

Spektrum
der Wissenschaft

KOMPAKT

DAS PERIODEN- SYSTEM

Auf der Spur der Elemente

Nukleosynthese

Von Wasserstoff bis Eisen

Neue Elemente

Insel der Schwergewichte

Prüfverfahren

Streit um die Neuen



Antje Findekle
E-Mail: findekle@spektrum.de

Liebe Leserin, lieber Leser,
es ist vielleicht das, was Ihnen aus dem Chemieunterricht
am nachhaltigsten in Erinnerung geblieben ist:
das Periodensystem. Es feiert im Jahr 2019 seinen
150. Geburtstag.

Aber – wie sind sie überhaupt entstanden, die darin
aufgelisteten Elemente? Und warum weist die Tafel an
manchen Stellen Lücken auf, die offenbar schwer zu
schließen sind? Dieses Kompakt geht auf Spurensuche.

Eine spannende Lektüre wünscht Ihnen

Erscheinungsdatum dieser Ausgabe: 29.04.2019

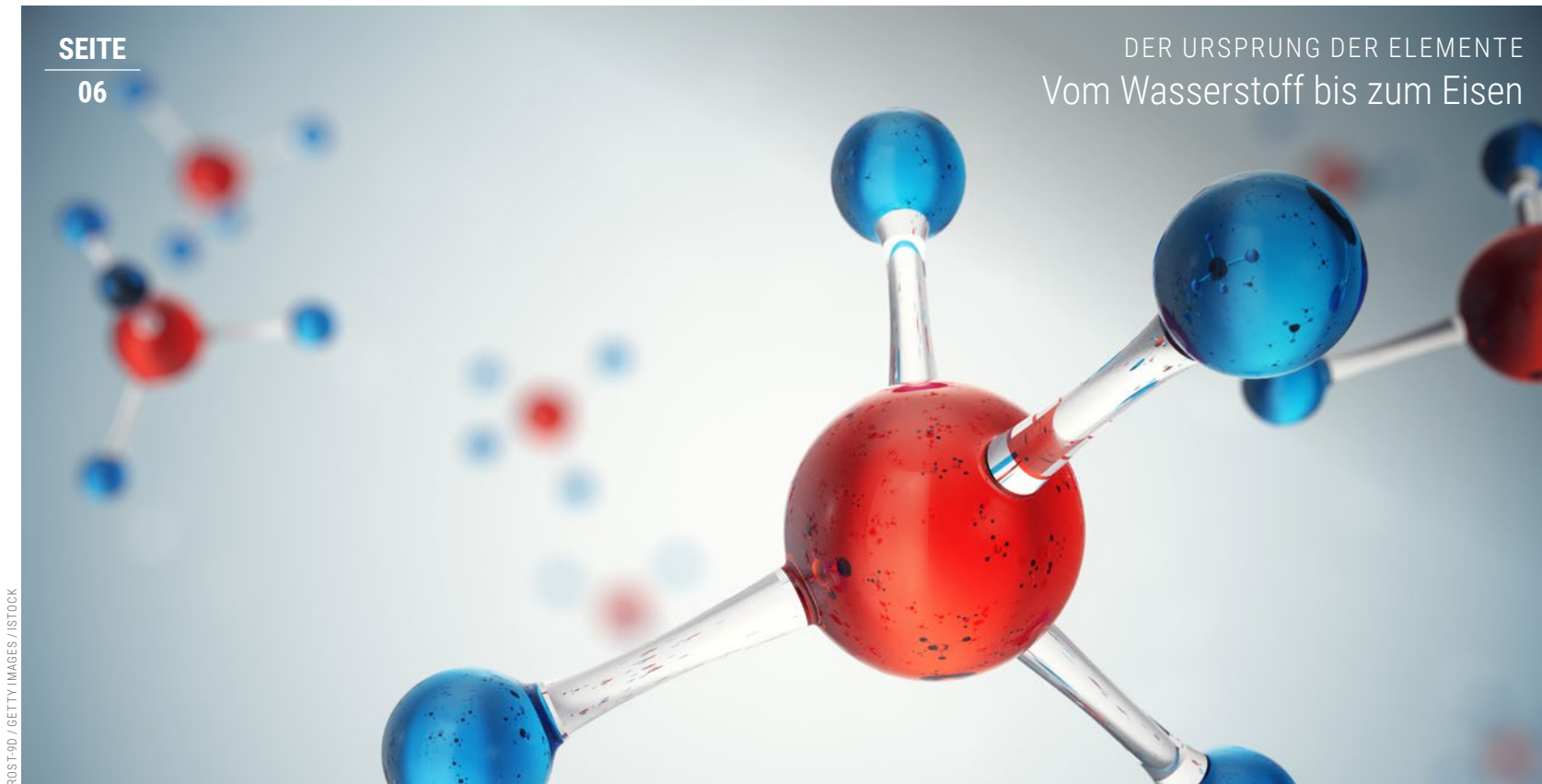
Folgen Sie uns:



CHEFREDAKTEURE: Prof. Dr. Carsten Könneker (v.i.S.d.P.)
REDAKTIONSLEITER: Dr. Daniel Lingenhöhl
ART DIRECTOR DIGITAL: Marc Grove
LAYOUT: Oliver Gabriel, Marina Männle
SCHLUSSREDAKTION: Christina Meyberg (Lt.), Sigrid Spies,
Katharina Werle
BILDREDAKTION: Alice Krüßmann (Lt.), Anke Lingg, Gabriela Rabe
PRODUKTMANAGEMENT DIGITAL: Antje Findekle,
Dr. Michaela Maya-Mrschik
VERLAG: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH,
Tiergartenstr. 15–17, 69121 Heidelberg, Tel. 06221 9126-600,
Fax 06221 9126-751; Amtsgericht Mannheim, HRB 338114,
UStd-Id-Nr. DE229038528
GESCHÄFTSLEITUNG: Markus Bossle
MARKETING UND VERTRIEB: Annette Baumbusch (Lt.),
Michaela Knappe (Digital)
LESER- UND BESTELLSERVICE: Helga Emmerich, Sabine Häusser,
Ilona Keith, Tel. 06221 9126-743, E-Mail: service@spektrum.de

BEZUGSPREIS: Einzelausgabe € 4,99 inkl. Umsatzsteuer
ANZEIGEN: Wenn Sie an Anzeigen in unseren Digitalpublikationen
interessiert sind, schreiben Sie bitte eine E-Mail an
service@spektrum.de.

Sämtliche Nutzungsrechte an dem vorliegenden Werk liegen bei
der Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH. Jegliche
Nutzung des Werks, insbesondere die Vervielfältigung, Verbreitung,
öffentliche Wiedergabe oder öffentliche Zugänglichmachung, ist
ohne die vorherige schriftliche Einwilligung des Verlags unzulässig.
Jegliche unautorisierte Nutzung des Werks berechtigt den Verlag
zum Schadensersatz gegen den oder die jeweiligen Nutzer. Bei jeder
autorisierten (oder gesetzlich gestatteten) Nutzung des Werks ist
die folgende Quellenangabe an branchenüblicher Stelle vorzu-
nehmen: © 2019 (Autor), Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesell-
schaft mbH, Heidelberg. Jegliche Nutzung ohne die Quellenangabe
in der vorstehenden Form berechtigt die Spektrum der Wissenschaft
Verlagsgesellschaft mbH zum Schadensersatz gegen den oder die
jeweiligen Nutzer. Bildnachweise: Wir haben uns bemüht,
sämtliche Rechteinhaber von Abbildungen zu ermitteln. Sollte
dem Verlag gegenüber der Nachweis der Rechtsinhaberschaft geführt
werden, wird das branchenübliche Honorar nachträglich gezahlt.
Für unaufgefordert eingesandte Manuskripte und Bücher
übernimmt die Redaktion keine Haftung; sie behält sich vor,
Leserbriefe zu kürzen.



SEITE
06

DER URSPRUNG DER ELEMENTE
Vom Wasserstoff bis zum Eisen

ROST-90 / GETTY IMAGES / ISTOCK

- 04 IM GIFTSCHRANK
Älteste Kopie des Periodensystems
gefunden
- 06 DER URSPRUNG DER ELEMENTE
Vom Wasserstoff bis zum Eisen
- 25 DER URSPRUNG DER ELEMENTE
Durch Neutroneneinfang zu den schwersten
Atomkernen
- 45 NEUE ELEMENTE
Insel der Schwergewichte
- 57 UMSTRITTENES PRÜFVERFAHREN
Der Streit um die Neuen im Periodensystem
- 65 CHEMIE
Ist das Periodensystem falsch herum?



