

Zeitschrift: Orion : Zeitschrift der Schweizerischen Astronomischen Gesellschaft
Herausgeber: Schweizerische Astronomische Gesellschaft
Band: 82 (2024)
Heft: 1

Artikel: Wie entstehen schwere Elemente wie Uran?
Autor: Schulthess, Elias von
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1096156>

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: 04.04.2026

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



Ein bisschen «astronomische Chemie»

Wie entstehen schwere Elemente wie Uran?

75 % des gesamten Universums besteht aus Wasserstoff, 24 % entfallen auf Helium und bloss 1 % aus schwereren Elementen. In der heutigen Rubrik schauen wir einmal auf das eine Prozent und fragen uns, wie schwere Elemente überhaupt entstehen können, allen voran jene, die nicht durch Fusionsprozesse gebildet werden.

Beitrag: Elias von Schulthess

«*Wir alle sind Sternenstaub*» heisst der Titel eines Buches, das der Wissenschaftsautor und Physiker *Stefan Klein* 2009 herausgegeben hat und zusammen mit Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern über die Rätsel unserer Existenz fachsimpelt. Es ist naheliegend, sich zu fragen, wie sich die chemischen Elemente überhaupt bilden konnten, wenn wir bedenken, dass 99 % des gesamten Universums aus Wasserstoff [H] und Helium [He] bestehen und bloss 1 % auf schwerere Elemente entfallen. Und aus diesem fast verschwindenden Anteil haben sich die festen Planeten, Asteroiden und Kometen gebildet und auf mindestens einem dieser konnte sich im Laufe von Jahrmilliarden Leben entwickeln. Ja, so surreal sich dies

lesen mag; wir haben mindestens schon einmal in einem Stern «gebrannt».

Wasserstoff, das leichteste aller Elemente, bestehend aus einem Proton und einem Elektron, entstand aus der ersten Materie im frühen Universum, als sich das Weltall ausreichend abgekühlt hatte und sich Protonen und Elektronen zu Atomen zusammenfinden konnten. Der grösste Anteil von Helium, dem zweithäufigsten Element, muss nach der gängigen Theorie schon wenige Minuten nach dem Urknall entstanden sein. Zudem wird Helium durch Kernfusionsprozesse in Sternen produziert; wir sprechen vom Wasserstoffbrennen, einer Kernfusion von Protonen zu Helium im Inneren von Sternen, eine Art «stellare Wasserstofffusion».

SCHALENBRENNEN IN STERNEN

Die ersten Sterne entstanden vermutlich 100 bis 250 Millionen Jahre nach dem Urknall, und zwar in kleinen Protogalaxien, die ihrerseits aus Dichteschwankungen im frühen Universum hervorgingen. Wir müssen uns die Sternentstehung nach einer Art «Zufallsprinzip» vorstellen, denn jeder Protostern «erhielt» gewissermassen ein Anfangsinventar an Wasserstoff und Helium, und je nach Masse «zündete» das Wasserstoffbrennen etwas eher. Kleine Sterne fusionieren im Kern bloss Wasserstoff zu Helium, während es Sterne wie unsere Sonne aufgrund ihrer im Kern vorherrschenden Temperatur und des Drucks bis zur Fusion von Kohlenstoff [C] schaffen. Anzumerken ist dabei, dass sich beim Schalenbrennen



Abbildung 1: Schwere Elemente wie Platin (links), Gold (Mitte) oder Iridium (rechts) gab es in unserem Universum nicht seit jeher. Sie entstanden erst nach Supernova-Explosionen von Überriesen.

