



LIGO
Scientific
Collaboration



GWTC-1: Ein neuer Katalog von Gravitationswellenereignissen

Wir präsentieren einen neuen Katalog (GWTC-1 oder „Gravitational-Wave Transient Catalog 1“ genannt) von Gravitationswellenereignissen, die während des ersten und zweiten Beobachtungslaufs des weltweiten Netzwerks der Gravitationswellen-Detektoren der zweiten Generation entdeckt wurden.

Unser Katalog enthält vier neue Verschmelzungen Schwarzer Löcher, die bisher nicht veröffentlicht wurden – darunter ein neuer „Dreifachnachweis“, also ein Signal, das am 18. August 2017 sowohl von den LIGO-Detektoren als auch vom Virgo-Detektor beobachtet wurde. Für dieses Ereignis wurde die Position der beiden Schwarzen Löcher, die sich 2,5 Milliarden Lichtjahre von der Erde entfernt befanden, mit einer Genauigkeit von 39 Quadratgrad am Himmel bestimmt – genauer als bei jeder anderen bisher beobachteten Verschmelzung Schwarzer Löcher.

Wir haben außerdem die Eigenschaften der Quellen von allen elf bestätigten Gravitationswellenereignissen in unserem Katalog besser als bisher bestimmt. Dabei handelt es sich um insgesamt zehn Verschmelzungen Schwarzer Löcher und bisher eine Verschmelzung von Neutronensternen. Außerdem stellen wir eine Liste von „marginalen“ Kandidatenereignissen bereit, bei denen der Gravitationswellennachweis nicht statistisch sicher bestätigt werden konnte. Schließlich aktualisieren wir unsere Schätzungen über die Häufigkeit, mit der diese Verschmelzungen im Universum stattfinden, und geben eine Obergrenze dafür an, wie oft Neutronensterne mit Schwarzen Löchern verschmelzen.

Für das aufstrebende Feld der Gravitationswellenastronomie beginnt nun eine aufregende neue Ära!

Die ersten beiden Beobachtungsläufe von Advanced LIGO und Advanced Virgo

In den letzten drei Jahren fanden die ersten beiden Beobachtungsläufe des Detektornetzwerks von Advanced LIGO und Advanced Virgo statt. Advanced LIGO führte seinen ersten Beobachtungslauf (O1) vom 12. September 2015 bis zum 19. Januar 2016 und seinen zweiten Lauf (O2) vom 30. November 2016 und 25. August 2017 durch.

Während O2, ab dem 1. August 2017, beobachtete Advanced Virgo erstmals gemeinsam mit den beiden Advanced-LIGO-Detektoren. Einige der wichtigsten Höhepunkte von O1 und O2 waren:

- GW150914: der erste Nachweis von Gravitationswellen von der Verschmelzung zweier Schwarzer Löcher, die mehr als eine Milliarde Lichtjahre entfernt sind;
- GW170814: das erste GW-Signal, das vom Drei-Detektor-Netzwerk nachgewiesen wurde, ebenfalls von der Verschmelzung zweier

Schwarzer Löcher;

- GW170817: das erste GW-Signal von der Verschmelzung eines Doppelneutronensterns (DNS) - und auch das erste GW-Ereignis, das zusätzlich von Dutzenden von Teleskopen im gesamten elektromagnetischen Spektrum beobachtet werden konnte.

Im Zeitraum zwischen O1 und O2 wurde die Empfindlichkeit beider LIGO-Instrumente verbessert und an LIGO Livingston (LLO) wurden auch während O2 weitere Verbesserungen vorgenommen. Infolgedessen stieg die „DNS-Reichweite“ von LLO (eine Zahl, die zur Beurteilung der Empfindlichkeit eines Detektors verwendet wird und ungefähr der durchschnittlichen Entfernung entspricht, bis zu der wir eine Verschmelzung von Neutronensternen entdecken können) von etwa 60 Mpc (1 Mpc = 1 Million Parsecs) während O1 auf 80 Mpc am Anfang von O2 und dann auf mehr als 100 Mpc am Ende des Laufs. Die DNS-Reichweite von LIGO Hanford (LHO) lag bei etwa 80 Mpc, als O1 endete, und wurde in O2 um durchschnittlich etwa 20 % er-