SEITE
25

DER URSPRUNG DER ELEMENTE
Durch Neutroneneinfang
zu den schwersten
Atomkernen

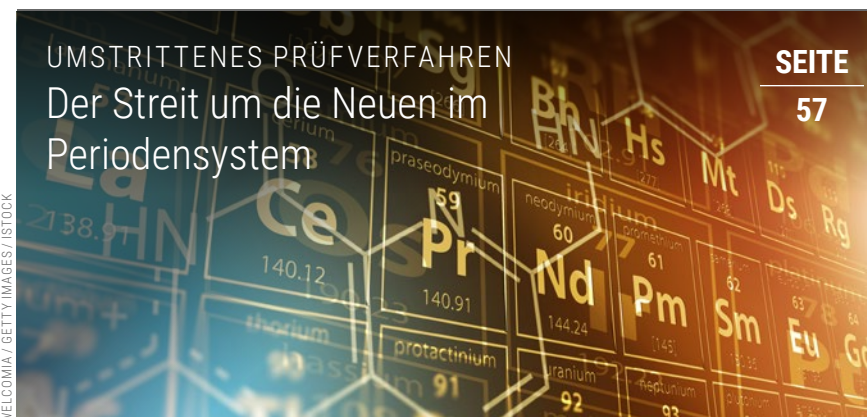
KTSIMAGE / GETTY IMAGES / ISTOCK



NEUE ELEMENTE
Insel der Schwergewichte

SEITE
45

DRHITCH / STOCK ADOBE.COM



UMSTRITTENES PRÜFVERFAHREN
Der Streit um die Neuen im
Periodensystem

SEITE
57

WELCOMIA / GETTY IMAGES / ISTOCK

Periodische Gesetzmässigkeit der Elemente nach Meyer

Reihen	Gruppe I $R^2 O$	Gruppe II RO	Gruppe III $R^2 O^3$	Gruppe IV RH^4 RO^2	Gruppe V RH^3 $R^2 O^5$	Gruppe VI RH^2 RO^3	Gruppe VII RH $R^2 O^7$	Gruppe VIII RH $R^2 O^7$
1	H=1							
2	Li=7	Be=9.4	B=11	C=12	N=14	O=16	F=19	
3	Na=23	Mg=24.3	Al=27	Si=28	P=31	S=32	Cl=35.5	
4	K=39	Ca=40	Sc=45	Ti=48	V=51	Cr=52	Mn=55	Fe=56
5	(Cu=63)	Zn=65	Y=88	Zr=90	Nb=94	Mo=96	Se=79	Br=80
6	Rb=85	Sr=87	Yt=88	Zr=90	Nb=94	Mo=96	--=100	Ru=101
7	(Ag=108)	Cd=112	In=113	Sn=118	Sb=122	Te=125	J=127	
8	Cs=133	Ba=137	Ce=137	La=139		Di=145?		
9	(-)							
10	-	165	-	169	Er=170	-173	Ta=182	W=184
11	(Au=196)	Hg=200	Tl=204	Pb=208	Bi=210			

IM GIFTSCHRANK

Älteste Kopie des Periodensystems gefunden

von Daniel Lingenhöhl

Das Periodensystem feiert 2019 sein 150-jähriges Jubiläum.
Passend dazu ist die bislang älteste bekannte Posterausgabe der
Elementetafel aufgetaucht.

Im Jahr 1869 entwickelten der russische Chemiker Dmitri Mendelejew und sein deutscher Kollege Lothar Meyer unabhängig voneinander das Periodensystem: die erste systematische Einteilung anhand der Ordnungszahlen und chemischen Eigenschaften der Elemente. Wenig später wurde diese Tafel bereits reproduziert und unter anderem an Universitäten ausgegeben (oder verkauft). Eines dieser Exemplare stöberte vor wenigen Jahren der Chemiker Alan Aitken von der schottischen Universität St. Andrews zufällig auf, und eine Datierung ergab nun, dass es sich um die älteste bekannte Kopie handeln dürfte. Das teilte die Universität in einer Erklärung mit.

Aitken stieß demnach 2014 auf das Poster, als er einen alten Lagerraum der Fakultät für Chemie durchstöberte. Dort hatten sich seit der Eröffnung alte Chemikalien, Laborgeräte und anderes Material ange-

sammelt. Dazwischen steckte aber auch noch eine Rolle mit aufgerolltem Unterrichtsmaterial. Und darunter befand sich schließlich das etwas vergilbte und sehr fragile Periodensystem.

Einen ersten Hinweis auf das Alter gab die Zahl und Anordnung der Elemente auf dem Poster. Es ähnelte stark Mendelejews zweiter Ausführung von 1871, war aber nicht damit identisch. Die Ausgabe war auf Deutsch und trug als Herstellerangabe »Verlag v. Lenoir & Forster, Wien«, der von 1875 bis 1890 produzierte. Der Wissenschaftshistoriker Eric Scerri von der University of California in Los Angeles grenzte den Zeitraum auf die Jahre zwischen 1879 und 1886 ein: Die beiden Elemente Gallium und Skandium waren bereits eingetragen, da sie zwischen 1875 und 1879 entdeckt wurden. Dagegen fehlt Germanium, das erst 1886 beschrieben wurde.

Eine weitere Nachforschung in den Universitätsarchiven brachte schließlich zu Tage, dass ein 1885 erstelltes Periodensystem im Jahr 1888 durch den damaligen Chemieprofessor Thomas Purdie erstanden und im Unterricht eingesetzt wurde. Um das Poster zu erhalten, hat die Universität erste Maßnahmen ergriffen: Unter anderem wurde Schmutz entfernt und das Papier entsäuert. Zudem hat man lückenhafte Stellen mit einem dem damaligen Papier nachgemachten Gemisch ausgebessert. Ein Faksimile wird nun ausgestellt, während das Original inzwischen bessere Verwahrung gefunden hat. ↩

(Spektrum – Die Woche, 04/2019)

Vom Wasserstoff **bis zum Eisen**

von Karlheinz Langanke und Michael Wiescher

Sie sind die Bausteine von allen Stoffen um uns herum und auch von unseren eigenen Körpern: die chemischen Elemente. Doch woher stammen sie, und wie haben sie sich gebildet? Die Suche nach Antworten führt uns auf eine spannende Reise durch das gesamte Universum bis zurück zum Urknall. Es zeigt sich, dass die Vorgänge im Mikrokosmos auf faszinierende Weise mit denen im Makrokosmos verknüpft sind. Und wir erkennen: Wir alle bestehen aus Sternenstaub.



Wenn wir unsere Umgebung näher mit wissenschaftlichen Augen betrachten, finden wir darin eine wahre Fülle an chemischen Elementen: Zwischen dem leichten Wasserstoff und dem schweren, radioaktiven Uran gibt es im Periodensystem der Elemente Platz für so Unterschiedliches wie Alkalimetalle, Seltene Erden oder Edelgase. Trotz ihrer Vielfalt ist ihr innerer Aufbau frappierend ähnlich: Ihre kleinsten Einheiten, die Atome, bestehen alle aus nur drei grundlegenden Bausteinen, nämlich Protonen und Neutronen im Kern (gemeinsam auch Nukleonen genannt) und Elektronen in der Atomhülle. Es ist letztlich nur die unterschiedliche Anzahl dieser Bausteine, welche die vielfältigen Erscheinungsformen und Eigenschaften der Elemente bedingt.

Karlheinz Langanke ist Professor für theoretische Physik an der Technischen Universität Darmstadt und Forschungsdirektor am GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung und von FAIR. **Michael Wiescher** ist Freimann Professor für Physik an der University of Notre Dame, USA, und Direktor des dortigen Joint Institute for Nuclear Astrophysics und des Nuclear Science Laboratory.

Wasserstoff ist das einfachste Element, denn sein Atomkern ist ein einzelnes Proton. Das Helium hat einen Atomkern, der aus zwei Protonen und normalerweise zwei Neutronen besteht, und hat völlig andere Eigenschaften. Uran, das schwerste in der Natur vorkommende Element, enthält 92 Protonen und – in seiner langlebigsten Form – 146 Neutronen im Kern.

Wenn wir wissen wollen, wie diese Elemente entstanden sind und was ihre unterschiedliche Häufigkeit verursacht hat – wo müssen wir nach Antworten suchen? Hinweise liefern uns die gewaltigen Kräfte, die in Form von Bindungsenergie in den Atomkernen steckt. Wir nutzen sie zum Beispiel zur Stromerzeugung durch Spaltung schwerer Atomkerne. Auch die Verschmelzung leichter Atomkerne setzt enorme Energiemengen frei. Um diese Fusion in Gang zu setzen, bedarf es extremer Bedingungen von unvorstellbar hoher Dichte und Temperatur. Unsere Spurensuche führt uns also an sehr spezielle Orte in der Natur: Nur zu Beginn des Universums, kurz nach dem Urknall, und innerhalb von Sternen und ihren spektakulären Explosionen lagen beziehungsweise liegen die erforderlichen Bedingungen vor.

AUF EINEN BLICK

Sterne als Elementfabriken

- 1 Alle chemischen Elemente, die in der Natur vorkommen, sind durch Kernreaktionen in gewaltigen Prozessen im Kosmos entstanden.
- 2 Unmittelbar nach dem Urknall bildeten sich nur die leichtesten Elemente: der gesamte Wasserstoff, ein Teil des heute vorhandenen Heliums und etwas Lithium.
- 3 Alle anderen Elemente bis hin zum Eisen entstanden tief im Innern von Sternen oder bei der heftigen Explosion am Ende ihres Daseins durch schrittweises Verschmelzen von Atomkernen.

