

Erster Nachweis: Verschmelzende Neutronensterne

Ein Meilenstein für die Astronomie

Ein Glücksfall für die Forschung: Erstmals gelang es, mit Gravitationswellen und in allen Bereichen des elektromagnetischen Spektrums – von den hochenergetischen Gammastrahlen über das sichtbare Licht bis zu der langwelligen Radiostrahlung – die Kollision von zwei Neutronensternen in einer fernen Galaxie zu beobachten.

Von Markus Pössel

IN KÜRZE

- Mit der direkten Beobachtung von Gravitationswellen und dem ersten Nachweis verschmelzender Schwarzer Löcher begann vor zwei Jahren das Zeitalter der Gravitationswellenastronomie.
- Nun haben die Detektoren LIGO und Virgo auch die Verschmelzung von zwei Neutronensternen mittels Gravitationswellen nachgewiesen. Andere Observatorien beobachteten dieses Ereignis in allen Bereichen des elektromagnetischen Spektrums.
- Damit gelang der Einstieg in die Mehrkanalbeobachtung oder Multimessenger-Astronomie. Der dadurch ermöglichte Erkenntnis-schub hebt die astronomische Forschung auf eine völlig neue Qualitätsstufe.

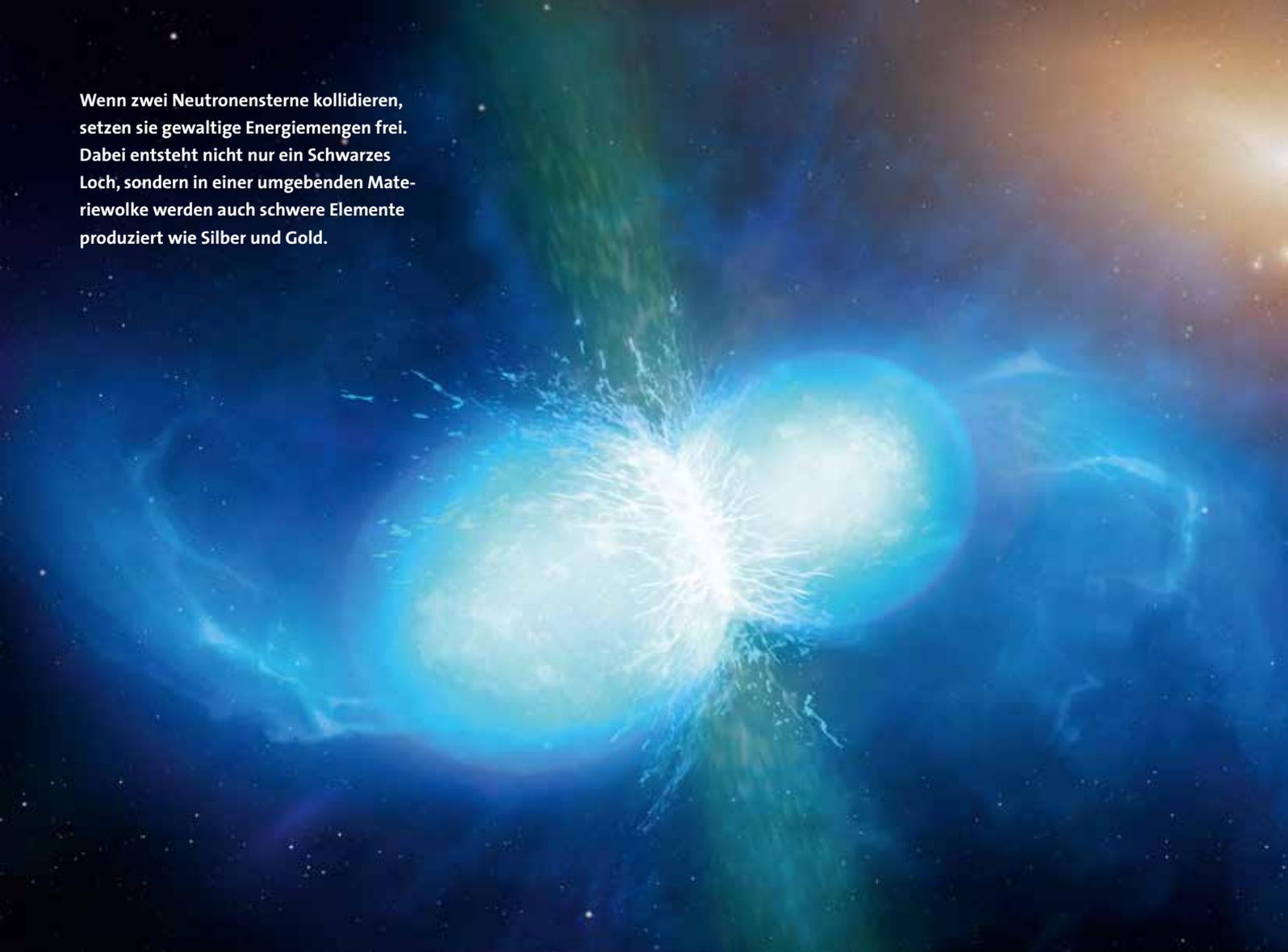
Das Signal kam blitzartig: Am 17. August 2017, um 12:41:06 Uhr Weltzeit, löste der Gamma-Ray Burst Monitor (GBM) an Bord des Weltraumteleskops Fermi Alarm aus. Gamma-Ray Bursts, zu deutsch Gammastrahlenausbrüche oder Gammablitze, entsprechen einem kurzen, hellen Aufleuchten einer astronomischen Quelle im hochenergetischen Bereich des elektromagnetischen Spektrums. Dass der GBM-Detektor anschluss, war für sich genommen nichts Ungewöhnliches – das Instrument hat jederzeit rund 75 Prozent des Himmels im Blick und weist alle paar Tage einen neuen Gammablitz nach. Dann wird das auf Gammastrahlen spezialisierte Fermi-Teleskop so gedreht, dass sein zweites Instrument, das Large Area Telescope, die Umgebung der Gammastrahlenquelle in Augenschein nehmen kann.

Außerdem wird bei einem solchen Alarm automatisch eine Meldung abgesetzt, eine so genannte GCN-Notice, die binnen einer Sekunde über das Internet

an interessierte Beobachter weitergeleitet wird, die dem Gamma-Ray Burst Coordinates Network (GCN) angeschlossen sind. Wer ein robotisches Teleskop betreibt, kann den Beobachtungsprozess mit Hilfe solcher Benachrichtigungen automatisieren: Sofort nach Anschlägen des GBM fährt ein solches Teleskop selbsttätig die Himmelsregion an, in welcher der Gammablitz verortet wurde. Allerdings ist die von Fermi abgeschätzte Position nicht sehr genau; interessant sind die Benachrichtigungen daher vornehmlich für Teleskope mit größerem Blickfeld.

Sechs Minuten, nachdem der GBM-Detektor angeschlagen hatte, wurde klar, dass die Lage diesmal alles andere als gewöhnlich war, sondern dass Messungen und Beobachtungen bevorstanden, die es in dieser Form noch nie zuvor gegeben hatte. Bevor wir zu den Details kommen, wollen wir uns in Erinnerung rufen, was die Astronomen überhaupt über Gammablitze wissen – genauer: was sie bis zu diesem 17. August 2017 bereits wussten.

Wenn zwei Neutronensterne kollidieren, setzen sie gewaltige Energiemengen frei. Dabei entsteht nicht nur ein Schwarzes Loch, sondern in einer umgebenden Materiewolke werden auch schwere Elemente produziert wie Silber und Gold.



University of Warwick / Mark Garlick (<https://www.eso.org/public/germany/images/eso1733s/>) / CC BY 4.0 (creativecommons.org/licenses/by/4.0/legalcode)

Das Rätsel der Gammablitze

Gammablitze wurden Ende der 1960er Jahre von US-amerikanischen Militärsatelliten entdeckt, die eigentlich Kernwaffenexplosionen aufspüren sollten. Über die Jahre hinweg fanden sich immer mehr solcher rätselhafter Blitze, die aus dem Weltraum kamen. Im Jahr 1997 gelang es erstmals, auch das optische Nachglühen eines Gamma-Ray Bursts zu beobachten: Wenige Stunden, nachdem der Satellit BeppoSAX am 28. Februar 1997 einen Gammablitz registriert hatte (der nach diesem Datum die Bezeichnung GRB970228 trägt), beobachteten Teleskope an der fraglichen Himmelsposition eine schwächer werdende Lichtquelle. Dieses Nachglühen war mit einer kaum sichtbaren Galaxie assoziiert; Gammablitze schienen also ferne Ereignisse weit außerhalb unseres Milchstraßensystems zu sein.