hört. Der Advanced-Virgo-Detektor baut auf dem Virgo-Detektor der ersten Generation auf, der 2011 seinen Betrieb aufgenommen hatte. Zu den wichtigsten Verbesserungen an Virgo gehören ein neues optisches Design mit einem größeren Laserstrahl und einer höheren „Finesse“ der Resonatoren, qualitativ hochwertigere Spiegel und optische Tische, die seismisch isoliert aufgehängt sind und im Vakuum betrieben werden. Die DNS-Reichweite von Advanced Virgo während O2 lag bei etwa 25 Mpc.

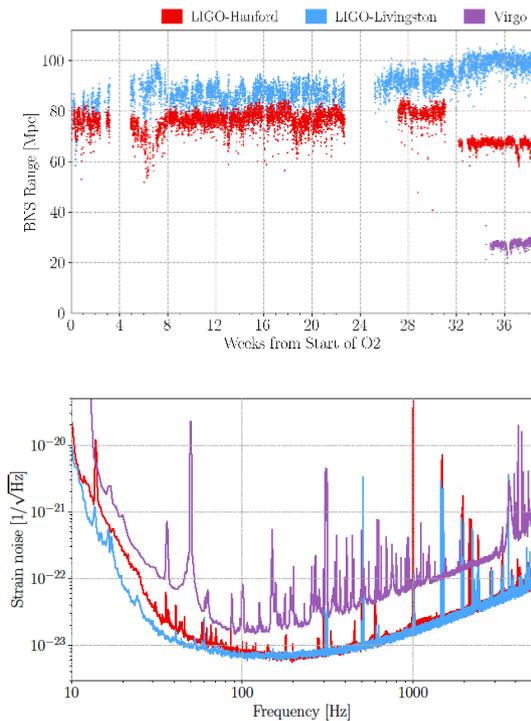


Abb. 1: Die obere Abbildung zeigt die DNS-Reichweite der LIGO- und Virgo-Detektoren während des O2-Beobachtungslaufs. Die Pause in der dritten Woche liegt an den Feiertagen am Jahresende 2016. In Woche 23 gab es eine zusätzliche Pause, um die Empfindlichkeit der Instrumente zu verbessern. Die Auswirkungen eines Erdbebens in Montana auf die Empfindlichkeit des LIGO-Hanford-Instruments sind in Woche 31 zu sehen. Virgo nahm ab Woche 34 an O2 teil. Die untere Abbildung zeigt die Empfindlichkeit jedes Detektors anhand der Amplitude des Detektorrauschens in Abhängigkeit von der Frequenz. Die Kurven stellen die jeweils höchste Empfindlichkeit jedes Detektors während O2 dar. (Nach Abbildung 1 unserer Veröffentlichung.)

Abbildung 1 zeigt die DNS-Reichweiten der drei Detektoren und die beste Empfindlichkeit, die sie während O2 erreichten. Die einzelnen LIGO-Detektoren nahmen während ca. 60% der Zeit Daten auf. Gemeinsam (koinzident) nahmen die LIGO-Instrumente während ca. 45% der Zeit Daten auf. Entfernen wir Intervalle, die von Instrumentenstörungen betroffen sind, beträgt der Zeitraum mit gemeinsamer Beobachtung 118 Tage. An 15 dieser Tage wurde gemeinsam mit Virgo beobachtet, der

etwa 80% seiner Beobachtungszeit Daten aufnahm.

