

GW170104: Beobachtung des Verschmelzens von zwei Schwarzen Löchern mit insgesamt 50 Sonnenmassen und einer Rotverschiebung von 0,2

EINLEITUNG

Im September 2015 hatten die beiden [Advanced-LIGO](#)-Detektoren (zweite Generation des *Laser-Interferometer-Gravitationswellen-Observatoriums*, auf Englisch *Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory*) den ersten direkten Nachweis von Gravitationswellen erbracht, die von zwei mehr als eine Milliarde Lichtjahre entfernten verschmelzenden Schwarzen Löchern stammten. Jene Entdeckung, genannt [GW150914](#), gelang einhundert Jahre nach der Vorhersage der Gravitationswellen aus Albert Einsteins [Allgemeiner Relativitätstheorie](#). Im Oktober 2015 wurde wahrscheinlich ein zusätzliches Ereignis ([LVT151012](#)) beobachtet, und im Dezember 2015 folgte dann eine zweite eindeutig bestätigte Beobachtung ([GW151226](#)) - wiederum ausgestrahlt von einem Paar verschmelzender [Schwarzer Löcher](#).

Advanced LIGO begann im November 2016 mit einer weiteren Beobachtungskampagne, nachdem an beiden Detektoren Verbesserungen zur weiteren Steigerung ihrer bemerkenswerten Messempfindlichkeit vorgenommen worden waren. Etwa einen Monat später gelang ein weiterer klarer Gravitationswellen-Nachweis, genannt [GW170104](#). In diesem Artikel fassen wir zusammen, wie GW170104 entdeckt wurde, was wir über die beteiligten Schwarzen Löcher erfahren haben, und wie diese neue LIGO-Entdeckung unser Verständnis von Schwerkraft und Raumzeit erweitert.

NACHWEIS DES SIGNALS GW170104

GW170104 wurde von den Advanced-LIGO-Detektoren in Hanford (Washington State, USA) und Livingston (Louisiana, USA) entdeckt. Eingehende Untersuchungen des Status der Detektoren zu dieser Zeit, ähnlich denen zur Bestätigung der ersten Ereignisse (siehe [hier](#) und [hier](#)), ergaben, dass beide Detektoren ordnungsgemäß arbeiteten.

Die oberen beiden Teilbilder von [Abbildung 1](#) zeigen die von den beiden LIGO-Detektoren zum Zeitpunkt von GW170104 aufgenommenen Daten. Das Signal von GW170104 ähnelt stark dem von GW150914: in beiden Fällen zeigen die LIGO-Daten deutlich das typische „Chirp“-Muster, wie es von Gravitationswellen zu erwarten ist, wie sie verschmelzende Schwarze Löcher aussenden: eine steil ansteigende Frequenz und Signalstärke (Amplitude), denn die beiden Schwarzen Löcher umkreisen einander schneller und schneller, bevor sie schließlich verschmelzen.

Mit einer als „optimaler Filter“ ([matched filter](#), siehe auch [hier](#) und [hier](#)) bekannten Methode wurden diese Daten mit einem Satz theoretisch berechneter Modellsignale („Wellenformen“) verglichen. So konnten das am besten passende Modell gefunden und die physikalischen Eigenschaften der Quelle dieser Gravitationswellen ermittelt werden: unter anderem die Massen der Schwarzen Löcher sowie die ungefähre Himmelsrichtung, aus der das Signal kam. Erste Schätzungen dieser Eigenschaften wurden früh an unsere Partner-Astronomen aus aller Welt geschickt, damit diese nach sogenannten „[elektromagnetischen](#) Gegenstücken“ suchen konnten - Lichtsignale, die vom selben Ereignis wie die Gravitationswellen stammen könnten. ([Hier](#) findet sich mehr zu solch einer Suche für GW150914.)

BESTIMMUNG DER EIGENSCHAFTEN VON GW170104

Eine eingehendere Datenanalyse mit „optimalen Filtern“ wurde in den folgenden Wochen auf Supercomputern durchgeführt. Das erste Ziel dieser Auswertung war, die statistische [Signifikanz](#) der Beobachtung zu ermitteln, indem wir die „[Fehlalarmrate](#)“ für das Ereignis berechneten - also wie oft wir in unseren beiden Detektoren gleichzeitig ein übereinstimmendes, GW170104 ähnelndes Signal messen würden, nur durch zufällige Übereinstimmungen von Störeffekten. Je niedriger die Fehlalarmrate, desto geringer die Chance, dass GW170104 nur ein Messartefakt der Geräte selbst sein könnte.

