



LIGO  
Scientific  
Collaboration



## GW151226: Gravitationswellenbeobachtung zweier verschmelzender Schwarzer Löcher mit insgesamt 22 Sonnenmassen

Wenige Monate nach dem [ersten Nachweis](#) von [Gravitationswellen](#), dem Ereignis [GW150914](#), hat das [Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory](#) (LIGO) erneut Gravitationswellen beobachtet, die von der Kollision und Verschmelzung zweier Schwarzer Löcher stammen. Dieses Signal namens **GW151226** erreichte die LIGO-Detektoren am 26. Dezember 2015 um 03:38:53 [UTC](#).

Das Signal, das aus einer Entfernung von etwa 1,4 Milliarden [Lichtjahren](#) stammt, war ein Beispiel einer [„compact binary coalescence“](#) (Verschmelzung binärer kompakter Objekte), bei der zwei extrem dichte Objekte verschmelzen. Solche Binärsysteme sind eine der vielfältigen Quellen von Gravitationswellen, nach denen die LIGO-Detektoren suchen. Gravitationswellen sind Kräuselungen der Raumzeit, die Energie von einem solchen Binärsystem davontreiben, wodurch sich die zwei Objekte auf ihren Umlaufbahnen spiralförmig einander annähern. Diese *inspiral*-Phase bringt die Objekte einander näher und näher, bis sie schließlich verschmelzen. Die vom Binärsystem produzierten Gravitationswellen [dehnen und stauchen](#) die Raumzeit auf ihrem Weg durchs Universum. Diese Dehnung und Stauchung ist es, die Observatorien wie [Advanced LIGO](#) messen, und die uns Informationen über die astrophysikalischen Quellen gibt, die diese Gravitationswellen erzeugten.

GW151226 ist der zweite eindeutige Nachweis eines verschmelzenden Binärsystems Schwarzer Löcher. Zusammen mit GW150914 markiert es den Beginn der Gravitationswellenastronomie als einen revolutionären neuen Weg zur Erkundung der Geheimnisse unseres Universums.

### **DAS SIGNAL**

Genau wie die [erste Beobachtung](#) wurde GW151226 von den zwei Advanced-LIGO-Detektoren in Hanford, Washington und Livingston, Louisiana (beide USA) detektiert. **Abbildung 1** (auf Seite 6 dieses PDF) zeigt die von den beiden Instrumenten gemessenen Daten über die letzte Sekunde des Verschmelzungsereignisses. Die Animation zeigt abwechselnd die Detektor-Rohdaten und die Daten nach Abzug des am besten dazu passenden Signals, sodass es im Vergleich leichter zu erkennen ist. Doch selbst in dieser Darstellung, und anders als bei der ersten Detektion (als das Signal eindeutig aus dem Hintergrund-„Rauschen“ der Detektoren herausstach), ist es in diesem Fall nicht offensichtlich, dass die Daten ein Gravitationswellen-Signal enthalten. Dies liegt an der niedrigeren Signalstärke von GW151226 (auch als Gravitationswellen-Dehnung oder „strain“ bezeichnet). Außerdem ist es schwerer zu erkennen, da das Signal über einen

längeren Zeitraum gestreckt ist, nämlich etwa eine ganze Sekunde im Vergleich zu den nur 0,2 Sekunden beim ersten Ereignis. Trotz dieser Schwierigkeit, das Signal mit bloßem Auge zu erkennen, war unsere Analyse-Software in der Lage, es klar zu identifizieren.

## **WIE WURDE DER NACHWEIS ERBRACHT?**

Der erste Hinweis auf das Signal kam von einer Online-Suche, die in Echtzeit die Detektordaten analysiert, direkt nachdem sie gemessen werden. **Abbildung 2** (auf Seite 7) zeigt die Ergebnisse einer solchen Suchmethode. Diese Analyse identifizierte GW151226 innerhalb von 70 Sekunden nach Ankunft auf der Erde als aussichtsreichen Gravitationswellen-Kandidaten. Etwa eine Minute später war auch die erste grobe Schätzung der Eigenschaften der Signalquelle berechnet. Dabei nutzte diese Suche eine „Angepasste Filter“ genannte Methode, um mögliche Gravitationswellensignale zu identifizieren. Dabei werden die Daten mit einer Vielzahl vorberechneter Signal-Modelle („Wellenformen“ genannt) verglichen („gefiltert“), um das Modell zu finden, das am besten zu den Daten passt. Wenn die Daten beider Detektoren zu gleicher Zeit zu einem Modellsignal passen, ergibt dies einen Gravitationswellenkandidaten. Angepasstes Filtern war eine entscheidende Zutat sowohl für den Nachweis als auch für die detaillierte Analyse von GW151226, vor allem aufgrund der geringeren Signalstärke im Vergleich zum ersten Ereignis GW150914.

