

GW170814: BEOBACHTUNG DER GRAVITATIONSWELLEN ZWEIER VERSCHMELZENDER SCHWARZER LÖCHER DURCH DREI DETEKTOREN

GW170814 ist der vierte bestätigte Nachweis von Gravitationswellen, den die LIGO Scientific Collaboration und die Virgo Collaboration vermelden können. Das Signal stammt von einem Paar verschmelzender schwarzer Löcher stellarer Masse und ist das erste, das auch von Advanced Virgo beobachtet wurde. Diese Detektion zeigt die gesteigerte Fähigkeit eines globalen Drei-Detektor-Netzwerks (die beiden Advanced-LIGO-Detektoren sowie Advanced Virgo umfassend), eine Gravitationswellenquelle am Himmel zu lokalisieren und die Allgemeine Relativitätstheorie zu testen. GW170814 bedeutet somit einen spannenden neuen Durchbruch für das neu entstehende Feld der Gravitationswellenastronomie.

EINLEITUNG

Am 01.08.2017 hat sich der [Advanced Virgo](#) Detektor der zweiten Beobachtungskampagne (O2) von [Advanced LIGO](#) angeschlossen, welche vom 30.11.2016 bis zum 25.08.2017 andauerte. Am 14.08. um 10:30:43 [UTC](#) wurde ein kurzes Gravitationswellensignal, inzwischen mit GW170814 bezeichnet, von einem Programm gefunden, das die aufgenommenen Daten der drei Advanced-Detektoren automatisch analysiert. Dieses Signal entsprach den letzten Momenten zweier verschmelzender [Schwarzer Löcher](#) von einem Vielfachen der Sonnenmasse. Nachfolgende Analyse, basierend auf sämtlichen zur Verfügung stehenden Informationen aller drei Detektoren, zeigte auch im Advanced-Virgo-Detektor eindeutig ein vorhandenes Signal. Damit ist GW170814 das erste bestätigte Gravitationswellenereignis, das von allen drei Detektoren beobachtet wurde.

DETEKTOREN UND DATENQUALITÄT

Die LIGO- und Virgo-Detektoren sind gigantische [Michelson-Laserinterferometer](#) mit vier bzw. drei Kilometer langen Armen. Die LIGO-Detektoren befinden sich in Hanford (Washington State, USA) und Livingston (Louisiana, USA) während sich Virgo in Cascina, Italien befindet. Die drei Detektoren wurden in den 90er Jahren entworfen, um das Jahr 2000 gebaut und im folgenden Jahrzehnt in ihrer ursprünglichen Konfiguration betrieben – gemeinsam auch mit dem Detektor [GEO600](#) in Deutschland. Mit dem Ziel, ihre Empfindlichkeiten um ca. einen Faktor 10 zu steigern (einem 1000-fachen Volumenanstieg des beobachtbaren Universums entsprechend), haben LIGO und VIRGO eine mehrere Jahre andauernde Weiterentwicklung durchlaufen.

LIGO wurde von 2010 bis 2015 grundlegend erneuert und verbessert. Die erste Beobachtungskampagne (O1) startete im September 2015 – mit dem [ersten Gravitationswellennachweis](#) nur wenige Tage später. Zwei weitere bestätigte Nachweise folgten im [Dezember 2015](#) (O1) und [Januar 2017](#) (O2).

Am 01.08.2017 schloss sich Advanced Virgo O2 an, nach Optimierungen seit 2011, bei denen der gesamte Aufbau von den Spiegeln und dem Vakuumsystem bis hin zu den Photodioden zum Auslesen der Laserstrahlen überarbeitet wurde. Obwohl LIGO und Virgo beide das Prinzip der Interferometrie nutzen und viele grundlegende Techniken teilen, sind sie in Bau und Betrieb komplett voneinander unabhängig.

