

Der seltsame Fall von GW₁₉₀₈₁₄: Die Verschmelzung eines Schwarzen Lochs von Sternenmasse mit einem rätselhaften kompakten Objekt

Am 14. August 2019 – auf den Tag genau zwei Jahre nach der allerersten Beobachtung eines Gravitationswellensignals durch drei Detektoren (GW₁₇₀₈₁₄) – haben die beiden Advanced-LIGO-Detektoren in den USA, in Hanford, Washington, und Livingston, Louisiana, sowie der Advanced-Virgo-Detektor in Cascina, Italien, ein weiteres Gravitationswellensignal von einer vielleicht noch faszinierenderen Quelle beobachtet. Die LIGO-Virgo-Detektoren befanden sich mitten in ihrem dritten Beobachtungslauf (O₃) als sie dieses extrem laute Ereignis beobachteten, das durch die finalen Umläufe und die Verschmelzung zweier kompakter Objekte erzeugt wurde; eines ist ein Schwarzes Loch, worum es sich bei dem anderen handelt, ist unbekannt.

Zwei herausragende Eigenschaften machen die Quelle von GW₁₉₀₈₁₄ einzigartig. Erstens ist das schwerere kompakte Objekt etwa neunmal so massereich wie sein Begleiter. Das macht sie zu der Gravitationswellenquelle mit den bisher unterschiedlichsten Massen. Zweitens: Die ermittelte Masse des leichteren kompakten Objekts macht es entweder zum leichtesten Schwarzen Loch oder zum schwersten Neutronenstern, der je in einem System aus zwei kompakten Objekten entdeckt wurde. Wir können aber nicht sicher sein, welche Hypothese zutrifft. Zusammen stellen diese Eigenschaften sowohl unser Verständnis der Massen, die kompakte Objekte haben können, in Frage als auch die Art und Weise, wie sie zu solchen verschmelzenden Doppelsystemen werden.

Das Gravitationswellensignal

Zur Suche nach Gravitationswellensignalen in den Messdaten der Detektoren werden Optimalfiltertechniken verwendet. Diese vergleichen die Messdaten mit Vorhersagen der Signale, die basierend auf der Allgemeinen Relativitätstheorie von Einstein berechnet werden. Eine solche Analyse ergibt eine Wahrscheinlichkeit von weniger als 1 in 10.000 Jahren, dass zufälliges Detektorrauschen GW₁₉₀₈₁₄ verursachte. GW₁₉₀₈₁₄ ist das drittlauteste Signal, das wir bisher beobachtet haben (nach GW₁₇₀₈₁₇ und GW₁₅₀₉₁₄). Damit ist es laut genug, um im Spektrogramm (Darstellung der Frequenz des Signals und seiner Änderung mit der Zeit) in Abbildung 1 mit bloßem Auge sichtbar zu sein.

