

Eine Suche nach Verschmelzungen von zwei Schwarzen Löchern auf exzentrischen Bahnen

Einführung

Während des ersten und zweiten Beobachtungslaufs der Advanced-LIGO- und Advanced-Virgo-Detektoren wurden zehn Verschmelzungen von je zwei Schwarzen Löchern sicher nachgewiesen (diese Verschmelzungen kompakter Doppelsysteme sind im Katalog GWTC-1 aufgeführt). Die derzeitigen Detektoren können nur die letzte Phase der Verschmelzung Schwarzer Löcher nachweisen (die letzten hunderte von Umrundungen – dies hängt von der Masse der beiden Komponenten ab); dann liegt die Signalfrequenz im Messband der Detektoren. Es wird erwartet, dass die sich die Bahnen der meisten nachgewiesenen Signale gut durch Kreisbahnen annähern lassen: denn Doppelsysteme, die sich für lange Zeit ungestört entwickeln, verlieren an Exzentrizität, während sich die Umlaufbahn aufgrund der Abstrahlung von Gravitationswellen (GWs) verkleinert.

Es gibt jedoch mehrere Entwicklungsszenarien, in denen sich ein Doppelsystem Schwarzer Löcher sehr spät entwickelt und eine erhebliche Restexzentrizität aufweist. Diese Szenarien können in Umgebungen mit hoher Sterndichte wie in der Nähe des Zentrums einer Galaxie, einem Kugelsternhaufen usw. auftreten. In diesen Umgebungen können sich Paare Schwarzer Löcher dynamisch bilden und binnen kurzer Zeit verschmelzen, dadurch kann das System eine gewisse Rest-Exzentrizität aufweisen, wenn seine Bahnfrequenz das Messband der Advanced-LIGO- und Advanced-Virgo-Detektoren erreicht. Eine andere Möglichkeit ist, dass Paare Schwarzer Löcher mit einem dritten Körper in Wechselwirkung treten, zum Beispiel mit dem extrem massereichen Schwarzen Loch im Zentrum der Galaxie, nahe dem sich die Doppelsysteme Schwarzer Löcher befinden; dies erhöht die Exzentrizität der Bahnen durch den Kozai-Lidov-Mechanismus.

Die Entdeckung einer Verschmelzung von Paaren Schwarzer Löcher mit exzentrischen Umlaufbahnen würde Informationen über deren Bildungsprozess liefern und darauf hindeuten, dass ein solches Ereignis in einer Umgebung hoher Sterndichte stattgefunden hat. Darüber hinaus bietet es Einblicke in solche astrophysikalischen Umgebungen, die mit anderen Experimenten schwer zu untersuchen sind. In dieser Studie konzentrieren wir uns auf den Nachweis von Doppelsystemen Schwarzer Löcher mit exzentrischen Bahnen.

Die Untersuchung

Es gibt vorläufige Modelle für die von zwei Schwarzen Löchern mit exzentrischen Bahnen abgestrahlten Gravitationswellen. Diese Modelle sind jedoch rechenaufwändig und daher langsam und erfordern auch, dass die Exzentrizität klein ist und dass sich die Schwarzen Löcher nicht um eigene Achsen drehen. Aufgrund dieser Einschränkungen verwenden wir den coherent-WaveBurst-Algorithmus (cWB),

um nach diesen Quellen zu suchen. Diese Methode sucht – ohne auf spezifische Wellenformmodelle zurückzugreifen – nach überschüssiger Gravitationswellen-Energie, die kohärent in den Detektoren des Netzwerks auftritt. cWB war der erste Algorithmus, der GW150914 und viele der anderen Ver-

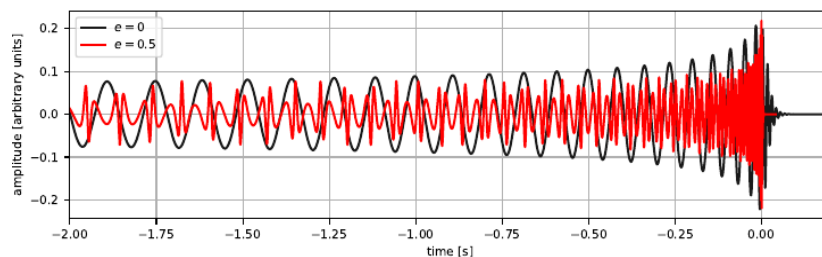


Abb. 1: Beispiele von Gravitationswellenformen für ein System zweier verschmelzender Schwarzer Löcher, dessen Komponenten beide das 10-fache der Sonnenmasse und Bahnen mit Exzentrizitäten von 0 (schwarz) und 0,5 (rot) haben. Die Auswirkung der Exzentrizität auf die Wellenform ist deutlich zu erkennen.

schmelzungen Schwarzer Löcher aus GWTC-1 entdeckte. Wir haben eine vereinfachte Wellenform für Doppelsysteme Schwarzer Löcher mit exzentrischen Bahnen verwendet, um die Entfernung zu schätzen, bis zu der cWB solche Systeme nachweisen kann (die simulierten Wellenformen für zwei verschiedene Bahnexzentrizitäten sind in Abbildung 1 dargestellt).