In den letzten 100 Jahren hat sich unsere Vorstellung von der Elementsynthese – dem Aufbau von neuen, schwereren Atomkernen aus leichteren – gefestigt. In diesem ersten Beitrag wollen wir hier den Ursprung der leichten Elemente bis hin zur Eisen-Nickel-Gegend beschreiben, wie sie in Sternen zumeist durch Kernfusion produziert werden. Die Synthese von allem, was im Periodensystem hinter Eisen zu finden ist, wird im Fokus des nachfolgenden Beitrags stehen.

Im Anfang war der Wasserstoff

Im Prozess der Elemententstehung sind die leichtesten Elemente die Grundbausteine für alle schwereren. Deshalb hängt die chemische Entwicklung unseres Universums davon ab, welche Elemente – und wie viel davon – anfangs vorhanden waren. Unsere Spurensuche führt uns also zunächst zum Anfang der Zeit, des Raums und aller Materie zurück: Unmittelbar nach dem Urknall war die Energiedichte unbeschreiblich hoch, die Temperatur überstieg zehn Milliarden Kelvin. Als Folge der Expansion des Kosmos nahmen Dichte und Temperatur danach rasch ab. Aus dem uranfänglichen Energie- und Materiebrei

Aufbau der Atomkerne

Alle Atome bestehen nur aus drei Grundbausteinen in unterschiedlicher Zusammensetzung: Die **Nukleonen** – positiv geladene Protonen und neutrale Neutronen – bilden den Atomkern, der von in der Atomhülle gebundenen, negativ geladenen Elektronen elektrisch abgeschirmt wird. Die Anzahl der Protonen – auch **Ordnungszahl** oder **Kernladungszahl** genannt – bestimmt, um welches Element es sich handelt. Kohlenstoff beispielsweise hat sechs Protonen im Atomkern. Hinzu kommen die Neutronen, beim Kohlstoff üblicherweise ebenfalls sechs. Es gibt aber auch stabile Kohlenstoffkerne mit sieben Neutronen: Sie machen gut ein Prozent des natürlichen Vorkommens aus.

Die Summe aus Protonen und Neutronen wird **Massenzahl** oder **Nukleonenzahl** genannt – im Fall der beiden Kohlenstoff-Varianten wären das die Massenzahlen zwölf und dreizehn. Kerne mit gleicher Protonenzahl, aber abweichender Neutronenzahl heißen **Isotope**: Es handelt sich um das gleiche chemische Element, aber um unterschiedlich schwere Varianten davon. Man bezeichnet sie mit dem Elementnamen, gefolgt von der Massenzahl, also beispielsweise Kohlenstoff-12 und Kohlenstoff-13.

Sobald ein Proton im Atomkern hinzukommt oder entfernt wird, ändert sich das Element, und somit wandeln sich auch die chemischen Eigenschaften des Stoffs. Kohlenstoff würde sich bei Hinzugeben eines Protons zu Stickstoff und bei Wegnahme eines Protons zu Bor verwandeln.

kondensierten in den ersten Augenblicken des Universums Protonen und Neutronen als materielle Teilchen aus.

Mit den Protonen waren die einfachsten Atomkerne – diejenigen des Wasserstoffs – in die Welt gesetzt. In den ersten wenigen Minuten nach dem Urknall waren die Dich-

te und die Temperatur noch hoch genug, dass erste Kernreaktionen stattfinden konnten. Es entstanden hauptsächlich Kerne von Helium-4 und in deutlich geringeren Mengen die Wasserstoff- und Heliumisotope Deuterium (ein Proton und ein Neutron) und Helium-3 (zwei Protonen

und ein Neutron). Auch Spuren eines dritten Elements bildeten sich: Lithium-7 (drei Protonen und vier Neutronen).

Damit kam die uranfängliche oder primordiale Elementsynthese auch schon zum Erliegen. Schwerere Elemente konnten nicht produziert werden, da es keine stabilen Atomkerne mit den Massenzahlen fünf und acht gibt. Der nächstschwerere stabile Atomkern wäre Beryllium-9 mit vier Protonen und fünf Neutronen – aber dieser konnte sich mit den Kernreaktionen, die unter den Bedingungen im frühesten Universum abliefen, nicht bilden.

Sterne der ersten Generation

Das Weltall enthielt nach den ersten wenigen Minuten also nur drei Elemente: Wasserstoff, Helium und Lithium (siehe »Elementhäufigkeiten«). Das blieb auch für die nächsten 400 Millionen Jahre so. Denn bevor die Elementsynthese weitergehen konnte, musste die Natur zunächst einen Mechanismus entwickeln, mit dem sich die Lücken bei fünf und acht in der Massenzahl überwinden lassen.

Die Gelegenheit kam mit den ersten Sternen. Dank der Gravitationswirkung der Dunklen Materie bildeten sich im vorhan-

denen Gas lokale Verdichtungen, aus denen riesenhafte Sterne mit dem Hundertfachen der Masse unserer Sonne wurden. In deren Innern stiegen Dichte und Temperatur auf Werte, die Kernfusionsprozesse ermöglichten.

Allerdings waren diese ersten Sterne sehr kurzlebig, denn im Gegensatz zu den heutigen Sternen stellte sich in ihnen kein stabiler Gleichgewichtszustand ein: Der im Innern durch Energiefreisetzung erzeugte Druck konnte nicht effizient genug der Kontraktion infolge der eigenen Schwerkraft entgegenwirken. Unter ihrer eigenen Masse kollabierten diese ersten Sterne, bis sie in einer gewaltigen Explosion, einer Supernova, zerrissen wurden. Während ihr Kernbereich als Neutronenstern oder Schwarzes Loch zurückblieb, wurden die ersten schweren Elemente – wie Kohlenstoff und Sauerstoff bis hin zu Kalzium – durch die Supernova in das junge Weltall geschleudert. Dort vermischten sie sich mit dem aus leichten Elementen bestehenden Gas und lieferten damit die Grundlage für die Bildung der nächsten Sternengeneration. Wie die Häufigkeitsverteilung der Elemente in der Nachfolgeneration aussah, lässt sich durch spektroskopische Untersu-

