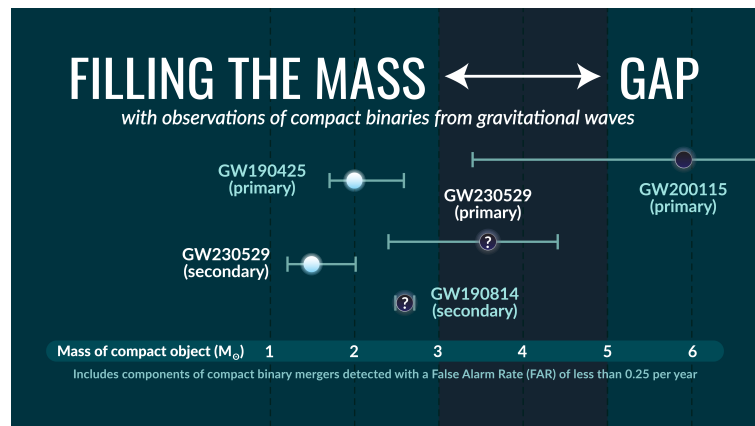


GW230529: Beobachtung der Verschmelzung eines Neutronensterns mit einem unbekanntem kompakten Objekt

Der erste direkte Nachweis von Gravitationswellen im Jahr 2015 mit GW₁₅₀₉₁₄ läutete ein neues Zeitalter der Astronomie ein. Seitdem wurden viele weitere Gravitationswellen von verschiedenen Arten von Quellen nachgewiesen. Bei allen handelte es sich um Verschmelzung von Paaren kompakter Objekte, die aus Neutronensternen und/oder Schwarzen Löchern bestehen.

Wir berichten hier über die Entdeckung von GW₂₃₀₅₂₉, einer Verschmelzung von zwei kompakten Objekten, die während des ersten Teils des vierten Beobachtungslaufs der LIGO-Virgo-KAGRA Detektoren beobachtet wurde. Eine der Komponenten hat eine Masse, die größer ist als für Neutronensterne und kleiner als für Schwarze Löcher erwartet. Ob es sich dabei um einen Neutronenstern oder ein Schwarzes Loch handelt, lässt sich nicht mit Sicherheit bestimmen.



Wie haben wir dieses Ereignis entdeckt?

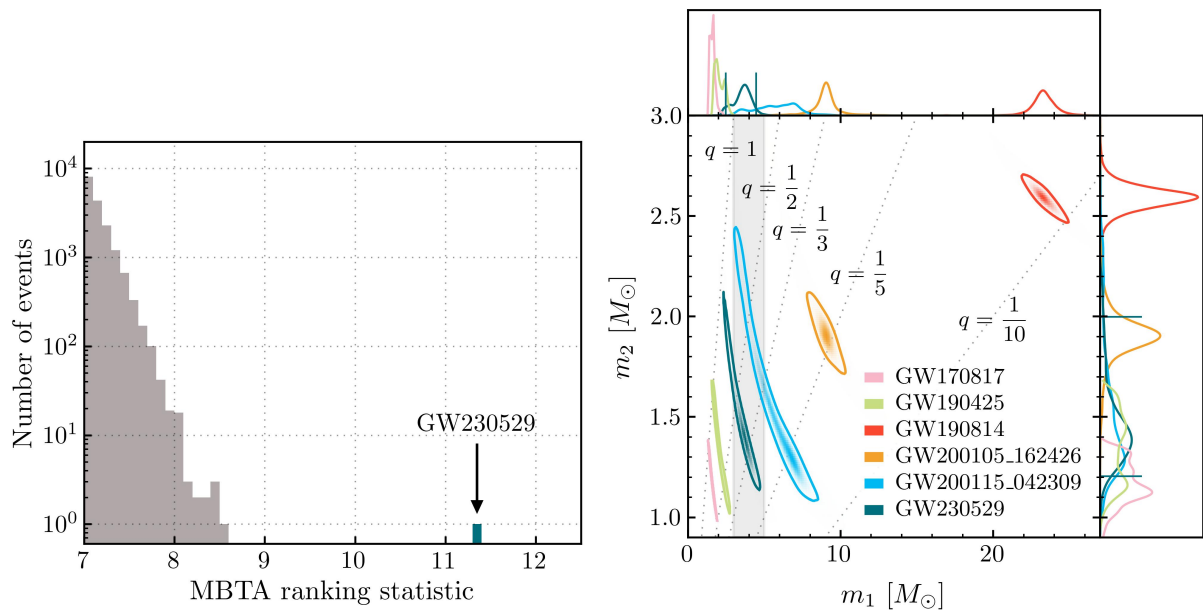
Wir analysieren die Daten jedes aktiven Detektors mit der Optimalfilter-Technik. Dabei werden die Detektordaten mit berechneten Signalen verglichen, um dasjenige zu identifizieren, das am besten mit einem echten in den Daten versteckten Signal übereinstimmt.