Wenige Wochen später gelang bereits die nächste optische Nachbeobachtung: Für den Blitz GRB970508 ließ sich sogar die Rotverschiebung des optischen Nach-

leuchtens ermitteln. Aus solchen Rotverschiebungen des Signals zu größeren Wellenlängen hin lässt sich die Entfernung der betreffenden Lichtquelle ableiten. GRB970508 war demnach so weit entfernt, dass sein Licht rund 7 Milliarden Jahre zu uns unterwegs gewesen war. (Zum Vergleich: Seit dem Urknall sind knapp 14 Milliarden Jahre vergangen.)

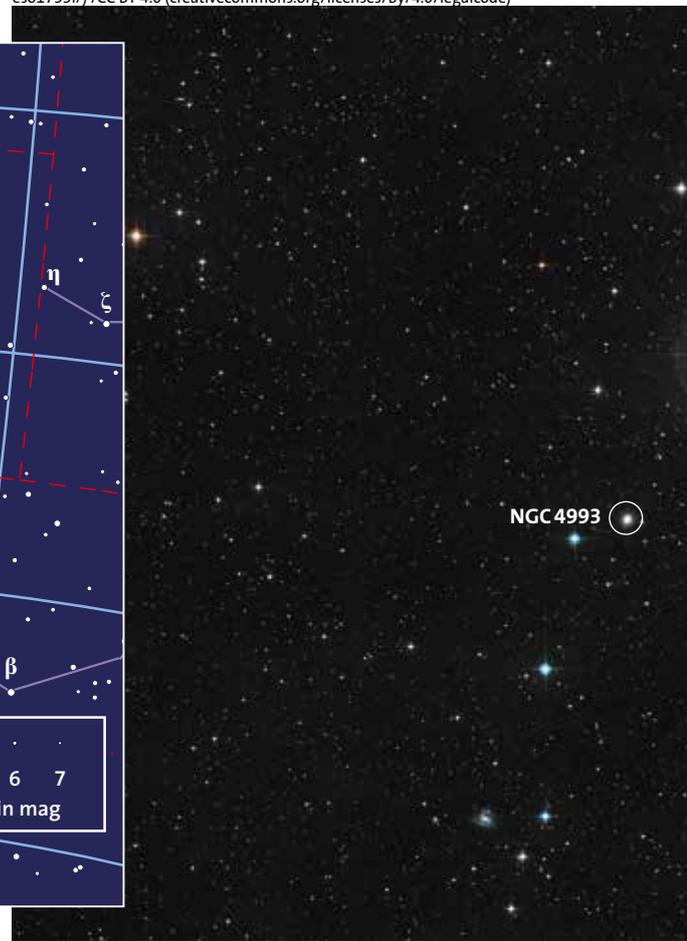
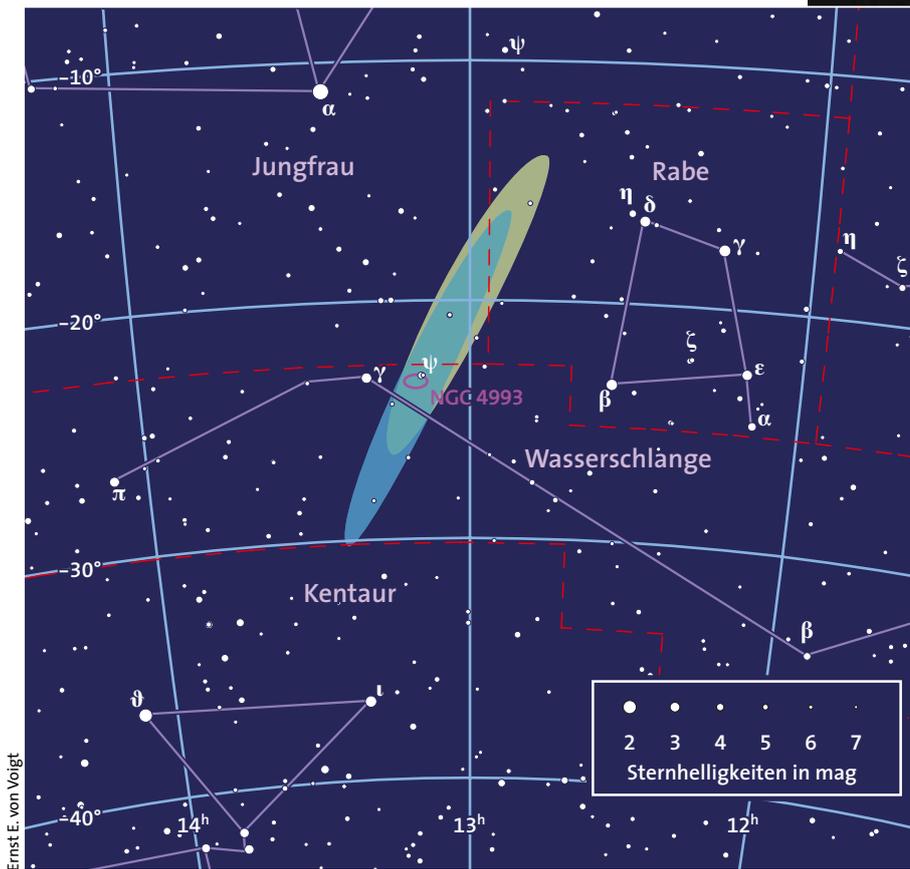
Somit wurde klar: Gammablitze gehören zu den fernsten kosmischen Ereignissen, die sich beobachten lassen. Würde man annehmen, dass sie ihre Energie gleichmäßig in alle Richtungen freisetzen, kämen gigantische Werte heraus, die mit keinem der denkbaren Modelle zu erklären wären. Recht schnell setzte sich deshalb die Erkenntnis durch, dass Gammablitze ihre Energie gebündelt abstrahlen; einen extrem hellen Ausbruch sehen wir entsprechend dann, wenn das Strahlungsbündel direkt auf die Erde gerichtet ist.

Doch selbst wenn in den Quellen ein starker Bündelungseffekt auftritt: Um über derart große Distanzen so gut sicht-

bar zu sein, müssen solche Ausbrüche, zumindest innerhalb eines kurzen Zeitraums, enorme Energiemengen freisetzen. Die Strahlungsleistung muss diejenige unserer Sonne um mindestens das Hundertbilliardenfache übertreffen.

Sobald hinreichend viele Beobachtungen vorlagen, zeigte sich, dass es offenbar zwei Typen von Gammastrahlenausbrüchen gibt: einerseits kurze Blitze mit einer mittleren Dauer von einigen Zehntelsekunden und andererseits längere, deren Gammastrahlung im Mittel über eine halbe Minute hinweg bei den irdischen Teleskopen ankam. Die Ausbrüche schienen bevorzugt in Sternentstehungsgebieten zu liegen, in denen man massereiche Sterne erwarten würde. Aber welches Ereignis mit massereichen Sternen konnte derart helle Ausbrüche hervorrufen?

Handelte es sich vielleicht um Neutronensterne – also die kompakten Überreste massereicher Sterne –, die Materie eines Begleiters auf sich gezogen hatten, dadurch zu einem Schwarzen Loch kollabier-



NGC 4993

Energiereiche Nova in ferner Galaxie

Mit den kombinierten Daten der Gravitationswellendetektoren LIGO und Virgo ließ sich die Quelle GW170817 in einem schmalen, etwa 30 Quadratgrad großen Himmelsareal verorten (Karte links; die beiden Ellipsen rühren von zwei unterschiedlichen Auswerteverfahren her). Innerhalb von zwölf Stunden hatten Observatorien das optische Pendant der Quelle in der linsenförmigen Galaxie NGC 4993 identifiziert, die in der Nähe des Sterns Psi Hydrae liegt (Mitte). Der Helligkeitsausbruch, der rund tausendmal stärker war als eine gewöhnliche Nova, ist in Aufnahmen des Weltraumteleskops Hubble deutlich sichtbar (rechts). Die Helligkeit dieser Kilonova nahm im Lauf von sechs Tagen allmählich ab.

ten und kurzzeitig intensive Strahlung in Form eines Jets aussandten? Spielten Neutronensterne mit extrem starken Magnetfeldern eine Rolle?

Zumindest für die längeren Gammastrahlenausbrüche war ab 2003 sicher, dass Sternexplosionen die Auslöser sind. Als Supernovae explodieren massereiche Sterne, wenn sie ihren Kernbrennstoff verbraucht haben. Die massereichsten Sterne, mit mehr als dem etwa 25-Fachen der Sonnenmasse, explodieren als entsprechend stärkere Hypernovae – und diese, das zeigten gleichzeitige Beobachtungen in mehreren Wellenlängenbereichen, schienen für die länger dauernden Gammablitz verantwortlich zu sein.

