

Tests der Allgemeinen Relativitätstheorie mittels Gravitationswellen von Verschmelzungen schwarzer Löcher

Einsteins Allgemeine Relativitätstheorie hat seit ihrer Entstehung vor über 100 Jahren zahlreiche Tests bestanden. Die Beobachtung von Gravitationswellen, die von zwei verschmelzenden schwarzen Löchern abgestrahlt werden, war eine der am meisten erwarteten Entdeckungen in der Geschichte der Allgemeinen Relativitätstheorie. Einsteins Theorie wurde damit erneut bestätigt. Mit der nun beginnenden Gravitationswellenastronomie können wir Gravitationswellen von Verschmelzungen zweier schwarzer Löcher nutzen, um damit Einsteins Theorie erstmals in Umgebungen extrem starker Schwerkraft zu testen, die sich in keinem Labor nachstellen lassen.

Neuartige Tests der Allgemeinen Relativitätstheorie mittels Gravitationswellen wurden mit dem Verschmelzen zweier Neutronensterne (GW170817) und dem Verschmelzen zweier schwarzer Löcher, wie zum Beispiel GW150914, GW170104 und GW170814, durchgeführt. Hier führen wir Tests an allen sicher nachgewiesenen Signalen von Verschmelzungen zweier schwarzer Löcher durch, die im „Gravitational-Wave Transient Catalog 1“ (GWTC-1) aufgelistet sind. Wir kombinieren die Ergebnisse der Analysen von den sichersten Nachweisen, um eine Obergrenze für Abweichungen von den Vorhersagen der Allgemeinen Relativitätstheorie zu bestimmen. Wir können jedoch nicht alle Tests für jedes Signal durchführen. Einige Tests erfordern eine ausreichende Lautstärke im nieder- oder hochfrequenten Teil des Signals, und die relative Lautstärke dieser Signalteile ist bei den unterschiedlichen Doppelsystemen verschieden. Der Unterschied hängt hauptsächlich von der Gesamtmasse des Doppelsystems ab, der bestimmt, welcher Signalteil im Frequenzbereich mit dem geringsten Detektor-Rauschen liegt.

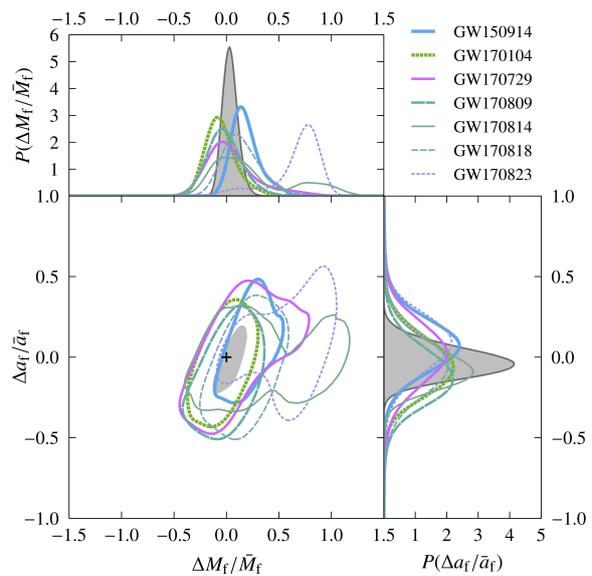


Abb. 1: 90%-Konfidenzbereiche für jedes Ereignis, bei dem der Unterschied zwischen der Masse des entstandenen schwarzen Lochs, M_f , und dessen Drehimpuls, a_f , einmal während der Umrundung und einmal nach der Umrundung gemessen wurde. Der grau schattierte Bereich ist das Ergebnis der Kombination von Ereignissen. Das schwarze Kreuz bei Null zeigt die genaue Übereinstimmung zwischen den beiden Messungen an, wie erwartet, falls die Relativitätstheorie stimmt. (Abbildung 2 unserer Veröffentlichung)

Vergleich der Daten mit unserer Wellenformschätzung

Wenn wir ein Gravitationswellensignal finden, verwenden wir Analysemethoden, um die Eigenschaften seiner Quelle zu messen, wie hier erläutert. Mit diesen Messungen können wir dann die Daten mit dem Modell der Gravitationswellenform vergleichen, die dem beobachteten Signal am besten entspricht. Dieses Wellenformmodell wird unter Verwendung der Vorhersagen der Allgemeinen Relativitätstheorie erstellt. Wenn das Modell die vorhandene Energie im Signal nicht erklären kann, müssten wir erneut prüfen, ob die von uns verwendete Theorie richtig ist, oder ob wir einen wichtigen Aspekt der Physik in der Konstruktion des Modells übersehen haben. Wir haben in unseren Signalen von Doppelsystemen schwarzer Löcher keine Hinweise auf zusätzliche Energieabstrahlung gefunden. Nach Abzug des am besten passenden Wellenformmodells von den Daten stimmt der Rest mit dem vorhandenen

Detektor-Rauschen zu jeden beliebigen anderen Zeitpunkt überein.

