

# Eine neue Quelle von Gravitationswellen: Neutronenstern-Schwarzes-Loch-Systeme

## Was haben wir entdeckt?

Am 5. Januar 2020 beobachteten der Advanced-LIGO-Detektor in Livingston, Louisiana in den USA und der Advanced-Virgo-Detektor in Italien Gravitationswellen, die konsistent mit denen von einer völlig neuen Art von astronomischem System sind. Die Gravitationswellen entstanden während der Todesspirale zweier der extremsten Objekte im Universum: einem Neutronenstern und einem Schwarzen Loch. LIGO und Virgo beobachteten die letzten Umrundungen, während die beiden Objekte aufeinander zufielen (engl. inspiral), gefolgt von der Verschmelzung des Neutronensterns mit dem Schwarzen Loch. Bemerkenswerterweise wurde nur zehn Tage später ein zweites ähnliches Gravitationswellensignal von einem Neutronenstern und einem Schwarzen Loch beobachtet, diesmal von beiden Advanced-LIGO-Detektoren (in Livingston und auch in Hanford, Washington) und dem Virgo-Detektor. Dies ist das erste Mal, dass Gravitationswellen von solchen gemischten Systemen aus Neutronensternen und Schwarzen Löchern beobachtet wurden (siehe **Abbildung 1**). Zuvor wurden Gravitationswellen von der Verschmelzung von Paaren Schwarzer Löcher und von Doppelneutronensternen beobachtet. Unsere neuen Entdeckungen tragen die Spitznamen **GW200105** und **GW200115**, nach den Kalenderdaten, an denen die Messungen stattfanden.

Diese beiden Entdeckungen sind die ersten Beobachtungen von Neutronenstern-Schwarzes-Loch-Systemen. Seit mehreren Jahrzehnten wurde die Existenz von solchen Systemen vorhergesagt, aber bis jetzt gab es keine überzeugenden Nachweise anhand von Beobachtungen. Mit der Beobachtung von Neutronenstern-Schwarzes-Loch-Systemen haben wir nun alle möglichen drei Arten von Doppelsystemen aus Schwarzen Löchern und Neutronensternen gesehen. Systeme aus Schwarzen Löchern und Neutronensternen werden als „kompakte Doppelsysteme“ bezeichnet. Diese neuen Entdeckungen und zukünftige Beobachtungen von kompakten Doppelsystemen werden Licht auf die Geburt, das Leben und den Tod von Sternen, sowie auf die Umgebung, in der sie entstehen, werfen.

## Nachweis der Gravitationswellensignale

Die Suche nach Gravitationswellensignalen in den von den Detektoren aufgezeichneten Daten erfolgt durch Optimalfilter. Dabei werden die beobachteten, verrauschten Daten mit Signalvorhersagen aus Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie verglichen. Die Optimalfilter können Gravitationswellensignale

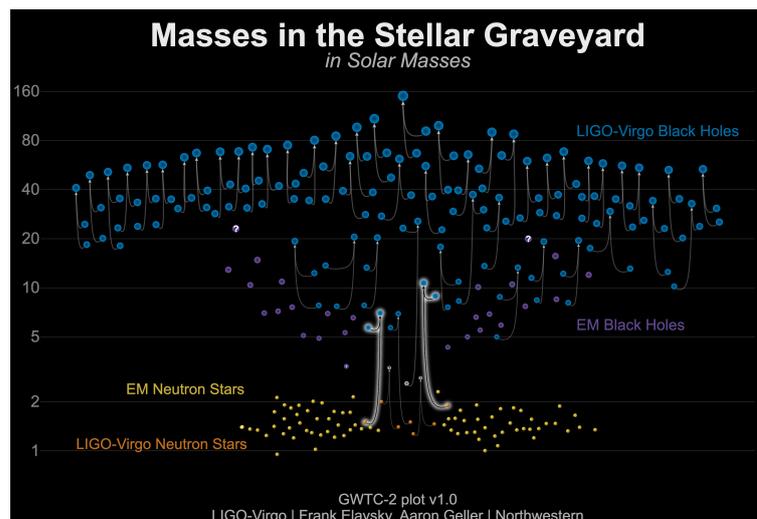


Abb. 1: Die Massen von Neutronensternen und Schwarzen Löchern, gemessen mittels Gravitationswellen beziehungsweise elektromagnetischer Beobachtungen. Die gelben und violetten Markierungen stellen die elektromagnetischen Messungen der Massen von Neutronensternen bzw. Schwarzen Löchern dar, während die orangen und blauen Markierungen die entsprechenden Messungen mittels Gravitationswellen sind. Unsere Signale, GW200105 und GW200115, sind als Verschmelzung von Neutronensternen mit Schwarzen Löchern hervorgehoben. (Bildnachweis: LIGO-Virgo & Frank Elavsky, Aaron Geller, Northwestern University)

