

Gravitationswelle entdeckt !

Erstmals in der Geschichte der Astronomie konnte eine Gravitationswelle aus einer fernen Galaxie auf der Erde interferometrisch nachgewiesen werden. Sie stammt aus zwei verschmelzenden schwarzen Löchern mit 29 und 36 Sonnenmassen – das Energieäquivalent von drei Sonnenmassen wurde dabei in eine Gravitationswelle verwandelt. Die Beobachtung öffnet das Fenster zur Gravitationswellen-Astronomie.

Von Georg Wolschin

Nach jahrzehntelangen vergeblichen Bemühungen vieler Gruppen ist es nunmehr der LIGO-Virgo-Kollaboration mit zwei baugleichen Interferometern in Nordamerika (Bild 1) erstmals gelungen, eine Gravitationswelle direkt - und zweifelsfrei - zu beobachten. Ihre Existenz vorhergesagt hatte Albert Einstein bereits im Juni 1916, in einer Mitteilung über die "Näherungsweise Integration der Feldgleichungen der Gravitation" an die preussische Akademie der Wissenschaften. Eineinhalb Jahre später leitete er die so genannte Quadrupolformel für die Abstrahlung solcher Wellen durch nicht-kugelsymmetrische kosmische Objekte her. Die damit einhergehende Verformung der Raumzeit ist jedoch extrem schwach, angeblich hielt ihr Erfinder einen experimentellen Nachweis für aussichtslos.



Bild 1: Das nördliche Interferometer der LIGO-Kollaboration in Hanford (Washington). Die L-förmigen Interferometerarme sind jeweils 4 Kilometer lang. Eine baugleiche Anlage steht in Livingston (Louisiana). Die Gravitationswelle wurde fast zeitgleich in beiden Interferometern registriert. © LIGO (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory) Kollaboration.

Dennoch wartete die wissenschaftliche Welt seit nunmehr fast 100 Jahren auf den Nachweis von Gravitationswellen. Ermutigt wurde sie in den 1970er Jahren nach der Entdeckung eines Doppelpulsars durch Russell Hulse und Joseph Taylor (1974): In diesem Neutronenstern-Paar nehmen die Halbachse der Umlaufbahn und die Bahnperiode stetig ab, so dass die Sterne in etwa 240 Millionen Jahren miteinander verschmelzen sollten. Die gemessene Abnahme stimmt - über mehrere Jahre und mit hoher Genauigkeit - mit der Vorhersage der allgemeinen Relativitätstheorie überein. Diese Theorie erklärt die Abnahme der Bahnperiode durch die Abstrahlung von Gravitationswellen. Ganz offensichtlich war die Beobachtung gleich bedeutend mit dem indirekten Nachweis der Gravitationswellen.

Es fehlte jedoch der *direkte* Nachweis der Wellen durch einen geeigneten Empfänger. Zwar hatte Joseph Weber 1969 in den Physical Review Letters behauptet, mit zwei 1,5 Tonnen schweren Aluminium-Zylindern ("Gravitationsantennen") in Maryland und Chicago simultan Gravitationswellen vom Zentrum der Galaxis empfangen zu haben. Dies blieb jedoch aufgrund gewichtiger Gegenargumente höchst umstritten. Ein anderes Nachweisprinzip, das nicht auf den wenigen festen Eigenschwingungs-Moden eines mechanischen Resonators beruht, erwies sich als vielversprechender: so genannte Interferometer, mit denen sich ein breites Spektrum von Gravitationswellen registrieren lassen sollte.

Dazu gehören Gravitationswellen mit hohen Frequenzen von einigen Hertz bis in den Kilohertzbereich - von Supernova-Explosionen, sowie von Doppelsternen oder stellaren schwarzen Löchern, die in der Endphase ihrer spiralförmigen Annäherung miteinander kollidieren und dann verschmelzen. Man erwartet jedoch auch Wellen mit tiefen Frequenzen ("Tönen") im Bereich um 0,001 Hertz – beispielsweise von galaktischen Binärsystemen – deren Nachweis ein Interferometer im Weltraum ("LISA", Laser Interferometer Space Antenna) erfordern würde.

Und schliesslich sollte es primordiale Gravitationswellen aus der Entstehungsphase des Kosmos ("Inflation") geben, welche die Polarisierung der kosmischen Hintergrundstrahlung beeinflussen und dadurch im Prinzip nachweisbar sein könnten. Ein derartiger Nachweis wurde 2014 durch eine am Südpol arbeitende Kollaboration behauptet; leider zeigte sich bald darauf, dass kosmischer Staub – der einen ganz ähnlichen Polarisierungseffekt hat – offensichtlich die primordialen Gravitationswellen nur vorgetäuscht hatte.

