

Schon wieder Gravitationswellen [02. Jun.]

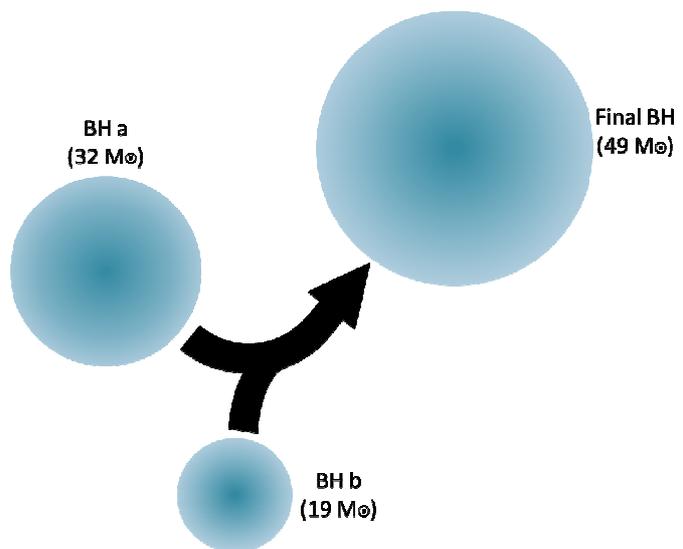
Das erdgebundene *Gravitationswellenobservatorium LIGO* (*Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory*) [1] hat erneut die Entdeckung von **Gravitationswellen** [1], die von **Schwarzen Löchern** [1] stammen, bekanntgegeben [1, 2, 3]. Die wiederholte Entdeckung beweist die Existenz eines neuen Fensters der Astronomie, mit Hilfe dessen man exotische Himmelsobjekte aus der Ferne untersuchen kann.

Die Gravitationswellen stammen erneut von zwei Schwarzen Löchern, die am Ende ineinander spiraltten und dadurch ein neues, größeres Schwarzes Loch erzeugten. Das **neue Schwarze Loch** besitzt eine Masse von rund **49 Sonnenmassen** [1-3] (Abb. 1) und schließt die Lücke zwischen den bisher entdeckten Ereignissen. Im Fall der 1. Entdeckung besaß das finale Schwarze Loch nach der Verschmelzung eine Masse von 62, im 2. Fall von 21 Sonnenmassen.

Abb. 1
Schematische Darstellung der Verschmelzung des neu beobachteten Schwarzen Lochs.

Das neue Gravitationswellensignal deutet auf die Verschmelzung zweier Schwarzer Löcher (bh) hin, aus denen ein neues, größeres Schwarzes Loch mit rund 49 Sonnenmassen (*final bh*) entstand (rechts). [Masse in Sonnenmassen]

© LIGO/CalTech



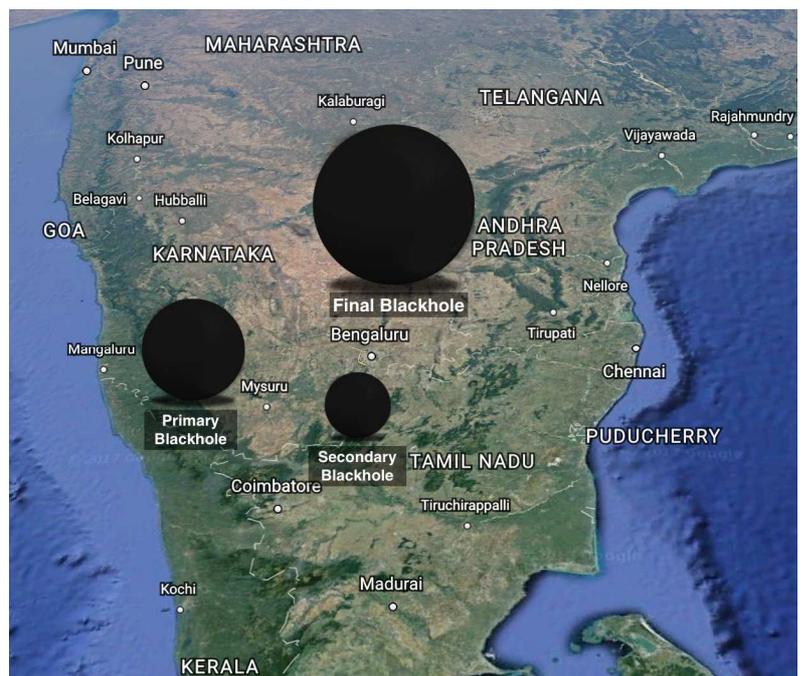
Somit existieren tatsächlich Schwarze Löcher mit einer vielfachen Masse der Sonne. Zuvor war dies zwar theoretisch vermutet worden, konnte jedoch vor der Existenz der Gravitationswellenastronomie praktisch nicht bestätigt werden.

