

GW190412: Die erste Beobachtung einer Verschmelzung ungleicher Schwarzer Löcher

Was wir entdeckt haben

Am 12. April 2019 beobachtete die LIGO Scientific Collaboration und die Virgo Collaboration Gravitationswellen, die durch das Umkreisen und Verschmelzen zweier Schwarzer Löcher erzeugt wurden. Dieses als GW190412 bezeichnete Ereignis wurde von allen drei im Netzwerk arbeitenden Detektoren beobachtet: sowohl von den LIGO -Detektoren (einer in Hanford, Washington und einer in Livingston, Louisiana) als auch vom Virgo-Detector (in Cascina, Italien). GW190412 wurde zu Beginn von Advanced LIGO's und Virgo's dritten Beobachtungslauf, bekannt als O3, entdeckt, der am 1. April 2019 begann und am 27. März 2020 ausgesetzt wurde.

Während die Massen der beiden Schwarzen Löcher mit denen von zuvor beobachteten Schwarzen Löchern übereinstimmen, ist GW190412 insofern einzigartig, dass es die erste Verschmelzung von Schwarzen Löchern ist, bei der die Massen der beiden Schwarzen Löcher definitiv ungleich sind - ein Schwarzes Loch ist mehr als dreimal schwerer als der andere. Diese Ungleichheit der Massen verändert das Gravitationswellensignal so, dass wir andere Parameter besser messen können, wie z.B. den Abstand und die Neigung des Systems, den Drehimpuls des schwereren Schwarzen Lochs und den Betrag der Präzession den das System aufweist. Darüber hinaus ermöglichen die ungleichen Massen von GW190412 die Überprüfung einer fundamentalen Vorhersage der allgemeinen Relativitätstheorie von Albert Einstein: Gravitationswellen „erklingen“ mit mehr als einer Grundfrequenz, sogenannte *höhere Multipole*.

Woher wissen wir, dass GW190412 ein echtes Gravitationswellensignal ist?

GW190412 ist ein lautes Ereignis, das bei allen drei Detektoren beobachtet wurde. Da die drei Detektoren Tausende von Kilometern voneinander entfernt sind, ist die fast gleichzeitige Beobachtung in allen Detektoren ein gutes Zeichen dafür,

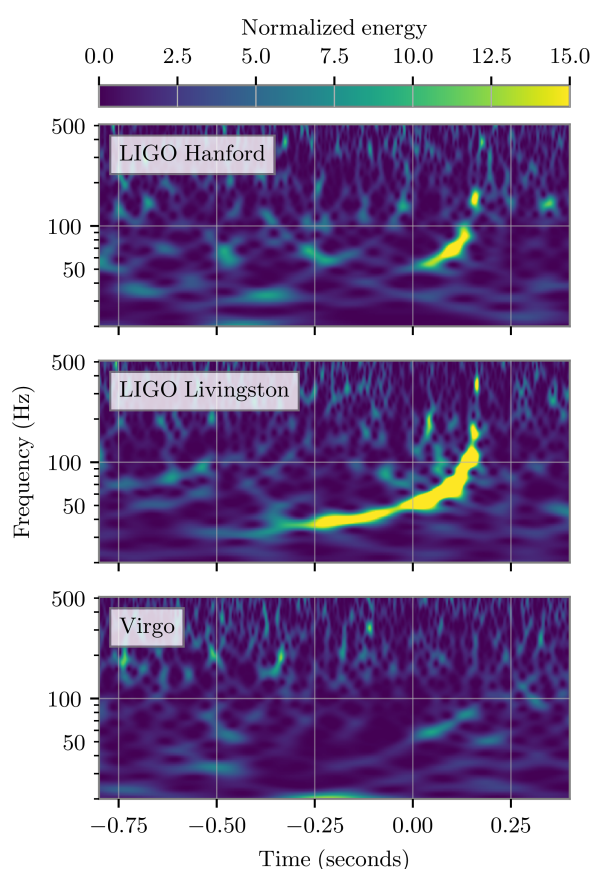


Abbildung 1: Das Spektrogramm von GW190412 in den drei Gravitationswellendetektoren. Die horizontale Achse repräsentiert die Zeit und die vertikale Achse zeigt die Frequenz des Signals an. Die Farbe repräsentiert die Energiemenge in einer bestimmten Frequenz zu einem bestimmten Zeitpunkt. Das bekannte „Chirp“-Signal kann als eine Zunahme von Frequenz und Energie im Laufe der Zeit gesehen werden, die sich aus der erhöhten Energie der Gravitationswellenstrahlung ergibt, wenn sich die beiden Schwarzen Löcher immer näher umkreisen und anschließend verschmelzen.

dass es eher astrophysikalischen Ursprungs ist als durch Rauschen verursacht wurde.