Prüfung der Übereinstimmung zwischen den verschiedenen Teilen des Signals

Es gibt drei Stufen der Kollision zweier schwarzer Löcher: die lange Umrundungsphase („Inspiral“-Phase), in der sich die beiden schwarzen Löcher umrunden und aufeinander zufallen; die Verschmelzungsphase, in der die beiden schwarzen Löcher zusammenstoßen, um schließlich zu einem größeren schwarzen Loch zu werden; und die Abkling-Phase, in der das verbleibende (neu entstandene) schwarze Loch Gravitationswellen aussendet, während es seinen endgültigen Ruhezustand erreicht. Die Allgemeine Relativitätstheorie sagt voraus, was die Masse und der Drehimpuls dieses verbleibenden schwarzen Lochs sein sollten, basierend auf den Massen und Drehimpulsen der sich anfangs umrundenen schwarzen Löcher. Wir können die Theorie testen, indem wir prüfen, ob Messungen der Umrundungs-, Verschmelzungs- und Abkling-Phase die gleichen Eigenschaften des entstehenden schwarzen Lochs vorhersagen. Die Konturen in Abbildung 1 stellen Bereiche dar, in denen die Differenz zwischen den beiden separaten Messungen mit einer Wahrscheinlichkeit von 90 % liegt. Dies ist als Konfidenzintervall von 90 % bekannt. Alle individuellen Wahrscheinlichkeiten sowie die daraus resultierende Gesamtwahrscheinlichkeit, die durch Kombination aller Ereignisse entsteht, stimmen mit der Vorhersage der Allgemeinen Relativitätstheorie, dargestellt durch ein schwarzes Kreuz in Abbildung 1, überein.

Mögliche Abweichungen der Gravitationswellenform von der Allgemeinen Relativitätstheorie

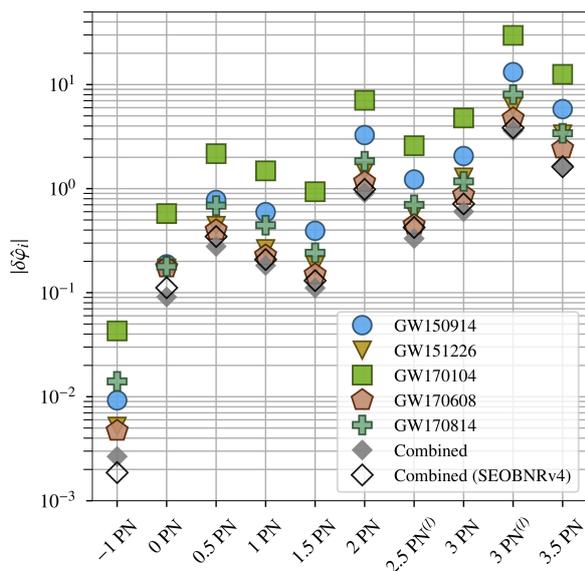


Abb. 2: Obergrenzen für die Abweichungen von den post-Newton'schen Bedingungen, die die Umrundungsphase einer Verschmelzung eines Doppelsystems beschreiben. Die -1PN- und die 0.5PN-Terme existieren in der Allgemeinen Relativitätstheorie nicht, sodass die Obergrenze die Möglichkeit darstellt, dass diese Terme in den Daten überhaupt vorhanden sind. Bei den anderen Ausdrücken gibt die Obergrenze eine Abweichung vom Wert der Allgemeinen Relativitätstheorie ungleich Null an. (Abbildung 4 unserer Veröffentlichung)

Die Allgemeine Relativitätstheorie beschreibt, wie zwei sich umkreisende schwarze Löcher Gravitationswellen erzeugen, dabei Energie verlieren und sich näher kommen, bis sie miteinander verschmelzen. Wir verwenden diese Vorhersagen der Allgemeinen Relativitätstheorie um Gravitationswellenformmodelle zu erstellen. Es gibt zwar noch keine Wellenformmodelle für die Verschmelzung von zwei schwarzen Löchern in alternativen Theorien der Schwerkraft, mit denen wir sie vergleichen können (sie sind sehr schwer zu berechnen!), wir können jedoch die Vorhersagen der Allgemeinen Relativitätstheorie durch kleine Modifikationen an unseren derzeit verfügbaren Wellenformmodellen testen, und die Daten mit diesen „verzerrten“ Wellenformen vergleichen. Wir haben zuvor gezeigt, dass die Umrundungsphase der Verschmelzung von Doppelsystemen durch eine Reihe von Begriffen aus dem post-newtonschen (PN) Formalismus beschrieben wird, welche die Newtonsche Schwerkraft korrigieren, und so die wichtigsten Auswirkungen der Allgemeinen Relativitätstheorie einbeziehen. Unter Berücksichtigung von Abweichungen dieser PN-Bedingungen können wir die Umrundungsphase unserer Wellenformen testen, und erhalten dabei eine gute Übereinstimmung mit der Allgemeinen Relativitätstheorie für alle von uns analysierten Doppelsysteme schwarzer Löcher. In Abbildung 2 geben wir die Obergrenzen für die Größe der Abweichungen von der Allgemeinen Relativitätstheorie an.

