

Die Herkunft von GW170817: Neutronensterne, Supernovae und Billard-Tricks

Englische Originalversion dieser Zusammenfassung und Versionen in anderen Sprachen:
<https://www.ligo.org/science/Publication-GW170817Progenitor/index.php>

Am 17. August 2017 entdeckten Advanced LIGO und Advanced Virgo ein Gravitationswellensignal, genannt [GW170817](#), das von zwei sich umkreisenden [Neutronensternen](#) stammt. Nachfolgende Beobachtungen von Astronomen aus der ganzen Welt zeigten ein [elektromagnetisches Gegenstück](#), sodass wir die Quelle des Signals genau ausfindig machen konnten. Die Heimat unseres Doppelneutronensterns ist die Galaxie [NGC 4993](#). Mit unseren Beobachtungen der Quelle können wir versuchen, herauszufinden, wie die Neutronensterne gebildet wurden. Es scheint, dass sie wahrscheinlich denen ähneln, die wir aus unserer eigenen Galaxie kennen.

Wir wissen, dass GW170817 mit einem Knall endete. Unsere zwei Neutronensterne umkreisten sich mit immer kleiner werdendem Abstand, bis sie schließlich miteinander verschmolzen, was zu einem [Himmelsfeuerwerk](#) führte. Aber wie wurde das Doppelneutronensternsystem („Binärsystem“) ursprünglich gebildet?

Neutronensterne sind die Überreste von „erschöpften“ Sternen. Wenn Sterne ihre Treibstoff verbrannt haben, haben sie nicht mehr die Energie, ihren aufgeblähten Zustand zu erhalten, und sie beginnen unter ihrem eigenen Gewicht zusammenzubrechen. Der zentrale Kern des Sterns wird dabei zusammengedrückt und Energie freigesetzt, wodurch die äußeren Schichten des Sterns weggeschleudert werden. Neutronensterne werden gebildet, wenn der Kern zu massiv ist, um als [Weißer Zwerg](#) zu enden (sowie unsere Sonne), aber noch nicht schwer genug, um als [Schwarzes Loch](#) zu enden. Große Mengen an Energie werden freigesetzt, wenn der Kern eines Sterns einen Neutronenstern bildet, was zu einer hellen Explosion führt, die [Supernova](#) genannt wird. Unser binärer Neutronenstern begann also mit zwei Knällen, je einem bei der Geburt eines jeden Neutronensterns.

Während einer Supernova kann es vorkommen, dass das Material nicht gleichmäßig nach außen in alle Richtungen explodiert. Daraus ergibt sich, dass der neu gebildete Neutronenstern einen Stoß erfährt. Durch die Explosion kann er mit einer Geschwindigkeit von mehreren hundert Kilometern pro Sekunde (entspricht Millionen von Kilometern pro Stunde) angetrieben werden. Wir haben von den gesammelten Beobachtungen von GW170817 rückwärts gearbeitet, um herauszufinden, wie groß der erhaltene Stoß gewesen sein könnte.

Diese Berechnung ist ein bisschen wie der Versuch, herauszufinden, wie hart eine [Billardkugel](#) getroffen wurde – nachträglich mit dem Wissen, dass sie in der Ecktasche gelandet ist. Die Kugel könnte sanft angestoßen worden sein, wenn sie sich in der Nähe der Tasche befand, oder sehr hart, und zwischendurch noch über mehrere Banden abgeprallt. Dementsprechend können wir eine Reihe von möglichen Stößen aus unterschiedlichen Ausgangspositionen ausprobieren, und sehen, welche das richtige Ergebnis liefern.

Für GW170817 simulierten wir eine große Anzahl von Doppelsystemen, beginnend an unterschiedlichen Ausgangspunkten in der Galaxie: wir gaben ihnen unterschiedliche

