

Vorhersage der Folgen der Neutronensternkollision, die GW170817 produzierte

Englische Originalversion dieser Zusammenfassung und Versionen in anderen Sprachen:
<https://www.ligo.org/science/Publication-GW170817Kilonova/index.php>

Die Quelle des Gravitationswellensignals GW170817, höchstwahrscheinlich zwei verschmelzende Neutronensterne, wurde auch durch elektromagnetische Strahlung beobachtet: die ersten Mehrkanal-Beobachtungen dieser Art. („Multi-Messenger-Astronomie“) In diesem Dokument beschäftigen wir uns mit der Materie, die aus dem System geschleudert wird, wenn die Neutronensterne miteinander verschmelzen. Es wird erwartet, dass diese ausgestoßene Materie durch Kernverschmelzung (Nukleosynthese), den sogenannten „r-Prozess“, ein helles Leuchten erzeugt, das Kilonova genannt wird, und ein solches Leuchten wurde in der Tat von Astronomen beobachtet. Wir können aber über diese ausgestoßene Materie auch schon etwas erfahren, indem wir nur die Gravitationswellendaten alleine und Modelle, die auf Simulationen von Neutronensternkollisionen kalibriert sind, verwenden.

Insbesondere wenden wir diese Modelle auf die Massen der einzelnen Neutronensterne an, die aus den Messungen von GW170817 abgeleitet wurden, um die Menge der dynamisch ausgestoßenen Materie zu bestimmen, d.h. der Materie, die während der Verschmelzung hinausgeschleudert wurde. Der wahrscheinliche Bereich für die Masse dieser „dynamischen Ejekta“ (ausgeworfene Masse) für GW170817 liegt zwischen einem Tausendstel und einem Hundertstel der Masse unserer Sonne. Die Menge der ausgestoßenen Materie verwenden wir dann, um ihren Beitrag zur Helligkeits- und Farbentwicklung der beobachtbaren Kilonova abzuschätzen. Darüber hinaus nutzen wir unsere Schätzungen der Auswurfmasse und der ebenfalls von GW170817 abgeleiteten Verschmelzungsrate von Neutronensternen, um den Beitrag solcher Ereignisse zur Häufigkeit schwerer Elemente wie Gold in unserem Universum zu ermitteln.

Der Nachweis von [GW170817](#) als Verschmelzung zweier [Neutronensterne](#) (NS) steht im Gegensatz zu den vorherigen Beobachtungen von Gravitationswellen (GW), die allesamt von [Schwarzen Löchern](#) stammten, da bei NS nicht nur die Physik der gekrümmten [Raumzeit](#) wichtig ist, sondern auch die extrem dichte Materie. Insbesondere kann die an der NS-Kollision beteiligte [neutronenreiche](#) Materie ein „elektromagnetisches Gegenstück“ erzeugen: Strahlung im sichtbaren Licht, Hochenergie- und Radio-Bereich. Es wird erwartet, dass ein Teil dieser Materie während der Verschmelzung ausgestoßen wird und eine sogenannte [r-Prozess-Nukleosynthese](#) (schneller Nukleosyntheseprozess, r für Englisch „rapid“) durchläuft. Wenn es zu diesen Kernreaktionen kommt, leuchtet die ausgeworfene Materie hell. Ein solches Glühen, oft „[Kilonova](#)“ genannt, wurde im Fall von GW170817 tatsächlich von mehreren Gruppen von Astronomen beobachtet. (Weitere Informationen zu diesen Beobachtungen finden sich in unserer [Zusammenfassung zum Thema Multi-Messenger-Astronomie](#)). Jedoch können wir auch schon, lediglich mit den Gravitationswellendaten von

GW170817, die Eigenschaften der ausgestoßenen Masse eingrenzen, welche die Astronomen dann mit ihren elektromagnetischen (EM) Beobachtungen vergleichen können.

