

GW₁₉₀₄₂₅: Der schwerste je gefundene Doppelneutronenstern?

Was wir entdeckt haben

Die LIGO Scientific Collaboration und Virgo Collaboration berichten, dass wir am 25. April 2019 Gravitationswellen vom Zusammenreffen zweier kompakter Objekte beobachtet haben. Unsere Kollaborationen haben dieses Signal GW₁₉₀₄₂₅ genannt. LIGO besteht aus zwei Gravitationswellen-Detektoren in Hanford (Washington, USA) und Livingston (Louisiana, USA). Zum Zeitpunkt von GW₁₉₀₄₂₅ war der LIGO-Hanford-Detektor vorübergehend abgeschaltet, aber das starke Signal wurde vom LIGO-Detektor in Livingston aufgezeichnet. Der Virgo-Detektor in Cascina (Italien) nahm zum selben Zeitpunkt Daten auf, aber aufgrund der Unterschiede in der Empfindlichkeit zwischen LIGO-Livingston und Virgo, sowie der wahrscheinlichen Himmelsposition des Signals, erreichte es nur in LIGO-Livingston die Schwelle für eine Detektion. Jedoch waren die Virgo-Daten nützlich, um die Eigenschaften der Quelle von GW₁₉₀₄₂₅ zu verstehen. Wir haben ermittelt, dass die Gesamtmasse des Doppelsternsystems, das GW₁₉₀₄₂₅ aussendete, zwischen 3,3 und 3,7 Sonnenmassen betrug. Angesichts dieses Massenbereichs ist die plausibelste Erklärung für das Signal, dass es von zwei miteinander kollidierenden Neutronensternen erzeugt wurde, die etwa 520 Millionen Lichtjahre von uns entfernt waren. Die Masse dieser Quelle ist deutlich größer als die aller bekannten Doppelneutronensterne.



Abbildung 1: Künstlerische Darstellung eines verschmelzenden Doppelneutronensterns, wie der Quelle von GW₁₉₀₄₂₅. Bildrechte: National Science Foundation/LIGO/Sonoma State University/A. Simonnet.

Ein paar Hintergrundinformationen

GW₁₉₀₄₂₅ wurde im dritten Beobachtungslauf (O₃) von Advanced LIGO und Virgo detektiert, der am 1. April 2019 begann und am 30. April 2020 enden wird. Vor O₃ gab es bereits zwei weitere Beobachtungsläufe dieser Detektorgeneration: O₁ (September 2015 bis Januar 2016) und O₂ (November 2016 bis August 2017), siehe hier für weitere Details. Zwischen Beobachtungsläufen werden die Detektoren mit neuen Technologien verbessert, um ihre Empfindlichkeit zu erhöhen.

Während O₂ beobachteten LIGO und Virgo erstmals Gravitationswellen von einem Doppelneutronenstern, bekannt als GW₁₇₀₈₁₇. Der Zusammenprall dieser Neutronensterne erzeugte auch weitere

Signale über das gesamte elektromagnetische Spektrum. GW190425 ist nun wahrscheinlich unsere zweite Beobachtung verschmelzender Neutronensterne mit Hilfe von Gravitationswellen. Bisher wurde jedoch noch kein elektromagnetisches Gegenstück, oder Neutrinosignal, gefunden, das mit GW190425 zusammenträfe. Dies ist nicht allzu verwunderlich, da die Quelle weiter entfernt war als die von GW170817 und das erwartete elektromagnetische Signal entsprechend schwächer sein sollte. Das größte Problem für die Suche nach Gegenstücken ist aber vermutlich, dass wir GW190425 nicht sehr gut am Himmel lokalisieren konnten. Das Signal kann aus einer Region kommen, die 16% des gesamten Himmels abdeckt – für konventionelle Teleskope ein riesiges Suchgebiet.

