

GW170817 im Überblick

12 Fragen – 12 Antworten

Astronomen haben die Verschmelzung von Neutronensternen gemessen.

Was bedeutet dies? Wir fassen das Wichtigste in Fragen und Antworten zusammen.

Von Uwe Reichert

Was bedeuten die Kürzel GW170817 und GRB 170817A, die im Zusammenhang mit der Entdeckung genannt werden?

Die Buchstaben bezeichnen die Art eines gemessenen Signals: GW steht für Gravitationswelle (englisch: gravitational wave), GRB für einen Gammastrahlenausbruch (englisch: gamma-ray burst). Die Ziffernfolge gibt das Datum der Messung an (Jahr, Monat, Tag). Der Zusatz A bezeichnet das erste derartige Ereignis an diesem Tag. GRB 170817A ist also der erste Gammablitz, der am 17. August 2017 gemessen wurde.

Was sind Gravitationswellen?

Gravitationswellen sind eine wichtige Vorhersage von Albert Einsteins allgemeiner Relativitätstheorie. Immer dann, wenn Massen beschleunigt werden, verursachen sie Krümmungen der vierdimensionalen Raumzeit, die sich mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten. In gewisser Weise ähneln sie damit elektromagnetischen Wellen, die entstehen, wenn elektrische Ladungen beschleunigt werden. Da aber die Schwerkraft um viele Größenordnungen schwächer ist als die elektromagnetische Kraft, sind Gravitationswellen erheblich schwieriger nachzuweisen als Lichtwellen.

Wenn Gravitationswellen so schwach sind, wie können wir sie nachweisen?

Die Detektoren brauchen eine außergewöhnliche Empfindlichkeit. Es sind spezielle Laserinterferometer mit kilome-

terlangen Messarmen, die rechtwinklig zueinander stehen. Durch Messung der Laufzeitunterschiede der Laserstrahlen in den Armen werden die winzigen Längenänderungen gemessen, die beim Durchlaufen einer Gravitationswelle entstehen.

Welche Genauigkeit ist dazu notwendig?

Gravitationswellendetektoren sind die empfindlichsten Messgeräte, die es gibt. Das gesuchte Signal ist viel schwächer als sämtliche Störquellen, die deshalb trickreich eliminiert werden müssen. Nur auf diese Weise ist es möglich, die erforderliche Genauigkeit von etwa 10^{-21} zu erreichen. Um ein Beispiel zu geben, wie außerordentlich diese Anforderung ist: Würden wir die Entfernung von Alpha Centauri, des nächsten Sterns jenseits unserer Sonne, mit dieser extremen Genauigkeit messen wollen, müssten wir diese Distanz auf die Breite eines menschlichen Haares genau bestimmen.

Welche Quellen senden überhaupt Gravitationswellen aus?

Im Prinzip erzeugen alle beschleunigten Massen Gravitationswellen. Aber nur die energiereichsten Quellen im Universum haben eine Chance, messbare Wellen in der Raumzeit auszulösen: Supernovae, enge Doppelsysteme aus Neutronensternen oder Schwarzen Löchern sowie Verschmelzungen solcher kompakter und massereicher Himmelskörper.

Was sind Neutronensterne?