Abschätzung der ausgeworfenen Masse

Man kann die Menge der Materie, die während einer Neutronensternverschmelzung ausgeworfen wird, mit numerischen Simulationen vorhersagen. Diese lösen [Einsteins Gleichungen](#), welche die gekrümmte Raumzeit beschreiben, zusammen mit den relativistischen [hydrodynamischen](#) Gleichungen, welche die Materie in den Neutronensternen beschreiben. (Plus möglicherweise weitere Gleichungen, die Magnetfelder oder [Neutrinos](#) beschreiben.) Diese Simulationen zeigen, dass die Auswurfmasse von vielen Parametern abhängt; aber für den Typ von Ejekta den wir hier betrachten, sind vor allem die Massen der beiden Sterne entscheidend, sowie ihre Größe und wie stark ihre Materie durch ihre eigene Schwerkraft an sie gebunden ist. Konkret hängt das Ergebnis von der „Kompaktheit“ der Sterne ab - wie groß sie für eine gegebene Masse sind - und von ihren Bindungsenergien – der erforderlichen Energiemenge, um einen Stern vollständig zu zerlegen. Wir verwenden eine empirische Formel, die die Masse der Ejekta in Abhängigkeit von den Eigenschaften der Neutronensterne in einem Doppelsternsystem angibt. Kalibriert ist diese Formel mit den Ergebnissen von über hundert numerischen Simulationen von Neutronensternverschmelzungen. Dabei berücksichtigen diese Prognosen nur *dynamisch* ausgestoßen Materie, d.h. Materie, die während der heftigen Verschmelzung selbst aus dem System ausgeworfen wurde. Zusätzliche Materie kann nach den Verschmelzen über einen längeren Zeitraum durch Winde von der Materiescheibe um den Überrest herausgetragen werden. Dieser Beitrag wird jedoch nicht in den Simulationen berücksichtigt, sodass wir ihn auch hier nicht in Betracht ziehen.

Die Massen der beiden Neutronensterne, die das Binärsystem bilden, können aus den Gravitationswellenbeobachtungen abgeleitet werden. Aus den Massen können die Kompaktheit und Bindungsenergie der Sterne abgeleitet werden, indem man die [Zustandsgleichung](#) verwendet, welche das „großräumige“ Verhalten der Materie im Neutronenstern beschreibt. (Weitere Einzelheiten finden sich in [der Zusammenfassung zur Entdeckung von GW170817](#).) Da die Materie in Neutronensternen viel dichter ist als jede Materie, die wir auf der Erde studieren können (außer in flüchtigen Teilchenkollisionen), ist diese Zustandsgleichung nicht genau bekannt. Wir betrachten daher eine Reihe von theoretischen Vorhersagen.

Alternativ können wir die Gravitationswellenmessungen der „Gezeitenverformbarkeit“ der Neutronensterne verwenden, um die Kompaktheit und Bindungsenergien abzuleiten, unter Verwendung von empirischen Formeln, die an eine Vielzahl von Zustandsgleichungen angepasst wurden. Wie in der [der Zusammenfassung zur Entdeckung von GW170817](#) ausgeführt, beschreibt die Gezeitenverformbarkeit, wie stark sich ein Stern durch das Gravitationsfeld seines Begleiters verformt, und gibt damit Auskunft über seinen inneren Aufbau.

Kilonova-Lichtkurven

Abhängig davon, wieviel Masse aus dem NS-Doppelsystem ausgeworfen wird, und wie genau dies geschieht, wird die Kilonova ein anderes EM-Spektrum aufweisen. Wir verwenden drei verschiedene Modelle, um mögliche optische und nahinfrarote Signale (sogenannte „Lichtkurven“) zu berechnen, in Abhängigkeit von unseren Rückschlüssen auf die Masse der Ejekta. Astronomen, die EM-Beobachtungen der GW170817-Kilonova gemacht haben, können ihre Beobachtungen mit diesen Vorhersagen vergleichen, um diese

Modelle zu testen sowie die Hypothese, dass die gesamte Materie nur von dynamischem Auswurf stammt, zu überprüfen. Mit GW170817 sind wir zum ersten Mal in der Lage, solche Vergleiche durchzuführen, und erschließen damit das Feld der Multi-Messenger-Astronomie.

