



LIGO
Scientific
Collaboration



Woher wissen wir, dass GW150914 echt war? Überprüfung eines Gravitationswellensignals von astrophysikalischer Herkunft

Englische Originalversion dieser Zusammenfassung und Versionen in anderen Sprachen:
<https://www.ligo.org/science/Publication-GW150914Detchar/index.php>

Am 14. September 2015 erreichten [Gravitationswellen](#) aus der Verschmelzung von zwei Schwarzen Löchern, etwa 1,3 Milliarden Lichtjahre entfernt, die Erde. Die beiden Detektoren von [Advanced LIGO](#) (Laser-Interferometer-Gravitationswellen-Observatorium) beobachten winzige Schwankungen, die die Raum-Zeit dehnen und zusammendrücken. Um diese noch nie da gewesene Messung zu verkünden, mussten wir zunächst überprüfen, ob das von uns gemessene Signal nicht auch durch nicht-astrophysikalische Störungen erzeugt werden konnte. Für diese Bestätigung war es notwendig sicherzustellen, dass die von uns analysierten Daten von hoher Qualität und frei von Verunreinigung sind.

Wie funktioniert ein LIGO-Interferometer?

Die Advanced LIGO-Detektoren sind 4 km lange, L-förmige [Interferometer](#). Laserlicht wird am Strahlteiler, einem teildurchlässigen Spiegel, geteilt, und die beiden 4 Kilometer langen Arme, die senkrecht zueinander verlaufen, entlang gesendet. An den Enden dieser Arme trifft das Licht auf Spiegel, von denen es reflektiert wird. Es kehrt entlang der beiden Arme zum Strahlteiler zurück und vereint sich wieder. Wir können feststellen, wie gut aufeinander abgestimmt die beiden wiedervereinigten Lichtwellen sind, oder um wie viel weiter sich einer der Strahlen im Vergleich zum anderen bewegt hat, in dem wir genau beobachten, wie die beiden Lichtwellen einander überlagern (miteinander interferieren). Dieses Interferenzmuster, das durch die kombinierten Lichtwellen erzeugt wird, wird von einem Photosensor gemessen. Wenn eine starke Gravitationswelle den Detektor erreicht, ändert das Dehnen und Quetschen des Interferometers die relative Länge der beiden Arme, und am Sensor wird ein Signal im Interferenzmuster beobachtet.

Die Advanced-LIGO-Detektoren

Es gibt zwei LIGO-Detektoren, beide in den Vereinigten Staaten: einer befindet sich in Hanford, Washington und der andere in Livingston, Louisiana. Die Hanford- und Livingston-Detektoren sind beide mit der gleichen Instrumentierung ausgestattet, was sie zu fast eineiigen „Zwillingen“ macht. Sie wurden vor kurzem auf den neusten Stand der Technik gebracht, sodass sie in der Lage sind, eine relative Längenänderung zwischen den beiden 4 Kilometer langen Armen von nur 10^{-19} m, weniger als ein Tausendstel der Größe eines Protons, zu erkennen. Dies entspricht einer Messung der Entfernung zwischen der Erde und unserem nächsten Nachbarstern (Proxima Centauri) auf die Genauigkeit des Durchmessers eines Haares.

Potenzielle Rauschquellen

Wie man vielleicht erwarten kann, bedeutet die Fähigkeit, solch winzige Abstandsänderungen zu messen, dass die LIGO-Detektoren auch sehr empfindlich auf andere Störungen sind, die zusammen als „Rauschen“ bezeichnet werden. Zum Beispiel kann ein Stoß an den Tisch, auf dem der Laser montiert ist, zu einer Störung, also einem Rauschen in den Detektordaten führen. Oder ein naher Blitzschlag könnte eine Magnetfeldstörung erzeugen, die durch Elektronik oder Verkabelung in die Detektordaten eindringen könnte. Auch ein Hardwarefehler könnte Schwankungen erzeugen, die die Daten kontaminieren könnten.