Die kürzeren Gammablitz blieben rätselhafter. Sie traten auch dort auf, wo keine massereichen Sterne zu erwarten sind. Als mögliche Ursache favorisierten die Astronomen das Verschmelzen von zwei Neutronensternen.

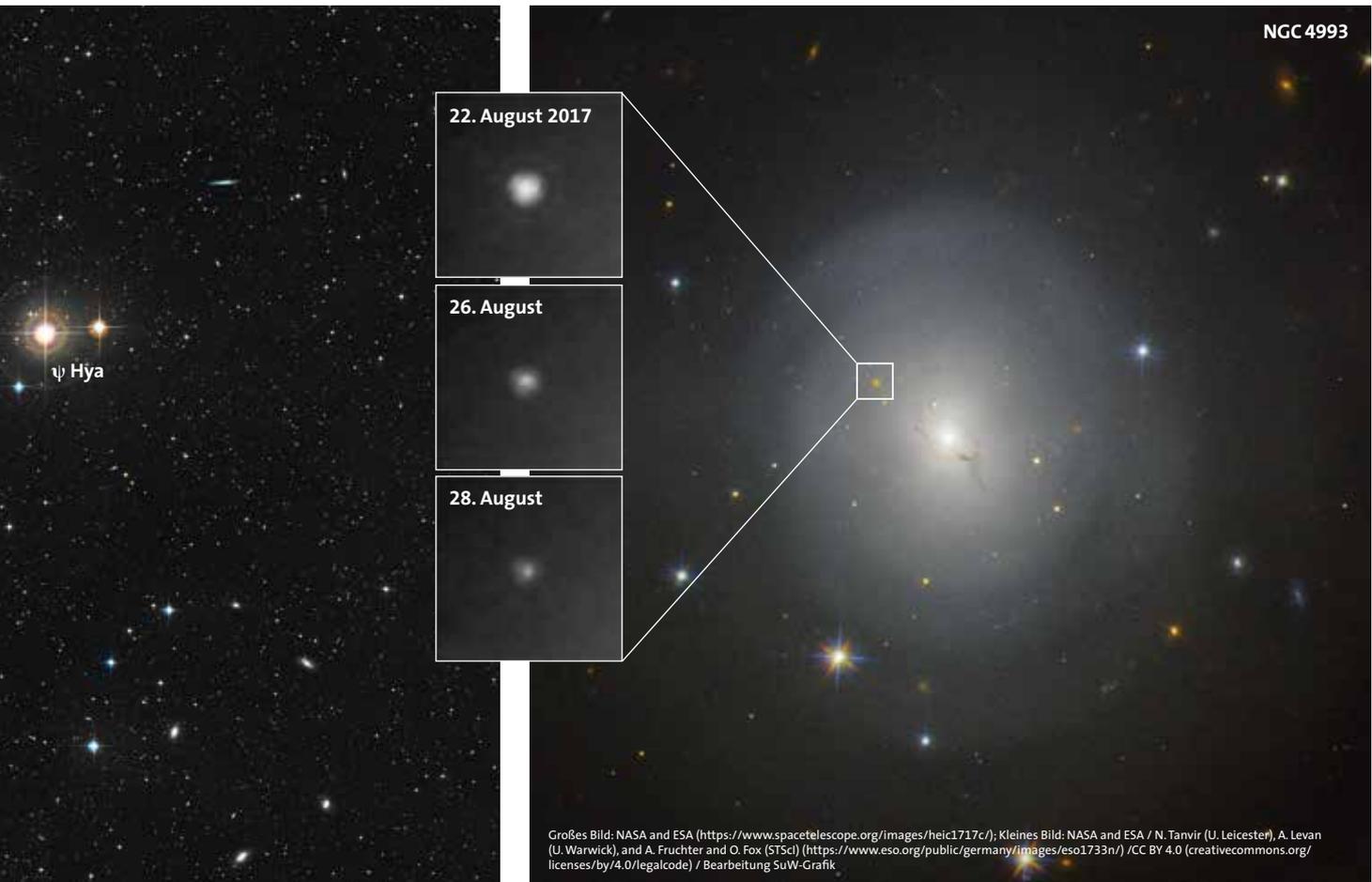
Neutronenstern-Doppelsysteme

Dass es Doppelsternsysteme gibt, in denen beide Partner aus den Resten massereicher Sterne bestehen, ist aus Beobachtungen im Radiobereich bekannt. Denn einige Neutronensterne senden enge Bündel von

elektromagnetischer Strahlung aus. Rotiert der Neutronenstern so, dass uns ein solches Bündel in regelmäßigen Abständen überstreicht, sehen wir ihn in regelmäßigen Abständen blinken wie das Licht eines Leuchtturms. Dieses pulsartige Erscheinungsbild gab diesen Objekten den Namen Pulsar. Derzeit ist ein gutes Dutzend Doppel-Neutronensterne bekannt, von denen wir jeweils mindestens einen Neutronenstern als Pulsar sehen.

Solche Systeme sind exzellente kosmische Laboratorien, mit denen sich die Vorhersagen von Einsteins allgemeiner Relativitätstheorie überprüfen lassen. Das liegt daran, dass Neutronensterne sehr kompakt sind, also vergleichsweise viel Masse bei astronomisch gesehen kleinem Radius haben (rund ein bis zwei Sonnenmassen in einer Kugel mit etwa 10 Kilometer Radius). Da unter solchen Bedingungen die von der allgemeinen Relativitätstheorie vorhergesagten Effekte sehr ausgeprägt sind, lässt sie sich genau auf die Probe stellen. Bislang hat die Theorie alle entsprechenden Tests mit Bravour bestanden.

Besonders wichtig ist dabei der folgende von der allgemeinen Relativitätstheorie vorhergesagte Effekt: Einander umkreisende Massen sollten den sie um-



gebenden Raum in winzige Schwingungen versetzen, die sich wellenartig mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten: Gravitationswellen, mit denen insbesondere auch Energie in den umgebenden Raum abgegeben wird. Infolge des Energieverlusts rücken die beiden Neutronensterne im Lauf der Zeit immer näher zusammen und umkreisen sich deswegen immer schneller. Dieser Effekt lässt sich durch Beobachtungen nachweisen. Seit Entdeckung des ersten Doppel-Neutronensterns im Juli 1974 hat die Umlaufzeit dieses Systems systematisch in genau der Weise um einige tausendstel Sekunden abgenommen, wie es sich auf Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie ausrechnen lässt. Das war der erste, wenn auch indirekte Nachweis für die Existenz von Gravitationswellen. Die Entdecker dieses Systems, Joseph Taylor und sein damaliger Doktorand Russell Hulse, wurden dafür mit dem Physik-Nobelpreis des Jahres 1993 ausgezeichnet.

Eine Eigenschaft eines Doppelsystems aus Neutronensternen ist, dass mit abnehmendem Abstand und immer schnellerer Umkreisung immer mehr Energie in Form von Gravitationswellen abgestrahlt wird. Dieser sich aufschaukelnde, sich selbst beschleunigende Prozess endet erst, wenn

die Neutronensterne sich so nahe gekommen sind, dass sie kollidieren und miteinander verschmelzen; was dabei entsteht, ist freilich nicht stabil, sondern kollabiert zu einem Schwarzen Loch.

Für die als Pulsare in unserer Milchstraße nachgewiesenen Doppel-Neutronensternsysteme liegt diese Verschmelzungsphase noch in weiter Ferne. Am ehesten ist das System PSR J0737–3039 an der Reihe, bei dem wir beide Partner als Pulsar beobachten können. Aber selbst diese beiden Neutronensterne werden erst in rund 85 Millionen Jahren verschmelzen.