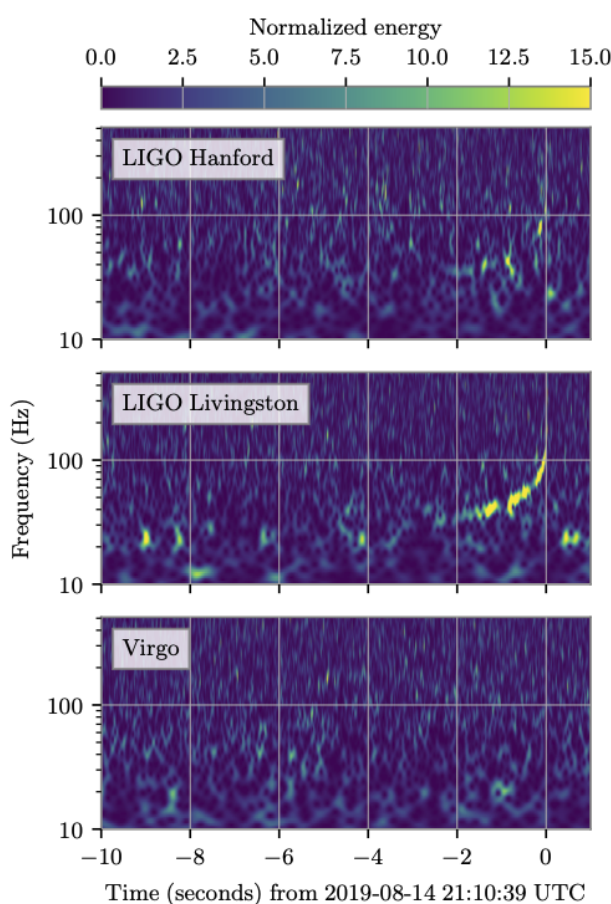


Abb. 1: Zeit-Frequenz-Darstellungen (Spektrogramme) des Messdatenabschnitts, der GW₁₉₀₈₁₄ enthält, beobachtet von LIGO Hanford (oben), LIGO Livingston (Mitte) und Virgo (unten). Es werden Zeiten ab etwa 10 Sekunden vor dem Ereignis angezeigt. Die Energie bei einer bestimmten Zeit-Frequenz-Kombination wird durch die Farbskala dargestellt. Im mittleren Spektrogramm (LIGO Livingston-Daten), in dem das Signal am lautesten war, ist ein „zirpendes“ Signal deutlich zu erkennen.

Während des Beobachtungslaufs O3 hat die LIGO-Virgo-Kollaboration in Echtzeit Hinweise auf potenzielle Gravitationswellen-Nachweise veröffentlicht. Diese öffentlichen Warnmeldungen enthalten vorläufige Informationen über die wahrscheinliche Signalquelle in Form einer Klassifikation. GW190814 wurde innerhalb von 20 Minuten nach der Entdeckung mit der Klassifikation „Massenlücke“ veröffentlicht. Danach hat mindestens eines der beiden beteiligten kompakten Objekte eine geschätzte Masse zwischen dem 3- und 5-fachen der **Masse unserer Sonne ($M_{\odot}$)**. Diese Definition von „Massenlücke“ beruht auf der Seltenheit von Beobachtungen Schwarzer Löcher mit Massen von weniger als ca. $5 M_{\odot}$. Dieser Teil der Massenverteilung Schwarzer Löcher ist als „untere“ Massenlücke bekannt.

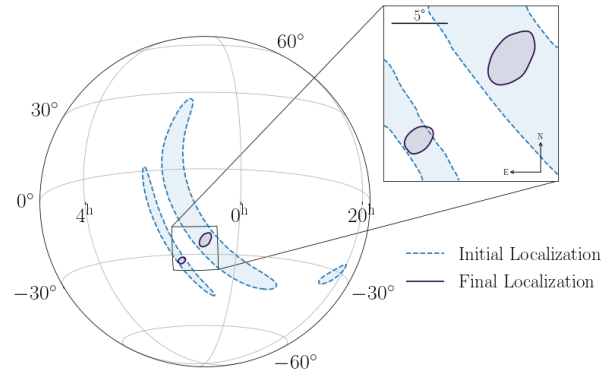


Abb. 2: Der Bereich am Himmel, aus dem das GW190814-Signal wahrscheinlich stammt. Die blauen Bereiche stammen von der ersten Online-Analyse der Daten, während die violetten Flecken die endgültige Himmelslokalisierung darstellen.

Eine weitere Untersuchung des Signals ermöglichte eine genauere Schätzung der Massen, und eine 11 Stunden später veröffentlichte Aktualisierung änderte daher die Quellenklassifikation in „NSBH“. Das bedeutet, dass eines der kompakten Objekte eine Masse weniger als $3 M_{\odot}$ hatte, was eine grobe Abschätzung der maximal möglichen Masse eines Neutronensterns darstellt. Der Richtung zur Quelle ließ sich außerdem auf eine kleine Himmelsfläche von etwa 20 Quadratgrad lokalisieren (siehe Abbildung 2). Mit diesen Informationen wurden – wie im Fall von GW170817 – Folgebeobachtungen quer durch das elektromagnetische Spektrum und mit Neutrinosdurchgeführt, die jedoch keine Entsprechungen zur Gravitationswellenbeobachtung fanden. Dies war zu erwarten, da GW190814 viel weiter entfernt ist als GW170817 und weil die gemessenen Quelleneigenschaften (siehe unten) eine starke elektromagnetische Abstrahlung nicht begünstigen.

