



LIGO
Scientific
Collaboration



Hatte Einstein Recht?

Gravitationswellenbeobachtung verschmelzender Schwarzer Löcher überprüft Allgemeine Relativitätstheorie

Englische Originalversion dieser Zusammenfassung und Versionen in anderen Sprachen:

<https://www.ligo.org/science/Publication-GW150914TestingGR/index.php>

Mit GW150914, dem [ersten direkten Nachweis](#) von Gravitationswellen, erhielten wir einen beispiellosen Einblick in das Wirken starker, sich schnell ändernder Schwerkraft und in deren Einfluss auf unser Universum. Hier beschreiben wir einige Überprüfungen, die diese Beobachtung uns für die beste bekannte Theorie der Schwerkraft (Gravitation) ermöglicht hat: Einsteins [Allgemeine Relativitätstheorie](#).

Die Allgemeine Relativitätstheorie besagt, dass alle beschleunigenden Massen Gravitationswellen erzeugen. Damit wir diese Wellen aber nachweisen können, müssen die Objekte extrem massereich sein und sich sehr schnell bewegen. Bei GW150914 wurden die Wellen von zwei Schwarzen Löchern erzeugt, die einander mit annähernder Lichtgeschwindigkeit umkreisten und dann zusammenprallten und sich zu einem einzigen Schwarzen Loch vereinigten, das noch ein bisschen zitterte, bevor es sich schließlich beruhigte. Gravitationswellen wurden in jeder dieser Phasen ausgestrahlt. In Jahrzehnten harter Arbeit wurden detaillierte theoretische Vorhersagen für den gesamten Prozess erarbeitet, unter Beachtung der grundlegenden Regeln von Einsteins Theorie. Wir haben diese Vorhersagen unter anderem verwendet, um das gemessene Wellenmuster in ein Verständnis [der Quelle](#) zu übersetzen.

Aber wir können die Beobachtung auch dazu verwenden, die Allgemeine Relativitätstheorie selbst zu überprüfen! Wir können verschiedene Eigenschaften des beobachteten Signals mit den Vorhersagen der Allgemeinen Relativitätstheorie vergleichen. Es wird wohl viele Wissenschaftler, die stets nach unerklärlichen Beobachtungen und neuen Herausforderungen suchen, aber die bisherigen Ergebnisse zeigen, dass die Allgemeine Relativitätstheorie alles, was wir gemessen haben, sehr gut erklären kann. Hier werden wir einige dieser Überprüfungen anschaulich zusammenfassen.

Gibt es ungeklärte Merkmale im gemessenen Signal?

Unsere [Parameterschätzung für GW150914](#) hat aus einer Vielzahl möglicher Eigenschaften von Doppelsystemen Schwarzer Löcher jene ausgewählt, die am besten zu den Daten passt – unter jenen, die die Allgemeine Relativitätstheorie zulässt. Wenn wir diese beste Anpassung einer Wellenform mit bestimmten Werten der Massen und Drehimpulse an das gemessene Signal (das „Best-Fit-Signal“) von den Rohdaten abziehen, gibt es dann noch etwas in unseren Daten, das

unerklärt bleibt? Nein, die Restdaten erscheinen als pures Rauschen, das wir nicht von der Art des Störrauschens unterscheiden können, das wir auch zu anderen Zeiten in unserem Detektor wahrnehmen. Daher ist die gesamte Leistung von Gravitationswellen, die wir bei der ersten Beobachtung von GW150914 in unseren Daten fanden, in unserem allgemein-relativistischen Modell enthalten.

Ist das Signal widerspruchsfrei?

Welche weiteren Informationen können wir zur Überprüfung heranziehen? Abbildung 1 zeigt die aus der Allgemeinen Relativitätstheorie abgeleiteten Möglichkeiten für die Muster von Gravitationswellen, die mit den Daten unserer Instrumente zusammenpassen. Wie auch [hier](#) beschrieben, ergeben sich diese Muster aus den drei Phasen der Verschmelzung der beiden Schwarzen Löcher: Der „Inspiral“-Phase, wenn die beiden Schwarzen Löcher sich anfangs umkreisen und immer weiter annähern, während sie Gravitationswellen aussenden. Die eigentliche Verschmelzung („merger“) zum Zeitpunkt des Zusammenstoßes und der Bildung eines neuen, größeren Schwarzen Loches. Und schließlich das Abklingen („ring-down“), wenn dieses anfangs noch unruhige Schwarze Loch die letzten Gravitationswellen aussendet, bevor es zur Ruhe kommt.

