

## Die aus O<sub>1</sub> und O<sub>2</sub> abgeleiteten Eigenschaften der Population von Paaren schwarzer Löcher

Jede einzelne Gravitationswellen-Entdeckung hat eine Welle der Begeisterung durch die Kollaboration geschickt – manche in der Tat mehr als andere. Aber es gibt wissenschaftliche Erkenntnisse, die sich nur durch die Kombination von Informationen aus mehreren Entdeckungen gewinnen lassen. Ein Doppelsystem aus zwei schwarzen Löchern, mit jeweils ein paar Dutzend Sonnenmassen, könnte ein statistischer Ausreißer sein, aber sieben oder acht von ihnen wirken wie ein Trend. GW<sub>150914</sub> war der erste Nachweis derartiger „schwerer stellarer schwarzer Löcher“ und war für viele eine Überraschung, da die schwarzen Löcher, die wir zuvor aus unserer eigenen galaktischen Nachbarschaft kannten, deutlich kleiner und leichter waren. Astrophysiker\*innen fanden jedoch bald Wege um zu erklären wie solche schwarzen Löcher entstehen können: Die ursprünglichen Sterne bildeten sich in einer Umgebung, die sich stark von der der Sonne unterscheidet. Die einzige Möglichkeit, solche Theorien zu überprüfen, besteht darin, eine größere und möglicherweise vielfältigere Population solcher Verschmelzungen schwarzer Löcher zu beobachten.

In den letzten Jahren hat das weltweite Netzwerk der Gravitationswellendetektoren, bestehend aus den LIGO- und Virgo-Interferometern, ihren ersten Katalog von Gravitationswellen-Beobachtungen zusammengestellt. Dieser neue Katalog (bekannt als GWTC-1) enthält Signale, die dieses Netzwerk während des ersten und des zweiten Beobachtungslaufs erfasste, und präsentiert zusätzlich zu den bereits veröffentlichten vier weitere Signale, die von Doppelsystemen schwarzer Löchern stammen, einschließlich des bisher massereichsten. LIGO und Virgo haben bislang insgesamt 10 Verschmelzungen von schwarzen Löchern entdeckt!

Die wachsende Zahl dieser schwarzen Löcher ist ein großer Schritt zum Verständnis der „unsichtbaren“ Population der schwarzen Löcher in unserem Universum. Wir fanden einige interessante Eigenschaften dieser Population, darunter einen scheinbaren Mangel an schwarzen Löchern, deren Einzelmassen vor der Verschmelzung größer als 50 Sonnenmassen waren, vorläufige Abschätzungen der Drehimpulse der schwarzen Löcher und Hinweise darauf, dass die Verschmelzungsrate der schwarzen Löchern zunimmt je früher sie im Universum entstanden sind.

### GWTC-1

In den ersten beiden Beobachtungsläufen der Advanced LIGO- und Advanced Virgo-Gravitationswellen-Detektoren wurden Daten über die Dauer von mehr als einem Jahr aufgenommen. Der erste Beobachtungslauf von Advanced LIGO (O<sub>1</sub>) fand von September 2015 bis Januar 2016 statt, der zweite Beobachtungslauf (O<sub>2</sub>) fand von November 2016 bis August 2017 statt. Während des zweiten Beobachtungslaufs beteiligte sich auch das Virgo-Interferometer an der Suche und ermöglichte damit das erste weltweite Netzwerk von Gravitationswellen-Detektoren.

