

GWTC-2: Ein erweiterter Katalog von Gravitationswellen

Wir stellen einen aktualisierten Katalog der Gravitationswellennachweise von LIGO und Virgo (GWTC-2, der „Gravitational-Wave Transient Catalog 2“) vor. Er deckt den Zeitraum von der allerersten Beobachtung im Jahr 2015 bis zum Ende von O3a, der ersten Hälfte des dritten Beobachtungslaufs ab. O3a dauerte vom 1. April bis zum 1. Oktober 2019 und fügte den 11 bestätigten Ereignissen in GWTC-1 weitere 39 Gravitationswellen-Ereignisse hinzu. Damit erhöht sich deren Gesamtzahl in GWTC-2 auf 50. Die Entdeckungen in O3a erstrecken sich über ein breites Spektrum astrophysikalischer Parameter. Die Signale stimmen mit Verschmelzungssignalen von Doppelsystemen Schwarzer Löcher, Doppelneutronensternen und von Neutronensternen mit Schwarzen Löchern überein.

Bemerkenswert ist, dass aus O3a etwa dreimal mehr sicher nachgewiesene Gravitationswellenereignisse hervorgingen als aus den beiden vorherigen Beobachtungsläufen (O1 und O2) zusammen. Zudem nahm der Virgo-Detektor während der gesamten Dauer von O3a gemeinsam mit beiden LIGO-Detektoren Daten auf. Dabei beobachtete während 97 % der Zeit mindestens ein Detektor, und während ca. 82 % der Zeit mindestens zwei Detektoren.

Einige besonders interessante Ereignisse aus O3a sind: 1) die zweite Beobachtung einer Gravitationswelle, die mit dem Verschmelzungssignal zweier Neutronensterne übereinstimmt, 2) die ersten Ereignisse mit eindeutig unterschiedlichen Komponentenmassen und 3) ein sehr massereiches Doppelsystem Schwarzer Löcher mit einer Gesamtmasse von etwa 150 Sonnenmassen.

In dieser Zusammenfassung beschreiben wir die Verbesserungen von LIGO und Virgo, die diese Messungen ermöglichten, sowie die astrophysikalische Bedeutung dieser Ereignisse.

Gravitationswellen messen

Die 39 Entdeckungen in O3a sind das Ergebnis von Verbesserungen der LIGO- und Virgo-Observatorien selbst, sowie von verbesserter Datenqualität und einer Vielzahl verschiedener Gravitationswellen-Suchmethoden. Zu den jüngsten Verbesserungen der Instrumentierung mit dem Ziel, das Rauschen zu verringern und die Empfindlichkeit zu erhöhen, gehören Laser mit höherer Leistung, neue und verbesserte Spiegel und eine bessere Kontrolle des Streulichts. Diese Änderungen führten bei allen drei Detektoren zu einer Erweiterung des Frequenz- und Entfernungsbereichs, in dem diese Gravitationswellen nachweisen können; dadurch wurde unser Blick auf das Universum erweitert. Im Durchschnitt der drei Detektoren stieg von O2 zu O3a die **Medianentfernung**, in der wir eine typische Neutronensternverschmelzung beobachten können, um etwa 63 %, wie **Abb. 1** zeigt.

Ein weiterer wichtiger Schritt bei der Entdeckung von Gravitationswellen ist die Verarbeitung der Detektor-Rohdaten. Dieser Datenkonditionierungsprozess umfasst die Kalibrierung der Daten, die Subtraktion des Rauschens und die Beseitigung von Störimpulsen (*glitches*). Zuerst kalibrieren wir die Schwankungen der optischen Lei-

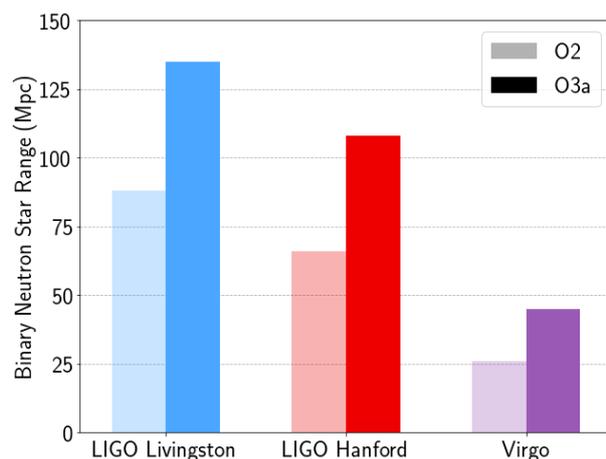


Abb. 1: Die **Medianentfernungen**, in denen die Detektoren während des zweiten Beobachtungslaufs (O2) bzw. der ersten Hälfte des dritten Beobachtungslaufs (O3a) Verschmelzungen von Neutronensternen nachweisen können. Anmerkung: 1 Megaparsec (Mpc) entspricht etwa 3,26 Millionen Lichtjahren. (Bildrechte: LIGO Virgo Collaboration / Eve Chase / Caitlin Rose / Northwestern / University of Wisconsin-Milwaukee).