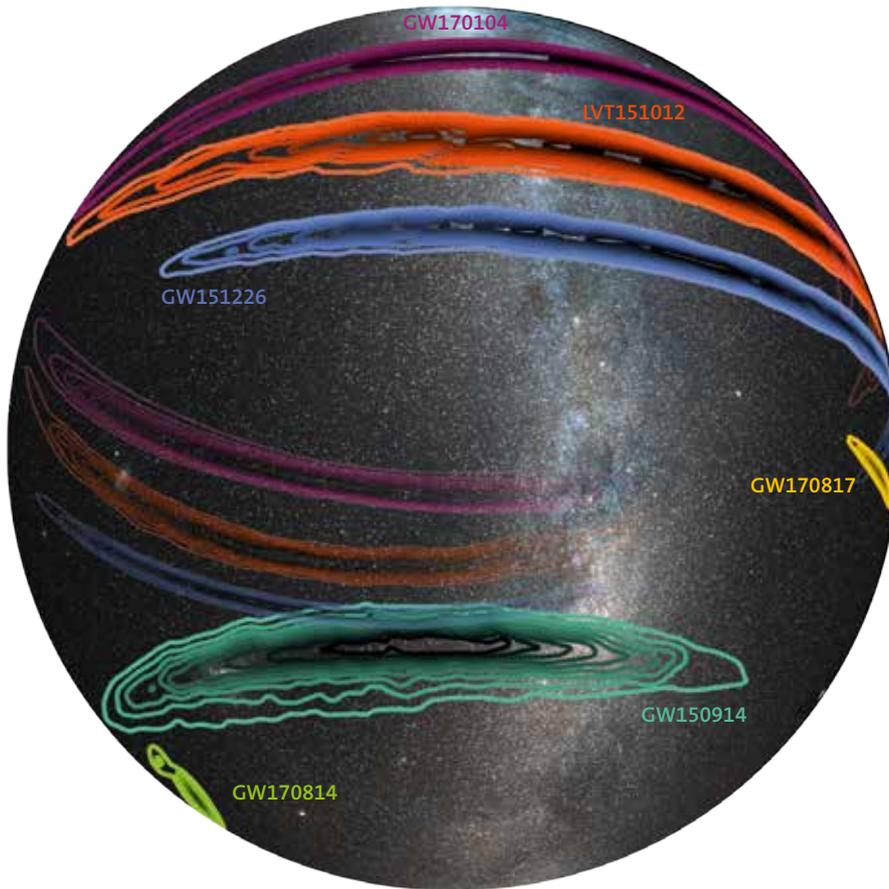
Gammablitz und Kilonova

Was dann passiert, lässt sich mit ausgefeilten Computersimulationen nachvollziehen. Indem sie Raum und Zeit gemäß den Gesetzen der allgemeinen Relativitätstheorie modellieren und die Materie der Neutronensterne abbilden, zeigen sie den Verschmelzungsprozess: Ein Teil der Neutronenmaterie kollabiert zu einem Schwarzen Loch, während Reste der Materie einen Torus, einen Ring, darum herum bilden (siehe SuW 1/2009, S. 40).

Solche Strukturen, die ein Schwarzes Loch oder einen anderen kompakten Körper umringen, bilden in anderen Situa-

tionen, etwa bei Röntgendoppelsternen, nachweislich Jets aus, in denen senkrecht zur Scheibenebene ein Plasma hochenergetischer Teilchen nach außen geschleudert wird. Dabei spielen starke Magnetfelder eine Rolle. Ein Teil der Energie der Jets wird in gebündelte, hochenergetische elektromagnetische Strahlung umgesetzt. Ist einer der Jets zufällig so ausgerichtet, dass die Strahlung – je nach Laufzeit viele Millionen Jahre später – die Erde trifft, können irdische Beobachter einen kurzen Gammastrahlenausbruch beobachten.

In der neutronenreichen Umgebung entstehen zudem Atomkerne mit einem hohen Neutronenüberschuss. Diese sind instabil und zerfallen schrittweise in stabile Kerne. Damit sind verschmelzende Neutronensterne eine wichtige Quelle für die Entstehung schwerer Elemente. Die radioaktiven Zerfälle sind dafür verantwortlich, dass auf den Gammablitz noch ein weniger energetisches Nachglühen im sichtbaren und im infraroten Licht folgt: Eine so genannte Kilonova oder Makronova leuchtet auf. Wenn die neu entstandenen Kerne mit hoher Geschwindigkeit auf das umgebende interstellare Gas treffen, entstehen zudem – etwas verzögert zur Kilonova – Radiowellen.



Wo am Himmel befinden sich die Quellen?

Auf Grund der Bauart von Gravitationswellendetektoren lässt sich die Herkunft eines Signals nur auf langgestreckte, ellipsenförmige Bereiche am Himmel eingrenzen. Drei statt zwei Detektoren verringern die Größe dieser Fehlerellipsen deutlich. In dieser Grafik sind Lokalisierungsbereiche der bisher nachgewiesenen Quellen von Gravitationswellen auf eine Himmelskugel projiziert. Die Quellen GW150914, LVT151012, GW151226 und GW170104 wurden nur von den beiden LIGO-Detektoren entdeckt; die Signale GW170814 und GW170817 wurden im August 2017 von allen drei Detektoren des LIGO-Virgo-Netzwerks nachgewiesen.

Das Nachleuchten in den verschiedenen Bereichen des elektromagnetischen Spektrums hat für die Beobachtung den Vorteil, dass die Abstrahlung nicht gebündelt, sondern einigermaßen gleichmäßig in alle Richtungen erfolgt. Das Licht und die Radiostrahlung sind im Prinzip also auch dann von der Erde aus nachweisbar, wenn der Gammablitz uns verfehlt.

Insgesamt wurde vermutet, dass die hier skizzierten Neutronenstern-Zusammenstöße entscheidend dazu beigetragen haben, dass es im Universum überhaupt Elemente wie Gold, Platin, Uran oder Plutonium gibt. Ungefähr die Hälfte der Elemente, die schwerer sind als Eisen, sollte in so genannten r-Prozessen entstehen, bei denen Atomkerne innerhalb kurzer Zeit weitere Neutronen einfangen (das »r« steht für das englische »rapid«, schnell). Verschmelzende Neutronensterne böten mit der gewaltigen Menge an freigesetzter Energie und der neutronenreichen Umgebung gute Bedingungen dafür.

Die herausgeschleuderten schweren Atomkerne würden sich im Lauf der Zeit mit dem interstellaren Gas vermischen; entstehen aus diesem Medium neue Sterne und Planeten, verdanken diese zumindest einen Teil ihrer schweren Elemente den Neutronenstern-Verschmelzungen.

Gesicherte Daten dazu gab es allerdings nicht; ein konkurrierender Erklärungsansatz bevorzugte Supernova-Explosionen, die zwar wesentlich weniger der entsprechenden Elemente produzieren, dafür aber insgesamt viel häufiger sind.

In Grundzügen war dieses Szenario von den Wissenschaftlern bereits vor dem 17. August 2017 weitgehend akzeptiert, wenn auch eine Reihe von konkreten Details ungeklärt waren: Wie und wo wird das Plasma zum Jet beschleunigt? Woher kommt die Energie für den Jet – welche Rolle spielen beispielsweise Neutrinos, die bei den Kernreaktionen während des Zusammenstoßes freigesetzt werden? Wie entsteht aus dem Jet die elektromagnetische Strahlung – vielleicht als Synchrotronstrahlung, wenn elektrisch geladene Jet-Teilchen spiralförmig um die Magnetfeldlinien herumtrudeln?

Woran es außerdem mangelte, waren Informationen über die Eigenschaften von Neutronenmaterie unter derart extremen Bedingungen. Insbesondere die Zustandsgleichung (der Zusammenhang zwischen dem von der Neutronenmaterie ausgeübten Druck und der Materiedichte) ist nur unvollständig bekannt.

An dieser Stelle wird wichtig, dass verschmelzende Neutronensterne auch Gra-

avitationswellen aussenden – ebenso wie verschmelzende Paare aus zwei Schwarzen Löchern oder aus einem Schwarzen Loch und einem Neutronenstern. Das Signal hat dabei in den letzten Stadien vor der Verschmelzung einen charakteristischen Verlauf, der als »Chirp«, also als »Zirpen« bezeichnet wird: Sowohl Frequenz als auch Amplitude des Signals steigen in genau definierter Weise an; auf Schallwellen übertragen entspricht dies wirklich einer Art Zirpen. Der Gravitationswellennachweis eines geeigneten Chirps, gekoppelt mit dem Nachweis eines kurzen Gammastrahlenausbruchs aus derselben Himmelsregion, könnte direkt zeigen, ob kurze Gammablitze tatsächlich durch die Verschmelzung von Neutronensternen hervorgerufen werden.

Entsprechend hoch waren die Erwartungen, seitdem den beiden LIGO-Detektoren am 14. September 2015 das erste Mal der direkte Nachweis von Gravitationswellen gelungen war (siehe SuW 4/2016, S. 24). Allerdings handelte es sich bei allen direkten Nachweisen bis Januar 2017 um verschmelzende Paare von Schwarzen Löchern. Was war mit den Doppel-Neutronensternen? Deren Gravitationssignale sind schwächer; entsprechend konnten die LIGO-Detektoren sie

in der damaligen Konfiguration nur bis zu Abständen von rund 200 Millionen Lichtjahren nachweisen. Da Neutronenstern-Verschmelzungen extrem selten sind, waren in der ersten Messkampagne, die von September 2015 bis Januar 2016 dauerte, den Abschätzungen zufolge nur 0,002 bis zwei solcher Nachweise zu erwarten.

