



# Tests der allgemeinen Relativitätstheorie mit GW<sub>170817</sub>

## Einführung

Die Entdeckung der Verschmelzung von zwei Neutronensternen mit dem Gravitationswellensignal GW<sub>170817</sub> hat bereits erheblichen Einfluss auf unser Verständnis von Astrophysik, Kosmologie und Grundlagenphysik genommen. Dieses Ereignis hat zwei auffällige Eigenschaften, die es im Gegensatz zu früheren Gravitationswellennachweisen von LIGO und Virgo auszeichnen. Erstens ist es das einzige bisher beobachtete Gravitationswellensignal, das von elektromagnetischer Strahlung begleitet wurde. Diese ließ sich in verschiedenen Frequenzbändern, von hochenergetischen Gammastrahlen bis hin zu Abstrahlung niederfrequenter Radiowellen, beobachten. Zweitens entstand es bei der Verschmelzung von zwei Neutronensternen; diese Objekte unterscheiden sich in folgenden Punkten von Schwarzen Löchern, von denen alle bisher nachgewiesenen Gravitationswellensignale stammten. Neutronensterne sind weniger massereich als Schwarze Löcher. Im allgemein wird erwartet, dass ihre Masse zwischen ein und zwei Sonnenmassen liegt, während die von LIGO und Virgo beobachteten stellaren Schwarzen Löcher Massen aufwiesen, die zehn- oder sogar fünfzigmal größer waren als die der Sonne. Im Gegensatz zu Schwarzen Löchern, die man als reine Schwerkraft betrachten kann, sind Neutronensterne ausgedehnte, strukturierte Materieobjekte. Zum Ende der gegenseitigen Umrundung zweier Neutronensterne, wenn beide Objekte nahe beieinander sind, werden die Neutronensterne durch das Gravitationsfeld des anderen räumlich verformt, was zu charakteristischen „Fingerabdrücken“ im Gravitationswellensignal führt.

Diese einzigartigen Eigenschaften von GW<sub>170817</sub> ermöglichen es uns, zum ersten Mal das Wesen der Schwerkraft zu untersuchen, die am wenigsten verstandene der fundamentalen Wechselwirkungen der Natur (Grundkräfte der Physik) – und zwar mit verschmelzenden Neutronensternen. In diesem Artikel präsentieren wir Erkenntnisse, die uns GW<sub>170817</sub> über grundlegende Eigenschaften von Einsteins allgemeiner Relativitätstheorie ermöglicht. Die 1915 von Albert Einstein veröffentlichte allgemeine Relativitätstheorie behandelt die Schwerkraft als geometrische Eigenschaft von Raum und Zeit; sie ist eine der Grundlagen für unserer gegenwärtigen Beschreibung der Welt. Die Schwerkraft wird nicht als Kraft behandelt, sondern als ein Aspekt der Raumzeitgeometrie selbst. Die Raumzeitkrümmung ist dynamisch an Materie und Strahlung in dieser Geometrie gekoppelt. Trotz ihrer Erfolge sind die allgemeine Relativitätstheorie und ihre Vorhersagen noch nicht vollständig überprüft worden. Der Theorie fehlt die Vereinheitlichung mit den anderen fundamentalen Wechselwirkungen. Wir haben eine Reihe von Tests mit GW<sub>170817</sub> durchgeführt, um zu überprüfen, ob die Beobachtung einer Verschmelzung von zwei Neutronensternen mit einer allgemeinen relativistischen Gravitationstheorie übereinstimmt. Alle unsere Tests haben die Vorhersagen der allgemeinen Relativitätstheorie bestätigt.