aus verrauschten Daten herausfiltern, ähnlich wie wir einzelne Instrumente in einem Musikstück unterscheiden können. Wir betrachten GW200115 als astrophysikalisches Gravitationswellensignal mit sehr hoher statistischer Konfidenz. Die Wahrscheinlichkeit, dass es aufgrund von zufälligem Rauschen auftritt, beträgt weniger als **einmal in 100.000 Jahren**. Die astrophysikalische Natur von GW200105 ist statistisch schwieriger zu bestimmen, aber es hebt sich auch deutlich von allen Rauscheffekten ab, die wir je gesehen haben, und wir nehmen an, dass ein solches Signal aufgrund von Rauschen wahrscheinlich weniger als **einmal in 2,8 Jahren** auftritt.

Verschmelzungen von Neutronenstern-Schwarzes-Loch-Systemen können prinzipiell Licht im gesamten elektromagnetischen Spektrum erzeugen. Leider konnte die Himmelsrichtung der Quellen nur sehr ungenau bestimmt werden, eingegrenzt auf einen Himmelsbereich zwischen dem 2.400- und 29.000-Fachen der Vollmondfläche. Zusammen mit der großen Entfernung zu den Quellen (auf die weiter unten näher eingegangen wird), machte dies die Beobachtung von elektromagnetischer Strahlung unwahrscheinlich; es wurde tatsächlich auch keine beobachtet. Bei zukünftigen Beobachtungen der Verschmelzungen von Neutronenstern-Schwarzes-Loch-Systemen könnte auch Licht gemessen werden. Dies könnte möglicherweise zeigen, dass das Schwarze Loch den Neutronenstern durch Gezeitenkräfte zerreißt und Informationen über die extreme Form der Materie liefern, aus der Neutronensterne bestehen.

## Eigenschaften der Quellen

Gravitationswellen tragen viele Informationen über ihren Ursprung, zum Beispiel die Massen des Schwarzen Lochs und des Neutronensterns. Das Schwarze Loch und der Neutronenstern, die GW200105 erzeugten, haben etwa 8,9-mal bzw. 1,9-mal so viel Masse wie unsere Sonne (mit der Masse  $M_{\odot}$ ). Das Ereignis GW200105 ereignete sich vor etwa 800 Millionen Jahren, also Hunderte von Millionen Jahren bevor es die ersten Dinosaurier auf der Erde gab. Für das Ereignis GW200115 schätzen wir, dass das Schwarze Loch und der Neutronenstern eine Masse von etwa  $5,7 M_{\odot}$  bzw.  $1,5 M_{\odot}$  hatten, und dass ihre Verschmelzung vor fast einer Milliarde Jahren stattfand. Die Massen sind in **Abbildung 2** zusammengefasst.