Die erste Online-Analyse ergab nur ungefähre Schätzungen für die Eigenschaften des Quellsystems — also der Massen der zwei kompakten Objekte, ihrer Umdrehungsgeschwindigkeiten, Ausrichtung, Entfernung von der Erde und Position am Himmel. Um diese Eigenschaften (oder „Parameter“) genauer zu bestimmen, nutzten wir eine andere Methodik: wir testeten eine weit größere Zahl von verschiedenen Parameterkombinationen und überprüften für jede davon, wie gut die entsprechende vorhergesagte Wellenform mit dem gemessenen Signal übereinstimmt. Dieser Ansatz erlaubt es uns, zu kartieren, welche verschiedenen Parameterkombinationen die Beobachtung erklären können, und für jede die *Wahrscheinlichkeit* zu berechnen, dass es die korrekte ist. **Abbildung 3** (auf Seite 8) zeigt die exzellente Übereinstimmung zwischen dem rekonstruierten Gravitationswellensignal (für Beobachtung mit dem Detektor in Livingston), wie es Parametern aus dem wahrscheinlichsten Bereich entspricht, im Vergleich mit einem Signal, wie es direkt per numerischer Lösung von Einsteins Feldgleichungen aus der Allgemeinen Relativitätstheorie berechnet wurde.

## **WIE KÖNNEN WIR SICHER SEIN, DASS ES EIN ECHTES EREIGNIS WAR?**

Genau wie für den ersten Nachweis (GW150914) führten wir viele Überprüfungen an den Detektoren durch, um sicherzustellen, dass keine Umgebungseinflüsse oder Effekte der Instrumente selbst das Signal erzeugt haben können. Die überprüften Effekte reichen von defekten Kühlschränken bis zu weitentfernten Blitzeinschlägen! Während das Ereignis aufgezeichnet wurde, gab es keinerlei Störungen, die stark genug gewesen wären, um GW151226 zu erklären. Daher konnten wir schließen, dass das Signal astrophysikalischen

Ursprungs sein muss.

## UND WAS HABEN WIR NUN GESEHEN?

Indem wir Millionen berechneter Signale mit den Daten verglichen, konnten wir jene Kombinationen von Binärsystem-Parametern ermitteln, die das Signal gut beschreiben. **Abbildung 4** (auf Seite 9) zeigt die Wahrscheinlichkeitsverteilung möglicher Massen der Einzelobjekte, ermittelt anhand dieser Methode. Aus dieser Abbildung erkennen wir, dass mit 99%-iger Wahrscheinlichkeit die Masse selbst des kleineren Objektes nicht unter dem 4,5-fachen der Masse unserer Sonne liegen kann, was deutlich über dem theoretisch möglichen Maximum der Masse eines [Neutronensterns](#) liegt. Deshalb können wir uns sicher sein, erneut zwei Schwarze Löcher beobachtet zu haben! Die Verteilungen für die zwei Massen der beiden Schwarzen Löcher konzentrieren sich auf die 14- und 8-fache Masse der Sonne. Nach der Verschmelzung ist das verbleibende einzelne Schwarze Loch etwa 21-mal so schwer wie die Sonne.