Eine ähnliche Analyse wird mit den Bedingungen durchgeführt, die die Verschmelzungs- und Abklingphasen eines Doppelsystems beschreiben, und wir erhalten wiederum eine gute Übereinstimmung mit den Vorhersagen der Allgemeinen Relativitätstheorie.

Die Reise einer Gravitationswelle zu unseren Detektoren

Wir können nicht nur testen, ob die Allgemeine Relativitätstheorie zufriedenstellend beschreibt, wie die Quelle Gravitationswellen erzeugt (was wir im vorherigen Abschnitt durch Modifizieren der post-newtonschen Bedingungen und der Verschmelzungs- und Abklingbedingungen gemacht haben), sondern auch, wie sich die Wellen im Universum ausbreiten, nachdem sie erzeugt wurden. Einige Wellen, wie beispielsweise Wasserwellen, können (durch einen Effekt namens Dispersion) auseinanderlaufen, wenn sie sich durch ein Medium bewegen. Das bedeutet, dass sie sich mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten je nach Frequenz ausbreiten, und dass so die Welle selbst verformt wird. Wenn die Allgemeine Relativitätstheorie korrekt ist, sollte dieser Effekt bei Gravitationswellen nicht auftreten. Durch Einführung eines Modifikationsterms für die Ausbreitung von Gravitationswellen (unter Berücksichtigung einer möglichen Dispersion) und durch Messungen, ob diese Veränderung in den Daten vorliegt, können alternative Gravitationstheorien eingeschränkt werden, die eine andere Ausbreitung von Gravitationswellen vorhersagen.

Wir beschreiben die Abweichung von der Allgemeinen Relativitätstheorie durch zwei Parameter A und α , wobei A die Größe der Abweichung angibt und α ihre Abhängigkeit von der Frequenz beschreibt. Wenn die Allgemeine Relativitätstheorie korrekt ist, sollte A genau Null sein. Unterschiedliche α -Werte entsprechen unterschiedlichen alternativen Theorien. Abbildung 3 zeigt die Obergrenzen (die positiv oder negativ sein können) für die Größe von A für verschiedene α -Werte. Durch Kombination aller sicheren Nachweise schwarzer Löcher aus dem GWTC-1-Katalog, erhalten wir unsere stringentesten Grenzen für Alternativen zur Allgemeinen Relativitätstheorie.

Der besondere Fall von $\alpha = 0$ und $A > 0$ entspricht den Ausbreitungseffekten eines massiven Gravitons, d.h. des für Gravitationswellen verantwortlichen Quantenteilchens. In der Allgemeinen Relativitätstheorie wird erwartet, dass das Graviton masselos ist, während einige alternative Theorien der Schwerkraft vorhersagen, dass das Graviton Masse hat. Mit Gravitationswellen können wir Grenzen dafür setzen, wie groß die Masse des hypothetischen massiven Gravitons sein könnte. Wir finden die Grenze der Graviton-Masse bei maximal $4,7 \cdot 10^{-23} \text{ eV}/c^2$, eine Verbesserung von 1,6 gegenüber unserer vorherigen Berechnung. Zum Vergleich sind die leichtesten Teilchen, die keine verschwindende Masse haben, Neutrinos: Wir wissen, dass mindestens zwei Neutrinos Massen von mehr als $0,009 \text{ eV}/c^2$ haben; das leichteste Neutrino könnte masselos sein.

Polarisation von Gravitationswellen

Die Allgemeine Relativitätstheorie sagt voraus, dass Gravitationswellen nur zwei mögliche Polarisierungen haben. Allgemeine Theorien der Schwerkraft erlauben jedoch bis zu sechs verschiedene Polarisationszustände. Die Ermittlung des Polarisationsgehalts eines Gravitationswellensignals ist mit den beiden LIGO-Detektoren aufgrund ihrer relativen Ausrichtung nicht möglich. Gravitationswellenbeobachtungen von LIGO und Virgo waren entscheidend für die ersten überzeugenden Tests der Gravitationswellenpolarisation. Die Ergebnisse, die mit drei Gravitationswellendetektoren (den beiden Advanced-LIGO-Detektoren und dem Advanced-Virgo-Detektor) beobachtet wurden, wurden zuvor für GW170814 und GW170817 veröffentlicht. Während wir jetzt einige zusätzliche Ereignisse haben, die von drei Detektoren beobachtet wurden, führt keines zu engeren Grenzen als die Neutronensternverschmelzung (GW170817). Der Grund dafür liegt an den größeren Unsicherheiten in der Lokalisierung der verschmelzenden schwarzen Löcher. Die neuen Ereignissen liefern kein Beweise dafür, dass alternative Polarisierungen von den Daten bevorzugt werden, gegenüber denen, die von der Allgemeinen

