



LIGO
Scientific
Collaboration



Direkter Vergleich der ersten beobachteten Gravitationswellen mit Supercomputer-Lösungen von Einsteins Theorie

Englische Originalversion dieser Zusammenfassung und Versionen in anderen Sprachen:

<https://www.ligo.org/science/Publication-GW150914DirectCompareNR/index.php>

Die Entdeckung von Gravitationswellen aus der Verschmelzung von zwei Schwarzen Löchern

Den [Advanced-LIGO](#)-Detektoren (aLIGO) gelang die erste Beobachtung von [Gravitationswellen](#) als charakteristisches „Chirp“-Signal in den Messdaten, genannt [GW150914](#). Durch den Vergleich der Daten mit Lösungen von Einsteins Gravitationstheorie haben wir festgestellt, dass die Daten mit der Art von Signal übereinstimmen, die wir von der Verschmelzung zweier [Schwarzer Löcher](#) erwartet haben. Weitere einführende Informationen über die Entdeckung und Interpretation von GW150914 bieten unsere [Übersichtsseiten](#).

Die Gleichungen in Einsteins Theorie der Schwerkraft sind schwer zu lösen. Daher beruht unsere ursprüngliche Interpretation auf vereinfachten Modellen, die eine zwar sorgfältige und systematische Analyse erlauben, sich dabei aber der vollständigen Theorie zwangsläufig nur annähern. Hier fassen wir eine zusätzliche Analyse von GW150914 zusammen, bei der ein anderes Verfahren zur Anwendung kam: nun vergleichen wir die Daten direkt mit aufwendigen Supercomputer-Simulationen der sich umkreisenden und verschmelzenden Schwarzen Löcher.

Eine neue Analysemethode

Einsteins Gleichungen auf Supercomputern

Das Lösen von Einsteins Gleichungen auf einem Supercomputer wird als Numerische Relativitätstheorie bezeichnet. Unser detailliertes Verständnis der Verschmelzung der beiden Schwarzen Löchern stammt letztlich aus solchen numerischen Simulationen. Allerdings sind diese Simulationen sehr anspruchsvoll und erfordern Wochen bis Monate auf den schnellsten Supercomputern der Welt. In Zusammenarbeit mit vier Expertenteams in diesem Bereich (RIT, SXS, Georgia Tech und das BAM-Team), haben wir eine große Sammlung von mehr als tausend Simulationen von zwei Schwarzen Löchern mit verschiedenen Eigenschaften zusammengestellt.

Skalierung von Supercomputer-Simulationen für GW150914

In der ursprünglichen [Analyse von GW150914](#) haben wir die Daten mit vereinfachten Modellen für Gravitationswellen, die aus der Verschmelzung von zwei Schwarzen Löchern resultieren, verglichen. Mit Hilfe dieser Modelle konnten wir solche Vergleiche für Millionen verschiedener

Kombinationen von möglichen Eigenschaften der beiden Schwarzen Löcher, die diese Modelle erlauben, durchführen. In dieser neuen Analyse dagegen haben wir uns darauf beschränkt, die Daten nur mit etwa tausend Simulationen zu vergleichen, wie oben beschriebenen.

Zum Glück funktioniert Einsteins Gravitationstheorie für alle Objekte gleich, unabhängig von ihrer Masse. Daher können wir jede einzelne Simulation auf größere oder kleinere Schwarze Löcher umrechnen, ohne sie komplett neu auf dem Supercomputer laufen zu lassen. Mit anderen Worten, für jede Simulation können wir jede mögliche Gesamtmasse eines Doppelsystems auswählen. Dennoch haben wir nur eintausend Simulationen um alle anderen Parameter abzudecken, die benötigt werden, um zwei Schwarze Löcher zu beschreiben, wie etwa das Verhältnis zwischen den beiden Massen der Schwarzen Löcher und den Drehimpuls der beiden Schwarzen Löcher.

