

Tests der allgemeinen Relativitätstheorie mit Gravitationswellen-Ereignissen aus der ersten Hälfte des 3. LIGO/Virgo-Beobachtungslaufs

Vor dem Nachweis von Gravitationswellen von verschmelzender Schwarzer Löcher hatte Einsteins rund 100 Jahre alte allgemeine Relativitätstheorie noch nicht ihre strengsten Tests bestanden. Diese Überprüfungen sind weder im Labor noch im Sonnensystem möglich. Verschmelzungen Schwarzer Löcher erzeugen einige der stärksten, dynamischsten Gravitationsfelder, die die allgemeine Relativitätstheorie zulässt. Die Beobachtungen dieser Verschmelzungen bestätigten zwei Vorhersagen der Theorie: Gravitationswellen lassen sich direkt nachweisen und verschmelzende Schwarze Löcher existieren. Aber waren dies tatsächlich die von Einstein vorhergesagten Gravitationswellen und Schwarze Löcher oder etwas, das diesen nahekommt, aber dennoch unterschiedlich ist? Was können wir aus den Gravitationswellen lernen, denen Informationen über das katastrophale Ereignis eingepreßt sind, das sie erzeugt hat?

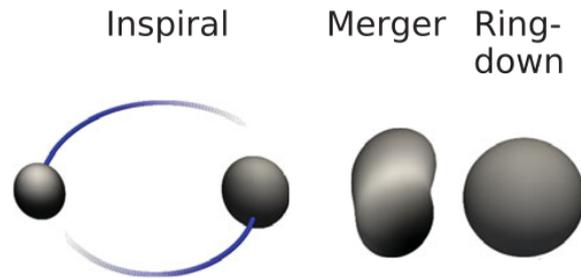


Abb. 1: Darstellung der drei Phasen einer Verschmelzung von zwei Schwarzen Löchern: Inspiral (Aufeinanderzufallen und Umrunden), Verschmelzen und Ringdown (Abklingen). Nach Abb. 2 der Entdeckungsveröffentlichung von GW150914.

LIGO und Virgo haben neuartige Tests der allgemeinen Relativitätstheorie für alle früheren Entdeckungen durchgeführt, die im Katalog GWTC-1 beschrieben sind, sowie für die Einzelereignisse GW190425, GW190412, GW190814 und GW190521. Bis jetzt hat Einstein alle Tests bestanden! Aber wir haben nun viele weitere Verschmelzungen Schwarzer Löcher aus dem neuen Gravitationswellen-Katalog (GWTC-2) zu untersuchen. Während wir mehrere der gleichen Tests wie in GWTC-1 durchführen, analysieren wir mehr als doppelt so viele neue Ereignisse und führen auch einige neue Tests durch.

Um nach Unterschieden zur allgemeinen Relativitätstheorie zu suchen, gehen wir von einer bestimmten Abweichung von der Theorie aus, z. B. von zusätzlichen Termen in einer Gleichung oder von Parametern, die andere Werte als in der allgemeinen Relativitätstheorie haben können. Dann überprüfen wir, ob diese Annahmen ein besseres Modell für die Daten ergibt. Wir verarbeiten die Signale mittels einer statistischen Analyse. Als Ergebnis erhalten wir ein bestimmtes statistisches Maß aus den Daten und vergleichen dieses mit der Erwartung aus der allgemeinen Relativitätstheorie. Unterschiede können drei Ursachen haben: (1) Die Messdaten sind verrauscht, so dass wir immer das Gravitationswellensignal zusammen mit dem Detektorrauschen messen. (2) In den meisten Fällen nähern wir das aus der allgemeinen Relativitätstheorie zu erwartende Signal an, und diese Näherungen sind möglicherweise bei einigen Ereignissen nicht nahe genug am wahren Verhalten. (3) Die allgemeine Relativitätstheorie ist möglicherweise nicht perfekt und müsste daher für solch extreme Objekte wie Doppelsysteme Schwarzer Löcher korrigiert werden. In der Praxis bedeutet das, dass es nicht einfach zu beweisen ist, dass ein Unterschied zur allgemeinen Relativitätstheorie besteht, weil Rauschen und Näherungsfehler das Bild trüben. Aber wir können testen, ob das, was wir finden, mit der allgemeinen Relativitätstheorie vereinbar ist. Und genau das haben wir getan.