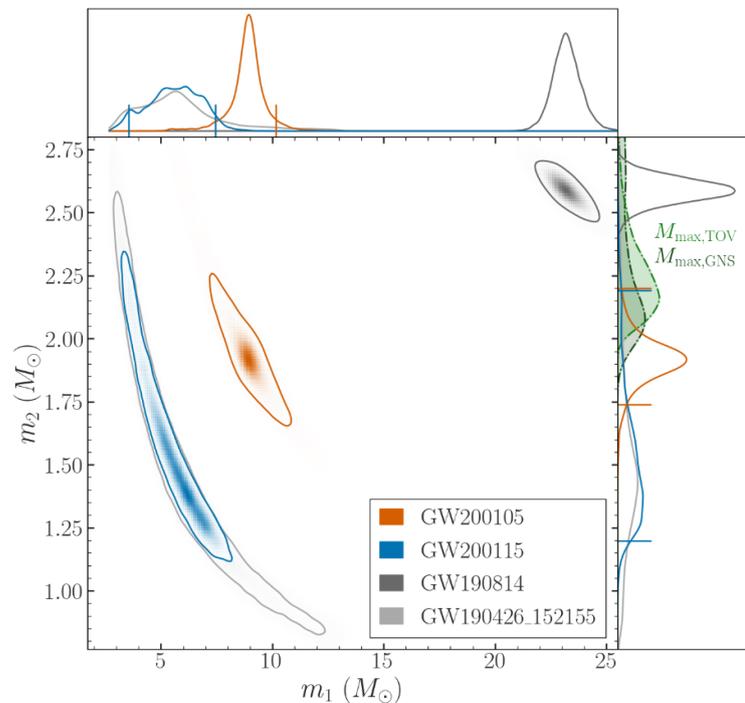


Abb. 2: Zusammenfassung unseres Wissens über die Komponentenmassen der Objekte, die GW200105 und GW200115 erzeugt haben. Auf der horizontalen Achse ist die Masse des schwereren Objekts (das Schwarze Loch) dargestellt, während die vertikale Achse die Masse des leichteren Objekts (der Neutronenstern) zeigt. Die Farbschattierung zeigt Massenkombinationen an, die mit den Daten übereinstimmen, orange für das erste Ereignis und blau für das zweite Ereignis. Eine dunklere Schattierung zeigt eine bessere Übereinstimmung an, d.h. eine höhere Wahrscheinlichkeit für solche Massenkombinationen. Das obere Feld fasst die Informationen über die Masse des Schwarzen Lochs zusammen, wobei z. B. die blaue Kurve zeigt, dass das Schwarze Loch in GW200115 eine Masse zwischen  $3,5 M_{\odot}$  und  $7,5 M_{\odot}$  hatte. Das rechte Feld fasst die Informationen über die Masse des Neutronensterns zusammen – zum Beispiel zeigt die orange Kurve in diesem Bereich an, dass der Neutronenstern von GW200105 eine Masse zwischen  $1,75 M_{\odot}$  und  $2,2 M_{\odot}$  hatte. Die grünen Schattierungen in diesem rechten Feld fassen das derzeitige astronomische Wissen darüber zusammen, wie massereich Neutronensterne sein können, und zeigen, dass unsere beobachteten Objekte Massen haben, die gering genug sind, um Neutronensterne zu sein. Die Abbildung zeigt auch Informationen über zwei frühere Entdeckungen von Gravitationswellen: GW190814, bei dem es sich wahrscheinlich um die Verschmelzung eines Schwarzen Lochs mit  $23 M_{\odot}$  mit einem Schwarzen Loch mit  $2,5 M_{\odot}$  handelt (das leichteste jemals beobachtete); und GW190426\_152155, ein Signal, das wie von einem Neutronenstern-Schwarzes-Loch-System aussieht, aber so schwach ist, dass unklar ist, ob es astrophysikalischen Ursprungs ist.

Wir fanden heraus, dass der Spin des Schwarzen Lochs in GW200105 zwischen 0% und bis zu 30% der maximalen Rotationsrate von Schwarzen Löchern liegen könnte, während für GW200115 der Spin zwischen 0% und 80% der maximalen Rate liegt. Wir konnten den Spin der Neutronensterne nicht

bestimmen, da unsere Messungen dafür nicht empfindlich sind (siehe **Abbildung 3**).

Warum gehen wir davon aus, dass wir Neutronenstern-Schwarzes-Loch-Systeme beobachtet haben? Um die beobachteten Gravitationswellen zu erzeugen, müssen die Objekte im Vergleich zu normalen Sternen sehr kompakt und dicht sein, sonst würden sie auseinanderbrechen, bevor sie verschmelzen. Da die Masse der schwereren Objekte in den beiden Doppelsystemen  $8,9 M_{\odot}$  und  $5,7 M_{\odot}$  beträgt, sind die einzigen bekannten Objekte, um die es sich handeln könnte, Schwarze Löcher. Die Massen der leichteren Objekte liegen bei  $1,9 M_{\odot}$  und  $1,5 M_{\odot}$ , sie sind viel leichter als jedes bekannte Schwarze Loch. Diese Massen sind konsistent mit denen bekannter Neutronensterne, wie sie in der Milchstraße beobachtet werden, oder mit Gravitationswellen (z. B. GW<sub>170817</sub>). Die Massen der Schwarzen Löcher sind konsistent mit Vorhersagen aus Modellen der Sternentstehung und -entwicklung.