Am 1. August 2017 gesellte sich erstmals der Advanced-Virgo-Detektor in Italien zu den beiden LIGO-Detektoren; letztere hatten bereits seit dem 30. November 2016 ihren zweiten Beobachtungsdurchgang, der noch bis zum 25. August laufen würde. Ein dritter Detektor hat einen entscheidenden Vorteil: Entsprechend dem Nachweisprinzip der interferometrischen Detektoren benötigt man mindestens drei Detektoren, um die Quelle wenigstens einigermaßen genau am Himmel zu lokalisieren; das ergibt sich direkt daraus, dass Signale aus unterschiedlichen Richtungen zu unterschiedlichen Zeiten bei den drei Detektoren ankommen. Mit zwei Detektoren lässt sich der Ort der Quelle nur auf einen länglichen Streifen einschränken.

Diese Fähigkeit stellte das Detektorentrio dann am 14. August 2017 tatsächlich unter Beweis: Gemeinsam wiesen alle drei Detektoren das Signal GW170814 nach, das wiederum von verschmelzenden Schwarzen Löchern stammte, eines davon mit einer Masse zwischen 28 und 36 Sonnenmassen, das andere zwischen 21 und 28 Sonnenmassen, in rund 1,8 Milliarden Lichtjahren Entfernung. Die Himmelsposition der Quelle konnten die Detektoren auf eine Fläche von rund 60 Quadratgrad einschränken. Ohne Virgo wäre die in Fra-

ge kommende Fläche rund 20 Mal größer gewesen (siehe Bild S. 28).

Allerdings sind auch 60 Quadratgrad noch ein riesiges Himmelsgebiet. Zum Vergleich: Die Vollmondscheibe bedeckt am Himmel eine Fläche von nur 0,2 Quadratgrad. Diese Positionsungenauigkeit für GW170814 mit drei Detektoren entsprach also der Fläche von 300 Vollmonden. Für diejenigen Wissenschaftler aber, die sich für Neutronensterne interessierten, war das ein wichtiger Fortschritt. Denn im Fall einer Neutronenstern-Verschmelzung käme es darauf an, nicht nur die Gravitationswellen und die Gammastrahlung nachzuweisen, sondern auch die Signale im optischen und im Radiowellenbereich. Um dafür die leistungsfähigsten Teleskope einsetzen zu können, sind möglichst präzise Positionsangaben erforderlich.

Die Entdeckung von GW170817

Nach dieser Zusammenfassung des bisherigen Wissensstands kehren wir zurück zum 17. August 2017. Was anfangs nur ein weiterer kurzer Gammastrahlenausbruch gewesen zu sein schien, entpuppte sich sechs Minuten später als das langersehnte, nie zuvor beobachtete Ereignis: Ein kurzer Gammablitz, der direkt – nur 1,7 Sekunden später – auf das charakteristische Chirp-Signal zweier verschmelzender Neutronensterne folgte.

Warum erst nach sechs Minuten? So lange brauchte der Suchalgorithmus, der laufend die Daten des LIGO-Detektors in Hanford auswertet, um festzustellen: Diese Daten enthalten ein deutliches Gravitationswellensignal einer Neutronenstern-Verschmelzung, die knapp zwei Sekunden vor dem kurzen Gammastrahlenausbruch stattgefunden hatte, um 12:41:04 Uhr Weltzeit.

Eine fieberhafte Datenanalyse begann. Ungewöhnlich war, dass die automatisch laufenden Algorithmen keine Koinzidenz zwischen den beiden LIGO-Detektoren gemeldet hatten. Der Grund war rasch

gefunden: Dem Gravitationswellensignal im LIGO-Detektor in Livingston hatte sich nahe dem Ende der Verschmelzung ein starkes Störsignal überlagert, das den Algorithmus verwirrt hatte. In den Daten des Virgo-Detektors in Italien war dagegen nur ein äußerst schwaches Signal zu finden. Wie stark eine Gravitationswelle einen der Detektoren mit seinen rechtwinkligen Interferometerarmen beeinflusst, hängt von der Einfallrichtung der Welle ab; offenbar kam diese Gravitationswelle aus einer Richtung, aus der Virgo seiner Orientierung nach nicht sonderlich empfindlich für Gravitationswellen war.

Die genauere Analyse zeigte aber mit immer größerer Sicherheit: Es schien sich tatsächlich um eine Verschmelzung von Neutronensternen zu handeln. Das Signal, der Chirp, hatte eine Dauer von rund 100 Sekunden innerhalb des von den Detektoren erfassten Frequenzbereichs. Damit war er ungleich länger als die nur Zehntelsekunden-langen Chirps von verschmelzenden Schwarzen Löchern, die zuvor nachgewiesen worden waren – und mit deutlich geringerer Amplitude in der Endphase. Die Gravitationswellen der Neutronenstern-Verschmelzung hatten zuerst den Virgo-Detektor erreicht, 22 Millisekunden später LIGO-Livingston im US-Bundesstaat Louisiana und weitere drei Millisekunden später LIGO-Hanford im US-Bundesstaat Washington.

Eine arbeitsreiche halbe Stunde später versandte das LIGO-Virgo-Team eine Mail; sie ging an all jene Astronomen, die automatisierte Nachrichten über Gammastrahlungsausbrüche erhielten und sich schriftlich verpflichtet hatten, Informationen über mögliche Gravitationswellenereignisse vertraulich zu behandeln. Dieses GCN-Circular machte klar: Achtung! GRB170817A ist ein Kandidat für einen kurzen Gammablitz, für den gleichzeitig die Gravitationswellen einer Neutronenstern-Verschmelzung beobachtet wurden (siehe Bild unten).

GCN-Circular 21505

Eine E-Mail informierte Astronomen am 17. August 2017, dass ein Gammablitz und ein fast zeitgleiches Gravitationswellensignal auf das Verschmelzen zweier Neutronensterne hinweisen könnte.

<https://gcn.gsfc.nasa.gov/gcn3/21505-gcn3>

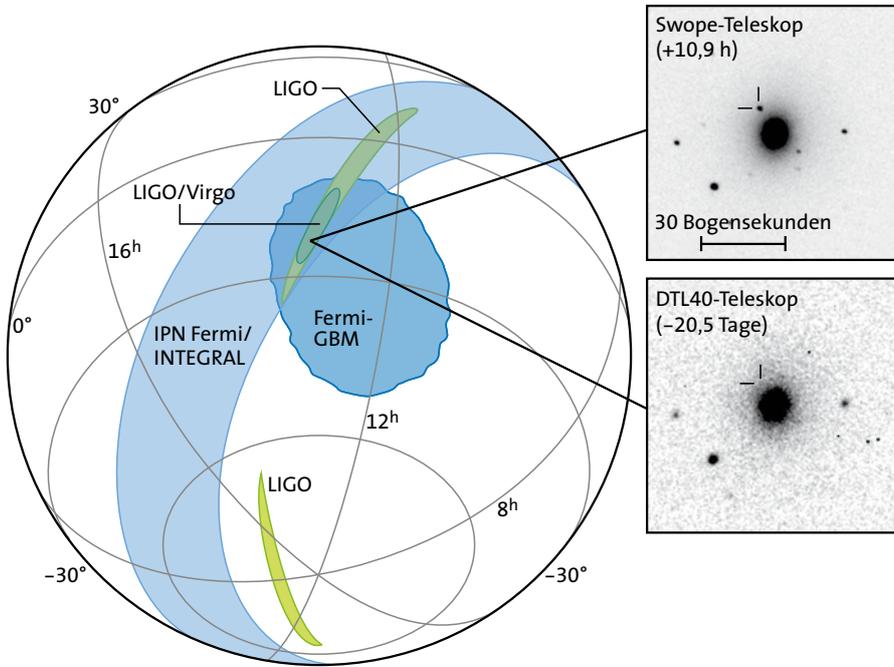
```
TITLE: GCN CIRCULAR
NUMBER: 21505
SUBJECT: LIGO/Virgo G298048: Fermi GBM trigger 524666471/170817529: LIGO/Virgo Identification of a possible gravitational-wave counterpart
DATE: 17/08/17 13:21:42 GMT
FROM: Reed Clasey Essick at MIT <ressick@mit.edu>
```

The LIGO Scientific Collaboration and the Virgo Collaboration report:

The online CBC pipeline (gstlal) has made a preliminary identification of a GW candidate associated with the time of Fermi GBM trigger 524666471/170817529 at gps time 1187008884.47 (Thu Aug 17 12:41:06 GMT 2017) with RA=186.62deg Dec=-48.84deg and an error radius of 17.45deg.

The candidate is consistent with a neutron star binary coalescence with False Alarm Rate of ~1/10,000 years.

An offline analysis is ongoing. Any significant updates will be provided by a new Circular.