Wie in unserer früheren Veröffentlichung zur Analyse von GWTC-1 beschrieben, passen einige Ereignisse nicht gut zu einigen Tests – doch wir haben jetzt mehr Ereignisse, aus denen wir wählen können. Ob wir eine Verschmelzung Schwarzer Löcher nachweisen oder nicht, hängt von den abgestrahlten Gravitationswellenfrequenzen ab, d. h. ob die Detektoren bei diesen empfindlich sind. Schwerere Schwarze Löcher verschmelzen bei niedrigeren Bahnfrequenzen, was zu niedrigeren Gravitationswellenfrequenzen führt. Diese Frequenzen werden während ihrer Reisezeit zur Erde durch die Expansion des Universums noch

weiter abgesenkt (rotverschoben). Je nach der Frequenz ist ein Ereignis also möglicherweise nicht für alle Tests geeignet.

Teile des Gravitationswellensignals mit Erwartungen aus der allgemeinen Relativitätstheorie vergleichen

Die allgemeine Relativitätstheorie bestimmt, was ein Schwarzes Loch ausmacht. Alles was sich über Schwarze Löcher sagen lässt, wird durch ihre Masse und den Spin bestimmt. Umkreisen sich zwei Schwarze Löcher, hat jedes eine Masse und einen Spin. Dazu kommen noch die Ausrichtungen der Spinachsen und die Entfernung der Schwarzen Löcher zueinander. Auf diese Weise wird der folgende Ablauf festgelegt. Die anfängliche Anordnung verändert sich durch den Verlust der abgestrahlten Gravitationswellenenergie, wodurch die Umlaufbahn während der immer schnelleren Umrundung immer kleiner wird. Diese Phase bezeichnet man als „Inspiral“. Dann verschmelzen die beiden Schwarzen Löcher zu einem neuen Schwarzen Loch mit eigener Masse und eigenem Spin. Aber dieses neu entstandene Schwarze Loch ist anfänglich verformt. Nach der allgemeinen Relativitätstheorie erzeugt diese Verzerrung Gravitationswellen, die die Verzerrung „abstrahlen“ und nur Masse und Spin zurücklassen. Wir können dieses Bild überprüfen, weil die anfänglich aufeinander zufallen und einander umrundenden Schwarzen Löcher die Eigenschaften des entstehenden Schwarzen Lochs bestimmen. Darüber hinaus sind auch die Details des Verschwindens der Verformung (der so genannte „Ringdown“ oder das Abklingen) durch die allgemeine Relativitätstheorie festgelegt.

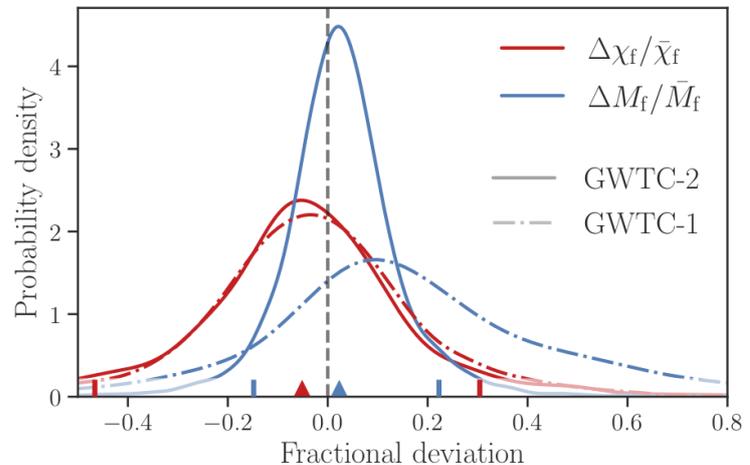


Abb. 2: Die Differenz der Masse des bei der Verschmelzung entstandenen Schwarzen Lochs M_f (blau) und dessen Spin χ_f (rot), abgeleitet aus der Ermittlung dieser Werte vor der Verschmelzung im Vergleich zur Messung der Werte nach der Verschmelzung. Die durchgezogenen Linien zeigen die Ergebnisse aus GWTC-2 und die Punkt-Strich-Linien die aus GWTC-1. Die vertikale, gestrichelte Linie ist der aus der allgemeinen Relativitätstheorie erwartete Wert. Es ist klar, dass sich der neuere auf den Massen basierte Vergleich der Vorhersage der allgemeinen Relativitätstheorie stark angenähert hat, während sich der Spin-Vergleich nicht wesentlich verändert hat. (Abb. 4 unserer Veröffentlichung).