Zwei unabhängige Suchalgorithmen namens „PyCBC“ und „GstLAL“ führten die Suche nach Gravitationswellensignalen von der Verschmelzung kompakter Doppelsysteme durch. Sie vergleichen die beobachteten Daten mit von der Allgemeinen Relativitätstheorie vorhergesagten theoretischen Signalen mittels einer Technik namens „matched filtering“ (angepasste Filter). Darüber hinaus kam ein weiterer generischer Suchalgorithmus namens „cWB“ zum Einsatz, der kein spezifisches, theoretisches Modell für das Gravitationswellensignal annimmt. Verbesserungen dieser Suchalgorithmen und eine Erweiterung der Suche bezüglich der Eigenschaften der gesuchten astrophysikalischen Objekte motivierten die Neu-Analyse der O1-Daten. Ebenso hat ein neues „Datenreinigungs“-Verfahren, um einen Teil des Detektorrauschens zu entfernen und die Empfindlichkeit zu verbessern, auch eine Neuanalyse der O2-Daten motiviert.

Jedes Suchverfahren erzeugt eine Liste von Kandidatenereignissen, die in Bezug auf ihre Signalstärke relativ zum Rauschen des Detektors – eine Größe, die als „Signal-Rausch-Verhältnis“ (englisch signal-to-noise ratio, SNR) bezeichnet wird – geordnet sind. Ebenso wird ihre statistische Signifikanz ermittelt, die wir mit der Fehlalarmrate (FAR) angeben, d.h. wie häufig man erwarten könnte, dass ein solches Kandidatenereignis rein zufällig eingetreten ist, allein aufgrund von Rauschen und Störungen in den Detektordaten, die ein tatsächliches Gravitationswellensignal nachahmen. Durch die Festlegung eines FAR-Schwellenwerts von weniger als einmal in 30 Tagen (etwa 12 Ereignisse pro Jahr) in mindestens einem der beiden Matched-Filtering-Algorithmen haben wir die Liste der Kandidatenereignisse reduziert und viele Kandidatensignale eliminiert, die sehr wahrscheinlich nur Ergebnisse des Detektorrauschens waren: Innerhalb der verbleibenden Kandidaten fanden wir 11 Ereignisse, die mit einer Wahrscheinlichkeit von mehr als 50% astrophysikalischen Ursprungs und kein reines Detektor-Rauschen sind. Diese Kandidaten sind mit dem Kürzel „GW“ gefolgt vom Datum der Messung (z.B. GW150914) gekennzeichnet. Die anderen Kandidaten gelten als „marginale“ Ereignisse, die wahrscheinlich nicht astrophysikalischen Ursprungs sind.

Einige alte Freunde – und einige neue Entdeckungen

Unsere drei Suchalgorithmen haben insgesamt elf Ereignisse sicher in den O1- und O2-Daten nachgewiesen. Sieben davon wurden bereits veröffentlicht: drei Verschmelzungen Schwarzer Löcher in O1 und drei weitere Verschmelzungen Schwarzer Löcher und eine Verschmelzung von zwei Neutronenster-

nen in O2. Eine der Verschmelzungen Schwarzer Löcher aus O1 wurde zuvor als LVT151012 (gemessen am 12. Oktober 2015) bezeichnet, da ihre erste Entdeckung, die 2016 publiziert wurde, eine zu geringe statistische Signifikanz aufwies, um sie zu diesem Zeitpunkt als GW-Entdeckung zu bezeichnen. Eine detaillierte Neuanalyse dieses Ereignisses hat nun jedoch gezeigt, dass es tatsächlich die Kriterien eines sicheren Nachweises erfüllt, und es wird nun in GW151012 umbenannt.

Darüber hinaus haben wir vier neue Gravitationswellenereignisse während O2 entdeckt: GW170729 (vom 29. Juli), GW170809 (9. August), GW170818 (18. August) und GW170823 (23. August), alle von verschmelzenden Schwarzen Löchern. GW170818 ist besonders erwähnenswert als der zweite Dreifachnachweis von verschmelzenden Schwarzen Löchern (nach GW170814), den sowohl die LIGO-Detektoren als auch Virgo beobachteten.