(Weitere Details darüber, wie Fehlalarmraten mit LIGO-Daten berechnet werden, finden sich [hier](#) und [hier](#).) Wir berechneten eine Fehlalarmrate von weniger als einer solchen Messung all alle 70.000 Jahre - selten genug, um zu zeigen, dass GW170104 tatsächlich mit großer Sicherheit einem echten astrophysikalischen Ereignis entspricht!

Der dritte Teil von [Abbildung 1](#) vergleicht die am besten passende Modell-Wellenform mit der gemessenen Daten-Zeitreihe von GW170104. (Angegeben als Gravitationswellen-„Strain“, der Verzerrung der Detektoren, was der relativen Abstandsänderung zwischen zwei Messpunkten entspricht, wenn eine Gravitationswelle sie erreicht.). Der letzte Teil der Abbildung zeigt den Unterschied zwischen diesen Daten und unserem besten Modell; wie man sieht, passt dieses Modell sehr gut zu den Messdaten.

Weitere Supercomputer-Auswertungen ermöglichten uns dann genauere Schätzungen der physikalischen Eigenschaften von GW170104 - etwa der Massen der einzelnen verschmelzenden Objekte, der Entfernung zwischen Quelle und Erde, ihrer Lage am Himmel, der Ausrichtung der Umlaufbahn der beiden Objekte zu unserer Sichtlinie, sowie der Rotation der Objekte („Spins“) und deren möglicher Auswirkungen auf eine [Präzession](#) der Umlaufbahn. Dies erforderte, Millionen verschiedener Kombinationen dieser Parameter auszuprobieren und zu überprüfen, wie gut die daraus vorhergesagten Wellenformen das von LIGO gemessene Signal reproduzieren. (Siehe auch [hier](#) und [hier](#) für weitere Informationen dazu, wie Gravitationswellen-Parameter ermittelt werden.)

ABBILDUNGEN AUS DEM FACHARTIKEL

Weitere Informationen zur Erstellung und Bedeutung dieser Abbildungen finden sich in unserem [Fachartikel](#) in *Physical Review Letters*.

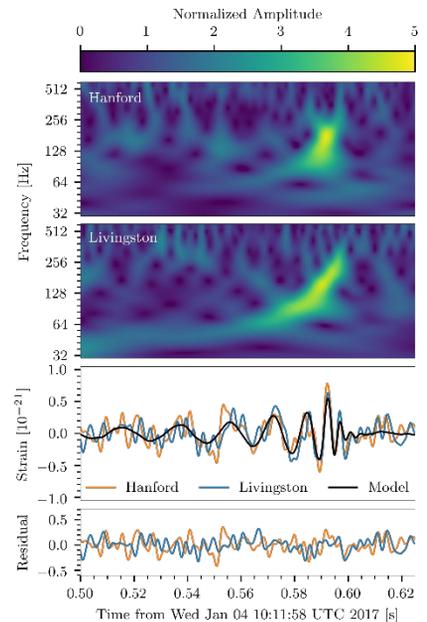


Abbildung 1: Die oberen beiden Teilabbildungen zeigen die Frequenzentwicklung des Signals, wie es von jedem der beiden Advanced-LIGO-Detektoren gemessen wurde, über eine Zeitspanne von etwa 0,1 Sekunden. Die Stärke („Normalized Amplitude“) des Signals wird von der Farbskala angezeigt.

Im dritten Teil vergleichen wir die am besten passende Modell-Wellenform (schwarze Kurve) einer Verschmelzung zweier Schwarzer Löcher mit dem gemessenen Gravitationswellen-„Strain“-Signal. Hier wurden die Daten um die 3 Millisekunden Unterschied in der Ankunftszeit zwischen den Detektoren in Hanford und in Livingston korrigiert, sowie für die verschiedenen Ausrichtungen der Interferometer-Arme beider Detektoren.

Ganz unten zeigen wir die Differenz zwischen Daten und unserem besten Modell; es verbleibt kein erkennbares Restmuster.



unsere
Webseite:

<http://www.ligo.org/>

Wir können auch die Genauigkeit unserer für GW170104 ermittelten Parameter abschätzen - sowohl einzeln als auch in Kombinationen. Abbildung 2 zeigt als ein Beispiel, was wir über die Einzelmassen der beiden beteiligten Objekte wissen: eines war etwa 30-mal so schwer wie unsere Sonne und eines etwa 20-mal. GW170104 muss also von einem Paar verschmelzender Schwarzer Löcher ausgegangen sein, da dies die einzigen hinreichend schweren und kompakten Objekte sind. Abzüglich der für das am Ende zurückbleibende einzelne Schwarze Loch geschätzten Masse wissen wir dann auch, dass die bei dieser Verschmelzung insgesamt als Gravitationswellen ausgestrahlte Energie etwa zwei ganzen Sonnenmassen entsprach. Und die maximale Leistung in Form von Gravitationswellen war für einen kurzen Moment höher als die gesamte Leuchtkraft aller Sterne im gesamten beobachtbaren Universum!