Quelle: Wikipedia

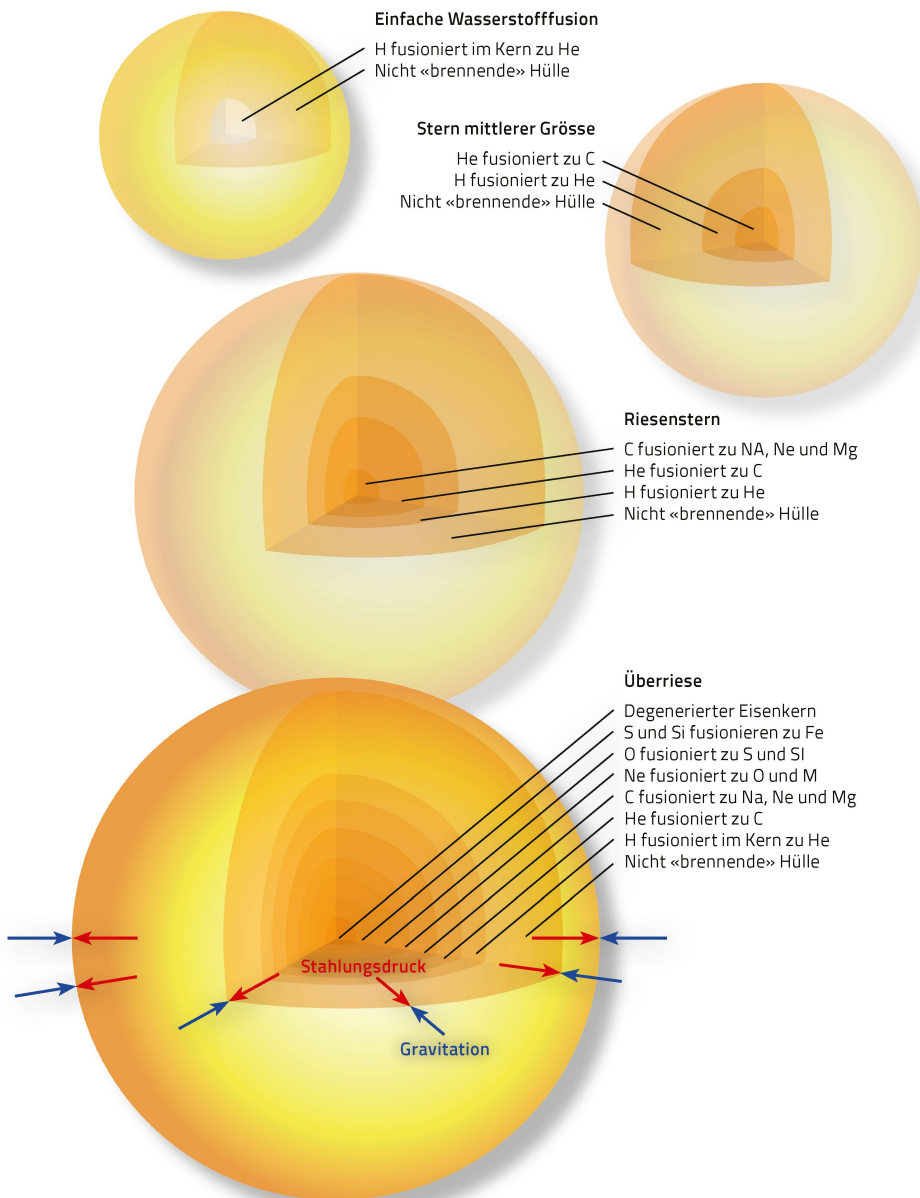


Abbildung 2: Die leichten Elemente (bis Eisen) entstehen durch Kernfusion in Sternen. Beim Wasserstoffbrennen fusioniert Wasserstoff zu Helium. Weiter wird Helium zu Kohlenstoff, Kohlenstoff zu Neon, Neon zu Sauerstoff, Sauerstoff zu Silizium und Silizium letztendlich zu Eisen fusioniert.

Grafik: Thomas Baer, ORIONmedien

in Sternen die leichteren Fusionsprozesse in die äusseren Schichten verlagern, während die zunehmend schwereren Elemente im Kernbereich des Sterns entstehen, wo Druck und Temperatur zunehmen.

Unsere Sonne fusioniert jede Sekunde rund 600 Millionen Tonnen Wasserstoff zu 596 Millionen Tonnen Helium. Anders ausgedrückt; jede Sekunde wird die Sonne 4 Millionen Tonnen «leichter», sie gibt es in Form von Strahlung ab, und das schon seit rund 4.6 Milliarden Jahren! Alle Sterne, die sich in der Phase des Wasserstoffbrennens befinden, durchleben ihr stabiles Stadium, das je nach Sternkaliber einige Milliarden Jahre dauern kann. Wir sprechen vom sogenannten Hauptreihen-

stadium, ein Begriff, der sich auf das Hertzsprung-Russell-Diagramm, kurz HRD, bezieht, ein Diagramm, das grob die Entwicklungsverteilung der Sterne zeigt. Grundsätzlich können wir sagen: Je grösser ein Stern, desto verschwenderischer geht er mit seinem «Brennstoff» um. Dies können wir an der Lebenserwartung eines Überriesen festmachen. Während unsere Sonne – ein eigentlicher Winzling im Vergleich zu einem Roten Überriesen wie Betelgeuze im Sternbild Orion – gut und gerne 13 Milliarden alt werden kann, «lebt» ein Überriese lediglich einige wenige Millionen Jahre.

Die längste Zeit seines Daseins befindet sich ein Stern in einem Gleichgewicht.