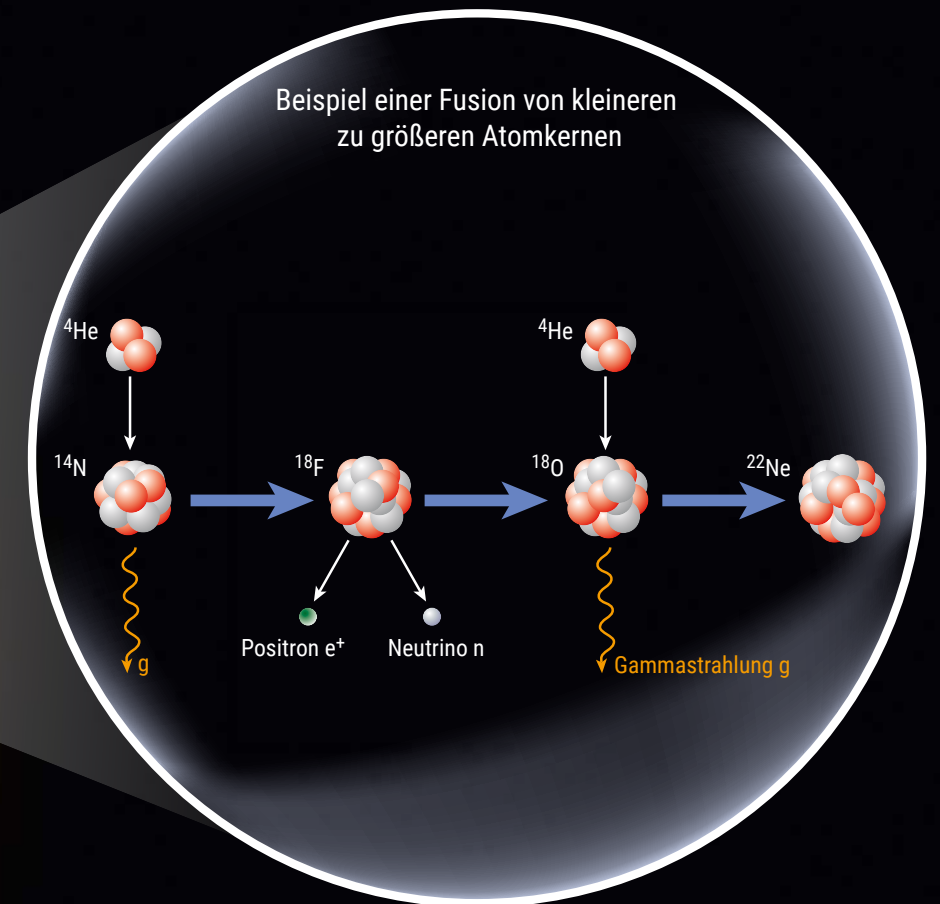
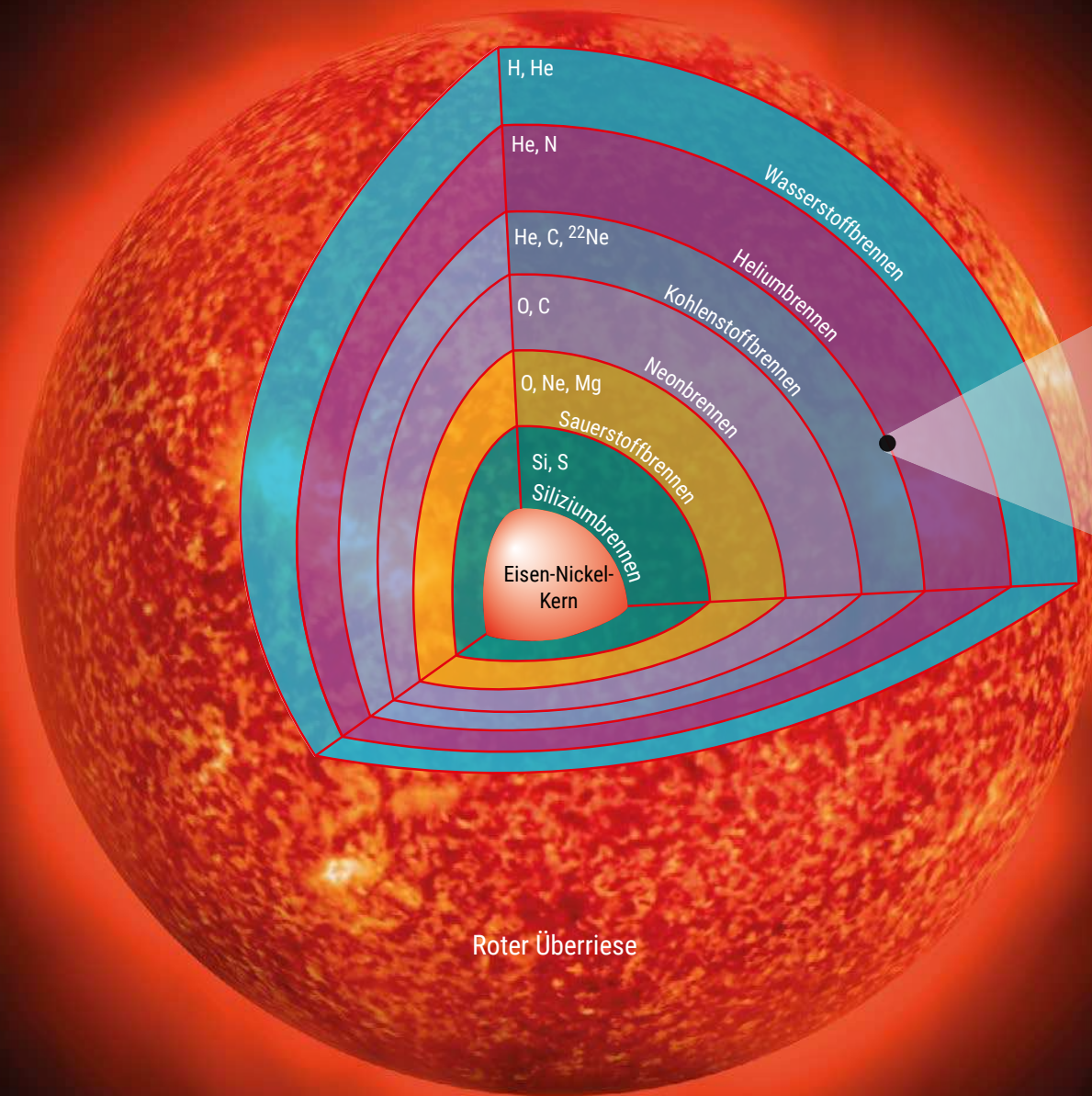
chungen der ältesten Sterne, die heute noch vorhanden sind, erschließen (siehe »Keller-Stern«).

Beim Kollaps eines Sterns der ersten Generation ergeben sich Dichten und Temperaturen, unter denen Elemente schwerer als Lithium gebildet werden. Die Lücken bei den Massenzahlen fünf und acht werden dabei über den Prozess der heißen Proton-Proton-Ketten – kurz p-p-Ketten – überbrückt. Ausgangsstufen sind Deuterium und Helium-3. Durch sukzessives Einfangen von Protonen und Helium-4-Kernen bildet sich der kurzlebige Kohlenstoff-11. Allerdings ist dieser Mechanismus durch die relativ geringe primordiale Häufigkeit von Deuterium beschränkt.

Doch bei höheren Dichten im kollabierenden Sternzentrum kommt es zum sogenannten Triple-Alpha- oder Drei-Alpha-Prozess, bei dem drei Helium-4-Kerne, bekannt als Alphateilchen, zu Kohlenstoff-12 fusionieren. Als Zwischenprodukt spielt hierbei das äußerst instabile Beryllium-8 eine Rolle: Dieser Kern zerfällt zwar mit einer Halbwertszeit von rund 10^{-17} Sekunden wieder in zwei Alphateilchen, doch im Gegensatz zu den Bedingungen kurz nach dem Urknall, wo diese Eigen-

ROTER ÜBERRIESE

Massereiche Sterne wie zum Beispiel Rote Riesen erzeugen in schalenförmigen Brennzonen verschiedene Elemente, die sie nach ihrer Explosion als Supernova im Weltall verteilen.



heit zu der Lücke bei der Massenzahl 8 führt, reichen Dichte und Temperatur im kollabierenden Stern sowie die vorhandenen Mengen an Helium aus, um nennenswerte Reaktionsraten zu erzielen. Denn die Reaktionspartner müssen innerhalb einer äußerst kurzen Zeitspanne zusammentreffen.

Kernphysikalisch betrachtet ist der Drei-Alpha-Prozess nur möglich, weil die beteiligten Atomkerne bestimmte zueinander passende Quantenkonfigurationen haben. So hat der Kohlenstoff-12-Kern in einem angeregten Zustand eine Drei-Alpha-Teilchen-Struktur. Die Anregungsenergie gibt der Kern durch Emission eines Gammaquants mit einer Energie von 7,5 Mega-elektronvolt ab. Diese Besonderheit zeigt, dass die Sternentwicklung im Makrokosmos unmittelbar mit den quantenmechanischen Konfigurationen des Mikrokosmos verknüpft sind.

Im einem nachfolgenden Schritt kann Kohlenstoff-12 ein weiteres Alphateilchen einfangen und dadurch das leichte und stabile Isotop Sauerstoff-16 formen. Dieses kann zwar theoretisch durch eine weitere Alphateilchen-Einfangreaktion zu Neon-20 werden, aber die Reaktionswahrschein-

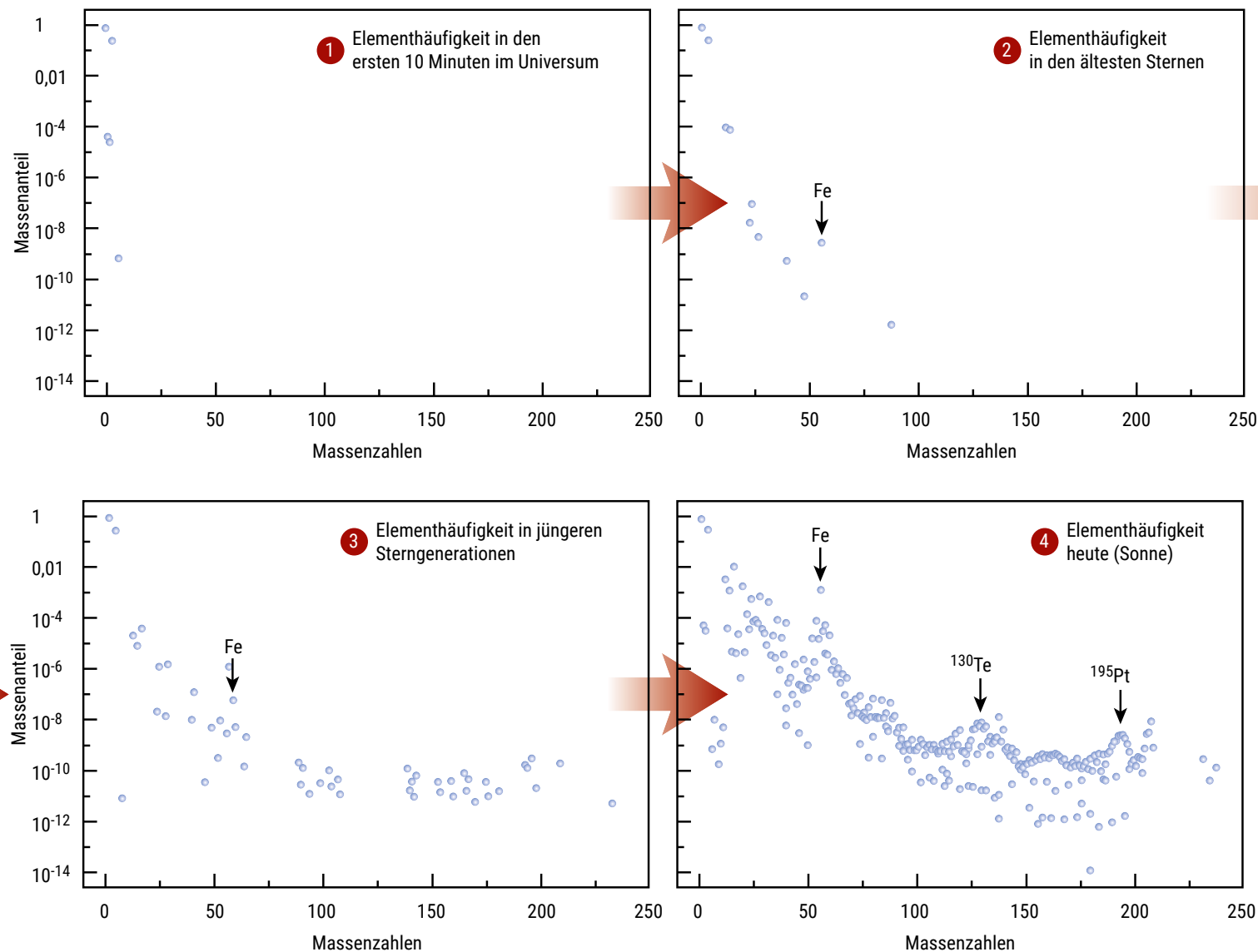
lichkeit ist erheblich geringer, wie sich in Experimenten zeigen ließ. Deshalb erfolgt keine nennenswerte Produktion des Edelgases Neon.

