

## GWTC-3, ein dritter Katalog von Gravitationswellennachweisen

GWTC-3 ist der dritte Gravitationswellen-Katalog der Detektoren LIGO, Virgo und KAGRA. GWTC-3 erweitert die bisherigen Kataloge mit Gravitationswellenbeobachtungen aus dem zweiten Teil des **Beobachtungslaufs 3** (mit dem kreativen Spitznamen O3b), der von November 2019 bis März 2020 dauerte. Insgesamt ist GWTC-3 die größte Sammlung von Gravitationswellenbeobachtungen überhaupt.

Welche Gravitationswellenkataloge gab es bisher?

- GWTC-1: Enthält insgesamt 11 Ereignisse aus dem ersten und zweiten Beobachtungslauf (O1 und O2).
- GWTC-2: fügte 39 weitere Ereignisse hinzu und enthält damit insgesamt 50.
- GWTC/2.1: Verbesserte die O3a-Analyse und fand acht weitere Kandidaten. Stufte aber auch drei der GWTC-2-Ereignisse neu ein, da ihre **Wahrscheinlichkeit, dass es sich um echte astrophysikalische Signale handelt**, auf weniger als 50 % sank (siehe den Abschnitt „Nachweis von Gravitationswellen“). Damit stieg die Gesamtzahl im Katalog auf 55.
- GWTC-3 (diese Veröffentlichung): Fügt weitere 35 Gravitationswellen-Ereignisse aus O3b hinzu. Dadurch erhöht sich die Gesamtzahl der bisher beobachteten Ereignisse auf satte 90. (Abbildung 4 veranschaulicht die stetig wachsende Zahl nachgewiesener Ereignisse).

Nachdem LIGO und Virgo O3b abgeschlossen hatten, führte KAGRA einen zweiwöchigen Beobachtungslauf mit dem GEO600-Detektor in Deutschland durch. Dieser Beobachtungslauf heißt O3GK. Es gab keine Entdeckungen, aber es war spannend, die ersten Beobachtungsdaten von KAGRA zu erhalten.

Alle bisher beobachteten Gravitationswellen stammen von verschmelzenden **Doppelsystemen, die aus verschiedenen Kombinationen von Schwarzen Löchern und Neutronensternen** bestehen. Wir, die Wissenschaftler:innen der LIGO-Virgo-KAGRA Kollaborationen, bezeichnen diese als **kompakte Objekte** und halten sie für die Überreste massereicher Sterne. Da unsere Detektoren immer empfindlicher werden, entdecken wir auch immer schneller neue Ereignisse. Seit unserem ersten Nachweis einer Gravitationswelle im Jahr 2015 sind wir sehr weit gekommen.

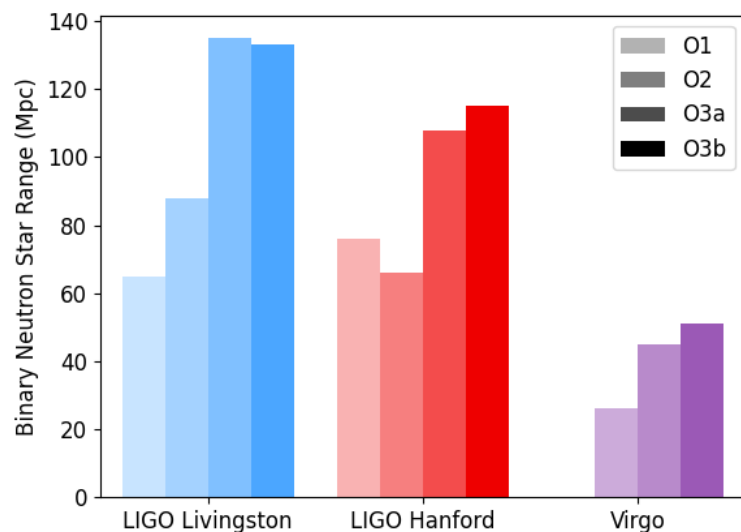


Abb. 1: Der Median der Reichweite, in der die Detektoren verschmelzende Doppelsysteme von Neutronensternen während des zweiten Beobachtungslaufs (O2), des ersten Teils von Beobachtungslauf 3 (O3a) und des zweiten Teils von Beobachtungslauf 3 (O3b) aufspüren konnten. Die Entfernung ist in Megaparsec angegeben. Bildnachweis: LIGO-Virgo-KAGRA-Kollaboration/Hannah Middleton/OzGrav.

In diesem Übersichtsdokument haben wir die Höhepunkte von GWTC-3 zusammengestellt und geben einen Ausblick auf geplante Beobachtungsläufe. Sie erfahren dabei, wie wir unsere Daten sammeln, wie wir darin Gravitationswellen nachweisen und wie wir daraus die Eigenschaften der Verschmelzungsergebnisse ermitteln.

## Gravitationswellendetektoren

Detektor-Upgrades, höhere Datenqualität, bessere Analysetechniken: Im Laufe der Jahre sind LIGO und Virgo immer empfindlicher geworden. Ein Maß für die Empfindlichkeit ist die Reichweite, in der ein Observatorium eine typische Verschmelzung zweier **Neutronensterne** nachweisen kann. Je größer die Reichweite, desto weiter entfernte Signale können wir nachweisen und desto mehr Entdeckungen sind zu erwarten. Den dritten Beobachtungslauf (O3) haben wir in zwei Hälften aufgeteilt (O3a und O3b), getrennt von einem Monat Pause im Oktober 2019. Allerdings hatte nur der Detektor Pause. Wir haben derweil vielfach aufgerüstet und repariert: Die Spiegel von LIGO in Livingston gereinigt, die Vakuumausrüstung von LIGO in Hanford ausgetauscht und den Laser von Virgo verstärkt.