stung jeden Detektors und wandeln sie für erste Nachweise nahezu in Echtzeit in dimensionslose **Gravitationswellenstärke** (*strain*) um. Später rekalisieren wir die Daten, um systematische Fehler zu reduzieren, und subtrahieren das Rauschen, um den Bereich, in dem wir Gravitationswellenquellen nachweisen können, weiter zu vergrößern. Dadurch werden auch schwächere Signale in den Daten sichtbar.

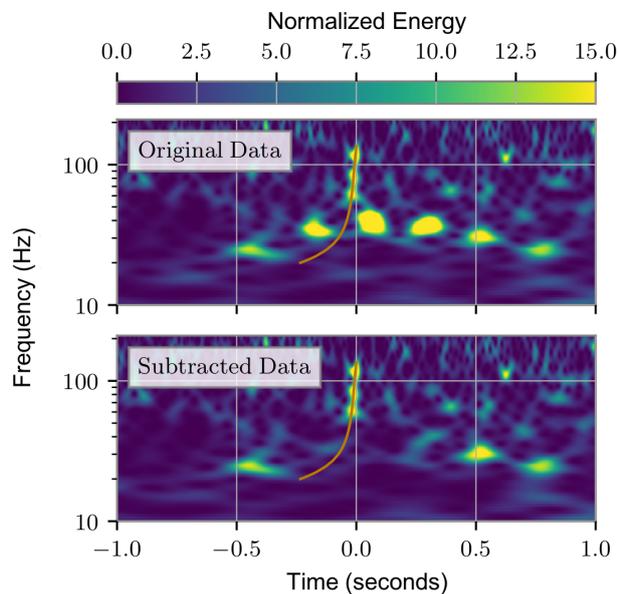


Abb. 2: Die Daten des Ereignisses GW190701_203306 in Spektrogramm-Darstellung vor und nach der Subtraktion eines Störimpulses. In diesem Fall erzeugte das Streulicht im LIGO Livingston-Detektor einen Störimpuls in Form von erhöhtem Rauschen bei Frequenzen unter ca. 40 Hz. (In Anlehnung an Abb. 5 unserer Veröffentlichung).

die Daten unmittelbar mit dem Ziel, innerhalb von Minuten öffentliche Beobachtungshinweise zu erzeugen. Später analysieren wir die Gravitationswellendaten erneut, um die kuratierte Kandidatenliste für diesen Katalog zu erstellen. Dabei verwenden wir eine aktualisierte Datenkalibrierung, Bewertungen der Datenqualität und verbesserte Methoden zur Berechnung der statistischen Signifikanz. Bei der Entscheidung, welche Kandidaten den Zuschlag erhalten, legen wir einen Schwellenwert für die Fehlalarmrate von zwei pro Jahr fest. Das ist die Rate, bei der wir erwarten, dass diese Art von Kandidaten zufällig aufgrund von Hintergrundrauschen auftritt. Von den 39 Ereignissen in O3a wurden 26 zuvor in Beobachtungshinweisen gemeldet, während 13 erstmals in GWTC-2 veröffentlicht werden.

Im GWTC-2 haben wir eine überarbeitete Namenskonvention für unsere veröffentlichten Gravitationswellenereignisse eingeführt. Die alte Konvention, nur das Datum der Beobachtung zu verwenden, gilt weiterhin für bereits veröffentlichte Ereignisse, einschließlich der neuesten GW190412, GW190425, GW190521 und GW190814. Den neuen GWTC-2-Ereignissen wird jedoch die Zeit ihrer Entdeckung (in der Zeitzone UTC) hinzugefügt; zum Beispiel wurde GW190701_203306 (siehe Abbildung 2) am 1. Juli 2019 um 20:33:06 UTC entdeckt. Auf diese Weise können wir selbst für zwei Ereignisse, die am selben Tag nachgewiesen wurden, eindeutige Namen haben. Das ist während O3a dreimal passiert.

