

Zerfälle als Zeugen

Der Nachweis radioaktiver Elemente und Isotope erlaubt es, die Prozesse der kosmischen chemischen Entwicklung nachzuvollziehen.

Roland Diehl und Camilla Juul Hansen

Das Universum ist im ständigen Wandel: Gewaltige Energieblitze in Gamma- bis Radiostrahlung belegen diese Aktivität. Dagegen ist die Anzahl der Kernbausteine des Mikrokosmos konstant, seit sich nach dem Urknall Protonen und Neutronen gebildet haben: Sie werden weder zerstört noch neu erzeugt, sondern bilden lediglich neue Kombinationen. So hat sich seither die chemische Zusammensetzung der kosmischen Materie deutlich verändert. Radioaktive Zerfälle sind ein wichtiges Werkzeug, um diese Entwicklung und die Prozesse dahinter zu verstehen.

Nach dem heißen Urknall entstanden während der primordialen Nukleosynthese Wasserstoff und Helium sowie Spuren von Lithium. Auch heute dominieren die beiden leichtesten Elemente die Häufigkeitsverteilung. Daneben existiert aber eine Vielfalt weiterer Elemente: Kohlenstoff, Sauerstoff und Eisen – die Elemente des Lebens – sowie Gold, Platin, Blei und Uran – die seltenen Elemente unserer Hochtechnologie. Der Prozess der sogenannten kosmischen chemischen Entwicklung hat ständig die vorhandenen Nukleonen umsortiert: zu Tausenden unterschiedlichen Isotopen der 118 derzeit bekannten chemischen Elemente. Namensgeber des Prozesses ist die resultierende, sich verändernde chemische Zusammensetzung der Materie im Universum (**Abb. 1**).

Für das Umsortieren sind Kernreaktionen verantwortlich, beispielsweise die Kernfusion. Im Inneren von Sternen und bei Sternexplosionen reichen Dichte und Temperatur aus, damit sich die Atomkerne so nahe kommen, dass die kurzreichweitigen Kernbindungskräfte wirken können und die Nukleonen neue Verbindungen eingehen. So kann aus drei Heliumkernen Kohlenstoff entstehen: $3\text{He} + 3\text{He} + 3\text{He} \rightarrow \text{C}$. Kohlenstoff entspricht einer etwas fester gebundenen Zusammensetzung der Nukleonen, sodass die überschüssige Bindungsenergie als Strahlung frei wird. Der zugehörige Strahlungsdruck verhindert, dass der

Stern unter seiner eigenen Gravitation kollabiert. Sterne, die mehr als achtmal schwerer sind als unsere Sonne, durchlaufen verschiedene Brennphasen, in denen immer komplexere Fusionsreaktionen Kernbindungsenergie freisetzen. Diese Entwicklung endet beim Isotop ^{56}Ni mit der

maximalen Bindungsenergie pro Nukleon: Weitere Fusionsreaktionen setzen keine Energie mehr frei. Die schwereren Elemente entstehen daher durch die Anlagerung von Neutronen und Betazerfälle in Prozessen, die sich durch langsame (s-Prozess für engl.: slow) oder schnelle (r-Prozess, rapid) Neutroneneinfangreaktionen auszeichnen. Die Nukleare Astrophysik zielt darauf ab, die Vielfalt der Kernreaktionen und ihre Wirkung zu verstehen, die der Sternentwicklung und der Nukleosynthese zugrundeliegen [1].

Eine massive Hülle umgibt meist die Orte, wo die Fusionsreaktionen stattfinden, und verhindert die direkte astronomischen Beobachtung: Die freigesetzte Kernenergie erreicht die Oberfläche von Sternen oder Explosionen durch Streuung als thermische Strahlung. Die Streuung zerstört detaillierte Informationen zu den Vorgängen. Dem Inneren entkommen lediglich Neutrinos, die auch bei Fusionsreaktionen auftreten. Allerdings erschwert ihre geringe Wechselwirkung den Nachweis.

Während der Nukleosynthese entstehen aber auch radioaktive Atomkerne. Einige zerfallen erst, nachdem sie den interstellaren Raum erreicht haben und zeugen von den Vorgängen im Stern. Mithilfe der charakteristischen Zerfallszeit τ eines instabilen Isotops lässt sich sein beobachtetes Vorkommen mit theoretischen Überlegungen vergleichen. Dazu gehören Modellierungen der Sternentwicklung, aber auch die Ausbreitung der neu erzeugten Elemente im interstellaren Medium. Daher eröffnet die Astronomie mit radioaktiven Isotopen einen Zugang, um neben der Nukleosynthese auch diese Aspekte in den Quellobjekten zu studieren [2] (**Abb. 2**).