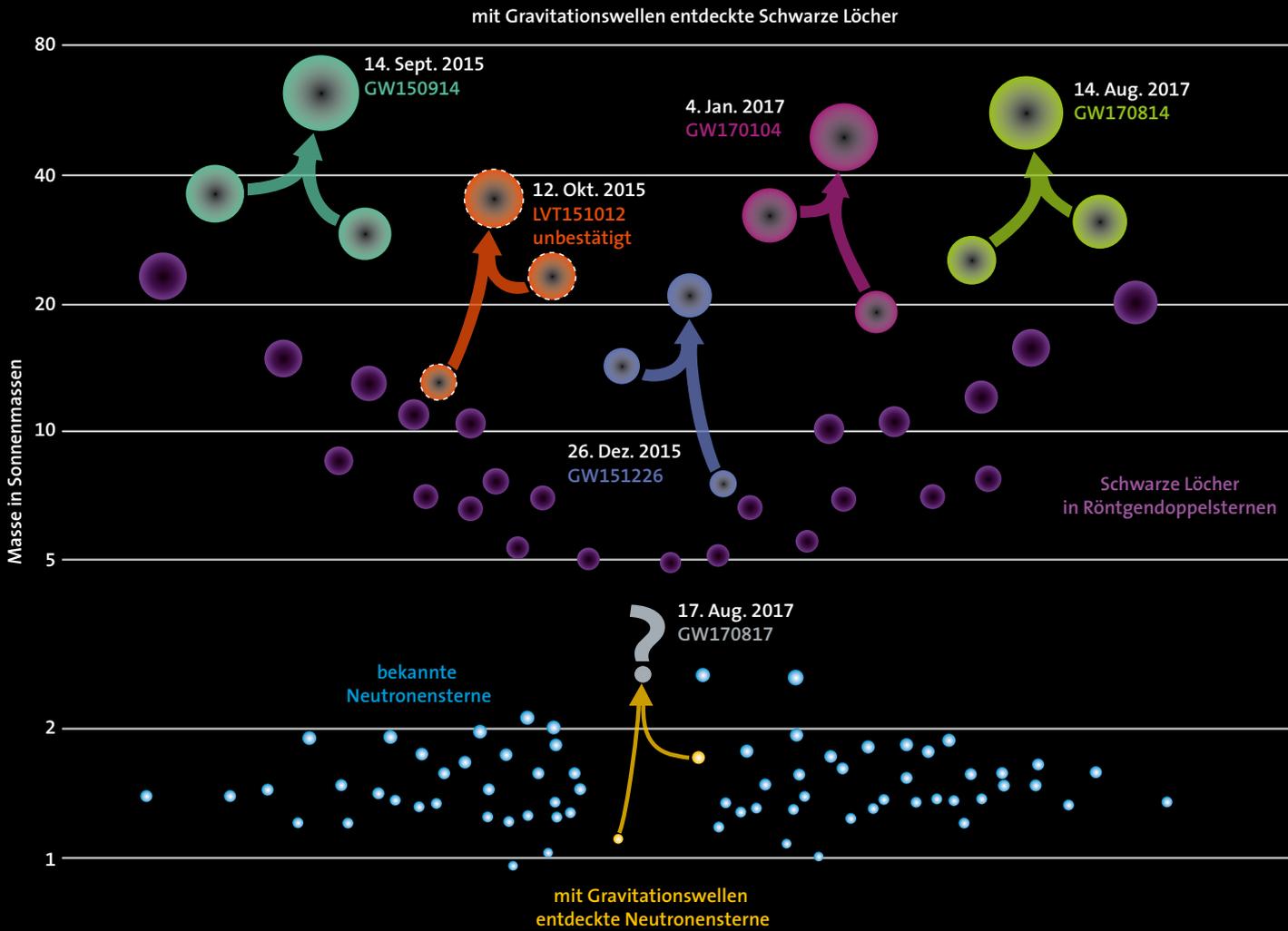
Neutronensterne sind die Überreste von massereichen Sternen. Nach dem Aufbrauchen des Fusionsbrennstoffs kollabiert die Kernregion eines solchen Sterns, weil nichts mehr den durch die Schwerkraft verursachten Druck kompensieren kann. Dabei werden die Protonen und Elektronen der Materie derart zusammengequetscht, dass sie sich zu Neutronen vereinen. Während der äußere Teil des Sterns als Supernova explodiert, bleibt innen ein Neutronenstern zurück – eine kompakte Kugel von etwas mehr als einer Sonnenmasse, aber einem Durchmesser von nur rund 20 Kilometern.

Was sind Schwarze Löcher?

Schwarze Löcher entstehen wie Neutronensterne; allerdings hatten ihre Vorgängersterne weit mehr Masse. Die ehemalige Kernregion wird dann noch stärker zusammengedrückt als beim Neutronenstern. Das Resultat ist ein kollabiertes Objekt, welches das Mehrfache einer Sonnenmasse in sich vereint. Wie es im Innern beschaffen ist, entzieht sich unserer Kenntnis. Sicher aber ist: Kein Teilchen, nicht einmal Licht, kann aus dem Innern herauskommen.

Wie können solche exotischen Objekte miteinander verschmelzen?