Abbildung 1 zeigt die typischen [Empfindlichkeitskurven](#) der drei Detektoren um den Zeitpunkt des Ereignisses GW170814. Die Daten wurden durch die Korrektur bekannter Quellen von Störungen, die das Signal in bekannter Weise beeinflussen¹, gereinigt. Sorgfältige Überprüfungen des Umgebungs- und Instrumentenstatus an allen drei Standorten zeigte keinerlei Hinweise auf Probleme.



Luftansicht des Virgo-Detektors, gelegen in Cascina, nahe Pisa (Italien). Virgo ist ein gigantisches Michelson-Laserinterferometer mit 3 km langen Armen. (Foto: Nicola Baldocchi / Virgo Collaboration)

ABBILDUNGEN AUS DER VERÖFFENTLICHUNG

Für weitere Informationen zur Bedeutung der Abbildungen steht die vollständige Publikation [hier](#) zur Verfügung.

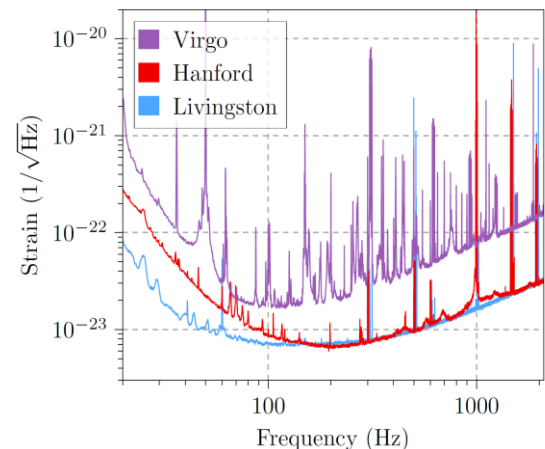


Abbildung 1: Diese Abbildung (bei der es sich um [Abbildung 2](#) in unserer [Publikation](#) handelt) vergleicht die Empfindlichkeiten (auf der senkrechten Achse mit „Strain“ bezeichnet) der drei Detektoren als eine Funktion der Frequenz (in Hertz, auf der waagerechten Achse). Zu beachten ist, dass beide Achsen eine logarithmische Skalierung haben. Bei einer gegebenen Frequenz gilt: Je niedriger die im Graph gezeigte Empfindlichkeit ist, desto schwächere Gravitationswellensignale können detektiert werden. Die blaue Kurve zeigt die Empfindlichkeit von LIGO Livingston, die rote Kurve zeigt LIGO Hanford und die lila Kurve zeigt Virgo.

1. Das gleiche Prinzip wird zur ‚noise-cancellation‘ (aktive Lärmkompensation) von Kopfhörern genutzt, welche durch eingebaute Sensoren Umgebungslärm erkennen und diesen Lärm entfernen, indem sie ein ‚gegenteiliges‘ Signal an das Ohr senden.

DAS BEOBACHTETE SIGNAL GW170814

Die Identifikation eines neuen Gravitationswellenereignisses erfolgt in mehreren Schritten, von denen im Fall von GW170814 der erste direkt nach Erfassung der Daten stattfand und auf Analysesoftware mit niedriger Latenz basiert. Diese nutzen sogenannte [Optimalfilter](#), um nach übereinstimmenden „Triggern“, also Kandidaten für Signale in den Advanced-Detektoren zu suchen.

GW170814 wurde von Advanced LIGO innerhalb von 30 Sekunden nach seiner Ankunft mit einer hohen [statistischen Signifikanz](#) identifiziert; eine Meldung wurde generiert und an diverse Teleskop-Partner der LIGO-Virgo-Kollaboration versendet. Später wurde die Signifikanz des Signalkandidaten genauer berechnet, indem ein insgesamt sechs Tage langer gemeinsamer Datensatz beider LIGO-Detektoren mit einem [ähnlichen Verfahren](#) ([weitergehende Informationen](#) auf englisch) wie bei den vorherigen bestätigten Nachweisen analysiert wurde. Diese detailliertere Analyse erlaubte die Berechnung einer [Fehlalarmrate](#) für dieses Ereignis, also der Häufigkeit, mit der reine Rausch-Fluktuationen erwartet werden können, die in beiden Detektoren ein falsches Signal mit mindestens der Stärke des beobachteten Signals erzeugen. Für GW170814 liegt die Fehlalarmrate bei weniger als 1 in 27 000 Jahren, was einen eindeutigen Nachweis bedeutet.