Möglicherweise drehte sich jedes Schwarze Loch [um seine eigene Achse](#), während die beiden einander umkreisten — genau wie die Erde um ihre Drehachse. Diese Eigenrotation kann in verschiedenen Winkeln um die Achse der Umlaufbahn gekippt sein; bei unserer Erde bewirkt diese Neigung die Jahreszeiten. Wie schnell die Schwarzen Löcher rotieren (der Betrag ihres sogenannten „Spins“) und die Stärke der Neigung (das „spin misalignment“) beeinflusst auch die Länge des messbaren Gravitationswellensignals. Wenn die Spins groß sind und die Drehrichtung der Umlaufbewegung des Binärsystems entspricht, können sich die zwei Schwarzen Löcher einander sehr weit annähern, bevor sie verschmelzen. Falls die beiden Schwarzen Löcher jedoch gegenläufig zu ihrer Umlaufbahn rotieren, werden sie bei größerem Restabstand verschmelzen und so ein kürzeres Gravitationswellensignal erzeugen. Wenn die Spins (Eigenrotationen) und Umlaufbewegung nicht aneinander ausgerichtet sind, „wackelt“ das ganze Binärsystem während seiner spiralförmigen Annäherung, was auch als die [Präzession](#) der Spins bezeichnet wird.

**Abbildung 5** (auf Seite 10) zeigt mögliche Spins und ihre Ausrichtung, und wie wahrscheinlich sie zu den Daten passen. Wir konnten herausfinden, dass das primäre Schwarze Loch (das massivere der zwei) eine höhere Wahrscheinlichkeit für einen entlang der Umlaufbewegung ausgerichteten Spin hat. Jedoch können wir nicht ermitteln, ob und wie sein Spin geneigt ist. Diese Abbildung zeigt auch, dass wir leider keine klaren Aussagen über den Spin des leichteren Schwarzen Loches treffen können.

Nach der Verschmelzung rotiert auch das verbleibende Schwarze Loch. Wir ermittelten, dass dieses neue Schwarze Loch mit 70% der maximal möglichen Rate rotiert.

Die Masse des verbleibenden Schwarzen Loches ist geringer als die Summe der zwei ursprünglichen Massen, da ein Teil dieser Anfangsmasse direkt in abgestrahlte Gravitationswellen umgewandelt wird, während die Objekte sich annähern und miteinander verschmelzen. Der Unterschied in den Massen entspricht in etwa der Umwandlung der ganzen Masse unserer Sonne in abgestrahlte Gravitationswellenenergie.

In der Spitze war die abgestrahlte Leistung dieses Binärsystems in Gravitationswellen größer als die gesamte Licht-Leistung (von Astronomen [Leuchtkraft](#) genannt) aller Sterne und Galaxien im beobachtbaren Universum!

Wir können auch feststellen, dass diese Verschmelzung in einer Entfernung von etwa 1,4 Milliarden [Lichtjahren](#) stattfand — diese Gravitationswellen haben also bis zu uns auf der Erde eine ähnliche Entfernung zurückgelegt wie die vom ersten Ereignis GW150914.

Zudem können wir den Unterschied in den Ankunftszeiten der Gravitationswellen in den zwei Detektoren nutzen, um die Position der Quelle am Himmel zu „triangulieren“. Jedoch ist diese Schätzung der Himmelsposition mit nur den zwei LIGO-Detektoren ziemlich ungenau. Die Position von GW151226 konnten wir auf eine Himmelsregion von 850 [Quadratgrad](#) einschränken — etwa 4000-mal die Fläche des Vollmonds. Die Genauigkeit dieser Triangulation wird in Zukunft mit zusätzlichen Gravitationswellendetektoren deutlich verbessert werden, siehe [diesen Artikel](#) für weitere Details.

GW151226 verbrachte etwa 1 Sekunde in dem Frequenzbereich, für den die LIGO-Detektoren empfindlich sind, womit es ein viel längeres Signal als das erste von nur 0,2 Sekunden war. Diese längere Dauer liegt an den niedrigeren Massen der Schwarzen Löcher in diesem Binärsystem: mehr von der Inspiral-Phase dieses Ereignisses konnte im empfindlichen Messbereich beobachtet werden. Eine längere Inspiral-Phase bedeutet auch, dass wir GW151226 dazu nutzen können, mögliche Abweichungen von der [Allgemeinen Relativitätstheorie](#) besser auszuschließen. Dabei fanden wir keine Hinweise darauf, dass Einstein falsch gelegen haben könnte.