Die Natur hat es dabei gut mit uns gemeint: die Messdaten von GW150914 ähneln tatsächlich unglaublich gut den meisten bisher durchgeführten Simulationen, bei denen die beiden Schwarzen Löcher meist recht ähnliche Massen haben. Also können viele dieser tausend Simulationen passend skaliert werden, um gut zu den Daten zu passen.

Wie wir die Teile des Puzzles zusammensetzen

Das Problem, die Eigenschaften der Schwarzen Löcher aus den Messdaten ihrer Verschmelzung zu rekonstruieren, ähnelt einem Puzzlespiel. Wir haben zwar nur einige der Teile zur Hand, aber aus Erfahrung und Einsteins Theorie wissen wir, dass das Puzzlebild mit einem groben Pinsel gemalt wurde, und so können wir die Lösung finden. Der numerische Vergleich zwischen den Daten und einer bestimmten Simulation (mit angepasster Gesamtmasse) ergibt jeweils eine einzige Zahl. Diese sogenannte „marginalisierte Wahrscheinlichkeit“ entspricht sozusagen der Farbe jedes Puzzleteils.

Für ein Objekt wie GW150914, mit nur wenigen gemessenen Gravitationswellenschwingungen, sind die Farben von benachbarten Teilen des Puzzles einander sehr ähnlich. Obwohl uns die meisten Stücke fehlen, können wir also immer noch herausfinden, wie das ganze Puzzle aussieht. Oder zumindest der wichtigste Teil des Puzzles: Der Teil, der GW150914-ähnliche Schwarze Löcher beschreibt. Abbildung 2 zeigt ein Beispiel: Mit nur wenigen Punkten (Simulationen) können wir die entsprechende Farbe (Wahrscheinlichkeit) für jeden Bereich diesen drei Diagramme herauszufinden.

Die Bedeutung dieser Ergebnisse

In unserer [ursprünglichen Analyse](#) haben wir bereits die Massen und Drehimpulse der beiden Schwarzen Löcher identifiziert. Diese bilden auch Teile eines anderen Puzzles: [Wie entstehen Paare von zwei Schwarzen Löchern?](#)

Unsere neue Analyse brachte einige zusätzliche Informationen über die beiden Schwarzen Löcher hervor, die sich zu GW150914 vereinten. Hierfür wurden Informationen verwendet, die aus Simulationen der Numerischen Relativitätstheorie stammen. Am wichtigsten ist dabei vielleicht, dass unsere Ergebnisse mit denen der ursprünglichen Analyse im Wesentlichen übereinstimmen; dies bedeutet, dass unsere Ergebnisse robust sind, da sich zwei unabhängige Methoden gegenseitig bestätigt haben.

Diese Arbeit veranschaulicht auch auf besonders klare Weise ein Ergebnis, das sich bereits in

[unserer ersten Interpretation von GW150914](#) angedeutet hatte: verschiedene Paare von Schwarzen Löchern mit ganz unterschiedlichen Eigenschaften können unter geeigneten Umständen sehr ähnliche Signale erzeugen, die beide den Gravitationswellenmessungen von GW150914 entsprechen. Einige der Simulationen, die gut zu den Daten passen, sind einfache Fälle, bei denen sich die beiden Schwarzen Löcher während ihrer allmählichen Annäherung innerhalb einer gleichbleibenden Ebene befinden. In anderen Simulationen, die ebenfalls mit den Daten verträglich sind, sinkt dagegen die Bahnebene stark (sogenannte [Präzession](#)). Die weiter unten verlinkten Filme veranschaulichen diese Bandbreite an möglichen Quellen für GW150914.

Schließlich können wir durch Vergleiche der verschiedenen Simulation mit diesem Ereignis auch herausfinden, in welchen Bereichen neue Simulationen am wertvollsten sind, um Lücken für diese und zukünftige Beobachtungen zu füllen.