Die Zeit-Frequenz-Darstellung (oder ein *Spektrogramm*) von GW190412 ist in Abbildung 1 dargestellt. Obwohl GW190412 stark genug ist, um es in den Daten der Hanford- und Livingston-Detektoren „mit dem bloßen Auge“ zu erkennen, verwenden wir eine Reihe von Algorithmen zum systematischen Durchsuchen der Daten nach Gravitationswellensignalen und bestimmen deren Bedeutung. Die meisten Techniken basieren auf einer *angepassten Filterung*, bei der die beobachteten Daten mit simulierten Signalen verglichen werden, welche mit Hilfe der allgemeinen Relativitätstheorie berechnet wurden. Wir bestimmen die Wahrscheinlichkeit, dass ein Signal aus dem Rauschen der Detektoren stammt, als *Fehlalarmrate*. Unter Verwendung der Daten vom 8. bis 18. April haben wir eine Fehlalarmrate von einem zufälligen Ereignis pro 30.000 Jahre gefunden! Diese Fehlalarmrate wird noch aussagekräftiger, wenn mehr Daten von O3 analysiert werden. Wir haben auch andere Arten von Instrumenten- und Umgebungsquellen für Rauschen überprüft und fanden nichts, was einen signifikanten Einfluss auf den Nachweis oder die Analyse von GW190412 haben könnte.

Eigenschaften von GW190412

Die einzelnen Massen der beiden Schwarzen Löcher in GW190412 stimmten mit den Beobachtungen früherer Beobachtungsläufe überein - ein Schwarzes Loch hatte etwa 30-mal so viel Masse wie die Sonne und das andere etwa 8-mal so viel Masse wie die Sonne. Das Massenverhältnis von GW190412, definiert als das Verhältnis der leichteren Masse des Schwarzen Lochs und der schwereren Masse des Schwarzen Lochs, unterscheidet sich jedoch von allen anderen zuvor entdeckten Verschmelzungen von Schwarzen Löchern. Während alle 10 Verschmelzungen von Schwarzen Löchern aus den ersten beiden Beobachtungsläufen darin übereinstimmten, dass beide Schwarzen Löcher in jedem System gleich groß waren, war das größere Schwarze Loch in GW190412 mehr als dreimal so groß wie das kleinere Schwarze Loch.

Die ungleichen Massen von GW190412 führen zu einer Asymmetrie der Gravitationswellenstrahlung. Dies hilft uns bestimmte Parameter des Systems besser abzuleiten. Wir stellen fest, dass der effektive Drehmoment (Spin) positiv war. Dies sagt uns, dass sich mindestens eines der Schwarzen Löcher mit einer der Umlaufbahn ähnlichen Orientierung drehte während sich die beiden Schwarzen Löcher gegenseitig umkreisten. Insbesondere aufgrund der ungleichen Massen von GW190412 können wir zum ersten Mal den Spin des größeren Schwarzen Lochs Grenzen setzen. Wir stellen fest, dass es sich mit etwa 40% des durch die allgemeine Relativitätstheorie zulässigen maximalen Spins drehte. Das für GW190412 abgeleitete effektive Spin- und Massenverhältnis ist in Abbildung 2 dargestellt. Wir sehen auch geringe Anzeichen dafür, dass das System eine Präzessionsbewegung durchführt. Die Auswirkungen der Präzession sind jedoch nicht stark genug, um es mit Sicherheit zu behaupten. Darüber hinaus tragen die ungleichen Massen dazu bei, eine Uneindeutigkeit zwischen dem Abstand und der Neigung des Systems zu beseitigen, wodurch beide Parameter besser gemessen werden können. GW190412 trat fast 2,5 Millionen Lichtjahre von der Erde entfernt auf!

