

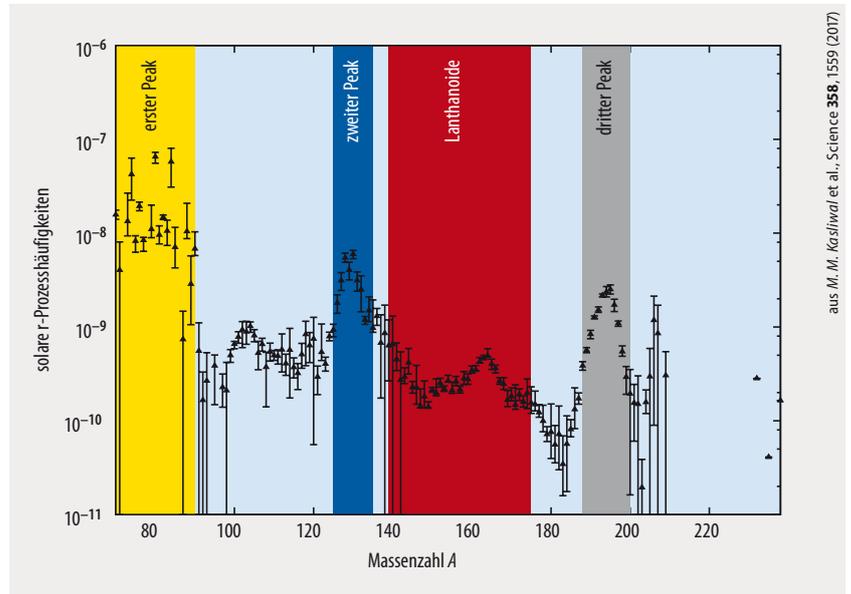
# Strontium aus kosmischen Kollisionen

Erstmals ist es gelungen, mit Strontium ein individuelles chemisches Element in der elektromagnetischen Strahlung einer Neutronenstern-Kollision zu identifizieren.

Stephan Rosswog

Während im Urknall nur die leichtesten Elemente entstanden sind, erzeugen verschiedene Brennphasen im Inneren massiver Sterne die Elemente bis Eisen (Ladungszahl  $Z = 26$ ). Die Synthese schwererer Elemente beruht im Wesentlichen auf Neutroneneinfangreaktionen. Die gemessene solare Häufigkeitsverteilung zeigt, dass dabei zwei Prozesse am Werk sind: ein langsamer  $s$ -Prozess (für engl.: slow) und ein schneller  $r$ -Prozess (rapid). Die Unterscheidung beruht auf der jeweils typischen Zeitskala eines Neutroneneinfangs im Vergleich zu den relevanten Betazerfällen. Der  $s$ -Prozess findet auf langen Zeitskalen im Inneren langlebiger, massearmer Sterne statt und ist seit geraumer Zeit recht gut verstanden. Der  $r$ -Prozess benötigt hingegen ein explosives Ereignis mit vielen freien Neutronen pro Atomkern, damit sich sehr neutronenreiche Kerne bilden können [1]. Das Verhältnis von Protonen zu Nukleonen  $Y_e = N_p / (N_p + N_n)$  ist hierfür wesentlich.

Die Differenz aus solarer Häufigkeit und den (bekannten) Anteilen aus dem  $s$ -Prozess ergibt die sogenannte  $r$ -Prozess-Verteilung. Sie besitzt drei



**Abb. 1** In der solaren  $r$ -Prozess-Verteilung (schwarz) treten drei Maxima bei den Massenzahlen  $A \approx 82$  (gelb),  $130$  (blau) und  $195$  (grau) auf. Die Lanthanoide (rot) liegen zwischen dem zweiten und dritten Peak.

ausgeprägte Maxima bei den Massenzahlen  $A \approx 82$ ,  $130$  und  $195$  (**Abb. 1**). Letzteres enthält die Elemente Platin und Gold, weshalb es den Namen Platin-Peak trägt. Liegen viele Neutronen pro Saatkern vor, so ist der Wert von  $Y_e$  niedrig und der  $r$ -Prozess kann den Platin-Peak erreichen. Bei Werten von

$Y_e > 0,25$  erreicht der  $r$ -Prozess nur noch den zweiten Peak und produziert leichte Kerne mit  $A \lesssim 130$ . Lanthanoide werden dann nicht gebildet. Liegen etwa gleich viele Protonen und Neutronen vor ( $Y_e \approx 0,5$ ), findet kein  $r$ -Prozess statt.