Wie wir die Eigenschaften unserer Gravitationswellenquellen bestimmen

Zwei Schwarze Löcher, die vor dem Verschmelzen auf nahezu kreisförmigen Bahnen umeinander laufen, lassen sich durch insgesamt 15 physikalische Größen oder Parameter beschreiben. Davon sind 8 Eigenschaften des Doppelsystems selbst, beispielsweise die Massen und Eigendrehungen (Spins) der beiden Objekte. Die 7 weiteren Parameter beschreiben, wie sich das System von der Erde aus beobachten lässt: die Position der Quelle am Himmel, ihr Abstand zu uns, wie stark die Bahnebene des Systems zu unserer Sichtlinie geneigt ist, der Polarisationswinkel der von der Quelle abgestrahlten Gravitationswellen, wann die Schwarzen Löcher verschmelzen und die Phase der Gravitationswellen zu diesem Zeitpunkt.

Da Neutronensterne aus Materie bestehen, hängen die von DNS-Systemen erzeugten Gravitationswellen noch von einem weiteren Parameter ab, der sogenannten „Gezeitenverformbarkeit“; diese misst, wie stark jeder Stern durch die Schwerkraft des anderen verformt wird. Messungen der Gezeitenverformbarkeit können uns etwas über die innere Struktur der Neutronensterne verraten.

Abbildung 2 zeigt unsere Abschätzungen der Komponentenmassen aller entdeckten Ereignisse; für jedes Ereignis stellt die Fläche den Wertebereich dar, in dem die Komponentenmassen mit 90-prozentiger Wahrscheinlichkeit liegen. Stets bezeichnen wir das Schwarze Loch mit der größeren Masse des Paares mit „1“. Es ist zu erkennen, dass die Einzelmassen einen weiten Bereich abdecken, von etwa dem Fünffachen bis zum Siebzigfachen der Masse unserer Sonne – was mit dem für stellare Schwarze Löcher erwarteten Bereich überein-

stimmt. Das schwerste System ist GW170729 und die beiden leichtesten Systeme sind GW151226 und GW170608.

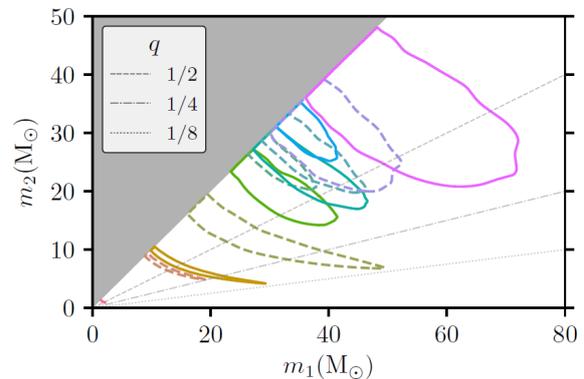


Abb. 2: Bereiche, in denen die geschätzten Komponentenmassen (Massen der einzelnen Objekte vor der Verschmelzung, in Sonnenmassen) unserer Gravitationswellennachweise mit 90-prozentiger Wahrscheinlichkeit lagen. Die geschätzten Massen der Neutronensterne in GW170817 sind in der linken unteren Ecke des Diagramms dargestellt. Alle anderen Ereignisse sind Verschmelzungen von zwei Schwarzen Löchern. Es ist zu erkennen, dass die Einzelmassen einen weiten Bereich abdecken, von etwa dem Fünffachen bis zum Siebzigfachen der Masse der Sonne. Stets bezeichnen wir das Objekt mit der größeren Masse des Paares mit „1“. (Nach Abbildung 4 unserer Veröffentlichung.)

Das schon lange vor der Verschmelzung erzeugte Gravitationswellensignal, das als „inspiral“ bezeichnet wird, hängt hauptsächlich von einer besonderen mathematischen Kombination der einzelnen Massen ab, der sogenannten „Chirpmasse“. Dieser Parameter lässt sich für Systeme mit geringerer Masse mit höherer Genauigkeit bestimmen. Andere wichtige Parameter, wie das Verhältnis zwischen den Komponentenmassen und der „effektive ausgerichtete Spin“ (der sich auf eine bestimmte Kombination der Spins der einzelnen Komponenten vor der Verschmelzung bezieht), sind schwieriger genau zu messen, da unterschiedliche Werte von mehreren dieser Parameter sehr ähnliche Auswirkungen auf das vorhergesagte Gravitationswellensignal haben.

