

Suche nach langlebigen Gravitationswellen in Daten von Advanced LIGOs zweiten Beobachtungslauf

LIGOs erste Entdeckung einer Verschmelzung von zwei schwarzen Löchern, GW150914, öffnete ein „Gravitationswellen“-Fenster zum Universum. Wir sind jetzt in der Lage, winzige Raumzeit-Wellen aus weit entfernten Galaxien aufzuspüren, und damit die Grenzen der Physik zu erweitern. Der Nachweis von neun Verschmelzungen schwarzer Löcher folgte, und im Jahr 2017 haben LIGO und sein Partner-Detektor Virgo außerdem eine Verschmelzung von zwei Neutronensternen entdeckt.

Gravitationswellensignale der Verschmelzungen von schwarzen Löchern und Neutronensternen dauern nur kurze Zeit und lassen sich gut mit Einsteins allgemeiner Relativitätstheorie beschreiben. Theoretische Studien motivieren aber auch eine Suche (mit minimalen Annahmen) nach langlebigen Gravitationswellen – und das haben wir in dieser Arbeit getan. Wir nennen diese langlebigen Signale auch „persistent“.

Um mit Advanced LIGO nach langlebigen Signalen zu suchen, verwenden wir eine als „Radiometrie“ bekannte Technik. In dieser Arbeit wenden wir diese Radiometrie an, um in Advanced LIGO-Daten des zweiten Beobachtungslaufs (O2) nach langlebigen Gravitationswellensignalen aus unterschiedlichen Himmelsrichtungen zu suchen. Astronom*innen nehmen an, dass Neutronensterne in unserer Milchstraße möglicherweise nicht perfekt kugelförmig sind und daher beim Drehen Gravitationswellen abgeben.

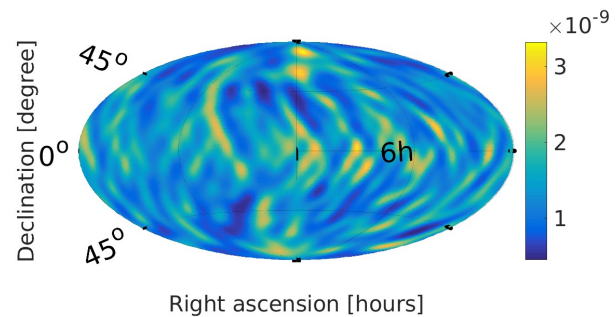


Abb. 1: Himmelskarte, die den maximalen Gravitationswellenfluss von Punktquellen zeigt, die sich während O2 von Advanced LIGO nicht ausschließen lassen.

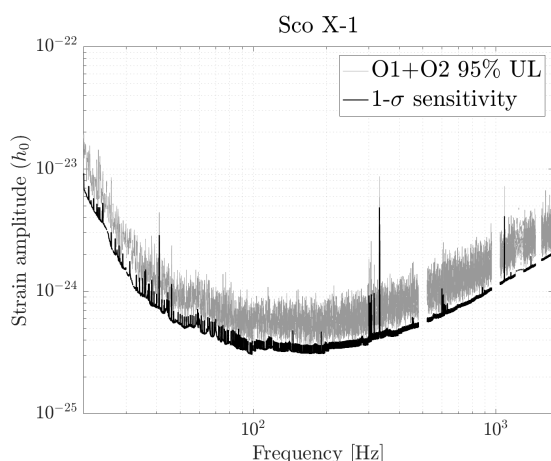


Abb. 2: Die graue Farbe repräsentiert die maximale Gravitationswellenverformung (mit 95 % statistischer Sicherheit) für verschiedene Frequenzen aus der Richtung von Scorpius-X1 während O1 und O2. Die schwarze Linie repräsentiert unser gemessenes Hintergrundsignal in Einheiten der Gravitationswellenverformung innerhalb einer Standardabweichung.

Gleichzeitig können theoretisch postulierte Teilchen (Axionen), falls sie existieren, mit schwarzen Löchern durch einen Prozess, der als Superradianz bezeichnet wird, wechselwirken. Dies würde zum Abstrahlen von Gravitationswellen führen. Aus der Sicht der Theoretiker*innen sind dies Beispiele für Phänomene, die stark genug sein könnten um Gravitationswellen auszusenden. Wir hoffen sie in Zukunft zu entdecken und zu untersuchen. Aus der Sicht von Beobachter*innen sind dies Beispiele für Gravitationswellen, die von einem bestimmten Punkt am Himmel (Punktquelle) mit fast gleichbleibender Frequenz ausgesendet würden. Mit Radiometrie suchen wir nach beliebigen schmalbandigen Signalen aus drei interessanten Richtungen: dem Galaktischen Zentrum, der Supernova 1987A und von Scorpius X-1; das sind die hellsten extrasolaren Röntgenquellen am Himmel. Wir berichten über ein Merkmal in den Daten, das wie ein mögliches Signal aussieht (Abbildung 3), das jedoch nicht mit einer langlebigen Gravitationswellenquelle zu vereinbaren ist. Wir

setzen außerdem Obergrenzen für den Stärke der Gravitationswellen, die aus diesen drei Richtungen kommen.