Beim radioaktiven Zerfall nimmt die emittierte Strahlung mit der Zeit exponentiell ab – das gilt auch für kos-



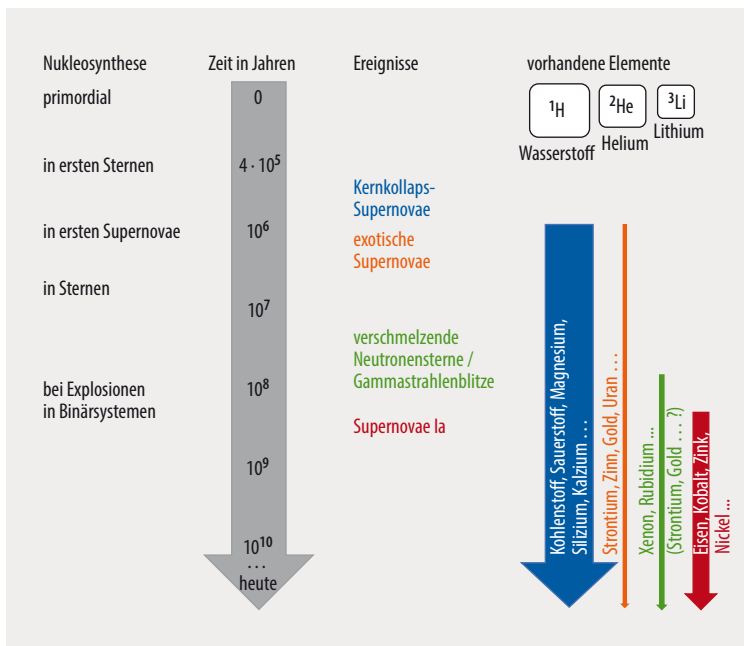


Abb. 1 Die primordiale Nukleosynthese erzeugte direkt nach dem Urknall Wasserstoff und Helium sowie Spuren von Lithium. Als die ersten Sterne ihre Entwicklung nach etwa einer Million Jahren mit Supernova-Explosionen abschlossen, bereicherten sie das Universum um zahlreiche Elemente (blau, orange). Erst in Binärsystemen kamen nach etwa hundert Millionen Jahren weitere Möglichkeiten hinzu (grün, rot), die zur heutigen chemischen Zusammensetzung führten.

misch erzeugtes radioaktives Material. Die Zeitkonstante der abfallenden Intensität ist demnach mit der Zerfallszeit des Atomkerns verknüpft. Beispielsweise wird die Strahlung nach einer Supernova-Explosion mit einer Zeitkonstanten von etwa hundert Tagen schwächer, was sehr gut zur Lebensdauer von ^{56}Co ($\tau = 111 \text{ d}$) passt. Das legt den Schluss nahe, dass ^{56}Co als Energiequelle auftritt; aber auch andere Isotope könnten theoretisch dazu beitragen, etwa ^{254}Cf ($\tau = 87 \text{ d}$). Wie aus der radioaktiven Strahlung während der Sternexplosion sichtbares Licht wird, ist ein komplexes Problem. Als Näherung wird üblicherweise der Verlauf der Intensität – auch Lichtkurve genannt – als Folge des radioaktiven Zerfalls interpretiert. Wünschenswert wäre aber der direkte Nachweis der Gammastrahlung.

Spektroskopische Herausforderung

Ein solcher Nachweis kann mittels Spektroskopie gelingen. Einen radioaktiven Zerfall zeichnet nicht nur die Zerfallszeit aus, sondern auch bestimmte Energien, für die

Gammastrahlung emittiert wird. Schon Joseph Fraunhofer untersuchte zu Beginn des 19. Jahrhunderts das sichtbare Spektrum des Sonnenlichts, um aus der Intensität der elektromagnetischen Strahlung auf das Vorkommen bestimmter Elemente in der Sonnenatmosphäre zu schließen. Paul Merrill entdeckte 1952 im Spektrum kühler Roter Riesen (sog. S-Sterne) das Element Technetium [3]. Technetium ist das leichteste Element ohne stabiles Isotop ($Z = 43$); die längste Lebensdauer besitzt ^{98}Tc mit sechs Millionen Jahren. Deshalb muss in diesen Sternen innerhalb der letzten Millionen Jahre ^{98}Tc entstanden sein – Nukleosynthese hat also auch in der jüngeren Vergangenheit unserer Galaxie stattgefunden. Solche atomaren Spektrallinien eignen sich aber im Allgemeinen nicht, um bestimmte Isotope nachzuweisen. Denn im Wesentlichen bestimmt die Kernladung, also die Anzahl der Protonen, die Energie solcher Spektrallinien. Die Neutronen führen abhängig von ihrer Anzahl zu einer Linienverschiebung, die aber meist kleiner ausfällt als die thermisch bedingte Linienbreite. Im stellaren Gas lassen sich daher Isotope nicht identifizieren – trotz der mittlerweile hohen spektralen Auflösung für sichtbares Licht. Ausnahmen bilden leichte oder exotische Elemente wie Barium und Europium.

Sterne konservieren an ihrer Oberfläche die Zusammensetzung des Gases, aus dem sie gebildet wurden. Teleskope mit immer größeren Öffnungsdurchmessern und bessere Spektrometer erlauben es heute, etwa 70 der 118 bekannten Elemente astronomisch zu vermessen – auch in kleinen und massearmen Sternen, die weit entfernt in unseren Nachbargalaxien existieren. In der Umgebung der Milchstraße befinden sich zahlreiche Zwerggalaxien, in denen sich das interstellare Gas genau wie in unserer Galaxis mit frisch synthetisierten Atomkernen anreichert. Vermutlich verläuft dieser Prozess aber anders ab als in großen Galaxien wie der Milchstraße, da in den Zwerggalaxien weniger Gas vorliegt und sich dort deswegen meist kleinere Sterne mit langer Lebensdauer bilden. Ein Beispiel ist die Zwerggalaxie Sagittarius am Südhimmel.

