, vorhersagen, dass das Endergebnis der Verschmelzung ein Schwarzes Loch ist.

Mehr als Gravitationswellen

Die Verzögerung bis zur Entstehung eines Schwarzen Lochs nach der Verschmelzung ist wichtig, um die Beobachtung des kurzen Gammastrahlenblitzes zu verstehen, der GW170817 begleitete. Ein

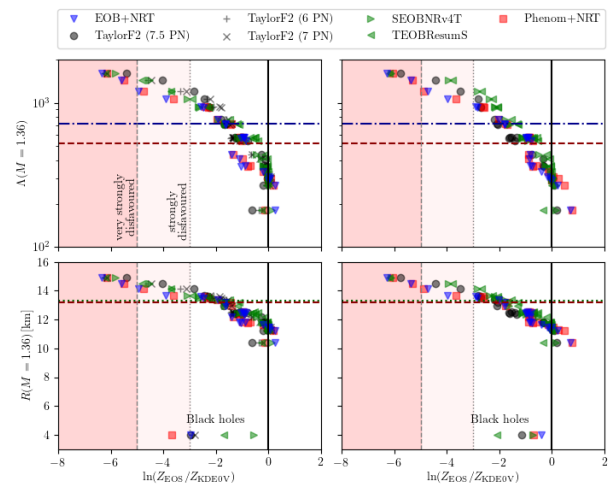


Abb. 2: Die Punkte in dieser Darstellung entsprechen verschiedenen theoretischen Modellen für das Verhalten extrem dichter Materie. Die Position auf der horizontalen Achse entspricht der Wahrscheinlichkeit, dass die beobachteten Gravitationswellen beim Ereignis GW170817 durch ein bestimmtes Modell beschrieben wurden, verglichen mit einem festen Referenzmodell. Von links nach rechts werden Modelle wahrscheinlicher. Die vertikale Achse in der oberen Abbildung bezieht sich auf den Grad der Verformung eines Neutronenstern mit einer Masse von 1,36 Sonnenmassen im Orbit um ein weiteres massereiches kompaktes Objekt. In der unteren Abbildung entspricht die vertikale Achse dem Radius eines solchen Neutronensterns. Ein Trend lässt sich erkennen, bei dem Modelle, die größere, deformierbarere Sterne voraussagen, weniger wahrscheinlich korrekt sind. Es zeigt auch, dass viele Modelle nicht ausgeschlossen werden können, wenn man nur die während GW170817 nachgewiesenen Gravitationswellen betrachtet.

theoretisches Szenario erfordert dafür die Existenz eines Schwarzen Lochs, das nach der Verschmelzung von einer massereichen Trümmerscheibe umgeben ist; ein anderes geht von einem hochmagnetisierten Neutronenstern anstelle eines Schwarzen Lochs aus. Für den Fall, dass der kurze Gammastrahlungsausbruch ein Schwarzes Loch erfordert, haben wir Grenzwerte für die maximal mögliche Masse *beliebiger* Neutronensterne abgeleitet. Solche Grenzwerte, die aus der Gravitationswellenastronomie gewonnen werden, sind unabhängig von den und ergänzen die Grenzwerte, die aus normalen astronomischen Beobachtungen von Neutronensternen bekannt sind.

Zukunftsaussichten

Zukünftige Beobachtungen werden wahrscheinlich strengere Einschränkungen der Zustandsgleichung liefern. Ein Grund dafür ist, dass ähnliche Ereignisse mit unterschiedlichen Massen zu stärkeren Gezeiteffekten führen können, die wiederum leichter zu messen sind. Zum anderen können verschiedene unabhängige Beobachtungen kombiniert werden, da die Zustandsgleichung für alle Neutronensterne wahrscheinlich dieselbe ist. Desweiteren hat sich die Empfindlichkeit der Detektoren seit GW170817 verbessert, was zu häufigeren Nachweisen führen dürfte, welche wiederum die benötigten Daten liefern, um die Zustandsgleichungen von Neutronensternen besser zu verstehen.

Glossar

Gammastrahlenblitze: Kurze, intensive Ausbrüche von Gammastrahlung, die häufig aus Quellen in fernen Galaxien beobachtet werden.

Gammastrahlung: Elektromagnetische Strahlung, die energiereicher als Röntgenstrahlung ist.

Neutronenstern: Extrem dichtes Objekt, das vor allem aus Neutronen besteht und das nach der Supernova-Explosion eines massereichen Sterns zurückbleibt.

Schwarzes Loch: Ein massereiches kompaktes Objekt, dessen Anziehungskraft so stark ist, dass kein Licht entkommen kann.

Weiterführende Informationen

Besuchen Sie unsere Webseiten: www.ligo.org, www.virgo-gw.eu.

Kostenloser arXiv-Vorabdruck unter <https://arxiv.org/abs/1908.01012>.

Weiterführende Informationen über GW170817

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 with GW170817

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 Mergers

Search for High-energy Neutrinos from Binary Neutron Star Merger GW170817 with ANTARES, IceCube, and the Pierre Auger Observatory