Da sich die beiden Detektoren in unterschiedlichen Umgebungen befinden, werden sie von verschiedenen, externen Störquellen beeinflusst. Zum Beispiel erfährt der Livingston-Detektor viel mehr Bodenbewegung, die durch die Wellen im Golf von Mexiko und dem Atlantischen Ozean erzeugt werden. Der Hanford-Detektor ist an vielen Tagen starken, böigen Winden ausgesetzt, die die Erde und die Gebäude, in denen der Detektor untergebracht ist, erschüttern. Solche turbulenten Umweltbedingungen haben Einfluss darauf, ob die Detektoren „saubere“ Daten aufzeichnen können.

Eine wichtige Aufgabe der LIGO-Kollaboration ist es, jede Rauschquelle und jede Störung zu identifizieren, zu reduzieren oder zu beseitigen, die Daten verunreinigen, die Gravitationswellensignale enthalten könnten.

Überwachung von Rauschen und Störungen in den LIGO-Detektoren

An jedem Detektor gibt es Tausende von Sensoren, die die lokale Umgebung überwachen (z.B. durch Messung von Vibrationen im Boden und der Luft) und das Verhalten der Detektors verfolgen (z.B. durch Aufzeichnung der Laserleistung oder der verwendeten mechanischen Kraft, um die optischen Komponenten ruhig zu halten). Über 200.000 dieser zusätzlichen Hilfsmessungen liefern eine vollständige Abdeckung jeden Detektors und seiner Umgebung.

Um die Wirkung von Umgebungsstörungen auf die Detektoren zu verstehen, führen wir zu bestimmten Zeiten „künstliche“ mögliche Quellen von Datenkontamination - wie laute Geräusche, Bodener-schütterungen oder magnetische Felder - an verschiedenen Stellen innerhalb der LIGO-Standorte ein. Wir messen dann, wie sich die Daten aufgrund dieser bekannten Störquellen ändern. Diese Tests ermöglichen es uns, zu verstehen, wie unterschiedliche Umwelteinwirkungen unsere Gravitationswellendaten kontaminieren könnten. Ein Beispiel für einen Magnetfeldtest ist in Abbildung 1 dargestellt.

Datenerfassung

Um einen gesicherten Nachweis von Gravitationswellen zu beanspruchen, müssen wir genug Daten aufnehmen, um zu berechnen, wie oft ein solches Signal wie das gemessene durch zufällige Übereinstimmung mit dem Hintergrundrauschen erzeugt werden könnte. Im Falle von GW150914 brauchten wir das Äquivalent von 16 Tagen, in denen beiden Detektoren gleichzeitig wie erwartet arbeiten. Da die Detektoren nicht kontinuierlich in der erforderlichen Konfiguration arbeiten, dauerte es vom 12. September 2015 bis zum 20. Oktober 2015, um genügend Daten für die Analyse von GW150914 zu sammeln. Während wir diese Daten sammelten, hielten wir die Detektoren so nahe wie möglich in der Konfiguration, in der sie sich befanden, als GW150914 eintraf. Allerdings

gab es einige Fälle von zusätzlichem Rauschen durch Hardware-Probleme und Umweltveränderungen, wie beispielsweise dem Wetter. Während der gesamten Datensammelperiode haben wir alle Daten identifiziert, die gemäß zusätzlicher Messungen der Detektoren und ihrer Umwelt durch übermäßiges Rauschen kontaminiert waren, und diese aus unserer Analyse entfernt. Diese „Vetos“ führten zur Entfernung von 4% der aufgezeichneten Hanford-Daten und 1% der aufgezeichneten Livingston-Daten.

Die typische Empfindlichkeit der LIGO-Detektoren während dieser Zeit ist in Abbildung 2 gezeigt. Der schraffierte Bereich zeigt die zeitlichen Schwankungen der Empfindlichkeit, und die geringe Breite dieses Bereichs zeigt, dass die Detektoren stabil arbeiteten, während wir Daten für unsere Analyse sammelten.

Woher wissen wir also, dass GW150914 echt ist?

Als das Signal sehr früh am Morgen an beiden Standorten eintraf, arbeiteten beide Detektoren normal und wiesen ein geringes Rauschen auf. Sobald GW150914 als Kandidat für ein Gravitationswellensignal identifiziert wurde, führten wir eine rigorose Reihe von Überprüfungen und Untersuchungen durch, um sicherzustellen, dass das Signal nicht durch Detektor- oder Umgebungsrauschen verursacht wurde. Zum Beispiel wurde jede der 200.000 Hilfsmessungen an beiden Detektoren auf Hinweise überprüft, ob GW150914 durch ein Rauschartefakt verursacht sein könnte, und alle Überprüfungen verliefen negativ. Insbesondere zeigen keine Sensoren, die die lokale Umgebung überwachen, ausreichend starke Störungen an, um ein Signal im Gravitationswellenkanal mit der Stärke von GW150914 zu erzeugen.