Zwar würde der Strahlungsdruck einen Stern beliebig aufblähen lassen. Doch die Schwerkraft wirkt entgegen, und so sind Sterne mehr oder weniger kugelförmige Plasmagebilde. Irgendwann kommt der Moment, wo die Kernfusion nicht weitergeht. Auch unsere Sonne wird dereinst ein aufgeblähter Heliumstern sein. Danach lässt der Strahlungsdruck allmählich nach, die Schwerkraft beginnt zu überwiegen.

SO UNTERSCHIEDLICH ENDEN STERNE

Aus unzähligen Beobachtungen von Sternen haben die Astronomen heute eine recht genaue Vorstellung, wie ein Stern endet. Im Falle unserer Sonne etwa koll-

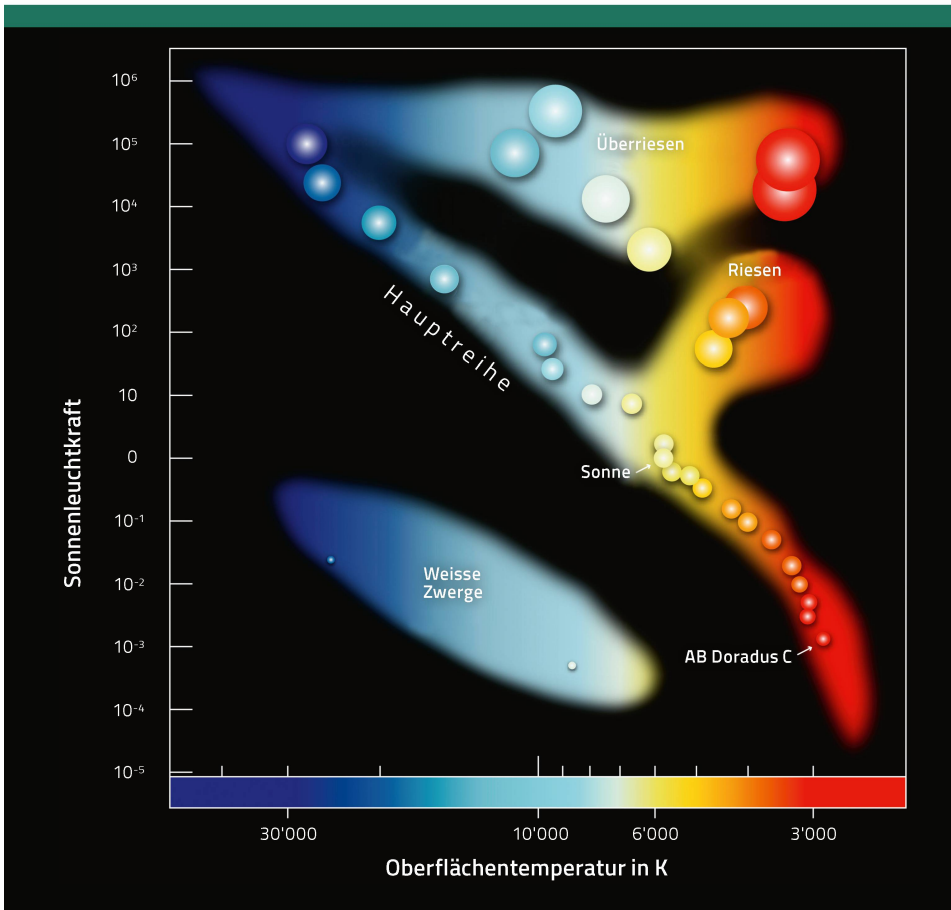


Abbildung 3: Das Hertzsprung-Russell-Diagramm zeigt grob die Verteilung der Sterne über ihre Entwicklungsstadien. Im Diagramm zeigen sich verschiedene charakteristische Bereiche. An der Position eines Sterns im HRD kann man meist seinen Entwicklungszustand ablesen.

Quelle: Wikipedia

biert der Helium-Riese, sobald sämtliche Heliumvorräte in seinem Inneren in Kohlenstoff umgewandelt sind. Übrig bleibt eine Sternleiche, ein Weißer Zwergstern. Dieser wird nur durch einen sonderbaren, nach aussen gerichteten «Entartungsdruck» zwischen den Elektronen seiner Atome davor bewahrt, zu einem noch kompakteren Objekt zu werden, weil sich gleiche Ladungen bekanntlich abstoßen. Die nicht mehr aktiven Sternhüllen werden abgestossen und zum Leuchten angeregt. Am Himmel können wir unzählige solcher «gestorbenen Sterne» sehen; es sind Planetarische Nebel.