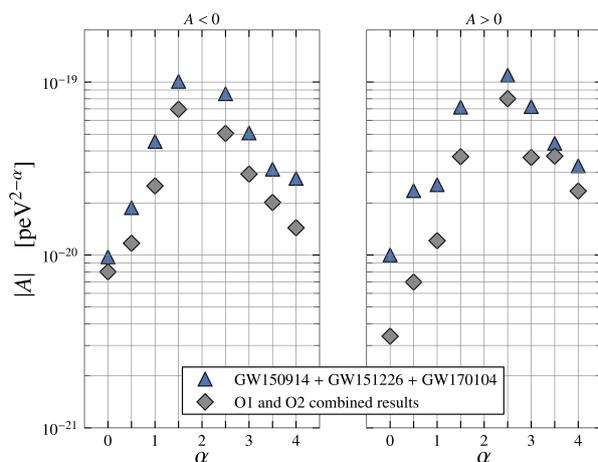


Abb. 3: Obergrenze für die Abweichungen von der durch die Allgemeine Relativitätstheorie vorhergesagten Dispersionsrelation. Die blauen Dreiecke stellen aktualisierte Grenzwerte dar, die aus zuvor veröffentlichten Gravitationswellen stammen/erhalten wurden, und die grauen Diamanten stellen die neuen Obergrenzen dar, die sich aus der Kombination der sehr sicheren Nachweise verschmelzender schwarzer Löcher ergeben, die im ersten (O1) und zweiten (O2) Beobachtungslauf von Advanced LIGO und Advanced Virgo beobachtet wurden. (Abbildung 5 unserer Veröffentlichung)

Relativitätstheorie vorhergesagt werden.

Zusammenfassung

Alle hier durchgeführten Tests haben gezeigt, dass die von Advanced LIGO und Advanced Virgo beobachteten Verschmelzungen von schwarzen Löchern mit den Vorhersagen der Allgemeinen Relativitätstheorie übereinstimmen. Darüber hinaus haben wir durch die Kombination von Informationen aus den sicheren Nachweisen von Verschmelzungen schwarzer Löcher unsere früheren Einschränkungen hinsichtlich möglicher Abweichungen von der Allgemeinen Relativitätstheorie um Faktoren bis zu 2,5 verbessert. Die Zukunft wird viele weitere Beobachtungen von Paaren schwarzer Löchern mit sich bringen und noch mehr Informationen zu diesen Messungen liefern. Darüber hinaus entwickeln wir eine Vielzahl neuer Methoden, um die Allgemeine Relativitätstheorie mit diesen Meldungen zu testen. Wir werden Einsteins Theorie weiter testen!

Glossar

Drehimpuls: Größe, die misst, wie schnell sich ein Objekt um sich selbst dreht.

Gravitationswellenpolarisation: Die geometrische Form des Streckens und Stauchens der Raumzeit, die durch eine sich ausbreitende Gravitationswelle verursacht wird.

Rauschen: Schwankungen im Gravitationswellen-Messsignal aufgrund verschiedener Geräte- und Umwelteinflüsse. Die Empfindlichkeit eines Gravitationswellendetektors ist durch Rauschen begrenzt.

Schwarzes Loch: Ein Bereich der Raumzeit, der durch eine extrem kompakte Masse verursacht wird, in der die Schwerkraft so stark ist, dass nichts, einschließlich Licht, sie verlassen kann.

Wellenform: Darstellung davon, wie sich ein Gravitationswellensignal mit der Zeit ändert.

Weiterführende Informationen

Unsere Webseiten: <http://www.ligo.org> und <http://www.virgo-gw.eu>.

Lesen Sie die gesamte Veröffentlichung: <https://dcc.ligo.org/P1800316/public/main>.

Lesen Sie die Veröffentlichung über GW-Entdeckungen: <https://dcc.ligo.org/P1800307/public/main>.

Lesen Sie die kostenlose Begleit-Veröffentlichung zu den Populationseigenschaften von Paaren schwarzer Löcher, die aus O1 und O2 abgeleitet wurden, unter <https://dcc.ligo.org/P1800324/public/main>.

Entdecken Sie die Katalogdaten unter <https://www.gw-openscience.org/> im Gravitational Wave Open Science Center.