Der grundlegende Mechanismus des  $r$ -Prozesses ist schon länger gut verstanden [2], obwohl es heftige Debatten um die möglichen kosmischen Produktionsstätten gab. Kernkollaps-Supernovae galten als das Lehrbuch-Szenario, allerdings produzierten moderne Computermodelle nur leichte  $r$ -Prozess-Elemente und erreichten den Platin-Peak meist nicht [3]. Der alternative Vorschlag einer Neutronensternkollision [4] galt als „exotisch“, unter anderem weil es die enorme Gravitation schwierig macht, eventuell erzeugte Elemente ins All zu schleudern. Die ersten dreidimensionalen Computersimulationen mit anschließenden Nukleosynthese-Rechnungen zeigten aber, dass dem Gravitationsfeld genügend Material

## Kurzgefasst

### Wie Proteine Energie speichern

Am SPB/SFX-Experiment des European XFEL ist es erstmals gelungen, in einem molekularen Film festzuhalten, wie sich Pflanzenproteine verändern, um Lichtenergie zu speichern. Für eine Einzelaufnahme regt ein Laserpuls aus sichtbarem Licht kristalline Proteine an. Nach extrem kurzer Verzögerung erzeugt der Röntgenlaserpuls ein Bild im Detektor und zerstört den Kristall. Daher ergeben Aufnahmen verschiedener Kristalle zu unterschiedlichen Zeiten den Film. Dieser hilft, feinste Details des biologischen Prozesses zu untersuchen und zu verstehen.

S. Pandey et al., Nat. Methods (2019), DOI: 10.1038/s41592-019-0628-z

### GRBs erdgebunden beobachtet

Ein Gamma-Ray Burst (GRB) entsteht bei der Kollision zweier Neutronensterne und emittiert kurzzeitig hochenergetische Gammastrahlung. Mit H.E.S.S. und MAGIC konnten nun erstmals erdgebundene Observatorien solche Ereignisse beobachten. H.E.S.S. registrierte noch zehn Stunden nach dem Einsetzen von GRB 180720B Photonen mit Energien von mehreren hundert GeV. MAGIC wies für GRB 190114C Photonen mit Energien bis zu 1 TeV nach und löste eine Multimessenger-Beobachtung aus.

MAGIC coll., Nature 575, 455 (2019), MAGIC coll., Nature 575, 459 (2019) und H.E.S.S. coll., Nature 575, 464 (2019)

entkommt und der Platin-Peak problemlos erreicht wird [5]. Neuere Simulationen berücksichtigen auch Prozesse der schwachen Wechselwirkung und ermöglichen so, alle zum r-Prozess gehörenden Isotope zu produzieren [6]. Erste direkte Hinweise, dass der r-Prozess bei der Kollision von Neutronensternen stattfindet, lieferten die Multimessenger-Beobachtungen nach dem Gravitationswelleneignis GW170817 [7]. Im Nachglühen dieses Ereignisses gelang es Wissenschaftlern um Darach Watson (U Kopenhagen, Dänemark) nun erstmals, mit Strontium ein Element spektroskopisch nachzuweisen [8].

Strontium ( $Z = 38$ ,  $A \approx 88$ ) ist ein Element im ersten r-Prozess-Peak, entsteht im Kosmos aber auch durch den s-Prozess. Damit es bei der Kollision der Neutronensterne in beobachtbaren Mengen entsteht, darf die Materie nicht zu neutronenreich sein. Neutronensterne bestehen fast ausschließlich aus sehr neutronenreichem Material mit  $Y_e \approx 0,1$ ; nur ein sehr geringer Anteil enthält mehr Protonen. Simulationen ergeben daher, dass sich beim Auswerfen des Materials während der Kollision Elemente mit  $A \geq 130$  bis zum Platin-Peak und eventuell darüber hinaus bilden.

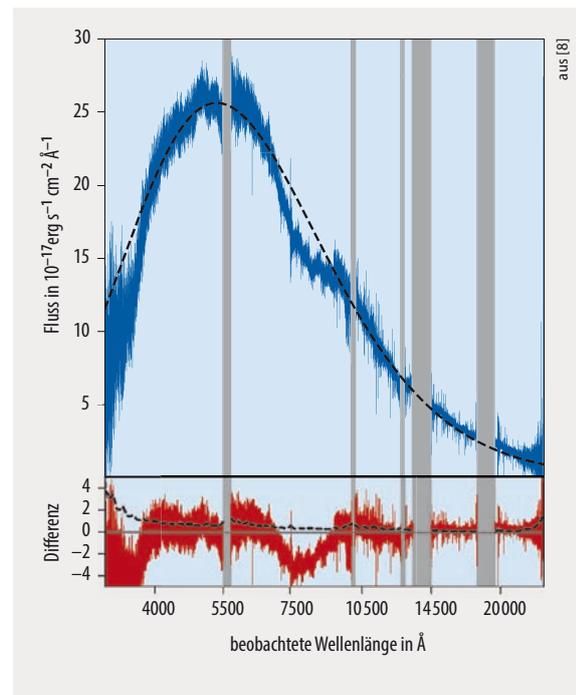
Eine Möglichkeit, den Parameter  $Y_e$  so zu erhöhen, dass Strontium entsteht, stellen Prozesse der schwachen Wechselwirkung dar, bei denen sich Neutronen in Protonen umwandeln. Dazu gehört beispielsweise der Einfang von Neutrinos ( $\nu_e + n \rightarrow p + e^-$ ) oder von Positronen ( $e^+ + n \rightarrow p + \bar{\nu}_e$ ). Eine protonenreichere Materie hat aber auch zur Folge, dass weniger Lanthanoide entstehen. Diese Elemente mit Ladungszahlen von  $Z = 57$  bis 71 zeichnen sich durch eine hohe Dichte atomarer Anregungszustände aus. Photonen können einer Umgebung mit vielen Lanthanoiden nur schwer entkommen: Sie regen einen Zustand nach dem anderen an und bleiben deshalb für lange Zeit in einem dichten „Wald von Spektrallinien“ gefangen. Erst wenn sich das expandierende Material nach einigen Tagen ausreichend verdünnt hat, können die Photonen als „rote Emission“ entkommen. Entstehen dagegen bei höherem  $Y_e$  nur leichtere Elemente