Der r-Prozess

Der schnelle Neutroneneinfangprozess oder *r-Prozess* ist eine Möglichkeit, um Elemente, die schwerer als Eisen sind, zu erzeugen. Es wird vermutet, dass frühere Neutronensternverschmelzungen die Quelle der vom r-Prozess abgängigen Elemente sein könnten, die wir heute in der Galaxie sehen - einschließlich all derer, die wir hier auf der Erde haben. Es wird auch erwartet, dass Supernovae zu deren Häufigkeiten beitragen, obwohl es unbekannt ist, ob Supernovae oder NS-Verschmelzungen die dominierenden Fabriken für den r-Prozess sind. Wenn verschmelzende NS für alle r-Prozess-Elemente verantwortlich sind, müssen sie in großem Umfang den r-Prozess durchlaufende Materie auswerfen und auch mit einer relativ hohen Rate im Universum auftreten. Aus unseren GW-Daten über GW170817 erhalten wir Grenzen für die Ejekta-Masse als auch für die Kollisionsrate, die dann verwendet werden können, um den Anteil der NS-Verschmelzungen an der Häufigkeit der r-Prozess-Elemente abzuschätzen. Unter der Annahme, dass alle NS-Verschmelzungen ähnliche Eigenschaften haben, wie wir sie aus GW170817 abgeleitet haben, ergibt sich, dass, wenn mehr als etwa 10% der dynamisch ausgestoßenen Masse in r-Prozess-Elemente umgewandelt wird, NS-Verschmelzungen für das gesamte heutige Vorkommen von r-Prozess-Elementen verantwortlich sein können. Zukünftige Beobachtungen von Gravitationswellen aus NS-Verschmelzungen werden den Beitrag genauer einschränken und damit dazu beitragen, das langjährige Rätsel zu lösen, wo die meisten r-Prozess-Elemente entstehen.

WEITERFÜHRENDE INFORMATIONEN

- Der vollständige Fachartikel ist [hier](#) gratis zu lesen und wurde in der Zeitschrift „Astrophysical Journal Letters“ [veröffentlicht](#).
- Websites von LIGO und Virgo: <https://www.ligo.org>, <http://www.virgo-gw.eu>
- LIGO Open Science Center mit Zugang zu den Rohdaten von GW17081: <https://losc.ligo.org>

Allgemeinverständliche Zusammenfassungen weiterer Veröffentlichungen über die Entdeckung und Bedeutung von GW170817:

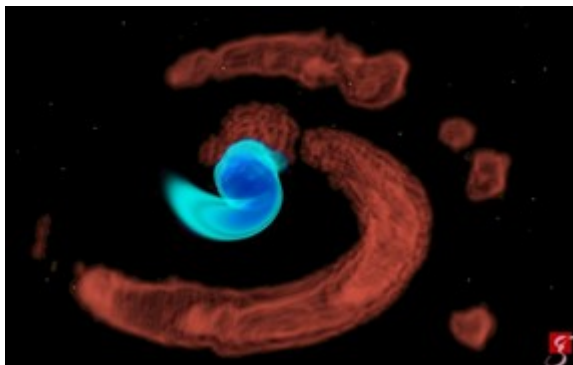
- [GW170817: Gravitationswellenbeobachtung eines Doppel-Neutronenstern-Systems](#)
- [Multi-Messenger-Beobachtungen eines verschmelzenden Doppelneutronensterns](#)
- [Gravitationswellen und Gamma-Strahlen von verschmelzenden Neutronensternen: GW170817 und GRB 170817A](#)
- [Messung der Expansion des Universums mit Gravitationswellen](#)
- [Suche nach dem Überrest von GW170817: Neutronenstern oder Schwarzes Loch?](#)
- [Die Herkunft von GW170817: Neutronensterne, Supernovae und Billard-Tricks](#)
- [Die Hintergrundsymphonie der Gravitationswellen von verschmelzenden Neutronensternen und schwarzen Löchern](#)
- [Suche nach hochenergetischen Neutrinos vom verschmelzenden Doppelneutronenstern GW170817 mit ANTARES, IceCube und dem Pierre-Auger-Observatorium](#)

Glossar

r-Prozess: Der schnelle Neutroneneinfangprozess. Ein Weg, Elemente schwerer als Eisen zu erzeugen, indem leichtere Elemente viele Neutronen absorbieren und dabei zunächst instabile radioaktive Isotope bilden. Einige der Neutronen zerfallen dann über den [Beta- Zerfall](#) in Protonen und bilden damit zunehmend schwerere Elemente, bis ein stabiles Isotop erreicht ist.

Lichtkurve: Die Helligkeit einer Quelle als eine Funktion der Zeit, für Beobachtungen mit einem gegebenen Farbfilter.

Multi-Messenger-Astronomie: Mit Hilfe von elektromagnetischen, Gravitationswellen-, und Astroteilchen-Daten können wir astrophysikalische Objekte und Phänomene im Universum umfänglicher studieren als mit nur einem dieser „Boten“ (englisch: messenger) oder „Kanäle“.