Wir können dies beispielsweise in Abbildung 3 sehen: Für alle Ereignisse ist die Verteilung des effektiven Spins um Null zentriert, außer für GW170729 und GW151226, wo wir einen effektiven Spin von Null mit mehr als 90 % statistischer Sicherheit ausschließen können. Präzisere Messungen der Spins und Massen werden uns in Zukunft einen besseren Einblick in verschiedene Szenarien geben, wie solche Doppelsysteme entstehen und sich entwickeln. Derzeit ist es mit der aktuellen Detektorempfindlichkeit aber noch sehr schwierig, die Eigendrehungen einzelner Schwarzer Löcher zu messen.

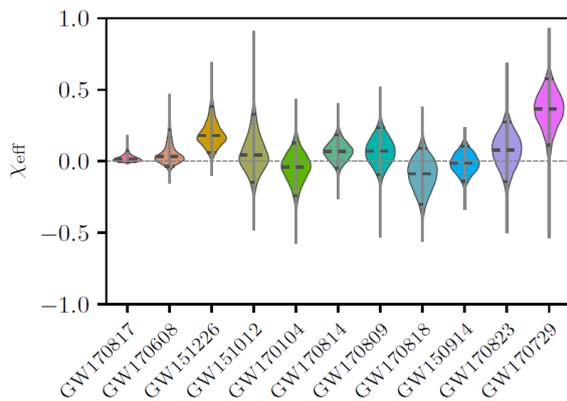


Abb. 3: Geschätzte Werte des effektiven ausgerichteten Spins für alle Gravitationswelleneignisse. Wir können sehen, dass in allen Fällen unsere Schätzung dieser Größe um Null zentriert ist, außer bei GW170729 und GW151226, wo wir einen effektiven Spin von Null mit mehr als 90 % statistischer Sicherheit ausschließen können. (Nach Abbildung 5 unserer Veröffentlichung.)

Weitere wichtige Größen, die sich aus unseren Gravitationswellensignalen ableiten lassen, sind die Masse und Eigendrehung des nach der Verschmelzung entstandenen Objekts, die in Gravitationswellen abgestrahlte Energie und die entsprechende Spitzen-„Leuchtkraft“ in Gravitationswellen. Wir haben festgestellt, dass einige Prozent der Gesamtmasse des Doppelsystems in Form von Gravitationswellen abgestrahlt werden. Je größer die Gesamtmasse, desto größer ist der Betrag der abgestrahlten Energie. So entspricht beispielsweise für GW170729, das bisher schwerste System, die abgestrahlte Energie fast fünf Sonnenmassen und die Spitzenleuchtkraft mehr als $4 \cdot 10^{56}$ erg/s – oder etwa 50-mal mehr als die Strahlungsleistung aller Sterne im gesamten Universum!

Die Amplitude (Stärke) des von uns gemessenen Signals ist umgekehrt proportional zur Entfernung der Quelle (genauer gesagt gilt dies für ein bestimmtes Entfernungsmaß, die „Leuchtkraftentfernung“), so dass wir diese Entfernung abschätzen können. Unsere Schätzungen bergen zwar eine erhebliche Unsicherheit, insbesondere für die weiter entfernten Systeme, aber es ist klar, dass wir Ereignisse beobachtet haben, die „vor langer Zeit in einer Galaxie weit, weit entfernt“ passierten.

Von den zehn Doppelsystemen Schwarzer Löcher in unserem Katalog haben sechs geschätzte Entfernungen von etwa einem Gigaparsec (1 Gpc = 1 Milliarde Parsec) oder mehr. Die am weitesten entfernte Quelle (die auch die massereichste war) ist GW170729, in einer Entfernung von 2,76 Gpc oder etwa 9 Milliarden Lichtjahren, während die nächste Quelle GW170608 ist, nur 0,32 Gpc (oder etwa 1 Milliarde Lichtjahre) entfernt. Andererseits

liegt das DNS-System GW170817 relativ gesehen vor unserer kosmischen Haustür, in einer Entfernung von nur 0,04 Gpc oder 130 Millionen Lichtjahren.