Anstöße, und überprüfen, bei welchen die finale Verschmelzung in einer Entfernung zum Zentrum der Galaxie stattfindet, die mit der beobachteten Position des optischen Gegenstücks von GW170817 übereinstimmt. Das Binärsystem könnte unmittelbar in der Nähe dieses Ortes entstanden sein und nur einen relativ kleinen Stoß bekommen haben. Aber es gibt insgesamt weniger Sterne, die sich in diesen äußeren Teilen der Galaxie gebildet haben, als weiter entfernt vom Verschmelzungsort näher am Zentrum. Das System könnte sich also auch weiter weg gebildet haben und einen starken Stoß bekommen haben, aber wenn dieser zu stark war, wären die beiden Neutronensterne voneinander weg geflogen und es wäre nie zur Verschmelzung gekommen. Schließlich könnte das Binärsystem auch einen leichten Stoß bekommen haben, und einen langen Weg langsam zurückgelegt haben. Aber dann dürfen die beiden Neutronensterne nicht mit einem zu kleinen Abstand zueinander entstanden sein, oder sie würden schon verschmolzen sein, bevor sie an ihrer endgültigen Position ankommen konnten. Indem wir alle diese Möglichkeiten zusammenfassen, können wir die Wahrscheinlichkeiten für verschiedene Stöße und Ausgangskonfigurationen berechnen.

Unsere Simulationen ergaben eine Auswahl an Parametern, die genau passen, um unsere Beobachtungen zu erklären. Zum Zeitpunkt der zweiten Supernova hatte das Binärsystem demnach eine Umlaufbahn von etwa dem doppelten [Radius unserer Sonne](#) - das ist ziemlich nahe für Doppelsterne! Kleinere Abstände würden bedeuten, dass die beiden Sterne zu schnell verschmelzen; größere Abstände würden bedeuten, dass es zu spät oder nie dazu kommt. Außerdem war das Binärsystem zum Zeitpunkt der zweiten Supernova wahrscheinlich etwa zwei [Kiloparsec](#) (7000 Lichtjahre oder 100 Milliarden mal der Radius unserer Sonne) vom Zentrum seiner Heimatgalaxie entfernt. Näher am Zentrum werden mehr Sterne gebildet, aber es ist auch schwieriger von dort in die Außenbereiche zu entkommen, wo das Gegenstück zu sehen war. Der Stoß der zweiten Supernova muss etwa 300 Kilometer pro Sekunde betragen haben. Schnellere Stöße sind unwahrscheinlich, da sie ein Binärsystem zerreißen. Um schließlich den richtigen Stoß und die notwendige Änderung der Umlaufbahn zu geben, stammte die zweite Supernova wahrscheinlich von einem Stern, der etwa die dreifache Masse unserer Sonne hatte.

Diese Ergebnisse stammen von unserer ersten Beobachtung verschmelzender Neutronensterne. Mit weiteren Entdeckungen werden wir in der Lage sein, genauer zu erfahren, wie Neutronensterne gebildet werden, und was genau während einer Supernova-Explosion passiert.

WEITERFÜHRENDE INFORMATIONEN:

- Der vollständige Fachartikel ist [frei verfügbar](#) und wurde in der Fachzeitschrift „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?](#)
- [Vorhersage der Folgen der Neutronensternkollision, die GW170817 produzierte](#)
- [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](#)

