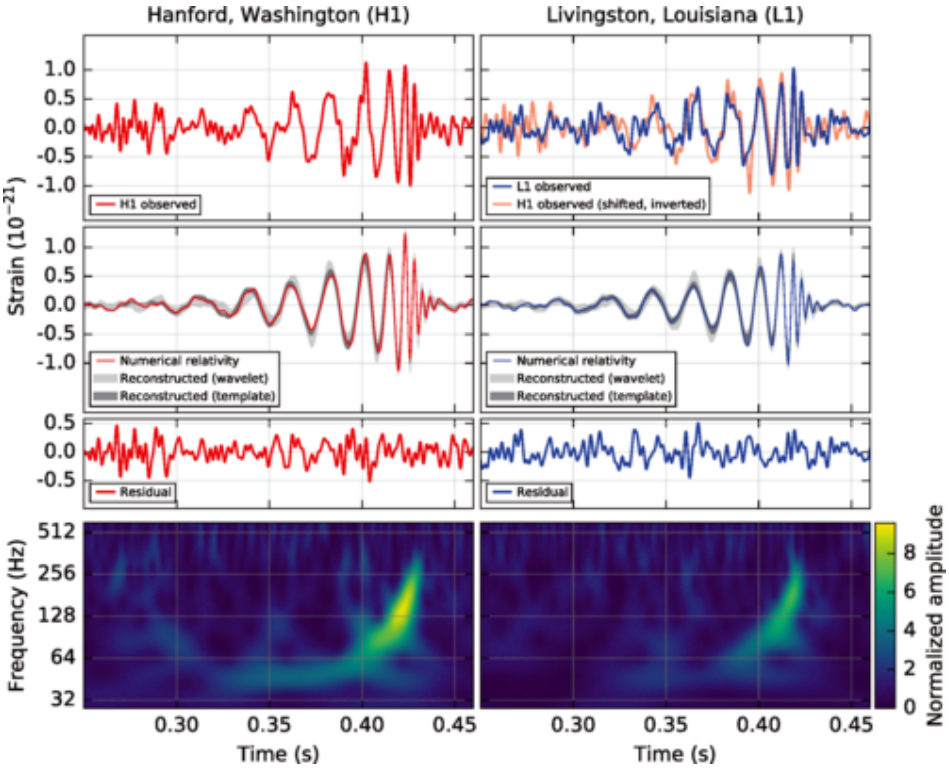
10.5 Die Entdeckung der Gravitationswellen

Mit dem direkten Nachweis der Existenz von Gravitationswellen im Jahr 2015 ist eine weitere wichtige Voraussage der Allgemeinen Relativitätstheorie bestätigt worden. Darüber hinaus eröffnet sich mit dieser Entdeckung ein neues Fenster zur Beobachtung von Ereignissen in astrophysikalischen Systemen, die bisher unzugänglich waren: neben elektromagnetischen Wellen können nun auch Gravitationswellen der Systeme beobachtet werden.

An den in Abschnitt 10.4 erwähnten beiden LIGO-Detektoren in Hanford und in Livingstone sind im Laufe der Jahre wiederholt Verbesserungen vorgenommen worden, um die Empfindlichkeit für den Nachweis von Gravitationswellen zu erhöhen. Hierbei flossen auch Erfahrungen ein, die zuvor mit dem bei Hannover stehenden deutsch-britischen Detektor GEO600 gewonnen worden waren. So war zum Beispiel die dreistufige Aufhängung der Testmassen von der GEO600-Kollaboration zur vierstufigen Aufhängung für Advanced LIGO weiter entwickelt worden. Die Umbauphase von Initial LIGO zu Advanced LIGO dauerte etwa fünf Jahre und war im September 2015 abgeschlossen. Man war damit zur Datenaufnahme bereit, die zur großen Überraschung auch sogleich erfolgreich war. Die Anlage GEO600 bei Hannover nahm von 2002 bis 2010 an gemeinsamen Datenläufen mit LIGO und VIRGO (Italien) teil, auch wenn die Empfindlichkeit von GEO600 diejenige von LIGO nicht erreichte, die schließlich bei einer maximalen relativen Verzerrung des Raumes von 10^{-21} lag.

Am 14. September 2015, um 9:50:45 Uhr koordinierter Weltzeit (UTC) war es dann so weit. Die beiden LIGO-Detektoren registrierten fast gleichzeitig, am Livingston-Detektor 6,9 Millisekunden früher, das mit bloßem Auge zu erkennende Signal. Da es in den USA noch Nacht war, wurde das empfangene Signal dort zunächst nicht bemerkt. Es waren Mitarbeiter des mit LIGO im Verbund befindlichen GEO600 bei Hannover, die ihre Kollegen in den USA darauf aufmerksam machten. Nachdem festgestellt worden war, dass dieses Signal nicht von einem Testlauf stammen konnte und der Form nach durchaus den theoretischen Erwartungen entsprach, wuchs die Überzeugung, dass hier der Nachweis von Gravitationswellen dokumentiert war.

