



LIGO
Scientific
Collaboration



GW190521: Die bislang massereichste Kollision Schwarzer Löcher

Was haben wir beobachtet?

Am 21. Mai 2019 beobachteten die Advanced-LIGO- und Advanced-Virgo-Detektoren ein Gravitationswellensignal von der Verschmelzung eines außergewöhnlichen Paares Schwarzer Löcher. Das Signal mit der Bezeichnung GW190521 war von kürzerer Dauer und erreichte seine Maximalamplitude bei einer niedrigeren Frequenz als alle anderen bisher beobachteten Verschmelzungen Schwarzer Löcher.

Das Zeitintervall, das das Signal einer Verschmelzung Schwarzer Löcher im Messband von Advanced Virgo und Advanced LIGO verbringt, ist umgekehrt proportional zur Gesamtmasse des Doppelsystems. Im Fall von GW190521 betrug dieses Zeitintervall nur etwa 0,1 Sekunden und war damit viel kürzer als beispielsweise bei GW150914 – der ersten jemals beobachteten Verschmelzung Schwarzer Löcher. Ebenso ist auch die Frequenz, bei der ein solches Verschmelzungssignal eines Paares Schwarzer Löcher sein Maximum erreicht, umgekehrt proportional zur Gesamtmasse des Doppelsystems. Bei GW190521 lag diese Frequenz nur bei etwa 60 Hz, was viel niedriger ist als bei GW150914, wo die Maximalfrequenz 150 Hz betrug. Es war also von Anfang an klar (siehe Abb. 1), dass LIGO und Virgo ein sehr massereiches Paar Schwarzer Löcher beobachtet hatten.

Abbildung 2 zeigt die gemessenen Massen der Schwarzen Löcher, die GW190521 erzeugten. Das größere dieser beiden Schwarzen Löcher hatte etwa die 85-fache Masse der Sonne (mit dem Symbol M_{\odot}), während das kleinere Schwarze Loch rund $66 M_{\odot}$ aufweist. Beide Objekte sind viel massereicher als jedes andere der verschmelzenden Schwarzen Löcher, die bisher von Virgo und LIGO entdeckt wurden – und selbst das kleinere Schwarze Loch ist bereits massereicher als viele der Schwarzen Löcher, die bei diesen Verschmelzungsereignissen entstanden sind (siehe Abb. 3).

Das nach der Verschmelzung verbleibende Schwarze Loch wiegt bei GW190521 etwa $142 M_{\odot}$ und steht damit mit Abstand auf Platz 1 der Liste der größten Schwarzen Löcher von LIGO und Virgo. Diese Restmasse ist etwa $8 M_{\odot}$ geringer als die Summe der Massen der beiden Schwarzen Löcher, die verschmolzen sind; diese Massendifferenz wurde in die Energie des Gravitationswellensignals umgewandelt.

