



LIGO
Scientific
Collaboration



Eine Suche nach schwarzen Löchern mit weniger als einer Sonnenmasse

Sterne erzeugen Energie durch Kernfusion. Die freigesetzte Energie erzeugt einen nach außen wirkenden Druck, der im Gleichgewicht mit der nach innen drückenden Schwerkraft steht. Wenn der Stern seinen gesamten „Treibstoff“ verbraucht hat, kann der Druck der Kernfusion die Schwerkraft nicht länger ausgleichen. Es kommt zum Kollaps durch die Schwerkraft. Für extrem massereiche Sterne ist die Schwerkraft sogar stärker als der Elektronenentartungsdruck, so dass ein Neutronenstern oder ein schwarzes Loch entsteht.

Dieser Entstehungsweg schwarzer Löcher und Neutronensterne wird „Sternentwicklung“ genannt. Nach unserem aktuellen Verständnis der Sternentwicklung erwarten wir nicht, dass Neutronensterne oder schwarze Löcher mit weniger als der Masse der Sonne (eine Sonnenmasse) entstehen. Der Nachweis eines kompakten Objekts von weniger als einer Sonnenmasse mittels Gravitationswellen wäre daher ein Hinweis auf einen neuen Weg zur Entstehung schwarzer Löcher. Gäbe es einen solchen neuen Weg, schwarze Löcher zu erzeugen, hätte dies tiefgreifende Auswirkungen für unser Verständnis der Geschichte und Entwicklung von Sternen und des Universums.

Nach einigen Theorien können schwarze Löcher mit weniger als einer Sonnenmasse mit Dunkler Materie in Zusammenhang stehen. Dunkle Materie ist eine Materieform, die den größten Teil der Masse in unserem Universum ausmacht. Sie strahlt kein Licht aus und lässt sich daher nur sehr schwer untersuchen. Schwarze Löcher sind ähnlich dunkel und unsichtbar, lassen sich aber wie Dunkle Materie anhand ihrer Schwerkraft nachweisen.

Vielen Theorien untersuchen die Möglichkeit, dass Dunkle Materie aus neuen Elementarteilchen besteht, die hauptsächlich durch Schwerkraft wechselwirken. Kürzlich haben Theoretiker*innen gezeigt, dass aus Dunkle-Materie-Teilchen mit bestimmten Eigenschaften schwarze Löcher mit Massen, die sich nicht durch Sternentwicklung erklären lassen, entstehen könnten. Eine Möglichkeit ist, dass die Teilchen mit Neutronensternen wechselwirken und diese zu schwarzen Löchern kollabieren lassen. Eine andere Hypothese besagt, dass schwarze Löcher direkt aus dem Kollaps einer hinreichend massereichen Wolke von Dunkle-Materie-Teilchen entstehen.

Andere Theorien schlagen vor, dass Dunkle Materie nicht aus Teilchen besteht, sondern aus primordialen schwarzen Löchern. Diese sind eine theoretisch mögliche Art von schwarzen Löchern, die aus zufälligen Dichteschwankungen im frühen Universum entstanden sein könnten. Da sie nicht aus zusammenfallenden Sternen entstehen, könnten primordiale schwarze Löcher Massen haben, die mit bekannten Prozessen nicht zu erreichen sind (beispielsweise weniger als eine Sonnenmasse).

Wir suchten in LIGO-Daten aus den Jahren 2016 und 2017 nach schwarzen Löchern von gerade einmal einer Fünftel Sonnenmasse. Wir fanden keine Kandidatensignale für schwarze Löcher von weniger als einer Sonnenmasse.

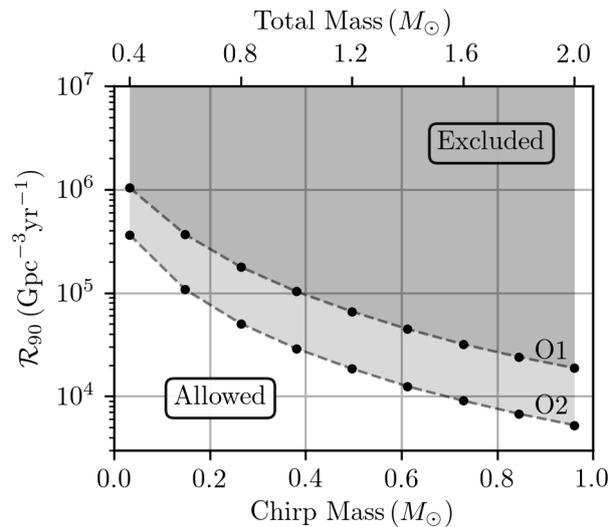


Abb. 1: Die obere Grenze für die Verschmelzungsdichte (Anzahl von Verschmelzungen pro Zeit und Einheitsvolumen) von Doppelsystemen mit Komponenten gleicher Masse mit weniger als einer Sonnenmasse, aufgetragen als Funktion der Chirpmasse des Doppelsystems. Wir messen diese Größe in Ereignissen pro Jahr und Kubikgigaparsec, welches ein kosmisches Volumenmaß darstellt.

Mit dem fehlenden Nachweis dieser schwarzen Löcher konnten wir neue Grenzen dafür formulieren, welchen maximalen Gesamtanteil der Dunklen Materie primordiale schwarze Löcher ausmachen könnten. Wir präsentierten außerdem die bislang striktesten Grenzen für die Verschmelzungsrate kompakter Objekte dieser Masse; diese verrät uns wie viele Verschmelzungen kompakter Objekte wir pro Einheitsvolumen und Jahr erwarten können. Diese Messgröße ist wichtig, weil sie keine Annahmen zur Entstehung des Objekts macht. Sie lässt sich auf schwarze Löcher mit weniger als einer Sonnenmasse beziehen, egal ob diese aus Teilchen Dunkler Materie oder primordialen Vorgängen stammen. Die Einschränkungen für die Rate und den Anteil an der Dunklen Materie sind beide dreimal strikter als die Einschränkungen, die wir mittels einer Suche in unseren Daten aus den Jahren 2015 und 2016 berechneten.