Das Summen von Schwingungen höherer Ordnung

Die einzigartigen Eigenschaften von GW190412 ermöglichen uns auch die Beobachtung einer grundlegenden Eigenschaft von Gravitationswellen. Beginnend mit der Pionierarbeit von Einstein und später

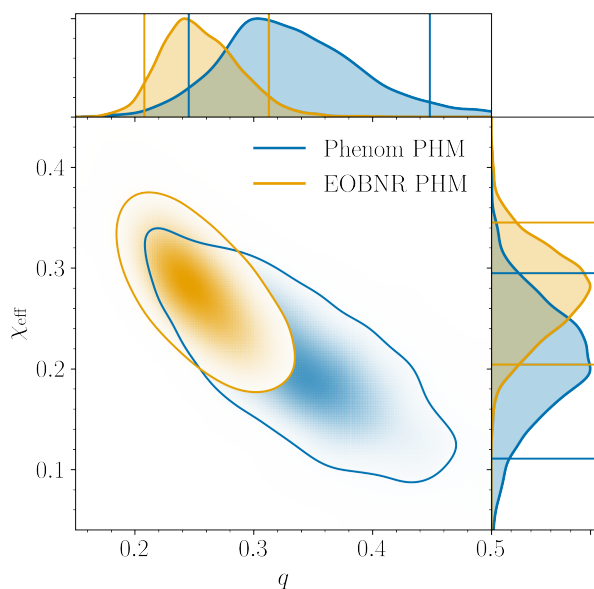


Abbildung 2: Das abgeleitete Massenverhältnis (q) und der effektive Spin χ_{eff} von GW190412. Die orangefarbenen und blauen Konturen zeigen die Verteilungen der Parameter, die unter Verwendung von zwei verschiedenen Wellenformmodellen wiederhergestellt wurden, die leicht unterschiedliche Näherungen für die Modellierung des exakten allgemein-relativistischen Signals vornehmen.

verfeinert von Newman, Penrose, Thorne und vielen anderen, wurde gezeigt, dass die Gravitationsstrahlung von kompakten Doppelsystemen überwiegend quadrupolar sind. Diese quadrupolare Strahlung kann als der Hauptklang angesehen werden, der beim Zupfen einer Saite auf einer Gitarre zu hören ist. Wie bei Musikinstrumenten wird jedoch vorausgesagt, dass die Gravitationsstrahlung auch mit höheren Oberwellen erklingen. Diese höheren Harmonischen oder höheren Multipole sind außerordentlich schwer aus einem Signal zu erkennen, besonders wenn die Massen der Schwarzen Löcher annähernd gleich sind. Die asymmetrischen Massen von GW190412 ermöglichen es uns, dass diese fast unbemerkten Signale in der Gravitationswellenstrahlung besser erkannt werden. Wir stellen fest, dass die Daten die Hypothese um einen Faktor von mehr als 1000: 1 stützen, dass das Signal höhere Harmonische enthält. In Zukunft könnte die relative Intensität höherer Multipole dazu beitragen, die Eigenschaften der Verschmelzung von Schwarzen Löchern besser zu verstehen.

Eine Reihe von Tests wurde durchgeführt, um festzustellen ob GW190412 mit der allgemeinen Relativitätstheorie übereinstimmt. Wir fanden keine Unstimmigkeiten mit der allgemeinen Relativitätstheorie und fügen einen weiteren Punkt zur Bestätigung von Einsteins Gravitationstheorie hinzu.

Bildung eines Doppelsystems Schwarzer Löcher mit ungleicher Masse

Jeder Beobachtungslauf des Advanced LIGO and Virgo-Netzwerks hat neue und aufregende Einblicke in die bisher entdeckten kompakten Doppelsysteme gebracht. GW190412 ist das erste Doppelsystem Schwarzer Löcher mit definitiv ungleichen Massen und liefert wichtige Daten für unser Verständnis der Bestandeseigenschaften von Doppelsystemen Schwarzer Löcher. Die Beobachtung dieses einzelnen Ereignisses zeigt, dass Systeme Schwarzer Löcher mit ungleichen Massen relativ häufig sind und dass wir in Zukunft mit viel mehr solcher Systeme rechnen sollten.