Umso mehr freut sich jetzt die wissenschaftliche Welt und mit ihr die Öffentlichkeit, dass endlich der direkte Nachweis einer Gravitationswelle aus der Fusion zweier stellerer schwarzer Löcher mit 29 und 36 Sonnenmassen in einer fernen Galaxie gelungen ist (Bild 2).

Die Quelle liegt ungefähr in der Richtung der Magellanschen Wolke, kann aber noch nicht mit Sicherheit lokalisiert werden, da nur zwei Interferometer – in Hanford, Washington, und

Livingston, Louisiana – die Welle gemessen haben, man zur Triangulation aber ein drittes Interferometer gebraucht hätte. Das Virgo-Interferometer war jedoch wie das GEO600 Gerät bei Hannover zum Messzeitpunkt am 14. September 2015 abgeschaltet, und deren Empfindlichkeit hätte auch nicht ausgereicht: Erst die im letzten Jahr verbesserte Optik der “Advanced LIGO”-Geräte reichte aus, um das spektakuläre Signal aus dem Kosmos zu empfangen. Die Frequenz erhöht sich während der kurzen Messzeit von 35 auf 250 Hertz. Die statistische Signifikanz des Signals schätzt die Kollaboration auf 5,1 Standardabweichungen.

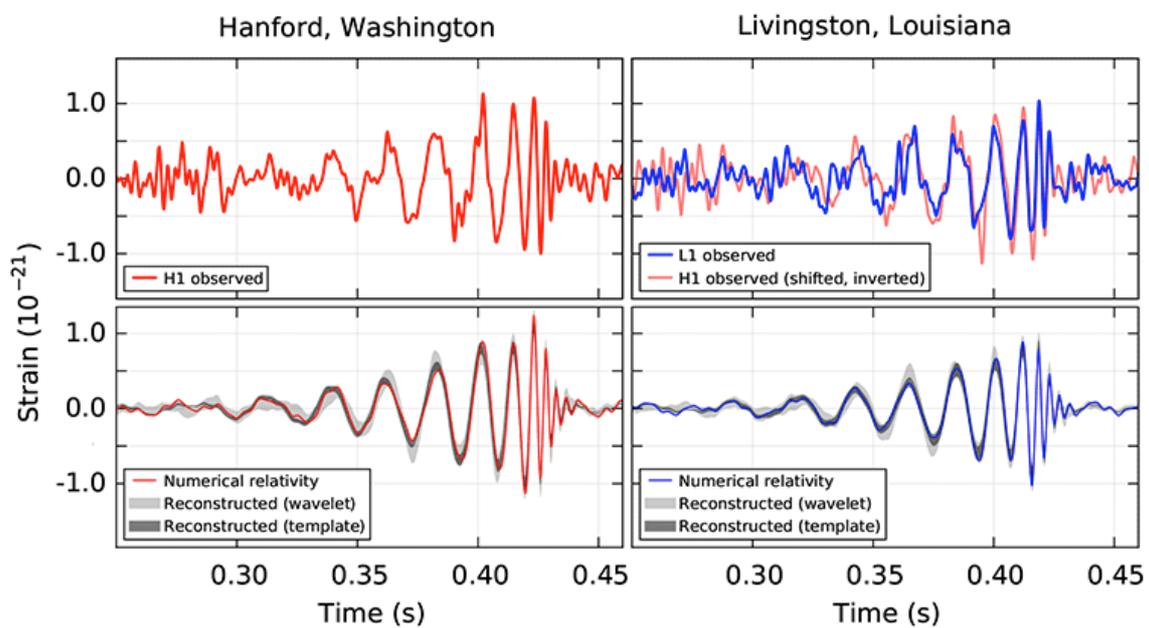


Bild 2: Die Interferometer in Washington und Louisiana haben am 14. September 2015 fast zeitgleich (mit einer Verzögerung von 7 Millisekunden, entsprechend der Laufzeit zwischen den Detektoren) eine Gravitationswelle nachgewiesen. Amplitude und Phase der Welle sind in beiden Detektoren völlig konsistent (siehe rechts oben) und stimmen mit allgemein-relativistischen numerischen Rechnungen für die Verschmelzung zweier schwarzer Löcher (unten) von 29 und 36 Sonnenmassen überein. © LIGO/Virgo Kollaboration, Phys. Rev. Lett. 116, 061102 (2016).