Messung astrophysikalischer Eigenschaften

Wir untersuchen die astrophysikalische Natur jedes Ereignisses durch einen Prozess namens Parameterschätzung, der die Werte zahlreicher astrophysikalischer Eigenschaften ermittelt, die für jedes Gravitationswellenereignis einzigartig sind. Wir messen extrinsische Parameter, die die Beziehung eines Doppelsystems zu uns hier auf der Erde beschreiben, wie z.B. die Entfernung zur Quelle, ihre Himmelsposition und die Orientierung der Systems aus der Sicht eines Beobachters. Zusätzlich messen wir intrinsische Parameter, die sich auf Eigenschaften wie die Massen und Spins jedes **kompakten Objekts** im Doppelsystem beziehen. Aus den Ereignisparametern berechnen wir **Gravitationswellenformen**, die die erwartete Gravitationswelle als Funktion der Zeit darstellen. Diese Vorhersage vergleichen wir dann mit den in LIGO und Virgo gemessenen Daten, wobei wir das in den Detektoren

Bei der Analyse von Gravitationswellendaten sind Störimpulse das häufigste Problem der Datenqualität. Störimpulse sind kurzzeitige Änderungen des Hintergrundrauschens, die beispielsweise durch einen mechanischen Kameraverschluss oder Lichtstreuung aus dem Laserstrahl entstehen. Andere Störimpulse sind jedoch bislang ungeklärten Ursprungs, wie z.B. breitbandige kurzzeitige Störimpulse, sogenannte „Blips“. Eine Möglichkeit, diese Störimpulse in den LIGO- und Virgo-Daten zu identifizieren und zu klassifizieren, ist die Bürgerwissenschaftsplattform „Gravity Spy“, bei der tausende Freiwillige mitmachen. Auch Sie können uns helfen, Störimpulse mit Gravity Spy zu identifizieren. Nachdem wir signifikante Störimpulse in den Daten identifiziert haben, wenden wir eine Subtraktion an, um sie aus den Gravitationswellenkandidaten zu entfernen, wie in **Abb. 2** dargestellt. Acht der 39 Ereignisse, die wir in O3a beobachtet haben, profitierten von der vorgeschalteten Störimpuls-Subtraktion vor der Analyse zur Schätzung ihrer Parameter.

Bei der Suche nach Gravitationswellen erfolgt die Identifizierung von Kandidaten auf zwei Zeitskalen. Zuerst verarbeiten mehrere Suchmethoden

