

■ Gravitationswellen gefasst!

Mit Hilfe der beiden LIGO-Detektoren ist es erstmals gelungen, Gravitationswellen direkt zu messen.

Die Gerüchte hatten sich bereits seit Ende letzten Jahres immer weiter verdichtet. Am 11. Februar schließlich bestätigten Vertreter der LIGO-Kollaboration in einer weltweit beachteten Pressekonferenz, dass es erstmals gelungen ist, ein Gravitationswellensignal direkt zu messen [1]. Das registrierte Signal GW150914, benannt nach dem Datum der Detektion, stammt von zwei Schwarzen Löchern, die vor etwa 1,3 Milliarden Jahren miteinander verschmolzen sind. Die Erde erreichte es am 14. September 2015, also kurz nach der Inbetriebnahme der Detektoren von Advanced-LIGO (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory). Die Messung dieses Signals ist eine weitere glanzvolle Bestätigung der Allgemeinen Relativitätstheorie (ART) und eröffnet außerdem mit der Gravitationswellenastronomie in spektakulärer Weise ein neues Fenster zum Universum.¹⁾

Schon 1916, kurz nach der Vervollständigung der ART, hat Albert Einstein Gravitationswellen als Konsequenz seiner Theorie vorhergesagt [2]. Ähnlich wie die Elektrodynamik lässt die ART sowohl statische, Coulomb-artige, als auch dynamische, wellenartige Lösungen zu. Diese Gravitationswellen kann man sich als kleine Störungen vorstellen, die wie Wellen auf einem Teich durch das Gefüge der Raumzeit propagieren und dabei eine Raumrichtung transversal zur Ausbreitungsrichtung etwas verlängern und die andere Raumrichtung etwas verkürzen – und eine halbe Periode später genau umgekehrt. In der Elektrodynamik zeigt die Lamor-Gleichung, dass elektromagnetische Strahlung in erster Näherung durch Zeitableitungen von Dipolmomenten der Ladungsverteilung entsteht. In direkter Analogie zeigt die Quadrupol-Gleichung in der ART, dass Gravitationswellen in erster Näherung durch Zeitableitungen von Quadrupol-Momenten der Masseverteilung ausgestrahlt werden. Diese Abschätzung machte



Der LIGO-Detektor in Livingston im US-Bundesstaat Louisiana gehört zu den präzisesten Instrumenten, die je gebaut

wurden. Damit gelang es, Gravitationswellen zweier verschmelzender Schwarzer Löcher nachzuweisen.

schon Einstein klar, dass die Intensität dieser Strahlung „in allen denkbaren Fällen einen verschwindenden Wert haben muß“ [2].

Wie schwach genau Gravitationswellen sind, hängt von der Quelle ab. Laut Quadrupol-Gleichung sind große Quadrupol-Momente erforderlich, die sich schnell ändern. Besonders vielversprechend sind daher Binärsysteme, in denen zwei Schwarze Löcher oder Neutronensterne umeinander kreisen. Die Emission von Gravitationswellen entzieht dem System Energie und Drehmoment, wodurch sich der Abstand zwischen den beiden Schwarzen Löchern verkleinert. Nach Keplers Gesetzen bewegen sie sich dadurch schneller und senden entsprechend stärkere Gravitationswellen aus. Die Frequenzmodulation des Gravitationswellensignals („chirp“) solcher Binärsysteme ist daher durch eine ansteigende Frequenz und Amplitude gekennzeichnet und endet, wenn die Schwarzen Löcher miteinander verschmelzen. Mit Hilfe von numerischen Simulationen lassen sich solche Signale genau vorhersagen (Abb. 1) [3]. Aber auch für die stärksten Quellen betragen die relativen Längenänderungen h („strains“) auf der Erde bestenfalls etwa 10^{-20} .