Eine Simulation des Verschmelzens zweier Neutronensterne mit Massen, die denen von GW170817 entsprechen. Bildrechte: T. Dietrich, S. Ossokine, H. Pfeiffer, A. Buonanno / Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik / BAM Zusammenarbeit

Abbildungen aus der Publikation

Weitere Informationen zu diesen Abbildungen finden sich in der [vollständigen Veröffentlichung](#).

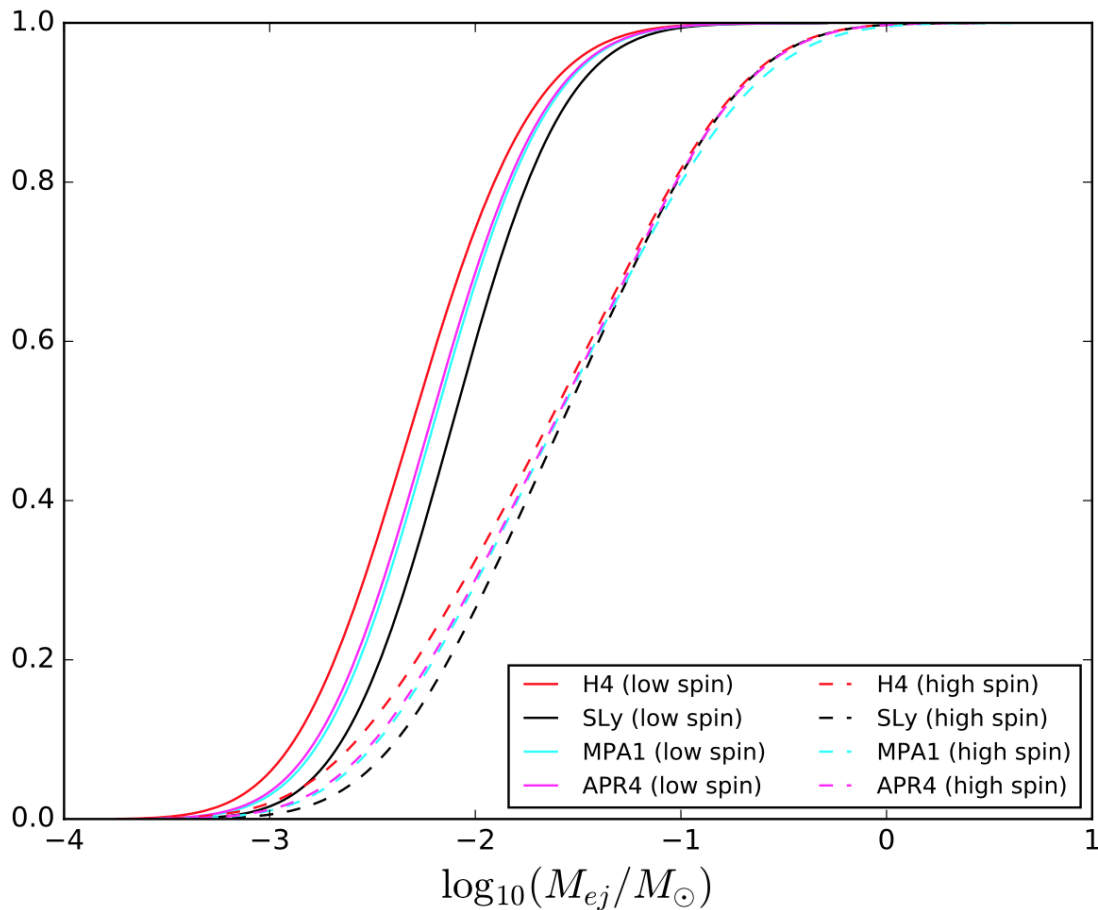


Abbildung 1: Diese Kurven zeigen die Wahrscheinlichkeit (auf der vertikalen Achse), dass die aus dem Binärsystem herausgeschleuderte Masse mindestens den auf der horizontalen Achse angegebenen Wert erreicht. Die durchgezogenen Kurven nehmen an, dass die zusammenstoßenden Neutronensterne sich kaum (wenn überhaupt) gedreht haben, während die gestrichelten Kurven erlauben, dass sie einen höheren Drehimpuls hatten. Die Farben kennzeichnen unterschiedliche Annahmen über die Kompaktheit und die Bindungsenergien der Neutronensterne. Mit niedrigem Drehimpuls wird nicht mehr Materie als etwa ein Hundertstel einer Sonnenmasse ausgestoßen.