## **WAS BEDEUTET GW151226 FÜR DIE ASTROPHYSIK?**

GW151226 ist die erste direkte Beobachtung eines Binärsystems Schwarzer Löcher in diesem Massenbereich. Da Schwarze Löcher kein Licht ausstrahlen, erlauben es uns ihre Gravitationswellensignale, neue Binärsysteme zu entdecken, die auf keine andere Weise direkt beobachtbar sind. Dennoch können wir unsere Ergebnisse darauf überprüfen, ob sie zu anderweitigen astrophysikalischen Erkenntnissen passen. Zum Beispiel sind die von uns gemessenen Massen (für die ursprünglichen Schwarzen Löcher und das Endprodukt) von GW151226 verträglich mit den Massen anderer Schwarzer Löcher, die aus Beobachtungen von [Röntgen-Doppelsternen](#) ermittelt wurden. Jedoch wurde unsere Gravitationswellen-Messung mit komplett unabhängigen Methoden gewonnen.

Binärsysteme aus Schwarzen Löchern können auf verschiedenen Wegen entstehen. Sie könnten aus zwei massiven Sternen entstanden sein, die zusammen geboren wurden und sich gemeinsam entwickelten, bis sie am Ende ihrer Leben zu einem Paar Schwarzer Löcher wurden. Alternativ können in Regionen des Universums mit besonders hoher Sternendichte auch Binärsysteme erzeugt werden, indem zwei einzeln entstandene Schwarze Löcher später miteinander interagieren und einander „einfangen“. Die Eigenschaften von GW151226 sind mit beiden Ursprungsszenarien verträglich, sodass wir derzeit keines dem anderen vorziehen können.

Jedoch deuten GW151226 und GW150914 gemeinsam darauf hin, dass es im Universum öfter zu Kollisionen Schwarzer Löcher kommt, als zuvor erwartet. Diese ersten Nachweise sind bedeutende Schritte auf dem Weg zu einem tieferen Verständnis der Population solcher Binärsysteme, die zuvor völlig vor uns verborgen war.

## **ZENTRALE ERGEBNISSE**

Advanced LIGO hat erneut die Verschmelzung zweier Schwarzer Löcher beobachtet. Gemeinsam zeigen die Beobachtungen von GW151226 und GW150914 uns die Existenz einer ganzen Population solcher Binärsysteme in unserem Universum. Gravitationswellenbeobachtungen haben somit die Existenz Schwarzer Löcher nachgewiesen und eröffnen uns ein ganz neues Beobachtungsfenster auf die Mysterien des Universums. Die Ära der Gravitationswellenastronomie hat somit tatsächlich begonnen!

## **WEITERE INFORMATIONEN (teils auf Englisch)**

- Original-Fachartikel in Physical Review Letters:  
<http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.116.241103>
- Englische Originalversion dieser Zusammenfassung:  
<http://ligo.org/science/Publication-GW151226/index.php>
- oder als PDF:  
<http://www.ligo.org/science/Publication-GW151226/flyer.pdf>
- Homepage der LIGO Scientific Collaboration:  
[www.ligo.org](http://www.ligo.org)
- weiterführende Links zu unseren wissenschaftlichen Veröffentlichungen:  
<https://papers.ligo.org>
- Homepage von Advanced Virgo: <http://public.virgo-gw.eu/language/en/>
- Hintergrundinformationen zu den technischen Verbesserungen von Advanced LIGO: <http://tinyurl.com/ALIGO-upgrades-pdf>
- LIGO Open Science Center (erlaubt Zugriff auf Originaldaten zu GW151226):  
<https://losc.ligo.org>
- Homepage des Albert-Einstein-Instituts: [www.aei.mpg.de](http://www.aei.mpg.de)  
(deutsche Version: <http://www.aei.mpg.de/2162/de> )

## ABBILDUNGEN AUS DER ORIGINALVERÖFFENTLICHUNG

Weitere Informationen dazu, wie diese Graphiken erzeugt wurden, und zu ihrer Bedeutung finden sich in unserem [Fachartikel](#) in [Physical Review Letters](#).