Diese Phasen sind miteinander verbunden: Wenn wir die Masse und den Drehimpuls der ursprünglichen beiden Schwarzen Löcher kennen, werden die Masse und der Drehimpuls des endgültigen Schwarzen Lochs durch Einsteins Theorie eindeutig bestimmt. Das heißt, wir können die Allgemeine Relativitätstheorie überprüfen, indem wir die Vorhersage aufgrund der vor der Verschmelzung gemessenen Eigenschaften (Inspiral-Phase) mit den Eigenschaften des endgültigen Schwarzen Lochs vergleichen, die wir aus der sogenannten „Post-Inspiral“-Phase gewinnen können, wenn die Schwarzen Löcher zusammenstoßen und verschmelzen und das neu gebildete Schwarze Loch abklingt. Wie sich herausstellt, überschneiden sich die Ergebnisse, siehe Abbildung 2. Die abgeleiteten Eigenschaften der einzelnen Phasen stimmen also miteinander überein, wie es von der Allgemeinen Relativitätstheorie vorhergesagt wird.

Wie genau umkreisen die zwei Schwarzen Löcher einander?

Wir können auch auf die Umlaufphase (Inspiral) alleine betrachten. Die Umlaufbahnen ausreichend lange vor der Verschmelzung werden mathematisch üblicherweise im „Post-Newton“-Formalismus berechnet, einer Näherung der vollen Allgemeinen Relativitätstheorie, die genauer ist als Isaac Newtons ursprüngliche Schwerkraftstheorie. Die einfachen Newtonschen Umlaufbahnen (Näherungsordnung „0PN“) sind immerhin noch eine gute Beschreibung, solange die Schwerkraft sehr schwach ist und die Bewegungen sehr langsam im Vergleich zur Lichtgeschwindigkeit. Sie funktionieren damit sehr gut für unser Sonnensystem und erlaubt es uns, die Positionen der meisten Planeten korrekt vorherzusagen, sowie Raumschiffe durch den interplanetaren Raum zu navigieren. Allerdings ist Merkur zu nahe an der Sonne, sodass die Schwerkraft für ihn stärker ist und in diesem Fall die Allgemeine Relativitätstheorie benötigt wird, um seine Umlaufbahn vorherzusagen!

Wir können nun die Auswirkung der Allgemeinen Relativitätstheorie auf die Bewegung der Schwarzen Löcher und das resultierende Gravitationswellenmuster für mäßig stärkere Schwerkraft und schnellere Geschwindigkeiten betrachten. Diese werden als „erste Post-Newtonische Ordnung“ (1PN) zusammengefasst. Wir können zusätzliche Korrekturen vornehmen, wenn diese Änderungen etwas größer werden (2 PN), und dann weitere Korrekturen an diesen Korrekturen vornehmen; dies wiederholen wir, bis die Berechnungen zu kompliziert werden. Aus technischen Gründen gibt es

auch Beiträge mit „halben Ordnungen“, d.h. zwischen den ganzzahligen Ordnungen. Mit zunehmender PN-Ordnung erfassen wir immer mehr vom vollen Effekt der Allgemeinen Relativitätstheorie. Die niedrigeren PN-Ordnungen sind dabei im gesamten Verlauf der Wellenform wichtig, während die höheren PN-Ordnungen immer wichtiger werden, sobald gegen Ende der Inspiral-Phase Wellen mit immer höherer Frequenz ausgesendet werden.

Das Ergebnis ist eine Reihe von mathematischen Ausdrücken, die zum Beispiel beschreiben, wie sich die Frequenz von Gravitationswellen, die von einem kompakten Binärsystem (also z.B. zwei Schwarzen Löchern) ausgestrahlt wird, mit der Zeit ändert: ein Term in den Gleichungen für jede Post-Newtonische Ordnung (einschließlich der halben Ordnungen), und ein Zahlenwert, der angibt wie wichtig dieser Term ist. Wir vergleichen dann die Summe dieser Terme mit der gemessenen zeitabhängigen Frequenz von GW150914 (siehe Abbildung 1), welche durch eine ähnliche Reihe von Termen beschrieben werden kann, bei der die numerischen Koeffizienten (mit ihrer Messunsicherheit) dem beobachteten Signal entsprechen.

Ein Vergleich der beiden Reihen (theoretische Vorhersage und Messung) zeigt, dass die Post-Newtonischen Werte, wie sie von der Allgemeinen Relativitätstheorie vorhergesagt werden, sehr gut dazu geeignet sind, unser beobachtetes Signal zu beschreiben. Wir können damit in noch nie dagewesenem Maße einschränken, wie weit einzelne Werte von der Vorhersage der Allgemeinen Relativitätstheorie abweichen. Die Ergebnisse sind in Abbildung 3 dargestellt.