Fazit

Zum Zeitpunkt von GW150914 arbeiteten die LIGO-Detektoren in einem rauscharmen Zustand mit normalen Niveaus von Umwelt- und instrumentellen Störungen. Die Detektoren waren über den gesamten analysierten Zeitraum stabil. Eine sorgfältige Analyse der Hilfsmessungen erlaubte uns, alle Daten zu entfernen, die durch instrumentelles oder Umgebungsrauschen verunreinigt waren. Da die für unsere Analyse verwendeten Daten von hoher Qualität waren, konnten wir abschätzen, dass zufällige Störungen weniger als einmal alle 203.000 Jahre ein Ereignis wie GW150914 hervorrufen würden.

Darüberhinaus fanden eingehende Untersuchungen keine Hinweise darauf, dass Umwelteinflüsse oder Detektorrauschen an beiden LIGO-Standorten GW150914 verursacht haben könnten. Eine detaillierte Studie von Umwelteinflüssen schloss eindeutig alle Quellen aus, die ein Signal in beiden Detektoren zum Zeitpunkt des Ereignisses erzeugt haben könnten, mit der Ausnahme eines astrophysikalischen Gravitationswellensignal von zwei Schwarzen Löchern.

Weiterführende Informationen:

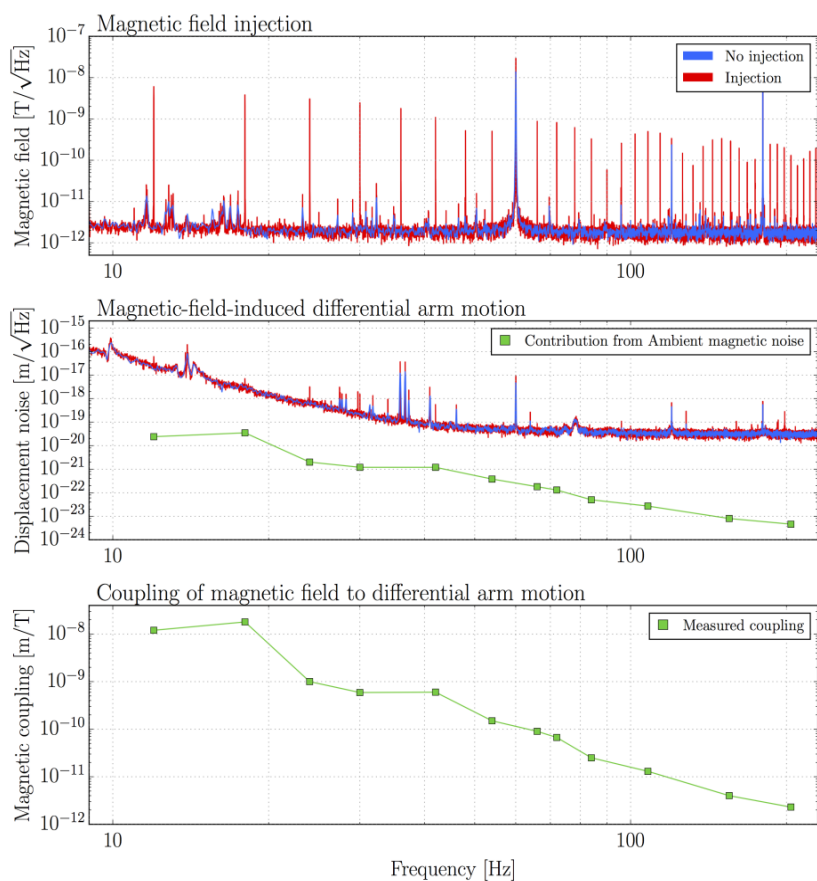
- Wissenschaftlicher Fachartikel zur Beobachtung von GW150914:
[Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger](#)
- Wissenschaftlicher Fachartikel zur hier beschriebenen Überprüfung des Signals:
[Characterization of Transient Noise in Advanced LIGO Interferometers relevant to Gravitational Wave Signal GW150914](#)

Abbildungen aus dem Fachartikel

Abbildung 1: Ein Beispiel für einen Magnetfeld-Injektionstest, durchgeführt am LIGO-Detektor in Hanford.