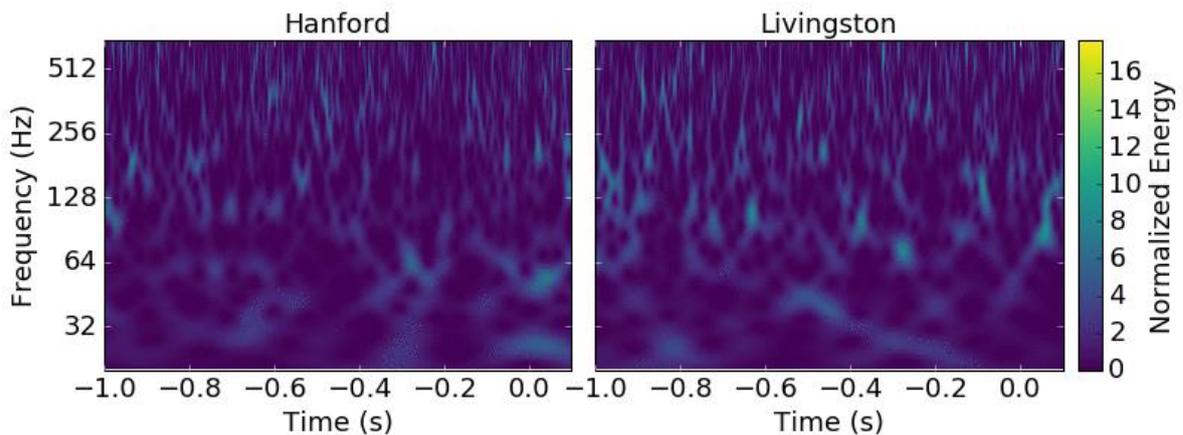


Abbildung 1. (basiert auf Abbildung 1 aus dem Fachartikel). Das Gravitationswellenereignis GW151226, wie es von den beiden Advanced-LIGO-Detektoren beobachtet wurde: LIGO Hanford (links) und LIGO Livingston (rechts). Diese Abbildung zeigt die von den Detektoren während der letzten Sekunde vor der Verschmelzung aufgezeichneten Daten, während das Signal sich in Abhängigkeit von Zeit (in Sekunden) und [Frequenz](#) (in Hertz, entsprechend der Anzahl von Wellenzyklen pro Sekunde) entwickelt. Um sicher zu sein, dass ein echtes Gravitationswellensignal beobachtet wurde, vergleichen wir die Detektordaten mit einem Satz vorberechneter Modelle von Binärsystemverschmelzungen. Dies erlaubt uns, auch Gravitationswellen zu entdecken, die tief im Detektor-Rauschen vergraben sind, und mit bloßem Auge kaum zu entdecken wären. Die Animation zeigt abwechselnd die Detektor-Rohdaten und die Daten nach Abzug des am besten dazu passenden Signalmodells, sodass dieses im Vergleich leichter zu erkennen ist. Man sieht, wie das Signal in der Frequenz ansteigt, während die zwei Schwarzen Löcher sich einander spiralförmig annähern. Das Signal ist mit bloßem Auge viel schwieriger zu entdecken als das zuerst beobachtete Ereignis [GW150914](#)!