Wir führen auch eine ähnliche Analyse für Zahlenwerte durch, die die Verschmelzungs- und Abklingphasen beschreiben, und jene Teile des Signals stimmen ebenfalls gut mit der Allgemeinen Relativitätstheorie überein.

Die Geschwindigkeit von Gravitationswellen

Schließlich können wir mit unserer Beobachtung auch überprüfen, ob sich die Gravitationswellen wirklich – wie von Einstein vorhergesagt – mit Lichtgeschwindigkeit bewegen. Die Gravitationswellen sind schwach genug, dass wir sie statt als Wellen auch als einen Strom von Quantenteilchen beschreiben können – den Gravitonen, genauso wie Lichtwellen als Strom von Photonen beschrieben werden können. In der Physik bewegen sich nur masselose Teilchen exakt mit der Lichtgeschwindigkeit, sodass eine langsamere Gravitationswellen-Geschwindigkeit bedeuten würde, dass die Gravitonen eine gewisse Masse besitzen.

Wenn die Gravitonen eine Masse haben sollten, dann stellt sich heraus, dass verschiedene Gravitonen sich mit leicht unterschiedlichen Geschwindigkeiten bewegen: langsamer, wenn es niederfrequente Gravitonen sind, und schneller, wenn es hochfrequente Gravitonen sind. Das bedeutet zum Beispiel, dass der hochfrequente Post-Inspiral-Teil des Signals ein bisschen früher am Detektor ankommen würde, als wir vom niederfrequenten Signal aus der Inspiral-Phase erwarten würden. Wir haben jedoch keinerlei Beweis gefunden, dass dies geschieht. Unsere Ergebnisse zeigen damit, dass die Gravitonenmasse mindestens dreimal kleiner sein muss als die bisher beste solche Einschränkung aus anderen Beobachtungen.

Zukünftige Überprüfungen

Dies sind nur einige der Untersuchungen, die wir mit den LIGO-Daten von GW150914 durchgeführt haben, und die Allgemeine Relativitätstheorie hat alle diese Tests mit Bravour

bestanden. Einhundert Jahre nach der Veröffentlichung der Allgemeinen Relativitätstheorie haben wir also mehr und mehr Beweise, dass Einstein Recht hatte. Es ist erstaunlich, dass diese hundert Jahre alten Ideen einer so genauen Prüfungen standgehalten haben.

Aber natürlich endet die Geschichte hier nicht. Advanced LIGO wird weiter nach Gravitationswellen Ausschau halten, und wir hoffen mehr Gravitationswellen zu entdecken, mit den wir dann diese Art von Überprüfungen wiederholen können. Mit der Verbesserung der Empfindlichkeit von Advanced LIGO und der zusätzlichen Inbetriebnahme von Gravitationswellendetektoren wie [VIRGO](#) und [KAGRA](#) sollten die Signale im Vergleich zum Hintergrundrauschen lauter und klarer werden. So werden wir in der Lage sein, noch höhere Hürden für die Allgemeine Relativitätstheorie zu bewältigen - oder auch nicht!

Weiterführende Informationen:

- Vollständiger Fachartikel „[Tests of general relativity with GW150914](#)“
- [Allgemeiner Fachartikel zur Entdeckung von GW150914](#)