Ein wörtlich explosives Ende nehmen Überriesensterne. Nun kommen wir auch unserer heutigen Frage näher. Wie wir gelernt haben, entsteht Eisen vor allem beim Siliciumbrennen in schweren Sternen bei Temperaturen von $2.7 \cdot 10^9$ bis $3.5 \cdot 10^9$ K und einer Dichte von mindestens $3 \cdot 10^{10}$ kg/m³. Noch schwerere Elemente können durch Fusionsprozesse nicht weiter gebildet werden. Die Fusion von Eisen bräuchte

mehr Energie als vom Stern selbst produziert werden kann. Bei Eisen kann sich daher kein neues Gleichgewicht einstellen. Im Kern eines Überriesen reichert sich Eisen an. Erreicht dieser die Chandrasekhar-Grenze, welche die obere Grenze für die Masse eines Weissen Zwergs definiert (ca. bei 1.26 Sonnenmassen), kommt es zu einer hydrodynamischen Supernova. Der Stern kollabiert im wörtlichen Sinne unter seinem «eigenen Gewicht».

DOCH WOHER STAMMEN DIE SCHWERSTEN ELEMENTE?

Bei einer Supernova werden unvorstellbare Energien freigesetzt; innert weniger Sekunden ein Foe (10^{44} J)! Damit wir dies einordnen und vergleichen können: Ein Foe entsprechen $3 \cdot 10^{28}$ TWh (Terawattstunden). Der Schweizer Endverbrauch lag im Jahr 2023 bei 57 TWh. Wir hätten damit auf alle Zeiten unsere Energieversorgung gesichert, für die nächsten $5 \cdot 10^{26}$ Jahre!

Die meisten der schwereren Atome entstehen durch Nukleosynthese, einem

Vorgang, bei dem es zu einer Bindung von Protonen und Neutronen kommt. Auch hier handelt es sich um eine Kernverschmelzung, allerdings unter Extrembedingungen, welche die massereichsten Sterne nur während ihrer Supernova-Phase erzeugen können.

Auch Zusammenstöße von Neutronensternen können schwerere Elemente wie Gold, Silber und Uran bilden; hier haben wir es mit einem als rapid-Prozess (kurz r-Prozess) bezeichneten Mechanismus zu tun, bei dem Elemente wie Eisen innert kürzester Zeit viele Neutronen einfangen. Einige Neutronen wandeln sich in Protonen um (β -Zerfall) und ziehen weitere Neutronen aus der Umgebung an. Solch schwere Elemente bleiben in langlebigen Sternen oder deren Überresten gebunden oder werden durch Explosionen und Sternwinde wieder freigesetzt und stehen im interstellaren Raum nachfolgenden Generationen von Sternen als Baumaterial abermals zur Verfügung.