Die Bedeutung des weltweiten Netzwerks

Wenn ein GW-Signal die Erde erreicht, kommt es an jedem Detektor zu leicht unterschiedlicher Zeit an. Diese beobachteten Ankunftszeiten und auch die Amplitude des an jedem Detektor gemessenen Signals ermöglichen es uns, die Richtung am Himmel zu bestimmen, aus der das Signal kam. Zwei Detektoren können die Richtung dabei nur darauf einschränken, irgendwo auf einem Stück eines Rings am Himmel zu liegen. Mit einem dritten Detektor im Netzwerk können wir die Himmelsposition viel genauer bestimmen - und so wichtige Informationen liefern, um Astronom*innen zu informieren, die diesen Bereich des Himmels mit Teleskopen über das gesamte elektromagnetische Spektrum (optisch oder in anderen Wellenlängen) durchsuchen können.

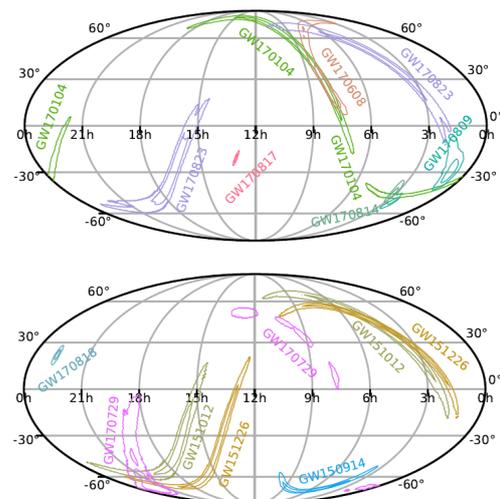


Abb. 4: Himmelskarten mit den Bereichen (50- und 90-prozentige statistische Sicherheit) für die gemessenen Himmelspositionen unserer Gravitationswellennachweise. Die deutlich bessere Himmelslokalisierung durch das Netzwerk von drei Detektoren (LLO, LHO und Virgo) ist z.B. bei GW170818 ersichtlich. (Nach Abbildung 8 unserer Veröffentlichung.)

Die Verbesserung dieser Lokalisierung am Himmel durch das globale Netzwerk ist in unseren Ergebnissen sehr deutlich zu erkennen und in Abbildung 4 zu sehen. Diese zeigt, wie gut die Himmelspositionen unserer Gravitationswelleneignisse bestimmt wurden. Das am schlechtesten lokalisierte Ereignis in unserem Katalog ist beispielsweise die Verschmelzung zweier Schwarzer Löcher

GW170823. Es wurde nur von den beiden LIGO-Detektoren beobachtet und der Ursprung ließ sich nur auf eine Himmelsfläche von mehr als 1600 Quadratgrad (oder etwa 5000-mal der Fläche des Vollmonds) eingrenzen. Andererseits wurde die Verschmelzung zweier Schwarzer Löcher GW170818, die eine ganz ähnliche Signalstärke wie GW170823 hatte, von allen drei Detektoren beobachtet und auf etwa 39 Quadratgrad am Himmel lokalisiert. Nur der Dreifachnachweis GW170817 wurde noch genauer lokalisiert – auf nur 16 Quadratgrad.

Schließlich zeigt Abbildung 5 (linke Spalte) die GW-Daten für alle Verschmelzungen Schwarzer Löcher als Spektrogramme: Dabei wird die Zeit als horizontale Achse und die GW-Frequenz als vertikale Achse verwendet, in Farbe wird die Stärke des Signals dargestellt. In vielen Fällen ist das charakteristische aufsteigende „Zirp“-Muster, das für ein solches verschmelzendes Doppelsystem erwartet wird, deutlich sichtbar. Die Abbildungen in der rechten Spalte zeigen für jede Verschmelzung die mit zwei verschiedenen Methoden rekonstruierten Signalwellenformen; diese stimmen unter Berücksichtigung der Messunsicherheiten gut überein.