Abbildungen aus dem Fachartikel

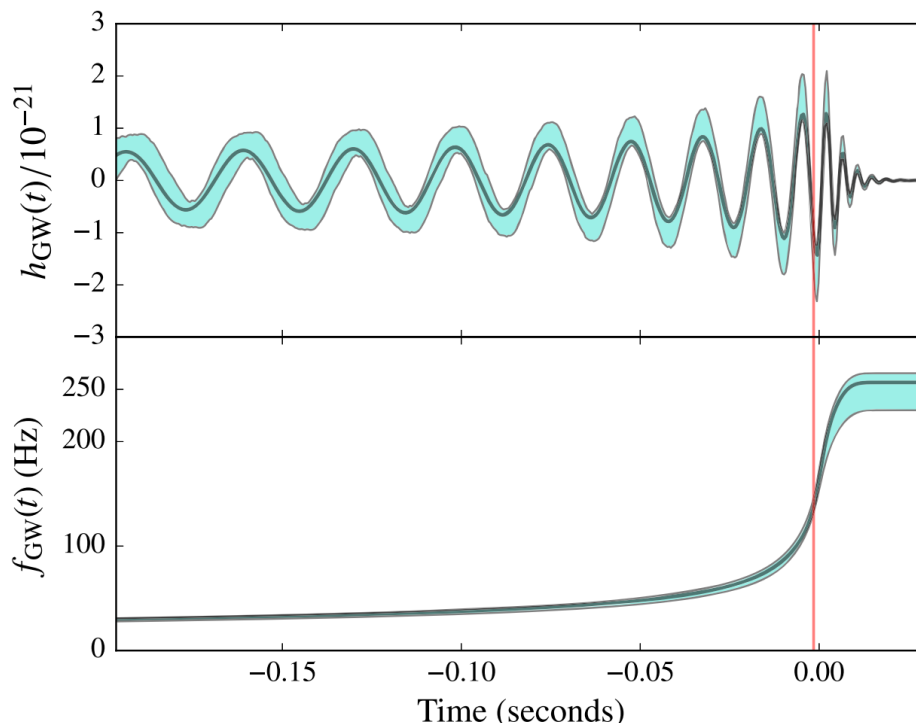


Abbildung 1 (Abb. 2 im Fachartikel): Die Parameterschätzung ergibt, dass das Gravitationswellenmuster am wahrscheinlichsten innerhalb des hellblauen Bandes liegt (obere Teilabbildung), wobei unser bestes Ergebnis für die Wellenform in schwarz dargestellt ist. Wir teilen die Gravitationswelle

an der roten vertikalen Linie in die Umkreisungsphase (Inspiral) auf der linken Seite, und die Post-Inspiral-Phase (d.h. das Verschmelzen und Abklingen) auf der rechten Seite. Die untere Teilabbildung zeigt den entsprechenden Frequenzverlauf.

