



LIGO
Scientific
Collaboration



Suche nach Doppelsystemen schwarzer Löcher mit mittlerer Masse im 1. und 2. Beobachtungslauf von Advanced LIGO und Advanced Virgo

Die Advanced-LIGO- und Advanced-Virgo-Detektoren haben zwischen 2015 und 2018 zwei Beobachtungsläufe absolviert. Bisher wurden zehn Verschmelzungen von je zwei schwarzen Löchern beobachtet. Obwohl die Masse, die ein schwarzes Loch (BH nach dem englischen *black hole*) haben kann, nicht begrenzt ist, gehören alle beobachteten verschmolzenen BH und ihre Überreste zur Kategorie stellarer schwarzer Löcher – d.h. sie verfügen über weniger als das 100-fache der Masse der Sonne (M_{\odot}). Die meisten Galaxien in unserem Universum haben ein extrem massereiches schwarzes Loch in ihrem Zentrum mit Massen von mehr als $100.000 M_{\odot}$. Unsere Milchstraße hat ein solches extrem massereiches schwarzes Loch, Sagittarius A* mit einer Masse von ungefähr 4,3 Millionen Sonnen.

IMBH: Der „missing link“ zwischen stellaren und extrem massereichen schwarzen Löchern

Alte Sterne mit Massen von mehr als $10 M_{\odot}$ kollabieren zu stellaren schwarzen Löchern. Theorien besagen, dass stellare schwarze Löcher zu größeren schwarzen Löchern verschmelzen. In einer geeigneten Umgebung können diese größeren schwarzen Löcher nach mehrmaliger Verschmelzung extrem massereiche schwarze Löcher bilden. Wir gehen daher davon aus, dass zu einem bestimmten Zeitpunkt in dieser Evolutionsphase ein schwarzes Loch mit mittlerer Masse (englisch *intermediate-mass black hole*, kurz IMBH) existieren sollte. Wir erwarten daher, IMBHs im Gravitationswellenfenster zu beobachten, das Advanced LIGO und Advanced Virgo geöffnet haben.

Wir haben indirekte Beweise für die Existenz dieser schwarzen Löcher aus elektromagnetischen Beobachtungen. Zum Beispiel wird angenommen, dass viele ultraleuchtkräftige Röntgenquellen (ULX) in nahe gelegenen Galaxien BH-Systeme mit Massen von mehr als $100 M_{\odot}$ enthalten. Es wurde jedoch noch keine eindeutige Entdeckung eines IMBH gemacht. Es gibt weitere Möglichkeiten, zur Entstehung von IMBHs: Beispielsweise könnten massereiche Sterne in dichten Sternumgebungen zusammenstoßen und einen noch massereicheren Stern bilden, der schließlich unter seiner eigenen Schwerkraft zusammenbricht und ein IMBH bildet. Oder es könnten einfach schwarze Löcher sein, die sich direkt nach dem Urknall gebildet haben!

Warum sind IMBHs so wichtig?

Die Entdeckung eines IMBH wird das Rätsel um den „missing link“ zu lösen. Es würde Licht auf die

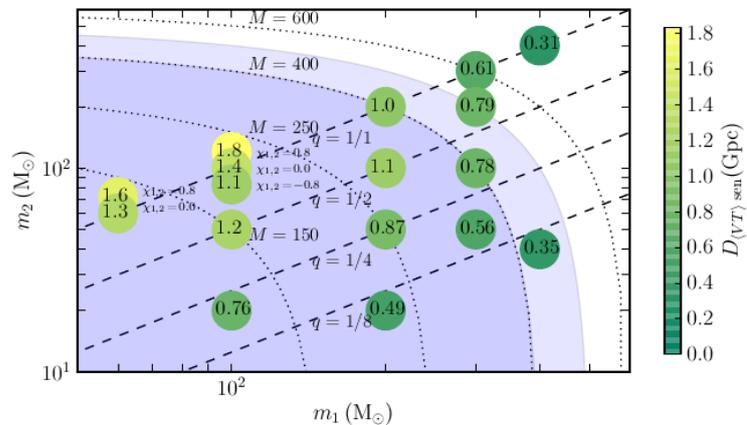


Abb. 1: Die Entfernung (D_{VTsen}), in der verschiedene simulierte schwarze Löcher mittlerer Masse nachgewiesen werden könnten, ist in der obigen Abbildung dargestellt. Jeder Kreis entspricht einer Klasse verschmelzender IMBH gemessen an der Quelle, und die Zahl im Kreis gibt die Entfernung in Gigaparsec (Gpc) an. 1 Gpc sind $3,09 \cdot 10^{22}$ km, also ca. 30 Milliarden Billionen Kilometer!

Entstehung von extrem massereichen schwarzer Löchern werfen und somit auf die Galaxienbildung. Da IMBHs extrem schwer sind, stellen sie auch hervorragende „Labore“ dar, in denen sich die allgemeine Relativitätstheorie prüfen lässt.