Weiterführende Informationen:

- Frei abrufbarer Fachartikel: [Directly comparing GW150914 with numerical solutions of Einstein's equations for binary black hole coalescence](#)
- Zusammenfassung: [Beobachtung der Gravitationswellen von der Verschmelzung zweier Schwarzer Löcher](#)
- Zusammenfassung: [Die erste Messung der Verschmelzung zweier Schwarzer Löcher und ihre Bedeutung](#)
- Einführungen in die Numerische Relativitätstheorie (auf Englisch)
 - Artikel in [Physics Today](#) (Baumgarte und Shapiro)
 - Wissenschaftliche Überblicksartikel: [Sperhake 2015](#) und [Centrella et al. 2007](#)
 - Lehrbücher: [Baumgarte and Shapiro](#), [Alcubierre](#)

Videos von Simulationen

Die vier Gruppen haben, basierend auf Simulationen, Filme über die Dynamik von GW150914-ähnlichen Doppelsystemen zweier Schwarzen Löchern gemacht:

- [YouTube-Film von Georgia Tech](#) (keine Präzession)
- [YouTube-Film von SXS](#) (keine Präzession)
- [YouTube-Film des RIT](#) (mit Präzession)
- [YouTube-Film der UIB](#) (mit Präzession)

Abbildungen

Abbildung 1: Dieses Bild zeigt das rekonstruierte Gravitationswellensignal von GW150914. Der schraffierte Bereich entspricht dabei einer 90%igen Wahrscheinlichkeit, dass die Signalstärke von GW150914 auf der vertikalen Achse innerhalb dieses Bereichs liegt. Die durchgezogene Linie zeigt eine Vorhersage der Numerischen Relativitätstheorie.

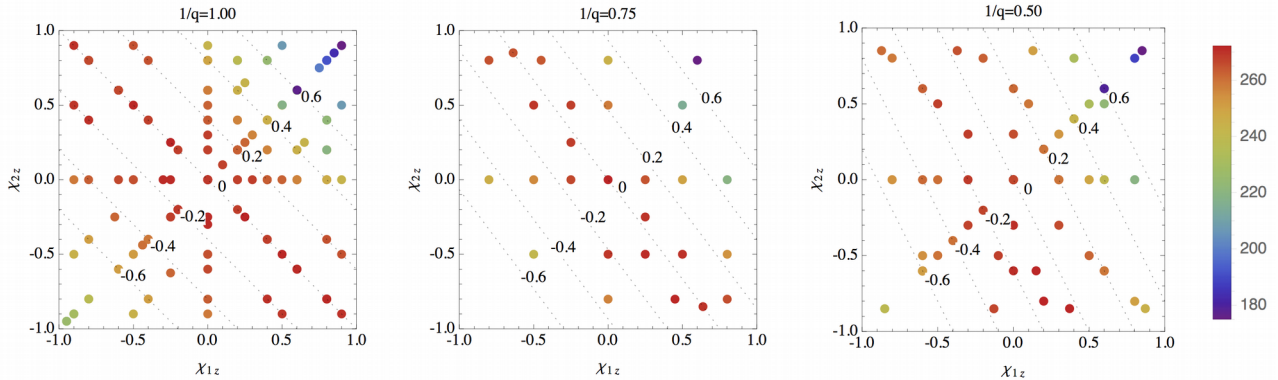
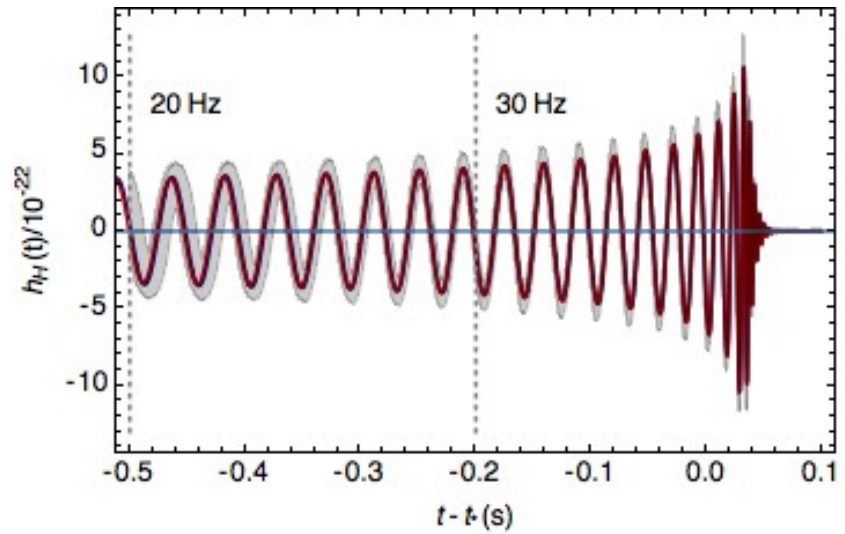
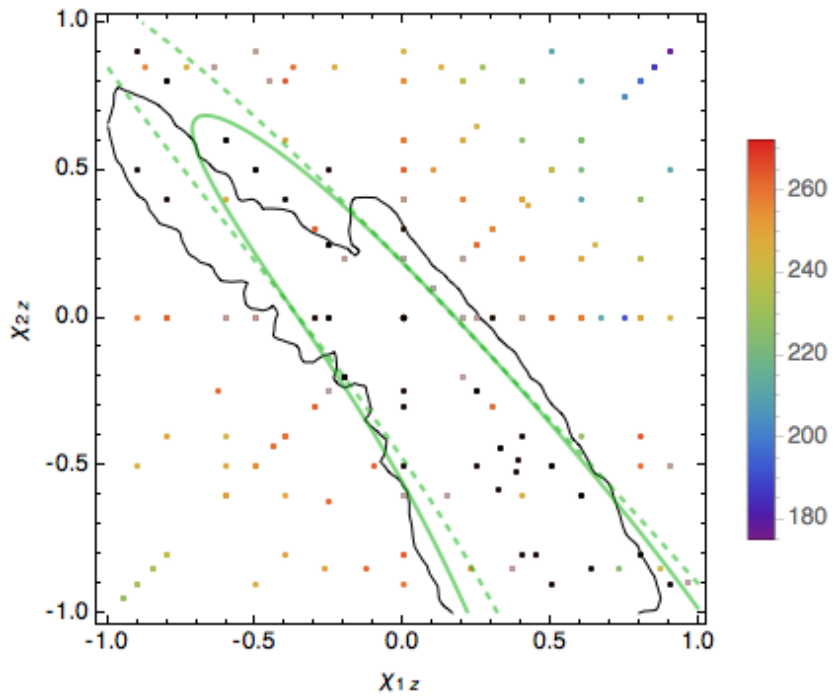