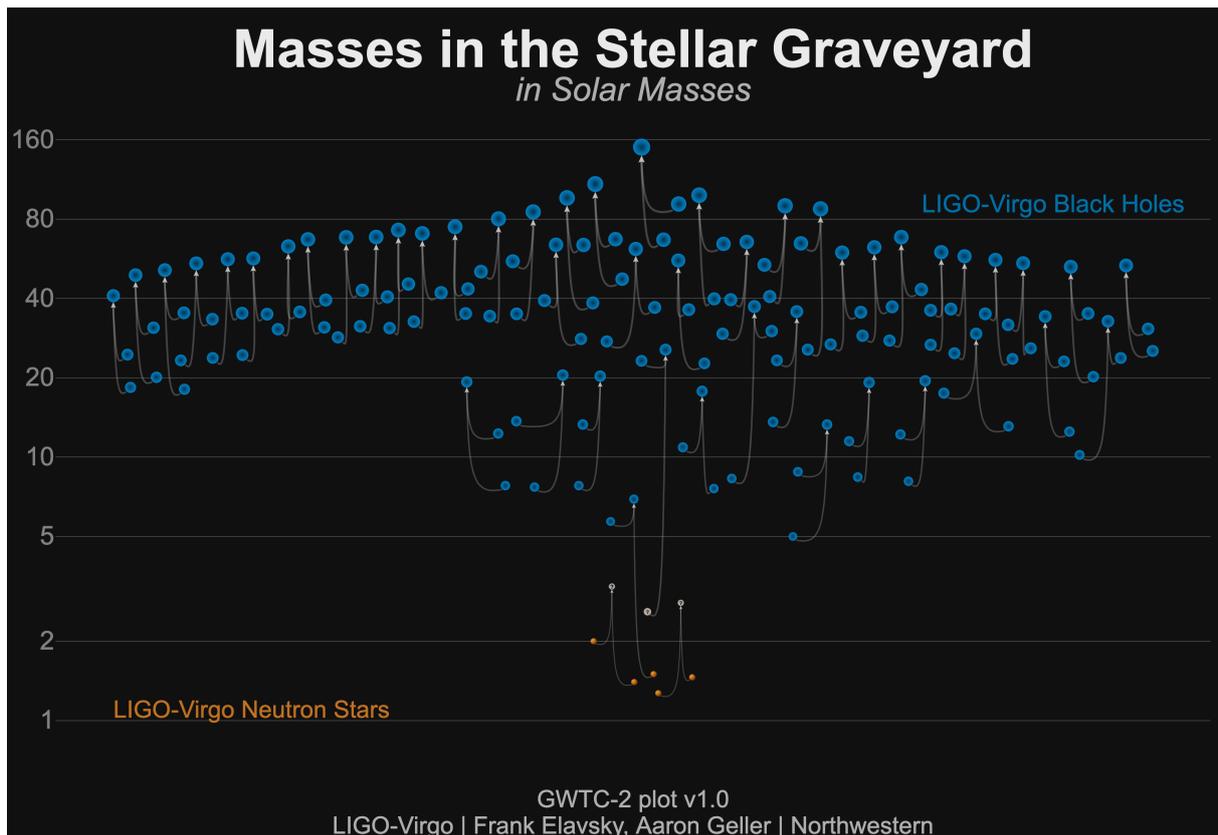


Abb. 3: Darstellung der Massen einer Vielzahl kompakter Objekte. Die Grafik zeigt Schwarze Löcher (blau), Neutronensterne (orange) und kompakte Objekte unbekannter Natur (grau), die mittels Gravitationswellen entdeckt wurden. Jede Verschmelzung eines Doppelsystems entspricht drei dargestellten kompakten Objekten: den beiden verschmelzenden Objekten und dem Ergebnis der Verschmelzung. (Bildrechte: LIGO-Virgo-Kollaboration / Frank Elavsky, Aaron Geller / Northwestern).

vorhandene Rauschen berücksichtigen. Durch diese Methoden zur Parameterschätzung erzeugen wir 90%-Glaubwürdigkeitsintervalle, die den Wertebereich repräsentieren, der mit den Daten übereinstimmt.

Unsere 39 Ereignisse erstrecken sich über einen weiten Massenbereich und beinhalten eine Fülle von Informationen über die Entstehung und Entwicklung von Schwarzen Löchern und Neutronensternen im gesamten Universum. Das weit vor der Verschmelzung erzeugte Gravitationswellensignal hängt hauptsächlich von einer speziellen Kombination der Einzelmassen der Komponenten ab, die als **Chirp-Masse** bezeichnet wird. Weitere wichtige Massenparameter sind die **Gesamtmasse** jedes Doppelsystems (die Summe der Massen der kompakten Objekte) und das **Massenverhältnis** (das Verhältnis der Masse des leichteren kompakten Objekts zum der des schwereren).

Außergewöhnliche Entdeckungen in O3a

Abb. 3 veranschaulicht die Massenvielfalt in GWTC-2, die von Neutronensternen bei rund 1,4 Sonnenmassen bis hin zu einem Schwarzen Loch von rund 150 Sonnenmassen reicht. Die Abb. 4 und 5 heben die folgenden acht Ereignisse hervor, von denen vier in einzelnen Veröffentlichungen beschrieben sind:

- GW190412: das erste Doppelsystem Schwarzer Löcher mit deutlich unterschiedlichen Komponentenmassen; es weist auch Anzeichen von Obertönen auf.
- GW190425: das zweite Gravitationswellenergebnis nach GW170817, das mit einer Verschmelzung von Neutronensternen übereinstimmt.
- GW190426_152155: ein massearmes Ereignis, das entweder eine Verschmelzung von einem Schwarzen Loch mit einem Neutronenstern oder einem anderen Schwarzen Loch sein kann.
- GW190514_065416: ein Doppelsystem Schwarzer Löcher mit dem kleinsten effektiven ausgerichteten Spin aller O3a-Ereignisse

- GW190517_055101: ein Doppelsystem Schwarzer Löcher mit dem größten effektiven ausgerichteten Spin aller O3a-Ereignisse
- GW190521: ein Doppelsystem Schwarzer Löcher mit einer Gesamtmasse von über 150 Sonnenmassen
- GW190814: ein hochgradig asymmetrisches System von unklarer Natur, das der Verschmelzung eines Schwarzen Lochs von 23 Sonnenmassen mit einem kompakten Objekt mit 2,6 Sonnenmassen entspricht. Letzteres kann entweder das leichteste Schwarze Loch oder der schwerste Neutronenstern sein, der je in einem kompakten Doppelsystem beobachtet wurde.
- GW190924_021846: wahrscheinlich das masseärmste Doppelsystem Schwarzer Löcher, in dem beide Schwarzen Löcher mehr als 3 Sonnenmassen haben.