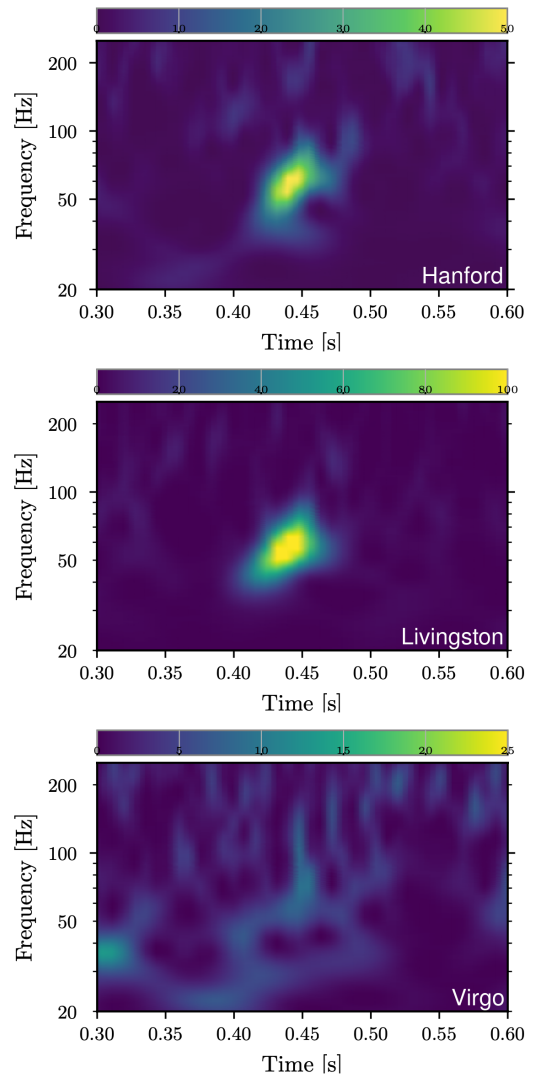


Abb. 1: Spektrogramm-Darstellungen von Daten, die das GW190521-Signal enthalten, beobachtet von LIGO Hanford (oben), LIGO Livingston (Mitte) und Virgo (unten). Die Zeiten sind relativ zu 03:02:29 UTC am 21. Mai 2019 dargestellt. Die Energie in einem bestimmten Zeit-Frequenz-Abschnitt wird anhand der Farpalette dargestellt. Beachten Sie die extrem kurze Dauer des Signals und seine Maximalfrequenz von etwa 60 Hz. (In Anlehnung an Abb. 1 der Entdeckungsveröffentlichung von GW190521)

Warum ist GW190521 so interessant?

Die außergewöhnlich hohe Massen der Schwarzen Löcher, die GW190521 erzeugten, bedeuten nicht nur Platz 1 der Liste; sie stellen unser Verständnis der Entstehung Schwarzer Löcher in Frage und bieten ein einzigartiges Laboratorium, um das fundamentale Wesen der Schwerkraft zu untersuchen.

Große Schwarze Löcher erzeugen

Astronom*innen klassifizieren Schwarze Löcher nach ihrer Masse. Dies ist deshalb sinnvoll, weil Schwarze Löcher an den verschiedenen Enden ihres Massenspektrums auf sehr unterschiedliche Weise entstehen.

In den Zentren der meisten, wenn nicht aller großen Galaxien sitzen die „extrem massereichen“ Schwarzen Löcher mit Massen von Hunderttausenden bis zu Milliarden Sonnenmassen.

Im Zentrum unserer Milchstraße sitzt ein Schwarzes Loch, dessen Masse etwa 4 Millionen Mal so groß ist wie die der Sonne. Wie genau diese gewaltigen Schwarzen Löcher entstehen, ist noch nicht vollständig geklärt. Wahrscheinlich begann ihr Entstehungsprozess jedoch, als das Universum noch sehr viel jünger war. So hatten diese Schwarzen Löcher viel Zeit, zu einer so solchen Größe heranzuwachsen.

Am anderen Ende des Massenspektrums befinden sich die Schwarzen Löcher mit „stellarer Masse“, von denen man annimmt, dass sie bei Supernova-Explosionen aus den zusammenfallenden Kernen massereicher Sterne entstehen. Schwarze Löcher mit stellarer Masse haben Massen im Bereich von einigen wenigen bis einigen Dutzend Mal der Masse der Sonne, und Paare dieser Objekte bilden die von LIGO und Virgo bisher beobachteten Verschmelzungen Schwarzer Löcher.

Zwischen Schwarzen Löchern stellarer Masse und den extrem massereichen liegt der geheimnisvolle Bereich der „mittelschweren“ Schwarzen Löcher vom 100- bis etwa 100.000-fachen der Sonnenmasse. Bis heute gibt es keine eindeutigen Beobachtungen von mittelschweren Schwarzen Löchern, aber es gibt verschiedene Szenarien dafür, wie sie entstehen könnten. Die ernstzunehmende Jagd nach diesen Schwarzen Löchern hat jedoch in letzter Zeit zugenommen, da sich die Beobachtungsfähigkeiten von Teleskopen und Gravitationswellendetektoren verbessert haben.