## Wie sind sie entstanden und wie oft passiert das?

Wie sind diese Neutronenstern-Schwarzes-Loch-Systeme entstanden? Dafür gibt es zwei Hauptmöglichkeiten. Eine davon beginnt mit zwei Sternen, die sich bereits gegenseitig umrunden. Die Sterne haben solche Massen, dass sie, wenn sie altern, schließlich als Supernovae explodieren, wobei ein Stern ein Schwarzes Loch und der andere einen Neutronenstern hinterlässt. Dieser Vorgang wird als „isolierte Doppelsternentwicklung“ bezeichnet. Die zweite Möglichkeit ist, dass sich die Neutronensterne und Schwarzen Löcher separat in voneinander unabhängigen Supernova-Explosionen bilden und erst danach zueinander finden. Dies wird als „dynamische Wechselwirkung“ bezeichnet und kann in dicht besetzten Sternumgebungen wie beispielsweise Kugelsternhaufen auftreten. Um zwischen diesen beiden Möglichkeiten zu unterscheiden, geben die Ausrichtungen der Spins der Schwarzen Löcher wichtige Hinweise. Bei einer isolierten Doppelsternentwicklung neigt die Spinrichtung der Schwarzen Löcher dazu, sich mit der Umlaufbahn des Doppelsystems auszurichten; wir erwarten also, dass der Neutronenstern das Schwarze Loch in dessen Äquatorebene umläuft. Im Gegensatz dazu bevorzugt das Szenario der dynamischen Wechselwirkung keine bestimmte Ausrichtung des Spins, und so könnte die Bahn des Neutronensterns eine beliebige Orientierung relativ zur Äquatorebene des Schwarzen Lochs haben.

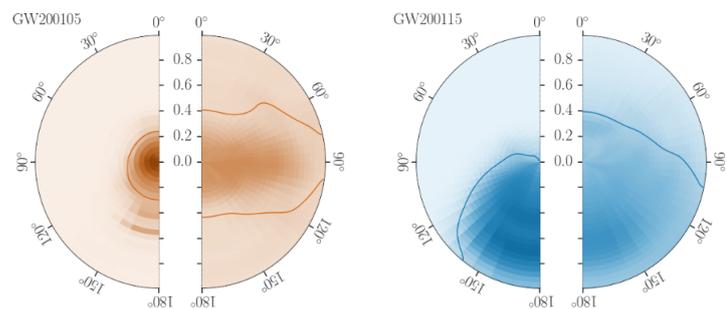


Abb. 3: Die abgeleitete Spinamplitude und -ausrichtung der Schwarzen Löcher (linke Halbkreise) und Neutronensterne (rechte Halbkreise) von GW<sub>200105</sub> und GW<sub>200115</sub>. Der Radius der Scheibe zeigt die Spinamplitude an und liegt zwischen 0 (kein Spin) und 1 (maximale Rotationsrate der Schwarzen Löcher). Die Spinausrichtung wird als Winkel dargestellt, der von 0° (Objekte drehen sich mit der Richtung der Umlaufbahn des Doppelsystems) bis 180° (Objekte drehen sich entgegengesetzt der Richtung der Umlaufbahn des Doppelsystems) reicht. Die Schattierung zeigt die wahrscheinlichen Werte für Amplitude und Ausrichtung des Spins an. Der linke Halbkreis weist eine Schattierung auf, die in der Nähe des Zentrums ihren Höhepunkt erreicht, was darauf hinweist, dass das Schwarze Loch von GW<sub>200105</sub> einen Spin hat, der wahrscheinlich klein ist. Die Schattierung des zweiten Halbkreises von rechts erstreckt sich nach unten, was darauf hinweist, dass das Schwarze Loch von GW<sub>200115</sub> in einer Richtung entgegengesetzt zur Bahnbewegung rotieren könnte.

Die ermittelten Spins des Schwarzen Lochs in GW<sub>200105</sub> erlauben es uns nicht, diese beiden Entstehungsszenarien zu unterscheiden. Für GW<sub>200115</sub> finden wir aber, dass die Spinrichtung des Schwarzen Lochs wahrscheinlich entgegengesetzt zur Umlaufrichtung ist. Wenn zum Beispiel der Neutronenstern das Schwarze Loch im Uhrzeigersinn umkreist, dann würde das Schwarze Loch auf seiner Achse gegen den Uhrzeigersinn rotieren. Dies deutet darauf hin, dass sich die Quelle von GW<sub>200115</sub> in einer dichten Umgebung gebildet haben könnte, wie zum Beispiel in einem Kugelsternhaufen.