Lokalisierung der Quelle

Damit optische Teleskope das Nachglühen eines Gammablitzes erfassen können, ist das Suchgebiet möglichst exakt einzugrenzen. Auf eine Himmelskugel sind hier die Regionen projiziert, aus denen das Gravitationswellensignal GW170817 und das Gammastrahlensignal GRB 170817A mit einer Wahrscheinlichkeit von 90 Prozent kamen – berechnet nur mit LIGO-Daten (hellgrün), Daten von LIGO und Virgo (dunkelgrün), aus der Zeitverzögerung zwischen den beiden Satelliten Fermi und INTEGRAL (hellblau) sowie mit Daten von Fermi-GBM (dunkelblau). Das Swope-Teleskop lokalisierte das optische Gegenstück der Quelle als Lichtpunkt in der Galaxie NGC 4993 (mit einem Fadenkreuz markiert).

Diese Mail löste weltweit eine zielgerichtete Aktivität aus, besonders an den Observatorien, für die der vermutete Ort der Quelle am Südhimmel zugänglich war. Hier waren vor allem die Teleskope in Chile gefragt. An den Standorten der Europäischen Südsternwarte ESO, des Las Campanas Observatory der Carnegie Institution und des Cerro Tololo Inter-American Observatory der US-amerikanischen Nationalsternwarte sind dort viele der weltweit leistungsfähigsten Teleskope versammelt.

Die Jagd auf die Kilonova beginnt

Zum Zeitpunkt des Gammablitzes hatte in Chile gerade der Tag begonnen. Immerhin: Nach Einbruch der Dunkelheit rund zehn Stunden später sollte der entsprechende Himmelsabschnitt für ein bis zwei Stunden zugänglich werden. Ein Wettlauf mit der Zeit begann: Würde es gelingen, die Lichtquelle am Himmel rasch genug so genau zu lokalisieren, dass die empfindlichsten der modernen Teleskope das Nachglühen noch würden beobachten, Bilder und Spektren würden aufnehmen können? Erschwerend kam hinzu: Von Tag zu Tag würde die Sonne näher an die betreffende Himmelsregion rücken. Keine optimalen Voraussetzungen also. Zumal sich in dem Suchareal rund 50 Galaxien befanden, die es abzusuchen galt.

Zunächst schlug die Stunde der Durchmusterungsteleskope mit großen Bildfeldern, wie sie zur Suche nach Supernovae und anderen zeitkritischen astronomischen Ereignissen eingesetzt werden. Um 23:33 Uhr Weltzeit war das Swope-Teleskop

am Las Campanas Observatory erfolgreich. Die dortigen Astronomen hatten sich in dem Suchfeld auf Galaxien mit besonders vielen Sternen und Sternentstehungsgebieten konzentriert. In dem neunten Bild, das sie aufnahmen, wurden sie fündig: Knapp elf Bogensekunden vom Zentrum der Galaxie NGC 4993 entfernt entdeckten sie einen neuen Lichtpunkt: Er erhielt die Bezeichnung SSS17a, für Swope Supernova Survey 2017a (siehe Bild oben).

Noch bevor das Team den Fund bestätigt und in einem GCN-Circular allen Suchenden bekanntgegeben hatte, war der Lichtpunkt noch von fünf weiteren Teams entdeckt worden, darunter dem großen Infrarotdurchmusterungsteleskop VISTA der ESO und einem 40-Zentimeter-Teleskop des weltweiten Teleskopnetzwerks des Las Cumbres Observatory. Jetzt, wo die genaue Position bekannt war, konnten auch die Großteleskope zum Einsatz kommen, die recht kleine Bildfelder haben.

Die elliptische Galaxie NGC 4993, in einer Entfernung von rund 130 Millionen Lichtjahren im Sternbild Hydra (Wasserschlange) gelegen, wurde nun Beobachtungsziel einer beispiellosen koordinierten Kampagne. Überall, wo die Galaxie am Nachthimmel zu sehen war, wurden die geplanten Beobachtungsprogramme unterbrochen, und die Aufmerksamkeit aller richtete sich auf die Himmelskoordinaten Rektaszension $13^{\text{h}}09^{\text{m}}48^{\text{s}}.085$, Deklination $-23^{\circ}22'53''.343$. Auch die Weltraumteleskope für Beobachtungen im Ultraviolett und Infrarot sowie im sichtbaren Licht konnten jetzt zum Einsatz kommen.

Insgesamt beteiligten sich mehr als 70 Observatorien mit rund 100 Teleskopen an der Kampagne. Es gibt Schätzungen, denen zufolge etwa 15 Prozent aller weltweit tätigen Astronomen in die Beobachtungen und die nachfolgenden Auswertungen eingebunden waren. Die diversen GCN-Circulars, mit denen sich die beteiligten Beobachter wechselseitig auf dem Laufenden hielten, lesen sich wie eine Art moderner Briefroman der beispiellosen Beobachtungskampagne.

Man beobachtete bei allen zugänglichen Wellenlängen: Die Weltraumteleskope Fermi, INTEGRAL, Swift, Chandra und NuStar nahmen sich des Gamma- und Röntgenbereichs an, unterstützt von den Tscherenkow-Teleskopen H.E.S.S. in Namibia. Die Weltraumteleskope Hubble und Spitzer beobachteten im Optischen und im Infraroten (siehe Bild S. 27). Zu größeren Wellenlängen hin beteiligten sich das ALMA-Observatorium mit seinen mehr als 60 Millimeter-/Submillimeterantennen, das Very Large Array, LOFAR und die Radioteleskope in Effelsberg und Parkes. Für das Weltraumteleskop INTEGRAL konnten die Forscher sogar nachträglich rekonstruieren, dass es ebenfalls einen Überschuss an Gammaphotonen gemessen hatte, als Fermi den Alarm auslöste.

Auch die Neutrino-Observatorien ANTARES, IceCube und Pierre Auger beteiligten sich an der Beobachtungskampagne, konnten aber keine Neutrinos aus der betreffenden Himmelsregion nachweisen – auch dies ein durchaus nicht nutzloses Resultat, da es die Eigenschaften der

schnellen Materieausflüsse nach der Verschmelzung einschränkt.

Allein aus den optischen Spektren hätten die Astronomen schon sagen können, dass sie da ein ganz und gar ungewöhnliches Ereignis verfolgten. Binnen Tagen wechselte die Farbe der beobachteten Kilonova von blau zu tiefrot, wurde das anfangs sehr starke UV-Licht schwächer und die Nahinfrarot-Anteile nahmen zu, viel schneller als bei allen bislang beobachteten Sternexplosionen. Nach etwa einer Woche verblassten auch die Anteile im sichtbaren und Nahinfrarotlicht.

Neue Einblicke

Diese Abfolge war, wie man sie für eine Neutronenstern-Verschmelzung erwartet hatte, sollten doch das herausgeschleuderte Material das UV- und sichtbare Licht nach und nach abschwächen, Nahinfrarotlicht aber weitgehend ungehindert passieren lassen (siehe Grafik S. 32). Insgesamt war die Kilonova im Optischen heller als erwartet – offenbar schirmte die Materiehülle das sichtbare Licht doch nicht so kräftig ab wie zuvor vermutet.

Die Spektren zeigten außerdem im Vergleich mit entsprechenden Modellen die Spuren von schweren Elementen – genau so, wie man es für eine Neutronenstern-Verschmelzung erwarten würde, bei der Elemente jenseits von Eisen durch schnellen Neutroneneinfang (den r-Prozess)

Gammastrahlenausbruchs. Die Gravitationswellensignale zeigen an, dass dort ein kompaktes Objekt von 1,36 bis 2,26 Sonnenmassen mit einem weiteren kompakten Objekt von 0,86 bis 1,36 Sonnenmassen verschmolzen ist – der Masse nach also eindeutig Neutronensterne.

Gefolgt wurde die Verschmelzung von einem vergleichsweise schwachen kurzen Gammablitz. Etwas später folgte eine Kilonova im Bereich des UV-, sichtbaren und Infrarotlichts, angetrieben durch radioaktive Zerfälle von bei der Verschmelzung entstandenen schweren Atomkernen; einige Spektren solcher schweren Elemente wurden auch direkt nachgewiesen. Insgesamt, so die Schätzung aus den Beobachtungsdaten, dürfte die Masse der erzeugten schweren Elemente dem 16000-Fachen der Erdmasse entsprechen – darunter alleine zehn Erdmassen an Gold und Platin.