Während dieser beiden Beobachtungsläufe wurden zehn Verschmelzungen zweier schwarzer Löcher (sowie eine Verschmelzung zweier Neutronensterne) nachgewiesen. Mit diesen Beobachtungen hat die LIGO/Virgo-Kollaboration ihren ersten Katalog von Gravitationswellensignalen erstellt. Doppelsysteme schwarzer Löcher sind die letzte Stufe in der Entwicklung massereicher Sterne. Sie ent-

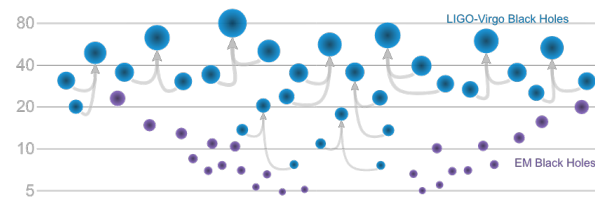


Abb. 1: Die Massen von bekannten schwarzen Löchern, die von LIGO und Virgo mittels Gravitationswellen (blau) gemessen wurden, bzw. die indirekt durch elektromagnetische Beobachtungen von Doppelsystemen mittels Röntgenstrahlung (violett) bestimmt wurden. Die Gesamtmasse der verschmolzenen schwarzen Löcher ist ebenfalls dargestellt. Abbildungsnachweis: LIGO-Virgo / Frank Elavsky / Northwestern.)

halten Informationen über ihre Vorläufer-Sternsysteme und den Umgebungen, in denen sie entstanden. Wie in Abbildung 1 zu sehen ist, weisen die von LIGO/Virgo entdeckten schwarzen Löcher bereits deutliche Unterschiede zu den schwarzen Löchern auf, deren Existenz indirekt durch elektromagnetische Beobachtungen abgeleitet wurde.

Was bedeuten die mit Gravitationswellen gemessenen Eigenschaften von Doppelsystemen schwarzer Löcher in Bezug auf die gesamte astrophysikalische Population dieser Objekte? Um eine neutrale Einschätzung über diese Population erhalten, müssen wir einige subtile Effekte berücksichtigen. Aufgrund des allgegenwärtigen Hintergrundrauschens in den Detektoren können wir die Massen und Drehimpulse von sich verschmelzenden schwarzen Löchern nicht genau messen. Wir können nur den wahrscheinlichsten „Bereich“ im Raum der möglichen Massen und Drehimpulse identifizieren, die die verschmelzende Objekte gehabt haben könnten – entsprechend den Fehlerbalken bei Einzelmessungen. Außerdem geben massereichere Verschmelzungen schwarzer Löcher im Allgemeinen stärkere Gravitationswellen-Signale ab, sodass sie sich in größeren Entfernungen als massearme Systeme beobachten lassen (die sogenannte Malmquist-Tendenz). Daher können wir massereichere Doppelsysteme in einem viel größeren Raumvolumen aufspüren. Dieser Auswahlereffekt kann teilweise erklären, dass unsere Beobachtungen Verschmelzungen schwarzer Löcher mit der 30- bis 40-fachen Sonnenmasse gegenüber denen mit 10- bis 15-facher Sonnenmasse bevorzugen.

Wir haben unsere Auswahlereffekte und Messunsicherheiten quantifiziert und haben geschätzt wie viel wahrscheinlicher es ist, verschiedene Arten von Verschmelzungen schwarzer Löcher zu finden. Mit diesem Wissen können wir unsere Beobachtungen in eine Schätzung der zugrundeliegenden Population übersetzen. Da wir so wenige Beobachtungen haben, müssen wir sachkundige Schätzungen anstellen, um die Lücken zu füllen – ein Prozess der als Bayes'sche Inferenz bezeichnet wird.

## Das Massenspektrum verschmelzender schwarzer Löcher

Die Gravitationswellen-Nachweise von verschmelzenden schwarzen Löchern hatten bereits tiefgreifende Auswirkungen auf die stellare Astrophysik. Die meisten von LIGO und Virgo entdeckten schwarzen Löcher sind massereicher als die bisher bekannte Population von schwarzen Löchern, deren Eigenschaften indirekt aus elektromagnetischen Beobachtungen von Röntgendoppelsternen abgeleitet wurden; dies sagte uns etwas darüber, wie und wo sich Paare schwerer schwarzer Löcher gebildet haben könnten. Mit mehr Ereignissen haben wir die Möglichkeit einen Schritt weiter zu gehen: können wir mit dem Wissen, dass massereiche stellare schwarze Löcher existieren, die relative Häufigkeit ausdrücken, mit der verschiedene Massen in der Population verschmelzender schwarzer Löcher auftreten?