## Die Signalentwicklung entspricht den Erwartungen aus der allgemeinen Relativitätstheorie

Unter Annahme, dass die allgemeine Relativitätstheorie stimmt und der Anwendung numerischer und analytischer Methoden können wir die Bahnentwicklung während der Umrundung der beiden Neutronensterne präzise vorhersagen, und ein Modell für die Form der abgestrahlten Gravitationswellen erstellen. Um die Signalentwicklung auf mögliche Verstöße gegen die allgemeine Relativitätstheorie zu testen, führen wir bestimmte Veränderungen in unsere Wellenformmodelle ein. Diese Veränderungen sind unabhängig von einer bestimmten alternativen Gravitationstheorie; stattdessen berücksichtigen wir allgemeine Abweichungen von der Vorhersage der allgemeinen Relativitätstheorie für die Phase der Gravitationswellen während der Umrundung. In der Praxis wird dies dadurch erreicht, dass die Terme einer bestimmten „Post-Newtonschen“ (PN)-Ordnung variieren dürfen.

Die post-Newtonsche Näherung ist eine weit verbreitete Analyseverfahren, die die Newtonsche Schwer-

kraft um Effekte der allgemeinen Relativitätstheorie erweitert und damit die Umlaufbahntwicklung und die Gravitationswellen eines Doppelsystems modelliert. Dieser Ansatz ermöglicht es uns, physikalische Größen wie die Phasenentwicklung der Gravitationswellen als eine Reihe auszudrücken, die zum grundlegenden Newtonschen Ausdruck immer komplexere post-Newtonsche Terme addiert. Im Gegensatz zu den zwei sich umkreisenden Körpern in der Newtonschen Schwerkraft werden post-Newtonsche Korrekturen durch Faktoren proportional zu  $(v/c)^{2n}$  gedämpft. Hierbei ist  $v$  die Umlaufgeschwindigkeit,  $c$  die Lichtgeschwindigkeit und  $n$  die PN-Ordnung. Bei der Ordnung 1PN gilt  $n = 1$ ; dies stellt die erste Post-Newtonsche Korrektur dar. Höhere PN-Ordnungen (2PN und höher) gewinnen an Bedeutung, wenn sich die Umlaufbahn des Doppelsystems durch Abstrahlung von Gravitationswellen verkleinert und die Bahngeschwindigkeit zunimmt. In der allgemeinen Relativitätstheorie haben Beiträge zur Phase der Gravitationswellen bei verschiedenen PN-Ordnungen spezifische, bekannte Werte, und es wird erwartet, dass die Abweichungen von diesen Werten Null betragen.

Bestimmte alternative Theorien der Schwerkraft erlauben auch besondere Beiträge zur post-Newtonschen Reihe bei „negativen“ PN-Ordnungen. Diese PN-Ordnungen fehlen im Rahmen der allgemeinen Relativitätstheorie gänzlich. Um „negative“ PN-Ordnungen zu veranschaulichen, erinnern wir uns, dass die üblichen Beiträge der 1PN-Ordnung (zum Beispiel die Bewegung eines Doppelsystems) um einen Faktor proportional zu  $v/c$  relativ zur Newtonschen Bewegung gedämpft sind. Beiträge in der -1PN-Ordnung würden dagegen um einen Faktor proportional zu  $c/v$  erhöht! In einer alternativen Gravitationstheorie, die solche Beiträge erlaubt, wären zusätzliche „negative“ PN-Ordnungen für eine genaue Beschreibung der Bewegung eines Doppelsystems und der Gravitationsstrahlung von großer Bedeutung, wenn die Objekte noch sehr weit voneinander entfernt sind (und die Frequenz der abgestrahlten Gravitationswellen noch sehr niedrig ist).