Mit solchen Eingriffen und kontinuierlicher Wartung bleiben die Detektoren extrem empfindlich, oder werden sogar noch empfindlicher. Abbildung 1 zeigt, wie sich der **Median** der Detektorreichweite verändert hat, in der wir Doppelneutronensternsysteme nachweisen können. Zwischen O3a und O3b hat sich diese Reichweite bei Virgo um 13,3 % erhöht, bei LIGO Hanford um 6,5 % und bei LIGO Livingston (unserem empfindlichsten Detektor) ist er mit einem leichten Rückgang um 1,5 % in etwa gleich geblieben.

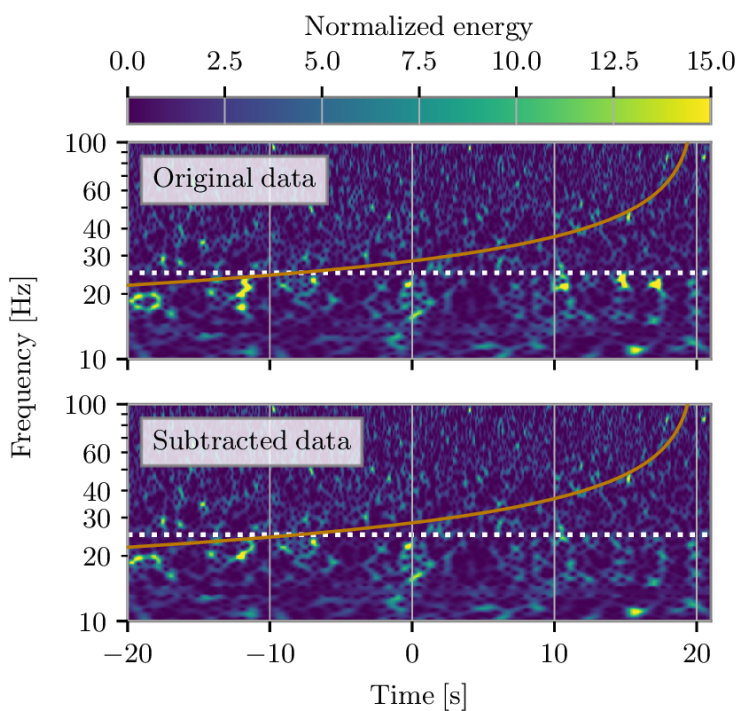


Abb. 2: (Abb. 15 aus unserer Veröffentlichung) Ein Beispiel für die Subtraktion von Störimpulsen (Glitches). Die Diagramme zeigen die Zeit-Frequenz-Daten für das Ereignis GW200115\_042309, und die Farbe zeigt die Energie in jedem Zeit-Frequenz-Intervall. Das obere Diagramm zeigt die unbehandelten Daten und das untere Diagramm die Ergebnisse nach der Subtraktion. Die geschätzte Signalspur wird durch die orangefarbene Linie dargestellt und ist von der Subtraktion der Glitches nicht betroffen.

licht. Aber manchmal bleibt ihr Ursprung auch rätselhaft.

Gelegentlich überlagern sich solche Glitches mit einem Gravitationswellensignal. In diesen Fällen können wir sie aus den Daten herausrechnen, wie in Abbildung 2 dargestellt. Nur durch diese Subtraktion von Glitches konnten wir beispielsweise unser erstes Signal eines Doppelneutronensterns, GW170817, analysieren. Und bei GWTC-3 mussten wir gleich bei 7 von 35 Ereignissen Glitches entfernen. Mehr über Glitches und wie Sie uns helfen können, sie zu verstehen erfahren Sie auf der Website unseres Bürgerwissenschaftsprojekts Gravity Spy.

## Gravitationswellen nachweisen

Im Verlauf von O3a und O3b machten wir stets sofort öffentlich, wenn wir potenzielle Kandidaten für

Die Rohdaten eines Gravitationswellendetektors stecken in der zeitlich veränderlichen Intensität des Laserlicht am Ausgang des Interferometers. Diese Rohdaten müssen wir anschließend sorgfältig kalibrieren, um die Stärke der Gravitationswellen bestimmen zu können. Wir drücken mit dem Strahlungsdruck von Laserlicht präzise auf die Spiegel und messen, wie sich das Signal am Ausgang des Interferometers verändert. Der erste Durchgang der Kalibrierung erfolgt nahezu in Echtzeit. Falls erforderlich, werden spätere Neukalibrierungen und die Subtraktion von lang anhaltenden Störsignalen eingesetzt, um die besten Daten zu erhalten. Diese wurden auch in dieser Untersuchung verwendet.