Wie viele Neutronenstern-Schwarzes-Loch-Systeme verschmelzen innerhalb eines bestimmten Zeitraums im Universum? Die Beobachtung dieser beiden nun veröffentlichten Systeme sagt uns, dass jedes Jahr zwischen 5 und 15 solcher Systeme in Entfernungen von bis zu einer Milliarde Lichtjahren verschmelzen. Diese geschätzte Verschmelzungsrate könnte jeweils allein durch isolierte Doppelsternentwicklung oder dynamische Wechselwirkung in jungen Sternhaufen erklärt werden, allerdings können wir kein bestimmtes Einzelszenario benennen.

## Glossar

**Inspiral:** Die Bahnbewegung von Objekten in einem Doppelsystem, wie z. B. in einem Neutronenstern-Schwarzes-Loch-System. Da das Doppelsystem durch das Abstrahlen von Gravitationswellen Energie verliert, umkreisen sich Neutronenstern und Schwarzes Loch immer schneller und kommen sich immer näher, bis sie schließlich verschmelzen.

**Neutronenstern:** Der Überrest eines massereichen Sterns, der das Ende seines Lebens erreicht hat. Wenn ein massereicher Stern seinen nuklearen Brennstoff 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 Sterne sind etwa so massereich wie unsere Sonne, haben aber einen Durchmesser von nur einigen zehn Kilometern.

**Schwarzes Loch:** Ein Bereich der Raumzeit mit einer so starken Schwerkraft, dass alles, einschließlich Licht, nicht entkommen kann. Schwarze Löcher gibt es in verschiedenen Größen: Schwarze Löcher mit stellarer Masse entstehen aus kollabierenden Sternen und ihre Massen reichen von einigen Sonnenmassen bis zu etwa 65 Sonnenmassen. Mittelschwere Schwarze Löcher reichen von etwa 100 Sonnenmassen bis zu  $10^5$  Sonnenmassen. Extrem massereiche Schwarze Löcher schließlich liegen in einem Bereich von mehr als  $10^5$  Sonnenmassen bis zu mehr als  $10^9$  Sonnenmassen.

**Kompaktes Doppelsystem:** Ein System aus zwei kompakten Sternüberresten, wie beispielsweise Neutronensternen oder Schwarzen Löchern, die einander sehr eng umrunden.

**Optimalfilter:** Eine Technik zum Erkennen von Signalen, die in verrauschten Daten verborgen sind. Die Daten werden mit Gravitationswellenformen, die aus der allgemeinen Relativitätstheorie berechnet wurden, gescannt. Die Optimalfilter zeigen an, wenn passende Muster in den Daten gefunden werden.

**Allgemeine Relativitätstheorie:** Die Theorie der Schwerkraft, die Albert Einstein 1915 vorgeschlagen hat. In dieser Theorie verhalten sich Raum und Zeit wie ein Gewebe, das sich in Gegenwart von Materie und Energie verformt. Objekte folgen Bahnen durch diese gekrümmte Raum-Zeit.

**Kugelsternhaufen:** Eine sehr dichte Gruppe von Sternen, die durch die Schwerkraft aneinander gebunden sind.

**Elektromagnetisches Spektrum:** Das sichtbare Licht erstreckt sich von Rot bis Violett, aber außerhalb des Bereichs, den unsere Augen sehen können, geht dieses Spektrum weiter. Jenseits von rotem Licht gibt es Infrarot, Mikrowellen und Radiowellen, und jenseits von Violett gibt es Ultraviolett, Röntgenstrahlen und Gammastrahlen. Dies ist das Spektrum der elektromagnetischen Strahlung, und Astronom:innen nutzen jeden Teil des Spektrums, um mehr über das Universum zu erfahren. Elektromagnetische Strahlung sind Wellen von elektrischen und magnetischen Feldern und unterscheidet sich in deren Frequenz oder Wellenlänge.

**Lichtjahr:** Eine Entfernungseinheit, die der Strecke entspricht, die das Licht in einem Jahr zurücklegt. Ein Lichtjahr entspricht ungefähr 9,46 Billionen Kilometern.

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

## Weiterführende Informationen

Besuchen Sie unsere 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/)

Lesen Sie einen kostenlosen Vorabdruck des vollständigen wissenschaftlichen Artikels unter <https://dcc.ligo.org/P2000357/public>.