Basierend auf der detaillierten Physik der Sternentwicklung haben Astronomen Modelle erstellt, wie sich Doppelsysteme Schwarzer Löcher im Universum bilden und welche Massen und andere Eigenschaften erwartet werden. Obwohl die meisten Modelle vorhersagen, dass Doppelsysteme mit nahezu gleichen Massen häufiger vorkommen sollten, sagen viele auch eine beträchtliche Anzahl von Systemen, wie GW190412, mit deutlich ungleichen Massen voraus. Es wird typischerweise vorausgesagt, dass sich solche Systeme mindestens zehnmals seltener bilden als ihre Gegenstücke mit gleicher Masse. Die Beobachtung von GW190412 mit seinem scheinbar extremen Massenverhältnis ist jedoch nicht unerwartet, da wir inzwischen weit über 10 Ereignisse entdeckt haben. Während wir unsere Empfindlichkeit gegenüber dem Gravitationswellenuniversum weiter erhöhen und ebenfalls einen schnell wachsenden Katalog von Verschmelzungen aus kompakter Doppelsystemen erstellen, erwarten wir viel mehr Systeme, die unser Verständnis der Sternentwicklung, der Bildung kompakter Doppelsysteme und der fundamentalen Physik verbessern.

Weiterführende Informationen

- Unsere Webseiten (auf Englisch): www.ligo.org und www.virgo-gw.eu
- Sie können einen kostenlosen Vorabdruck des vollständigen wissenschaftlichen Artikels hier oder auf arXiv.org lesen.
- Es gibt auch eine Infographik und ein Informationsblatt für GW190412.

Glossar

- **Schwarzes Loch:** Ein Objekt, das so kompakt ist, dass nicht einmal Licht seiner Anziehungskraft entkommen kann.
- **Kompaktes Doppelsystem:** Ein System aus zwei kompakten Stern-Resten, z.B. Neutronensterne oder Schwarze Löcher.
- **Effektiver Spin:** Der am besten gemessene Parameter, der die Spininformationen in einem Gravitationswellensignal entschlüsselt. Formal handelt es sich um eine massengewichtete Projektion des individuellen Spins des Schwarzen Lochs in Richtung der Umlaufbahn der beiden Schwarzen Löcher.
- **Allgemeine Relativitätstheorie:** Die 1915 von Albert Einstein vorgeschlagene Gravitationstheorie. In dieser Theorie ist der Raum wie ein formbares Gewebe, das sich in Gegenwart von Materie und

Energie biegt, und Objekte folgen Umlaufbahnen durch diesen gekrümmten Raum.

- **Höhere Multipole:** Die Gravitationswellenstrahlung kann als Reihenentwicklung von „sphärischen Harmonischen (Kugelflächenfunktionen)“ beschrieben werden. Höhere Multipole sind Beiträge zu dieser Entwicklung, die über die dominanten Quadrupol-Terme hinausgehen.
- **Neigung:** Die Neigung der umkreisenden Schwarzen Löcher in Bezug auf die Erde.
- **Angepasste Filterung:** Eine Technik zum Erkennen von Signalen, die in verrauschten Daten vergraben sind. Vorlagen von Gravitationswellenformen, die aus der allgemeinen Relativitätstheorie berechnet wurden, werden über die Daten gescannt und 'klingeln', wenn übereinstimmende Muster in den Daten gefunden werden.
- **Präzession:** Aus der Erhaltung des Drehimpulses folgt, dass wenn sich Schwarze Löcher in eine andere Richtung als die Umlaufbahn der Doppelsystems drehen, dreht sich die Ebene der Umlaufbahn in die Richtung des gesamten Drehimpulses („Präzession“).
- **Quadrupol:** Der stärkste Multipol der Gravitationswellenstrahlung aus einem kompakten Doppelsystem. Wenn man diese Wellen als „Klang der Raumzeit“ betrachtet, ist die Quadrupolstrahlung der Grundton. Der Name bezieht sich auf das Strahlungsmuster in die verschiedenen Richtungen: Zum Vergleich sendet eine einfache Funkantenne einen Dipol als stärkste Strahlung aus.
- **Spektrogramm:** Eine Zeit-Frequenz-Energie-Darstellung einer Zeitserie von Daten. Die Stärke der einzelnen Frequenzen wird in unterschiedlichen Farben angezeigt.
- **Wellenform:** Ein theoretisches Gravitationswellensignal, das unter Verwendung von Näherungen von Einstein's allgemeiner Relativitätstheorie erzeugt wird.