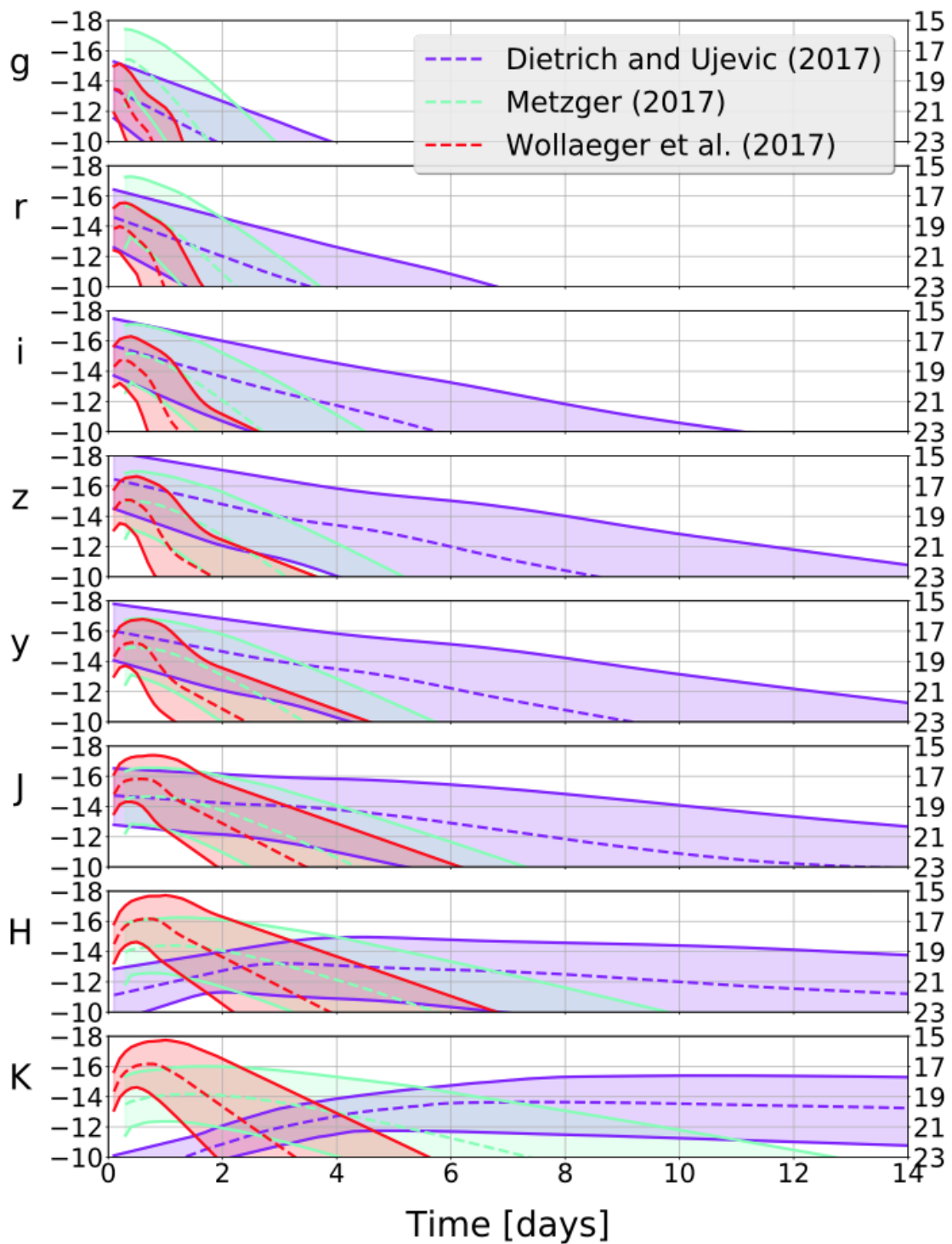


Abbildung 2: Diese Lichtkurven zeigen, wie viel Licht durch die herausgeschleuderte Masse der Neutronensternverschmelzung entsteht, das wir dann auf der Erde sehen können. Jede Teilabbildung zeigt die vorhergesagte Helligkeit der Quelle (auf der vertikalen Achse) zu einer bestimmten Zeit (auf der horizontalen Achse) für eine andere Lichtfarbe, welche von unseren Teleskopen beobachtet werden (sogenannte „Farbfilter“). Die Filter sind von blau/grün im oberen Bereich bis nahinfrarot im unteren Bereich angeordnet. (Dies ist Abbildung 3 in unserer [Veröffentlichung](#).)