Nachdem wir die Daten kalibriert und Störquellen entfernt haben, folgt eine Qualitätsprüfung der Daten. Bei dieser Qualitätskontrolle der Daten von Verschmelzungsereignissen sind unser häufigstes Problem Glitches. So nennen wir kurzzeitige (Sekunden bis Minuten lange) Störimpulse in den Daten. Einige der Glitches können wir erklären, etwa durch Streu-

Gravitationswellen entdeckten. Die rasche Veröffentlichung ermöglicht es der Astronomiegemeinschaft, mit elektromagnetischen Teleskopen und Neutrinodetektoren nach **Multimessenger**-Signalen dieser Ereignisse zu suchen. Die Meldungen wurden in der Regel innerhalb weniger Minuten nach den Entdeckungen in O3b veröffentlicht. Eine spätere erneute Analyse der Gravitationswellendaten kann dazu führen, dass einige Ereignisse zurückgezogen und weitere Ereignisse entdeckt werden.

Die endgültige Analyse erscheint nun im Katalog GWTC-3. Da wir während des gesamten Beobachtungslaufs Kalibrierung, Datenqualität und Datenanalyse verbessern, kann die endgültige Analyse besser beurteilen, welche der Kandidaten interessant sind und welche nicht. Während O3b wurden 39 Kandidaten in Echtzeit veröffentlicht, von denen 18 die erneute Analyse überstanden haben und mit einer Echtheitswahrscheinlichkeit von mehr als 50 % im GWTC-3 erschienen sind. Weitere 17 Ereignisse werden zum ersten Mal in der GWTC-3-Analyse gemeldet und nicht als Echtzeitkandidaten veröffentlicht.

Wir verwenden zwei Arten von Analysen, um nach Kandidaten für Gravitationswellen zu suchen: Die Optimalfiltersuche und die minimal modellierte Suche. Bei der Optimalfiltersuche verwenden wir eine Auswahl von simulierten Signalen („templates“ oder Schablonen) und durchsuchen die Daten nach Ereignissen, die mit der Form der Schablonen und ihrem Zeitverlauf übereinstimmen. Bei der minimal modellierten Suche suchen wir nicht nach einem exakten Signaltyp, setzen aber voraus, dass dasselbe Signal in mehreren Detektoren auftritt.

Die Optimalfiltersuche ist in der Regel besser geeignet, um Signale von Doppelsystemen kompakter Objekte herauszufiltern (da wir wissen, wie diese aussehen sollten). Demgegenüber stellt der minimal modellierte Ansatz sicher, dass wir nichts übersehen, nur weil wir nicht die richtige Schablone haben. Abschließend berechnen wir wie wahrscheinlich es ist, ob auch zufälliges Rauschen wie das Signal des infrage stehenden Kandidaten aussehen könnte. Je besser das Signal dann zwischen den Detektoren übereinstimmt, desto sicherer können wir sein, dass es sich um ein echtes Signal handelt.

Im Katalog GWTC-3 führen wir alle Kandidaten auf, bei denen wir davon ausgehen, dass sie mit einer Wahrscheinlichkeit von mindestens 50 % real sind. Dabei stützen wir uns nicht nur auf unser Wissen, wie Rauschen in unseren Detektoren auftritt, sondern auch darauf, wie oft wir Gravitationswellensignale mit den Detektoren beobachten sollten. Da wir gerade erst anfangen, etwas über die Gesamtheit (Population) der verschmelzenden kompakten Objekte zu lernen, können diese Zahlen unsicher sein. Wenn wir in künftigen Beobachtungen mehr darüber erfahren haben, können wir die Kandidaten, bei denen wir uns derzeit weniger sicher sind, erneut überprüfen.

Zusätzlich enthält GWTC-3 eine Liste von schwächeren Signalen, die den Schwellenwert der Echtheitswahrscheinlichkeit von 50 % nicht überschreiten. Genau wie bei GWTC-2.1 enthält die diese Liste für GWTC-3 alle Kandidatenereignisse mit einer **Fehlalarmrate** von weniger als 2 pro Tag. Es gibt 1.048 Kandidaten, von denen wir annehmen, dass es sich bei den meisten um Rauschen handelt; dennoch kann diese Liste Astronom:innen bei der Identifizierung potenzieller Multimessenger-Ereignisse helfen.

## Eine Gravitationswelle benennen

Die Namen von Gravitationswellen geben das Datum und die Uhrzeit an, zu der die Signale in koordinierter Weltzeit (UTC) gemessen wurden. Frühere Ereignisnamen enthalten manchmal nur das Datum. Denn erst mit den verbesserten, empfindlicheren Detektoren können wir mehr als ein Ereignis pro Tag entdecken. Daher fügen wir, wie bei GWTC-2 und GWTC-2.1, den Namen nun die Zeit hinzu, um sie leichter unterscheiden zu können. Ein Beispiel: GW200208\_222617 wurde am 8. Februar 2020 um 22:26:17 UTC beobachtet.

## Die Quellen von Gravitationswellen erforschen

Unsere Gravitationswellenbeobachtungen enthalten Informationen über die Eigenschaften des Doppelsystems kompakter Objekte, das sie erzeugt hat. Diese Eigenschaften können intrinsisch oder extrinsisch sein. Intrinsische Eigenschaften beschreiben die Quelle selbst, beispielsweise die Massen und Drehimpulse der kompakten Objekte. Extrinsische Eigenschaften beschreiben, wie wir das Ereignis von der Erde aus beobachtet haben. Das umfasst die Position der Quelle am Himmel, ihre Entfernung von der Erde und die Ausrichtung der Ebene, in der die beiden kompakten Objekte umeinander kreisen.