Eine Neutronenstern-Kollision, so vermuten die Wissenschaftler, könnte die

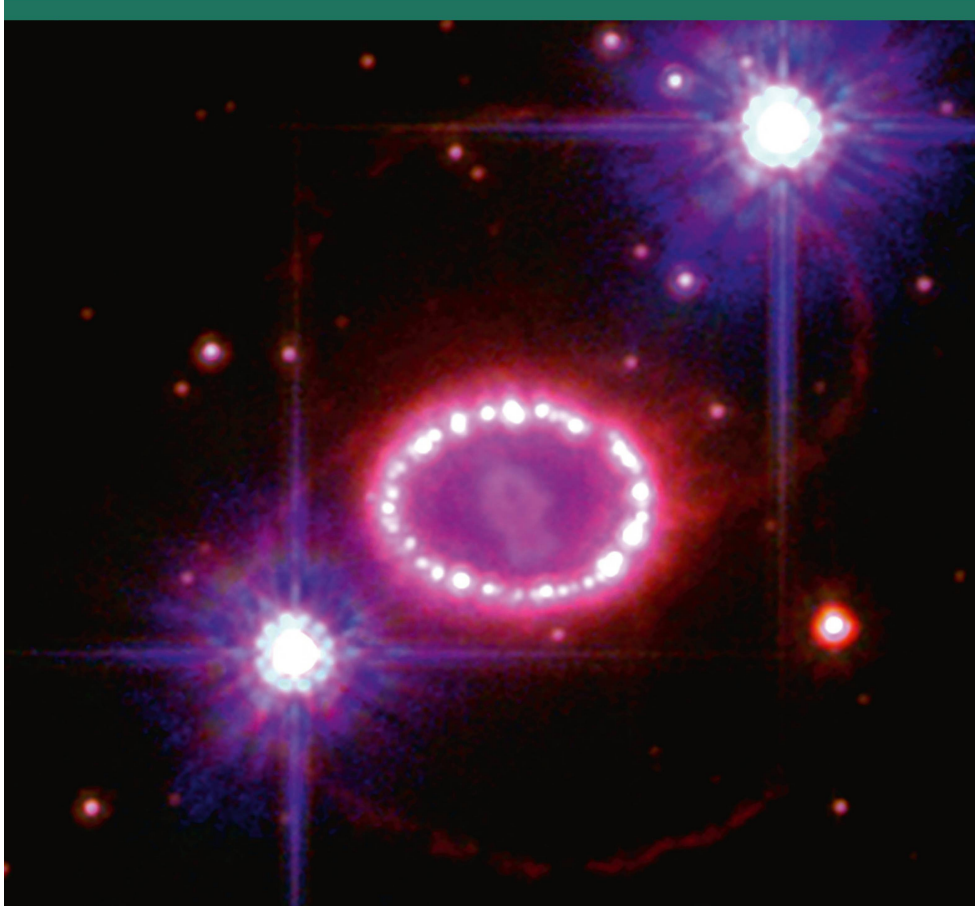


Abbildung 4: Vor nunmehr 37 Jahren erlebten Astronomen eine der hellsten Sternexplosionen seit mehr als 400 Jahren. SN 1987A strahlte nach ihrer Entdeckung am 23. Februar 1987 mehrere Monate lang mit der Kraft von 100 Millionen Sonnen. Beobachtungen, die in den letzten 30 Jahren vom Hubble-Weltraumteleskop der NASA und vielen anderen wichtigen Erdbeobachtungsstationen durchgeführt wurden, haben die Sichtweise der Astronomen darüber, wie massereiche Sterne ihr Leben beenden, erheblich verändert. Astronomen schreiben Hubbles scharfer Sicht zu, dass sie wichtige Hinweise auf den Untergang des massereichen Sterns erhielten. Dieses Bild des Hubble-Teleskops zeigt das Dreiringsystem der Supernova, einschliesslich der hellen Flecken entlang des inneren Gasrings, der den explodierten Stern umgibt. Eine durch die Sternexplosion freigesetzte Schockwelle aus Material trifft auf Regionen entlang des inneren Rings, erhitzt sie und bringt sie zum Leuchten. Der etwa ein Lichtjahr grosse Ring wurde wahrscheinlich bereits etwa 20'000 Jahre vor seiner Explosion vom Stern abgestossen.

Bild: NASA / HST

schweren Elemente auf die Erde (und ins Sonnensystem) gebracht haben. Bereits als erst eine protoplanetare Scheibe, die solare Urwolke, rotierte, muss es radioaktive Atome wie Plutonium oder Curium gegeben haben. Bis vor wenigen Jahren war deren Quelle ein Rätsel. Mittlerweile scheint man eine plausible Erklärung gefunden zu haben: Demnach soll es vor 4.6 Milliarden Jahren, knapp 100 Millionen Jahre bevor sich das Sonnensystem bildete, in rund 1'000 Lichtjahren Entfernung zu dieser Kollision gekommen sein, welche schwere Isotope in die Geburtszone des Ur-Sonnensystems strömen liess.

GIBT ES SCHWERERE ELEMENTE ALS URAN?

Das schwerste natürlich vorkommende Element ist Uran mit der Ordnungszahl 92. Künstlich konnten noch wesentlich schwerere Elemente mit bis zu 294 Protonen und Neutronen hergestellt werden, doch diese sind hoch radioaktiv und zerfallen binnen Sekundenbruchteilen. Kurzum:

In der Natur kommen solche Elemente gar nicht vor, glaubte man jedenfalls bis vor Kurzem. Forscher der University of Michigan haben scheinbar Hinweise in Sternspektren gefunden, die im Universum durchaus Atome mit mehr als 260 Protonen und Neutronen vermuten lassen. Sie beobachteten quasi die Zerfallsprodukte solcher extrem schwerer Elemente. <

Sie wählen aus – wir berichten



In der Rubrik «Nachgedacht – nachgefragt» greifen wir astronomische Fragen von Leserinnen und Lesern auf. In jeder ORION-Ausgabe schlagen wir drei Themen vor, über die auf der ORION-Website via QR-Code (oben) abgestimmt werden kann. Die Frage mit den meisten Stimmen wird im nächsten Heft behandelt. Zur Auswahl für ORION 2/24 stehen folgende Themen:

- Warum gibt es die Schwerelosigkeit?
- Wie sind die Ringe des Saturns entstanden?
- Warum gibt es im Weltall keinen Sauerstoff?