Die „Standard“-Massenverteilung wird durch ein Potenzgesetz beschrieben: die Wahrscheinlichkeit, dass ein schwarzes Loch bei einer bestimmten Masse existiert, nimmt mit der Masse ab:  $p(m) \propto m^{-\alpha}$ , wobei  $\alpha$  der Exponent des Potenzgesetzes ist (d.h. wie stark die Wahrscheinlichkeit mit zunehmender Masse abnimmt). Mit Hilfe der Bayes'schen Inferenz und dem Katalog der gemessenen Massen können wir dann den wahren Wert des Parameters im Modell ( $\alpha$ ) ableiten. Beispielsweise lässt sich die Massenverteilung von schweren Sternen durch ein Potenzgesetz mit einem Exponenten von  $\alpha = 2,3$  beschreiben.

Wir untersuchen mehrere Modelle der Massenverteilung, die ein höheres Maß an Flexibilität als das Potenzgesetz mit einem Parameter haben, und komplexere astrophysikalische Vorhersagen erlauben. Im Gegensatz zur Annahme „festgelegter“ minimaler und maximaler Massen für das Potenzgesetz, erlauben wir beispielsweise, dass diese Parameter sich frei bewegen und ihre Werte aus den Daten bestimmt werden. Ein Modell (Modell C) mit einem höheren Grad an Komplexität wird durch eine Mischung aus Potenzgesetz und Gaußscher (Normal)verteilung beschrieben. Die Normalverteilung kann eine mögliche Ansammlung von schwarzen Löchern mit höheren Massen erfassen (beispielsweise durch eine pulsierende Paarinstabilitätssupernova). Die relative Verschmelzungsrate als Funktion der Masse des schwereren schwarzen Lochs im Paar, die aus dem Katalog der Verschmelzungen schwarzer Löcher abgeleitet wird, ist in Abbildung 2 für die drei verschiedenen Modelle dargestellt.

Nach allen drei Modellen gibt es fast keine verschmelzenden schwarzen Löcher mit Komponentenmassen von mehr als 45 Sonnenmassen. Verschmelzungen massereicher schwarzer Löcher lassen sich über weit größere kosmologische Entfernungen nachweisen; dies ist auch der Grund dafür, dass die meisten unserer Entdeckungen massereicher sind als die schwarzen Löcher, die mit Röntgenstrahlung entdeckt wurden. Das bedeutet aber auch, dass wir verschmelzende Löcher mit Massen im Bereich von 45 bis 100 Sonnenmassen sicher nachgewiesen hätten, wenn diese existieren. Die Komponentenmassen