Wie suchten wir nach IMBH-Doppelsystemen?

Ein Doppelsystem stellarer schwarzer Löcher sendet eine Gravitationswelle aus, die eine charakteristische „Chirp“-Form hat und in drei Phasen unterteilt werden kann: Umkreisen, Verschmelzen und Abklingen. IMBH-Systeme haben eine große Masse und strahlen daher einen großen Teil ihrer Energie durch Gravitationswellen ab. Dieses Signal kann von unseren aktuellen Detektoren nur innerhalb eines sehr kurzen Zeitraums beobachtet werden. Daher stufen wir sie als „Burst“-Signale / Gravitationswellenausbrüche ein.

Wir verwenden zwei Methoden, um nach diesen Signalen in den verrauschten Beobachtungsdaten zu suchen - eine, die darauf basiert, die Daten mit den verfügbaren theoretischen Modellen „abzugleichen“, wie sie aus der allgemeinen Relativitätstheorie vorhergesagt werden. Die andere, allgemeinere Suche sucht nach übereinstimmenden Signalen zwischen den beiden Detektoren, ohne deren Form in der Zeit-Frequenz-Ebene zu beschränken. Beide Suchen wurden bis zu einer Gesamtmasse von ca. $500 M_{\odot}$ mit verschiedenen Massenverhältnissen durchgeführt.

Das Ergebnis der Suche

Leider wurde bei dieser Suche keine Verschmelzung eines IMBH-Doppelsystems entdeckt. Allerdings können wir dieses Ergebnis nutzen, um Grenzen dafür zu berechnen, wie oft diese Objekte verschmelzen. Zu diesem Zweck führten wir eine Folgestudie mit realistischen simulierten Signalen aus IMBH-Doppelsystemen durch, die aus numerischen Lösungen der Einstein-Gleichungen berechnet wurden. Wir haben diese simulierten Quellen in unterschiedlichen Entfernungen über den Himmel verteilt und unsere Suchtechniken angewendet, um sie zu finden. Basierend auf dieser Studie kamen wir zu mehreren interessanten Ergebnissen.

In Abbildung 1 zeigen wir die Entfernung, in der die Gravitationswellendetektoren unter Verwendung der verwendeten Suchmethoden jede der ausgewählten Quellen hätten nachweisen können. Diese Studie liefert eine im Vergleich zur vorherigen Studie verbesserte Schätzung der Häufigkeit von IMBH-Verschmelzungen pro Jahr. Dies zeigt, dass sich die Verschmelzungsrates eines Doppelsystem mit $100 M_{\odot}$ schweren schwarze Löchern im Vergleich zum früheren Wert auf ein Fünftel verringerte, auf 0,7 Verschmelzungen pro Kugelsternhaufen und Milliarden Jahre.

In Zukunft werden wir mit der Verbesserung der Empfindlichkeit der Gravitationswellendetektoren ein besseres Verständnis der Häufigkeit von IMBH-Verschmelzungen bekommen. Der dritte Beobachtungslauf hat mit dem Sammeln von Daten am 1. April 2019 begonnen, und Gravitationswellenwissenschaftler*innen sind sehr zuversichtlich, diese schwer erfassbaren Quellen bald zu beobachten!

Weiterführende Informationen

Kostenloser Vorabdruck der Veröffentlichung unter <https://arxiv.org/abs/1906.08000>.

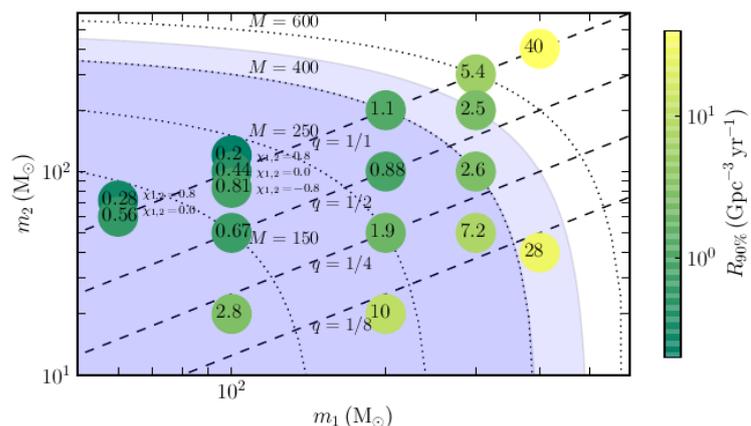


Abb. 2: Die oberen Grenzwerte für die Verschmelzungsratedichte (bei 90% statistischer Sicherheit) ($R_{90\%}$) sind für dieselben Systeme (wie in Abb. 1) dargestellt. Hier sind die Zahlen in jedem Kreis $R_{90\%}$. Die Rate wird in der Anzahl der Verschmelzungen pro Gpc^3 pro Jahr angegeben. Beachten Sie, dass die „strengste“ Obergrenze für Systeme mit einer Gesamtmasse der schwarzen Löcher von ca. $200 M_{\odot}$ gilt.