Kombiniert man diese Mengenschätzung mit einer Schätzung der Häufigkeit solcher Ereignisse, dann könnten Neutronenstern-Verschmelzungen sogar für die Produktion so gut wie aller Elemente schwerer als Eisen verantwortlich sein, die durch den r-Prozess entstehen; auf Modelle, die zu erklären versuchen, wie solche Elemente auch in Supernovae erzeugt werden könnten, ließe sich dann vollständig verzichten. (Für Elemente bis hin zu Eisen blieben Supernovae freilich nach wie vor die Haupterzeuger!) Nur der

Die verschmelzenden Neutronensterne erzeugten schwere Elemente – darunter zehn Erdmassen an Gold und Platin.

erzeugt und in den Weltraum hinausgeschleudert werden. Alleine schon die tiefrote Färbung, die das Objekt nach einiger Zeit zeigte, wies in diese Richtung – die entsprechende Materie aus schweren Kernen absorbiert sichtbares Licht viel stärker als beispielsweise die von einer Supernova ausgeworfene Materie und erzeugt so eine charakteristische tiefrote Farbe.

Die Astronomen untersuchten diesen Aspekt aber noch sehr viel genauer; in den entsprechenden Modellen, mit denen die Beobachtungsdaten verglichen werden, gehen die verzweigten Abläufe der Kernreaktionsketten, die Geometrie des Entstehungsszenarios und die Art und Weise ein, wie elektromagnetische Strahlung unter solchen Umständen nach außen dringt.

Insgesamt ergab sich das erste umfassende Bild von der Natur eines kurzen

langsame Neutroneneinfang in einem Spätstadium bestimmter Sterne (der so genannten AGB-Sterne) trägt bei einigen der schweren Elemente noch merklich zur Häufigkeit bei. Auf einen Schlag war eine weitere grundlegende Frage entschieden worden, diesmal zur Entstehung der chemischen Elemente im Universum.

Wechselwirkungen der freigesetzten hochenergetischen Teilchen mit dem interstellaren Gas der Umgebung setzten dann mit noch größerer Verzögerung Röntgenstrahlung frei. Beobachtet wurde sie neun Tage nach dem Gammablitz von dem Weltraumteleskop Chandra. Eine Woche später folgte die erste Radiostrahlung, derer sich eine Vielzahl von Radioteleskopen rund um die Welt annahmen, darunter auch das 100-Meter-Radioteleskop in Effelsberg in der Eifel.

DEEP SPACE 20" F3.6



Abbildung zeigt Prototypen

€ 6990⁰⁰*



Eigenschaften

- 20" F3.6 DOBSON
- Öffnung: 500 mm
- Brennweite: 1800 mm
- Revolutionäre Neukonstruktion
- Design by MDA - Made in Hungary
- Endmontage in Deutschland
- QUARZ Haupt- und Fangspiegel
- GSO Qualitätsoptik mit Zertifikat
- Einblickhöhe im Zenit nur 168cm
- Pulverbeschichtete Alu-Konstruktion
- Gesamtgewicht nur 53kg
- Innovative Kundenwünsche realisiert

Lieferbar
ab 15.11.2017!

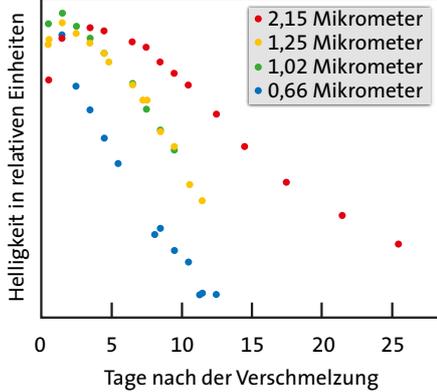
... denn Öffnung ist durch
nichts zu ersetzen.

© 2017 Explore Scientific GmbH - Alle Rechte vorbehalten. / Advert_Gitterrohr-Dobson-20-71x297_de_EXFSC_v082017a

EXPLORE
SCIENTIFIC



*Unverbindliche Preisempfehlung des Herstellers in Euro inkl. MwSt. (DE), zzgl. Versand.



Die Helligkeit der Kilonova in NGC 4993 veränderte sich in verschiedenen Farbregionen unterschiedlich schnell. Im blauen Licht verblasste das Objekt schnell, aber bei längeren Wellenlängen, insbesondere im nahen Infrarotbereich des Spektrums, hellte es sich etwas auf und verblasste dann viel langsamer. Infolgedessen änderte sich die Farbe des Objekts innerhalb von vier Wochen von sehr blau auf sehr rot.

Insgesamt passen die Beobachtungen gut zu den bisherigen theoretischen Vorstellungen. Einige Aspekte kamen für die Astronomen allerdings durchaus unerwartet. Der Gammablitz GRB170817A selbst war erstaunlich schwach – das stellte sich allerdings erst heraus, als klar wurde, dass uns dieses Ereignis vergleichsweise nahe ist. Mit einem Abstand von 130 Millionen Lichtjahren ist dies sowohl der uns nächste Gammastrahlenausbruch als auch die uns nächste nachgewiesene Quelle von Gravitationswellen! Das bedeutete freilich auch: Was die Forscher anfangs für einen normal hellen, Milliarden von Lichtjahren entfernten Gammablitz gehalten hatten, war in Wirklichkeit ein sehr nahes Ereignis und besaß damit gar keine so große Leuchtkraft wie angenommen.

Im Gegensatz zu anderen kurzen Gammablitzern wurde GRB170817A auch nicht sofort von starker Röntgenstrahlung begleitet. Dies alles deutete darauf hin, dass der Jet des Gammablitzes nicht direkt auf die Erde zeigte, sondern knapp an ihr vorbei, so dass irdische Teleskope den Jet nicht direkt, sondern schräg beobachteten. Dass solche Beobachtungen gelingen könnten, war rund zwanzig Jahre zuvor erstmals vorgeschlagen worden; hier gab es nun den ersten direkten Beleg.

Die genaue Auswertung der reichhaltigen Datensätze dürfte noch einige weitere Monate in Anspruch nehmen, und insbesondere die Radioteleskope sind noch weiter am Beobachten – vielleicht treffen die herausgeschleuderten Elemente ja noch auf weitere Wolken interstellaren Gases.

Die Messungen der Gravitationswellen erlaubten dabei bereits erste Rückschlüsse auf die Eigenschaften von Neutronensternmaterie. Bestimmte Zustandsgleichungen, die bei gegebener Masse zu einem größeren Radius von Neutronensternen führen, sind den Messungen zufolge mit einiger Sicherheit ausgeschlossen;

solche größeren Neutronensterne hätten bereits bei größeren Abständen verschmelzen müssen, als es den Signalen zufolge der Fall war.

Für die Astronomen haben die neuen Beobachtungen noch eine weitere fundamentale Bedeutung. Allein aus der Wellenform der Gravitationswellen-Chirps lässt sich nämlich abschätzen, wie stark das betreffende Signal am Ort der Quelle war. Im Vergleich mit der Stärke der nachgewiesenen Welle ergibt sich direkt die Entfernung des Verschmelzungsereignisses. Für GW170817 beträgt diese Chirp-Entfernung 130 Millionen Lichtjahre, mit einer Unsicherheit von 25 Millionen Lichtjahren. Das entspricht den früheren Abschätzungen der Entfernung von NGC4993 und bestätigt somit die bisherigen astronomischen Methoden der Entfernungbestimmung.

Diese herkömmlichen Entfernungen beruhen auf der astronomischen Entfernungsleiter, einer Kombination aufeinander aufbauender Verfahren, die vom Sonnensystem zu den nächsten Sternen und von dort über mehrere Stufen zu den fernsten bekannten Galaxien führt. Dabei spielen Radarmessungen, Positionsbestimmungen sowie Annahmen über die Eigenschaften von Galaxien und Supernovae eine Rolle. Diese komplexe Verkettung von Verfahren ließ sich nun direkt überprüfen, wenn auch nur an einem einzigen Datenpunkt und noch nicht sehr genau – aber durch einen Vergleich mit einem gänzlich unabhängigen Verfahren, der Chirp-Entfernung, das seinerseits nur von grundlegenden Gesetzen der Physik abhängt, nämlich von denen der allgemeinen Relativitätstheorie.

Und alles andere als unerwartet, aber trotzdem erwähnenswert: Dass Gammastrahlen und Gravitationswellen nach einer Reisezeit von 130 Millionen Jahren in so kurzem Abstand, nämlich weniger als zwei Sekunden auseinander, hier auf

der Erde ankamen, bestätigt, dass Gravitationswellen sich tatsächlich mit Vakuumlichtgeschwindigkeit ausbreiten, so wie von der allgemeinen Relativitätstheorie vorhergesagt.

Am 16. Oktober 2017 verkündeten die Forscher der LIGO- und Virgo-Kollaborationen und der beteiligten Observatorien ihre Ergebnisse. Die Öffentlichkeit war durchaus nicht unvorbereitet. Denn bereits ab Ende August hatten sich sehr konkrete Gerüchte verbreitet. Die Beobachtungs-Logbücher einer Reihe von Observatorien sind öffentlich zugänglich, und dass sich am 17. August nach der Fermi-Alarmierung ungewöhnlich viele Großteleskope auf die sonst eher unscheinbare Galaxie NGC4993 richteten, sprach Bände.