Wenn der Inspiral- und der Ringdown-Teil des Gravitationswellensignals in ihrer Stärke vergleichbar sind, so dass wir sie getrennt analysieren können, können wir fragen, ob das erste das letztere vorhersagt. Gemäß der allgemeinen Relativitätstheorie sollte es möglich sein, auf den Ringdown zu schließen, wenn man die Details der Inspiralphase hat. Stimmen sie überein? Auch wenn das Detektorrauschen und die Näherungsfehler den Vergleich unpräzise machen, finden wir eine Übereinstimmung mit der Einsteins Theorie. Abb. 2 zeigt die Ergebnisse. Das nach der Verschmelzung verformte Schwarze Loch verhält sich ein wenig wie eine angeschlagene Glocke. Wenn Sie eine Glocke anschlagen, hören Sie eine Kombination aus reinen Tönen, den Resonanzfrequenzen der Glocke. Aber in einer kurzen Zeit, die für die Glocke charakteristisch ist, klingen die Töne ab – sie werden gedämpft. In ähnlicher Weise erfordert die allgemeine Relativitätstheorie, dass das Schwarze Loch mit bestimmten Frequenzen und Dämpfungszeiten abklingt. Wir können dann die beobachteten Eigenschaften des Abklingens des verformten Schwarzen Lochs mit denen vergleichen, die wir aus der Inspiral-Phase des Ereignisses vorhersagen. Obwohl die Genauigkeit noch nicht sehr gut ist (wir hoffen auf eine höhere Genauigkeit bei zukünftigen Entdeckungen), stimmen die Ergebnisse mit der allgemeinen Relativitätstheorie überein.

Sind einige scheinbare Schwarze Löcher eigentlich Imitatoren?

Die Verschmelzung Schwarzer Löcher erzeugt eine enorme Menge Gravitationswellen, die in vielen Fällen vorübergehend mehr Leistung als der Rest des Universums darstellt. Was wäre, wenn diese Strahlung von etwas stammt, das scheinbar ein Schwarzes Loch der allgemeinen Relativitätstheorie war, in Wirklichkeit aber etwas anderes – ein Imitator eines Schwarzen Lochs. Mehrere Arten solcher Imitatoren

wurden in der Literatur vorgeschlagen. Wie ein echtes Schwarzes Loch haben sie eine große Masse in einem kleinen Volumen, aber etwas an ihnen ist anders. Bei den Imitatoren gibt es nicht die präzise strikte Beziehung, bei der alles von Masse und Spin bestimmt wird, wie für allgemein-relativistische Schwarze Löcher. Beispielsweise kann der bekannte Einbahnstraßen-Charakter des Ereignishorizonts des Schwarzen Lochs für einen Imitator anders sein. Bei einigen vorgeschlagenen Imitatoren befindet sich dort eine spiegelartige Oberfläche anstelle des Ereignishorizonts. Gravitationswellen, die normalerweise in das Schwarze Loch hineinfallen würden, werden wieder zu uns zurück geworfen und erzeugen Echos des ursprünglichen Signals (siehe Abb. 3). Wir finden allerdings keine signifikanten Hinweise auf diese Echos.