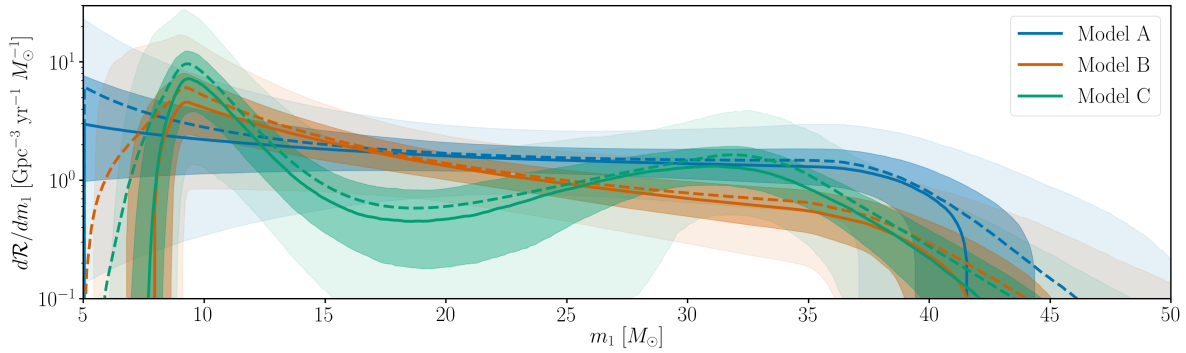


Abb. 2: Die Anzahl der schwarzen Löcher einer bestimmten Masse, die an Verschmelzungen über ein gegebenes Raumvolumen beteiligt sind für verschiedene Modellannahmen. Modell A hat die geringste Komplexität und Modell C ist am komplexesten. Die durchgezogenen Linien, dunklen und hellen Schattierungen zeigen den Mittelwert, bzw. die Konfidenzintervalle von 50 % und 90 % an. Die gestrichelte Linie zeigt die *a-posteriori*-Verteilung der Population: die beste Vorhersage für die Masse eines typischen Mitglieds der Population. (Nach Abbildung 1 der Veröffentlichung.)

von allen zehn unserer entdeckten schwarzen Löcher sind konsistent damit, dass sie weniger als 45 Sonnenmassen betragen. Daher sind wir zuversichtlich, dass es nur sehr wenige verschmelzende schwarze Löcher mit massereicheren Komponenten geben muss. Dies passt gut zu Vorhersagen der Modellen von Supernova-Explosionen, die aufgrund eines bestimmten Supernova-Typs, der sogenannten (pulsierenden) Paarinstabilitätssupernova, eine Lücke im Massenspektrum der schwarzen Löcher von ca. 50 bis ca. 130 Sonnenmassen vorhersagt. Die drei Modelle stimmen ziemlich gut überein, aber das Modell, das eine zusätzliche Gaußsche Komponente bei höheren Massen zulässt, wird statistisch gegenüber den beiden anderen untersuchten Modellen leicht bevorzugt, was einen schwachen Hinweis dafür liefert, dass die Verteilung der Massen verschmelzender schwarzer Löcher von einem „echten“ Potenzgesetz abweicht.

## Drehimpuls-Verteilung

Gravitationswellen vom Verschmelzen kompakter Objekte geben auch Aufschluss darüber, wie sich die kompakten Objekte um ihre eigenen Achsen drehen – sowohl wie schnell sie sich drehen (Spin-Größe) als auch wie die Drehimpulse relativ zur Umlaufbahn des Doppelsystems geneigt sind (Spin-Neigung). Beide Messungen bieten einzigartige Informationen darüber, wie und wo sich die schwarzen Löcher gebildet haben. Messungen der Spin-Größe können beispielsweise zeigen, wie verschiedene Schichten innerhalb massereicher Sterne sich gegenseitig beeinflussen; Messungen der Spin-Neigung können dazu beitragen, die Stärke von Supernova-Explosionen, die schwarze Löcher bilden, zu bestimmen und ob sich ein Doppelsystem schwarzer Löcher als isoliertes Sternenpaar oder in einer Umgebung mit hoher Sterndichte, wie einem Kugelsternhaufen, durch dynamische Wechselwirkungen zwischen den Sternen gebildet hat.

Die im Katalog dargestellten Beobachtungen sprechen gegen hohe Spin-Größen, vor allem dann, wenn die Drehimpulse der einzelnen schwarzen Löcher in die gleiche Richtung zeigen wie der des Doppelsystems. Abbildung 3 zeigt die abgeleitete Verteilung der Spin-Größen unter Verwendung eines Modells, das annimmt, dass sie einer Beta-Verteilung folgen. Die Verteilung der Spin-Neigungen ist