Das von der LIGO-Kooperation veröffentlichte charakteristische Signal ist in Figur 4 dargestellt und kann wie folgt gedeutet werden: Die beiden sich umkreisenden Objekte strahlen Gravitationswellen ab, verlieren dabei Energie und kommen sich immer näher bis sie miteinander verschmelzen. Das dadurch entstehende neue Objekt schwingt noch etwas nach, bevor es zur Ruhe kommt. Die Amplitude des Signals, seine Stärke, ist proportional zur Umlaufgeschwindigkeit der Partner des binären Systems. Die Signalfrequenz vor der Kollision (hier 35 bis 150 Hertz) ist proportional zur monoton zunehmenden Umlauffrequenz und steigt bis zu einem bestimmten Wert bei der Verschmelzung an. Dieser Wert hängt davon ab, ob Schwarze Löcher oder Neutronensterne verschmelzen. Die Oszillationen, die nach der Verschmelzung zu beobachten sind, geben Auskunft über das resultierende Objekt. Falls bei einer Verschmelzung zweier Neutronensterne ein Neutronenstern entsteht, schwingt dieser anders als ein Schwarzes Loch.



Figur 4: Gezeigt sind hier die Graphiken des Ereignisses an den LIGO-Detektoren in Hanford (links H1) und Livingston (rechts L1), darunter die entsprechende theoretische Modellierung des Signals. Vertikal ist die relative Längenänderung in Einheiten von 10^{-21} aufgetragen, horizontal die Zeit in Sekunden.
Quelle: Abbott, B.P., et al., Phys. Rev. Lett. 116, 061102 (2016).

Wegen der Bedeutung des Ereignisses, das die Bezeichnung GW150914 erhielt, wurde danach viel Zeit darauf verwendet, alle möglichen Fehler im Detektorsystem auszuschließen. So kam es, dass die Veröffentlichung erst im Februar 2016 erschienen ist.[11] Die sorgfältige Analyse des Signals und der Vergleich mit Vorhersagen numerischer Simulationen, die mit Hilfe der Einsteinschen Feldgleichungen gewonnen wurden, hat ergeben, dass das Signal bei der Verschmelzung zweier Schwarzer Löcher mit Massen von 36 und 29 Sonnenmassen ausgestrahlt wurde. Hierbei ist ein neues Schwarzes Loch mit einer Masse von etwa 62 Sonnenmassen entstanden. Die Massendifferenz von drei Sonnenmassen wurde entsprechend der Energieäquivalenz $E = Mc^2$ in Form von Gravitationswellen in kürzester Zeit mit einer maximalen Leuchtkraft von über 10^{49} Watt abgestrahlt. Dieser gewaltige Energieausstoß ereignete sich in einer Entfernung von etwa 1,4 Milliarden Lichtjahren. Das Signal dauerte etwa 0,2 Sekunden und aus dem unterschiedlichen Eintreffen an den beiden LIGO-Detektoren war zu schließen, dass die Gravitationswellen sich mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten.
In den folgenden Jahren nahm die Anzahl der registrierten Gravitationswellen weiterhin zu, darunter auch solche, die bei der Verschmelzung zweier Neutronensterne

[11] Abbott, B.P., et al., Phys. Rev. Lett. 116, 061102 (2016).

entstanden waren. Ein Ereignis ist besonders interessant, da es an drei Orten, von den beiden LIGO-Detektoren und dem Virgo-Detektor (Italien), nachgewiesen wurde. Aus den unterschiedlichen Richtungen der an den drei Orten empfangenen Signale des Ereignisses konnte auf die Richtung der Quelle im Sternbild Eridanus geschlossen werden.

Die Messung der vielfältigen Aspekte des Gravitationswellensignals, wie Frequenz und Amplitude sowie deren zeitlichen Änderungen, erlaubt es, die Entfernung zur Quelle unabhängig von optischen Beobachtungen zu bestimmen. Bei dem Ereignis GW170817 sind beide Beobachtungen gemacht worden. Dies ermöglicht eine von den bisherigen Verfahren unabhängige Bestimmung des Hubble-Parameters. Der so ermittelte Wert $H = 70,0$ (km/s)/Mpc stimmt mit dem nach bisherigen Methoden bestimmten Wert gut überein.[12]

Diese wenigen Beispiele zeigen bereits, dass durch die Beobachtung von Gravitationswellen, sich ein Gebiet für die astrophysikalische Forschung öffnet mit Informationen über das Universum, die bisher so nicht zugänglich waren. Von der sich nun weiter entwickelnden Erforschung der Gravitationswellen sind noch viele interessante Erkenntnisse zu erwarten.

[12] B P. Abbott et al., Nature 551, 85–88 (2017).