Wir ermitteln die Eigenschaften zweier kompakter Objekte durch **Parameterschätzung**. Dabei handelt es sich um eine statistische Methode, bei der wir mögliche **Gravitationswellenformen** (mit unter-

schiedlichen Eigenschaften) mit den Beobachtungsdaten verglichen. Der Vergleich zeigt uns, welche Werte der Quelleneigenschaften mit den Daten übereinstimmen (unter der Annahme, dass ein echtes Gravitationswellensignal vorliegt). In unseren Ergebnissen wählen wir die zu 90%-Konfidenzintervalle aus diesen Bereichen aus. Wir sind uns also zu 90% sicher, dass die Eigenschaften des Doppelsystems innerhalb dieses Bereichs liegen.

Die Konturen in Abbildung 3 zeigen diese 90%-Bereiche für zwei Eigenschaften: die **Gesamtmasse** und das **Massenverhältnis**. Die Gesamtmasse gibt an, wie schwer das aus zwei kompakten Objekten bestehende System insgesamt war. Die Massen werden in Einheiten von Sonnenmassen  $M_{\odot}$  gemessen. Das Massenverhältnis sagt uns, wie asymmetrisch die Massen der beiden kompakten Objekte verteilt waren, die miteinander verschmolzen sind. Ein Massenverhältnis nahe bei 1 bedeutet, dass die beiden kompakten Objekte annähernd die gleiche Masse hatten.

Während wir die Eigenschaften der Population erforschen, lernen wir zugleich etwas über die Entstehung dieser Systeme. Wir können diese Beobachtungen auch nutzen, um Albert Einsteins allgemeine Relativitätstheorie auf den Prüfstand zu stellen und sogar die Expansionsrate des Universums zu messen.

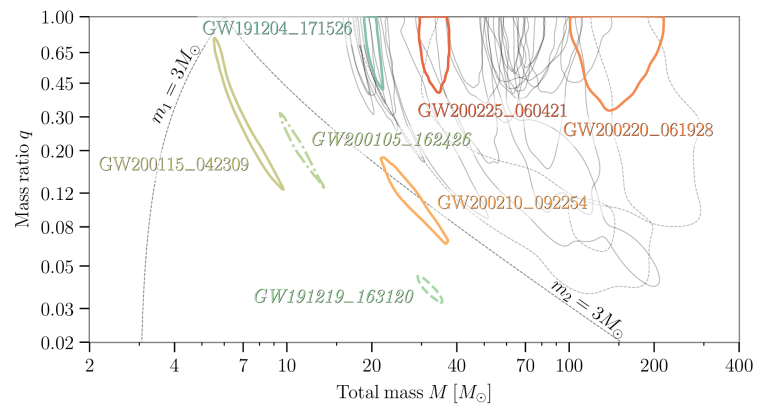


Abb. 3: (Abb. 8 aus unserer Veröffentlichung) Schätzungen der Gesamtmasse ( $M$ ) und des Massenverhältnisses ( $q$ ) zwischen der leichteren und der schwereren Komponente für alle  $O3b$ -Ereignisse. Jede Kontur steht für ein anderes Ereignis und umschließt die wahrscheinlichsten Werte der Parameter mit einer Wahrscheinlichkeit von 90% (der Bereich 90% statistischer Konfidenz). Mehrere Ereignisse sind aufgrund ihrer interessanten Eigenschaften farblich hervorgehoben (siehe Haupttext und unsere Veröffentlichung).

## Highlights aus GWTC-3

Nach den Eigenschaften der 35 neuen Ereignisse im GWTC-3, sind 32 von ihnen wahrscheinlich Verschmelzungen zweier **Schwarzer Löcher** und drei sind mögliche Verschmelzungen eines Neutronensterns mit einem Schwarzen Loch. Wir betrachten kompakte Objekte mit einer Masse von weniger als  $3 M_{\odot}$  als mögliche Neutronensternkandidaten. In  $O3b$  haben wir keine Kandidaten für Doppelneutronensterne entdeckt. Abbildung 5 fasst zudem die wahrscheinlichsten Werte von drei Schlüsselparametern für acht ausgewählte Ereignisse zusammen.

### Verschmelzungen von einem Neutronenstern und einem Schwarzen Loch

Bei drei Ereignissen könnten ein Neutronenstern und ein Schwarzes Loch verschmolzen sein:

- Bei **GW191219\_163120** verschmolzen ein Neutronenstern und ein Schwarzes Loch mit extrem ungleichen Massen. Das Schwarze Loch hatte eine Masse von etwa  $31 M_{\odot}$  und der Neutronenstern eine Masse von etwa  $1,2 M_{\odot}$ . Der Neutronenstern ist einer der masseärmsten, die je beobachtet wurden.
- Bei **GW200115\_042309** ist ein so eindeutiges Signal einer Verschmelzung eines Schwarzen Lochs mit einem Neutronenstern, dass wir bereits in einem eigenen Artikel darüber berichteten. Wir schätzen die Masse des Schwarzen Lochs auf etwa  $6 M_{\odot}$  und die Masse des Neutronensterns auf etwa  $1,4 M_{\odot}$ .
- **GW200210\_092254** ist ein hingegen möglicherweise die Verschmelzung eines Neutronensterns und eines Schwarzen Lochs. Wir halten das schwerere Objekt aufgrund seiner Masse von etwa  $24 M_{\odot}$  eindeutig für ein Schwarzes Loch. Das leichtere Objekt hat jedoch eine Masse von etwa  $2,8 M_{\odot}$ , was entweder auf einen schweren Neutronenstern oder ein leichtes Schwarzes Loch hindeuten könnte. Dieses Ereignis ist GW190814 aus  $O3a$  sehr ähnlich. Nach dem, was wir über Neutronensterne wissen, ist die Quelle von GW200210\_092254 wahrscheinlich ein Doppelsystem Schwarzer Löcher, aber wir können uns nicht sicher sein.