mit weniger dicht liegenden atomaren Anregungszuständen, können die Photonen früher mit blauen Wellenlängen entkommen.

Die Beobachtungen der elektromagnetischen Strahlung von GW170817 bestätigten die theoretischen Modelle für einige Prozent ausgeworfener r-Prozess-Materie: blaue Emission nach etwa einem Tag, rote Emission nach etwa einer Woche. Auch der zeitliche Verlauf der Lichtkurve stimmte sehr gut mit den Erwartungen überein [7]. Unklar blieb bisher die genaue Zusammensetzung des ausgeworfenen Materials; insbesondere fehlte die direkte spektroskopische Identifikation von Elementen aus dem r-Prozess.

Die Signaturen dieser Elemente sind Absorptionslinien im beobachteten Spektrum. Das Team um Darach Watson nutzte Daten des Spektrographen X-shooter, der am Very Large Telescope der ESA den Wellenlängenbereich vom Ultraviolett bis ins nahe Infrarot ( $\lambda = 320 \text{ nm}$  bis  $2480 \text{ nm}$ ) abdeckt [8]. Etwa 1,5 Tage nach der Kollision der Neutronensterne entspricht das emittierte Spektrum noch in guter Näherung einer Schwarzkörper-Strahlung. Um daraus spektroskopische Informationen zu extrahieren, nutzte das Team ein mehrstufiges Verfahren. Zunächst wurde mit einem möglichst einfachen Modell die Temperatur des Schwarzkörper-Spektrums zu  $3700 \text{ K}$  bestimmt. Anschließend kamen komplexere Modelle zum Einsatz, die es erlauben, die Absorptionslinien bestimmter Elemente zu simulieren und die Auswirkung des Strahlungstransports auf die Linienform zu berücksichtigen. Vergleiche der simulierten Spektren mit den Beobachtungen zeigten, dass sich zwei breite Absorptionbereiche bei etwa  $3500$  und  $8100 \text{ \AA}$  nur durch Strontium erklären lassen (Abb. 2). Die Linienform verändert sich dabei mit der Zeit gerade so, wie es nach einer frei expandierenden Explosion zu erwarten ist.

Der Nachweis von Strontium zeigt, dass Prozesse der schwachen Wechselwirkung den Protonenanteil der ausgeworfenen Materie erhöht haben, was konsistent ist mit der früh beobachteten blauen Emission. Diese Prozesse sind deshalb unbedingt in



**Abb. 2** Das Nachglühen der Neutronenstern-Kollision GW170817 (blau) entspricht etwa einem Schwarzkörper-Spektrum (oben, schwarz). In der Differenz aus Daten und Modell (rot) zeigen sich zwei breite Absorptionsbereiche bei  $3500$  und  $8100 \text{ \AA}$ . Die verdeckten Bereiche (grau) gingen nicht in die Analyse ein.

realistischen Computermodellen zu berücksichtigen. Ob es sich bei der Kollision GW170817 um ein typisches Ereignis handelte und ob es weitere Produktionsstätten für den r-Prozess gibt, müssen künftige Multimessenger-Beobachtungen zeigen.

- [1] F.-K. Thielemann et al., *Ann. Rev. Nucl. Part. Sci.* **67**, 253 (2017)
- [2] E. M. Burbidge et al., *Rev. Mod. Phys.* **29**, 547 (1957); A. G. W. Cameron, *PASP* **69**, 201 (1957)
- [3] A. Arcones et al., *A&A* **467**, 1227 (2007); L. Hudepohl et al., *Phys. Rev. Lett.* **104**, 251101 (2010)
- [4] J. M. Lattimer und D. N. Schramm, *ApJ* **192**, L145 (1974)
- [5] S. Rosswog et al., *A&A* **341**, 499 (1999); C. Freiburghaus et al., *ApJ* **525**, L121 (1999)
- [6] S. Wanajo et al., *ApJ* **789**, L39 (2014); O. Just et al., *MNRAS* **448**, 541 (2015)
- [7] G. Martinez-Pinedo et al., *Physik Journal*, Dezember 2017, S. 20
- [8] D. Watson et al., *Nature* **574**, 497 (2019)

## Autor

**Prof. Dr. Stephan Rosswog**, The Oskar Klein Centre for Cosmoparticle Physics, Department of Astronomy, Stockholm University, AlbaNova, Roslagstullbacken 21, SE-10691 Stockholm, Schweden