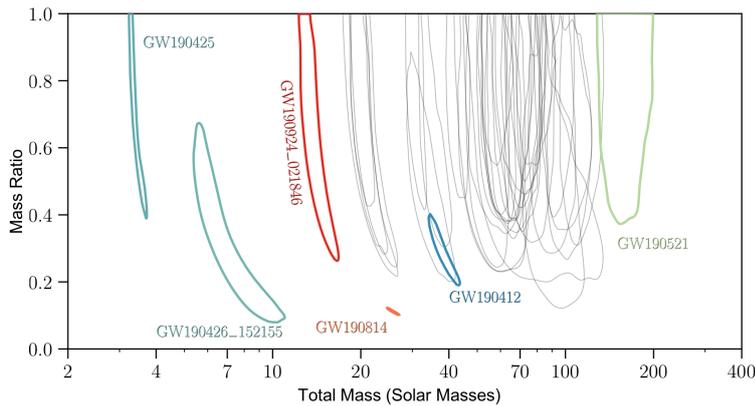


Abb. 4: Ermittelte Massenverhältnisse und Gesamtmassen für alle O3a-Ereignisse. Die Konturen repräsentieren 90%-Glaubwürdigkeitsintervalle. Sechs einzigartige Ereignisse sind hervorgehoben. (In Anlehnung an Abb. 6 unserer Veröffentlichung).

der massereichsten Verschmelzung in GWTC-1. Darüber hinaus enthält GW190521 höchstwahrscheinlich das bisher schwerste einzelne Schwarze Loch, das anhand von Gravitationswellen nachgewiesen wurde, mit einer Masse von mehr als 90 Sonnenmassen. Mehrere weitere Ereignisse könnten Gesamtmassen von mehr als 100 Sonnenmassen aufweisen, darunter GW190519_153544, GW190602_175927 und GW190706_222641.

GWTC-2 enthält Objekte mit asymmetrischeren Massen als alle in GWTC-1 veröffentlichten Quellen, beispielsweise GW190412 und GW190814, die beide aus der Verschmelzung eines Schwarzen Lochs mit einem leichteren Begleiter stammen. Asymmetrische Verschmelzungen verstärken Obertöne von Gravitationswellen, wie beim Nachweis von GW190412 zu sehen ist. Dieser aktualisierte Katalog enthält mehrere andere einzigartige Meilensteine der Gravitationswellenastronomie. O3a umfasst das am weitesten entfernte Ereignis, das bis heute nachgewiesen wurde, sowie neun Ereignisse, die auf weniger als 1% der Gesamtfläche des Himmels genau lokalisiert wurden.

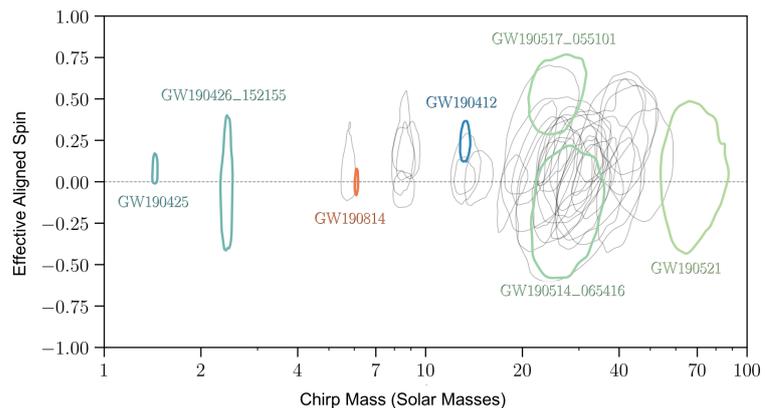


Abb. 5: Gemessene effektive ausgerichtete Spins und Chirp-Massen für alle O3a-Ereignisse. Die Konturen stellen 90%-Glaubwürdigkeitsintervalle dar. (In Anlehnung an Abb. 7 unserer Veröffentlichung).