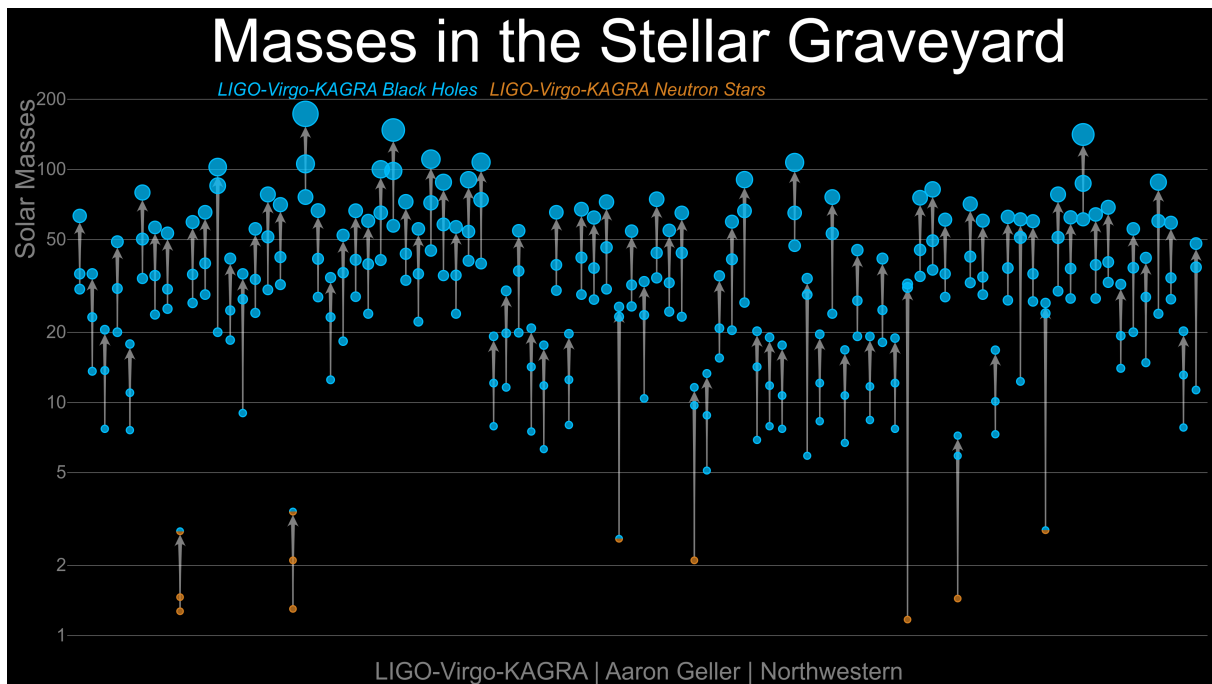


Abb. 4: Die Massen kompakter Objekte. Jeder Kreis steht für ein anderes kompaktes Objekt, und die vertikale Skala zeigt die Masse als Vielfaches der Masse unserer Sonne an. Blaue Kreise stehen für schwarze Löcher und orangefarbene Kreise für Neutronensterne. Halb blaue, halb orange Kreise sind kompakte Objekte, deren Klassifizierung unsicher ist. An jeder Verschmelzung sind drei kompakte Objekte beteiligt: zwei verschmelzende Objekte und das entstehende Objekt. Die Pfeile zeigen, welches kompakte Objekt verschmolzen ist und welches Überbleibsel dabei entstanden ist. Bildnachweis: LIGO Virgo Collaboration/Frank Elavsky, Aaron Geller/Northwestern.

Aufmerksamen Gravitationswellenbeobachtenden könnte aufgefallen sein, dass **GW200105\_162426** fehlt. Das Ereignis wurde zusammen mit GW200115\_042309 veröffentlicht. Wenn wir aber alle Ereignisse in O3b zusammen betrachten, bleibt für GW200105\_162426 nur noch eine 36% Wahrscheinlichkeit, ein echtes astrophysikalisches Signal zu sein. Damit liegt es unter der 50%-Schwelle für die Aufnahme in den Katalog. Mehr dazu finden Sie im Glossar. Obwohl das Ereignis den GWTC-3-Schwellenwert nicht erreicht, hebt es sich deutlich vom Hintergrundrauschen ab. Es ist also definitiv interessant! Wenn GW200105\_162426 real ist, dann besteht seine Quelle aus einem  $9 M_{\odot}$  schweren Schwarzen Loch und einem  $1,9 M_{\odot}$  schweren Neutronenstern.

