

Zeitschrift:	Orion : Zeitschrift der Schweizerischen Astronomischen Gesellschaft
Herausgeber:	Schweizerische Astronomische Gesellschaft
Band:	76 (2018)
Heft:	1
 Artikel:	Es geschah in einer weit, weit entfernten Galaxis ... : Kosmischer Paukenschlag
Autor:	Geiger, Hansjürg
DOI:	https://doi.org/10.5169/seals-914009

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 15.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Mikrowellenhintergrundstrahlung zu messen, um dabei Gravitationswellen von der Inflation zu entdecken. Im März 2014 wurde von der Kollaboration BICEP die Entdeckung der B-Mode in der Hintergrundstrahlung vermeldet. Im September 2014 veröffentlichte dann jedoch die Planck Kollaboration eine Analyse ihrer Daten, nach der die BICEP-Daten durch polarisierte Emission von kosmischem Staub der Milchstrasse verursacht worden sein könnten. Im Januar 2015 wurde die Entdeckung der B-Mode von den Forschern offiziell zurückgezogen. In der Zwischenzeit wurde weiter fleissig Daten gesammelt, und wir können hoffen, dass wir bald Neues von diesem Experiment hören werden.

Die Grenzen des «Lichtes» sind erreicht

Ein weiterer Informationsträger vom frühen Universum neben Licht und Gravitationswellen sind Neutrinos, also elektrisch neutrale Elementarteilchen mit sehr geringer Masse. Wie der kosmische Mikrowellenhintergrund ist der kosmische Neutrino hintergrund ein Überrest des Urknalls: Er geht auf die Entkopplung der Neutrinos von der Materie rund zwei Sekunden nach dem Urknall zurück. Da der Mikrowellenhintergrund entstand, als das Weltall rund 380'000 Jahre alt war, kann der Neutrino hintergrund mehr Details vom Urknall liefern. Da Neutrinos mit einer geringen Energie nur sehr schwach mit Materie in Wechselwirkung treten, sind sie sehr schwierig nachzuweisen. Es gibt jedoch überzeugende indirekte Hinweise auf sein Bestehen. Das geplante Experiment PTOLEMY hat als Ziel, den Neutrino hintergrund direkt zu messen.

Fast am Urknall

Zusammenfassend kann man sagen, dass wir beim Informationsträger «Licht» mit der kosmischen Mikrowellenstrahlung an unsere Grenze gelangt sind: Weiter weg können wir nicht sehen. Es stehen uns aber mit den Gravitationswellen und Neutrinos andere Informationsträger zur Verfügung, mit denen wir das Universum mit einem Alter von lediglich 10^{-35} Sekunden erforschen können. ■

Es geschah in einer weit, weit entfernten Galaxis ...

Kosmischer Paukenschlag

■ Von Dr. Hansjürg Geiger

Eine kosmische Kollision liess das Weltall erzittern. Gravitationsphysiker hier auf der Erde empfingen die Signale, gerieten ins Schwärmen, wussten plötzlich, woher das viele Gold stammt und kassierten Nobelpreise. Wieso?

Für einen Physiker muss es eine schmerzliche Erkenntnis gewesen sein. ALBERT EINSTEIN hatte eine neue Theorie entwickelt, eine sensationelle, völlig neue Weltsicht erarbeitet, welche die alten Überzeugungen

nur noch als Spezialfall einer viel komplexeren Wahrheit erschienen liessen. Aber jede Idee eines Naturwissenschaftlers ist bekanntlich nur gerade so gut, wie die Ergebnisse der Versuche, die er zur Über-