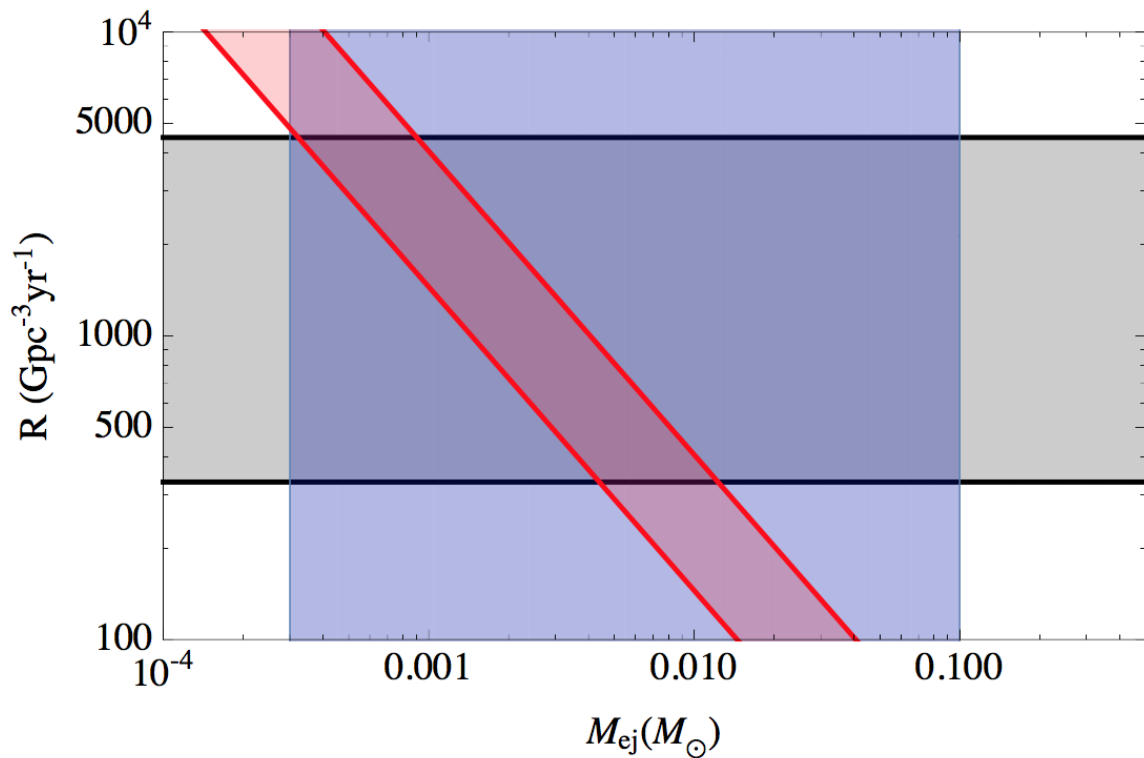


Abbildung 3: Dieses Diagramm zeigt, dass verschmelzende Neutronensterne wie GW170817 eine dominante Produktionsstätte bestimmter schwerer Elemente sein können. Die vertikale Achse zeigt, wie oft solche Verschmelzungen auftreten (ihre „Rate“) und die horizontale Achse gibt an, wie viel Masse aus einem Binärsystemen bei der Verschmelzung herausgeschleudert wird. Das graue Band zeigt den von GW170817 abgeleiteten Bereich wahrscheinlicher Raten, und das blaue Band zeigt, was Astronomen als plausible Werte für die ausgeworfenen Massen annehmen, unter Berücksichtigung, der mit Teleskopen entdeckten hellen Quellen. Das rote Band, im Überlappungsbereich, zeigt die möglichen Fälle, in denen Neutronensterneverschmelzungen für alle im Sonnensystem beobachteten r-Prozess-Elemente verantwortlich sein könnten. Die Überlappung der drei Bänder zeigt, dass verschmelzende Neutronensterne tatsächlich plausibel die dominierende Quelle von r-Prozess-Elementen sein könnten, wenn man unsere Daten von GW170817 betrachtet. (Dies ist Abbildung 5 in unserer [Veröffentlichung](#).)