Ausgangspunkt ist ein Doppelsternsystem, bei dem jede der beiden Komponenten entweder ein Neutronenstern oder ein



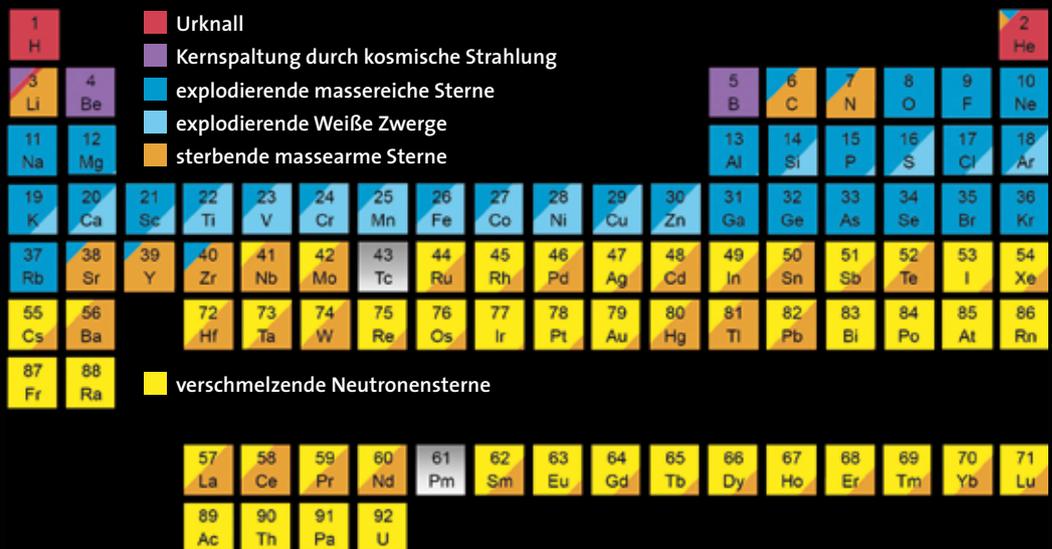
Bekannte Massen von Neutronensternen und Schwarzen Löchern

Massereiche Sterne beenden ihr Dasein als kompakte Neutronensterne oder Schwarze Löcher. Nur von wenigen dieser Sternleichen ließen sich bisher die Massen ermitteln. Es gelang nur, wenn sie sich in einem Doppelsystem befinden und sich durch Radio- oder Röntgenstrahlung bemerkbar machen. Gravitationswellen,

die bei der Verschmelzung eines Doppelsystems aus Schwarzen Löchern oder Neutronensternen emittiert werden, eröffnen eine neue Methode. Die Grafik zeigt die seit September 2015 beobachteten Ereignisse. Welches Objekt bei dem Ereignis GW170817 entstanden ist, ist noch nicht abschließend geklärt.

Ursprung der Elemente

Nur Wasserstoff, Helium und Spuren von Lithium entstanden unmittelbar nach dem Urknall. Schwerere Elemente bilden sich durch Kernreaktionen im Innern von Sternen oder bei Supernova-Explosionen. Die wichtigste Quelle für die schwersten Elemente sind verschmelzende Neutronensterne, wie die Beobachtung der Kilonova von GW170817 belegt.



Stermentod in Raten – die Vorgeschichte von GW170817

Ursprünglich umkreisten sich zwei massereiche Sterne. Zu verschiedenen Zeiten explodierten sie als Supernova, wobei ihr Kern zu einem ultradichten Neutronenstern kollabierte. Im Lauf von Jahrmilliarden näherten sich diese Sternleichen einander an, weil beim Umlauf von kompakten Objekten Energie in Form

von Gravitationswellen abgestrahlt wird. Ein messbarer Puls von Gravitationswellen entstand erst unmittelbar vor der Verschmelzung. In einer expandierenden Materiehülle entstanden schwere Elemente. Elektromagnetische Strahlung aller Wellenlängenbereiche wurde teils gebündelt, teils allseitig emittiert.

Entstehung eines Neutronenstern-Doppelsystems ~ 10 Millionen Jahre

Zwei massereiche Riesensterne in einem Doppelsystem explodierten nacheinander als Supernova und hinterließen zwei Neutronensterne

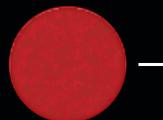


rote Riesensterne



Supernova

Zwischenstadium



Supernova

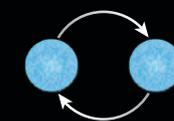
Die beiden Neutronensterne blieben gravitativ in einem Doppelsystem gebunden



Neutronensterne

Annäherung weniger als 8 Milliarden Jahre

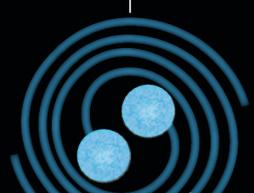
Im Lauf von Jahrmilliarden verringert sich der Bahndurchmesser des Doppelsystems