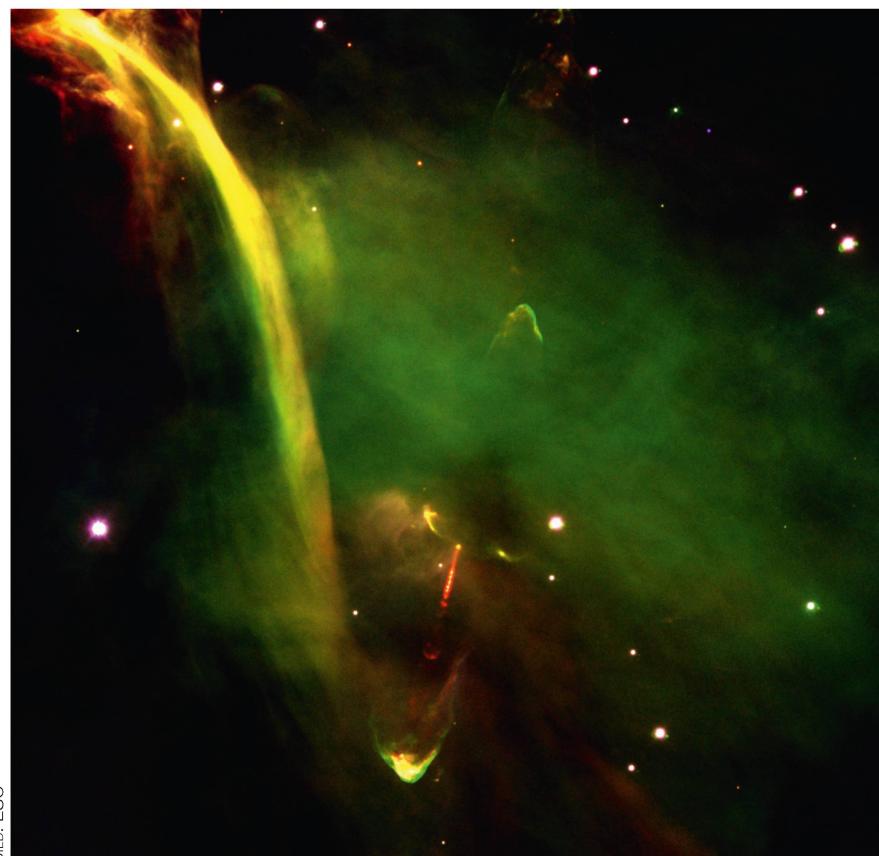


Abbildung 1: Schon bei der Geburt von Sternen kommt es zu gewaltigen Strahlungsausbrüchen. Die Aufnahme zeigt das Objekt HH-34 im Sternbild Orion, 1500 Lichtjahre von uns entfernt. Der junge Stern produziert zwei Jets, die mit grosser Wucht in das umgebende interstellare Umfeld dringen. Im «unteren» Jet, im rot leuchtenden Strahl, sind mehrere Blasen erkennbar, die von einzelnen Strahlungsausbrüchen stammen.

prüfung durchführen kann. Das Problem waren die Dimensionen, mit denen sich EINSTEIN zu Beginn des letzten Jahrhunderts auseinandersetzte. Er wollte nichts geringeres als ein neues Modell des Universums, der Welt als Ganzes, entwerfen. Und dies bedeutete nicht mehr und nicht weniger, als dass er seine Einfälle in den grössten Dimensionen, im Weltall selbst, testen musste. Immerhin gab es dazu verschiedene Möglichkeiten, wie die Beugung der Lichtstrahlen ferner Sterne in der Nähe einer grossen Masse, die bei einer Sonnenfinsternis gemessen werden konnte, oder die Abweichungen in der Bahnbewegung des Planeten Merkur, die schon seit über 50 Jahren bekannt waren und sich nun mit EINSTEINS Formeln elegant erklären liessen. Ein Effekt aber, den die mühsam gelösten, kniffligen Gleichungen, vermuten liessen und der seine Theorien in kosmischen Grössenordnungen bestätigen könnte, war so schwach zu erwarten, dass es unmöglich scheint, ihn auch mit den allerbesten Instrumenten nachzuweisen. Riesige Mengen an schnell bewegten Massen, so erzählten ihm die Resultate seiner Formeln zur Gravitationstheorie, müssten das ganze Universum, den Raum und die Zeit, erbeben lassen. EINSTEIN folgerte, bei solch wahrhaftig kosmischen Ereignissen müssten Erschütterungen, Wellen im Raumzeit-Gefüge des Alls entstehen, ähnlich Wasserwellen in einem Tümpel, wenn ein Stein geworfen wird. Aber eben, leider, nur in ganz winzig kleinen Ausschlägen. Viel zu gewaltig müssten die Massen sein, unvorstellbar riesig die Kräfte sie zu bewegen, um auch nur ein winziges, bei uns messbares Erzittern des Universums auszulösen.