Aus diesem Grund ließen sich Gravitationswellen bisher nur indi-

rekt nachweisen, nämlich durch ihren Effekt auf die Bahn von Neutronensternen in Binärsystemen [4, 5]. Für diese Entdeckung erhielten Hulse und Taylor 1993 den Nobelpreis für Physik. Die ersten Vorschläge und Versuche, Gravitationswellen direkt zu messen, stammen aus den 1960er-Jahren. Ein Beispiel ist der Resonanzdetektor von Joseph Weber („Weber bars“). Bald stellte sich jedoch ein Michelson-Interferometer, in dem die Interferenz zweier Laserstrahlen eine sehr genaue Längenmessung ermöglicht, als vielversprechender heraus. Rainer Weiss, Ron Drever, Kip Thorne und andere entwickelten dieses Konzept weiter, das in den modernen Gravitationswellen-Detektoren verwirklicht ist [1]. Der Bau dieser Instrumente – LIGO in den USA, TAMA in Japan, GEO600 in Deutschland und VIRGO in Italien – begann in den frühen 1990er-Jahren, und nach zwei Jahrzehnten weiterer Entwicklung ging im Herbst Advanced LIGO mit einer nochmals höheren Empfindlichkeit in Betrieb.

Die beiden LIGO-Detektoren in Livingston (Louisiana) und Hanford (Washington) haben vier Kilometer lange Interferometerarme. Aber selbst bei dieser Armlänge L entspricht die durch eine Gravitationswelle zu erwartende Längenän-

1) Das Physik Journal-dossier „Allgemeine Relativitätstheorie“ findet sich auf www.pro-physik.de/phy/physik/dossier.html?qid=7888701

derung hL nur einem Bruchteil des Radius eines Protons! Daher ist es erforderlich, alle Störungen so weit wie möglich zu unterdrücken.

Zu den wichtigsten Störquellen gehören seismisches und thermisches Rauschen sowie das Quantenzähl- bzw. Schrotrauschen. Dieses resultiert daher, dass Laserlicht nicht kontinuierlich ist, sondern durch eine Zufallsverteilung von Photonen übertragen wird. Diese Störungsquellen lassen sich durch eine monolithische, mehrstufige Pendelaufhängung der Interferometerspiegel, durch besonders stabile Lasersysteme und durch gequetschtes Licht unterdrücken [6]. Viele dieser Methoden wurden am GEO600 in Deutschland entwickelt und kommen jetzt in den LIGO-Detektoren zum Einsatz.

Atemberaubend ist, dass die LIGO-Kollaboration die nötige Präzision erreichen konnte, und ein glücklicher Zufall, dass das Universum direkt zum Auftakt ein so klares Signal in unsere Richtung schickte.

Das Signal GW150914 war so stark, dass es mit bloßem Auge zu erkennen war (Abb. 1). Zum Teil liegt das daran, dass die Quelle des Signals kosmisch gesehen relativ nah ist, und zum Teil daran, dass die Frequenz des Signals in dem Bereich liegt, in dem das Rauschen in den Detektoren am besten unterdrückt ist. In den Monaten nach der Entdeckung haben die Wissenschaftler das Signal sorgfältig analysiert und mit Vorhersagen numerischer Simulationen verglichen. Dadurch wissen wir jetzt mit einer Signifikanz von $5,1\sigma$, dass das Signal bei der Verschmelzung zweier Schwarzer Löcher mit Massen von etwa 36 und 29 Sonnenmassen ausgesandt wurde. In dieser Verschmelzung entstand ein neues schwarzes Loch mit einer Masse von etwa 62 Sonnenmassen – die Differenz von etwa drei Sonnenmassen ist in Form von Energie in Gravitationswellen frei geworden [7]. Diesen Prozess haben wir noch nie beobachten können, sodass schon diese erste Beobachtung eines Gravitationswellensignals weitreichende astrophysikalische Implikationen hat [8].

Der Nachweis ist nicht nur eine weitere Bestätigung der ART, sondern eröffnet die Ära der Gravitationswellenastronomie, mit der wir Prozesse im Weltraum beobachten können, die bis jetzt unzugänglich waren. GW150914 war eine großartige Beobachtung, aber sicher nur der Auftakt zu weiteren spannenden Entwicklungen. LIGO wird seine Empfindlichkeit weiter verbessern, wodurch die Wahrscheinlichkeit von Beobachtungen steigt. Andere Gravitationswellendetektoren sollten diese Empfindlichkeit bald erreichen und das weltweite Netzwerk erweitern. Das ist wichtig, um die Quellen zu lokalisieren.