### Verschmelzungen von Schwarzen Löchern

Hier ist eine Auswahl an Höhepunkten dieser Ereignisse:

- **GW200220\_061928** ist wahrscheinlich die Verschmelzung zweier Schwarzer Löcher mit der höchsten Gesamtmasse in O3b (aber weniger als GW190521 und GW190426\_190642 in O3a). Die vereinte Masse der beiden Schwarzen Löcher betrug  $148 M_{\odot}$  ( $87 M_{\odot}$  plus  $61 M_{\odot}$ ). Das endgültige Schwarze Loch, das aus der Verschmelzung hervorgeht, hat eine Masse von  $141 M_{\odot}$  und überschreitet damit die Schwelle von  $100 M_{\odot}$ , um als mittelschweres Schwarzes Loch zu gelten.
- **GW191204\_171526** ist eine Verschmelzung von zwei Schwarzen Löchern, bei der wir sicher sein können, dass ihr effektiver Spin (siehe Glossar) positiv ist. Der effektive Spin ist ein Parameter, der sich gut anhand eines Gravitationswellensignals messen lässt. Ein positiver Wert deutet darauf hin, dass mindestens eines der Schwarzen Löcher rotiert und dass die Spins insgesamt in Richtung der Bahnbewegung ausgerichtet sind. Diese Information ist ein wichtiger Hinweis darauf, wie sich das Doppelsystem gebildet hat. Die erste Beobachtung eines Systems mit einem positiven effektiven Spin war GW151226. Bei GW191204\_171526 betragen die Massen der beiden verschmelzenden Schwarzen Löcher etwa  $12 M_{\odot}$  und  $8 M_{\odot}$ , und die endgültige Masse des Schwarzen Lochs betrug etwa  $19 M_{\odot}$ .
- **GW191129\_134029** hat die geringste Gesamtmasse unter den O3b-Ereignissen, bei denen wir sicher sind, dass es sich um ein Doppelsystem Schwarzer Löcher handelt. Sie beträgt etwa  $17,5 M_{\odot}$ .

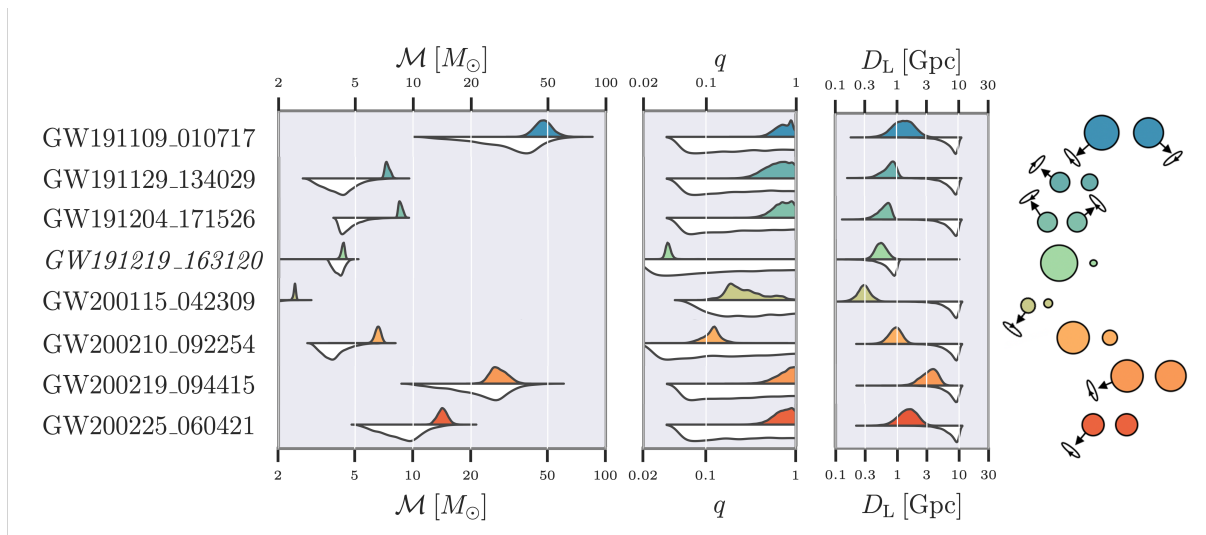


Abb. 5: Diagramme, die die wahrscheinlichsten Werte von drei Schlüsselparametern von acht kompakten Doppelsystemen aus GWTC-3 zeigen: die Chirp-Masse des Doppelsystems  $\mathcal{M}$ ; das Massenverhältnis  $q$  zwischen der leichteren und der schwereren Komponente; und die Leuchtkraftentfernung  $D_L$ . Die weißen Kurven zeigen, was unsere Analyse ergeben hätte, wenn wir kein Signal gefunden hätten, während die farbigen Kurven unsere tatsächlichen Ergebnisse zeigen. Jedes Doppelsystem ist auf der rechten Seite des Diagramms abgebildet, wobei die Größe des Kreises die Masse darstellt und die Spins der Komponenten angegeben sind (nicht maßstabsgetreu). Credits: LIGO-Virgo-KAGRA-Kollaboration/Isobel Romero-Shaw/OzGrav

(etwa  $10,7 M_\odot$  plus  $6,7 M_\odot$ ). Das aus der Verschmelzung resultierende Schwarze Loch hat eine Masse von etwa  $16,8 M_\odot$ .