Abbildung 1: Die Illustration zeigt einige der Komponentenmassen von Gravitationswellenereignissen, die innerhalb oder um den Bereich von 3 bis 5 Sonnenmassen liegen, der auch als „untere Massenlücke“ bezeichnet wird. Die hellblauen Kreise stellen Neutronensterne dar und die schwarzen Kreise Schwarze Löcher. Die schwarzen Kreise mit Fragezeichen stellen Quellen dar, bei denen es sich wahrscheinlich um ein schwarzes Loch handelt, möglicherweise aber auch um einen Neutronenstern. Die Hauptmasse von GW₂₃₀₅₂₉ liegt in dieser Massenlücke. (Grafik: S. Galaudage, Observatoire de la Côte d’Azur.)

Das Ergebnis ist eine Schätzung der Signalstärke als Funktion der Zeit oder eine Zeitreihe des Signal-Rausch-Verhältnisses. Wenn in den Detektordaten tatsächlich ein astrophysikalisches Signal ist, ist das Signal-Rausch-Verhältnis hoch, andernfalls ist es niedrig. Diese Methode hat sich als effizient erwiesen um schwache Gravitationswellensignale in den Daten der Detektoren zu identifizieren, aber sie ist nicht narrensicher. Verschiedene Rauschquellen können unsere Messungen stören oder sogar Gravitationswellensignale vortäuschen.

Wie können wir also sicher sein, dass GW230529 ein echtes Ereignis ist?

Die meiste Zeit suchen wir nach Signalen, deren zeitliches Auftreten und deren Eigenschaften in den Daten unserer verschiedenen Detektoren übereinstimmen. Aber wir sind nicht darauf beschränkt, nach solchen koinzidenten Ereignissen zu suchen. Wir haben unsere Analysetechnik so verfeinert, dass ein einziger Detektor ausreicht, um eine Entdeckung statistisch signifikant dingfest zu machen. Und das ist auch gut so, denn so konnte das außergewöhnliche Ereignis GW₂₃₀₅₂₉ entdeckt werden, bei dem die einzigen verwertbaren Daten von LIGO-Livingston stammten. Drei unabhängige Suchpipelines (oder Suchalgorithmen) haben GW₂₃₀₅₂₉ entdeckt. Sie alle verwenden die Optimalfilter-Technik, implementieren sie aber unterschiedlich und alle haben leistungsfähige Werkzeuge entwickelt, um astrophysikalische Ereignisse von durch Rauschen verursachten Ereignissen zu unterscheiden. Weil



(a) Verteilung der Nachweisstatistik (horizontale Achse) einer der Suchpipelines (namens MBTA), die während der ersten zwei Wochen des vierten Beobachtungslaufs Ereignisse in Daten von LIGO Livingston aufgespürt hat. Die Nachweisstatistik wird verwendet, um potenzielle Entdeckungen einer Suchpipeline zu beurteilen. Sie beinhaltet auch verschiedene Tests zur Unterscheidung von zufälligem Rauschen. Die Nachweisstatistik wird aus dem Signal-Rausch-Verhältnis berechnet; je größer die Nachweisstatistik, desto lauter ist das Ereignis und desto mehr stimmt es mit einem astrophysikalischen Signal überein. Die graue Verteilung bezieht sich auf Ereignisse, die nicht signifikant genug waren, um als astrophysikalisch eingestuft zu werden. Die grauen Balken zeigen die Verteilung von Ereignissen, die nicht signifikant genug waren, um sie als astrophysikalischen Ursprungs zu klassifizieren. Der blaue Balken stammt vom Ereignis GW230529. Der Wert der Nachweisstatistik von GW230529 (11,4) ist viel größer als der aller übrigen Ereignisse. Es wurde kein weiteres Ereignis mit einem Wert von mehr als 8,5 entdeckt.