Wie zwei unabhängige Analysen gezeigt haben, sah Virgo dieses Gravitationswellenereignis ebenfalls. Die erste Methode basiert auf Optimalfiltern und vergleicht zwei Modelle: Das eine Modell nimmt an, dass es sich bei GW170814 um zwei verschmelzende schwarze Löcher handelt, die von allen drei Detektoren (Virgo eingeschlossen) beobachtet wurden, während das andere annimmt, dass in Virgo ausschließlich Rauschen vorhanden war. Unsere Berechnungen ergaben, dass die Wahrscheinlichkeit für das erste Modell 1600 mal höher ist als die für das zweite Modell. Die andere Methode sucht

nach kurzen Gravitationswellensignalen, bei denen die Frequenz mit der Zeit zunimmt, wie z.B. bei dem [Chirp-Signal](#), das beim Verschmelzen zweier kompakter Objekte produziert wird, ohne eine bestimmte Wellenform anzunehmen. Die Daten aller Detektoren werden kombiniert, um die Wellenform zu rekonstruieren. Für alle bisher bestätigten Gravitationswellennachweise haben die mit diesem Ansatz rekonstruierten Wellenformen sehr gut mit dem Modell zweier verschmelzender Schwarzer Löcher übereingestimmt.

Für GW170814 wurden zwei verschiedene Rekonstruktionen (beide ohne festes Modell) verglichen – die eine verwendete nur die beiden LIGO-Detektoren, während die andere auf dem 3-Detektor-Netzwerk basierte. Die Stärke des rekonstruierten Signals kann erneut in eine Fehlalarmrate übersetzt werden, die die Häufigkeit angibt, mit der die unabhängigen Rauschfluktuationen ein Signal von mindestens gleicher Größe produzieren. Verwendung von nur zwei Detektoren lieferte eine Fehlalarmrate von etwa 1 in 300 Jahren; für das gesamte Netzwerk konnte die Rate auf weniger als 1 in 5700 Jahren reduziert werden. Somit ist der 3-Detektor-Fall erneut klarer Favorit gegenüber der 2-Detektor-Hypothese. Abbildung 2 zeigt drei verschiedene Darstellungsarten der von den drei Interferometern aufgenommenen Daten zum Zeitpunkt des Nachweises von GW170814.

Lokalisierung der Quelle von GW170814

Die Lokalisierung einer Quelle am Himmel kann unter Verwendung der Ankunftszeiten der Gravitationswellensignale in den verschiedenen Detektoren abgeschätzt werden, die durch die endliche, laut Einstein auch für Gravitationswellen gültige, [Lichtgeschwindigkeit](#) zustande kommen. Der Abstand von 3000 km der beiden LIGO-Detektoren entspricht einer maximalen Verzögerung von 10ms. Unter der Annahme genau bekannter Ankunftszeiten kann jede Zeitdifferenz mit einem Kreis am Himmel assoziiert werden, entsprechend den möglichen Herkunftsrichtungen. Für ein 3-Detektor-Netzwerk kann man drei Zeitdifferenzen beobachten und erhält somit drei Kreise, die sich an zwei Stellen überschneiden².