Warum wir wissen, dass GW190425 ein astrophysikalisches Signal ist

Wir benutzen mehrere Suchmethoden, um nach Gravitationswellensignalen von verschmelzenden kompakten Objekten zu suchen. Diese vergleichen die Messdaten mit aus der Allgemeinen Relativitätstheorie vorhergesagten Signalen, wobei eine Optimalfilter genannte Technik benutzt wird. Unsere Suchalgorithmen haben das GW190425-Signal in Daten von LIGO-Livingston identifiziert. Der nächste Schritt ist dann, abzuschätzen, wie signifikant das Signal ist: wir wollen wissen, wie häufig solch ein Signal rein zufällig allein aufgrund des Detektorrauschens in den Daten auftreten könnte. Dies bezeichnet man als Fehlalarmrate. Um sie abzuschätzen, müssen wir die Stärke von GW190425 mit einer Hintergrundverteilung vergleichen. Diesen Hintergrund haben wir ermittelt, indem wir die Suche über 169,5 Tage aus O1 und O2 sowie 50 Tagen aus O3 laufen ließen, wobei die Daten der drei Detektoren (LIGO-Livingston, LIGO-Hanford und Virgo) einzeln herangezogen wurden. Als Fehlalarmrate für GW190425 erhielten wir, dass ein solches Ereignis nur alle 69.000 Jahre vom Rauschen erzeugt würde. Abbildung 2 zeigt den Hintergrund über die kombinierten 219,5 Tage. GW190425 ragt klar aus diesem Hintergrund heraus, ebenso wie das vorherige Ereignis GW170817.

Zusätzlich zu den Suchalgorithmen haben wir für GW190425 auch Überprüfungsverfahren durchgeführt, wie sie hier für ein früheres Ereignis beschrieben werden. Dabei untersuchen wir, ob seltene kurze Störungen in den Instrumenten das in LIGO-Livingston gemessene Signal erklären könnten. Wir haben keine Störungen im Detektor oder seiner Umgebung gefunden, die GW190425 verursacht haben könnten.

Warum ist GW190425 so interessant?

Wir haben ermittelt, dass das schwerere der beiden kompakten Objekte eine Masse zwischen dem 1,61- und 2,52-fachen der Sonne hatte, und das zweite Objekt zwischen 1,12 und 1,68 Sonnenmassen. Diese Massen liegen in einem ähnlichen Bereich wie sie zuvor für andere Neutronensterne gemessen wurden und passen zu den Erwartungen anhand von simulierten Supernova-Explosionen. Der schwerste Neutronenstern, der aus elektromagnetischen Beobachtungen bekannt ist (PSR J0740+6620), hat die 2,05–2,24-fache Masse der Sonne. Wir können zwar auch nicht direkt ausschließen, dass GW190425 von einer Quelle mit ein oder zwei Schwarzen Löchern stammt. Die naheliegendste Interpretation ist aber, dass tatsächlich beide Objekte Neutronensterne waren. Wenn dies also der Fall war, was können wir dann über GW190425 ableiten?

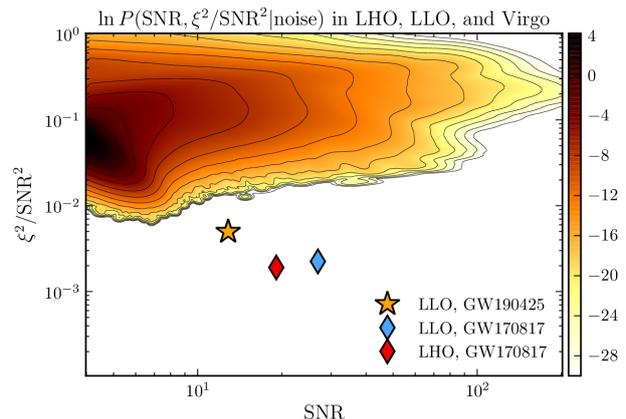


Abbildung 2: Die Wahrscheinlichkeitsfunktion für den Hintergrund aus Detektorrauschen in LIGO-Hanford (LHO), LIGO-Livingston (LLO) und Virgo, aufgetragen gegen die zwei Größen SNR und ξ^2 . Das SNR (Signal-zu-Rausch-Verhältnis, englisch: *signal-to-noise ratio*) gibt an, wie laut ein Signal ist, und der ξ^2 -Wert überprüft, wie gut die zeitliche Entwicklung des SNRs zu unseren Erwartungen an ein echtes Signal von einem kompakten Doppelstern passt. Abgebildet ist die Hintergrundverteilung für den Bereich von Systemeigenschaften, der zu Doppelneutronensternen passt. Der Hintergrund wurde aus Daten von 169,5 Tagen während O1 und O2 und 50 Tagen von O3 ermittelt. Es finden sich keinerlei Hintergrundsignale an der SNR- ξ^2 -Position von GW190425 (goldener Stern), dieses Signal ragt also aus dem Hintergrund heraus. Zum Vergleich sind auch die Messungen von GW170817 in LIGO-Hanford und LIGO-Livingston markiert (blaue und rote Rauten).