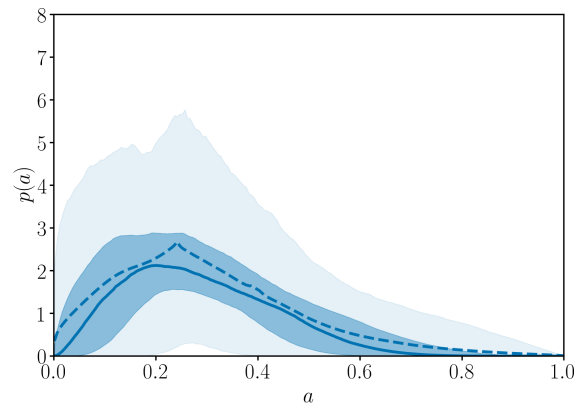


Abb. 3: Abgeleitete Verteilung der Spin-Größe für das in der Analyse verwendete parametrische Spinmodell in Einheiten, in denen 1 der maximal mögliche Drehimpuls ist, der durch die allgemeine Relativitätstheorie für ein schwarzes Loch möglich ist. Die durchgezogene Linie, die dunkle Schattierung und die helle Schattierung zeigen den Mittelwert, bzw. die Konfidenzintervalle für 50 % und 90 % Wahrscheinlichkeit. Die gestrichelte Linie zeigt die Verteilung der *a-posteriori*-Wahrscheinlichkeit. (Nach Abbildung 7 der Veröffentlichung.)

etwas weniger eingeschränkt (das liegt auch daran, dass kleine Spin-Größen es schwieriger machen die Richtung der Drehung zu bestimmen). Es lässt sich derzeit nicht endgültig sagen, ob die Daten auf ausgerichtete, isotrope oder gemischte Spin-Neigungen hindeuten.

## Veränderung der Verschmelzungshäufigkeit mit der Rotverschiebung

Aus dem Signalkatalog lässt sich auch die durchschnittliche Anzahl von Verschmelzungen schwarzer Löcher pro Zeit und Raumvolumen als Funktion der Rotverschiebung abschätzen:  $\mathcal{R}(z)$ . Eine naive Näherung wäre eine konstante Rate im mitbewegten Volumen, was bedeutet, dass jede Galaxie im Verlauf der Entwicklung des Universums eine annähernd konstante Zahl von Verschmelzungen pro Zeit beiträgt. Die Verschmelzungsraten von schwarzen Löchern hängen jedoch wahrscheinlich von anderen Faktoren ab, wie z.B. der Sternentstehungsrate als Funktion der Rotverschiebung, die über kosmologische Zeiträume nicht konstant ist. Es ist jedoch noch komplizierter, denn ob sich ein Signal bei einer gegebenen Rotverschiebung nachweisen lässt, hängt auch von den spezifischen (intrinsischen) Eigenschaften dieses Systems ab, beispielsweise davon, wie massereich es ist.

In Abbildung 4 sind Abschätzungen der Veränderung der Verschmelzungsrates in blau dargestellt.

Die rote und gelbe Linie zeigt Modelle, bei denen die Rate über kosmologische Zeiträume als konstant angenommen wird; dabei folgt die Massenverteilung entweder einem Potenzgesetz oder einer gleichmäßigen Verteilung des Logarithmus (flat-in-log). Wir können keinen Zusammenhang mit der Rotverschiebung erkennen, aber unsere Analyse zeigt eine Wahrscheinlichkeit von 88 % dafür, dass die Verschmelzungsrates mit der Rotverschiebung zunimmt. Dies bedeutet, dass im lokalen Universum wahrscheinlich mehr Verschmelzungen als bei höheren Rotverschiebungen (in größerer Entfernung) auftreten. Dies steht im Einklang mit der Sternentstehungsrate im Universum, die zu früheren Zeiten größer war und ein Maximum bei einer Rotverschiebung von etwa 2 erreichte.