In der Praxis sind die Ankunftszeiten nicht perfekt messbar, was bedeutet, dass die Kreise tatsächlich Bänder mit einer bestimmten Dicke sind, die durch Ungenauigkeiten in der Zeiterfassung bestimmt ist; die Schnittflächen dieser Bänder markieren die Flächen am Himmel innerhalb derer die Quelle der Gravitationswelle liegt. Um die Quellenlokalisierung weiter zu verbessern, können zudem Unterschiede in Amplitude und Form der Signale, die innerhalb des Netzwerks detektiert wurden, verwendet werden. Um dies zu verstehen, stellt man sich die Gravitationswellendetektoren am besten als Mikrophone vor und nicht als Teleskope: Sie sind auf Signale aus den meisten Richtungen empfindlich, allerdings mit einigen Limitierungen. Während z.B. eine Gravitationswelle direkt von oberhalb oder unterhalb der Ebene der Detektorarme kommend am besten gesehen werden kann, wäre die gleiche Welle entlang der Winkelhalbierenden der Arme kommend komplett unsichtbar. Generell spricht der Detektor besser an, je weiter über dem lokalen Horizont sich die Quelle befindet. Jedes Instrument hat vier blinde Punkte, die alle in der Ebene der Arme liegen. Wenn eine Gravitationswelle von einem Instrument nicht detektiert wird, das im Prinzip empfindlich genug ist, um sie zu sehen, bedeutet dies, dass das Signal aus Richtung eines dieser blinden Punkte kommt.

2. Mit vier oder mehr Detektoren würden sich alle Kreise in einem Punkt schneiden. Das ist einer der Gründe aus dem ein vierter Detektor (KAGRA in Japan) zum Ende dieses Jahrzehnts und ein fünfter Detektor (LIGO India) einige Jahre später das Lokalisationsvermögen des globalen Netzwerks weiter verbessern werden.

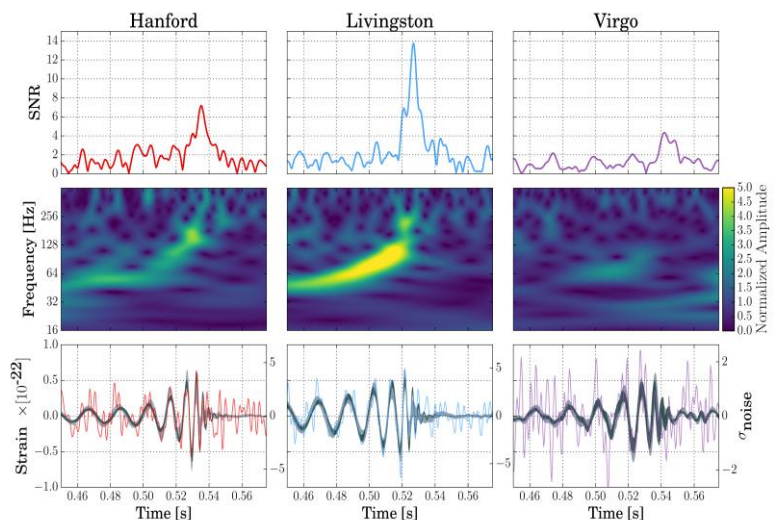


Abbildung 2 (Abbildung 1 in unserer [Publikation](#)):

Obere Reihe: Signal-zu-Rausch-Verhältnis („SNR“) als Funktion der Zeit. Da die Gravitationswellen sich mit der endlichen Lichtgeschwindigkeit fortbewegen, erreicht das Signal die Detektoren zu unterschiedlichen Zeiten; somit entstehen auch die Signalspitzen zu unterschiedlichen Zeiten. GW170814 kam zuerst bei LIGO-Livingston an, 8 ms später bei LIGO-Hanford und weitere 6 ms danach bei Virgo. **Mittlere Reihe:** Zeit-Frequenz-Darstellung der Messdaten (‘Strain‘ oder Dehnung der Interferometerarme). Je heller ein Punkt in einer der 2D-Darstellungen, desto größer ist das Signal für genau diese Zeit und Frequenz in Bezug auf das erwartete Rauschen. Zu beachten ist das charakteristische „chirp“-Muster, bei dem die Frequenz mit der Zeit ansteigt. **Unterste Reihe:** ‘Strain‘-Zeitreihen sowie die am besten dazu passenden Wellenformen, wie sie durch Optimalfilter (schwarze, durchgehende Linien) bzw. durch Suchmethoden ohne festes theoretisches Modell (graue Bänder) ermittelt wurden..