- GW191109\_010717 ist ein Doppelsystem Schwarzer Löcher mit deutlichen Anzeichen für einen negativen effektiven Spin. Dies deutet darauf hin, dass die Spins der schwarzen Löcher insgesamt in die entgegengesetzte Richtung zum Bahndrehimpuls ausgerichtet sind (das bedeutet, dass die beiden kompakten Objekte im Doppelsystem möglicherweise in die entgegengesetzte Richtung zu ihrer Bahnbewegung rotieren). Die Wahrscheinlichkeit, dass der Spin negativ ist, liegt bei 90%. Negativer effektiver Spin scheint bei unseren Entdeckungen seltener zu sein als positiver effektiver Spin. GW191109\_010717 ist zudem eine der massereicheren Quellen: Die beiden Schwarzen Löcher haben  $65 M_\odot$  und  $47 M_\odot$  und das neu entstandene etwa  $107 M_\odot$ . Da seine Masse nahe an der von GW200220\_061928 liegt, heben wir in den Diagrammen lieber GW200225\_060421 hervor. Das ist unser andere Kandidat mit einer hohen Wahrscheinlichkeit (etwa 85%) für einen negativen effektiven Spin.

## Ein Blick in die Zukunft

Die LIGO- und Virgo-Kollaborationen haben ein Universum enthüllt, das reich an Gravitationswellenquellen ist. Bis heute haben wir 90 Ereignisse beobachtet. Mit GWTC-3 kommen 35 Ereignisse hinzu, darunter unsere besten Kandidaten für das Verschmelzen von Neutronensternen und Schwarzen Löchern. Je mehr Ereignisse wir beobachten, desto mehr erfahren wir über die Objekte, die sie erzeugen, und über ihre Eigenschaften als Population. Außerdem können wir sie nutzen, um die Allgemeine Relativitätstheorie weiter zu testen. Die Entdeckung von mehr Ereignissen bedeutet auch, dass sich unsere Chancen erhöhen, die ungewöhnlicheren Mitglieder dieser Systeme zu sehen.

Nach O3 gingen die Detektoren offline, um an ihnen Verbesserungen für den vierten Beobachtungslauf, der am 24. Mai 2023 begann, vorzunehmen. Der KAGRA-Detektor in Japan wird sich ebenfalls am Beobachtungslauf O4 beteiligen. Die Aufnahme weiterer Detektoren in das Netzwerk wird dazu beitragen, dass wir potenzielle Quellen besser lokalisieren können.

In der Zwischenzeit analysieren wir weiterhin unsere Daten, lernen aus den Beobachtungen kompakter Objekte und suchen nach noch unentdeckten Arten von Gravitationswellen, darunter kontinuierliche Gravitationswellen, stochastische Gravitationswellen und natürlich auch Überraschungen!

## Glossar

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

**Chirp-Masse:** Eine mathematische Kombination der Massen beider kompakten Objekte in einem Doppelsystem. Die Chirp-Masse bestimmt den Anstieg der Frequenz eines Gravitationswellenzirpens für Doppelsysteme niedriger Masse.

**Doppelsystem Schwarzer Löcher:** Ein System, das aus zwei Schwarzen Löchern besteht, die sich in einer engen Umlaufbahn umeinander befinden. (Siehe hier)

**Doppelsystem aus Neutronensternen:** Ein System, das aus zwei Neutronensternen besteht, die sich in einer engen Umlaufbahn umeinander befinden. (Siehe hier)

**Doppelsystem aus einem Neutronenstern und einem Schwarzen Loch:** Ein System, das aus einem Schwarzen Loch und einem Neutronenstern besteht, die sich in einer engen Umlaufbahn umeinander befinden. (Siehe hier)

**Effektiver Spin:** Der am besten messbare Parameter, der Spin-Informationen in einem Gravitationswellensignal kodiert. Er beschreibt, wie viel des Spins jedes einzelnen Schwarzen Lochs in der gleichen Weise rotiert wie die Bahnbewegung (z. B. ob der Spin und die Bahn beide im oder gegen den Uhrzeigersinn zeigen).

**Fehlalarmrate:** Diese Rate misst, wie oft eine Rauschschwankung des Detektors ein Signal erzeugen könnte, das dem betrachteten Ereignis ähnelt. Je kleiner diese Fehlalarmrate ist, desto wahrscheinlicher ist es, dass das in Frage kommende Ereignis astrophysikalischen Ursprungs ist.