Ganz oben gezeigt ist die Ausgabe eines Magnetometers, das die Magnetfeldstärke misst. In blau ist die magnetische Feldstärke während einer ruhigen Periode dargestellt, sie zeigt typische Magnetfeldschwankungen in der Nähe des Detektors. In rot sind die zusätzlichen „Spitzen“ der gleichen Magnetometer-Ausgabe aufgetragen, als ein künstliches, oszillierendes Magnetfeld in der Nähe erzeugt wurde.

In der Mitte gezeigt sind die Detektordaten, die benutzt wurden, um die Gravitationswellen zu messen. Die beiden Kurven zeigen die Detektordaten in den gleichen Zeitperioden wie die obere Teilabbildung: blau während der ruhigen Zeit, und rot beim Magnetfeld-Test. Die grünen Punkte im mittleren Feld sind eine Schätzung, um wie viel das magnetische Rauschen in der ruhigen Zeit zum Gesamthintergrundrauschen während der Datenaufnahme beigetragen hat.



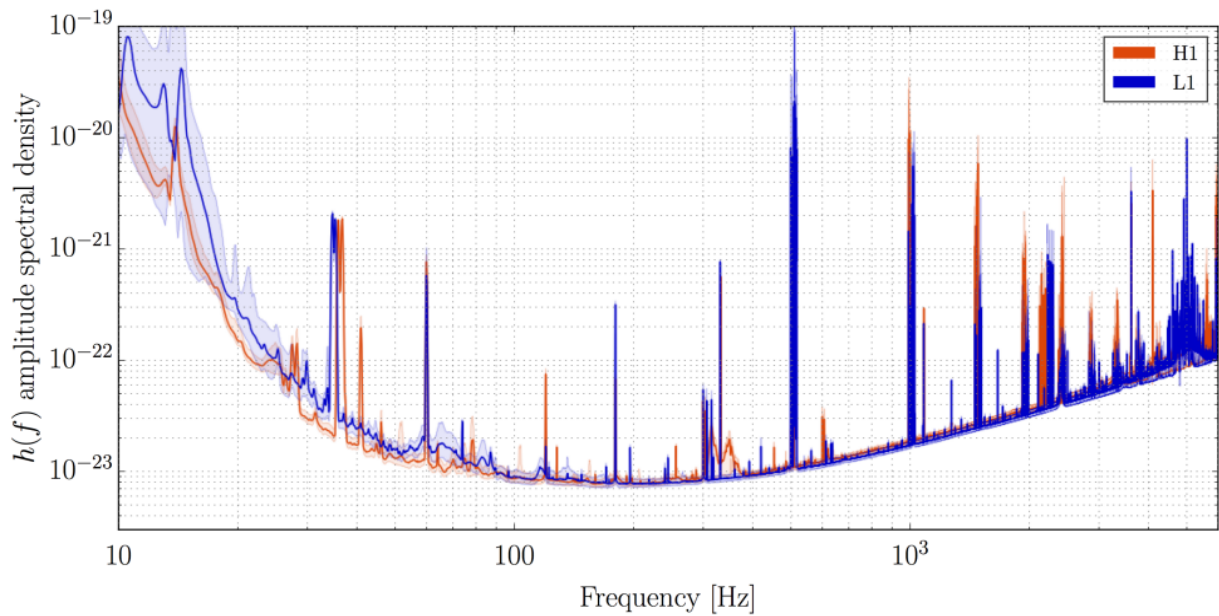


Abbildung 2: Die durchgezogenen Kurven zeigen das typische Niveau (Median) der Hintergrundfluktuationen in den LIGO-Detektoren in Hanford und Livingston als eine Funktion der Frequenz während des Analysezeitraums zwischen dem 12. September und dem 20. Oktober 2015. Der schattierte Bereich zeigt die Variationsbreite derartiger Kurven über diesen Zeitraum (von 5% bis 95% aller Messungen).