Wir haben unsere derart modifizierten Wellenformmodelle mit den Daten von GW170718 verglichen und das Ausmaß der Abweichungen von der allgemeinen Relativitätstheorie zusammen mit anderen Eigenschaften der Quellen wie Massen oder Drehimpulsen bestimmt. Abbildung 1 zeigt Obergrenzen (mit 90%-tiger statistischer Konfidenz) für Abweichungen von der allgemeinen Relativitätstheorie bei verschiedenen PN-Ordnungen während der Umrundungsphase. Um das Vertrauen in unsere Ergebnisse zu erhöhen, haben wir zwei unabhängige Analysen mit unterschiedlichen Methoden und Wellenformmodellen durchgeführt. Diese unabhängigen Ergebnisse sind in der Abbildung durch blaue und gelbe Markierungen dargestellt. Bei jeder PN-Ordnung stimmen unsere Grenzwerte für Abweichungen mit den für die allgemeine Relativitätstheorie erwarteten Nullwerten überein. Darüber hinaus finden wir keine Hinweise auf Gravitationsdipolstrahlung, deren Abstrahlung in der allgemeinen Relativitätstheorie verboten ist, die alternative Gravitationstheorien jedoch häufig vorhersagen. In solchen alternativen Theorien wird erwartet, dass das Gravitationsdipolmoment am Anfang der gegenseitigen Umrundung eines Doppelsystems seine Spuren in den ausgesandten Gravitationswellen hinterlässt. Dadurch treten in der Phasenentwicklung des Signals (wie oben beschrieben) völlig neue Terme in der -1PN-Ordnung auf. Unsere Ergebnisse schließen Beiträge der -1PN-Ordnung im Signal aus und bestätigen das Fehlen dipolarer Gravitationswellen.

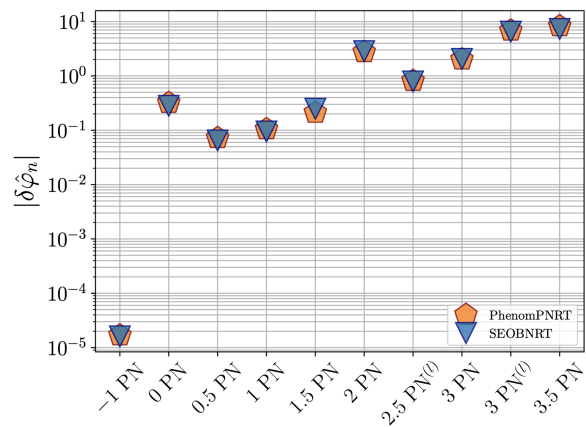


Abb. 1: Diese Abbildung zeigt Obergrenzen (mit 90 % statistischer Konfidenz) für Abweichungen der Phase der Gravitationswellen von der allgemeinen Relativitätstheorie. In alternativen Gravitationstheorien sind Abweichungen von Termen bestimmter Post-Newtonscher (PN) Ordnung möglich, die das Gravitationswellensignal während der Umrundung der zwei Neutronensterne beschreiben. In der allgemeinen Relativitätstheorie haben die Beiträge zur Phase der Gravitationswellen bei verschiedenen PN-Ordnungen spezifische, bekannte Werte, und es wird erwartet, dass die Abweichungen Null sind. Die gelben und blauen Markierungen in der Abbildung stellen die Ergebnisse von zwei unabhängigen Untersuchungen dar.

## Ausbreitungseigenschaften von Gravitationswellen

Neben den Ausstrahlungseigenschaften des Signals sagt die allgemeine Relativitätstheorie auch voraus, wie sich das Signal von der Quelle in einer Entfernung von 40 Megaparsec zu uns auf der Erde ausbreitet. In der allgemeinen Relativitätstheorie breiten sich Gravitationswellen mit Lichtgeschwin-

digkeit aus und sind nicht dispersiv. Eine modifizierte Dispersion, die durch verschiedene alternative Gravitationstheorien vorhergesagt wird, verändert die Ausbreitung von Gravitationswellen. Um die Ausbreitung von Gravitationswellen in alternativen Gravitationstheorien zu untersuchen, haben wir unsere Daten mit Wellenformmodellen verglichen, die Effekte modifizierter Dispersion beinhalten. Wir stellen fest, dass die Ausbreitung von GW<sub>170817</sub> keine Hinweise auf eine Abweichung von der allgemeinen Relativitätstheorie zeigt.