Abbildung 3 fasst die Lokalisierungen der Quelle von GW170814 am Himmel zusammen, die von den schrittweisen Datenanalysemethoden geliefert wurden: Die anfängliche schnelle Lokalisierung mit nur den beiden LIGO-Detektoren ist in blau dargestellt, die Ergänzung durch Virgo in orange und die Ergebnisse der abschließenden Parameterbestimmung (siehe unten) in grün. Das Netzwerk kann ebenfalls den Abstand zur Quelle einschränken, was im rechten Graph in Abbildung 3 gezeigt ist. Dieser zeigt, dass die Lokalisierung der Quelle in drei Dimensionen ausgeführt wird. Für weitere Ereignisse enthielte das wahrscheinlichste Volumen in günstigen Fällen nur eine begrenzte Anzahl an Galaxien, was die Suche nach einem sichtbaren Gegenstück durch Partner-Teleskope vereinfachen würde. Folgebeobachtungen von GW170814 wurden durch 25 Observatorien gemacht, aber kein Gegenstück konnte ermittelt werden. Von der Verschmelzung zweier Schwarzer Löcher wird allerdings auch keine andere Emission neben Gravitationswellen erwartet.

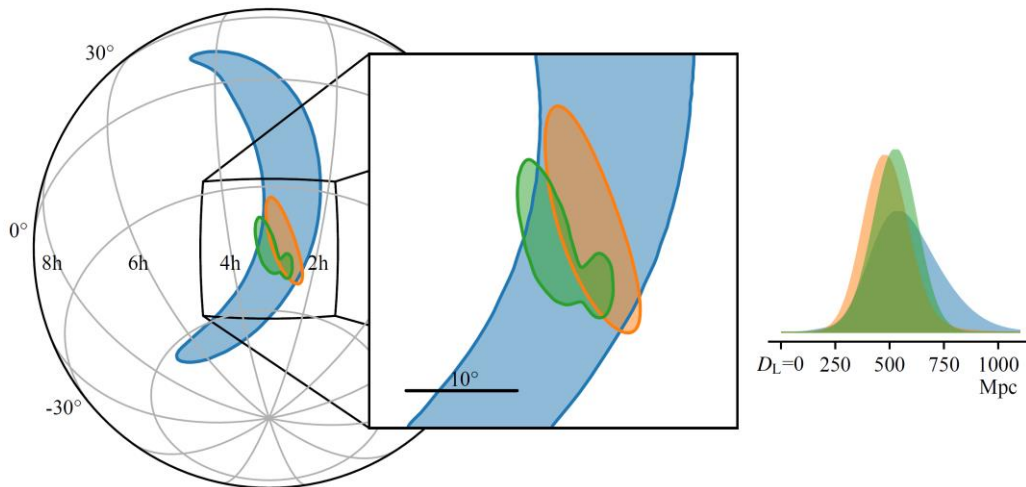


Abbildung 3: Lokalisierung der Quelle von GW170814 am Himmel.