(b) Wahrscheinlichkeitsverteilung für die Gesamtmasse verschiedener Doppelsysteme. Der wahrscheinlichste Wert für die Massen wird durch das Maximum in den Wahrscheinlichkeitsverteilungsfunktionen angezeigt. Das obere Diagramm ist die Projektion auf den Parameter m_1 (die Masse des jeweils schwereren Objekts) und das rechte Diagramm die Projektion auf den Parameter m_2 (die Masse des jeweils leichteren Objekts). Gestrichelte Linien zeigen konstanten Massenverhältnisses $q = m_2/m_1$. GW170817 (rosa) und GW190425_081805 (grün) waren konsistent mit Doppelneutronensternen. GW200105_162426 und GW200115_042309 (orange bzw. blau) waren konsistent mit Neutronenstern-Schwarzes-Loch-Systemen. Bei GW190814 (rot) könnte das leichtere Objekt entweder ein Schwarzes Loch oder ein Neutronenstern sein. Die Massenlücke zwischen 3 und 5 M_\odot ist als schattierter grauer Bereich dargestellt. GW230529 (hellgrün) liegt genau zwischen den beiden Doppelneutronensternsystemen und den beiden Neutronenstern-Schwarzes-Loch-Systemen, mit der Masse m_1 im Bereich der Massenlücke.

Abbildung 2

diese Suchpipelines ausgereift sind, können wir ihre Ergebnisse zuverlässig gegenseitig überprüfen. Es ist daher äußerst unwahrscheinlich, dass ein Ereignis wie GW230529 durch zufälliges Rauschen verursacht wird. Das Ereignis wurde während einer Echtzeitanalyse der Detektordaten entdeckt und die Entdeckung wurde am Ende des Beobachtungszeitraums verifiziert. Für das Ereignis berechneten wir eine Fehlalarmrate von weniger als einem Ereignis pro tausend Jahre. Das bedeutet, dass wir bei Abwesenheit von Verschmelzungssignalen in den Detektordaten erwarten, dass ein Signal wie GW230529 weniger als einmal in tausend Jahren auftritt. Abbildung 2a zeigt, wie sich dieses Ereignis von den anderen Kandidaten unterscheidet.

Was macht dieses Ereignis so interessant?

Physiker*innen haben seit mehreren Jahren die Existenz einer „unteren Massenlücke“ in der Massenverteilung kompakter Objekte vorgeschlagen, zwischen 3 M_\odot und 5 M_\odot (M_\odot steht für „Sonnenmasse“), wo nur wenige kompakte Objekte zu erwarten sind. Jüngste Beobachtungen von Doppelsystemen im elektromagnetischen Spektrum oder mit Gravitationswellen haben jedoch Systeme mit Komponenten, die potenziell in der Massenlücke liegen, entdeckt. So wurde beispielsweise die Masse des leichteren Objekts in GW190814 mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit auf 2,50 M_\odot bis 2,67 M_\odot geschätzt. Das ist

mehr als der schwerste Neutronenstern, der zum Zeitpunkt der Entdeckung bekannt war, aber weniger als die erwartete Masse Schwarzer Löcher.