## Suche nach weiteren Dimensionen im Universum

Wir haben auch nach möglichen Beweisen für die Existenz weiterer Dimensionen im Universum gesucht. In alternativen Gravitationstheorien, die zusätzliche Dimensionen enthalten (über die vier Standarddimensionen von Raum und Zeit hinaus), erwarten wir, dass ein Gravitationswellensignal, das weit entfernt von der Quelle beobachtet wird, schwächer ist als dasjenige, das wir nach der allgemeinen Relativitätstheorie messen würden. Dies liegt daran, dass Gravitationswellen in die zusätzlichen Dimensionen entweichen und die Amplitude der nachgewiesenen Gravitationswellen dämpfen. Dieses schwächere Signal würde zu einer falschen Schätzung der Entfernung zur Quelle führen, wenn wir unsere Daten mit Wellenformmodellen vergleichen, bei denen die allgemeine Relativität als korrekt angenommen wird. Bei der Verschmelzung der beiden Neutronensterne von GW<sub>170817</sub> haben wir nicht nur Gravitationswellen beobachtet, sondern auch eine Vielzahl von elektromagnetischen Signalen empfangen. Optische Messungen konnten die Ursprungsgalaxie dieser Verschmelzung identifizieren und unabhängig von den Gravitationswellen-Daten den Abstand zur Quellen messen. Mit diesen zusätzlichen Informationen konnten wir feststellen, ob das Gravitationswellensignal von GW<sub>170817</sub> Anzeichen einer Amplituden-Dämpfung und einen Verlust aufweist, der auf ein Vorhandensein oder Fehlen höherer Dimensionen hinweist. In Abbildung 2 geben wir Obergrenzen (mit 90%-tiger statistischer Konfidenz) für die Anzahl der Raumzeitdimensionen an. Die Schattierung gibt die Anzahl der Dimensionen an, die nicht mit den Daten vereinbar sind. Diese Ergebnisse wurden mit bestimmten Annahmen über den Prozess des Gravitations„verlusts“ gewonnen. Insbesondere haben wir bestimmte Modellparameter festgelegt, die bestimmen, in welchem Abstand von der Quelle die Gravitationswellen in höhere Dimensionen entweichen und wie abrupt dieser Übergang ist. Aus den erhaltenen Ergebnissen können wir schließen, dass GW<sub>170817</sub> mit der von Einstein vor über hundert Jahren vorgeschlagenen vierdimensionalen Raumzeit übereinstimmt.

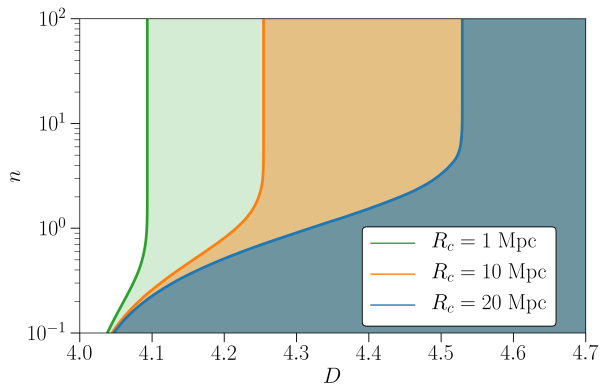


Abb. 2: Diese Abbildung zeigt die Anzahl der Raumzeitdimensionen  $D$ , die mit der gemeinsamen GW<sub>170817</sub>-Beobachtung mit Gravitations- und elektromagnetischen Wellen vereinbar sind. Die Schattierung zeigt Bereiche an, die nicht mit den Daten vereinbar sind. Wir haben bestimmte Modellparameter festgelegt, die bestimmen, ab welchem Abstand von der Quelle Gravitationswellen in mögliche höhere Dimensionen entweichen (bezeichnet mit  $R_c$ ) und wie abrupt dieser Übergang ist (bezeichnet mit  $n$ ).

## Untersuchung der Gravitationswellen-Polarisation

Zuletzt stellen wir fest, dass eine bestimmte Signaleigenschaft (der Polarisationsinhalt) mit der allgemeinen Relativitätstheorie übereinstimmt. Bei Transversalwellen (wie elektromagnetischen Wellen oder Gravitationswellen) ist die Polarisation eine Eigenschaft, die Schwingungsrichtung der Wellen kennzeichnet. Im Gegensatz zu fast allen anderen Gravitationstheorien, die im allgemeinen sechs verschiedene Polarisationszustände zulassen, erlaubt die allgemeine Relativitätstheorie nur zwei Polarisierungen. Gravitationswellenbeobachtungen mit drei oder mehr Detektoren können den Polarisationsinhalt einer Gravitationswelle bestimmen. Die Daten von GW<sub>170817</sub>, die von den beiden LIGO-Detektoren und Virgo gemeinsam beobachtet wurden, sprechen für die allgemeine relativistische Vorhersage von nur zwei Polarisationszuständen.