Der **Größenvergleich** des aktuell beobachteten neu entstandenen Schwarzen Lochs im Vergleich zur indischen Landkarte:

Abb. 2
Schematische Darstellung der Durchmesser der beteiligten Objekte vom Januar 2017.

Der Durchmesser eines Schwarzen Lochs ist abhängig von seiner Masse. Aus den beiden Anfangsobjekten (unten, *primary/secondary black hole*) entstand ein neues, größeres Schwarzes Loch (oben, *final black hole*). Unten auf der Karte befindet sich die Region Kerala [1], weiter oben Goa [1] und Mumbai [1], die Hauptstadt.

© IUCAA



Umso sensationeller ist die Detektierung dieser exotischen Objekte in großen Entfernungen bzw. von Ereignissen, die bereits vor Milliarden Jahren stattfanden und deren Signale erst jetzt am Ort der Erde eintreffen bzw. gemessen werden.

Das neue Gravitationswellenereignis stammt aus der aktuellen Meßserie des LIGO, in *Hanford* (Washington) und *Livingston* (Louisiana) [1] in den Vereinigten Staaten, die erst am 30. November 2016 begann und im Sommer endet.

GW20170104

Somit existieren **3 gesicherte Ereignisse**, bei denen man sozusagen das Endstadium ineinander spiralerender Schwarzer Löcher beobachtet hat: das **1. Ereignis** wurde im September 2015 gemessen, **das 2.** im Dezember des gleichen Jahres und das **3. Ereignis** im Januar 2017.

Das Ereignis **GW20170104** vom 04.01.2017 ist zugleich das Entfernteste: zwei Schwarze Löcher verschmolzen in einer Entfernung von rund 3 Milliarden *Lichtjahren* (Lj) [1]. Im 1. und 2. Fall waren die Objekte 1,3 bzw. 1,4 Milliarden Lj von uns entfernt (Abb. 3).

Abb. 3
Schematische Darstellung der 3 bisherigen, gesicherten Gravitationswellenereignisse am LIGO.
 Im Vergleich zu den beiden anderen gesicherten Ereignissen handelt es sich bei GW170104 um das bisher entfernteste neue Schwarze Loch, das nach einer Verschmelzung beobachtet werden konnte (rechts).
 [Unten: Entfernung in Lj; oben: Bezeichnung des Ereignisses, Datum, beteiligte Massen]
 © LIGO/CalTech



Die **Auswertung des Signals vom 4. Januar** [2] (Abb. 3 rechts) ergibt, daß die Verschmelzung eines Schwarzen Loch mit rund 25-40 Sonnenmassen und einem zweiten Schwarzen Loch mit rund 13-25 Sonnenmassen in einem neuen Schwarzen Loch mit einer Masse von rund 46-57 Sonnenmassen endete (Abb. 3 links, Tabelle):

GW170104

Datum/Uhrzeit	4. Januar 2017 10:11:58,6 UTC (<i>Weltzeit</i> [1])
Wahrscheinlich eines astrophysikalischen Ursprungs	> 99,997%
Entfernung	1,6-4,3 Milliarden Lj
Gesamtmasse	46-57 Sonnenmassen
Masse 1. Schwarzes Loch	25-40 Sonnenmassen
Masse 2. Schwarzes Loch	13-25 Sonnenmassen
Masse des finalen Schwarzen Lochs	44-54 Sonnenmassen