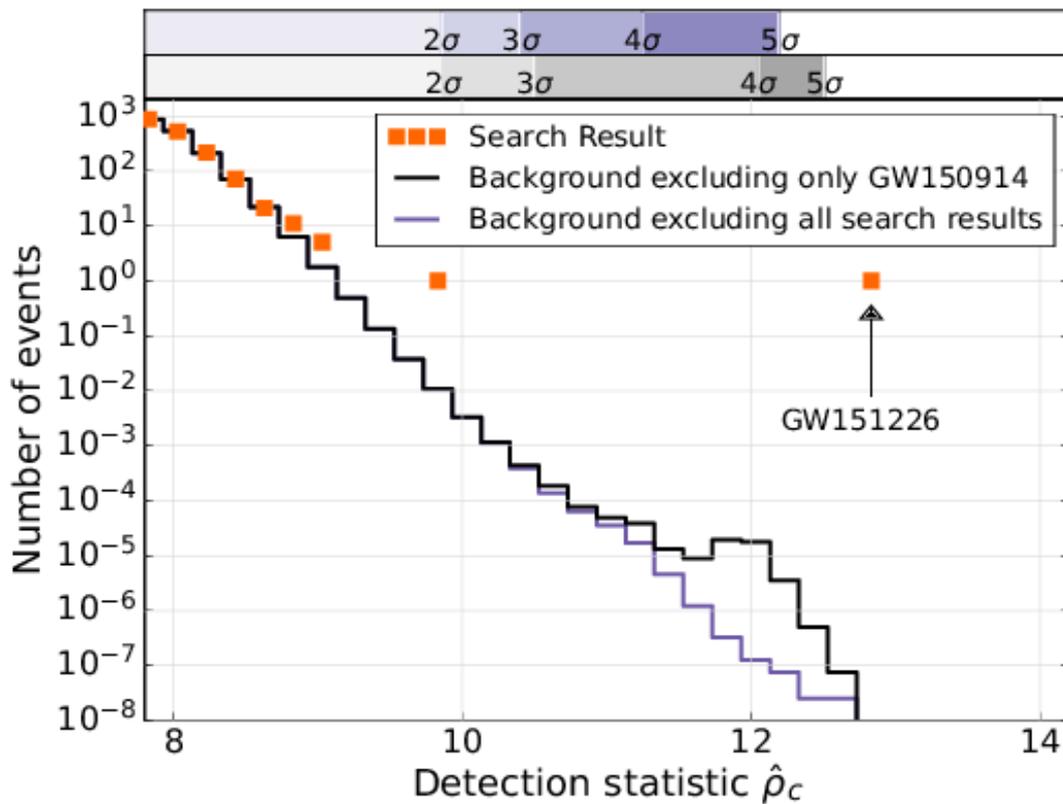


Abbildung 2. (basiert auf Abbildung 2 aus dem Fachartikel). Ergebnisse unserer Suche nach Gravitationswellenereignissen wie GW151226 und GW150914. Dies zeigt die Signifikanz dieser Beobachtungen im Vergleich zum Hintergrund falscher „Signale“, wie sie vom Hintergrundrauschen der LIGO-Detektoren selbst erzeugt werden. Wie man sieht, wurde GW151226 deutlich über dem Niveau des Hintergrundrauschens detektiert.