Wir fügen diese simulierten Signale in Detektor-Messdaten ein – unter Verwendung einfacher Modelle für die erwartete astrophysikalische Verteilung der Massen und der Exzentrizitäten der Doppelsysteme – um damit herauszufinden, welche Systeme cWB hätte nachweisen können.

Das Ergebnis

Unsere Untersuchung zeigt, dass die cWB-Suche Verschmelzungen Schwarzer Löcher mit exzentrischen Bahnen nachweisen kann. Die Entfernung, bis zu der cWB ein solches System nachweisen kann, hängt nur wenig von der Exzentrizität ab und ist in Abbildung 2 dargestellt.

Die Suche ergab keine neuen Kandidaten für Verschmelzungen von Doppelsystemen. Wir gehen davon aus, dass die zuvor nachgewiesenen Signale eine vernachlässigbare Exzentrizität aufweisen, da sie aus einer Suche stammen, die Wellenformen von Doppelsystemen mit kreisförmigen Bahnen verwendete. Es ließen sich auch keine Abweichungen von kreisförmigen Umlaufbahnen nachweisen, auch bei sorgfältiger Analyse nach möglichen Abweichungen von Vorhersagen der allgemeinen Relativitätstheorie (weitere Details finden Sie hier).

Da keine Signale von Paaren Schwarzer Löcher mit exzentrischen Bahnen nachgewiesen wurden, verwenden wir die in die Daten eingespeisten simulierten Signale, um eine Obergrenze für die Rate solcher Verschmelzungen auf ungefähr 100 pro Kubikgigaparsec pro Jahr zu schätzen.

Glossar

Exzentrizität: Ein Parameter, der den Betrag definiert, um den eine Umlaufbahn von einem perfekten Kreis abweicht.

Kozai-Lidov-Mechanismus: Ein dynamisches Phänomen, das die Umlaufbahn eines Doppelsystems beeinflusst, die von einem entfernten dritten Körper gestört wird.

Kubikgigaparsec: Das Volumen eines Würfels, dessen Kanten jeweils eine Gigaparsec lang sind.

Kugelsternhaufen: Ein dichter Sternhaufen, der das Zentrum einer Galaxie in großem Abstand umkreist.

Parsec: Eine übliche Maßeinheit für astrophysikalische Entfernungen. Der nächste Stern (abgesehen von der Sonne) ist ungefähr 1,3 Parsec von uns entfernt. Eine Million und eine Milliarde Parsec werden als Megaparsec bzw. Gigaparsec bezeichnet. Das beobachtbare Universum hat einen Durchmesser von ungefähr 28 Gigaparsec.

Weiterführende Informationen

- Besuchen Sie unsere Webseiten: www.ligo.org, www.virgo-gw.eu.
- Kostenloser arXiv-Vorabdruck, der die Details der vollständigen Analyse und der Ergebnisse beschreibt unter <https://arxiv.org/abs/1907.09384>.
- Veröffentlichte Version des Artikels: The Astrophysical Journal, Volume 883, Number 2

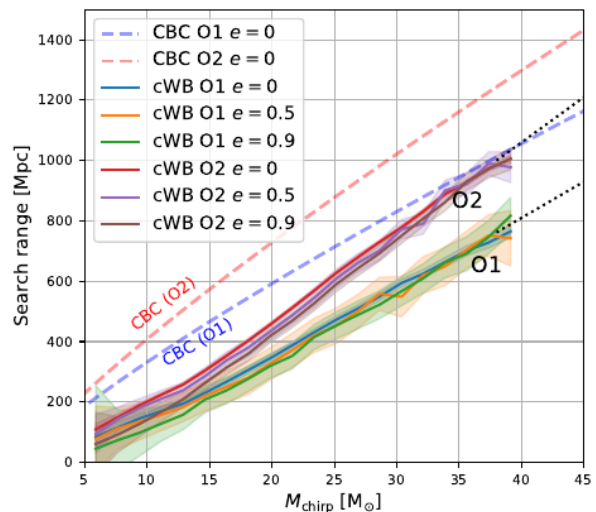


Abb. 2: Dieses Diagramm zeigt die Entfernung (in Megaparsec), in der die cWB-Methode f Verschmelzungen zweier Schwarzer Löcher nachweisen kann (aufgetragen als Funktion der Chirp-Masse des Doppelsystems in Einheiten der Sonnenmasse). Diese Entfernung wird getrennt für die O₁- und O₂-Beobachtungsläufe und für verschiedene Exzentrizitäten der Umlaufbahn angegeben. Die schattierten Bereiche zeigen das 68%-Konfidenzintervall. Die Entfernung hängt nur sehr wenig von der Bahnexzentrizität ab.