Eigenschaften der Quelle

Das schwerere kompakte Objekt im Doppelsystem hat eine Masse von etwa $23 M_{\odot}$, was mit der bisher von LIGO und Virgo beobachteten Population Schwarzer Löcher übereinstimmt (siehe Abbildung 3). Die Masse des leichteren kompakten Objekts liegt zwischen $2,5 M_{\odot}$ und $3 M_{\odot}$. Damit liegt diese über der des wohl schwersten bekannten Neutronensterns, PSR J0740+6620, und unter den typischen Massen Schwarzer Löcher, die durch elektromagnetische Beobachtungen indirekt entdeckt wurden. Die Masse ist jedoch vergleichbar mit der des kompakten Objekts (wahrscheinlich ein Schwarzes Loch), das durch die Verschmelzung der beiden in GW170817 beobachteten Neutronensterne entstand.

Der Massenunterschied hilft uns, Eigenschaften der Quelle genauer zu messen. Je größer diese Asymmetrie, desto stärker ist die Signatur der höheren „Harmonischen“ der Grundfrequenz im Gravitationswellensignal, die sich mit Obertönen einer Gitarrensaite beim Zupfen vergleichen lassen. Wie im Fall GW190412 – der Verschmelzung Schwarzer Löcher mit deutlich unterschiedlichen Massen – wird die mangelnde Eindeutigkeit von Abstand und Neigung des Systems teilweise durch die in den höheren Harmonischen enthaltene Zusatzinformation aufgelöst. So können wir feststellen, dass die Gravitationswellen von

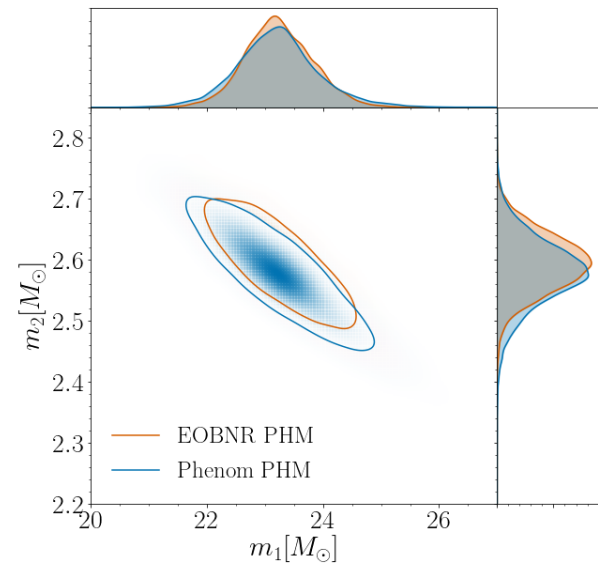


Abb. 3: Die ermittelten Massen der beiden kompakten Objekte, die GW190814 erzeugten (auf der horizontalen Achse die Masse des schwereren Objekts, auf der vertikalen Achse die Masse des leichteren Objekts, das ein Neutronenstern oder ein Schwarzes Loch sein könnte). Die Konturen und der schattierte Bereich zeigen die möglichen Massenkombinationen, die mit den Daten übereinstimmen. Die Kurven in den zusätzlichen Feldern oben und rechts geben die entsprechenden Verteilungen der möglichen Werte für die einzelnen Massen an. Die beiden Farben stehen für zwei leicht unterschiedliche Modellvorhersagen des Signals in der Allgemeinen Relativitätstheorie.

GW190814 aus einer Entfernung von 800 Millionen **Lichtjahren** kommen.

Es wird erwartet, dass sich kompakte Objekte wie Neutronensterne und Schwarze Löcher um ihre Achsen drehen. Diese Spins beeinflussen das Gravitationswellensignal nicht so stark wie ihre Massen und sind daher schwieriger zu messen. Allerdings war GW190814 ein langes Signal, das in unseren Detektoren über 10 Sekunden lang dauerte. In Verbindung mit der hohen Lautstärke des Signals ermöglicht uns dies die bisher präziseste Gravitationswellenmessung des Spins eines Schwarzen Lochs: Er beträgt weniger als 7 % des in der Allgemeinen Relativitätstheorie erlaubten Maximalspins. Wir sind auch in der Lage festzustellen, dass das System wahrscheinlich nicht präzedierte.