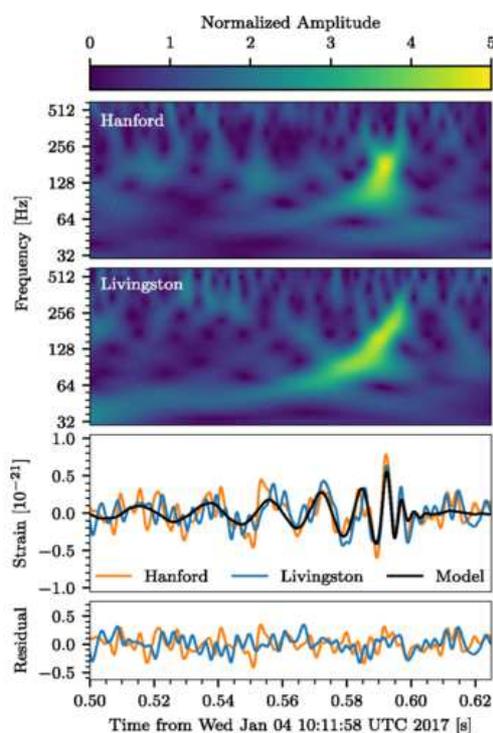


Abb. 4 Signale und Eigenschaften des Gravitationswellenereignisses vom 4. Januar.

Die Beobachtung des Ereignisses vom 4. Januar deutet auf die erneute Messung der Verschmelzung zweier Schwarzer Löcher hin. Dabei entstand ein neues Schwarzes Loch mit einer Masse von rund 46-57 Sonnenmassen (s. Tabelle links). Die beiden Signale (rechts) trafen an den Detektoren des LIGO in einem Abstand von etwa 3 Millisekunden ein. (Erklärung unter [2])

© LIGO/CalTech

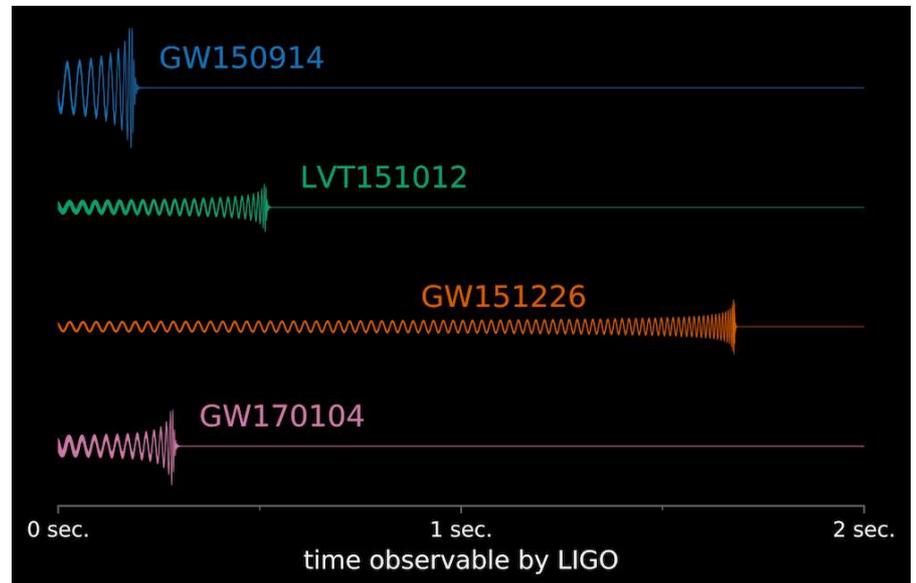
Im Vergleich zu den bisherigen beobachteten Gravitationswellenereignissen war das Signal vom Januar sehr kurz (Abb. 5):

Abb. 5

Vergleich der Signale der Gravitationswellenereignisse am LIGO.

Der Vergleich der 3 bestätigten Ereignisse aus dem Jahr 2015 und 2017 sowie dem Kandidatenereignis *LVT151012* [1] zeigt die Kürze des Signals vom Januar 2017 (unten). Dennoch ist sicher, daß es sich dabei um ein Gravitationswellenereignis handelt.

© LIGO // B. Farr/Univ. Chicago



Eine **Animation und Simulationen** des Ereignisses vom Januar 2017 bzw. September 2015 finden Sie unter [4].