In mancher Hinsicht ist GW190425 anders als bekannte Doppelneutronensterne in unserer Milchstraße. Obwohl die Massen der einzelnen Neutronensterne vergleichbar mit den bekannten sind, ist die Gesamtmasse des Systems ungewöhnlich. Abbildung 3 zeigt die Gesamtmassen von zehn galaktischen Doppelneutronensternen, von denen erwartet wird, dass sie innerhalb der Lebensdauer des Universums verschmelzen. Anhand einer an diese 10 Systeme angepassten Normalverteilung sehen wir, dass die durchschnittliche Gesamtmasse eines galaktischen Doppelneutronensterns etwa 2,69 Sonnenmassen beträgt. Dagegen entspricht die Gesamtmasse des GW190425-Systems etwa 3,4 Sonnenmassen. Damit liegt sie 5 Standardabweichungen über dem galaktischen Durchschnitt. Diese Abweichung legt nahe, dass die Quelle von GW190425 auf andere Weise entstanden sein dürfte als die bekannten Doppelneutronensterne in der Milchstraße.

Ein Doppelsystem aus zwei Neutronensternen kann im Allgemeinen auf zwei Wegen entstehen. Eine Möglichkeit ist die Entwicklung eines sogenannten „isolierten“ Doppelsystems, in dem die beiden ursprünglichen Sterne eine gemeinsame Hülle („Common Envelope“) ausbilden. Die beiden Neutronensterne werden dann jeweils durch eine Supernovaexplosion der beiden Vorgängersterne erzeugt, aber es findet keine Wechselwirkung mit anderen Objekten außerhalb des Doppelsystems statt. Der zweite Weg ist die „dynamische“ Entstehung, bei der ein ursprüngliches Doppelsystem etwa aus zwei Neutronensternen, oder einem Neutronenstern und einem Hauptreihenstern, besteht. Ein weiterer Neutronenstern trifft dann auf dieses System und schleudert den leichteren Stern hinaus, sodass ein schwereres Doppelneutronensternsystem zurückbleibt. Solch eine dynamische Entstehung ist für GW190425 unwahrscheinlich, da allgemein nicht angenommen wird, dass dieser Weg einen nennenswerten Anteil an der Entstehungsrate von Doppelneutronensternen hat. Falls das GW190425-System isoliert entstanden ist, könnte dies bedeuten, dass die Neutronensterne aus Sternen mit niedriger Metallizität geboren wurden. Es könnte auch sein, dass nachdem die erste Supernova-Explosion stattfand und den ersten Neutronenstern im Doppelsystem erzeugte, Masse vom zweiten Stern (der noch keine Supernova erlebt hatte) auf den ersten Neutronenstern überging und ihn schwerer werden ließ. In jedem Fall könnte die Entdeckung von GW190425 darauf hinweisen, dass es eine Population von Doppelneutronensternen mit kurzen Umlaufzeiten (unter einer Stunde) geben könnte, die mit heutigen elektromagnetischen Durchmusterungen nicht beobachtbar sind.

Wir haben auch versucht, zu ermitteln, wie schnell sich die beiden Neutronensterne drehen. Leider geben unsere Daten keine eindeutige Messung dieser Umdrehungsraten (oder „Spins“) her. Die Ergebnisse sind allerdings verträglich mit den zwei sich am schnellsten drehenden bekannten galaktischen Neutronensternen in Doppelsystemen (von denen erwartet wird, dass sie innerhalb der Lebensdauer des Universums verschmelzen), PSR J0737–3039A/B und PSR J1946+2052. Das zweite von diesen genannten Systemen enthält einen Pulsar, der sich in 17 Millisekunden um die eigene Achse dreht.