Außerdem haben wir die Entfernung zur Quelle von GW170104 berechnet: dieses Ereignis fand vermutlich etwa zweimal so weit von uns weg statt wie GW150914, in einer Entfernung von etwa 3 Milliarden Lichtjahren. Damit war GW170104 so weit weg, dass die Gravitationswellen, als sie die Erde erreichten, durch die Expansion des Universum um etwa 20% gedehnt worden waren - die sogenannte kosmologische [Rotverschiebung](#), auch bekannt vom Licht weit entfernter Galaxien. Eine vollständige Tabelle der berechneten Parameter von GW170104 findet sich im [Fachartikel](#) sowie im [Datenblatt](#).

WAS HABEN WIR AUS GW170104 GELERNT?

Die Population stellarer Schwarzer Löcher

GW170104 ist nun der dritte sichere direkte Nachweis von Gravitationswellen, und wenn man auch den „Kandidaten“ LVT151012 mitzählt, ist es bereits das vierte Mitglied unseres wachsenden „Familienalbums“ von Binärsystemen massiver Schwarzer Löcher mit direkt gemessenen Massen. Abbildung 2 zeigt die für GW170104 ermittelten Massen auch im Vergleich zu den anderen drei Ereignissen: wie man sieht, liegt GW170104 genau in der Lücke zwischen GW150914 und LVT151012. Diese Beobachtung hat damit auch unser Wissen darüber verbessert, wie oft Schwarze Löcher im Universum verschmelzen. Obwohl diese Verschmelzungsrate noch ziemlich ungenau bekannt ist, könnten unsere Ergebnisse bereits eine gewisse Herausforderung für manche Modelle zur Entstehung und Entwicklung Schwarzer Löcher darstellen.

Solche Modelle können auch durch Messungen der „Spins“ von Schwarzen Löchern weiter eingegrenzt werden - da beispielsweise verschiedene Modelle verschiedene Vorhersagen darüber machen, ob die Rotationsachsen der beiden Schwarzen Löcher parallel oder mehr oder weniger schief zueinander stehen. Obwohl wir die Spin-Parameter noch nicht sehr genau messen können, deuten unsere Messungen bereits daraufhin, dass eher schräg zueinander stehende Achsen verbreitet sein könnten.

Überprüfung der Allgemeinen Relativitätstheorie

Dieser dritte sichere Nachweis von Gravitationswellen verbessert auch unsere Möglichkeiten, grundlegende Eigenschaften von Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie zu überprüfen. In Kombination der Ergebnisse von GW170104, GW150914 und GW151226 haben wir spezifische Vorhersagen der Relativitätstheorie für die gemessenen Wellenformen überprüft und systematisch nach Abweichungen der Daten von diesen Vorhersagen gesucht. Die Ergebnisse stimmen mit denen von den vorherigen Ereignissen allein (siehe [hier](#) und [hier](#)) überein, und Einsteins Theorie hat der Überprüfung somit erneut glänzend standgehalten!

Dass GW170104 so weit entfernt ist, erlaubte uns auch eine weitere Vorhersage der Relativitätstheorie zu überprüfen: dass Gravitationswellen sich genau mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten und lediglich von der Expansion des Universums verzerrt werden. Wellen im Allgemeinen können auseinandergedrückt werden, wenn sie bestimmte Medien durchqueren: die Wellenform wird verzerrt, da Anteile mit verschiedenen Frequenzen sich nun verschieden schnell bewegen. (Die sogenannte „[Dispersion](#)“. Ein alltägliches Beispiel für dieses Phänomen ist etwa die Brechung weißen Lichts in einen

[Regenbogen](#). Andererseits laufen Schallwellen auf dem Weg durch die Luft eines Konzertsaals kaum auseinander; falls doch, würden die Töne einer Piccolo-Flöte und des Kontrabass das Publikum außer Takt erreichen.) Laut der Allgemeinen Relativitätstheorie sollten die Gravitationswellen von GW170104 auf ihrer Milliarden Lichtjahre langen Reise zu uns keinerlei Dispersion erlitten haben. Da manche Alternativtheorien jedoch die Dispersion von Gravitationswellen voraussagen, haben wir, um dies zu überprüfen, ein einfaches Dispersions-Modell verwendet, und dieses mit unseren Beobachtungen von GW170104 verglichen - erneut auch in Kombination mit unseren früheren Beobachtungen GW150914 und GW151226.