Die Rotationsachse der Schwarzen Löcher

Für das aktuelle Ereignis kann auch die Richtung bestimmt werden, in der sich die beiden Ausgangs-Schwarzen Löcher drehten, die **Rotationsachse** [1]. Während die beiden Schwarzen Löcher, die später verschmolzen, einander umkreisen, rotieren sie ebenfalls um ihre eigene Achse – wie die Erde. Gelegentlich rotieren die betreffenden Schwarzen Löcher in der gleichen Richtung wie die ihrer gemeinsamen Umkreisung, jedoch muß das nicht immer der Fall sein. Oftmals rotieren sie in entgegengesetzter Richtung zueinander, also nicht parallel zur Drehrichtung auf ihrer Bahn umeinander.

Dabei kann die **Richtung der Rotationsachse** eines Schwarzen Lochs zudem gegenüber der Bahnebene geneigt sein – wie im Fall der Erde, deren Rotationsachse um 23,5 Grad gegenüber der Bahnebene um die Sonne geneigt ist.

Zwar können die aktuellen Messungen nicht genau sagen, ob die Rotationsachsen der beiden verschmolzenen Schwarzen Löcher gegenüber ihrer Bahnebene geneigt waren, jedoch scheint die Rotationsachse von mindestens einem der beiden Objekte gegenüber der gemeinsamen Bahnebene geneigt gewesen zu sein. Das ist zwar schade, jedoch erhalten die Forscher dadurch Information wie das Paar der Schwarzen Löcher entstanden sein könnte.

Zum ersten Mal haben die Wissenschaftler zwei sich umkreisende Schwarze Löcher beobachtet, deren Rotationsachsen nicht parallel ausgerichtet waren, zumindest nicht im Vergleich zur Richtung der Bahnebene. Daraus schließen die Forscher, daß Doppelsysteme aus Schwarzen Löchern in dichten *Sternhaufen* [1] entstehen könnten.

Die Entstehung von Doppel-Schwarzen Löchern

Die Wissenschaftler sind uneinig: gegenwärtig existieren **zwei Modelle** zur Erklärung der **Entstehung von Paaren Schwarzer Löcher**.

Im **1. Modell** entstehen die späteren Schwarzen Löcher zusammen: sie bilden sich, wenn jeder der beiden schweren, entwickelten Sterne im Doppelsternsystem zur *Supernova* [1] wird und ein Schwarzes Loch hinterläßt. Da die Sterne des Doppelsternsystems die gleiche Rotationsrichtung besaßen, besitzen wahrscheinlich die finalen Schwarzen Löcher ebenfalls die gleiche Rotationsrichtung.

Im **2. Modell** treffen die Schwarzen Löcher erst später aufeinander. Sie entstehen irgendwo in einem Sternhaufen, enden als massereiche Sterne in einem Schwarzen Loch und sinken dadurch sozusagen in das Zentrum des Sternhaufens – ähnlich einem Anker auf dem Meeresboden. In diesem Szenario können die Schwarzen Löcher im Vergleich zu ihrer Bahnebene (um das Zentrum des Sternhaufens) unterschiedliche Rotationsrichtungen besitzen.

Im Fall von GW170104 scheinen die Rotationsrichtungen der Schwarzen Löcher nicht mit ihrer gemeinsamen Bahnebene übereinzustimmen. Diese Beobachtung könnte das 2. Modell der Entstehung in einem Sternhaufen bevorzugen. Allerdings ist die statistische Aussagekraft bei lediglich 3 Beobachtungen dürftig. Weitere Beobachtungen könnten Klarheit bringen.

Woher stammt das Signal?

Die spannendste Frage gilt der Herkunft bzw. der **Richtung** des Gravitationswellenereignisses.

Die nebenstehende Abbildung (Abb. 6) zeigt die wahrscheinliche Richtung, aus der die bisherigen gemessenen Signale stammen. Im Fall von GW170104 ist das ein relativ großer Bereich am Himmel (**pinkfarben**).

Abb. 6
Herkunft der bisher beobachteten Gravitationswellenereignisse am Himmel.