Abbildung 2: Die farbigen Punkte in diesen Darstellungen zeigen einzelne Supercomputer-Simulationen von Einsteins Gleichungen mittels der Numerischen Relativitätstheorie. Die drei Diagramme zeigen dabei verschiedene Verhältnisse der Massen der beiden Schwarzen Löcher; die Achsen jedes Diagramms entsprechen den Drehimpulsen der beiden Objekte. Die Farben zeigen die Ergebnisse des Vergleichs mit den Daten an. Die Farben ändern sich dabei von Punkt zu Punkt langsam, nicht in großen Sprüngen. Daher können wir auch für Lücken in unserem Katalog, also Kombinationen von Eigenschaften, für die (noch) keine Simulationen existieren, die entsprechende Farbe recht gut abschätzen.

Abbildung 3: Erneut entsprechen die Achsen den möglichen Drehimpulsen von zwei Schwarzen Löchern, in Einheiten des höchstmöglichen Drehimpulses. Die grünen Kurven in diesem Bild zeigen, welche Drehimpuls-Kombinationen gut mit den Daten übereinstimmen. Diese Kurve haben wir ermittelt, indem wir Punkt gleicher Farben (Wahrscheinlichkeiten) miteinander verbanden. Die durchgezogene schwarze Kurve ist dagegen das Ergebnis, das wir in unserer ersten Analyse von GW150914 gefunden haben. Die beiden liegen weitgehend übereinander.



(Diese Abbildung nimmt an, dass die Umlaufbahn des Zweiersystems stets in derselben Ebene bleibt, also keine Präzession stattfindet.)



Abbildung 4: Logos der vier Forschungsgruppen, deren Simulationen in dieser Arbeit verwendet wurden.