Auf der Grundlage des theoretischen Verständnisses der Vorgänge im Inneren massereicher Sterne und der Entstehung von Schwarzen Löchern geht man davon aus, dass kollabierende Sterne keine Schwarzen Löcher mit Massen zwischen dem 65- und 120-fachen der Sonnenmasse bilden. Damit ist GW190521 gewissermaßen ein Partygast ohne Einladung: Denn die Masse des größeren Schwarzen Lochs in dieser Verschmelzung (das „primäre“ Schwarze Loch) liegt genau in dem Bereich, in dem ein Sternkollaps nicht direkt Schwarze Löcher erzeugen dürfte. Zudem kann der Überrest der Verschmelzung als mittelschweres Schwarzes Loch klassifiziert werden.

Die LIGO-Virgo-Beobachtung von GW190521 deutet darauf hin, dass entweder Sterne schwerere Schwarze Löcher bilden *können* oder dass einige der von LIGO und Virgo beobachteten Schwarzen Löcher auf andere Weise entstehen – vielleicht als Ergebnis einer früheren Verschmelzung zwischen Paaren kleinerer Schwarzer Löcher. Dies bereitet dann den Weg zur Entstehung eines noch größeren Schwarzen Lochs, indem eine weitere Verschmelzung Schwarzer Löcher folgt. Dieses Szenario mehrfacher Verschmelzungen setzt voraus, dass sich Schwarze Löcher in besonderen Umgebungen bilden, in denen sich

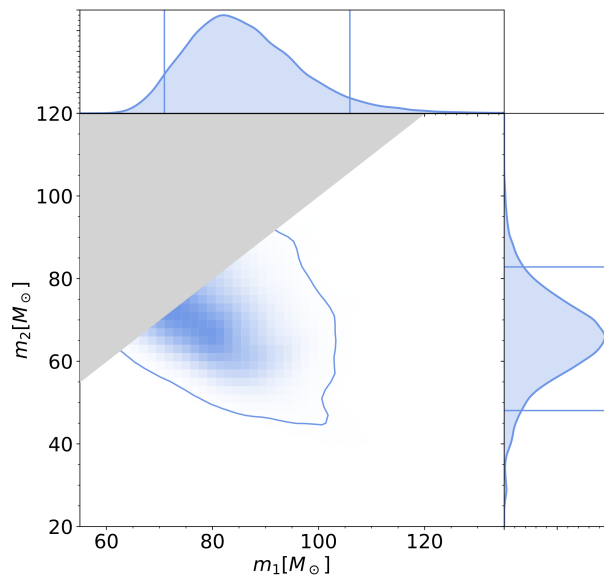


Abb. 2: Die ermittelten Massen der verschmelzenden Schwarzen Löcher, die das Gravitationswellensignal GW190521 erzeugten, sind hier als Wahrscheinlichkeitsverteilungen dargestellt. Nach der LIGO-Virgo-Analyse haben die wahren Werte der Massen der Schwarzen Löcher eine 90%-ige Wahrscheinlichkeit, sich innerhalb der blauen Konturlinie in der mittleren Darstellung zu befinden (dieser Teil zeigt die gemeinsame Wahrscheinlichkeit für beide Massen). Dasselbe gilt für die vertikalen und horizontalen Linien in den glockenförmigen Kurven oben und rechts in der Abbildung, die die Massenmessungen für die einzelnen Schwarzen Löcher zeigen. Der ausgegraute Bereich des mittleren Diagramms ist auf die LIGO-Virgo-Konvention zurückzuführen, wonach die „primäre“ Masse m_1 immer größer oder gleich der „sekundären“ Masse m_2 ist.

genügend andere Schwarze Löcher in der Nähe befinden, damit mehrere Verschmelzungen stattfinden können. Astronom*innen haben dichte Sternhaufen oder die Scheiben der aktiven Galaxienkerne als mögliche Beispiele für solche speziellen Umgebungen vorgeschlagen.

Die Beobachtung von GW190521 deutet auch darauf hin, dass der mittlere Massenbereich der Schwarzen Löcher zum Teil von Verschmelzungsüberresten Schwarzer Löcher mit stellaren Massen bevölkert sein könnte. In ähnlicher Weise können sich auf diese Weise auch extrem massereiche Schwarze Löcher bilden.