Der linke Teil der Abbildung vergleicht die Himmelsregionen, die laut den verschiedenen Analysen jeweils am wahrscheinlichsten die Quelle von GW170814 enthalten. Diese werden 90%-[Glaubwürdigkeitsregionen](#) genannt, da sie so definiert sind, dass ihre Wahrscheinlichkeit, die Quelle zu enthalten, bei 90% liegt. Die blauen Bereiche entsprechen der schnellen Lokalisierung basierend auf den Daten nur der zwei LIGO-Detektoren. Fügt man Virgo hinzu, entsteht der orange Bereich, der mehr als eine Größenordnung kleiner ist – 100 Quadratgrad anstelle von 1160 Quadratgrad. Der grüne Bereich ist das Ergebnis der kompletten Parameteranalyse unter Verwendung aller drei Detektoren – ein Bereich von 60 Quadratgrad. Zum Vergleich ist die Fläche, die unter Verwendung einer kompletten Parameteranalyse nur der LIGO-Daten berechnet werden kann, 700 Quadratgrad groß.

Der rechte Teil der Abbildung vergleicht die Wahrscheinlichkeitsverteilungen für die [Leuchtkraftentfernung](#) der Quelle. Fügt man Virgo hinzu, wird diese Verteilung schmäler, indem die großen Distanzen entsprechenden Ausläufer abgeschnitten werden, mit einem wahrscheinlichsten Abstand von etwa 540 Mpc.

MESSUNG DER PARAMETER VON GW170814

Die Parameter von GW170814 wurden mit den selben Methoden bestimmt wie für die vorhergehenden Nachweise: die gemessenen Signale wurden mit zwei unabhängigen Familien von Modell-Wellenformen verglichen, deren Eigenschaften von den gemessenen Parametern abhängen. Je besser die für einen bestimmten Satz an Parametern erzeugten Wellenformen mit dem Signal übereinstimmen, desto näher sollten diese Parameter an den tatsächlichen Werten liegen.

Eine vollständige Übersicht der gemessenen Parameter von GW170814 können in unserer [Publikation](#) oder im [GW170814-Faktenblatt](#) nachgelesen werden. Beispielhaft zeigt Abbildung 4 die ermittelten Parametergrenzen für die Massen der ursprünglichen schwarzen Löcher.

TESTS DER ALLGEMEINEN RELATIVITÄTSTHEORIE

Tests der [Allgemeinen Relativitätstheorie](#) wurden für GW170814 durchgeführt, ähnlich zu [denen vorangegangener Nachweise](#). Erneut sind die Ergebnisse konsistent mit den Vorsagen von Einsteins Theorie. Eine tiefere Analyse wird in zukünftigen Publikationen erfolgen.

Mit einem Netzwerk, das aus unterschiedlich ausgerichteten Detektoren besteht (die beiden LIGO-Instrumente zeigen fast in die gleiche Richtung, Virgo jedoch nicht) kann man Aussagen über die [Polarisation](#) der Gravitationswellen treffen, d.h. die Art und Weise wie sie die [Raumzeit](#) verzerren.

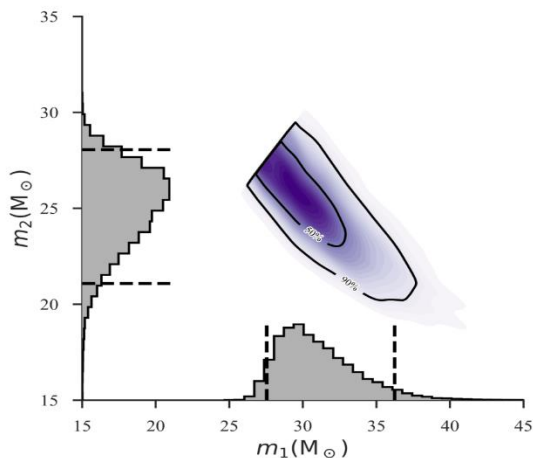


Abbildung 4 (oberer Teil von Abbildung 4 in unserer [Publikation](#)): Massen (in Einheiten der Sonnenmasse) der beiden ursprünglichen Schwarzen Löcher. Die Massen wurden gemeinsam bestimmt und die sich ergebenden Parametergrenzen sind in der m_2 - m_1 -Ebene dargestellt (wobei die Konvention $m_2 \leq m_1$ benutzt wurde). Je dunkler die Farbe, desto größer ist die Wahrscheinlichkeit, dass die Massen der beiden Schwarzen Löcher dem entsprechende Wertepaar (m_1, m_2) entsprechen. Die Konturen zeigen die 50%- und 90%-Glaubwürdigkeitsregionen. Zusätzlich sind auf den Achsen die eindimensionalen Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Einzelmassen in grau dargestellt. Am wahrscheinlichsten sind daher Massen von etwa 30 und etwa 25 Sonnenmassen.