Detektoren auf der Erde können nur Gravitationswellen bestimmter Wellenlängen beobachten. Längere Wellen, etwa von supermassiven Schwarzen Löchern mit Millionen von Sonnenmassen, lassen sich nur mit Satellitensystemen messen. Die Mission LISA Pathfinder ist kürzlich erfolgreich gestartet und testet die Technologie für ein geplantes Instrument eLISA [9]. Pulsar Timing Arrays ermöglichen es, noch längere Wellenlängen zu beobachten [10]. Auch auf diesem

Gebiet wird es möglicherweise bald aufregende Ergebnisse geben [5].

Ich habe größte Hochachtung vor den Pionieren, welche die Gravitationswellenastronomie als Möglichkeit erkannt haben, Bewunderung für die Arbeitsgruppen, die sie realisiert haben, und freue mich auf viele neue Erkenntnisse über exotische und möglicherweise völlig unerwartete Objekte im Universum!

Thomas W. Baumgarte

- [1] B. P. Abbott et al. (LIGO Scientific Coll. and Virgo Coll.), Phys. Rev. Lett. **116**, 061102 (2016)
- [2] A. Einstein, Sitzungsber. K. Preuss. Akad. Wiss. **1**, 688 (1916)
- [3] T. W. Baumgarte, Physik Journal, Juni 2015, S. 39; T. W. Baumgarte und S. L. Shapiro, Numerical Relativity, Cambridge University Press, New York (2010)
- [4] R. A. Hulse und J. H. Taylor, Astrophys. J. Lett. **195**, L51 (1975); J. H. Taylor und J. M. Weisberg, Astrophys. J. **253**, 908 (1982)
- [5] M. Kramer und N. Wex, Physik Journal, Juni 2015, S. 31
- [6] R. Schnabel et. al., Physik Journal, Oktober 2009, S. 33
- [7] The LIGO Scientific Coll. and The Virgo Coll., arXiv:1602.03840 (2016)
- [8] The LIGO Scientific Coll. and The Virgo Coll., Astrophys. J. Lett. **818**, L22 (2016)
- [9] www.elisascience.org
- [10] www.ipta4gw.org

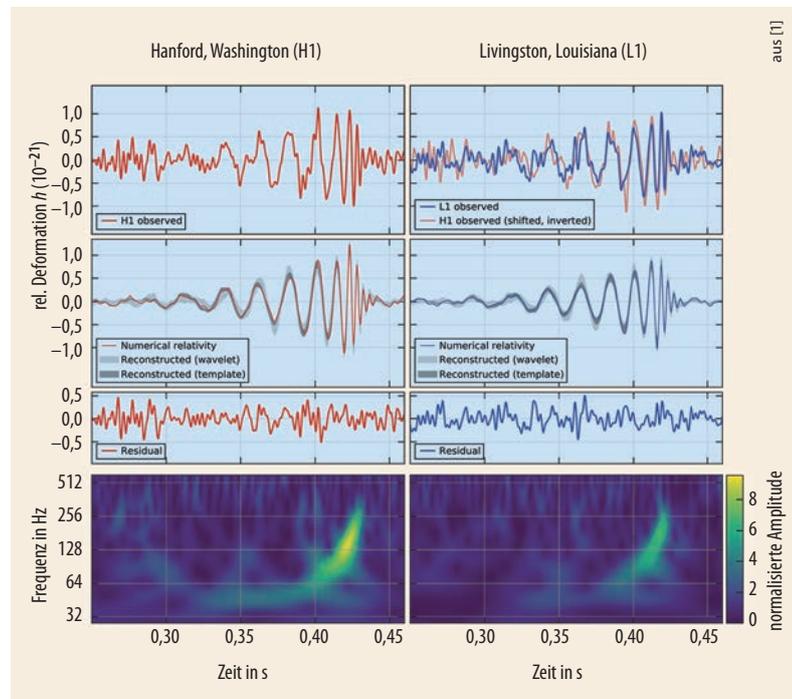


Abb. 1 Genau wie erwartet zeichnet sich das Gravitationswellensignal GW150914 durch ansteigende Frequenz und Amplitude aus und endet, wenn die beiden Schwarzen Löcher miteinander ver-

schmolzen sind. Das Signal war in beiden LIGO-Detektoren in Harford und Livingston mit bloßem Auge zu erkennen und stimmt fast exakt mit den numerischen Simulationen überein.