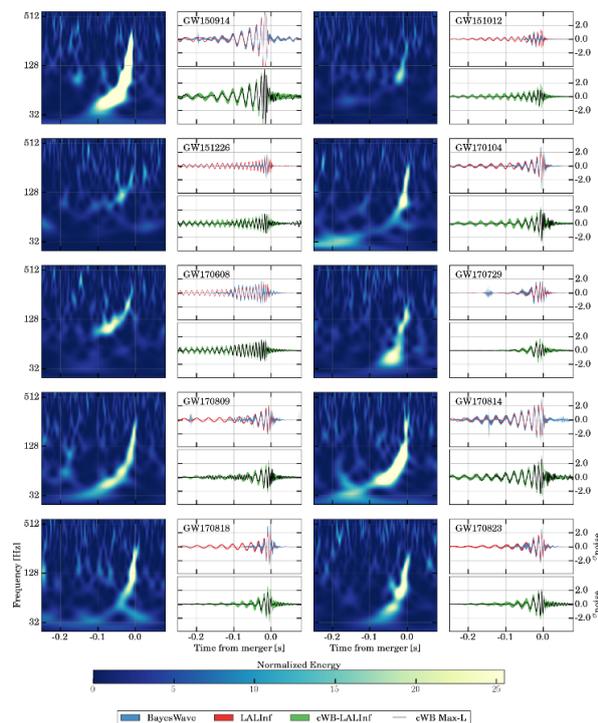


Abb. 5: Spektrogramme und rekonstruierte Signalwellenformen für die zehn Verschmelzungen Schwarzer Löcher, die in unserem Katalog aufgeführt sind. In der rechten Spalte stellen für jedes Signal die verschiedenen Farben zwei verschiedene Methoden zur Rekonstruktion der Wellenformen dar; diese stimmen gut überein, wenn wir die Messunsicherheiten berücksichtigen. (Nach Abbildung 10 unserer Veröffentlichung.)

Ein Blick in die Zukunft

Die in unserem Katalog vorgestellten GW-Nachweise haben es uns ermöglicht, unsere Schätzung der Rate, mit der Paare von Schwarzen Löchern und Neutronensternen „global“ im Universum verschmelzen, zu verbessern. Die Rate der Verschmelzungen von Neutronensternen mit Schwarzen Löchern konnten wir nach oben zu begrenzen, da wir in O1 und O2 kein solches Ereignis nachgewiesen haben. Weitere Details zu diesen Schätzungen und wie sie ermittelt wurden, finden sich in einem Begleitartikel zu unserer Katalog-Veröffentlichung. Obwohl unsere Schätzungen der Raten noch recht unsicher sind, werden sie sich weiter verbessern, da uns in Zukunft viele weitere GW-Nachweise gelingen werden.