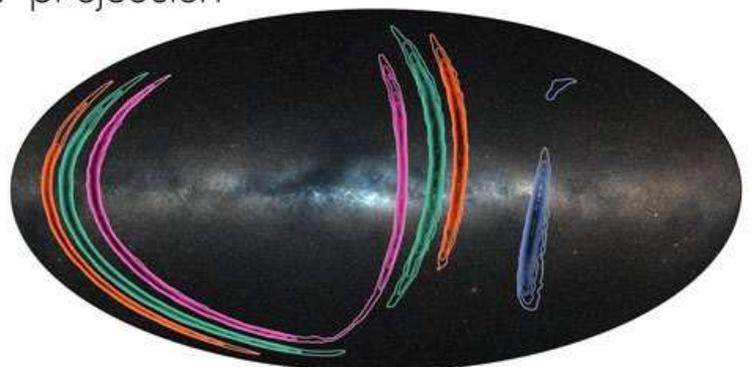
Die 3-dimensionale Projektion der Milchstraße auf einen transparenten Globus zeigt die wahrscheinlichen Richtungen der bisherigen Ereignisse: GW150914 (**blau**), GW151226 (**orange**) und GW170104 (**pink**) sowie den Kandidaten LVT151012 (**grün**). Die äußere Kontur entspricht einer Wahrscheinlichkeit von 90 Prozent, die innere entspricht 10 Prozent.

© LIGO/CalTech/MIT/L. Singer/A. Mellinger

Celestial sphere



Aitoff projection



Schwer zu sagen, in Richtung welchen *Sternbilds* [1] das Ereignis gemessen wurde.

Test der Relativitätstheorie

Die Beobachtung von **Doppel-Schwarzen Löchern** [1] testet ebenfalls die **Allgemeine Relativitätstheorie** (ART) *Albert Einsteins* [1], beispielsweise im Hinblick auf die sog. *Dispersion* [1]. Dieser Effekt tritt auf, wenn sich *Lichtwellen* [1] in einem Medium wie beispielsweise Glas in Abhängigkeit ihrer *Wellenlänge* (Farbe) [1] mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten fortbewegen. Auf diese Weise entsteht mithilfe eines *Prismas* [1] ein Regenbogen.

Die ART sagt voraus, daß Gravitationswellen keinen Dispersionseffekt aufweisen. Bisher konnten die Beobachtungen am LIGO diese Vorhersage Einsteins bestätigen und ihm erneut Recht geben. Es scheint keine Abweichungen von den Vorhersagen der ART zu geben, auch nicht bei Gravitationswellenereignissen, die 3 Milliarden Lichtjahre durch das Universum gereist sind.

Weitere Aufrüstung

Im Sommer soll nach dem 1. Upgrade nun der Ausbau des LIGO mit weiteren Detektoren erfolgen, um die Signale aus dem Weltall noch besser lokalisieren zu können. Ein weiteres technisches Upgrade soll Ende 2018 erfolgen, dann soll die Empfindlichkeit der Detektoren nochmals erhöht werden.

Die Wissenschaftler hoffen nach den Upgrades nicht nur weitere Verschmelzungen Schwarzer Löcher beobachten zu können, sondern ebenfalls andere, neue Ereignisse exotischer Himmelsobjekte wie beispielsweise die Kollision zweier *Neutronensterne* [1].

Falls Sie Fragen und Anregungen zu diesem Thema haben, schreiben Sie uns unter **kontakt@ig-hutzi-spechtler.eu**

Ihre
IG Hutzi Spechtler – Yasmin A. Walter

Quellenangaben:

[1] Mehr Information über astronomische Begriffe
www.wikipedia.de

[2] http://ig-hutzi-spechtler.eu/aktuelles_gravitationswellen_entdeckt.html

[3] Abbott, B. P., et al. (LIGO Scientific and Virgo Coll.), *Phys. Rev. Lett.* **118**, 221101 (1 Jun 2017)

[4]
Animation des Gravitationswellenereignisses vom 4. Januar
<https://www.youtube.com/watch?v=S2vp7iVWrkE&feature=youtu.be>
Simulation des Gravitationswellenereignisses vom 4. Januar
https://www.youtube.com/watch?v=FGC_DM7ZgAk&feature=youtu.be
Simulation der Ereignisse vom 4. Januar 2017 und 15. September 2015
https://www.youtube.com/watch?v=3_u6TM0tGno&feature=youtu.be