## Zusammenfassung

GW<sub>170817</sub> hat sich als vollkommen im Einklang mit einer Verschmelzung von zwei Neutronensternen in einer allgemeinen relativistischen Gravitationstheorie erwiesen. Die allgemeine Relativitätstheorie besteht eine weitere Reihe herausfordernder Tests!

## Glossar

**Dispersion:** Wenn die Geschwindigkeit, mit der sich eine Welle bewegt, von ihrer Frequenz abhängt.

**Gammastrahlen:** Kurzwellige elektromagnetische Strahlung, die durch den spontanen radioaktiven Zerfall von Atomkernen entsteht.

**Kosmologie:** Das Studium des Ursprungs, der Evolution, der Struktur und des endgültigen Schicksals des Universums.

**40 Megaparsec (Mpc):** Eine Entfernung von 40 Millionen Parsec oder 130 Millionen Lichtjahren. Zum Vergleich: Das Zentrum unserer Galaxie, die Milchstraße, ist nur 26.000 Lichtjahre entfernt.

**Neutronenstern:** Ein extrem dichter Überrest vom Zusammenbruch eines massereicheren Sterns. Ein Neutronenstern hat eine ähnliche Masse wie unsere Sonne, aber einen Radius von nur 10 Kilometern.

**Radiowellen:** Langwellige elektromagnetische Strahlung, die durch beschleunigte elektrische Ladungen erzeugt wird.

**Schwarzes Loch:** Eine Region der Raumzeit, die durch eine extrem kompakte Masse verursacht wird, in denen die Schwerkraft so stark ist, dass nichts, einschließlich des Lichts, austritt.

**Sonnenmasse:** Die Masse unserer Sonne; sie entspricht  $2 \cdot 10^{30}$  Kilogramm.

## Weiterführende Informationen

- Besuchen Sie unsere Webseiten: [www.ligo.org](http://www.ligo.org), [www.virgo-gw.eu](http://www.virgo-gw.eu).
- Kostenloser arXiv-Vorabdruck, der die Details der vollständigen Analyse und der Ergebnisse beschreibt unter <https://arxiv.org/abs/1811.00364>.
- Veröffentlichte Version des Artikels: Physical Review Letters 123, 011102 (Veröffentlicht am 1. Juli 2019)

## Lesen Sie weitere Artikel über die GW<sub>170817</sub>-Entdeckung:

- GW<sub>170817</sub>: Observation of Gravitational Waves from a Binary Neutron Star Inspiral
- Multi-messenger Observations of a Binary Neutron Star Merger
- Gravitational Waves and Gamma-rays from a Binary Neutron Star Merger: GW<sub>170817</sub> and GRB 170817A
- A Gravitational-wave Standard Siren Measurement of the Hubble Constant
- Search for Post-merger Gravitational Waves from the Remnant of the Binary Neutron Star Merger GW<sub>170817</sub>
- Estimating the Contribution of Dynamical Ejecta in the Kilonova Associated with GW<sub>170817</sub>
- On the Progenitor of Binary Neutron Star Merger GW<sub>170817</sub>
- GW<sub>170817</sub>: Implications for the Stochastic Gravitational-Wave Background from Compact Binary Coalescences
- Search for High-energy Neutrinos from Binary Neutron Star Merger GW<sub>170817</sub> with ANTARES, IceCube, and the Pierre Auger Observatory
- Properties of the binary neutron star merger GW<sub>170817</sub>
- GW<sub>170817</sub>: Measurements of neutron star radii and the equation of state
- Constraining the p-mode–g-mode tidal instability with GW<sub>170817</sub>
- Search for gravitational waves from a long-lived remnant of the binary neutron star merger GW<sub>170817</sub>