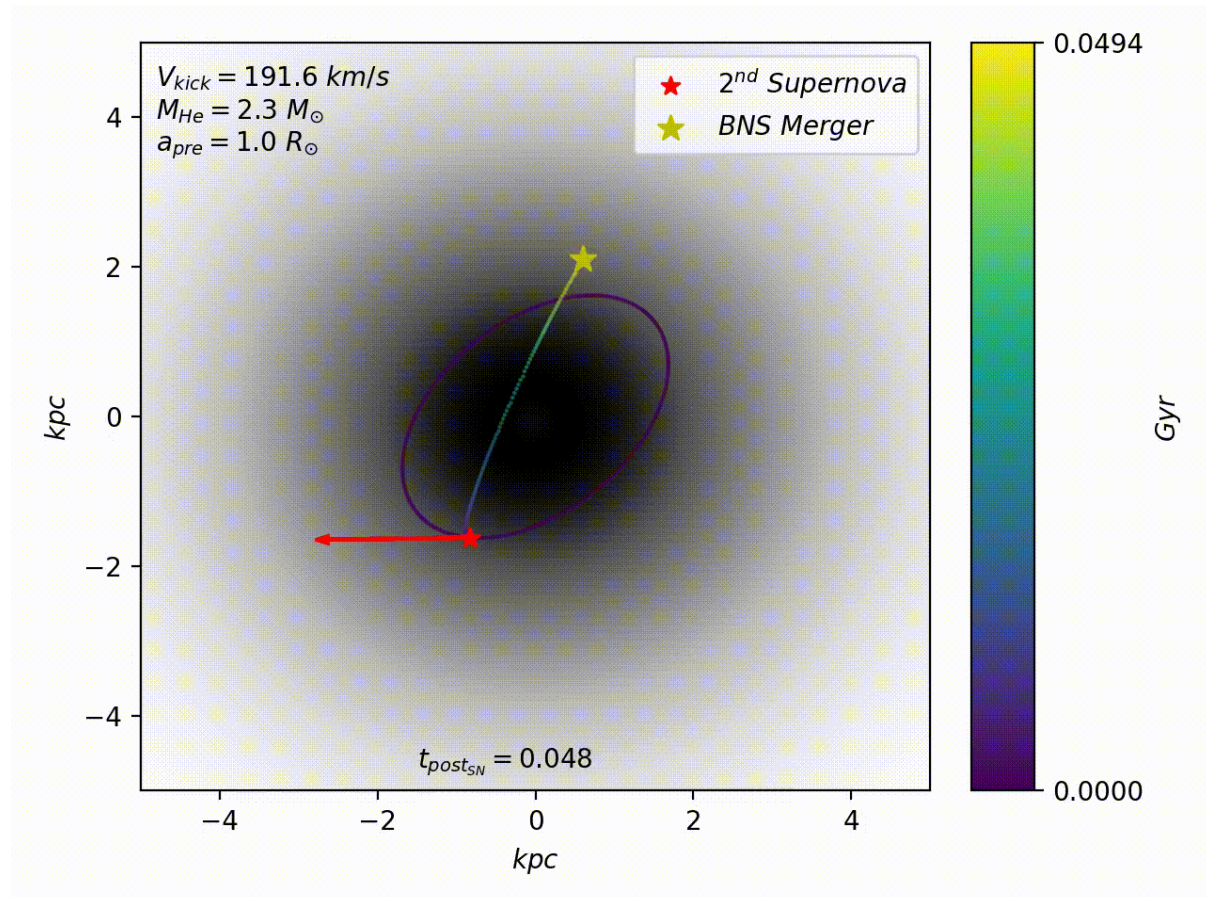
Glossar

- **Gravitationswellen:** Wellen in der Raumzeit, ein [Dehnen und Quetschen](#) , erzeugt durch die Beschleunigung massiver Objekte. Sie sind eine Vorhersage von Einsteins allgemeiner Relativitätstheorie. Wie elektromagnetische Strahlung bewegen sie sich mit [Lichtgeschwindigkeit](#). LIGO hat bereits eine größere [Anzahl von Gravitationswellen beobachtet](#), diese werden durchgehend mit GW (für Gravitationswelle) gefolgt vom Datum der Beobachtung bezeichnet. Unter „[Science Summaries](#)“ finden sich auch viele deutschsprachige Übersetzungen verständlicher Artikel zu diesen Ereignissen.
- **Elektromagnetische Wellen:** Wellen in elektrischen und magnetischen Feldern. Sie sind eine Vorhersage der Maxwellschen Theorie des Elektromagnetismus. Wie Gravitationswellen, können sie für die Astronomie verwendet werden. Die bekanntesten elektromagnetische Wellen sind ganz normales Licht. Sichtbares Licht erstreckt sich von rot bis violett, aber außerhalb dieses Regenbogens gibt es auch andere Formen von elektromagnetischen Wellen. Jenseits des roten Licht gibt es Infrarot, Mikrowellen und Radiowellen, und jenseits von Violett gibt es Ultraviolett-, Röntgen- und Gammastrahlen . Jeder Teil des [Spektrums der elektromagnetischen Strahlung](#) gibt einen anderen Einblick in einen Teil unseres Universums. LIGO und Virgo [pflanzen die gemeinsame Nutzung](#) von Entdeckungen mit Kollegen aus der „elektromagnetischen“ Astronomie, sodass wir ein umfassenderes Verständnis der Signalquellen erhalten können.