Unter der Annahme, dass GW190425 von einem Doppelneutronenstern stammt, können wir diese Entdeckung mit dem zuvor entdeckten und sicher identifizierten Signal GW170817 kombinieren, um die Rate von verschmelzenden Neutronensternen im Universum zu ermitteln. Wir erhalten eine Rate von 250 bis 2810 Verschmelzungen pro Kubik-Gigaparsec pro Jahr.

GW190425 ist also vermutlich die zweite Gravitationswellen-Beobachtung eines Doppelneutronensterns, und es hat uns einmalige Einsichten in diese seltsamen Objekte gegeben.

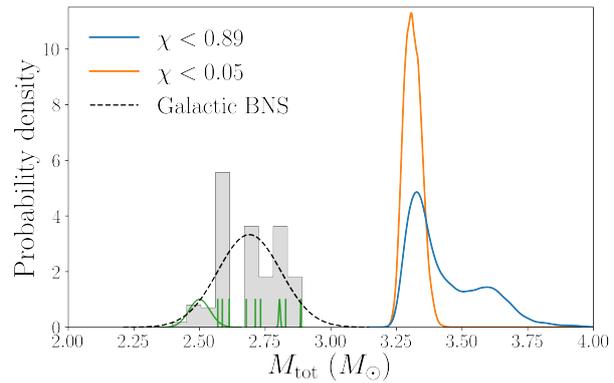


Abbildung 3: Wahrscheinlichkeitsverteilung der möglichen Gesamtmassen des GW190425-Doppelsternsystems unter verschiedenen Annahmen über die Spins (Umdrehungsraten) der beiden kompakten Objekte (blaue und orangene Kurven). Dazu sind die Gesamtmassen von 10 galaktischen Doppelneutronensternen aufgetragen, von denen erwartet wird, dass sie innerhalb der Lebensdauer des Universums verschmelzen. Die gestrichelte schwarze Kurve ist eine an diese 10 Systeme angepasste Normalverteilung. Die grünen Kurven entsprechen den einzelnen galaktischen Doppelneutronensternen, auf eine feste Höhe von 1 auf der vertikalen Achse umgerechnet.

Weiterführende Informationen

- Unsere Webseiten (auf Englisch): www.ligo.org und www.virgo-gw.eu
- Englische Originalversion dieser Zusammenfassung:
<https://www.ligo.org/science/Publication-GW190425/>
- LIGO-Pressemitteilung (auf Englisch):
<https://www.ligo.caltech.edu/news/ligo20200106>
- Deutschsprachige Pressemitteilung des Max-Planck-Instituts für Gravitationsphysik:
<https://www.aei.mpg.de/2439386/neues-aus-dem-gravitationswellen-universum>
- Kostenloser Vorabdruck des wissenschaftlichen Artikels (auf Englisch):
<https://dcc.ligo.org/P190425/public>

Glossar

- **Kompaktes Objekt:** Ein allgemeiner Begriff für sehr dichte, sehr kleine Sternüberreste wie Neutronensterne und Schwarze Löcher. Aber „klein“ meinen wir nur im astronomischen Sinne: Diese Objekte sind mindestens so schwer wie unsere Sonne, komprimiert auf einen Durchmesser von nur wenigen, oder wenigen Dutzend, Kilometern.
- **Doppelstern:** Ein System aus zwei Sternen oder kompakten Objekten, die umeinander kreisen.
- **Neutronenstern:** Extrem dichtes Objekt, das nach dem Kollaps eines schweren Sterns zurückbleibt.
- **Schwarzes Loch:** Eine Raumzeitregion, erzeugt durch eine extrem kompakte Masse, in der die Gravitation so stark ist, dass nichts, nicht einmal mehr Licht, entkommen kann.
- **Spin:** Angabe, wie schnell ein Objekt sich um seine eigene Achse dreht. Beispielsweise dreht sich die Erde in 24 Stunden einmal um sich selbst.
- **Pulsar:** Ein Neutronenstern, der anhand von regelmäßigen Pulsen elektromagnetischer Strahlung (meistens im Radioband) beobachtet werden kann. Ein großer Anteil der Neutronensterne, deren Existenz als Sternüberreste anzunehmen ist, können nicht als Pulsare beobachtet werden, weil sie keine starken elektromagnetischen Pulse abstrahlen, oder weil ihre Strahlung nicht in die Richtung der Erde zeigt.