Hier gelang es, mit Thorium eines der schwersten Elemente in Sternspektren nachzuweisen. Das Isotop ^{232}Th ist radioaktiv und zerfällt nach etwa 14 Milliarden Jahren, was ungefähr dem Alter des Universums entspricht. Aus den Mengen von Thorium und Europium, die in der Sagittarius-Galaxie vorkommen, lässt sich schließen, dass die Sterne mehr als neun Milliarden Jahre alt sind [4]. Beide Elemente entstehen bei der Nukleosynthese im r-Prozess; dieser muss also bereits vorher stattgefunden haben. Während in

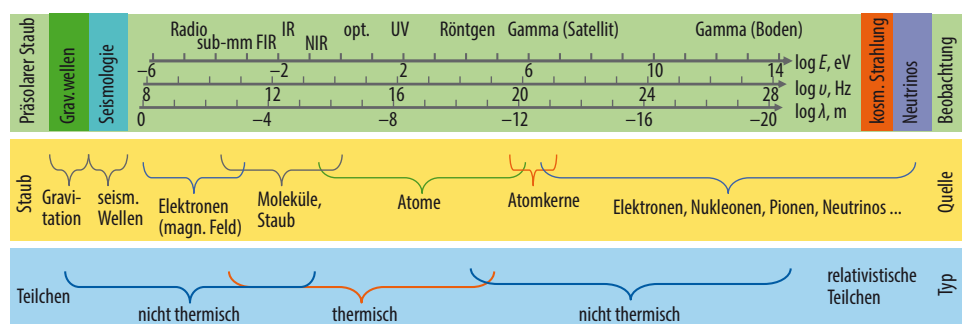


Abb. 2 Die Astronomie mit elektromagnetischer Strahlung wird seit einiger Zeit durch immer neue Methoden ergänzt. Dazu gehört auch der Nachweis von Gravitationswellen und Neutrinos. Radioaktive Isotope lassen sich nur in Spektralbereichen außerhalb des sichtbaren Lichts messen.

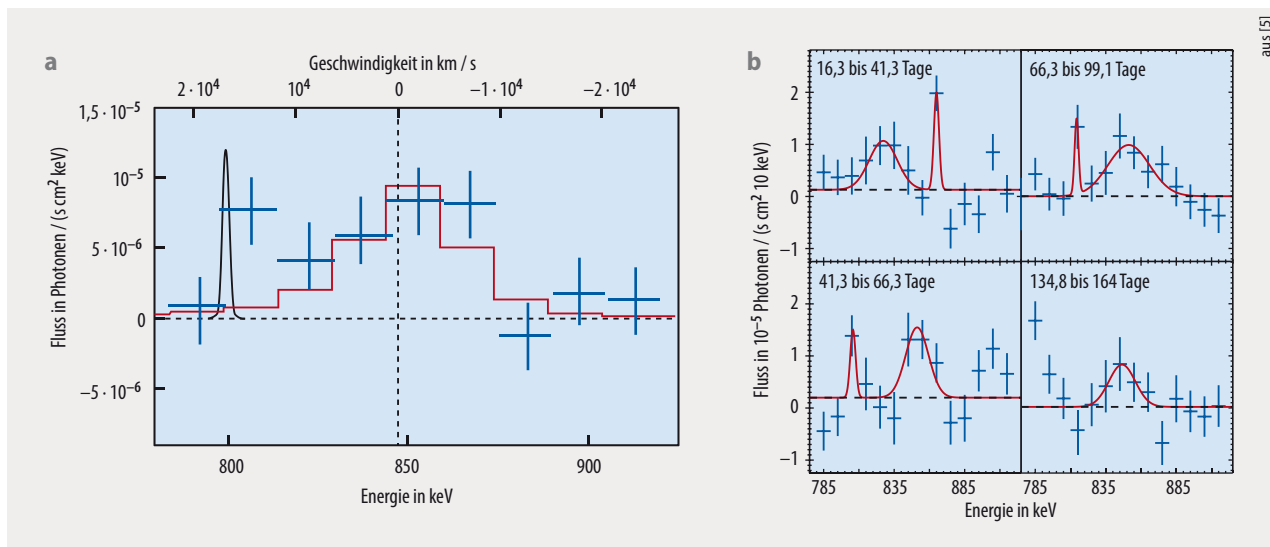


Abb. 3 Das Spektrometer SPI hat für die Supernova SN2014J den Zerfall von ^{56}Co mit der Gammalinie bei 847 keV nachgewiesen (a, blau). Die Energieauflösung von SPI (schwarz) ist sehr hoch, sodass sich aus der Linienbreite der aufsummierten Daten (Fit: rot) auf eine starke Doppler-Verbreiterung schließen lässt. Bei höherer spektraler sowie zeitlicher Auflösung (b) zeigte der Fit (rot) an die Messwerte (blau) spektrale Fluktuationen, die auf Abweichungen von einer sphärisch-symmetrischen Ausbreitung hindeuten.

großen Galaxien viele Supernovae die Elementhäufigkeiten bestimmen, könnten die ältesten Sterne in den Zwerggalaxien lediglich die Spuren einer Sternexplosion tragen. Das würde den Vergleich mit Simulationen der zugehörigen Nukleosynthese erheblich erleichtern und dazu beitragen, die kosmische chemische Entwicklung besser zu verstehen.