Energieverlust durch Emission von Gravitationswellen

Verschmelzung weniger als

Wenige Minuten vor der Verschmelzung nimmt die Umlaufgeschwindigkeit rapide zu



Intensität und Frequenz der Gravitationswellen steigen rasch an

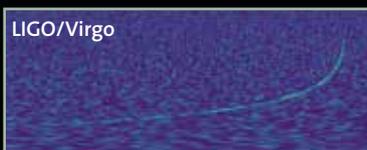
Axel M. Quetz / SuW-Grafik

GW170817 – Chronologie der Entdeckung



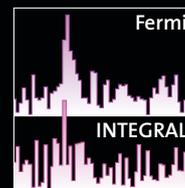
Gravitationswellensignal
Vor 130 Millionen Jahren kollidierten zwei Neutronensterne in der Galaxie NGC 4993.

17. August 2017, 12:41:04 Uhr UTC
LIGO und Virgo registrieren das Gravitationswellensignal dieser Verschmelzung.



LIGO/Virgo

Gammablitz
Unmittelbar nach der Verschmelzung entstand ein kurzer, starker Puls aus Gammastrahlung, der gerichtet abgestrahlt wurde.



+ 2 Sekunden
Die Weltraumteleskope Fermi und INTEGRAL registrieren den Gammablitz.

+ 10 Stunden, 52 Minuten
Ein Teleskop am Las Campanas Observatory entdeckt eine neue, helle Lichtquelle in der Galaxie NGC 4993.



Las Campanas Obs.

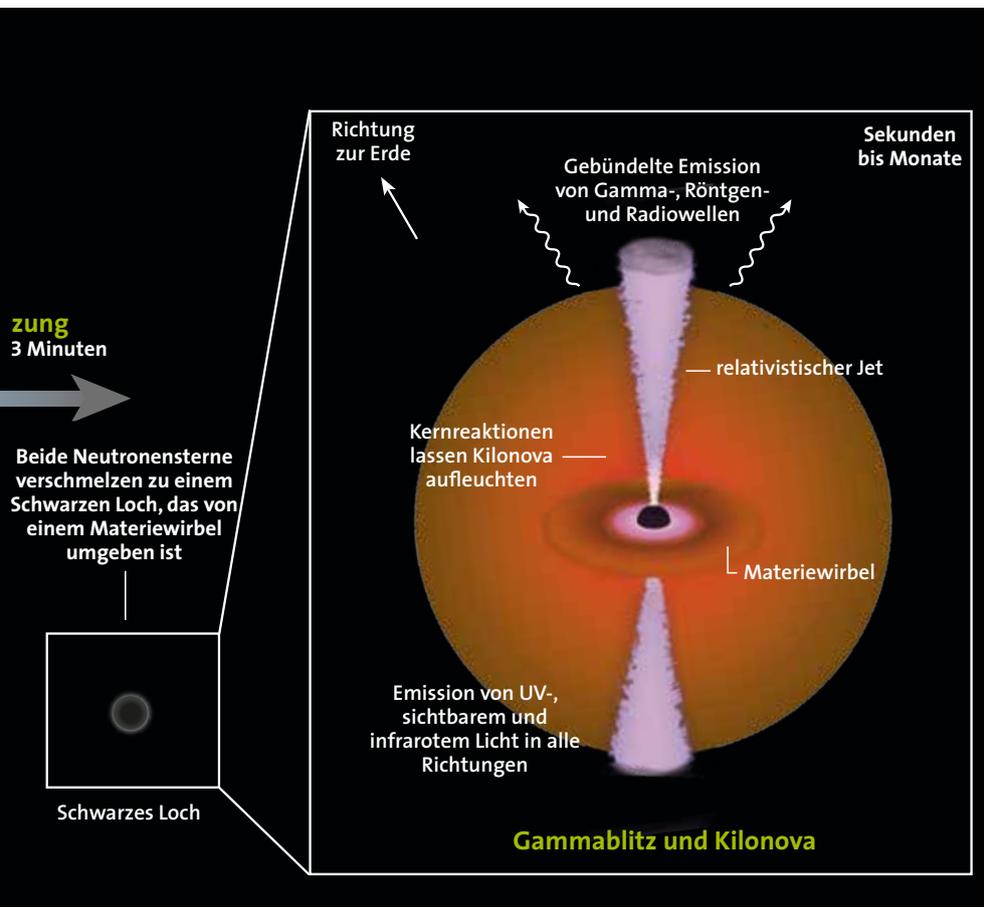
NGC 4993

+ 11 Stunden, 36 Minuten
Das Infrarotteleskop VISTA registriert Infrarotstrahlung derselben Quelle.