Pionierzeit der Kosmologie

Es war die Zeit, als die ganz grossen Observatorien, mit denen wir heute die fernsten Galaxien beobachten, noch nicht einmal geplant waren. Trotzdem begannen die Astrophysiker bereits damals zu ahnen, dass beim Tode grosser Sterne, in den katastrophischsten Explosionen die sie sich vorstellen konnten, neue, exotische Objekte entstehen könnten. Wir nennen diese Ungetüme heute Neutronensterne und Schwarze Löcher. Es dauerte aber bis nach

dem Tode von ALBERT EINSTEIN im Jahre 1955, bis die Revolution im Wissen über das Weltall durch neue Beobachtungsinstrumente nochmals so richtig Fahrt aufnahm. Die lange vermuteten Massemonster konnten erstmals direkt beobachtet werden. Was aber könnte diese Riesen so extrem beschleunigen, dass sie die von EINSTEIN vorausgesagten Gravitationswellen auslösen und sein Weltbild weiter erhärten könnten?

Das Kleine und das Grosse

Um verstehen zu können, was sich hinter den Gravitationswellen verbirgt, mussten die Kosmologen erst begreifen, wie die Schwergewichte im Universum entstehen und wie sie gebaut sind. Dies wiederum wurde erst möglich, als ihre Kollegen entdeckten, wie die kleinsten Bausteine der Materie, die Atome, konstruiert sind.

Für einen Astrophysiker muss es eine faszinierende Zeit gewesen sein, vor einhundert Jahren, als mit der Relativitätstheorie von EINSTEIN und der Geburt der modernen Atomtheorie beinahe gleichzeitig zwei entscheidende Durchbrüche gelangen. Los ging es 1911, als ERNEST RUTHERFORD, HANS GEIGER und ERNEST MARSDEN bewiesen, dass ein Atom aus einem absolut winzig kleinen, positiv geladenen Kern aus Protonen und einer relativ grossen Hülle mit negativ geladenen Elektronen besteht. Kurz danach, 1913, brachte NIELS BOHR etwas Ordnung in das wirre Durcheinander der Elektronen, indem er diese Elementarteilchen auf kugelförmig angeordneten Schalen unterbrachte. Die Parallelen zum kopernikanischen Modell der Planetenbahnen waren unübersehbar.

Das BOHR'sche Atommodell war zwar noch eine ziemlich simple Annäherung an die modernen Varianten, aber sie zeigte den Wissen-



Abbildung 2: Die Galaxie NGC 4993, aufgenommen durch das Very Large Telescope der europäischen Südsternwarte auf dem Cerro Paranal in Chile. Die Kilonova leuchtet «links» neben dem «oberen» Arm der Milchstrasse. NGC 4993 ist 12.4^{mag} hell und vom Hubble-Typ E-SB0. Sie ist im Sternbild der Wasserschlange am Südsternhimmel zu sehen und ist schätzungsweise 130 Mio. Lichtjahre von uns entfernt. Entdeckt wurde sie am 26. März 1789 von WILHELM HERSCHEL.

schaftlern eine für unser Thema ganz wichtige Erkenntnis, nämlich die extreme Winzigkeit des Kerns im Vergleich zur Atomhülle. Ein Zahlenbeispiel am kleinsten und einfachsten Atom, dem Wasserstoffatom, mag dies verdeutlichen. Es besteht aus einem einzigen Proton im Kern und einem einsamen Elektron in der Atomhülle. Könnte sein Kern auf 1 mm Durchmesser vergrößert werden, so würde ihn das Elektron im gleichen Massstab in etwas mehr als 20 m Entfernung umkreisen. Berücksichtigen wir jetzt noch die «Grösse» des Elektrons, das etwa 2000-mal kleiner ist als das Proton, so lässt sich wahrlich sagen, dass ein Atom eigentlich aus beinahe «Nichts» besteht. Es sind immens starke Kraftfelder, die dieses seltsame Gebilde zusammenhalten, das Elektron auf seine Bahn zwingen und seinen Absturz in den Kern verhindern.