- **Neutronenstern:** Die kompakten Überreste eines kollabierten Sterns. Wir denken, dass [Neutronensterne](#) Massen haben, die etwa zwischen der unserer Sonne und der dreifachen [Masse unserer Sonne](#) liegen. Wir sind uns der Grenzen jedoch noch nicht ganz sicher, hoffen aber, diese durch das Sammeln von weiteren Gravitationswellenbeobachtungen zu erfahren. Die maximale Masse eines Neutronensterns wird durch die Eigenschaften der Materie festgelegt, aus der er besteht. Dies ist eine seltsame Form der Materie, ähnlich der Materie, welche die Atomkerne bilden, aber enorm vergrößert – Neutronensterne sind etwa so groß wie eine Stadt.
- **Supernova:** Eine heftige Explosion, oft entdeckt als ein schnell erscheinendes helles Objekt am Himmel, das dann verblasst. Eine einzelne [Supernova](#) kann den Rest ihrer Galaxie überstrahlen. Es gibt eine Vielzahl verschiedener Supernovae. Einige entstammen dem Zusammenbruch massereicher Sterne, andere der Kollision von zwei weißen Zwergen. Eine Supernova in unserer Galaxie wurde in der Antike, im Jahr [1054](#), von Astronomen beobachtet. Dies war der Zusammenbruch eines massiven Sterns: seine äußeren Schichten wurden abgesprengt um den [Krebsnebel](#) zu bilden, und sein Kern zerbrach um den Krebs-Pulsar zu bilden, einen Neutronenstern.