Für elektromagnetische Strahlung mit höheren Energien wie Röntgen- oder Gammastrahlung ist die Erdatmosphäre undurchlässig, sodass Spektroskopie nur mit satellitenbasierten Teleskopen möglich ist. Röntgenteleskope wie Chandra, Suzaku oder XMM-Newton haben Überreste von Supernovae untersucht. Die Materie ist hier mehrere Millionen Grad heiß, sodass ein Plasma aus hochionisierten Atomen vorliegt, das Röntgenstrahlung emittiert. So gelang es unter anderem, Stickstoff, Magnesium und Silizium in hohen Ladungszuständen (H- oder He-ähnlich) nachzuweisen. Die im Vergleich zum interstellaren Gas deutlich erhöhten Häufigkeiten erlauben den Schluss, dass diese Elemente während der Supernova bzw. in ihrem Vorläuferstern synthetisiert wurden.

Eine hochauflöste Spektroskopie von Gammastrahlung hat sich erst in den letzten Jahrzehnten entwickelt. In diesem Spektralbereich lässt sich die Strahlung aus dem Atomkern nachweisen, die für bestimmte Isotope und ihren radioaktiven Zerfall charakteristisch ist. Da Gammastrahlung nuklearen Ursprungs ist, hängt sie nicht vom Ionisationsgrad und der Temperatur des Gases ab. Seit 2002 ist das Satellitenobservatorium INTEGRAL der ESA in Betrieb. Mit seinem Spektrometer SPI und Ge-Detektoren, die eine spektrale Auflösung von wenigen keV besitzen, sind für Energien zwischen 30 keV und 8 MeV Linien nuklearen Ursprungs nachweisbar. Ein limitierender Faktor der instrumentellen Empfindlichkeit ist der Hintergrund, den die kosmische Strahlung verursacht. Daher ließen sich bisher nur wenige intensive Linien nachweisen, die von Quellen innerhalb oder nahe unserer Galaxie stammen.

Helligkeitsstandard mit Fragezeichen

Im Februar 2014 ereignete sich eine Supernova des Typs Ia in einer relativ nahe gelegenen Galaxie. Daher konnten viele Teleskope in unterschiedlichen Spektralbereichen das Ereignis SN2014J beobachten, auch das Gammastrometer SPI [5]. Bereits wenige Tage nach der Explosion traten die charakteristischen Gammalinien des Zerfalls von ^{56}Ni ($\tau = 9$ Tage) zutage, während Modellrechnungen frühestens nach etwa drei Monaten das Erscheinen des Zerfallsprodukts ^{56}Co vorhergesagt hatten. Wenig später zeigten sich dann auch dessen Zerfallslinien deutlich (**Abb. 3a**). Damit ließ sich erstmals die Energiequelle des Supernova-Lichts direkt und unabhängig von Modellen der Hülle bestimmen. Ein wichtiger Schritt, da Supernovae Ia in der Kosmologie als Helligkeitsstandard dienen. Aus dem Vergleich der beobachteten mit der erwarteten Helligkeit ergibt sich die Entfernung des Ereignisses. Dieses Vorgehen setzt voraus, dass die Mechanismen hinter der „kosmischen Leuchtkerze“ verstanden und standardisierbar sind.

Die beobachteten Intensitäten der Gammalinien bezeugen, dass etwa 0,5 Sonnenmassen ^{56}Ni – genauer $(0,5 \pm 0,05) M_{\odot}$ – erzeugt wurden; der Wert stimmt gut mit Modellrechnungen überein. Allerdings passt die zeitliche Entwicklung der Spektren nicht zu der erwarteten sphärisch-symmetrischen Ausbreitung: Die Hülle wird nach der Explosion offenbar nicht ganz gleichmäßig transparent (**Abb. 3b**). Dies stellt das gleichförmige Erscheinungsbild der Supernovae Ia infrage. Wenn die Absorption hochenergetischer Strahlung in der Sternhülle und die anschließende Emission niederenergetischer Photonen von der Richtung abhängen, sind die Modellvorstellungen noch nicht physikalisch konsistent und durch variable Komponenten gekennzeichnet. Das könnte weitreichende Konsequenzen für die Kosmologie haben: Aus der Anwendung von Supernovae Ia als Helligkeitsstandard folgt zum Beispiel eine

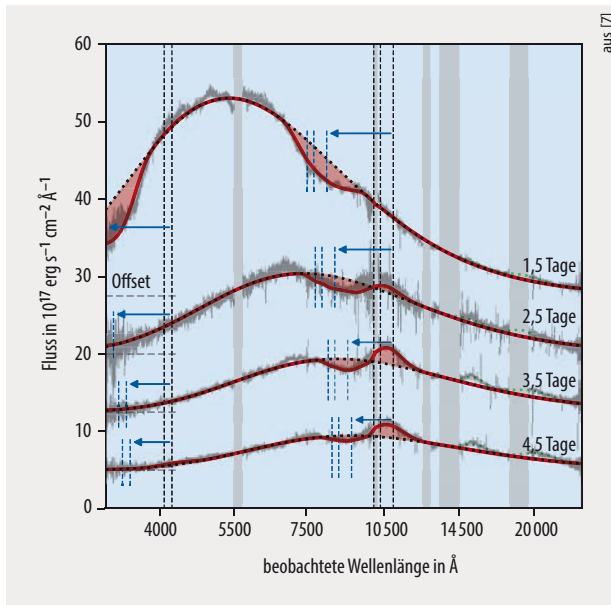


Abb. 4 Die Spektren der Kilonova (grau, Fit: rot) zu GW170817 weichen von der Schwarzkörperstrahlung (schwarz) ab. Die Abweichungen lassen sich durch Strontium als Absorber erklären. Aus der Verschiebung der Spektrallinien (blau) folgt eine Geschwindigkeit der Materie von $0,2c$. Die grau hinterlegten Bereiche gingen nicht in die Analyse ein.

beschleunigte Expansion des Universums, verursacht durch die Dunkle Energie.