Das gemessene Signal stammt vom letzten Umlauf eines Systems aus zwei schwarzen Löchern und ihrer Verschmelzung, es ist extrem klar und stimmt in beiden Detektoren bei Berücksichtigung der Laufzeitverzögerung zwischen den Standorten von etwa sieben Millisekunden sehr genau überein. Demnach gibt es keinen vernünftigen Zweifel, dass hier erstmals eine Gravitationswelle direkt beobachtet worden ist. Die Messung testet – im Vergleich mit den Rechnungen (Bilder 2,3) – die allgemeine Relativitätstheorie in der Nähe

des Ereignishorizonts der schwarzen Löcher: Auch dies ist ein Novum. Die gute Übereinstimmung der Daten mit den entsprechenden numerischen Rechnungen zeigt, dass die allgemeine Relativitätstheorie sogar in diesem Extrembereich noch gültig ist.

Die Ergebnisse sind publiziert in 'LIGO/Virgo Kollaboration', Phys. Rev. Lett. 116, 061102 (2016). Sie sind der Auftakt zu einer neuen Form der Himmelsbeobachtung: der Gravitationswellen-Astronomie.

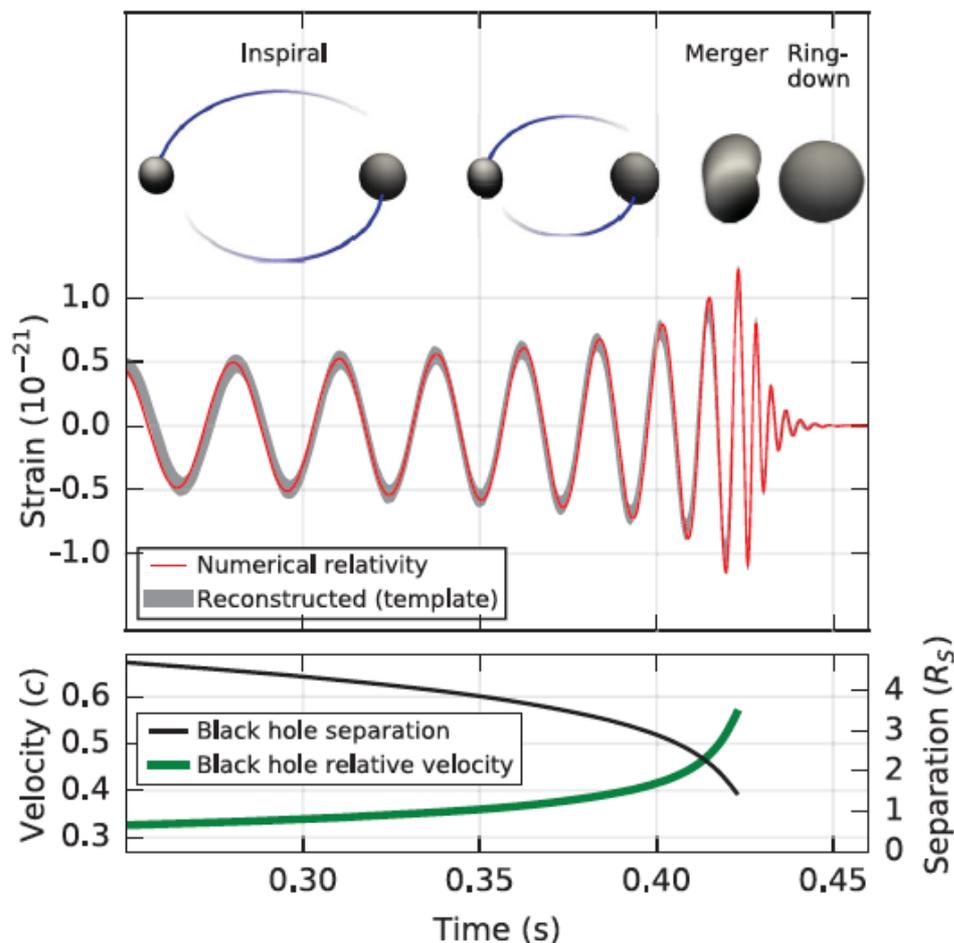


Bild 3: Darstellung der Verschmelzung zweier schwarzer Löcher, wie sie mit den beiden LIGO-Interferometern in überzeugender Weise beobachtet worden ist. Gemessen wird dabei die Gravitationswelle aus dem letzten Umlauf der beiden Himmelsobjekte in einer ca. 1,3 Milliarden Lichtjahre entfernten Galaxie samt ihrer Verschmelzung, und der anschließenden 'Ringdown'-Phase, bei der aufgrund der extrem starken Gravitation ein sphärisches schwarzes Loch entsteht. Seine Masse ist ca. drei Sonnenmassen kleiner als die Summe der Massen der beiden schwarzen Löcher; die Differenz wird in Form von Gravitationswellen abgestrahlt. Das messbare Signal dauert etwa 0,2 Sekunden. Der Abstand der beiden schwarzen Löcher nimmt dabei stetig ab (schwarz), ihre Geschwindigkeit zu (grün).

© LIGO/Virgo Kollaboration, Phys. Rev. Lett. 116, 061102 (2016).