Mit einer geschätzten Masse der schwereren Komponente von etwa $3,6 M_{\odot}$ ist GW230529 der erste Kandidat für ein Doppelsystem mit einer Komponente in der Masselücke, wie in Abbildung 2b gezeigt. Angesichts unseres derzeitigen Verständnisses der Populationen von Neutronensternen und Schwarzen Löchern stimmt diese Masse mit einer Wahrscheinlichkeit von 99 % mit einem Schwarzen Loch mit einer Masse von weniger als $5 M_{\odot}$ überein. Die Wahrscheinlichkeit, dass es sich um einen Neutronenstern handelt, wurde ebenfalls unter Berücksichtigung unserer aktuellen Erkenntnisse der theoretischen und experimentellen Kernphysik sowie der Populationen astrophysikalischer Quellen ermittelt. Die Wahrscheinlichkeit, dass es sich um einen Neutronenstern handelt, ist gering, aber nicht gleich Null. Unter bestimmten Annahmen kann sie sogar ein paar Prozent erreichen, so dass wir dieses Szenario nicht mit Sicherheit ausschließen können. Andererseits ist die leichtere Komponente von GW230529, deren Masse mit einer Wahrscheinlichkeit von 90 % zwischen $1,2 M_{\odot}$ und $2,0 M_{\odot}$ liegt, mit ziemlicher Sicherheit ein Neutronenstern.

Was lernen wir daraus?

Verschmelzungen von Neutronensternen mit Schwarzen Löchern sind seltene Ereignisse. Daher ist jede zusätzliche Entdeckung äußerst wertvoll für die Untersuchung ihrer Verschmelzungsraten sowie für die Charakterisierung der Populationen von Schwarzen Löchern und Neutronensternen. Das ist eines der Ziele der Gravitationswellenastronomie.

Dafür müssen wir die Verteilung der Verschmelzungen in Abhängigkeit von ihrer Masse ableiten, die minimale und maximale Masse für Schwarze Löcher und Neutronensterne bestimmen und die Häufigkeit rotierender kompakter Objekte bei verschiedenen Massen untersuchen. Wenn man dafür GW230529 allein verwendet, beträgt die abgeleitete Verschmelzungsrate für ähnliche Ereignisse etwa 39 Ereignisse pro Jahr in einem Volumen von etwa $3,5 \cdot 10^{28}$ Kubiklichtjahre. Eine Analyse, die andere mögliche Verschmelzungsereignisse von Neutronensternen mit Schwarzen Löchern einschließt, die während des dritten Beobachtungslaufs entdeckt wurden, ergibt etwa 61 Ereignisse pro Jahr in einem Volumen von etwa $3,5 \cdot 10^{28}$ Kubiklichtjahre pro Jahr. Eine weitere Analyse, die zusätzliche, statistisch weniger signifikante Kandidatenereignisse einbezieht, ergibt eine Verschmelzungsrate von etwa 95 Ereignissen pro Jahr in einem Volumen von etwa $3,5 \cdot 10^{28}$ Kubiklichtjahren. Aus diesen Untersuchungen geht hervor, dass die abgeleitete Verschmelzungsrate für Doppelsysteme, die GW230529 ähneln, mit der Verschmelzungsrate vergleichbar ist, die während des dritten Beobachtungslaufs für andere Ereignisse abgeleitet wurde, deren schwerere Komponente zweifellos ein Schwarzes Loch war. Dies bestätigt die Hypothese, dass die schwerere Masse des Doppelsystems ein Schwarzes Loch war. Die Wahrschein-