Einmalige Datenvielfalt

Im August 2017 gelang es erstmals, das Verschmelzen zweier Neutronensterne mit den Gravitationswellendetektoren LIGO und Virgo nachzuweisen [6]. Zeitgleich erfassten die Gammadetektoren an Bord des INTEGRAL- und des Fermi-Satelliten einen charakteristischen kurzen Gamma-

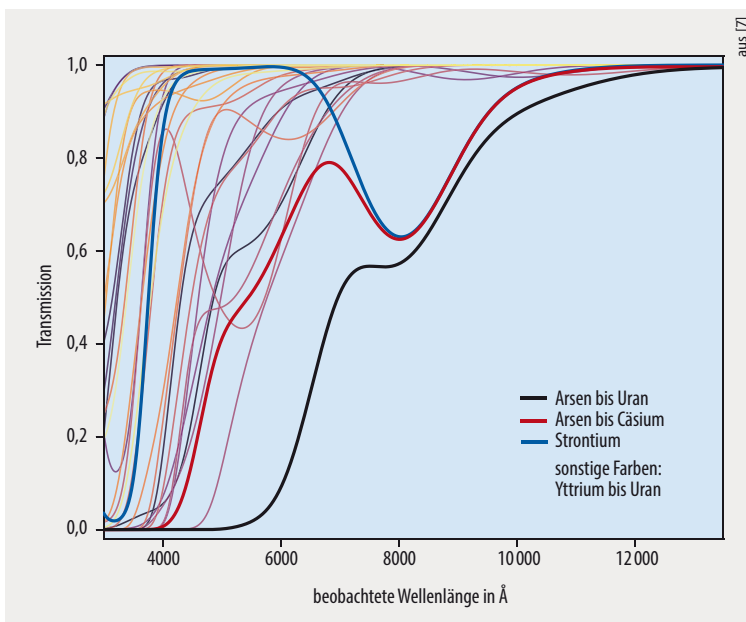


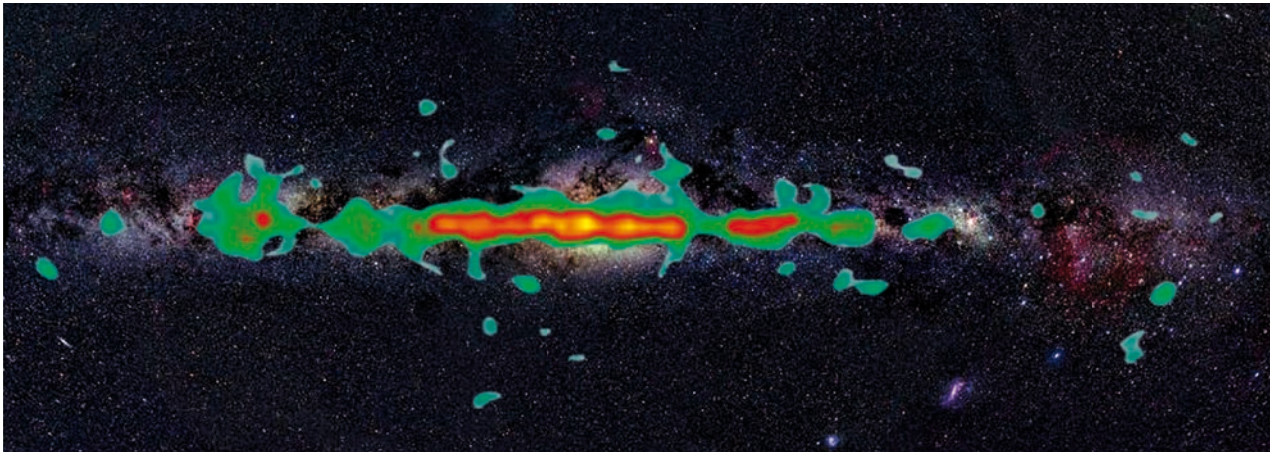
Abb. 5 Die modellierten Signaturen unterschiedlicher Elemente von Arsen bis Uran unterscheiden sich deutlich: Nur Strontium ($Z = 38$, blau) passt zu den beobachteten Absorptionslinien im Spektrum der Kilonova zu GW170817.

blitz (short Gamma-Ray Burst, sGRB), der zu dem Gravitationswelleneignis GW170817 gehörte. Im Laufe der nächsten zehn Tage setzte erstmals eine Beobachtung des zugehörigen Himmelsausschnitts mit Teleskopen für alle Spektralbereiche ein. So gelang es, das Nachglühen des Verschmelzens vollständig zu beobachten, insbesondere mit bodengebundenen Teleskopen und Spektrografen. Etwa ein bis fünf Tage nach dem durch die Gravitationswellen und den Gammablitz markierten Ereignis schwächte sich das Nachleuchten ab, und das emittierte Licht verlagerte sich von blauen optischen Wellenlängen bis ins Infrarote. Da die Helligkeit des Ereignisses zwischen derjenigen einer Nova- und einer Supernova-Explosion lag, handelte es sich um eine sogenannte Kilonova. Ein solches Ereignis wurde erstmals 2013 nachgewiesen, allerdings recht ungenau vermessen. Auf dieser Basis entstanden Simulationen, wie die Nukleosynthese während einer Kilonova ablaufen könnte. Diese besagten, dass bei den Neutroneneinfangreaktionen während der Kollision große Mengen an Lanthanoiden entstehen. Da der r-Prozess zunächst deren radioaktive Mutterisotope erzeugt, sollten die Zerfälle im Infraroten eine deutliche Signatur hinterlassen, die innerhalb von etwa drei Wochen abnimmt.