Einstein und Hubble auf dem Prüfstand

GW190814 bietet uns ein sehr ergiebiges Umfeld, um Wissenschaft zu betreiben. Da GW190814 wesentlich asymmetrischere Massen aufweist als GW190412, finden wir viel stärkere Beweise für die Anwesenheit von höheren Harmonischen oder höheren Multipolen der Gravitationswellen im zugrunde liegenden Signal. Dies ist eine wunderbare Bestätigung der Allgemeinen Relativitätstheorie, die diese multipolare Struktur der Gravitationswellen vorhersagt.

Wir führten mehrere weitere Tests der Allgemeinen Relativitätstheorie an GW190814 durch und stellen fest, dass das Signal (siehe Abbildung 4) durch die Verschmelzung zweier Schwarzer Löcher gut beschrieben werden kann. Bezeichnenderweise gibt es keine Hinweise darauf, dass das leichtere Objekt etwas anderes als ein Schwarzes Loch war, wie etwa ein Neutronenstern oder etwas noch Exotischeres.

Mit GW190814 sind wir auch in der Lage, eine neue, auf Gravitationswellen basierende Messung der Hubble-Konstante H_0 , der derzeitigen Expansionsrate des Universums, durchzuführen. GW190814 ist bis heute die am besten am Himmel lokalisierte Gravitationswellenquelle, für die wir kein Gegenstück im elektromagnetischen Spektrum oder anhand von Neutrinos beobachtet haben. Um H_0 zu messen, benötigen wir im Prinzip die **Rotverschiebung** der Ursprungsgalaxie der Quelle. Aber auch ohne ein Gegenstück, das diese Galaxie eindeutig identifiziert, können wir stattdessen alle bekannten Galaxien in der gut lokalisierten Ursprungsregion von GW190814 als mögliche Orte in Betracht ziehen. Um die Hubble-Konstante zu bestimmen, kombinieren wir alle ihre Rotverschiebungen mit der Gravitationswellen-Entfernungsmessung. Dazu werden diese mit der Wahrscheinlichkeit gewichtet, dass die jeweilige Galaxie der Ursprungsort ist. Mit dieser Berechnung ermitteln wir H_0 (mit einer gewissen Unsicherheit) zu etwa 75 km pro Sekunde pro Megaparsec. Das so gut wie es mit jeder zuvor beobachteten Gravitationswellenquelle ohne Gegenstück möglich war.

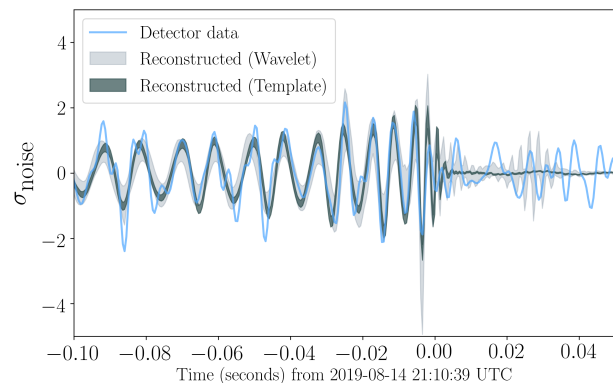


Abb. 4: Darstellungen der tatsächlichen Detektordaten (blaue Kurve) um die Zeit (horizontale Achse) des Ereignisses herum, zusammen mit Vorhersagen, wie das zugrunde liegende Signal aussieht. Das hellgraue Band stellt eine Modellvorhersage des Signals nach der Allgemeinen Relativitätstheorie dar, während das dunkelgraue Band eine Rekonstruktion des Signals unter minimalen Annahmen über die zugrunde liegende Theorie der Schwerkraft darstellt. Die vertikale Achse ist so skaliert, dass ein Wert von 1 dem typischen Niveau von Rauschfluktuationen in den Daten entspricht.

Ist das leichtere kompakte Objekt ein Neutronenstern oder ein Schwarzes Loch?