Aber was wäre, wenn sich eine Kraft aufbauen liesse, welche stärker ist als die Kräfte, die das Atom in Form halten? Kräfte, die das Elektron quasi in das Proton des Atomkerns drücken könnten? Solche Überlegungen machten sich die Wissenschaftler damals wohl noch kaum. Als aber Sir JAMES CHADWICK 1932 das dritte Elementarteilchen eines Atoms, das Neutron, entdeckte, drängten sich derartige Ideen förmlich auf. Zerfällt nämlich ein Neutron, so entsteht ein Elektron und ein Proton (und ein Elektron-Antineutrino). Also müsste es doch eigentlich umgekehrt auch gehen, nämlich ein Elektron und ein Proton (plus ein Elektronneutrino) zu einem Neutron zu vereinigen. Dies ist tatsächlich möglich. Allerdings sind dazu unvorstellbar riesige Kräfte nötig, die es in der Natur aber tatsächlich gibt, nämlich dann, wenn ein Stern sein atomares Brennmaterial aufgebraucht hat. Aber bevor es soweit ist, werden in einem jungen Stern zunächst die leichtesten Elemente des Periodensystems zusammengeschweisst. Das beginnt, ganz grob beschrieben, wenn sich eine Wolke aus Gas und Staub zusammenzieht. Dabei spielen die Gravitationskraft und Magnetfelder eine wichtige Rolle. Im sich verdichtenden Materiekörpern steigt der Druck und damit auch die Temperatur, was nichts anderes heißt, als dass sich die Teilchen in der Wolke immer flinker bewegen. Irgendwann sind sie so schnell, dass

Bild: ESO/NASA



Abbildung 3: Im Verlaufe weniger Tage veränderte sich das Licht der Kilonova von blau über grün nach rot. Zeichen für die Abkühlung nach dem Zusammenprall und der verschiedenen atomaren Kernreaktionen.

sie die Abstossungskräfte der positiv geladenen Kerne überwinden. Jetzt können in einem mehrstufigen Vorgang vier Wasserstoffkerne zu einem Heliumkern verschmelzen. Dabei werden gigantische Energymengen frei, die den Stern weiter aufheizen (oder einer Wasserstoffbombe ihre Zerstörungskraft geben). Der Stern beginnt zu «leuchten».

Ein Stern wird zum Riesenatom

Die gewaltige Hitze, die das atomare Feuer im Innern des jungen Sterns

entfacht, hat aber noch eine andere Folge. Sie dehnt den Stern aus und wirkt der Gravitationskraft entgegen, die den Stern zusammendrückt. Es dauert nicht lange, wenigstens für kosmische Massstäbe, bis die beiden Kräfte einen Gleichgewichtszustand erreichen. Der Stern besitzt nun einen bestimmten Radius, der von seiner Masse abhängt.

Je nach Grösse des Sterns dauert das «Brennen» des Wasserstoffs in seinem Zentrum länger oder kürzer. In massereichen Sternen sind der Druck und die Hitze so gewaltig, dass der Brennstoff schnell aufge-