Im Innern des in sich zusammenstürzenden massereichen Sterns kommen also bereits Kohlenstoff und Sauerstoff vor. Mit dem rapiden Anwachsen von Dichte und Temperatur beim Kollaps ergeben sich Fusionsreaktionen zwischen diesen beiden Elementen, die zu den angeregten Zwischenkernen Magnesium-24, Silizium-28 und Schwefel-32 führen. Diese zerfallen dann wieder über Alphateilchen-, Protonen- und Neutronenausstoß in leichtere Kerne. Der dadurch freigesetzte Fluss an Protonen und Alphateilchen führt bei den hohen Temperaturen zum schnellen Aufbau noch schwererer Kerne bis hin zu Kalzium, Titan und Eisen.

Dies geschieht aber bereits in den letzten Sekundenbruchteilen vor dem Sturz in einen Neutronenstern und weiter in ein Schwarzes Loch. Die schwersten Elemente überstehen diesen Kollaps nicht: Sie verschwinden im Schwarzen Loch. Die leichteren Elemente hingegen werden von der nach außen laufenden Stoßwelle in das interstellare Medium geschleudert.

Es bleibt festzuhalten, dass die ältesten Sterne vorwiegend die leichteren Elemente Kohlenstoff und Sauerstoff bis hin zum Kalzium produzierten. Neben den Vorgängen in den ersten Minuten nach dem Urknall legten also – mit gebühlichem zeitlichen Abstand – die Sterne der ersten Generation die Grundlage für die weitere chemische Entwicklung des Universums. Die neu gebildeten schweren Kerne waren zwar um Größenordnungen seltener als die ursprünglichen Elemente Wasserstoff und Helium. Gleichwohl ergab sich eine neue Situation, denn nun waren die Voraussetzungen für langlebige Sternkonfigurationen und für die effektivere Fusion zu schweren Elementen gegeben.

Die nachfolgenden Generationen von Sternen, die sich durch lokale Verdichtungen in den interstellaren Gasen bildeten und auch heute noch bilden, durchlaufen bestimmte Entwicklungsphasen, die im Wesentlichen durch die Details der ablaufenden Kernfusionsreaktionen bestimmt sind. Diese Prozesse sind vergleichbar mit denen in der ersten Sternengeneration, nur wird die Sternentwicklung durch die interne Energieerzeugung stark gebremst. So bilden sich langlebige Gleichgewichtszu-



Elementhäufigkeiten

Die verschiedenen chemischen Elemente (hier nach ihrer Massenzahl aufgetragen) entstanden erst nach und nach im Universum, und auch ihre Häufigkeit veränderte sich im Lauf der Zeit. In den ersten Minuten nach dem Urknall bildeten sich nur Isotope von Wasserstoff, Helium und Lithium (1). Aus diesen Rohstoffen erzeugten die ersten Sterne weitere Elemente (2). Doch erst in nachfolgenden Stern- generationen entstand eine größere Vielfalt (3), bis sich schließlich die Situation einstellte, die wir heute beobachten (4) und die als Grundlage für die Entwicklung des irdischen Lebens diente.

SUN-GRAPHIK, NACH SCHÄTZ, H.: RARE ISOTOPES IN THE COSMOS. PHYSICS TODAY 61, 2008, FIG. 1

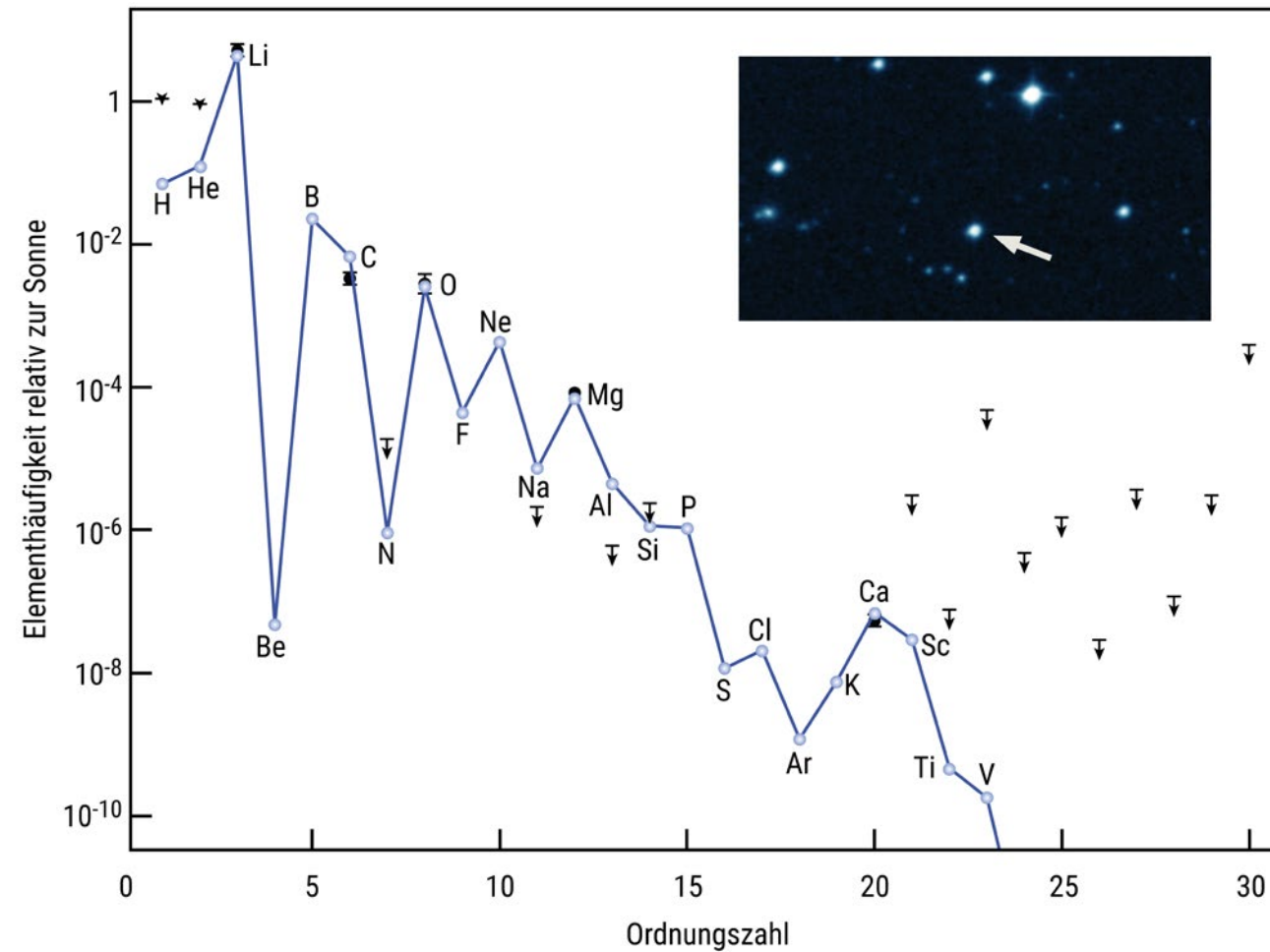
stände, welche die verschiedenen Lebens-
phasen eines Sterns definieren.

Wasserstoffbrennen

Die erste stabile Phase in der stellaren
Entwicklung ist das Wasserstoffbrennen,
in dem durch eine Folge von Kernreaktio-
nen zwischen den leichten Wasserstoff-

kernen untereinander und zwischen Was-
serstoffkernen und Kohlenstoff-, Stick-
stoff- und Sauerstoffisotopen im Zentrum
des Sterns Energie freigesetzt wird. Dies
erhöht die Temperatur und den Druck,
der wiederum die Gravitation kompen-
siert – die Kontraktion des Sterns kommt
zum Stillstand.