Die Relativitätstheorie sagt voraus, dass Gravitationswellen transversal sind. Das bedeutet, dass sie die Raumzeit senkrecht zu ihrer Ausbreitungsrichtung stauchen und quetschen. Es gibt nur zwei erlaubte Verzerrungsarten, die „+“ („Plus“) und „x“ („Kreuz“) Polarisationen. In Abbildung 5 (a) und (b) ist dargestellt, wie sich diese auf einen hypothetischen Ring freischwebender Teilchen auswirken.

Eine verallgemeinerte „metrische“ Theorie der Gravitation kann bis zu sechs verschiedene Polarisationen aufweisen, inklusive der in der Relativitätstheorie erlaubten. Jede zusätzliche Polarisation verzerrt die Raumzeit auf eine andere Weise und würde daher verändern, wie ein interferometrischer Detektor auf ein solches Signal reagiert. Diese Änderung würde man feststellen, wenn man das Signal in zwei nicht-parallelen Detektoren vergleicht, da Abweichungen dann nicht durch die Allgemeine Relativitätstheorie erklärt werden könnten. Abbildung 5, (c) bis (f) zeigt die Auswirkung dieser anderen Polarisationen. Während (c) wiederum eine transversale Welle zeigt, handelt es sich bei (d) bis (f) um Gravitationswellen die in die gleiche Richtung wandern wie die Raumzeit-Verzerrungen, dies ist durch den Pfeil dargestellt.

Ein erster Test der Gravitationswellen-Polarisation wurde mit den Daten von GW170814 durchgeführt. Dazu wurde die volle Parameterbestimmung erneut durchgeführt, diesmal unter Hinzunahme der weiteren Polarisationen, die laut Relativitätstheorie verboten sind. Die alternativen Polarisationen konnten dabei die Messdaten nicht so gut beschreiben wie die von der Relativitätstheorie erlaubten „+“ und „x“ allein, was ein weiterer Hinweis darauf ist, dass GW170814 mit Einsteins Theorie in Einklang steht.

ZUSAMMENFASSUNG

GW170814 ist die vierte Verschmelzung zweier Schwarzer Löcher, die von der LIGO Scientific Collaboration und Virgo Collaboration bestätigt wurde. Die Schwarzen Löcher hatten ähnliche Massen wie die früheren Ereignisse GW150914 und GW170104. Sie sind konsistent mit den anhand der vorangegangenen Ereignissen erwarteten astrophysikalischen Population- und Verschmelzungsraten, die aus den vorangegangenen Ereignissen bestimmt wurden.

Dieses Ereignis ist insofern einzigartig, als dass es die erste Messung durch drei Detektoren markiert: den beiden Advanced-LIGO-Interferometern und Advanced Virgo. Ein Netzwerk aus drei Detektoren hat enormes wissenschaftliches Potential, wie bei GW170814 durch die stark verbesserte Positions- und Entfernungsbestimmung sowie die Möglichkeit weitergehender Tests der Allgemeinen Relativitätstheorie gezeigt werden konnte. Mit der dritten LIGO-Virgo-Beobertungskampagne „O3“, die 2018 starten wird, blicken wir in eine strahlende Zukunft der Gravitationswellenastronomie.