Bild: ROBIN DIENEL/CARNEGIE INSTITUTION

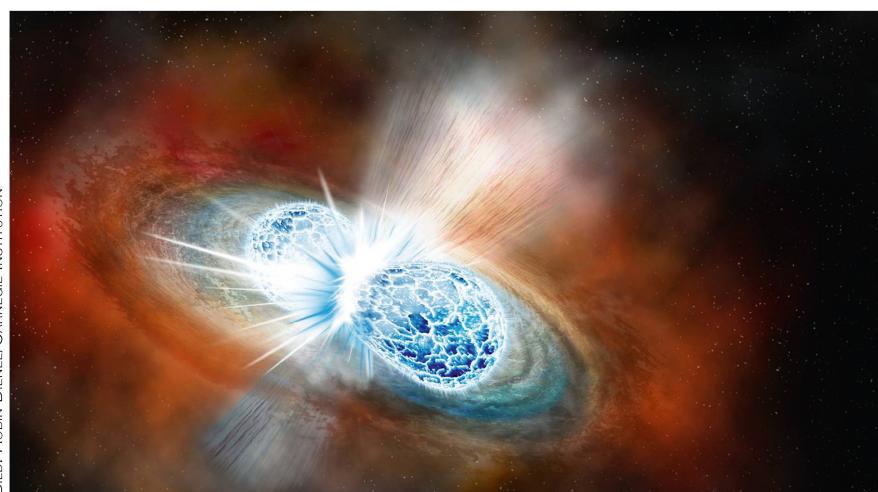


Abbildung 4: Zeichnerische Darstellung der Verschmelzung von zwei Neutronensternen.

braucht wird. Kleinere Sterne dagegen können viele Milliarden Jahre gleichmässig strahlen. Allen Sternen gemeinsam ist aber, dass sich das Helium wegen seiner Masse im Zentrum ansammelt. Damit steigen dort der Druck und die Temperatur, so dass irgendwann neue Kernreaktionen möglich werden. Helium «verbrennt» zu Kohlenstoff, dieser «sinkt» wiederum ins Zentrum, zündet bei genügend Druck und Hitze neue Reaktionen, Neon entsteht, später Sauerstoff, Silizium, Nickel und andere Elemente des Periodensystems. Weil der Stern dabei immer heißer wird, dehnt er sich aus. Das Spielchen geht so weiter, bis sich bei Sternen mit mindestens zwölfacher Sonnenmasse das Element Eisen anreichert.

Jetzt wird's kritisch. Denn Eisen kann unter den herrschenden Bedingungen keine weiteren atomaren Reaktionen mehr durchführen. Dazu reichen der Druck und die Hitze im Stern ganz einfach nicht aus. Die Teilchen sind zu langsam. Das atomare Feuer erlischt, die aufblähende Kraft stoppt. Schlagartig setzt sich nun die gewaltige Gravitationskraft des Riesensterns durch. Zunächst kollabiert das Zentrum, dann stürzen die äusseren Schichten auf seinen Kern, fliegen von dort wieder weg, angetrieben

durch Neutrinos, neuen Teilchen, die beim Kollaps entstehen. Das Material durchmischt sich mit «kühlerer» einfallender Materie und fällt wieder auf den Kern zurück. Erst wenn sich ein genügend hoher Druck durch die Neutrinos aufgebaut hat, prallen die Teilchen endgültig vom Kern ab und fliegen mit grosser Wucht nach aussen weg. Der Stern explodiert.

Der ganze Vorgang läuft zunächst nur im Innern des Sterns ab. Äußerlich sähe ein Beobachter dem todgeweihten Himmelskörper zunächst nicht viel an. Erst Tage nach dem Kollaps des Zentrums erreichen die abgestossenen Teilchen die äusseren Schichten. Der Stern wird zur Supernova. Spektakulär aus der Ferne, Bad News aus der Nähe, denn die immense Strahlungskraft sterilisiert alles, was in der Nachbarschaft möglicherweise belebt sein könnte. Niemand wird uns also einen YouTube-Film direkt vom Ort des Geschehens hochladen.