Die Masse des leichteren kompakten Objekts macht es entweder zu einem außergewöhnlich schweren Neutronenstern oder zu einem ungewöhnlich leichten Schwarzen Loch. Normalerweise wären wir in der Lage, aus den Fingerabdrücken der Gezeiteneffekte im Gravitationswellensignal auf das Vorhandensein eines Neutronensterns zu schließen: In einem verschmelzenden Doppelsystem mit einem Neutronenstern verursacht die von seinem Begleiter ausgeübte Gravitationskraft Gezeiten auf dem Neutronenstern, ähnlich wie die vom Mond auf der Erde verursachten Gezeiten. Für ein so massereiches und asymmetrisches System wie GW190814 ist der Fingerabdruck dieser Gezeiten jedoch zu klein, um gemessen werden zu können. Das heißt, in diesem Fall verrät uns unser Versuch, die Gezeiten zu messen, nicht, ob GW190814 von der Verschmelzung eines Schwarzen Lochs und eines Neutronensterns stammt oder von der zweier Schwarzer Löcher.

Andererseits erlauben uns theoretische Modelle der Neutronenstern-Materie sowie elektromagnetische Beobachtungen der Neutronensternpopulation, die maximale Masse abzuschätzen, die ein Neutronenstern erreichen kann. Diese Vorhersagen deuten darauf hin, dass das leichtere kompakte Objekt wahrscheinlich zu schwer ist, um ein Neutronenstern zu sein, und daher eher ein Schwarzes Loch sein dürfte. Wir können jedoch nicht ausschließen, dass GW190814 einen besonders schweren Neutronenstern enthält, ein Szenario in dem wir unsere Schätzungen der maximal möglichen Masse eines Neutronensterns erheblich revidieren müssten.

Entstehungsgeschichte des Systems

Da die Masse des leichteren kompakten Objekts zwischen den typischen Werten für Neutronensterne und Schwarze Löcher liegt und etwa neunmal kleiner ist als die Masse seines Begleiters, ähnelt GW190814 keiner anderen der bisher von LIGO und Virgo beobachteten Verschmelzungen (siehe Abbildung 5). Das Signal unterscheidet sich auch von den meisten Systemen, die in Simulationen der Population verschmelzender kompakter Objekte im Universum auftreten. Wir erwarten, dass Verschmelzungen dieser Art viel seltener vorkommen als die typischeren Verschmelzungen von zwei Schwarzen Löchern oder zwei Neutronensternen. Aus diesen Gründen ist es sehr schwierig, die Entstehung dieses Systems mit allen derzeitigen Modellen zu erklären.

Vergleicht man die Eigenschaften und die abgeleitete Verschmelzungsrate von GW190814 mit Vorhersagen, die auf von Astronom*innen entwickelten theoretischen Modellen der Sternentwicklung basieren, so wird klar: junge dichte Sternhaufen und Scheiben um aktive galaktische Kerne scheinen mit höherer Wahrscheinlichkeit die Entstehungsregionen dieser Ereignisse zu sein als Kugelsternhaufen. Aber alle Modelle zur Bildung kompakter Objekte müssen überarbeitet werden. Dieses System könnte sich aus der Entwicklung eines isolierten Doppelsterns gebildet haben, obwohl die Vorhersagen dieses Szenarios entscheidend von den Annahmen und Modellen zur Bildung kompakter Objekte abhängen. Es ist jedoch möglich, dass das leichtere Objekt im System selbst durch eine frühere Verschmelzung entstanden sein könnte, als ein Verschmelzungsrest der zweiten Generation. Ein solcher Überrest könnte dann über Gravitationswechselwirkungen in dichten Stern-Umgebungen wie Kugelsternhaufen ein Schwarzes Loch als Begleiter erhalten. Es ist jedoch unwahrscheinlich, dass dies der Hauptmechanismus ist, durch den solche Doppelsysteme gebildet werden.

GW190814 wirft faszinierende Fragen über die Massen von kompakten Objekten und die Prozesse auf, die zu ihren Verschmelzungen führen. Zukünftige Beobachtungen von Gravitationswellen werden entscheidend sein, um Licht (oder Gravitationswellen!) auf die größere Population asymmetrischer Verschmelzungen zu werfen, von denen GW190814 nur das erste Beispiel ist.