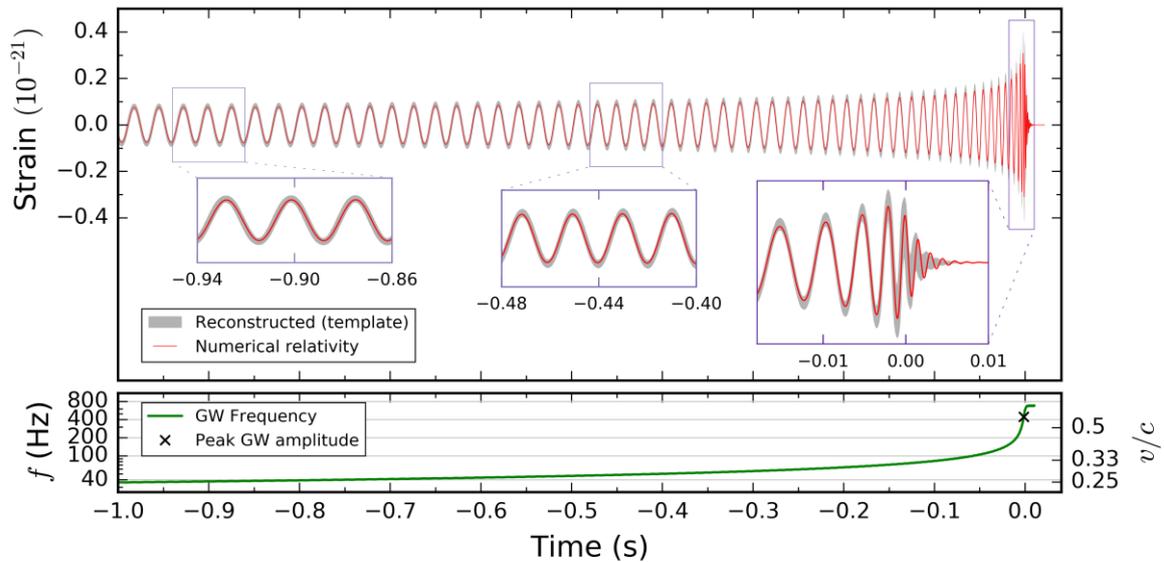


Abbildung 3. (basiert auf Abbildung 5 aus dem Fachartikel). Die obere Graphik zeigt einen Vergleich des rekonstruierten Gravitationswellen-„Strain“-Signals, in Abhängigkeit von der Zeit und gemessen im Livingston-Detektor, (grau) mit einem Signal, das aus einer Simulation (numerischen Lösung der Allgemeinen Relativitätstheorie) berechnet wurde. Die Zeit in Sekunden läuft hier rückwärts, mit der Verschmelzung der zwei Schwarzen Löcher bei Zeit Null. Die untere Graphik zeigt, wie die Frequenz der Gravitationswellen sich mit der Zeit entwickelt: sie steigt an, während sich die Schwarzen Löcher einander spiralförmig annähern. Dies kann auch mit der Umlaufgeschwindigkeit  $v$  verglichen werden, die auf der rechten Achse der unteren Abbildung in Einheiten der Lichtgeschwindigkeit  $c$  aufgetragen ist. Das schwarze Kreuz zeigt den Punkt der größten Signalstärke, was auch ungefähr dem Zeitpunkt der Verschmelzung entspricht.

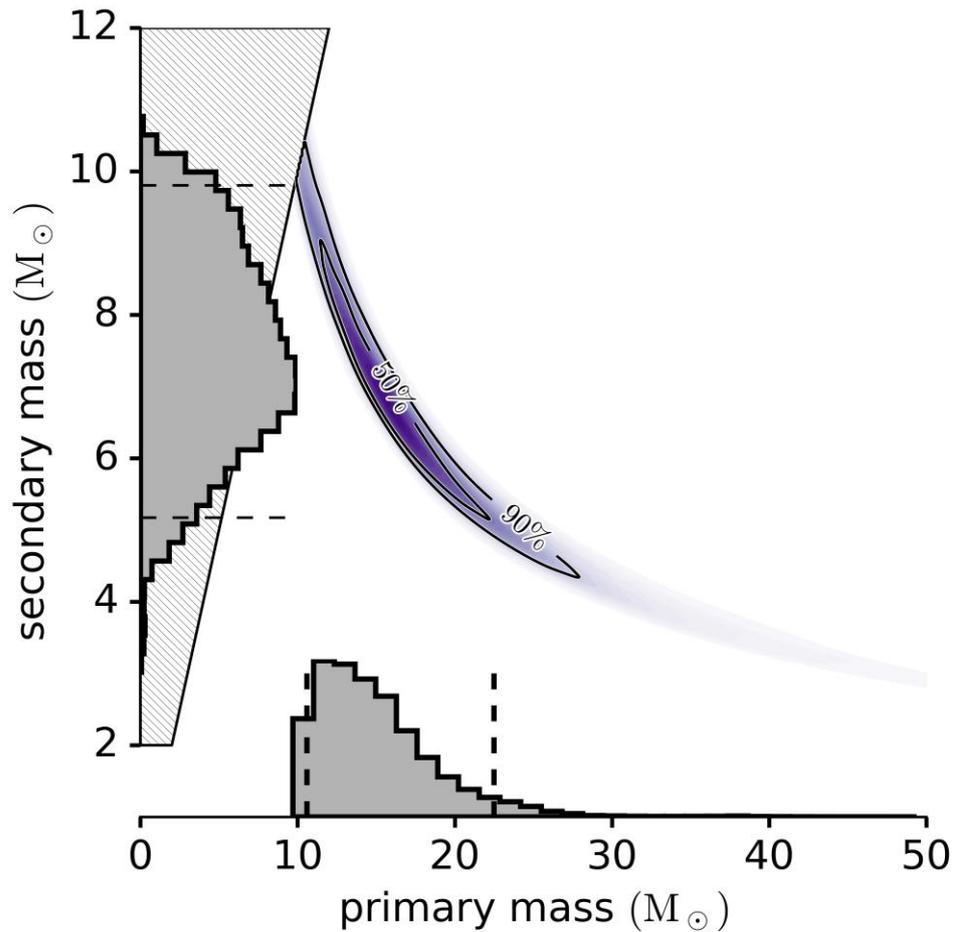


Abbildung 4. (basiert auf Abbildung 3 aus dem Fachartikel). Diese Abbildung zeigt die möglichen Kombinationen der Massen der beiden Schwarzen Löcher (in Einheiten der Masse unserer Sonne), die unsere Messungen erklären können. Dabei bezeichnen wir das schwerere Loch als das primäre (primary) und das leichtere als das sekundäre (secondary). Dunklere Bereiche entsprechen Massenkombinationen mit höherer Wahrscheinlichkeit, wobei wir 90% Wahrscheinlichkeit dafür ermitteln, dass die beiden Massen von GW151226 innerhalb des schwarzen Umrisses liegen, der mit '90%' beschriftet ist.