Der Stern ist damit «tot». Aber wie bei jedem Kadaver beginnt nun die Verwesung. Die ohne genügend Gegenkraft wirkende Gravitation drückt die Sternleiche mit brutaler Kraft zusammen, so stark, dass bei grossen Sternen im Innern die Teilchen zu Neutronen verschmelzen. Ein Neutronenstern entsteht,

der eigentlich nichts anderes ist, als ein gigantischer Atomkern. Bei noch grösseren Sternen, ab etwa vierzig Sonnenmassen, kann nichts mehr die Gravitationskraft stoppen. Sie wirkt wie eine kosmische Schrottpresse und quetscht die Materie noch viel stärker zusammen, bis ein Schwarzes Loch entsteht. Für das Periodensystem der Elemente bedeutet eine Supernova-Explosion die Geburt neuer Atomsorten. Jetzt ist genügend Energie vorhanden, um chemische Elemente mit höheren Ordnungszahlen entstehen zu lassen. Allerdings längst nicht alle und auch nicht in den Mengen, die im Universum gefunden werden. Ein anderer, noch gewaltiger Vorgang muss also für die Existenz der schweren Elemente verantwortlich sein. Diesen Vorgang glauben die Astronomen nun beobachtet zu haben. Und sie haben für diese Zuversicht sehr gute Argumente.

Kosmische Schubser

Es war am 17. August 2017, als um 14:41:06 Uhr MESZ zwei Raumsonden in der Erdumlaufbahn einen kurzen, heftigen Anstieg der Gammastrahlung, einen Gammablink, registrierten. Dies war an sich noch nicht bemerkenswert, gelingen solche Beobachtungen doch wöchentlich mehrfach. Was die Wissenschaftler aber förmlich aus dem Häuschen brachte, war die Tatsache, dass praktisch gleichzeitig, im Bundesstaat Washington, das LIGO-Observatorium ebenfalls Impulse auffing.

Dieses Messgerät wurde gebaut, um Gravitationswellen nachzuweisen. Es besteht aus zwei vier Kilometer langen Armen, die rechtwinklig zueinanderstehen. Durch beide Arme wird ein Laserstrahl geschickt und mehrfach gespiegelt. Dies vergrössert die Lauflänge der Strahlen auf über 1'100 km und erhöht die Empfindlichkeit des Gerätes massiv. Trifft eine Gravitationswelle auf das Observatorium, staucht oder dehnt sie die beiden Arme unterschiedlich, je nach Richtung, aus der sie kommt. Durch die enorme Lauflänge der Laserstrahlen kann das Instrument Unterschiede in den beiden Armlängen bis zu einem zehn Trilliardstel messen (10^{-22})! Bei dieser Genauigkeit reichen natürlich kleinste Effekte in der Um-

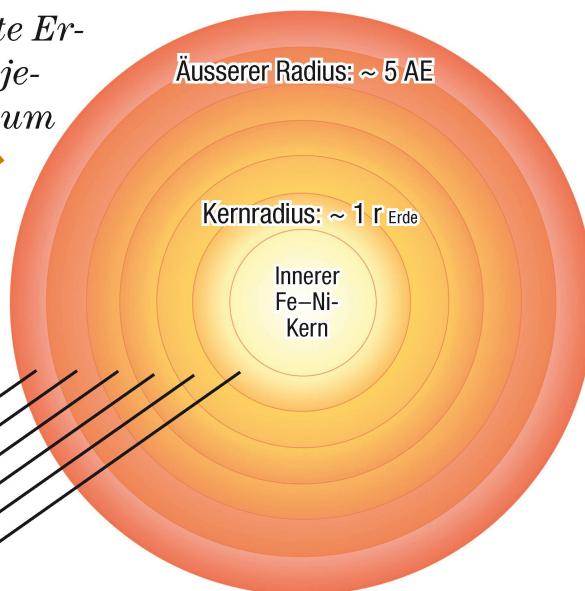
«Das gewaltigste Ereignis, das man jemals im Universum beobachtet hat.»