Abbildungen

animierte Versionen online:

<https://www.ligo.org/science/Publication-GW170817Progenitor/index.php>

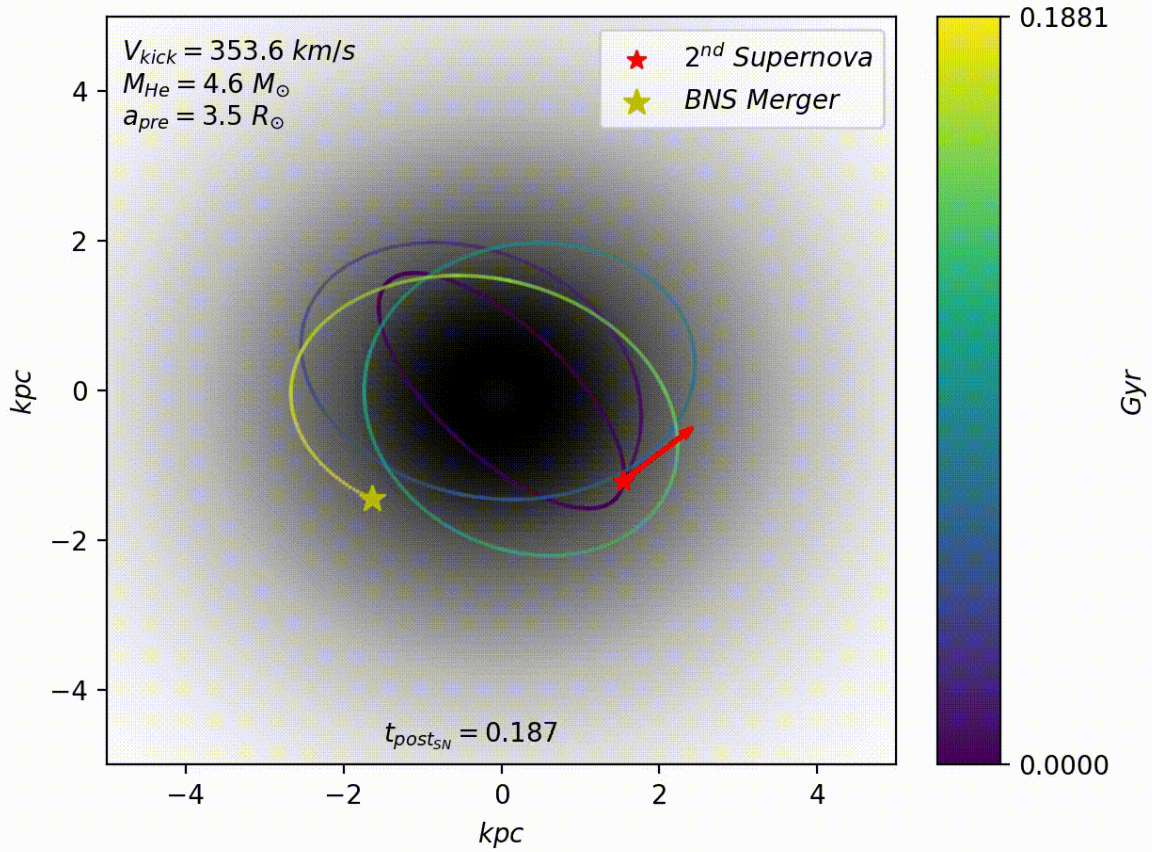
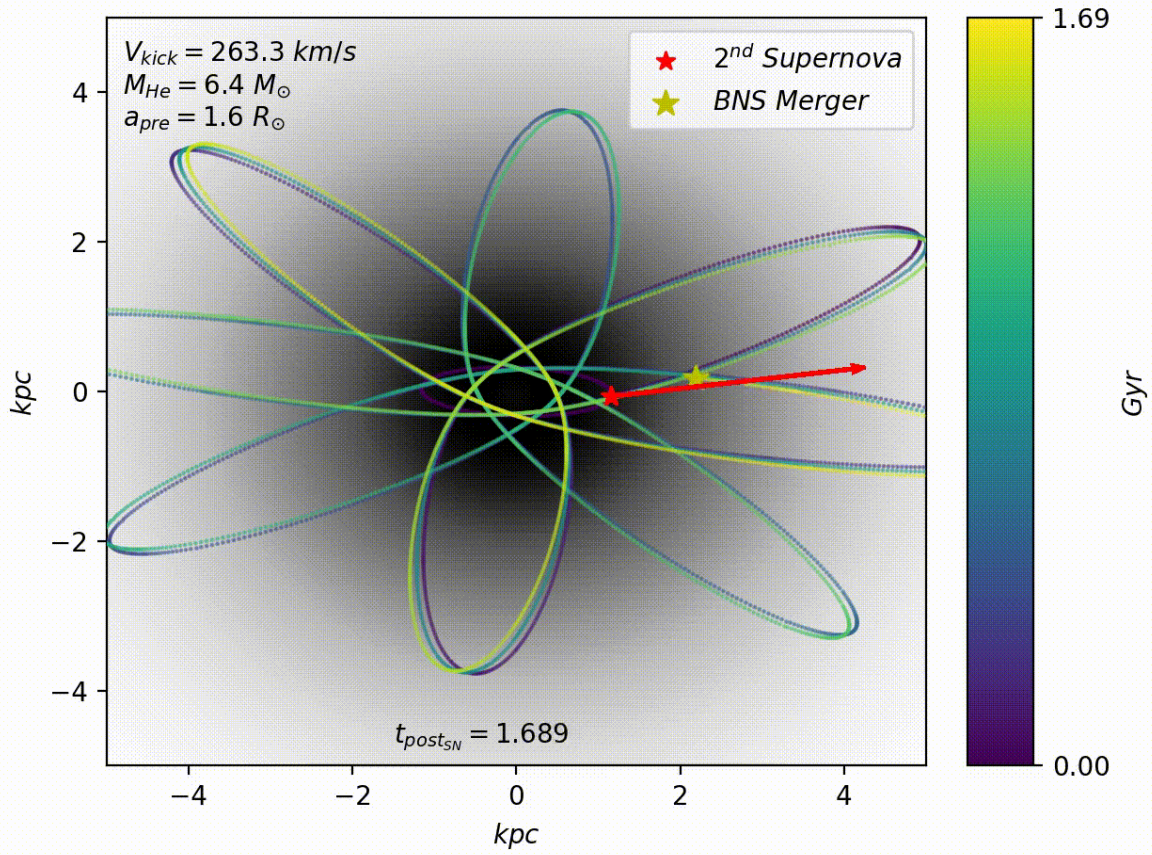