Einstieg in die Multimessenger-Astronomie

Die Monate im Sommer und Herbst 2017 waren für die Forscher sehr aufregend und arbeitsreich. Wie gesagt, hatten die LIGO- und Virgo-Kollaborationen bereits Ende September das von der Kollision Schwarzer Löcher herrührende Gravitationswellensignal GW170814 bekanntgegeben – das erste, das gleich mit drei Detektoren nachgewiesen und dessen Quelle entsprechend genau lokalisiert werden konnte. Der Nachweis mit drei Detektoren erlaubte es dabei erstmals, eine direkte Vorhersage über die Eigenschaften von Gravitationswellen nachzuprüfen, die aus der allgemeinen Relativitätstheorie folgt: dass die Verzerrung aufgrund dieser Wellen nur senkrecht zur Ausbreitungsrichtung stattfindet, in der Sprache der Physiker: dass solche Wellen transversal sind.

Mitten in die Auswertung weiterer Gravitationswellensignale fiel am 3. Oktober die Bekanntgabe, dass drei der LIGO-Pioniere den Physik-Nobelpreis des Jahres 2017 erhalten (siehe Artikel S. 41 in diesem Heft). Damit würdigte das Nobel-Komitee in Stockholm die große Bedeutung, die der erstmalige direkte Nachweis von Gravitationswellen im September 2015 für die Wissenschaft hat. Mit den neuen Ergebnissen zu GW170817 hat nun mit einem Paukenschlag die Ära der Mehrkanalbeobachtungen in der Astronomie begonnen, die neben elektromagnetischer Strahlung und Teilchenströmen auch Gravitationswellen als astronomische Informationsträger nutzt. Die Beobachtungen ab dem 17. August, mit denen die Natur der kur-

zen Gammastrahlenausbrüche aufgeklärt wurde, zeigt eindrucksvoll, wie sich die einzelnen Informationsträger ergänzen und Daten zu ganz unterschiedlichen Aspekten ein und desselben Objekts liefern, die sich zu einem aufschlussreichen Gesamtbild fügen. Für diese umfassende Zusammenarbeit zwischen den verschiedenen Nachweis- und Beobachtungstechniken wurde bereits der Begriff Multimesseger-Astronomie geprägt.

Nach dem Ende der gemeinsamen Messkampagne im August sind die Wissenschaftler von LIGO und Virgo nun dabei, ihre Detektoren zu modifizieren und ihre Empfindlichkeit ein weiteres Mal zu steigern. Die Leistung der Laser wird dazu noch einmal erhöht. Zudem soll zum ersten Mal gequetschtes Licht zum Einsatz kommen – das ist eine trickreiche Technik, mit der sich das durch Quanteneffekte bedingte Rauschen noch weiter dämpfen lässt. Am deutsch-britischen Gravitationswellendetektor GEO600 in Hannover wird dieses Verfahren bereits erfolgreich in großem Stil eingesetzt.

Im Herbst 2018 soll die dritte gemeinsame Messkampagne von LIGO und Virgo

Mit einem Paukenschlag begann eine neue Ära der Astronomie. Doch das Spannendste liegt noch vor uns.

beginnen; durch die Empfindlichkeitssteigerungen sollten sich Verschmelzungsereignisse von Schwarzen Löchern und Neutronensternen dann in einem rund acht Mal größeren Raumvolumen nachweisen lassen als bisher – und entsprechend häufiger sollten solche Nachweise werden (vergleiche das Interview S. 38).

Wenn alles nach Plan läuft, treten wir damit bald in eine Ära ein, in der einzelne Gravitationswellennachweise nichts besonderes mehr sind; dafür wird dann die Statistik dieser Ereignisse interessant: Wie viele sich umkreisende Schwarze Löcher, wie viele entsprechende Neutronensterne gibt es in unserer kosmischen Umgebung? Wie sind ihre Massen verteilt, und was sagt uns das über ihre Entstehung und, allgemeiner, über die Entstehung sehr massereicher (Vorläufer-)Sterne im Universum?

Eine weitere Anwendungsmöglichkeit hat Bernard Schutz von der Universität Cardiff (und ehemals Direktor am Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik in Potsdam) bereits 1986 vorgeschlagen: Er wies darauf hin, dass die Gravitations-

wellen von Doppelneutronenstern-Verschmelzungen direkte Informationen zur Kosmologie liefern. Bei Neutronenstern-Verschmelzungen wie GW170817 gibt es nicht nur die direkte Chirp-Entfernungsbestimmung mittels Gravitationswellen. Aus den elektromagnetischen Beobachtungen lässt sich zusätzlich üblicherweise die Rotverschiebung bestimmen; diese ist ein Maß dafür, wie schnell sich die betreffende Galaxie von uns entfernt. In einem expandierenden Universum wie unserem hängen Entfernung und Rotverschiebung einer fernen Galaxie linear zusammen. In einem Entfernungs-Geschwindigkeits-Diagramm (dem Hubble-Diagramm) bilden die entsprechenden Datenpunkte eine Gerade, deren Steigung so etwas wie den derzeitigen Schwung der kosmischen Expansion anzeigt; diese Größe ist die so genannte Hubble-Konstante.

Mit nur zehn direkt nachgewiesenen Doppelneutronenstern-Verschmelzungen bis hinaus zu einer Entfernung von knapp 350 Lichtjahren, so die Abschätzung von Schutz, ließe sich die Hubble-Konstante mit einer Genauigkeit von drei Prozent gänzlich unabhängig von den herkömmli-

chen Methoden zur astronomischen Entfernungsmessung bestimmen. Das wäre dann entweder eine wichtige fundamentale neuartige Bestätigung unserer kosmologischen Modelle. Oder aber es ergibt sich eine unerwartete Abweichung, und damit eine interessante neue Erkenntnis über das Universum. Der erste Datenpunkt, der aus der Beobachtung von GW170817 abgeleitet wurde, ist jedenfalls mit einem Wert von 70 Kilometer pro Sekunde und pro Megaparsec konsistent mit den Werten, die mit anderen Verfahren abgeleitet wurden.

Insgesamt ist es sicher nicht übertrieben, festzustellen, dass wir am Beginn einer neuen Ära stehen. Und das Spannendste dürfte noch vor uns liegen. Bisher hat noch jedes neue astronomische Fenster, jeder neu erschlossene Wellenlängenbereich komplett unerwartete Entdeckungen mit sich gebracht. Die können wir uns vom Blick durch das Einstein-Fenster, von der Astronomie mit Hilfe des direkten Nachweises von Gravitationswellen, mit einiger Zuversicht auch erhoffen. ©



MARKUS PÖSSEL ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Max-Planck-Institut für Astronomie in Heidelberg, und er leitet das Haus der Astronomie, ein Zentrum für astronomische Öffentlichkeits- und Bildungsarbeit. Zuvor forschte er am Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik in Potsdam-Golm, wo er auch das Webportal »Einstein Online« gestaltete.

Literaturhinweise

- Abbott, B. P. et al.:** GW170817: Observation of Gravitational Waves from a Binary Neutron Star Inspiral. In: Physical Review Letters 119, 161101, 2017
- Kann, D. A. et al.:** Kosmische Gammastrahlenausbrüche. In: Sterne und Weltraum 12/2007, S. 42–50
- LIGO Scientific Collaboration et al.:** Multi-Messenger Observations of a Binary Neutron Star Merger. In: The Astrophysical Journal Letters 848:L12, 2017
- LIGO Scientific Collaboration et al.:** Gravitational Waves and Gamma-Rays from a Binary Neutron Star Merger: GW170817 and GRB 170817A. In: The Astrophysical Journal Letters 848:L13, 2017
- Metzger, B. D.:** Kilonovae. In: Living Reviews in Relativity 20:3, 2017
- Pössel, M., Rezzolla, L.:** Mit Gravitationswellen ins Innere der Neutronensterne. In: Sterne und Weltraum 1/2009, S. 40–43
- Reichert, U.:** Nobelpreis für Physik – indirekter Nachweis von Gravitationswellen. In: Spektrum der Wissenschaft 12/1993, S. 21–23
- Reichert, U.:** Eine neue Ära der Astrophysik. Das Zeitalter der Gravitationswellen-Astronomie hat begonnen. In: Sterne und Weltraum 4/2016, S. 24–35
- Schutz, B. F.:** Determining the Hubble Constant from Gravitational Wave Observations. In: Nature 323, S. 310–311, 1986
- Stauder, J., Rezzolla, L.:** Verschmelzende Neutronensterne können die kurzen Gammablitz erzeugen! In: Sterne und Weltraum 7/2011, S. 22–23

Dieser Artikel und Weblinks im Internet: www.sterne-und-weltraum.de/artikel/1513209