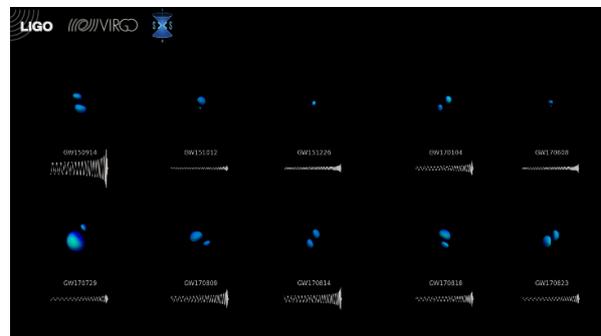


Abb. 6: Animation „Binary Black Hole Orrery“ (sozusagen ein „Planetarium“ Schwarzer Löcher): eine Visualisierung der verschmelzenden Schwarzen Löcher, die LIGO und Virgo bisher beobachtet haben. Dieses Video (hier klicken, um es direkt auf YouTube anzusehen) zeigt numerisch-relativistische Berechnungen des Ereignishorizonts der Schwarzen Löcher und der Gravitationswellen, die während der letzten Umrundungen und der Verschmelzung der Schwarzen Löcher abgestrahlt werden. Je eine dieser numerisch-relativistischen Berechnungen entspricht einer der Beobachtungen aus dem LIGO-Virgo-Katalog. Während die Ereignishorizonte der Schwarzen Löcher kollidieren und verschmelzen, werden die ausgesendeten Gravitationswellen lauter (größere Amplitude) und höher im Ton (höhere Frequenz). Dieser Film ist inspiriert vom „Kepler Orrery“ (Exoplanetarium des Kepler-Teleskops). (Quelle: Teresita Ramirez / Geoffrey Lovelace / SXS Collaboration / LIGO Virgo Collaboration).

Die Messempfindlichkeit von Advanced Virgo und Advanced LIGO wird derzeit weiter verbessert, und ein dritter Beobachtungslauf, O3 genannt, wird voraussichtlich im Frühjahr 2019 beginnen und ein ganzes Jahr dauern. Während dieses Laufs sollten Dutzende von Verschmelzungen beobachtet werden. Darüber hinaus wird erwartet, dass der japanische Detektor KAGRA gegen Ende von O3 in das Netzwerk aufgenommen wird – was das globale Netzwerk weiter ausbauen wird und damit unsere Fähigkeit, die Quellen am Himmel zu lokalisieren, weiter verbessern sollte.

Die Veröffentlichung von GWTC-1 ist ein Meilenstein der Gravitationswellenastronomie und ein wichtiges Sprungbrett in eine strahlende Zukunft.

Glossar

Schwarzes Loch: Ein Bereich der Raumzeit, in dem durch eine extrem kompakte Masse die Schwerkraft so intensiv ist, dass sie verhindert, dass irgendetwas, einschließlich Licht, austritt.

Neutronenstern: Ein extrem dichter Überrest aus dem Zusammenbruch eines massereichen Sterns.

Rauschen: Schwankungen des Gravitationswellen-Messsignals durch verschiedene Einflüsse aus der Umwelt und des Instruments selbst. Die Empfindlichkeit eines Gravitationswellendetektors ist durch dieses Rauschen begrenzt.

Beobachtungslauf: Eine festgelegte Zeitspanne, in der Gravitationswellendetektoren Daten aufnehmen.

Empfindlichkeit: Eine Beschreibung der Fähigkeit eines Detektors, ein Signal zu erkennen. Detektoren mit

geringerem Rauschen sind in der Lage, schwächere Signale zu erkennen und haben daher eine bessere (höhere) Empfindlichkeit.

Strain: Die relative Abstandsänderung zwischen zwei Messpunkten, verursacht durch die Verformung der Raumzeit durch eine Gravitationswelle.

Wellenform: Darstellung davon, wie sich ein Gravitationswellensignal mit der Zeit verändert.

Spin: Größe, die misst, wie schnell sich ein Objekt um sich selbst dreht (auch: Eigendrehimpuls).

Gravitationswellenpolarisation: Die geometrische Form des Dehnens und Quetschens der Raumzeit, die durch eine Gravitationswelle während ihrer Bewegung verursacht wird.

Gezeitenverformung: Verformung eines Objekts, die durch das Gravitationsfeld eines anderen Objekts hervorgerufen wird. So werden auf der Erde die Gezeiten durch Sonne und Mond verursacht und erzeugen eine Verformung der Oberfläche der Ozeane mit daraus resultierenden täglichen Schwankungen des Meeresspiegels.

Weiterführende Informationen

Unsere Webseiten: <http://www.ligo.org>, <http://www.virgo-gw.eu>

Der vollständige Artikel ist kostenlos online abrufbar.

Auch eine Begleitveröffentlichung über die Eigenschaften der Population von Doppelsystemen Schwarzer Löcher, die aus O1 und O2 abgeleitet wurden, ist kostenlos online abrufbar.

Daten zum Katalog können im Gravitations-Wellen-“Open Science Center“ erkundet und heruntergeladen werden.