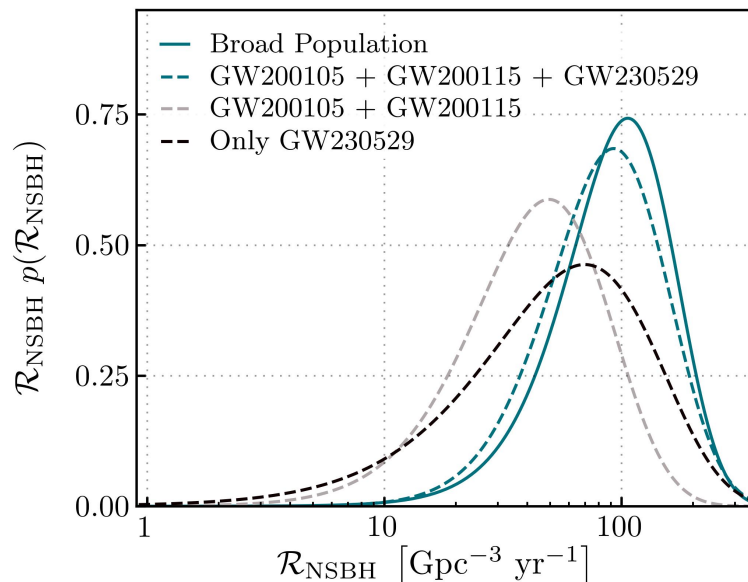


Abbildung 3: Wahrscheinlichkeitsverteilung der Verschmelzungsraten von Doppelsystemen aus einem Neutronenstern und einem Schwarzen Loch. Die Wahrscheinlichkeitsverteilungsfunktionen erreichen ihr Maximum bei dem wahrscheinlichsten Wert der Verschmelzungsrate (auf der horizontalen Achse). Die gestrichelten Linien wurden unter Verwendung der in der Bildunterschrift angegebenen Populationsmodelle abgeleitet, die nur von bestimmten Doppelsystemen aus einem Neutronenstern und einem Schwarzen Loch ausgehen. Die durchgezogene Linie, die mit „breite Population“ (broad population) bezeichnet ist, wurde unter Verwendung eines Populationsmodells abgeleitet, das zusätzliche, weniger bedeutende Ereignisse einschließt, wie im Text erläutert. Wir sehen, dass die Maxima für die verschiedenen Verteilungen relativ nahe beieinander liegen. Das heißt, dass sich alle Populationen bis zu einem gewissen Grad überschneiden. Insbesondere das Maximum, das für GW230529 allein gefunden wurde, ist vergleichbar mit dem Spitzenwert, der bei Einbeziehung anderer Verschmelzungen von Doppelsystemen aus einem Neutronenstern und einem Schwarzen Loch gefunden wurde.

Die Wahrscheinlichkeitsverteilungsfunktionen erreichen ihr Maximum bei dem wahrscheinlichsten Wert der Verschmelzungsrate (auf der horizontalen Achse).