Spins können die Entstehungsgeschichte von Doppelsystemen aus kompakten Objekten weiter enthüllen. Spins hängen mit dem Drehimpuls eines kompakten Objekts zusammen und variieren von nicht-drehend bis maximal schnell drehend. Normalerweise messen wir Spins in einem Parameter, der als „effektiver ausgerichteter Spin“ bezeichnet wird und eine bestimmte Kombination der Spins der beiden kompakten Objekte darstellt, bevor diese verschmelzen. **Abb. 5** zeigt die gemessenen effektiven

Darüber hinaus umfasst GWTC-2 Ereignisse, die sich über die so genannte „untere Massenlücke“ zwischen 2,5 und 5 Sonnenmassen erstrecken. Viele Jahre lang sagten Astrophysiker*innen die Existenz dieser Massenlücke aufgrund fehlender Beobachtungen innerhalb dieses Massenbereichs vorher. O3a brachte jedoch potenzielle Objekte in der Massenlücke hervor; dazu zählen die leichteren Begleiter von GW190814 und GW190924_021846.

Wie aus **Abb. 4** hervorgeht, weist GW190521 die größte Gesamtmasse der Ereignisse in O3a auf und hat fast die doppelte Masse von GW170729,

ausgerichteten Spins und die Chirp-Massen aller Ereignisse. Ein negativer effektiver ausgerichteter Spin deutet auf nicht parallel ausgerichtete Spins hin, was bedeuten kann, dass sich das Doppelsystem in einer Umgebung hoher Sterndichte – wie etwa in einem Kugelsternhaufen – gebildet haben könnte. Wie in **Abb. 5** dargestellt, weist GW190517_055101 wahrscheinlich den größten effektiven ausgerichteten Spin auf. In GWTC-2 werden keine sicher negativen Werte identifiziert, obwohl GW190514_065416 wahrscheinlich den kleinsten effektiven ausgerichteten Spin aufweist. Darüber hinaus können Spins Beweise für Präzession im Doppelsystem erbringen; GWTC-2 enthält Ereignisse, die leichte Anzeichen von Präzession aufweisen, wie z.B. GW190412 und GW190521.

Eine strahlende Zukunft für die Gravitationswellenastronomie

So unwirklich es auch erscheinen mag, der Nachweis von Gravitationswellen ist inzwischen alltäglich geworden, gerade einmal fünf Jahre nach dem ersten Nachweis im September 2015. Mit jetzt 50 Gravitationswellen-Messungen können wir die Population von Schwarzen Löchern und Neutronensternen im gesamten Universum besser erforschen (siehe diese Zusammenfassung). Zusätzliche Gravitationswellennachweise verbessern auch unser Verständnis der Allgemeinen Relativitätstheorie (siehe diese Zusammenfassung).

Die Zukunft der Gravitationswellenastronomie wird immer vielversprechender, nachdem 39 Ereignisse in den ersten sechs Monaten der O3-Beobachtungsperiode entdeckt wurden. Die Analyse des zweiten Teils von O3 (genannt O3b) ist derzeit im Gange und wird unseren wachsenden Katalog von Gravitationswellen-Ereignissen noch mehr erweitern. Im Anschluss an O3 werden die Detektoren weiter technisch verbessert, um ihre astrophysikalische Reichweite rechtzeitig für den vierten Beobachtungslauf weiter zu steigern. Während wir unsere Instrumente verbessern und auf den Bau neuer Detektoren warten, wird die Gravitationswellen-Gemeinschaft weiterhin die Natur von Schwarzen Löchern und Neutronensternen im Universum erforschen.

Glossar

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.

Gravitationswellenstärke: die Änderung der Armlänge des Detektors aufgrund der Verformung der Raumzeit durch Gravitationswellen, die jeden Detektor durchlaufen, geteilt durch die Gesamtarmlänge

Gravitationswellenform: Darstellung der zeitlichen Entwicklung eines Gravitationswellensignals

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

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.

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

Sonnenmasse: die Masse der Sonne. Die Sonnenmasse ist eine gängige Einheit zur Darstellung von Massen in der Astronomie.

Weiterführende Informationen

Besuchen Sie unsere Websites: www.ligo.org, www.virgo-gw.eu

Lesen Sie einen kostenlosen Vorabdruck des vollständigen wissenschaftlichen Artikels unter <https://dcc.ligo.org/P2000061/public>

Die Daten für die 39 in O3a entdeckten Ereignisse sind auf dem Ereignis-Portal des GWOSC-Webservers unter <https://www.gw-openscience.org/eventapi/html/GWTC-2/> verfügbar. Die GWOSC-Website enthält nützliche Hintergrunddokumentation, Beispielcode und Tutorials, die beim Erkunden dieser öffentlich zugänglichen Datensätze helfen.