Aber die allgemeine Relativitätstheorie könnte bei einer anderen Art von Imitatoren scheitern. Diese haben zwar einen Ereignishorizont, aber die Form des dem Schwarzen Loch ähnlichen Objekts ist falsch. Wir wissen, dass rotierende Objekte eine abgeflachte Form haben. Dies trifft auf die Erde zu und ist für den Planeten Jupiter offensichtlich und schon mit einem kleinen Teleskop sichtbar. Diese Abplattung kann die Schwerkraft betreffen, selbst wenn die allgemeine Relativitätstheorie keine Rolle spielt. Wenn das rotierende Objekt ein Schwarzes Loch ist, hängt die abgeplattete Form genau von der Masse und dem Spin des Schwarzen Lochs ab. Dies muss für einen Imitator, der eine andere Form haben kann, nicht zwingend zutreffen. Wir haben viele Verschmelzungen Schwarzer Löcher auf diesen Unterschied hin untersucht dabei aber nichts Signifikantes gefunden.

Gravitationswellen brauchen lange, um uns nach der Verschmelzung zu erreichen

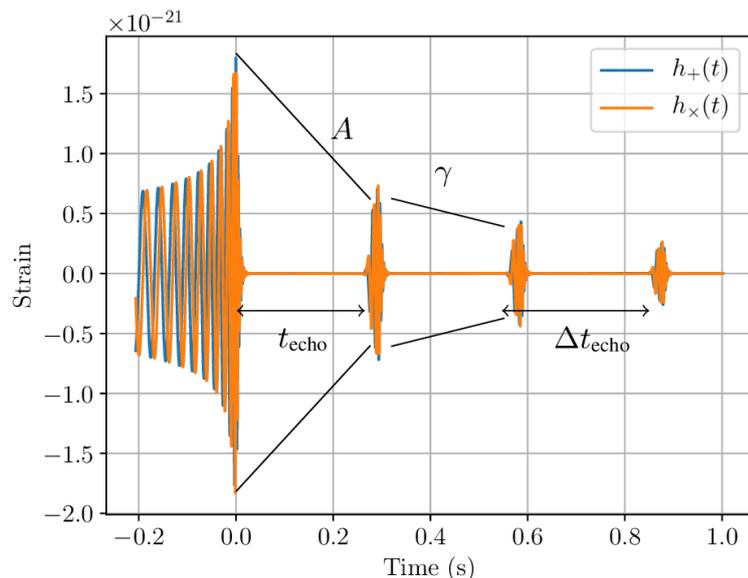


Abb. 3: Ein mögliches Szenario für Echos von einem Schwarzes-Loch-Imitator. Die Zeit ist auf der Querachse dargestellt und nimmt nach rechts zu. Zu erkennen ist das ursprüngliche Gravitationswellensignal zusammen mit einer Reihe verzerrter Kopien, wenn die Wellen von der spiegelartigen Oberfläche des Imitators zurückgeworfen werden. (Mit freundlicher Genehmigung von R.K.L. Lo.)

schließen wir, dass wir ihn nachweisen würden, wenn die Masse größer als $1,76 \cdot 10^{-23} \text{ eV}/c^2$ wäre. Wir finden keinen Effekt, also ist die Gravitonmasse höchstens so groß. Wir haben unsere bisherige beste obere Grenze damit um den Faktor 2,7 unterschritten. Zum Vergleich weisen wir darauf hin, dass bestimmte Arten von Neutrinos mit den kleinsten bekannten Massen mindestens $0,009 \text{ eV}/c^2$ Masse aufweisen. Wir weisen auch darauf hin, dass unser oberer Grenzwert für die Gravitonmasse alle spekulativen Gravitationstheorien, die eine solche Masse verwenden, weiter einschränken wird.

Zusammenfassung

Wie lautet also die Antwort? Hatte Einstein Recht? Ist die allgemeine Relativitätstheorie die korrekte Theorie der Gravitation? Wir haben unsere Messungen mit der Theorie verglichen und dafür die neu entdeckten Verschmelzungen Schwarzer Löcher und (für neue Tests) auch bereits bekannte Ereignissen