Dieses Wasserstoffbrennen, in dem sich
auch unsere Sonne befindet, ist die erste
und zugleich längste Lebensphase in der
Entwicklung der Sterne und dauert so lan-
ge an, bis der Wasserstoff im Sterninnern
verbraucht ist. Die Sonne wird noch für
weitere fünf Milliarden Jahre Wasserstoff
verbrauchen, bis die Energieausbeute sinkt



Keller-Stern

Einer der ältesten Sterne in unserer Galaxis ist SMSS 0313-6708 im Sternbild Südliche Wasserschlange (kleines Bild, durch Pfeil markiert). Entdeckt haben ihn Stefan Keller von der Australian National University und sein Team, weshalb er oft auch Keller-Stern genannt wird. Entstanden ist er aus der Asche der ersten Sternengeneration, die kaum Eisen und andere schwere Elemente enthält.

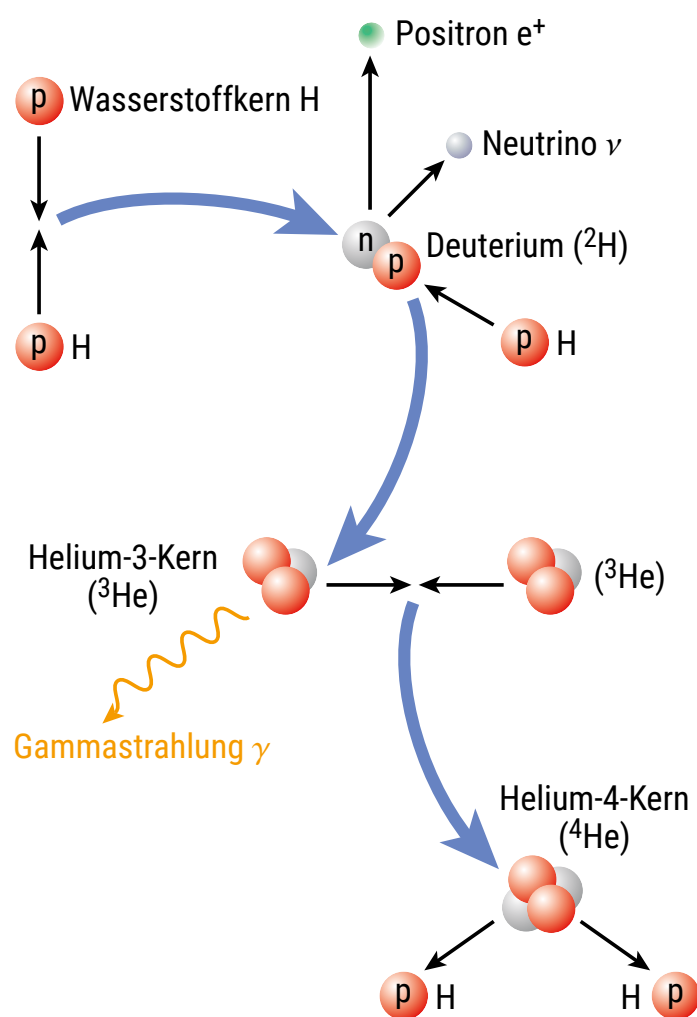
SUW-GRAFIK, NACH: KELLER, S.C. ET AL.: A SINGLE LOW-ENERGY, IRON-POOR SUPERNOVA AS THE SOURCE OF METALS IN THE STAR SMSS J031300.36-670839.3. NATURE 506, S. 463-466, 2014

und die Kontraktion des Sterninneren wieder einsetzt. Das führt zur weiteren Verdichtung des zumeist aus Helium bestehenden Innern des Sterns. Auch das Material, das sich in einer schalenförmigen Zone um das Sternzentrum befindet, wird verdichtet. Dadurch zündet nun dort das Wasserstoffbrennen, was den Druck nach außen erhöht und so den Stern zu einem Roten Riesen aufbläht.

Betrachtet man das Wasserstoffbrennen detailliert, so finden wir aus kernphysikalischen Überlegungen, dass es bei masseärmeren Sternen hauptsächlich über die bereits genannten p-p-Ketten und bei massereichen Sternen über den Bethe-Weizsäcker-Zyklus, auch CNO-Zyklus genannt, verläuft.

Die p-p-Ketten basieren auf einer Abfolge von Protoneneinfängen an leichten Ker-

nen, ausgehend von der Fusion von zwei Protonen zu Deuterium, also Wasserstoff-2. Dieser erste Fusionsprozess ist durch die schwache Wechselwirkung bestimmt, da dabei ein Proton über den so genannten Beta-Plus-Zerfall in ein Neutron umgewandelt werden muss. Die Reaktionsraten, die von der schwachen Wechselwirkung bestimmt sind, sind um viele Größenordnungen geringer als diejenigen, die von der



PROTON-PROTON-KETTE

Durch Verschmelzung von Wasserstoffkernen (Protonen, p) entsteht in mehreren Schritten unter Energiegewinn Helium. Zunächst fusionieren zwei Protonen zu Deuterium; dabei werden ein Positron und ein Neutrino frei. Aus dem Deuteriumkern und einem weiteren Proton bilden sich ein Helium-3-Kern und ein Gammaquant. Aus zwei Helium-3-Kernen entsteht Helium-4, wobei zwei Protonen abgespalten werden.

starken Kernkraft oder der elektromagnetischen Wechselwirkung dominiert werden. Dies ist der fundamentale Grund, weshalb unsere Sonne eine so lange Lebensdauer hat. Nur so ist es überhaupt möglich, dass ein Stern in einem relativ stabilen Zustand bleibt und auf seinen Planeten geologische, chemische und biologische Entwicklungsprozesse ablaufen können.

Die nachfolgenden Reaktionen sind durch Einfangs- und Fusionsreaktionen bestimmt, die auf der elektromagnetischen sowie der starken Wechselwirkung beruhen und somit deutlich schneller ablaufen. Ferner hängen die Raten dieser Reaktionen auch stark von der Struktur der Kerne selbst ab.

Dieser Einfluss der Kernstruktur tritt insbesondere beim CNO-Zyklus auf. Hier fusioniert der Wasserstoff katalytisch zu Helium, durch aneinandergereihte Anlagerung an schon existierende schwerere Kerne wie Kohlenstoff, Stickstoff und Sauerstoff. Die schwache Wechselwirkung behindert den CNO-Zyklus nicht, da die involvierten Kerne, die sich über den Beta-Zerfall umwandeln, Halbwertszeiten von nur einigen Minuten haben. Die Energieausbeute hängt von der Häufigkeit der

Kohlenstoff-, Stickstoff- und Sauerstoffisotope im Sterninnern ab. Deswegen kann dieser Prozess nicht zum Brennen der ersten Sterne beitragen, denn diese Elemente waren zu deren Zeiten noch gar nicht vorhanden.

Der letzte Schritt beim CNO-Zyklus ist der Protoneneinfang an Stickstoff-15, wodurch ein hochangeregter Sauerstoff-16-Kern entsteht, der in zwei Fragmente, Kohlenstoff-12 und Helium-4, zerbricht. Die spezielle Kernstruktur des angeregten Sauerstoff-16-Zwischenkerns ist dabei der kritische Parameter, der die Bildung eines Helium-4-Kerns bewirkt. Nur etwa ein Tausendstel der so gebildeten Sauerstoff-16-Kerne geht über das Ausstrahlen von Gammaquanten in den Grundzustand über und bleibt als Sauerstoff im Sterninnern zurück.

Die Lebensdauer eines Sterns in der wasserstoffbrennenden Phase hängt von der Schnelligkeit ab, mit der Wasserstoff zu Helium umgeformt wird, also von der Stärke und der Effizienz der beteiligten Kernreaktionen. Die langsamste Reaktion innerhalb des Mechanismus, sozusagen das schwächste Glied der Kette, bestimmt somit die Zeitskala. Bei den p-p-Ketten ist es die Fusion

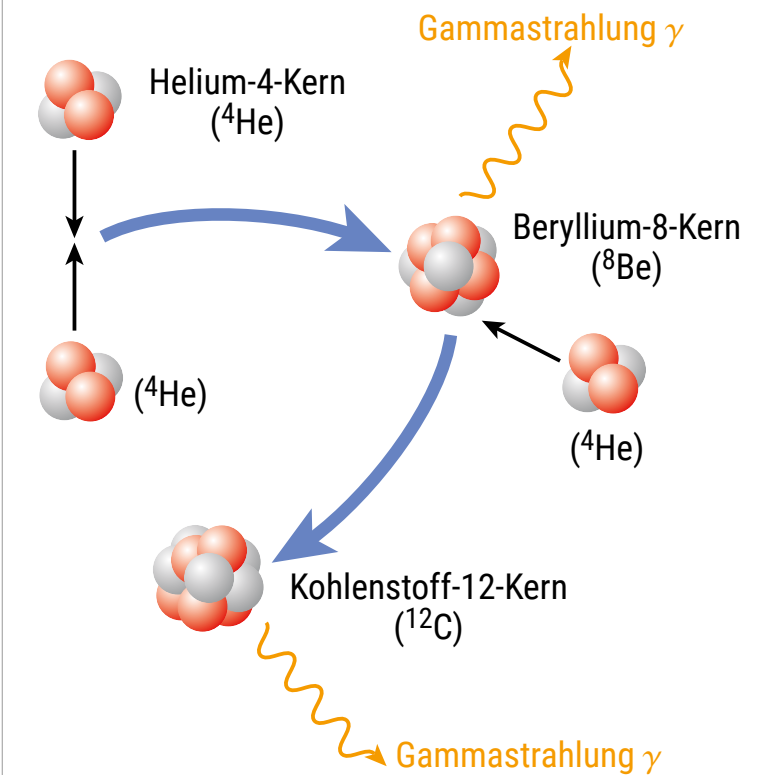
zwischen den zwei Wasserstoffkernen. Beim CNO-Zyklus ist es der Protonenein-
fang von Stickstoff-14, wodurch dieser in
Sauerstoff-15 umgewandelt wird. Diese Re-
aktionen bestimmen nicht nur die Zeitska-
la, mit der insgesamt Wasserstoff zu Heli-
um verwandelt wird, sondern auch die
Häufigkeitsverteilung, die sich dabei für
die anderen beteiligten Isotope ergibt. In
den p-p-Ketten werden Deuterium, Heli-
um-3 und Lithium-7, die sich aus dem Ur-
knall ergeben, abgebaut und in Helium-4
umgewandelt. Beim CNO-Zyklus wird der
vorhandene Kohlenstoff und Sauerstoff
im Wesentlichen zu Stickstoff-14 umge-
wandelt, so dass als Endprodukte des kata-
lytischen CNO-Wasserstoffbrennens vor-
nehmlich Helium-4 und Stickstoff-14 im
Sterninnern liegen bleiben.