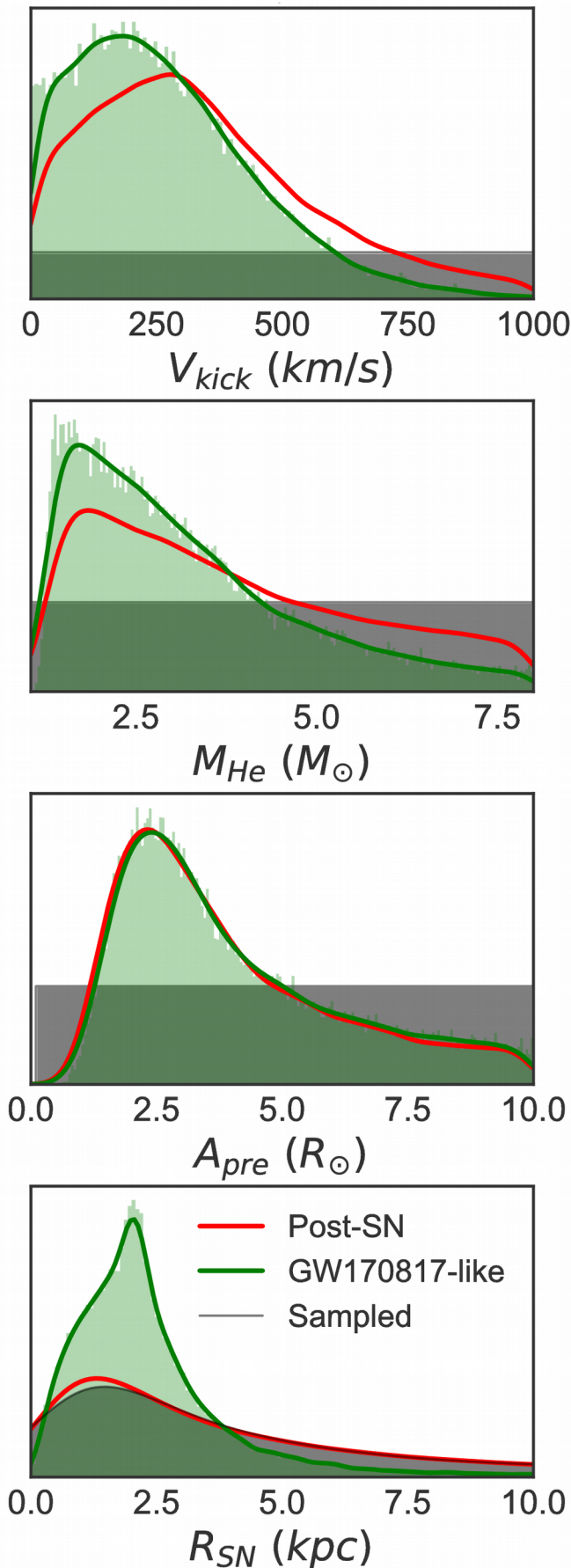
Beispiel: Bahnen von simulierten Doppelneutronensternen um eine simulierte Galaxie, die unseren Beobachtungen GW170817 entsprechen würden. Die Linie, die den Weg des Binärsystems in der Galaxie zeigt, ist farblich entsprechend der Zeit bis zur Verschmelzung markiert; auf der Farbskala ist diese in Milliarden Jahren (Gigayears, Gyr) angegeben.

Der rote Stern markiert die zweite Supernova, der Pfeil zeigt die Richtung des dabei ausgeübten Stoßes, und der gelbe Stern markiert die Verschmelzung der beiden Neutronensterne.

Einige Bahnen wie die oben gezeigte sind relativ einfach (wie gerade Stöße einer Billardkugel), andere komplizierter – siehe die weiteren Beispiele auf den folgenden Seiten. (Dies entspricht im Billardbeispiel Stößen, bei denen der Ball an mehreren Banden abprallt, bevor er die Tasche erreicht.)

Weitere Details finden sich in [Abbildung 4](#) der [Veröffentlichung](#).





Abgeleitete Eigenschaften der zweiten Supernova und des Binärsystems: die Supernova-Stoß-Geschwindigkeit (oben), die Masse des Sterns vor dem Zusammenbruch, der Orbitalabstand (Radius der Umlaufbahn) direkt vor der Supernova, und der Abstand der Binärsystems vom Zentrum der Galaxie (unten).

Die durchgezeichnete graue Linie zeigt die statistische Verteilung aller von uns simulierten Binärsysteme. (Sozuagen alle Billardbälle, die wir anstoßen.)

Die rote Linie zeigt die Verteilung aller Binärsysteme, die nach der Supernova verschmelzen. (Alle Kugeln, die in eine Tasche gehen.)

Die grüne Linie zeigt die Verteilung aller Binärsysteme, die an einer ähnlichen Stelle in der Galaxie verschmelzen, wie für GW170817 beobachtet. (Alle Kugeln, die in die rechte Tasche gehen.)

Weitere Details in [Abbildung 5](#) der [Veröffentlichung](#).