Die Farben eines Regenbogens verbergen sich im Sonnenlicht und kommen zum Vorschein, wenn ein Regentropfen das Licht bricht. Kann auf ähnliche Weise die Raumzeit die „Farben“ (d. h. die Frequenzen) in Gravitationswellen zum Vorschein bringen? Die allgemeine Relativitätstheorie verneint dies. Aber andere Theorien lassen ein Graviton mit nicht verschwindender Masse zu, das zu einer Dispersion der Gravitationswellen führen könnte. Wir beobachten Gravitationswellen, die seit Milliarden von Jahren zu uns unterwegs sind. Wenn Gravitonen eine Masse haben, haben sie viele Gelegenheiten, eine Dispersion zu erfahren. Daher lässt sich sogar der Einfluss einer sehr kleinen Gravitonmasse erkennen. Wir können auch versuchen, jeden in den Daten verborgenen Effekt der Gravitonmasse zu verstärken, indem wir Informationen aus allen Ereignissen kombinieren. Aus unseren neuesten Daten

verwendet. In den meisten Fällen können wir die Ergebnisse verschiedener Ereignisse kombinieren, um unsere Schlussfolgerungen sicherer zu machen. Unter dem Strich ist alles, was wir gefunden haben, mit der allgemeinen Relativitätstheorie vereinbar, wenn wir Rauschen und Ungenauigkeiten der Näherungen berücksichtigen. Wie wir in den Abbildungen zeigen, liefern einige unserer Tests keine sehr aussagekräftigen Ergebnisse. Wir erwarten, dass wir in Zukunft noch viele weitere Verschmelzungen Schwarzer Löcher entdecken werden, die uns helfen werden, eine definitivere Antwort zu geben.

Glossar

Echo: Beschreibt eine Kopie eines Gravitationswellensignals, die durch Reflexion an der Oberfläche eines Schwarzen Lochs entsteht, analog zu gewöhnlichen Echos, die wir von zurückgeworfenem Schall hören.

eV/c²: Eine Einheit der Masse: Das Elektronenvolt (eV) ist eine Energieeinheit, die häufig verwendet wird, um z. B. zu messen, wie viel Energie benötigt wird, um ein Elektron aus einem Atom zu entfernen. Da nach Einstein $E = mc^2$ (wobei E die Energie, m die Masse und c die Lichtgeschwindigkeit ist) gilt, ergibt die Division einer in eV gemessenen Energie durch c zum Quadrat eine Masse.

Graviton: das angenommene teilchenartige Gegenstück zu Gravitationswellen, so wie Photonen die Teilchen sind, die Lichtwellen entsprechen. Die allgemeine Relativitätstheorie verlangt, dass Gravitonen masselos sind, genau wie Photonen.

Imitatoren Schwarzer Löcher: Ein Bereich der Raumzeit, der einem Schwarzen Loch ähnlich genug ist, um durch seine Gravitationswellen bei einer Verschmelzung entdeckt zu werden. Bei sorgfältiger Untersuchung weist ein Imitator aber nicht alle von der allgemeinen Relativitätstheorie geforderten Eigenschaften auf.

Rauschen: Fluktuation des Gravitationswellen-Messsignals aufgrund verschiedener instrumenteller und umweltbedingter Effekte. Die Empfindlichkeit eines Gravitationswellendetektors ist durch das Rauschen begrenzt.

Ringdown: Die Phase einer Verschmelzung Schwarzer Löcher, in der das verformte Schwarze Loch, das bei der Verschmelzung entsteht, Gravitationswellen aussendet, die die Verformungen abstrahlen und verschwinden lassen.

Schwarzes Loch: Ein durch eine extrem kompakte Masse verursachter Bereich der Raumzeit, in dem die Gravitation so stark ist, dass sie alles, auch Licht, am Entkommen hindert.

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

Weiterführende Informationen

Besuchen Sie unsere Websites: www.ligo.org, www.virgo-gw.eu

Lesen Sie einen kostenlosen Vorabdruck des vollständigen wissenschaftlichen Artikels unter <https://dcc.ligo.org/LIGO-P2000091/public>.

Lesen Sie den Artikel über die Gravitationswellenereignisse online unter <https://dcc.ligo.org/LIGO-P2000061/public>.

Lesen Sie eine Begleitveröffentlichung über die Eigenschaften der Populationen Schwarzer Löcher unter <https://dcc.ligo.org/LIGO-P2000077/public>.

Erforschen Sie die Katalogdaten im Gravitational Wave Open Science Center (<https://www.gw-openscience.org/>) unter <https://doi.org/10.7935/99gf-ax93>.