Unabhängig vom jeweiligen Reaktions-
mechanismus wird bei jedem Fusionspro-
zess Energie von etwa 26 Megaelektronvolt
erzeugt. Hauptsächlich kommt diese Ener-
gie gemäß der berühmten Formel $E = mc^2$
vom Massenunterschied zwischen vier
Protonen und einem Heliumkern. Die
p-p-Ketten setzen schon bei niedrigeren
Temperaturen – also masseärmeren Ster-
nen – ein, was an der geringeren elektro-

magnetischen Abstoßung zwischen Ker-
nen mit kleinerer Ordnungszahl liegt (sie-
he »Reaktion beim Wasserstoffbrennen«).
Bei höheren Temperaturen beschränkt je-
doch die schwache Wechselwirkung in
der p-p-Reaktion die Energieproduktion.
CNO-Isotope haben eine höhere Ordnungs-
zahl, aber keine solche Beschränkung durch
die schwache Wechselwirkung: Deshalb
wird bei höheren Temperaturen – also mas-
sereicheren Sternen – die Energieproduk-
tion hauptsächlich durch die CNO-Zyklen
bestimmt.

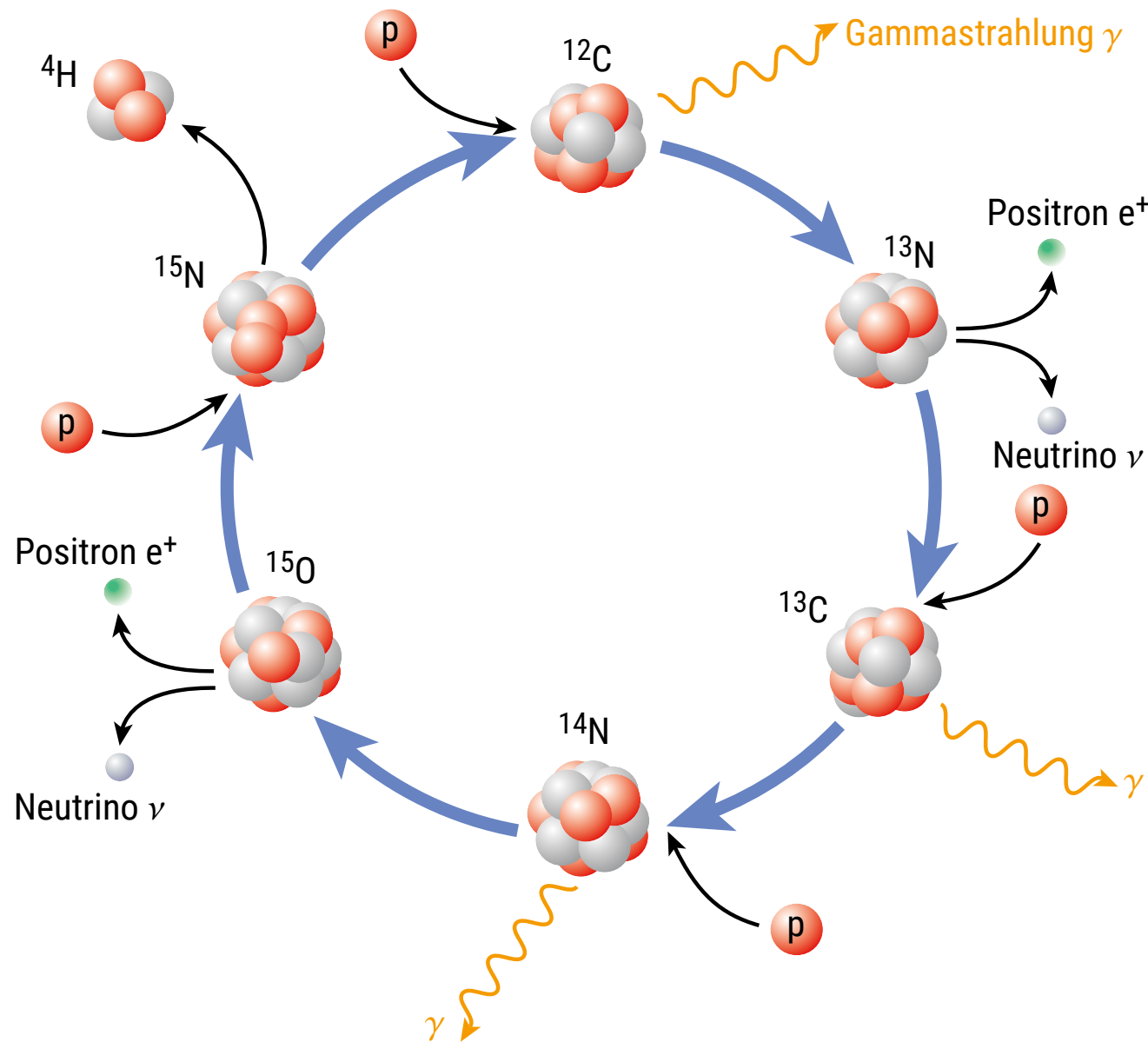
Heliumbrennen

Sobald der Wasserstoff als Brennmateri-
al im Sterninnern verbraucht ist, verändert
der Stern seine Struktur. Das Innere kon-
trahiert, da der Strahlungsdruck die
Schwerkraft nicht mehr ausgleichen kann.
Die Brennzone verlagert sich in eine Schale
um den Zentralbereich herum; die Hülle
des Sterns bläht sich auf, und er färbt sich
rot – man bezeichnet ihn in diesem Stadi-
um als Roten Riesen. Die weitere Kontrak-
tion des Sterninnern erhöht dort rapide den
Druck und die Temperatur, bis Bedingun-
gen erreicht sind, unter denen Helium fu-
sionieren kann. Dieses Heliumbrennen



DREI-ALPHA-PROZESS

Ein Flaschenhals in der Entstehung von Elementen schwerer als Lithium ist, dass es keinen stabilen Kern mit einer Massenzahl von 8 gibt. Mit dem Drei-Alpha-Prozess, der unter den besonderen Bedingungen möglich ist, wie sie in massereichen Sternen herrschen, gelingt es, diese Lücke zu überwinden. Dazu müssen innerhalb eines sehr kurzen Zeitfensters drei Alphateilchen (Helium-4-Kerne) zusammentreffen. Aus zwei Alphateilchen entsteht zunächst ein instabiler Beryllium-8-Kern, der sich durch Einfang eines dritten Alphateilchens zu Kohlenstoff-12 umwandelt.



CNO-ZYKLUS

Wie aus vier Protonen (p , rot) unter Energiefreisetzung letztlich ein Heliumkern (^4He) aus zwei Protonen und zwei Neutronen (grau) entstehen kann, erklärt ein Reaktionszyklus, an dem Kerne von Kohlenstoff (C), Stickstoff (N) und Sauerstoff (O) als Katalysatoren beteiligt sind.

läuft über die bereits bekannte Drei-Alpha-Reaktion ab: Drei Alphateilchen verschmelzen zu Kohlenstoff-12. Die bei diesem Prozess freigesetzte Energie von etwa 7,5 Megaelektronvolt entspricht dem Massenunterschied zwischen den drei Heliumkernen und einem Kohlenstoffkern. Nun

ist der Strahlungsdruck wieder ausreichend, um die Kontraktion des Sterninneren zunächst zu stabilisieren.