KARSTEN DANZMANN,
MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR
GRAVITATIONSPHYSIK, HANNOVER, 14.2.16, DER TAGESSPIEGEL

H-Schalenbrennen
He-Schalenbrennen
C-Schalenbrennen
Ne-Schalenbrennen
O-Schalenbrennen
Si-Schalenbrennen

BILD NACH: L. BAUDIS, ASTROPHYSIK, UNIVERSITÄT ZÜRICH

Abbildung 5: Schematische Darstellung des schalenförmigen Aufbaus eines Riesensterns mit mehr als vierzigfacher Sonnenmasse gegen Ende seiner Existenz. Die schwereren Elemente reichern sich entsprechend ihrer Masse gegen innen an. Am Schluss «verbrennt» Wasserstoff H nur noch in der äussersten Schale. Der Radius der Hülle beträgt in diesem Stadium den fünffachen Abstand der Erde zur Sonne.



gebung aus, um falsche Signale zu erzeugen. Entsprechend aufwändig ist die Analyse der Daten, um echte Signale von Störfaktoren zu unterscheiden.

Aber am 17. August 2017 war es wieder einmal so weit. Wieder einmal deswegen, weil die ersten Gravitationswellen der Geschichte ja schon zwei Jahre vorher registriert worden waren, wofür drei Wissenschaftler im Dezember 2017 den Nobelpreis für Physik empfangen durften. Was das neue Ereignis so speziell machte, war die Tatsache, dass es an einer Vielzahl von Observatorien beobachtet werden konnte. Sehr schnell fanden die optischen Sternwarten im Sternbild Wasserschlange, in der Galaxie NGC 4993, 130 Millionen Lichtjahre von der Erde entfernt, einen schwachen Lichtpunkt. Ein Objekt war mit brutalster Gewalt explodiert. Und die Astronomen konnten zuschauen! Das ist besonders deshalb wichtig, weil nun auch mit den optischen Teleskopen das Licht des Strahlungsausbruchs analysiert werden konnte. Und da waren sie, die Spektrallinien der höheren Elemente im Periodensystem.

Was war geschehen? Heute ist klar, vor 130 Millionen Jahren fand in NGC 4993 eine Kollision von zwei Neutronensternen statt. Das Ganze begann aber eigentlich schon vor Milliarden von Jahren, als zwei massereiche Sterne in einem Doppelsternsystem unabhängig voneinander in Supernova-Ereignissen explodierten. Die dabei entstandenen Neutronensterne umkreisten sich während rund acht Milliarden Jahren und näherten sich dabei langsam an. Bis sie sich zu nahe kamen. Jetzt, wenige Minuten vor dem Crash, steigerten sie ihre Geschwindigkeit enorm schnell auf gegen 20 % der Lichtgeschwindigkeit. Schnell genug, um beim Zusammenprall den von EINSTEIN vorausgesagten Effekt auszulösen. Das Weltall erzitterte und Gravitationswellen mit genügender Stärke schossen mit Lichtgeschwindigkeit durchs All. 130 Millionen Jahre später erreichten sie die Erde und verkündeten die Geburt eines neuen Schwarzen Lochs.

Die 100 Jahre alten Theorien von ALBERT EINSTEIN hatten sich einmal mehr glanzvoll als richtig erwiesen und damit sein Weltbild erneut bestätigt. GW170817, das Gravitationswellenereignis vom 17. August 2017 (Jahr, Monat, Tag), bewies aber