Unser Verständnis der Schwerkraft überprüfen

Unser theoretisches Verständnis davon, wie die Schwerkraft funktioniert, wird durch Einsteins Allgemeine Relativitätstheorie, kurz „ART“, gut beschrieben. Physiker*innen verwenden die ART zur Vorhersage der Gravitationswellensignale von verschmelzenden Schwarzen Löchern. Diese Vorhersagen werden wiederum verwendet, um die Virgo- und LIGO-Daten zu analysieren. Auf der anderen Seite können Beobachtungen von Gravitationswellensignalen dazu verwendet werden, die Vorhersagen der Theorie selbst zu testen und nach Abweichungen von der ART zu suchen, die auf alternative Theorien der Gravitation hindeuten könnten.

Die Verwendung von Gravitationswellen als Physiklabor ist nichts Neues: frühere LIGO-Virgo-Beobachtungen Verschmelzender Schwarzer Löcher wurden genutzt, um unser Verständnis der ART zu testen. Was ist an GW190521 also anders?

Das Gravitationswellensignal der Verschmelzung zweier Schwarzer Löcher besteht aus drei verschiedenen Abschnitten (siehe Abb. 4): erstens das „Aufeinanderzufallen“, wenn sich die beiden Schwarzen Löcher weit voneinander entfernt umkreisen; zweitens die „Verschmelzung“, wenn die beiden Schwarzen Löcher kollidieren und sich zu einem Schwarzen Loch vereinen; schließlich das „Abklingen“, wenn das verbleibende Schwarze Loch wie eine angeschlagene Glocke „klingt“, bevor es einen stabilen, endgültigen Zustand erreicht.

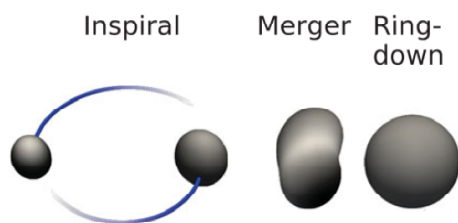


Abb. 4: Schematische Darstellung der drei verschiedenen Abschnitte des Gravitationswellensignals von der Verschmelzung zweier Schwarzer Löcher.

Wie bereits erwähnt, sind die Signale Schwarzer Löcher in den LIGO-Virgo-Daten für unterschiedlich lange Zeiträume zu beobachten, und sie erreichen je nach den Massen der beteiligten Schwarzen Löcher unterschiedliche Maximalamplituden bei unterschiedlichen Frequenzen. Infolgedessen sind die Detektoren je nach der Masse des Doppelsystems für verschiedene Abschnitte des Gravitationswellensignals empfindlich. Signale von Schwarzen Löchern mit geringerer Masse werden während ihrer Phasen des Aufeinanderzufallens und Verschmelzens deutlicher beobachtet. Andererseits bieten uns die viel höheren Massen der Schwarzen Löcher, die GW190521 erzeugt haben, die bisher beste Möglichkeit, die späte Verschmelzungs- und Abkling-Phase des Gravitationswellensignals zu untersuchen.

Wie bei allen bisher beobachteten Signalen Schwarzer Löcher bestand die ART die mittels GW190521 vorgenommenen Überprüfungen. Einer der Tests bestand darin, den Abkling-Anteil des Signals unabhängig von den ersten beiden Teilen zu untersuchen und zu prüfen, ob sie konsistent sind oder