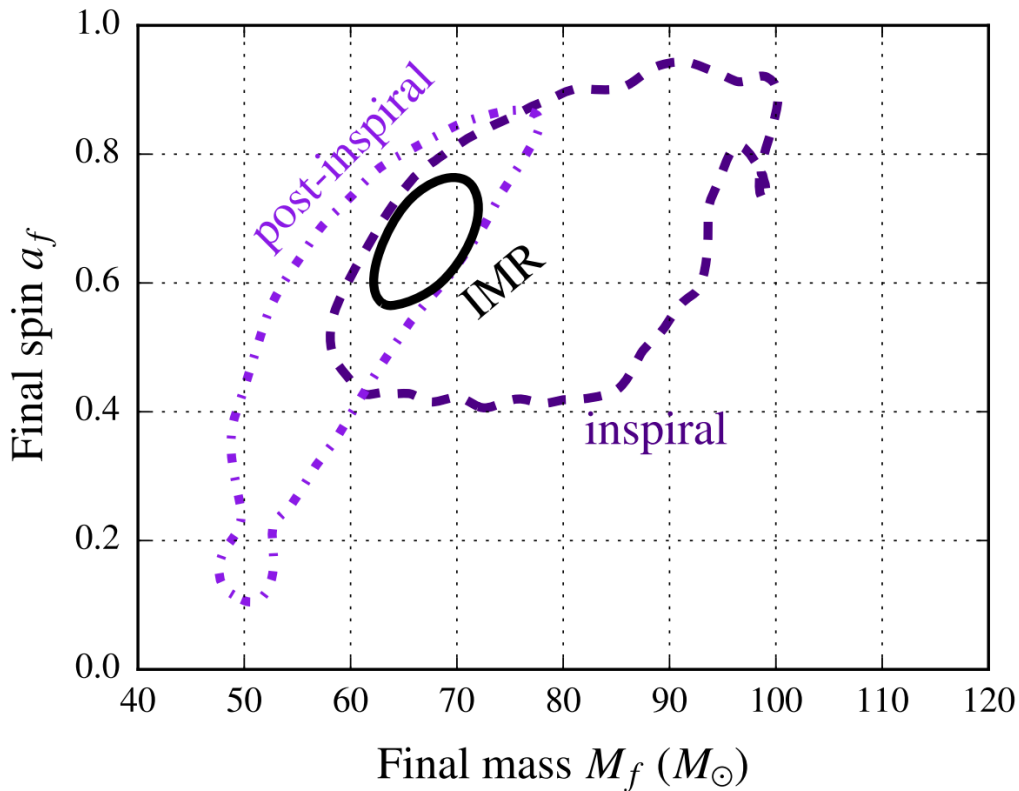


Abbildung 2 (Angepasste Version von Abb. 3 aus dem Fachartikel): Die Masse und der Eigendrehimpuls (Spin) des am Ende der Verschmelzung übriggebliebenen Schwarzen Lochs können auf verschiedene Arten aus der beobachteten Gravitationswelle bestimmt werden. Hier zeigen wir, welcher Wertebereich gemäß der verschiedenen Untersuchungsmethoden der Daten mit einer 90%igen Wahrscheinlichkeit erlaubt ist (Bereiche innerhalb der farbigen Linien). Die gestrichelte Linie zeigt die Vorhersage für die Massen des Schwarzen Lochs an, die aus der Inspiral-Phase allein gewonnen wurde, während die gestrichelt-punktierte Linie das Ergebnis aus der späteren Post-Inspiral-Phase anzeigt, unter Verwendung von hochfrequenten Wellen während der Verschmelzung und des Abklingens. Die starke Überschneidung der beiden Regionen bedeutet, dass beide Methoden miteinander konsistent sind. Die dicke schwarze Linie zeigt die engeren Grenzen für die endgültige Masse und den Drehimpuls des Schwarzen Lochs an, die sich aus der Allgemeinen Relativitätstheorie ergibt, wenn wir alle Phasen des Ereignisses verwenden: Umkreisung, Verschmelzung und Abklingen (Inspiral, Merger und Ring-down, zusammen: IMR).

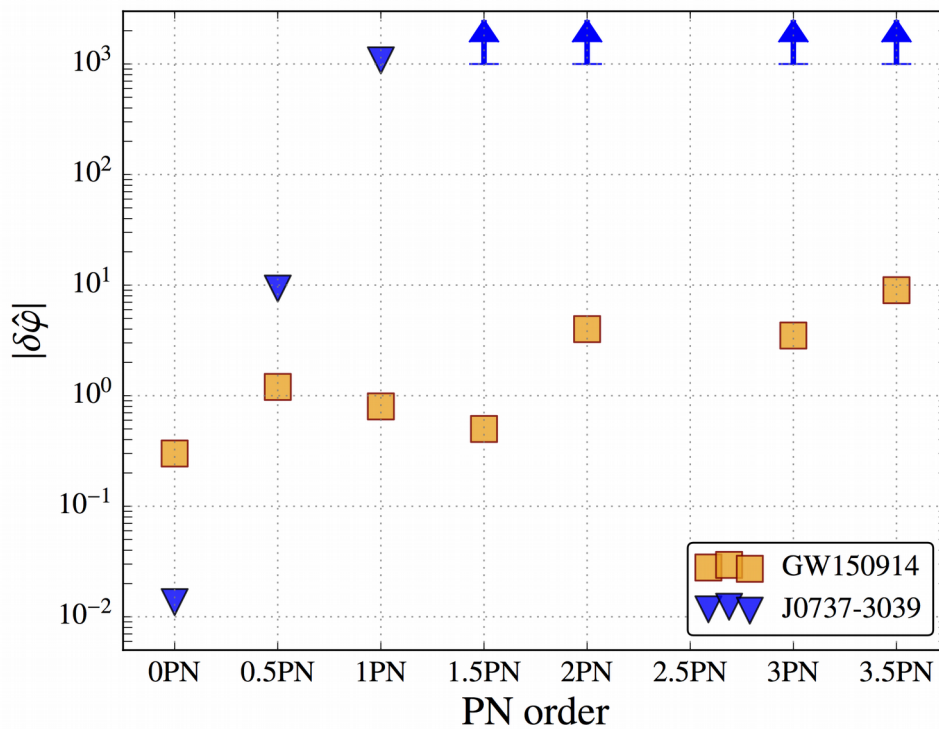


Abbildung 3 (Abb. 6 im Fachartikel): Diese Darstellung vergleicht die mathematischen Vorhersagen der Allgemeinen Relativitätstheorie mit den Zahlenwerten, die das Binärsystem Schwarzer Löcher, die GW150914 verursacht haben, empirisch am besten beschreiben. Die Bedeutung jeder Ordnung im Post-Newton-Formalismus („PN order“) wird durch einen Zahlenwert oder Koeffizienten gemessen, und wir können obere Grenzen für die Unterschiede zwischen den gemessenen Koeffizienten und denen, die von der Allgemeinen Relativitätstheorie vorhersagt werden, berechnen. Vor dieser Entdeckung kamen die besten solchen Grenzwerte aus dem [Doppel-Pulsar-System J0737-3039](#). Beobachtungen solcher Binärsysteme von Pulsaren verraten uns viel über die Newtonischen Umlaufbahnen (Ordnung 0PN), aber weniger über höhere Koeffizienten. Unsere Entdeckung von Gravitationswellen setzt die engsten Grenzen für mögliche Unterschiede zur Allgemeinen Relativitätstheorie, wenn die Gravitationswechselwirkungen stark sind, also bei höheren PN-Ordnungen.