+ 15 Stunden
Ultraviolette Strahlung wird gemessen.

+ 9 Tage
Röntgenstrahlung wird registriert.

GW170817-Spektrogramm: LIGO-Virgo Collaboration; GRB170817A: NASA GSFC / ESA / Integral / SPI / ISDC / SuW-Grafik



Schwarzes Loch ist. Bei jeder Umkreisung senden sie schwache Gravitationswellen aus, so dass das System Energie verliert und sich die beiden Komponenten im Lauf der Zeit annähern. Das dauert viele Millionen Jahre. Am Ende geht alles sehr schnell: In den letzten zwei, drei Minuten beschleunigen die kompakten Objekte auf rund 20 Prozent der Lichtgeschwindigkeit, bevor sie zusammenstoßen.

Was passiert bei der Verschmelzung?

Dafür gibt es verschiedene Szenarien. Das resultierende Objekt ist vermutlich ein Schwarzes Loch. Wir wissen jetzt, dass bei der Verschmelzung von Neutronensternen ein kurzer Gammablitz entsteht. Ursache sind starke Magnetfelder, die Restmaterie in der unmittelbaren Umgebung gebündelt beschleunigen. Auch eine helle Kilonova entsteht.

Was ist eine Kilonova?

Unmittelbar nach der Verschmelzung sind viele schnelle Neutronen vorhanden. In der expandierenden Materiewolke um das Schwarze Loch entstehen innerhalb kurzer Zeit durch Einfang dieser Neutronen Atomkerne, die einen starken Überschuss an Neutronen haben und deshalb instabil sind. Durch radioaktiven Zerfall setzen sie über Monate hinweg Energie frei, was zur Emission von elektromagnetischer Strahlung führt. Für kurze Zeit leuchtet die Kilonova heller als eine Galaxie und heller als eine normale Nova.

Welche Elemente entstehen dabei?

Am Ende der radioaktiven Zerfallsketten stehen schwere Elemente, deren Kerne mehr als 40 Protonen haben. Darunter sind Edelmetalle wie Silber, Gold und Platin, aber auch Lanthanoiden und Actinoiden bis hin zum Uran. Was bisher nur vermutet wurde, hat sich nun durch Beobachtung von GW170817 bestätigt: Verschmelzende Neutronensterne sind die dominierende Quelle im Universum für diese schweren Elemente.

Gilt das auch für Elemente, die wir auf unserer Erde finden?

Ja, ein Großteil der schweren Elemente auf der Erde stammt aus der Verschmelzung von Neutronensternen. Die Gas- und Molekülwolke, aus der unser Sonnensystem entstand, war mit den Resten einer Neutronenstern-Verschmelzung angereichert.

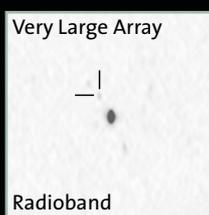
Nach einer Laufzeit von 130 Millionen Jahren trafen die Gravitationswellen, dicht gefolgt von einem Blitz aus Gammastrahlung, an der Erde ein. Als Kilonova wurde das Ereignis Stunden und Tage später in verschiedenen Bereichen des elektromagnetischen Spektrums entdeckt. An den Beobachtungen waren die Gravitationswellendetektoren LIGO und Virgo sowie mehr als 70 Observatorien und Weltraumteleskope beteiligt.

Radioquelle

Die rasch expandierende Materiehülle löste eine Stoßwelle im interstellaren Medium aus. Die dabei verursachte Emission von Radiostrahlung kann über Jahre hinweg anhalten.



+16 Tage Radioteleskope weisen die Radiowellen der Quelle nach.



GW170817 hat bestätigt, dass ...

- ... die Verschmelzung zweier Neutronensterne Gravitationswellen auslöst.
- ... verschmelzende Neutronensterne intensive kurze Gammastrahlenausbrüche hervorrufen.
- ... Gravitationswellen sich wie elektromagnetische Wellen mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten und transversal schwingen.
- ... verschmelzende Neutronensterne eine helle Kilonova auslösen, die ihre Energie aus dem radioaktiven Zerfall neutronenreicher Atomkerne bezieht.
- ... verschmelzende Neutronensterne die dominierenden Quellen für die Entstehung von schweren Elementen wie Silber, Platin, Gold und Uran sind.
- ... die Expansionsrate des Universums sich unabhängig von anderen Methoden direkt aus Gravitationswellensignalen ableiten lässt.