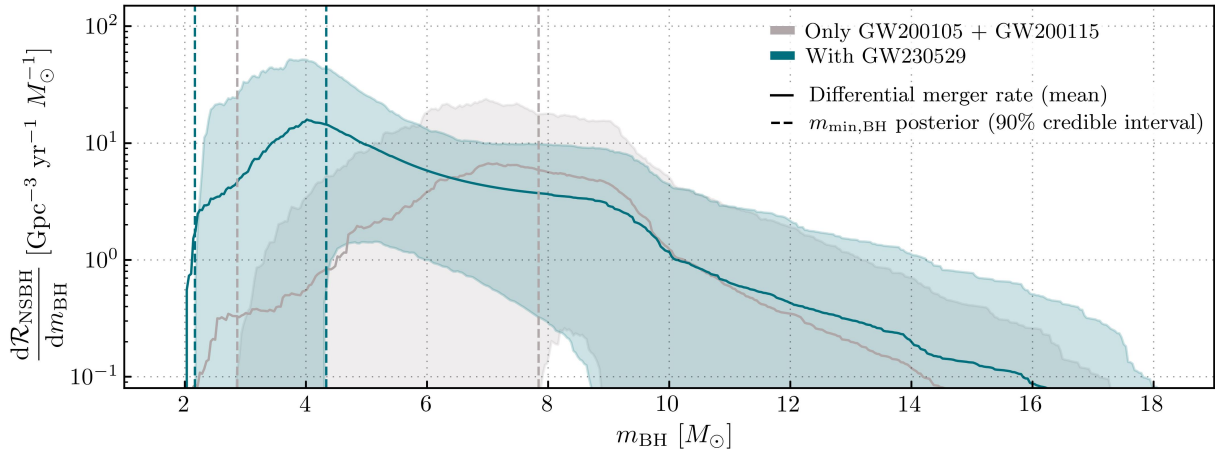


Abbildung 4: Verschmelzungsrates von Doppelsystemen aus einem Neutronenstern und einem Schwarzen Loch (vertikale Achse) in Abhängigkeit von der Masse des Schwarzen Lochs (horizontale Achse) im System. Die durchgezogenen Kurven zeigen die Verschmelzungsrates für zwei verschiedene Modelle und die schattierten Bereiche zeigen die Unsicherheiten dieser Modelle. Die gestrichelten vertikalen Linien zeigen den erwarteten Bereich für die minimale Masse eines Schwarzen Lochs mit einer Wahrscheinlichkeit von 90%. Die graue Farbe zeigt ein reines Populationsmodell für Doppelsysteme aus einem Neutronenstern und einem Schwarzen Loch ohne GW230529. Die blaue Farbe schließt auch GW230529 in das Populationsmodell ein. Wir sehen, dass die Berücksichtigung von GW230529 die Häufigkeit von Doppelsystemen mit Schwarzen Löchern geringer Masse erhöht und die minimale Masse für Schwarze Löcher zu niedrigeren Werten verschiebt.

lichkeitsverteilung für diese Verschmelzungsrates ist in Abbildung 3 dargestellt.

Da die schwerere Masse höchstwahrscheinlich in der Massenlücke liegt, ist GW230529 ein erstklassiger Kandidat für die Verfeinerung von Populationsmodellen. Es werden drei Populationsmodelle betrachtet, um zu untersuchen, wie sie von GW230529 beeinflusst werden. Die ersten beiden Modelle umfassen alle Arten von Doppelsystemen kompakter Objekte (Doppelneutronensterne, zwei Schwarze Löcher, gemischte Systeme), während das dritte Modell nur die Population gemischter Systeme beschreibt. Die Einbeziehung von GW230529 in die ersten beiden Modelle ändert das Ergebnis nicht wesentlich, was bedeutet, dass GW230529 kein Ausreißer ist. Das dritte Modell verändert sich jedoch deutlich, wie in Abbildung 4 zu sehen ist. Die Häufigkeit von Schwarzen Löchern mit geringer Masse wird erhöht und die Mindestmasse Schwarzer Löcher wird zu niedrigeren Werten verschoben. Wir finden für diese minimale Masse etwa $3,36 M_{\odot}$, wenn wir GW230529 einbeziehen, im Vergleich zu dem früheren Wert von etwa $6,04 M_{\odot}$.

Der Entstehungsprozess, der zu GW230529 führte, ist unklar. Das derzeitige Wissen über Supernovae in massereichen Sternen spricht aufgrund der geringen Masse des schwereren Objekts im Doppelsystem gegen ein solches Szenario für deren Ursprung. Ein plausibleres Szenario ist eine Entstehung durch zurückfallendes Sternenmaterial, wobei sich nach der Supernova durch Akkretion von Restmaterie auf den Sternkern ein Schwarzes Loch bildet. Jüngste Ergebnisse aus numerischen Modellen haben gezeigt, dass die Bildung von Schwarzen Löchern mit $3\text{--}6 M_{\odot}$ durch diesen Entstehungsmechanismus möglich ist. Simulationen des Kernkollapses für Heliumsterne haben Massen Schwarzer Löcher so niedrig wie die maximale Neutronensternmasse vorhergesagt, auch wenn dabei der Massenbereich unter $5 M_{\odot}$ weniger bevölkert ist. Kernkollapsmodelle können bis heute das Ergebnis des Prozesses nur mit großen Unsicherheiten bestimmen, so dass es schwierig ist, die Grenzen für die Massen kompakter Objekte genau zu bestimmen. GW230529 ist ein wertvoller Datenpunkt, um diese Modelle einzuschränken.

Ein weiteres mögliches Szenario für die Entstehung des schwereren Objekts ist die Verschmelzung zweier Neutronensterne. In diesem Fall können wir uns vorstellen, dass die leichtere Masse Teil eines ehemaligen Dreifach- oder Vierfachsystems war, oder dass sie von der schwereren Masse eingefangen wurde, während sie sich in einem jungen Sternhaufen oder einem aktiven Galaxienkern entwickelte.