Die Analyse der vielfältigen spektroskopischen Daten ermöglichte einen detaillierten Vergleich mit den Modellrechnungen zu einer Neutronensternkollision. Diese beinhalteten auch die dabei auftretende Nukleosynthese anhand der Energie aus radioaktiven Zerfällen, die in der Hülle absorbiert und anschließend abgestrahlt wurde [7]. Dabei zeigte sich, dass die Kilonova zu GW170817 eine überraschend blaue Färbung besaß. Beispielsweise hatte der SWIFT-Satellit einen hellen UV-Blitz gemessen, aber nicht das erwartete starke Röntgensignal registriert. Daraus ließ sich der Ursprung des elektromagnetischen Signals modellieren. Das resultierende Spektrum entspricht fast perfekt einer Schwarzkörperstrahlung, wobei es im sichtbaren Licht zu einer starken Absorption kommt (Abb. 4). Deren Ursache sind schwere Elemente, die bei Neutroneneinfangreaktionen entstehen. Simulationen, welche die Elemente Gallium bis Uran berücksichtigen (Abb. 5), liefern als mögliche Erklärung eine große Menge frisch gebildeten Strontiums ($> 5 \cdot 10^{-5} M_{\odot}$): Einerseits leuchtet es radioaktiv, andererseits absorbiert die sich schnell ausdehnende Hülle der Kilonova ($v \approx 0,2c$) diese Strahlung (Abb. 4). Statt der erwarteten Lanthanoide ließ sich das leichtere radioaktive Element Strontium anhand des typischen Linienprofils – zusammengesetzt aus rotverschobener Emissions- und blauverschobener Absorptionslinie – eindeutig nachweisen. Aus der spektroskopischen Analyse des Nachleuchtens und dem charakteristischen Helligkeitsabfall ist abzuleiten, dass es bei dem Ereignis zur Nukleosynthese im r-Prozess kam.

Der kosmische Transport radioaktiven Materials

Das heiße Auswurfmaterial einer Supernova-Explosion hat eine Temperatur von mehr als 10^7 K und kühlt sich über 100 Millionen Jahre auf 10 bis 20 K ab. Aus diesem kalten Gas bilden sich neue Sterne und Planeten. Bis dahin hat das Auswurfmaterial einen turbulenten interstellaren Weg



Hintergrund: A. Mellinger, PASP 121, 1180 (2009);
Daten: S. Pluschke et al., ESA-SP 459, 55 (2001)

Abb. 6 Das radioaktive Isotop ^{26}Al kommt in der gesamten Milchstraße (Hintergrund) vor. Die Intensität der Zerfallslinie bei 1808,6 keV ist im zentralen Bereich der Galaxis am höchsten (gelb, rot) und nimmt in den äußeren Bereichen ab (grün).

hinter sich. Auf diesem Weg liegen beispielsweise Kilonova-Explosionen oder die viel häufigeren Supernovae. Zudem verwirbeln starke Sternwinde alles. Langlebige radioaktive Isotope helfen, diesen kosmischen Transport nachzuvollziehen. Denn solange radioaktive Kerne im Auswurfmaterial vorhanden sind, emittieren sie bei ihrem Zerfall Gammastrahlung einer bestimmten Energie. Um Zeitspannen von 100 Millionen Jahren zu verfolgen, eignen sich die Isotope ^{26}Al ($\tau = 10^6$ Jahre), ^{60}Fe ($\tau = 3,7 \cdot 10^6$ Jahre) und ^{244}Pu ($\tau = 1,2 \cdot 10^8$ Jahre). Auch lange nachdem die Röntgen- und Radiostrahlung eines Supernova-Überrests abgeklungen ist (ca. 10 000 Jahre), zeugen solche Isotope noch von dem explosiven Ereignis.

In der gesamten Ebene der Milchstraße registrieren heutige Gammateleskope die radioaktive Strahlung aus dem Zerfall von ^{26}Al (**Abb. 6**). Demnach hat in den letzten Jahrmillionen in der ganzen Galaxis Nukleosynthese stattgefunden. Die neuen Atomkerne haben sich im interstellaren Raum verteilt: Die Zerfallslinien von ^{26}Al sind diffus verteilt um die uns bekannten Objekte und Sterngruppen beobachtbar. Auch die Ausbreitung senkrecht zur Ebene der Milchstraße ist mit einigen Hundert Parsec¹⁾ deutlich größer als beispielsweise die Ausdehnung von Molekülwolken, in denen neue Sterne entstehen (etwa 50 Parsec). Der Zerfall von ^{26}Al zeigt direkt, wie sich das Auswurfmaterial verteilt hat.