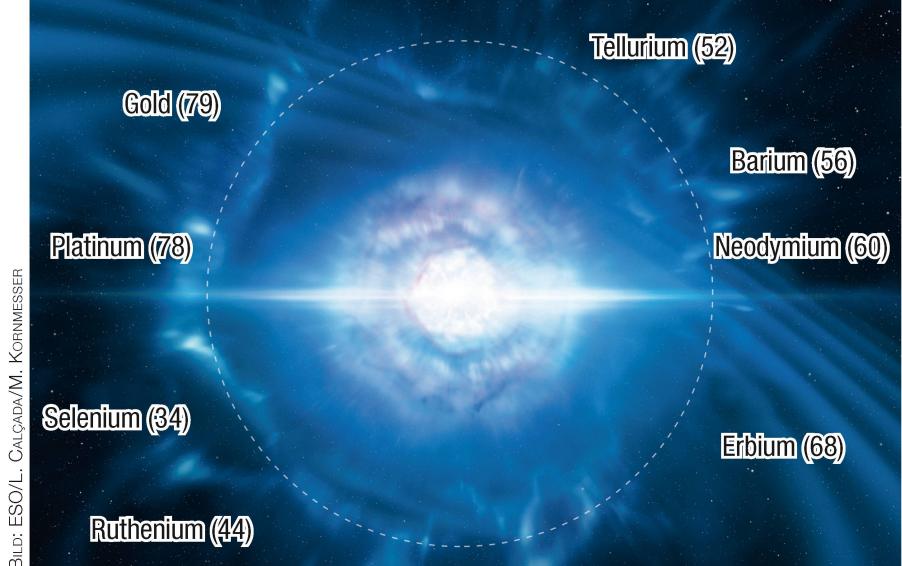


Abbildung 6: Das Verschmelzen von zwei Neutronensternen produziert durch radioaktive Zerfallsprozesse eine grosse Zahl neuer Elemente. Einige davon sind in dieser künstlerischen Darstellung einer Kilonova mit ihren Nummern im Periodensystem eingetragen.

auch, dass die Teilchen der verschmelzenden Neutronensterne zahllose radioaktive Zerfallsprozesse auslösen. Die freiwerdende Energie dieser Kernreaktionen lassen den kosmischen Unfallort in einer Kilonova aufleuchten. Im Trümmerfeld der Strahlung entstehen aber unter vielen anderen chemischen Elementen auch die von uns so geschätzten Edelmetalle Gold und Platin.

Wenn Sie, liebe Leserin, lieber Leser, also beim Zahnarzt einen Goldzahn eingesetzt erhalten sollten, so denken Sie bitte an die Herkunft des Materials in Ihrem Mund. Ihr Zahnersatz war mal Teil einer Verschmelzung zweier Massemonster im All. Vielleicht löst diese Vorstellung in Ihnen auch ein kleines Beben aus. Für LIGO wäre das nur eine Störquelle. Für uns ist es aber das Resultat einer tiefen, neuen Erkenntnis. ■

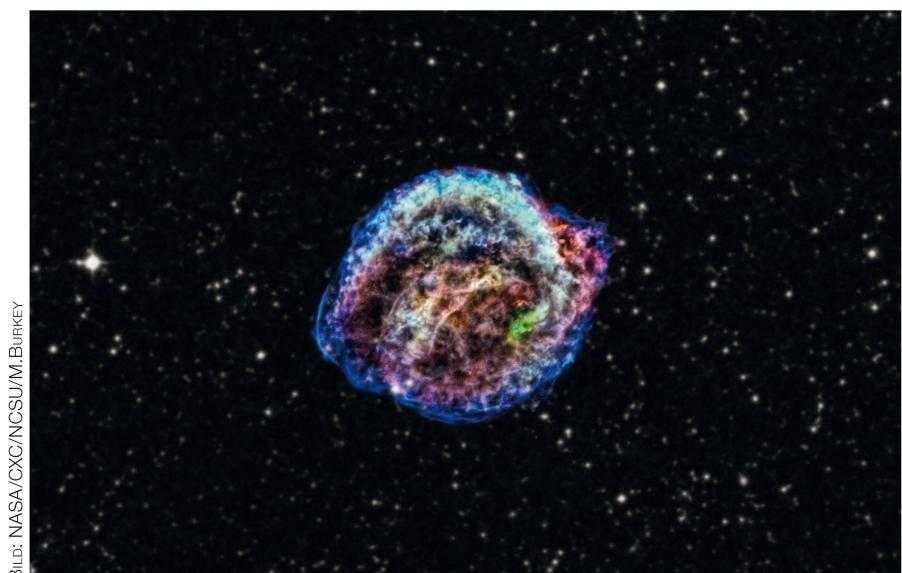


Abbildung 7: Die Überreste von «KEPLERS Supernova». Neben vielen anderen Himmelsbeobachtern fiel auch JOHANNES KEPLER am 9. Oktober 1604 ein «neuer Stern» im Westen auf. Es handelt sich um die letzte bekannte Supernova in unserer eigenen Galaxis.