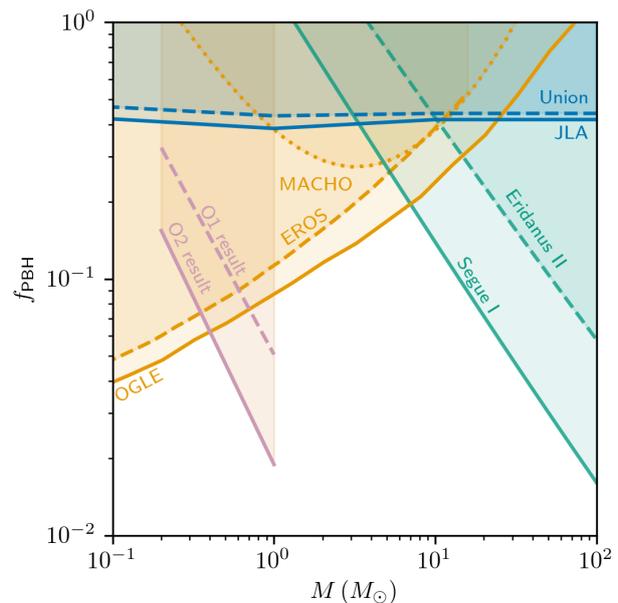


Abb. 2: Einschränkungen des Häufigkeit von primordialen schwarzen Löchern als Anteil der Dunklen Materie. Die Querachse zeigt die Masse des schwarzen Lochs, während die Hochachse die Obergrenze für den Anteil der Dunklen Materie zeigt, den schwarze Löcher erklären können.

Advanced LIGO und Advanced Virgo haben mit höherer Empfindlichkeit als je zuvor einen neuen Beobachtungslauf begonnen und haben bereits mehrere vielversprechende Gravitationswellensignalkandidaten identifiziert. Die verbesserte Empfindlichkeit von LIGO und Virgo erlaubt ihnen, ein viel größeres Volumen des Universums zu erfassen. Damit werden sie entweder schwarze Löcher von weniger als einer Sonnenmasse nachweisen oder noch striktere Grenzen für deren Vorkommen setzen.

Glossar

Dunkle Materie: Diese mysteriöse Materieform macht rund 85 % der Masse im Universum aus. Sie ist dunkel, weil sie kein Licht abstrahlt oder elektromagnetisch wechselwirkt. Viele Theorien der Dunklen Materie sagen vorher, dass sie aus Elementarteilchen besteht; aber es ist ebenso interessant zu untersuchen, dass die dunkelsten bekannten Objekte (schwarze Löcher!) einen Teil der Dunklen Materie darstellen könnten.

Elektronenentartungsdruck: Elektronenentartungsdruck entsteht aufgrund des Pauli-Prinzips, das besagt, dass sich zwei Elektronen nicht im selben Quantenzustand befinden können. Das bedeutet, dass es selbst unter extremer Schwerkraft wie z.B. im Inneren von Sternen eine Grenze dafür gibt, wie stark sich Elektronen zusammenpressen lassen.

Gigaparsec: Eine astronomische Entfernungseinheit; eine Milliarde Parsec entsprechen rund drei Milliarden Lichtjahren oder $3 \cdot 10^{22}$ Kilometern.

Kernfusion: Kernfusion bezeichnet die Verschmelzung von zwei Atomkernen zu einem einzelnen Kern. Bei Elementen, die leichter als Eisen sind, wird dabei Energie freigesetzt. Diese Energie treibt Sterne an.

Neutronenstern: Ein extrem dichter Überrest vom Kollaps massereicher Sterne.

Primordiale schwarze Löcher: Eine postulierte Art schwarzer Löcher, die im frühen Universum entstanden. Schwankungen der Energiedichte des Universums könnten zu Raumregionen geführt haben, die so dicht waren, dass sie spontan zusammenbrachen und ein schwarzes Loch bildeten. Da sie nicht aus dem Kollaps massereicher Sterne entstehen, könnten primordiale schwarze Löcher mit Massen von weniger als einer Sonnenmasse existieren.

Schwarzes Loch: Ein Bereich der Raumzeit, der durch eine extrem kompakte Masse verursacht wird, in dem die Schwerkraft so stark ist, dass nichts, einschließlich Licht, sie verlassen kann.

Verschmelzungsratendichte: Die Anzahl von Paaren kompakter Objekte, deren Verschmelzung wir pro Einheitsvolumen und Jahr erwarten.

Weiterführende Informationen

Unsere Webseiten: <https://www.ligo.org> und <http://www.virgo-gw.eu>.

Lesen Sie einen kostenlosen Vorabdruck unter <https://arxiv.org/abs/1904.08976>.

Lesen Sie eine ähnliche Zusammenfassung der letzten Suche nach Objekten mit weniger als einer Sonnenmasse in den Daten aus LIGOs ersten Beobachtungslauf unter <https://www.ligo.org/science/Publication-O1SSM/index.php>.

Lesen Sie einen Vorabdruck der letzten Suche nach Objekten mit weniger als einer Sonnenmasse unter <https://arxiv.org/abs/1808.04771>.

Vorhersagen der zukünftigen Detektorempfindlichkeit finden Sie unter <https://arxiv.org/abs/1304.0670>.