Wir können auch einen nicht-stellaren Ursprung, wie z.B. primordiale Schwarze Löcher, nicht ausschließen.

Die weitere Untersuchung von Systemen mit Komponenten in der Massenlücke wie GW230529 wird es uns ermöglichen, unser Verständnis der Populationen von Schwarzen Löchern und Neutronensternen zu verfeinern. Damit wird es auch möglich, ihre Entstehungsmechanismen und bei Neutronensternen

zusätzlich ihre innere Struktur besser zu verstehen.

Glossar

Fehlalarmrate: Die Fehlalarmrate wird verwendet, um zu quantifizieren, wie wahrscheinlich es ist, dass ein Ereignis durch Rauschen verursacht wurde. Sie wird berechnet, indem Ereignisse, die durch Rauschen verursacht wurden, simuliert werden und ihre Signalstärke betrachtet wird, um eine Verteilung der erwarteten Rate solcher Ereignisse als Funktion der Signalstärke abzuleiten. Diese Rate ist in der Regel die Fehlalarmrate. Konkret: Wenn ein Ereignis eine Fehlalarmrate von 1 pro Tag hat, bedeutet dies, dass wir erwarten, dass das Rauschen unseres Detektors etwa einmal pro Tag ein solches Ereignis erzeugt. Wir hätten also wenig Vertrauen in den astrophysikalischen Ursprung eines solchen Ereignisses.

LIGO, Virgo und KAGRA: jeweils in den USA, Italien und Japan gelegen, sind sie die Instrumente, die es uns ermöglichen, Gravitationswellen zu beobachten. Das Grundkonzept der LIGO-, Virgo- und KAGRA-Detektoren besteht aus zwei kilometerlangen Armen mit Spiegeln an ihren Enden, die ein „L“ bilden und in denen Laserlicht hin- und herläuft. Wir verwenden den Laser, um die Längenunterschiede zwischen den Armen zu messen. Wenn die Gravitationswellen die Erde erreichen, verursachen sie eine relative Längenänderung in den Armen der Detektoren. Der Längenunterschied zwischen den Armen der einzelnen Detektoren wird kontinuierlich überwacht und stellt die Daten dar, mit denen wir nach Gravitationswellen suchen.

Kernkollaps-Supernova: In einem Stern gleicht der Gasdruck ständig die Anziehungskraft des Kerns aus. Wenn er sich dem Ende seines Lebens nähert, fällt der Druck ab und der Stern kann der Anziehungskraft nicht mehr standhalten. Er erleidet einen extrem schnellen Gravitationskollaps in Richtung seines Kerns, der mehrere mögliche Folgen hat. Der plötzliche Kollaps kann einen extrem hohen Druck im Stern erzeugen, der ihn in einer Supernova explodieren lässt, daher der Name „Kernkollaps-Supernova“. Die Supernova kann einen Neutronenstern oder ein Schwarzes Loch im Falle eines Materie-Rückfalls zurücklassen. Wenn der Stern zu massereich war, kollabiert er direkt zu einem Schwarzen Loch und überspringt den Schritt der Supernova.

Lichtjahr: Entfernungseinheit. 1 Lichtjahr ist die Entfernung, die das Licht in einem Jahr zurücklegt, berechnet auf der Grundlage der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum.

Materie-Rückfall: Im Szenario einer Supernova mit Kernkollaps und der Bildung eines Neutronensterns kann Restmaterie in Richtung des Neutronensterns „zurückfallen“. Diese Akkretion von Materie kann die Masse des Neutronensterns über dessen maximal mögliche Masse treiben und zur Bildung eines Schwarzen Lochs führen.

M_{\odot} oder Sonnenmasse: Masse der Sonne, die in der Astronomie als Standardmasseneinheit verwendet wird. Sie entspricht ungefähr $2 \cdot 10^{30}$ kg.