Abbildung 3 zeigt die ermittelten Grenzwerte für die Stärke möglicher Dispersionseffekte, gemäß einem weiteren Parameter α des verwendeten Modells. Man sieht, dass höchstens eine winzige Dispersion möglich wäre, um noch mit den Beobachtungen konsistent zu bleiben. Die Vorhersage der Relativitätstheorie (genau gar keine Dispersion) hat also erneut der Überprüfung standgehalten. Für den Spezialfall eines Wertes $\alpha = 0$ kann man unsere Ergebnisse auch als obere Schranke für die Masse der [Gravitonen](#) übersetzen - Teilchen, die man sich als Quanten der Gravitationswellen vorstellen kann, so wie Photonen die Quanten von Lichtwellen sind. Unser Ergebnis für die maximale Gravitonenmasse, kombiniert aus allen drei gesicherten Gravitationswellen-Ereignissen, ist mehr als 50% genauer als zuvor veröffentlichte Grenzwerte.

Die zweite Beobachtungskampagne von Advanced LIGO wird bis zur Jahresmitte 2017 weitergehen, und [Advanced Virgo](#) soll ebenfalls bald mit Messungen beginnen. Mit weiteren Beobachtungen erwarten wir in der Zukunft, genauere Erkenntnisse über die Entstehungsgeschichte Schwarzer Löcher zu gewinnen, und die Allgemeine Relativitätstheorie noch intensiver überprüfen zu können.

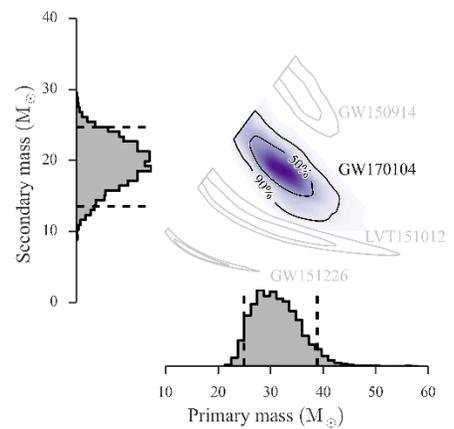


Abbildung 2: Hier sehen wir den Bereich möglicher Massen für die beiden ursprünglichen Schwarzen Löcher (in Einheiten der Sonnenmasse), der zum gemessenen GW170104-Signal passt. Die Konturen im oberen rechten Teil der Abbildung zeigen die mit den Daten verträglichen Kombinationen der Massen beider Schwarzer Löcher. Regionen mit dunklerer Färbung zeigen Massenkombinationen mit höherer Wahrscheinlichkeit. Die grauen Balkendiagramme (Histogramme) an beiden Seiten zeigen die relative Wahrscheinlichkeit verschiedener Massen, wenn man jedes der beiden Schwarzen Löcher einzeln betrachtet, mit wahrscheinlichsten Werten von 30 bzw. 20 Sonnenmassen. Wahrscheinlichkeitskonturen für die Massen der an den drei vorherigen Ereignissen beteiligten Schwarzen Löcher sind in hellgrau aufgetragen. (Angepasste Version von Abbildung 2 des Fachartikels.)

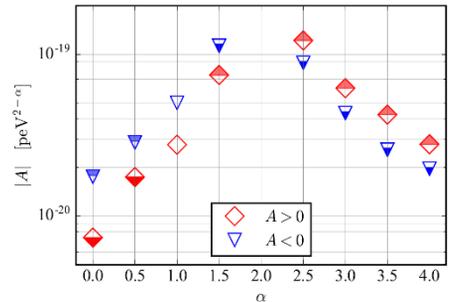


Abbildung 3: Aus den Messungen von GW170104 abgeleitete Höchstwerte für den Betrag (Absolutwert) $|A|$ des Dispersionsparameters A , aufgetragen gegen verschiedene Annahmen über den Modellparameter α . Das theoretische Modell für Abweichungen von der Allgemeinen Relativitätstheorie erlaubt sowohl positive als auch negative Werte von A . Dies ist durch die verschiedenfarbigen Symbole dargestellt, und wie wir sehen, ergeben sich in beiden Fällen ähnliche Grenzen. Die Relativitätstheorie sagt dabei einen Wert von exakt $A = 0$ voraus.

WEITERFÜHRENDE INFORMATIONEN:

- [Fachartikel](#) zu GW170104 in der Zeitschrift Physical Review Letters (englisch)
- [Homepage](#) der LIGO Scientific Collaboration (englisch)
- [Homepage](#) von Advanced LIGO (englisch)
- [Homepage](#) von Advanced Virgo (englisch)
- [Homepage](#) des Albert-Einstein-Instituts (deutsch/englisch)
- [LIGO Open Science Center](#)
- (Direktzugriff auf die Rohdaten zu GW170104, englisch)