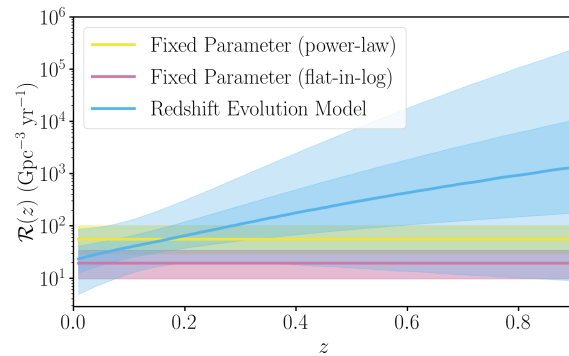


Abb. 4: Dieses Diagramm zeigt die Einschränkungen der Entwicklung der Verschmelzungsrates als Funktion der Rotverschiebung. In blau gibt die durchgezogene Linie die mittlere *a-posteriori*-Verschmelzungsrates, das dunkle und helle Band geben die Konfidenzintervalle von 50 % und 90 % Wahrscheinlichkeit an. Nach Abbildung 5 der Veröffentlichung.

## Schlussfolgerungen & Zukunftsaussichten

Wenn der Katalog der beobachteten Verschmelzungen schwarzer Löcher in den kommenden Beobachtungsläufen anwächst, werden die Unsicherheiten der Parameter in den Populationsmodellen kleiner werden, und wir werden erfahren, welche Modelle von den Daten bevorzugt werden. Neben vielen anderen astrophysikalischen Problemen kann eine solche Schlussfolgerung zu einem besseren Verständnis davon führen, wie sich schwarze Löcher aus Supernovae bilden und welche Wechselwirkungen zwischen zwei massereichen Sterne wirken. Außerdem lassen sich so die spezifischen Dynamik dichter Sternhaufen und die Entstehungsgeschichte von schwarzen Löchern über kosmologische Zeiträume beleuchten.

## Glossar

**Bayes'sche Inferenz:** Eine Methode der statistischen Inferenz, die auf der Aktualisierung der Wahrscheinlichkeit für eine Hypothese beruht, sobald mehr Beweise vorliegen.

**Beobachtungszeitraum:** Ein Beobachtungszeitraum, in dem Gravitationswellen-Detektoren Daten aufnehmen.

**Malmquist-Tendenz:** Das bevorzugte Entdecken von hellen Objekten.

**Mitbewegtes Volumen:** Ein Raumvolumen, das so definiert ist, dass es sich mit in kosmologischen Zeiträumen mit der gleichen Geschwindigkeit ausdehnt, wie sich Strukturen im Universum voneinander entfernen: Ein festes Volumen enthält im Durchschnitt eine konstante Anzahl von Galaxien über die Zeit.

**(Pulsierende) Paarinstabilitätssupernova:** Eine Typ von Supernova, der auftritt, wenn der aus der Erzeugung von Elektron-Positron-Paaren entstehende Strahlungsdruck im Inneren eines Sterns erschöpft ist.

**Röntgendoppelsystem:** Das kompaktere Objekt eines Doppelsystems nimmt Materie vom Begleitstern auf. Die aufgenommene Materie erwärmt sich beim Einströmen auf das kompakte Objekt und strahlt u.a. im Röntgenbereich

**Rotverschiebung:** Effekt bei dem die von einem entfernten Beobachter gemessene Wellenlänge, länger ist als die abgestrahlte Wellenlänge. Wenn Licht über kosmologische Entfernungen reist, ist die Rotverschiebung hauptsächlich auf die Expansion des Universums zurückzuführen und kann daher zum Messen von Entfernungen weit entfernter Objekte verwendet werden.

**Schwarzes Loch:** Eine Region der Raumzeit, verursacht durch eine äußerst kompakte Masse, deren Schwerkraft so groß ist, dass nichts, einschließlich Licht, sie verlassen kann.

### Weiterführende Informationen

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

Der vollständige Artikel ist kostenlos online abrufbar.

Lesen Sie die Katalog-Veröffentlichung hier.

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