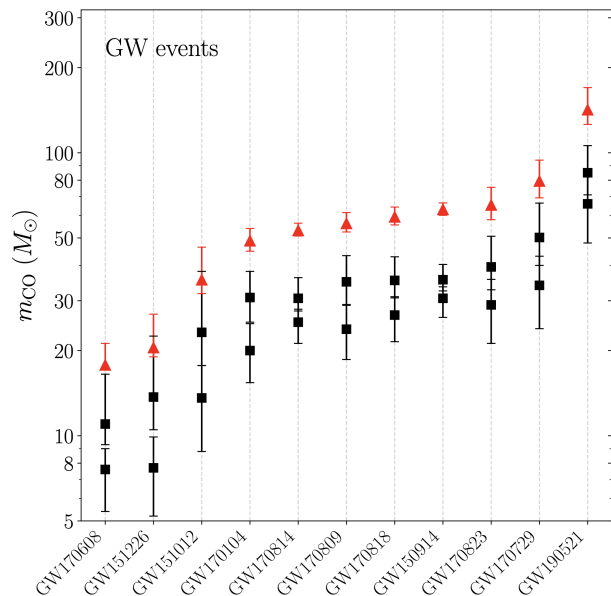


Abb. 3: Darstellung der Komponentenmassen (schwarze Quadrate) der Schwarzen Löcher von GW190521 im Vergleich zu den Massen anderer Verschmelzungen Schwarzer Löcher, die LIGO und Virgo während ihres ersten und zweiten Beobachtungslaufs entdeckten. Für jedes Ereignis ist die Masse des Verschmelzungsüberrests als rotes Dreieck dargestellt. In allen Fällen zeigt der vertikale Balken den Unsicherheitsbereich der geschätzten Masse. Die rekordbrechenden Massen von GW190521 sind anhand dieser Darstellung offensichtlich. (In Anlehnung an Abb. 10 unserer Veröffentlichung über die astrophysikalischen Implikationen von GW190521)

nicht. Es wurden auch Tests durchgeführt, um nach zusätzlichen Merkmalen im Signal zu suchen, deren Existenz von einigen alternativen Theorien der Gravitation vorhergesagt wird, und um andere Hypothesen (als die Verschmelzung zweier Schwarzer Löcher) für den Ursprung des Signals selbst zu überprüfen. Keiner dieser Tests war in der Lage, die Interpretation zu widerlegen, nach der GW190521 von der Verschmelzung von zwei Schwarzen Löchern stammt, die sich an die in der ART beschriebene Physik hält.

Zusammenfassung

GW190521 ist eine rekordbrechende Beobachtung von Gravitationswellen, die die Grenzen unseres Wissens über die Entstehung Schwarzer Löcher erweitert und eine neue Untersuchung der Gravitation in Extremumständen ermöglicht. Das Ereignis deutet auch auf die Existenz vieler solcher verschmelzender Schwarzer Löcher mit hohen Massen hin, die während zukünftiger Beobachtungskampagnen mit LIGO (inklusive LIGO India), Virgo und KAGRA in Japan entdeckt werden könnten.

Das massereiche Ende der Population Schwarzer Löcher mit stellarer Masse zu untersuchen, wird uns helfen, zum einen ein klareres Bild von den Prozessen zu erlangen, die Schwarze Löcher erzeugen, und zum anderen die Umgebungen, in denen sie sich befinden, besser zu verstehen. GW190521 kann seinen Platz als das bisher massereichste beobachtete Paar Schwarzer Löcher genießen, sollte es sich aber nicht zu bequem machen. LIGO, Virgo und KAGRA werden den Himmel mit weiter verbesserter Empfindlichkeit nach Gravitationswellen absuchen. Zudem werden zukünftige Detektoren viel leistungsfähiger sein, vor allem bei niedrigen Frequenzen, wo viel mehr schwere Schwarze Löcher versteckt sein sollten. Zu den bereits geplanten neuen Detektoren gehören das Einstein-Teleskop und der Cosmic Explorer auf der Erde und LISA im Weltraum. Rekorde sind gemacht, um gebrochen zu werden!

Weiterführende Informationen

Lesen Sie die Pressemitteilungen von LIGO und Virgo über die Entdeckung von GW190521.

Lesen Sie die frei verfügbare vollständige wissenschaftliche Veröffentlichung, die die Entdeckung von GW190521 beschreibt: <https://dcc.ligo.org/P2000020/public>

Lesen Sie die frei verfügbare vollständige wissenschaftliche Veröffentlichung, die die astrophysikalischen Implikationen von GW190521 beschreibt: <https://dcc.ligo.org/P2000021/public>

Im Gravitational-Wave Open Science Centre sind Daten für GW190521 verfügbar: https://www.gw-openscience.org/eventapi/html/O3_Discovery_Papers/GW190521/v1/.