Gravitationswellen, die zu schwach sind, um einzeln nachgewiesen zu werden, treten in großer Zahl auf. Obwohl diese Wellen nicht einzeln aufgelöst werden können, ergeben sie zusammen ein Hintergrundsignal, das Wissenschaftler*innen als stochastischen Hintergrund bezeichnen. Wir suchen nach dem Gravitationswellenhintergrund, der aus dem ausgedehnten Himmelsbereichen kommt. Wir führen auch am gesamten Himmel eine Suche nach Punktquellen durch, die Gravitationswellen in einen breiten Frequenzbereich aussenden können. Dabei nehmen wir unterschiedliche Modelle für das Spektrum der Gravitationswellen an, die durch theoretische Arbeiten der Kosmologie und Astrophysik motiviert sind. In einer anderen Studie haben wir nach einem Gravitationswellenhintergrund gesucht, der in alle Himmelsrichtungen gleich ist.

Obwohl wir bei dieser speziellen Suche keine Gravitationswellen entdeckt haben, können wir die maximale Stärke von Gravitationswellensignalen einschränken, die möglicherweise nicht nachgewiesen wurden. Unsere Untersuchung verbessert die bisherigen Ergebnisse um den Faktor 1,5. Die Himmelskarten zeigen die maximal mögliche Energiedichte des Gravitationswellenhintergrunds, der mit unseren Beobachtungen vereinbar ist. Falls sie in den folgenden LIGO-Beobachtungsläufen entdeckt werden, könnten langlebige Gravitationswellen uns helfen, mehr über das Universum zu erfahren. Minimale Annahmen über das Signalmodell könnten uns möglicherweise zu einer unerwarteten, noch aufregenderen Entdeckung führen!

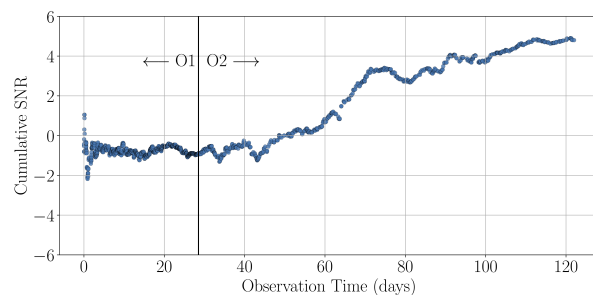


Abb. 3: Zeitliche Entwicklung des Signal-zu-Rausch-Verhältnisses für den Ausreißer, der bei der Suche nach Schmalbandsignalen gefunden wurde. Der Ausreißer scheint nicht in den kombinierten Daten von O1 und O2 zu sein, er wird aber in zukünftigen Beobachtungsläufen überwacht werden.

Glossar

Axion: Ein hypothetisches leichtes Elementarteilchen, das 1977 vorgeschlagen wurde.

Axion-Superradianz schwarzer Löcher: Ein Prozess, bei dem Axionen einem schwarzen Loch Energie entziehen und das schwarze Loch als Konsequenz Gravitationswellen aussendet.

Energiedichte: Die in einem bestimmten System oder einer bestimmten Raumregion pro Volumeneinheit gespeicherte Energiemenge.

Gravitationswellenspektrum: Eine Darstellung, wie stark ein Gravitationswellensignal bei verschiedenen Frequenzen ist.

Gravitationswellenverformung: Ein Maß für die Verformung der Raumzeit durch eine vorbeiziehende Gravitationswelle.

Kompaktes Doppelsystem: Ein Paar von Neutronensternen oder Schwarzen Löchern, die sich gegenseitig umkreisen und aufgrund der Abstrahlung von Gravitationswellen auf einen Zusammenstoß zusteuern.

Neutronenstern: Ein dichter Überrest eines kollabierten Sterns, bei dem der Druck von Materie bei Atomkerndichte mit der Schwerkraft des Sternenrests im Gleichgewicht steht.

Obere Grenze: Der maximale Wert einer beobachtbaren Größe, der vom aktuellen Experiment nicht ausgeschlossen wird.

Punktquelle: Eine Quelle von Gravitationswellen, deren Größe im Vergleich zur Entfernung zur Quelle vernachlässigbar ist.

Schmalbandige Gravitationswellen: Gravitationswellen, die ungefähr gleichbleibender Frequenz ausgesendet werden.

Schwarzes Loch: Ein Überrest eines kollabierten Sternens, bei dem die Eigenschwerkraft des Sternenrests größer ist als der Druck von Materie bei Atomkerndichte. In diesem Fall kollabiert das Objekt vollständig und hinterlässt einen Ereignishorizont: einen Bereich, aus dem weder Licht noch Materie entweichen können.

Weiterführende Informationen

LIGO Multimedia

Interaktive Himmelskarten mit den O₁-Ergebnissen für die Suche nach ausgedehnten Quellen im Gravitationswellenhintergrund

Kostenloser ArXiv-Vorabdruck der Veröffentlichung, in dem die Details der vollständigen Analyse und der Ergebnisse beschrieben werden unter <https://arxiv.org/abs/1903.08844>.

ArXiv-Vorabdruck der Veröffentlichung mit Ergebnissen aus dem O₁-Beobachtungslauf unter <https://arxiv.org/abs/1612.02030>.

ArXiv-Vorabdruck der Veröffentlichung mit Ergebnissen aus dem Initial LIGO- Beobachtungslauf unter <https://arxiv.org/abs/1109.1809>.

Informationen zur Suche nach einem isotropen Gravitationswellenhintergrund