Das Spektrometer SPI ermöglicht eine hochauflösende Gammaskopie. Dabei trat eine kinematische Doppler-Verschiebung der Zerfallslinie von ^{26}Al auf ($E_\gamma = 1808,6$ keV, **Abb. 7**). Die Verschiebung ist auf die großräumige Rotation um das galaktische Zentrum zurückzuführen. In einigen Blickrichtungen fällt sie aber weitaus größer aus, als es aus dieser Bewegung mit 250 km/s folgt: Das Auswurfmaterial mit den ^{26}Al -Isotopen besitzt eine etwa 200 km/s höhere Geschwindigkeit [8]. Simulationen ergaben als mögliche Ursache, dass die Dichte am Ort der Nukleosynthese geringer ist als typischerweise im interstellaren Medium: In diesem Fall wirkt sich die hohe Auswurfgeschwindigkeit länger aus, weil das interstellare Gas das radioaktive Material erst später durch Stöße abbremsen kann. Aus der Zerfallszeit von ^{26}Al von einer Million Jahren

und den typischen Auswurfgeschwindigkeiten von einigen 1000 km/s lässt sich auf interstellare Hohlräume schließen, die mehrere Tausend Parsec groß sind. Die Messung zeigt auch, dass das Material große Distanzen zurücklegt, bevor sich daraus neue Sterne bilden. Eine gleichmäßige und vollständige Durchmischung des Materials aus allen Ereignissen in der Galaxis, bei denen Nukleosynthese auftritt, ist daher eher unwahrscheinlich. Moderne Theorien zur Galaxienentwicklung gehen von einer „inhomogenen chemischen Entwicklung“ mit lokal unterschiedlichen Anreicherungen einzelner Isotope und Elemente aus. Diese Inhomogenität lässt sich auch in Sternatmosphären beobachten.

Radioaktive Isotope auf der Erde und dem Mond

Unser Sonnensystem befindet sich in der „solaren Blase“, einem Hohlraum entstanden aus vielen Supernovae, die nahegelegene Sterngruppen erzeugt haben. Offenbar ist unsere unmittelbare Umgebung in der Galaxis alles andere als ruhig.

In den Tiefen des pazifischen Ozeans findet sich Material, dessen Zusammensetzung zivilisatorisch unbeeinflusst ist. Mithilfe einer hochempfindlichen, massenspektrometrischen Analyse, der Accelerator Mass Spectrometry (AMS), gelang es in solchen Proben, das radioaktive Isotop ^{60}Fe nachzuweisen [9]. Ein terrestrischer Ursprung kommt für dieses Isotop nicht infrage, weil es zwei Neutronen mehr besitzt als das schwerste stabile Eisenisotop. Deshalb müssen die nachgewiesenen Atomkerne vor wenigen Millionen Jahren als Produkt kosmischer Nukleosynthese das Sonnensystem und unsere Erde erreicht haben. Die untersuchten Proben stammen aus einer Ablagerungstiefe, die auf ein Alter von etwa drei Millionen Jahren deutet. Neuere Messungen mit höherer Zeitauflösung zeigen, dass die ^{60}Fe -Ablagerung im Ozean über einige 100 000 Jahre erfolgte. Daher fällt eine einzige Supernova-Explosion als Ursache weg: Ihr Auswurfmaterial würde das Sonnensystem in we-

1) Das Parsec ist eine astronomische Längeneinheit und entspricht $3,0857 \cdot 10^{16}$ m bzw. etwa 3,26 Lichtjahren.

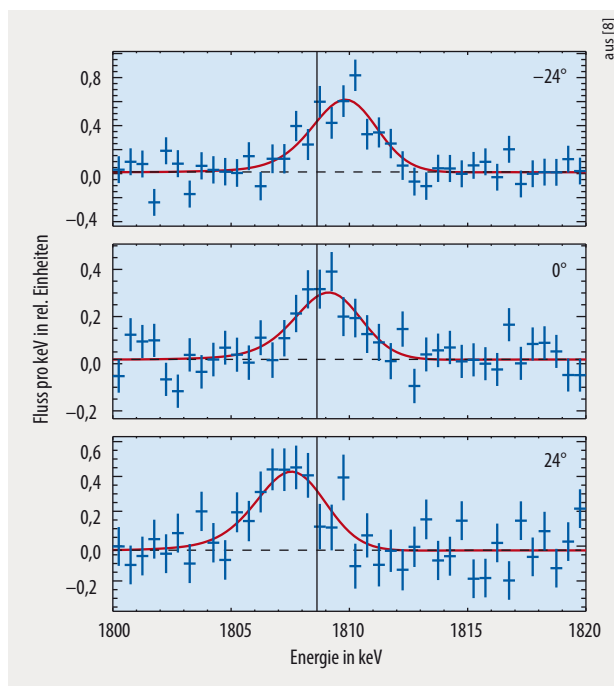


Abb. 7 Die großräumige galaktische Rotation führt auch bei der Zerfallslinie von ^{26}Al zu einer kinematischen Doppler-Verschiebung. Die abgeleitete Geschwindigkeit ist aber mit 450 km/s fast doppelt so groß wie die mittlere Geschwindigkeit der bekannten Objekte in der Milchstraße.

sentlich kürzerer Zeit passieren. Allerdings erlauben es die Ablagerungen nicht, auf eine genaue Anzahl der Ereignisse zu schließen. Auch in Proben von der Mondoberfläche ließ sich ^{60}Fe nachweisen, was die kosmische Herkunft des radioaktiven Materials unterstreicht. Aufgrund der häufigen Meteoriteneinschläge auf dem Mond ist hier allerdings keine Datierung möglich.