Glossar

Aktive Galaxienkerne: Sehr kompakte und sehr helle Bereiche in den Zentren bestimmter Galaxien. Sie gehören zu den leistungstärksten dauerhaften Energiequellen im Universum.

Höhere Harmonische / Multipole: Die Abstrahlung von Gravitationswellen kann als eine mathematische Reihenentwicklung in „sphärischen Harmonischen“ beschrieben werden. Höhere Harmonische sind Terme in dieser Entwicklung über den führenden Term hinaus.

Kompaktes Objekt: Sehr dichte Objekte, wie Weiße Zwerge, Neutronensterne oder Schwarze Löcher, die normalerweise die Endpunkte des Lebenszyklus eines Sterns darstellen.

Kugelsternhaufen: Eine kugelförmige Ansammlung dicht gepackter Sterne auf einer Umlaufbahn um eine Galaxie. Ein Kugelsternhaufen kann bis zu einer Million Sterne enthalten.

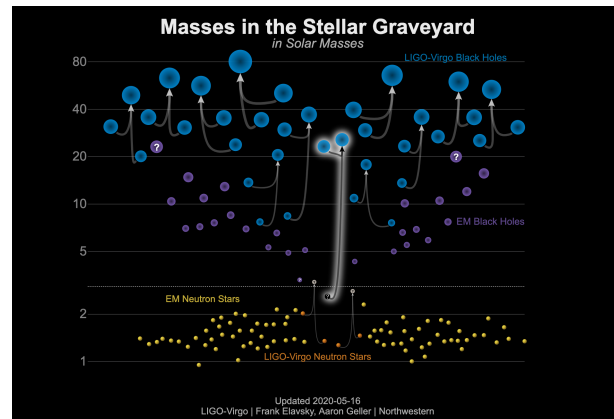


Abb. 5: Die Massen von Neutronensternen und Schwarzen Löchern, ermittelt durch Beobachtungen mit Gravitationswellen und im elektromagnetischen Spektrum. Die gelben und violetten Symbole stellen die Beobachtungen von Neutronensternen bzw. Schwarzen Löchern im elektromagnetischen Spektrum dar, während die orangen und blauen Symbole die entsprechenden Beobachtungen mittels Gravitationswellen sind. Unser Signal, GW190814, ist in der Mitte der Grafik als Verschmelzung eines Schwarzen Lochs und eines rätselhaften Objekts mit der etwa 2,6-fachen Masse der Sonne hervorgehoben. Dieses Ereignis erzeugte ein weiteres Schwarzes Loch.

Lichtjahr (Lj): Entfernungseinheit, definiert als die vom Licht in einem Jahr zurückgelegte Entfernung.

Massenlücke: Eine vermutete Lücke in der Population Schwarzer Löcher, auf die fehlende Beobachtungen von kompakten Objekten mit Massen zwischen $2,5 M_{\odot}$ und $5 M_{\odot}$ hindeuten.

Megaparsec (Mpc): Entfernungseinheit, die etwa 3,26 Millionen Lichtjahren entspricht.

$M_{\odot}$: Masse der Sonne und eine Standardmasseneinheit in der Astronomie, die etwa $2 \cdot 10^{30}$ kg entspricht.

Neutronenstern: Ein extrem dichtes kompaktes Objekt, das nach dem Kollaps eines massereichen Sterns zurückbleibt.

Präzession: Aufgrund der Drehimpulserhaltung dreht sich bei Schwarzen Löchern, die in einer anderen Richtung als die Umlaufbahn des Doppelsystems rotieren, die Ebene der Umlaufbahn („Präzession“) um die Richtung des Gesamtdrehimpulses.

Rotverschiebung: Zunahme der Wellenlänge (von Schall, Licht oder Gravitationswellen) aufgrund der Bewegung der Quelle in Bezug auf den Beobachter. Aufgrund der kosmologischen Expansion des Universums entfernen sich Objekte wie Galaxien von uns, und Licht und andere elektromagnetische Strahlung, die von ihnen kommt, haben eine größere Wellenlänge.

Schwarzes Loch: Ein kompaktes Objekt, das so dicht ist, dass auch Licht seiner Anziehungskraft nicht entkommen kann.