Neutronenstern: Extrem dichtes kompaktes Objekt, das fast ausschließlich aus Neutronen mit einer kleinen Beimischung von Protonen und Elektronen besteht, da Atome dem Druck nicht standhalten können. Neutronensterne entstehen durch den Kollaps massereicher Sterne in einem Prozess, der als Kernkollaps-Supernova bezeichnet wird. Die für Neutronensterne erwartete maximale Masse beträgt etwa $3 M_{\odot}$.

Offline-Suche: Offline-Analysen sind Suchvorgänge, die mit Daten aus einem vorangegangenen Beobachtungszeitraum durchgeführt werden, typischerweise in den Unterbrechungen, in denen die Detektoren wegen Wartungsarbeiten und Upgrades nicht in Betrieb sind. Sie ergänzen die Echtzeitanalysen (auch Online-Analysen genannt), die während der Beobachtungszeiträume laufen.

Optimalfilter: Die Methode, die wir zur Analyse der Detektordaten verwenden. Dabei werden die Daten unserer Detektoren jederzeit mit theoretisch vorhergesagten Signalen zu verglichen, die von den Eigenschaften des Doppelsystems abhängen. Wenn echte Gravitationswellen die Erde durchlaufen, sollten wir eine gute Übereinstimmung zwischen vorhergesagtem Signal und Beobachtung haben. Mit der Optimalfilter-Technik berechnen wir jederzeit die Korrelation zwischen den Daten unserer Detektoren und den simulierten theoretischen Signalen.

Populationsmodell: ein theoretisches Modell, das die Häufigkeit von kompakten Objekten eines bestimmten Typs als Funktion einer beliebigen Kombination von Eigenschaften des Doppelsystems angibt.

Primordiales Schwarzes Loch: hypothetische Schwarze Löcher, die sich im frühen Universum, kurz nach dem Urknall, gebildet haben könnten. Die vorhergesagten Massen reichen von etwa $10^{-18} M_{\odot}$ bis $10^{36} M_{\odot}$.

Schwarzes Loch: Kompaktes Objekt, das so dicht ist, dass die Geschwindigkeit, die nötig ist, um seiner Anziehungskraft zu entkommen, höher als die Lichtgeschwindigkeit ist. Dadurch erscheint es als ein dunkler Raumbereich, da uns aus dieser Region kein Licht erreichen kann.

Suchpipeline: Suchpipelines sind Rechenprogramme, die aus einer Kette von mehreren Prozessen bestehen. Sie bereiten die Daten für die Analyse vor, filtern sie und berechnen dann verschiedene Größen, um so viele Rauschereignisse wie möglich auszuschließen und die Signifikanz von Kandidaten für astrophysikalischen Ereignisse abzuschätzen. Einige laufen in Echtzeit, einige laufen offline und einige tun beides. Weitere Informationen finden Sie im „IGWN public alerts user guide“.

Untere Massenlücke: ein Massenbereich, in dem wir keine oder nur wenige kompakte Objekte erwarten. Dieser Bereich reicht ungefähr von $3 M_{\odot}$ für die maximale Masse eines Neutronensterns bis $5 M_{\odot}$ für die minimale Masse eines Schwarzen Lochs.

Verschmelzung kompakter Objekte: Bezeichnet den Prozess, in dem entweder zwei Schwarze Löcher, zwei Neutronensterne oder ein Schwarzes Loch und ein Neutronenstern einander umrunden und schließlich miteinander verschmelzen. Der gesamte Prozess erzeugt Gravitationswellen, die in Frequenz und Amplitude zunehmen, wenn sich die beiden Objekte einander nähern und beschleunigen. Das bei der Verschmelzung entstehende Objekt kann (je nach Ausgangssystem) entweder ein Neutronenstern oder ein Schwarzes Loch sein. Die Objekte, die das Doppelsystem bilden, werden als seine Komponenten bezeichnet, wobei die primäre Komponente diejenige mit der größten Masse ist.

Weiterführende Informationen

Alle aktuellen News auf unseren Websites:

www.ligo.org

www.virgo-gw.eu

gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/

Der vollständige wissenschaftliche Artikel: <https://dcc.ligo.org/P2300352/public>