Wenn sich ^{60}Fe in der Ozeankruste findet, sollten auch andere schwere Elemente aus der Nukleosynthese im r-Prozess dort vorliegen. Ein guter Kandidat wäre das Isotop ^{244}Pu , das eventuell ebenfalls bei Supernova-Explosionen entsteht. Seine Lebensdauer ist mehr als 30-mal länger als die von ^{60}Fe , sodass es einen tieferen Blick in die Vergangenheit erlaubt. Bisher ließen sich aber mithilfe der Massenspektrometrie nur deutlich weniger Atome nachweisen, als sich aus der abgeschätzten Häufigkeit von Supernova-Explosionen ergeben [10]. Da ^{60}Fe und ^{244}Pu vermutlich in unterschiedlichen Ereignissen mit anderem Verhältnis entstehen, wäre es interessant, das Zeitprofil der Ablagerungen zu vergleichen. Die Daten könnten helfen, die Häufigkeit verschiedener Ereignisse einzuschränken oder – falls die Ablagerungen nichts gemein haben – ein weiteres exotisches Szenario für den r-Prozess in Betracht zu ziehen.

Auch in der kosmischen Strahlung im interplanetaren Raum des Sonnensystems konnte ein Instrument des ACE-Satelliten mittels Massenspektrometrie das radioaktive Isotop ^{60}Fe nachweisen [11]. Die kosmische Strahlung transportiert also Material, das erst vor wenigen Millionen Jahren erzeugt wurde. Berechnungen der Transporteigenschaften ergeben als Distanz für die Quelle des Materials maximal 800 000 Parsec – das entspricht etwa einem Zehntel der

Entfernung unserer Sonne vom Zentrum der Galaxis und liegt damit in unserer Nähe.

Zusammenfassung

Der Zerfall radioaktiver Atomkerne liefert ein wichtiges astronomisches Werkzeug. Die instabilen Isotope erzeugen ein charakteristisches Signal und führen zu den teils exotischen Orten ihrer Nukleosynthese. So öffnet gerade die Vergänglichkeit dieser Kerne ein Fenster zu den kernphysikalischen Prozessen in kosmischen Objekten. Ähnlich einer archäologischen Untersuchung erlauben sie es außerdem, die Geschichte der kosmischen chemischen Entwicklung nachzuvollziehen – von den Anfängen der primordialen Nukleosynthese bis zur heutigen Vielfalt der Elemente und ihrer Isotope [12].

Literatur

- [1] J. Jose und Ch. Iliadis, Rep. Prog. Phys. **74**, 096901 (2011)
- [2] R. Diehl, D. H. Hartmann und N. Prantzos (Hrsg.), Astrophysics with radioactive Isotopes, Springer Nature, Cham (2018)
- [3] P. W. Merrill, Science **115**, 484 (1952)
- [4] C. J. Hansen et al., ApJ **855**, 83 (2018)
- [5] R. Diehl et al., Science **345**, 1162 (2014); E. Churazov et al., Nature **512**, 406 (2014); R. Diehl et al., A&A **574**, A72 (2015)
- [6] B. P. Abbott et al., ApJL **848**, L12 (2017)
- [7] D. Watson et al., Nature **574**, 497 (2019)
- [8] K. Kretschmer et al., A&A **559**, A99, (2013); M. G. H. Krause et al., A&A **578**, A113 (2015)
- [9] K. Knie et al., Phys. Rev. Lett. **93**, 171103 (2004); A. Wallner et al., Nature **532**, 69 (2016)
- [10] A. Wallner et al., Nat. Commun. **6**, 5956 (2015)
- [11] W. R. Binns et al., Science **352**, 677 (2016)
- [12] A. Frebel, Ann. Rev. Nucl. Part. Sci. **237**, 68 (2018); A. Frebel und N. Christlieb, Physik Journal, März 2013, S. 29

Die Autoren



Roland Diehl (FV Extraterrestrische Physik, FV Hadronen und Kerne) studierte Physik in Mainz. Er promovierte und habilitierte sich an der TU München und ist dort seit 2010 Professor. Seit 1979 forscht er am MPI für extraterrestrische Physik (MPE) in Garching, u. a. als Principal Investigator des Spektrometers SPI. Er wurde u. a. 2015 als Fellow der American Physical Society ausgezeichnet, war Mitglied im Senat der Max-Planck-Gesellschaft und in Steering Committees internationaler Forschungsprojekte.



Camilla Juul Hansen hat an der LMU München in Zusammenarbeit mit der ESO promoviert. Seitdem widmet sie sich der Entstehung der schweren Elemente, zunächst als Postdoc an der Landessternwarte der U Heidelberg und danach als Fellow am Niels Bohr Institut der U Kopenhagen. Derzeit arbeitet sie als Wissenschaftlerin am MPI für Astronomie in Heidelberg (MPIA).

Prof. Dr. Roland Diehl, Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik (MPE), Gießenbachstr. 1, 85748 Garching und **Dr. Camilla Juul Hansen**, Max-Planck-Institut für Astronomie (MPIA), Königstuhl 17, 69117 Heidelberg