**Gesamtmasse:** Die Summe der Massen der beiden kompakten Objekte im Doppelsystem.

**Gravitationswellenform:** Darstellung der zeitlichen Entwicklung eines Gravitationswellensignals

**GW200105\_162426:** Eine mögliche Verschmelzung von Neutronenstern und Schwarzem Loch, über die bereits berichtet wurde. Dieser Kandidat hat eine 36 %-ige Wahrscheinlichkeit, ein echtes astrophysikalisches Signal zu sein. Die Analyse dieser Quelle stellt aus zwei Gründen eine besondere Herausforderung dar. Zum einen handelt es sich um eine Einzelbeobachtung von LIGO Livingston. Zum Zeitpunkt des Ereignisses nahm LIGO Hanford keine Daten auf. Virgo nahm zwar Daten auf, aber es konnte kein solches Signal identifiziert werden. Ein Ereignis, das in einem Detektor sichtbar, aber in einem anderen unsichtbar ist, ist nicht unerwartet: Es hängt von der relativen Empfindlichkeit der Instrumente und von der Position der Quelle des Gravitationswellensignals am Himmel ab (eine ähnliche Situation gab es bei GW170817). Es ist immer eine Herausforderung, die Bedeutung eines Signals abzuschätzen, wenn nur Daten von einem Detektor vorliegen. Der zweite Grund ist, dass zum jetzigen Zeitpunkt nur wenig über die Population von solchen Doppelsystemen aus Neutronenstern und Schwarzem Loch bekannt ist, da wir nicht viele Beobachtungen von ihnen haben. Dies macht eine zuverlässige Klassifizierung einer solchen Verschmelzung schwierig. Sobald wir mehr solcher Systeme beobachten, werden wir aber mehr über diese erfahren und können Kandidaten wie GW200105\_162426 erneut überprüfen.

**Kompaktes Objekt:** Ein extrem dichtes astrophysikalisches Objekt wie ein Schwarzes Loch, ein Weißer Zwerg oder ein Neutronenstern.

**$M_{\odot}$  (Sonnenmasse):** Die Masse der Sonne (etwa  $2 \cdot 10^{30}$  Kilogramm). Die Sonnenmasse ist eine gängige Einheit zur Darstellung von Massen in der Astronomie.

**Massenverhältnis:** Verhältnis der Masse des leichteren kompakten Objekts zur Masse des schwereren Objekts

**Median:** Der Wert, der genau in der Mitte einer Verteilung liegt, so dass eine Hälfte der Werte oberhalb und die andere Hälfte unterhalb des Medians liegt.

**Megaparsec:** Eine Entfernungseinheit. Ein Megaparsec (1 Mpc) entspricht etwa 3,26 Millionen Lichtjahren.

**Multimessenger-Signal:** Ein Signal, das mit mehreren astronomischen „Boten“ beobachtet werden kann, also beispielsweise im elektromagnetischen Spektrum, mit Gravitationswellen und mit Astroteilchen wie Neutrinos o.ä.

**Neutronenstern:** Der Überrest eines massereichen Sterns, der das Ende seines Lebens erreicht hat. Wenn ein massereicher Stern seinen Kernbrennstoff aufgebraucht hat, stirbt er auf katastrophale Weise – in einer Supernova –, was oft zur Bildung eines Neutronensterns führt: ein Objekt, das so massereich und dicht ist, dass die Atome ihre Struktur nicht aufrechterhalten können, wie diese auf der Erde normalerweise vorkommt. Diese Stern sind etwa so massereich wie unsere Sonne, haben aber einen Durchmesser von nur einigen zehn Kilometern.

**Parameterschätzung:** Statistische Verfahren zur Ermittlung der astrophysikalischen Parameter aus einem Gravitationswellensignal.

**Schwarzes Loch:** Ein Bereich der Raumzeit mit einer so starken Schwerkraft, dass nichts, einschließlich Licht, entkommen kann.

**Spin:** Größe, die misst, wie schnell sich ein Objekt um sich selbst dreht.

**Streulicht:** Wenn Laserlicht auf ein optisches Bauteil trifft, kann ein kleiner Teil des Lichts gestreut (in einem zufälligen Winkel reflektiert) werden. Das gestreute Licht kann wiederum von anderen Oberflächen reflektiert werden und sich seinen Weg zurück in den Laserstrahl des Detektors bahnen und Streulichtstörungen verursachen. Weitere Informationen zu Störungen gibt es übrigens bei Gravity Spy.

**Wahrscheinlichkeit, dass es sich um ein astrophysikalisches Signal handelt:** Quantifiziert die Wahrscheinlichkeit, dass es sich bei einem Signal um eine echte Gravitationswelle handelt. Sie hängt sowohl davon ab, wie laut das Signal im Vergleich zum Hintergrundrauschen ist, als auch von unserem Verständnis der Population, zu der die Quelle gehört. Da wir viele Beobachtungen von Doppelsystemen aus schwarzen Löchern haben, können wir die Population dieser besser verstehen und die Wahrscheinlichkeit berechnen, dass Signale dieses Typs astrophysikalisch sind. Da wir weniger Beobachtungen von Verschmelzungen zwischen Neutronensternen und Schwarzen Löchern haben, ist diese Größe schwieriger zu berechnen, und wir müssen die aktuellen Schätzungen möglicherweise überarbeiten, sobald wir mehr Beobachtungen haben und mehr über die Population wissen.

## Weiterführende Informationen

**Alle aktuellen News auf unseren Websites:**

[www.ligo.org](http://www.ligo.org)

[www.virgo-gw.eu](http://www.virgo-gw.eu)

[gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/](http://gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/)

**Mitteilungen der Kollaborationen zu diesem Katalog**

<https://www.ligo.org/detections/O3bcatalog.php> <https://www.virgo-gw.eu/gwtc3>

**Der vollständige wissenschaftliche Artikel:**

im Dokumenten-Verzeichnis: <https://dcc.ligo.org/LIGO-P2000318/public/main> auf dem Preprint-Server: <https://arxiv.org/abs/2111.03606> oder in der Fachzeitschrift: <https://doi.org/10.1103/PhysRevX.13.041039>.

**Öffentlich verfügbare GWTC-3-Daten:**

[www.gw-openscience.org/GWTC-3/](http://www.gw-openscience.org/GWTC-3/)