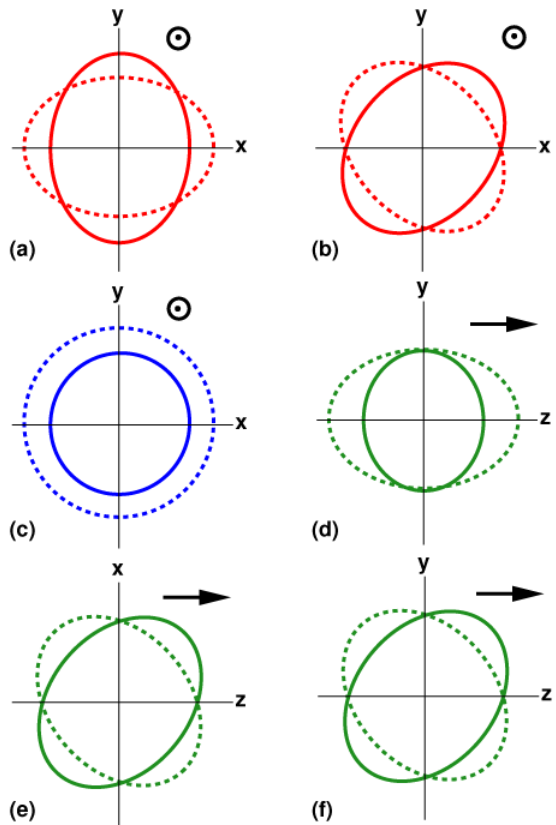


Abbildung 5: Darstellung der sechs erlaubten Polarisationen in verallgemeinerten „metrischen“ Theorien der Gravitation. Die von der allgemeinen Relativitätstheorie erlaubten Polarisationen „+“ und „x“ sind in (a) und (b) dargestellt. In beiden Fällen ist die Raumzeitdehnung senkrecht zur Ausbreitungsrichtung der Welle (hier aus der Seitenebene heraus): ein Ring aus Teilchen wird in eine Richtung dieser Ebene gestaucht, während die dazu senkrechte Richtung gestreckt wird, und umgekehrt. Abbildungen (c) bis (f) zeigen von der Relativitätstheorie nicht erlaubte Polarisationen, hierbei ist (c) wiederum transversal polarisiert, während (d) bis (f) Verzerrungen der Raumzeit darstellen die in Ausbreitungsrichtung der Welle geschehen (durch den Pfeil dargestellt). (Bild: Clifford Will, Living Reviews in Relativity)



Besuchen Sie unsere Webseiten:
<http://www.ligo.org>
<http://www.virgo-gw.eu>



Den vollständigen, von **Physical Review Letters** angenommenen Artikel können Sie [hier](#) lesen. Weiterführende Informationen zur Gravitationswellenforschung bietet das [AEI Hannover/Golm](#).

GLOSSAR

- **Schwarzes Loch:** Ein Bereich der Raumzeit, in dem die durch eine extrem kompakte Masse erzeugte Gravitation so stark ist, dass nichts entkommen kann, inklusive Licht.
- **Wellenform:** Eine Kurve, die beschreibt wie sich die Dehnung durch eine Gravitationswelle mit der Zeit verändert.
- **Rauschen:** Schwankungen im Messsignal durch verschiedene Einflüsse des Messinstruments und seiner Umgebung. Die Empfindlichkeit eines Gravitationswellendetektors wird durch das Rauschen begrenzt.
- **Beobertungskampagne:** Eine Zeitspanne in der die Gravitationswellendetektoren Messdaten sammeln.
- **Empfindlichkeit:** Eine Beschreibung dessen, wie gut ein Detektor ein Signal messen kann. Detektoren mit niedrigerem Rauschen können schwächere Signale messen; man sagt daher, dass sie eine höhere Empfindlichkeit haben.
- **Dehnung oder ‚Strain‘:** Bruchteil der Entfernungsänderung zwischen zwei Messpunkten, die durch die Verformung der Raumzeit aufgrund einer vorbeilaufenden Gravitationswelle erzeugt wird.