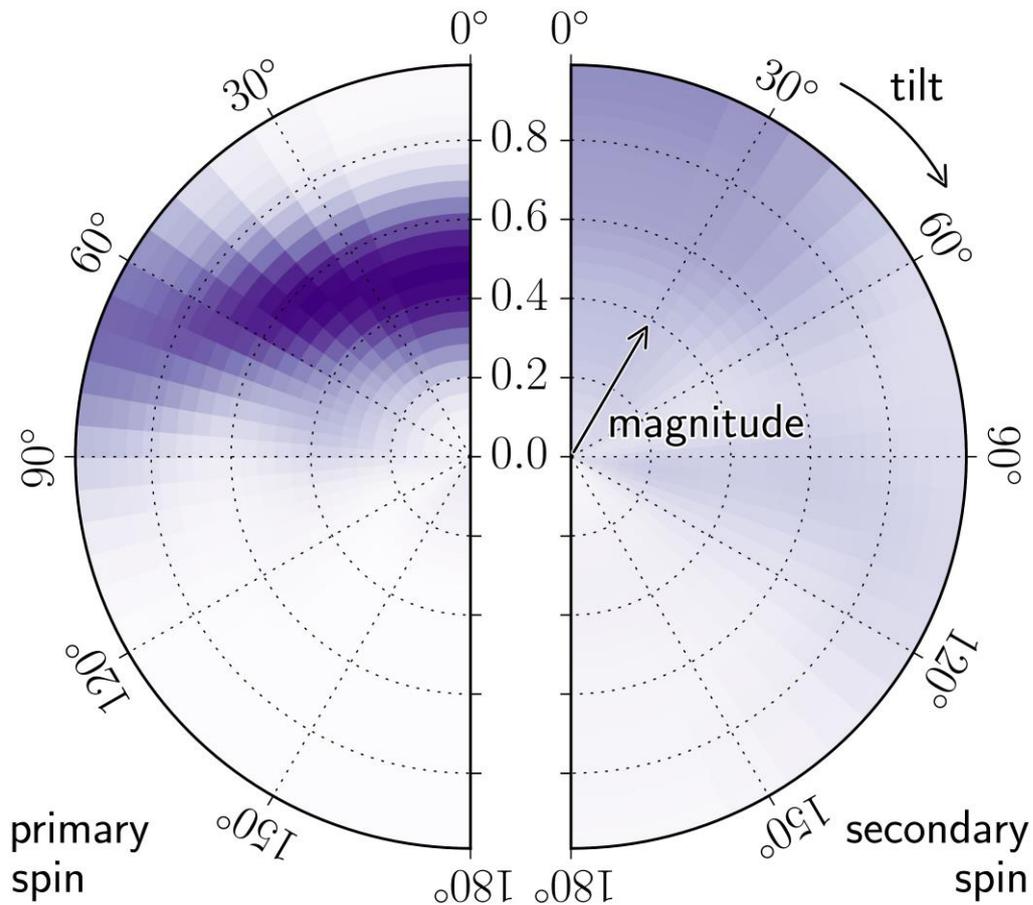


Abbildung 5. (basiert auf Abbildung 4 aus dem Fachartikel). Diese Abbildung zeigt die möglichen Rotationsraten (Spin-Werte) und Neigungen zur Umlaufbewegung (spin misalignments) der zwei Schwarzen Löcher in GW151226. Dabei bezeichnen wir das schwerere Loch als das primäre (primary) und das leichtere als das sekundäre (secondary). Jedes Pixel in einem der Halbkreise entspricht einer möglichen Kombination von Spin-Betrag und Neigung, wobei dunklere Flächen Kombinationen mit höherer Wahrscheinlichkeit entsprechen. Somit können wir gewisse Schlüsse auf den Spin-Betrag und die Spin-Neigung des primären Schwarzen Loches ziehen, jedoch keine für das sekundäre.