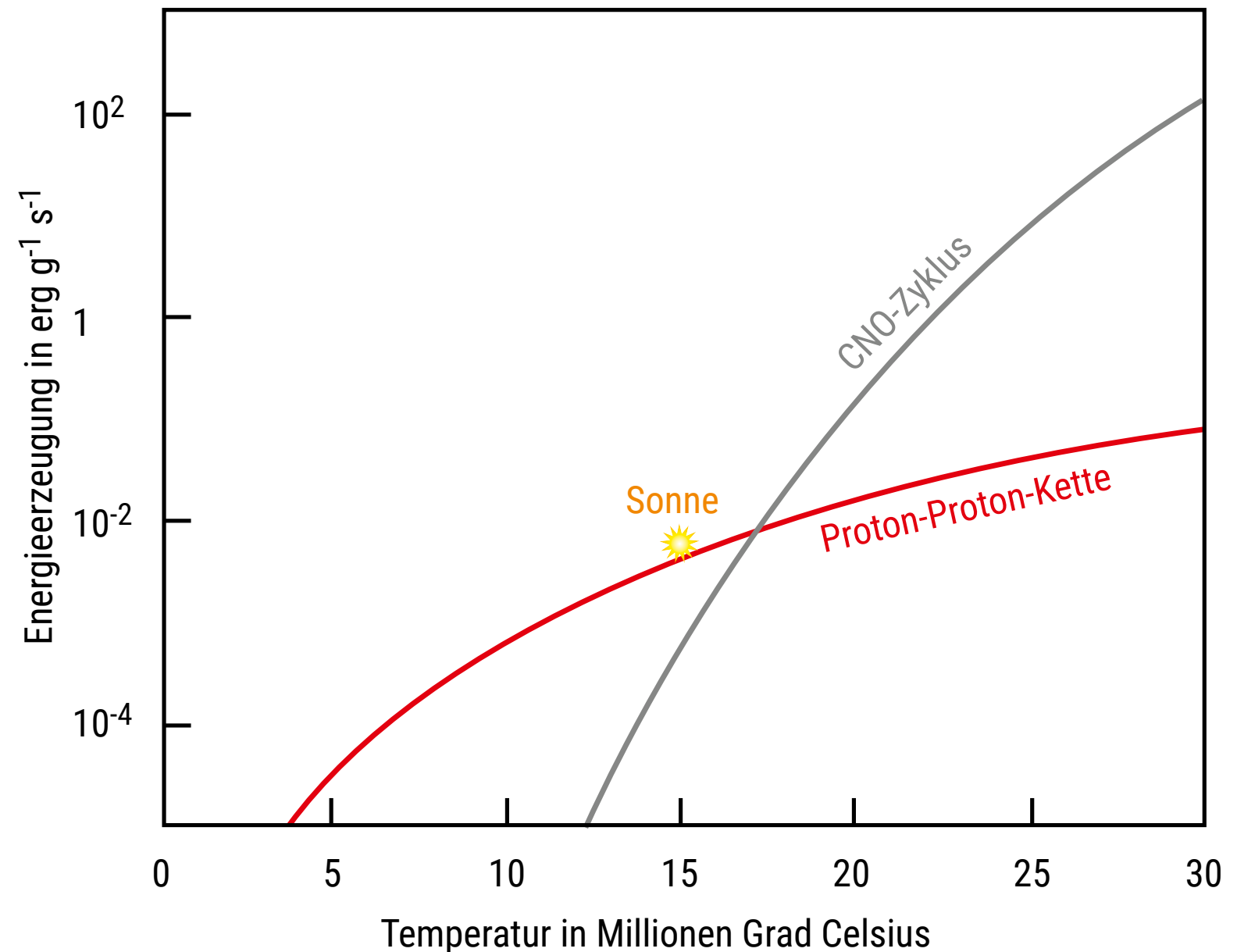
Über eine Folgereaktion mit einem Heliumkern wird der Kohlenstoff teilweise in Sauerstoff umgewandelt. Die Effizienz dieser Reaktion bestimmt wesentlich die im

Universum beobachtete Häufigkeitsverteilung von Kohlenstoff-12 und Sauerstoff-16. Denn eine weitere Reaktion des Sauerstoff-16 mit einem Alphateilchen zu Neon-20 ist sehr unwahrscheinlich.

Die sich einstellende Balance dieser drei Helium-brennenden Reaktionen legt ur-

sächlich die Menge an verfügbarem Kohlenstoff und Sauerstoff als Grundlage für die Entwicklung von biologischem Leben in unserem Universum fest. Der Drei-Alpha-Prozess »füttert« die absoluten Häufigkeiten von Kohlenstoff-12 und Sauerstoff-16, die beiden weiteren Reaktionen bestimmen das relative Verhältnis. Eine schwächere Kohlenstoff-Sauerstoff-Reaktionsrate hätte keinen Sauerstoff in ausreichender Menge produzieren können, und eine stärkere Sauerstoff-Neon-Rate hätte den reaktionsfreudigen Sauerstoff zum inerten Edelgas Neon umgewandelt und somit die Entwicklung von komplexeren chemischen und biologischen Strukturen unwahrscheinlicher gemacht.

Stickstoff kann sich durch zwei Heliumkern-Einfänge gefolgt von einem anschließenden Beta-Plus-Zerfall in Neon-22 umwandeln. Dieses neutronenreiche Isotop erzeugt einen hohen Neutronenfluss im Stern, der es ermöglicht, schwerere Elemente zu produzieren. Die anfängliche, durch den CNO-Zyklus festgesetzte Stickstoff-14-Häufigkeit wird also durch diesen Prozess in freie Neutronen umgesetzt und verteilt sich damit auf die Häufigkeiten der schweren Elemente.



REAKTION BEIM WASSERSTOFFBRENNEN

Welche Reaktion beim Wasserstoffbrennen im Innern von Sternen dominiert, ist eine Frage der Temperatur: In der Sonne wird die Energie zu 99 Prozent durch die Proton-Proton-Kette erzeugt. Die restliche Energie wird durch den CNO-Zyklus freigesetzt.

Die späten Phasen der Sterne

Je schwerer die Atomkerne sind, die als Brennmaterial fungieren, desto kürzer ist die Zeitspanne der Brennphase. So dauert das anfängliche Wasserstoffbrennen, abhängig von der Masse des Sterns, viele Millionen bis Milliarden von Jahren. Das Heliumbrennen hingegen hält nur für einige hunderttausend bis Millionen Jahre an. Die nachfolgenden Brennprozesse bei massereichen Sternen, vom Kohlenstoff- über das Neon- und Sauerstoffbrennen bis hin zum Siliziumbrennen, währen nur Tausende von Jahren oder in der letzten Phase sogar nur wenige Tage. Diese späten Phasen der Sternentwicklung werden also durch die Wechselwirkung zwischen den im Wasserstoff- und Heliumbrennen produzierten Elementen bestimmt.

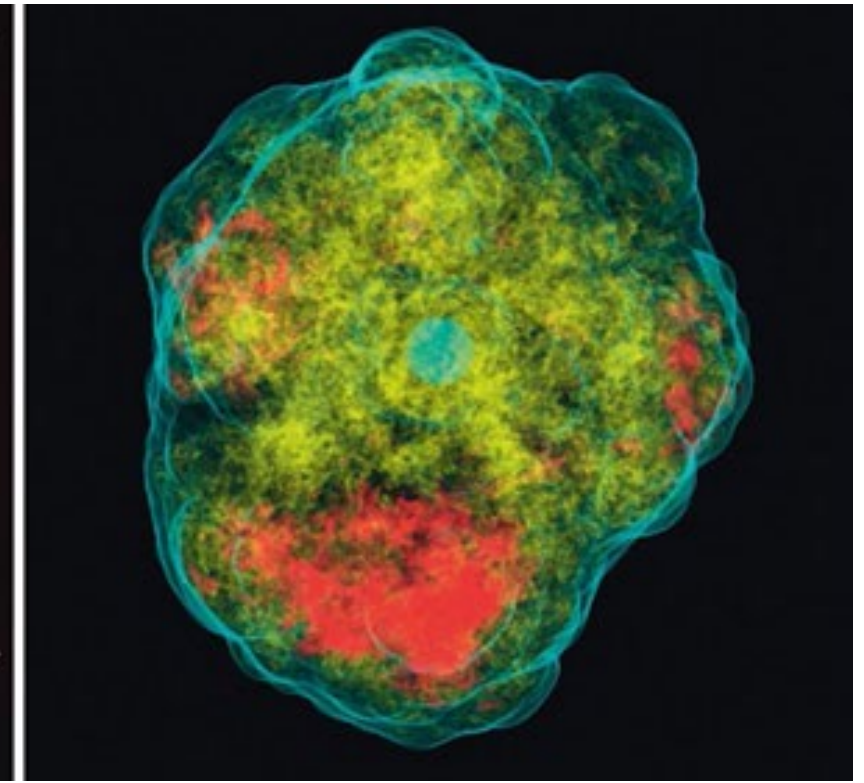
Sobald das Helium im Sterninnern verbraucht ist, setzen die nachfolgenden Brennprozesse ein, was ein weiteres Mal zur schwerkraftbedingten Kontraktion des Sterninnern führt. Helium wird nun nur noch in einer schalenförmigen Zone um den Zentralbereich verbrannt, während in diesem mit zunehmender Dichte und Temperatur das Kohlenstoffbrennen einsetzt. Dabei werden zwei Kohlen-



LINKS: NASA, NOAO, ESA, THE HUBBLE HELIX NEBULA TEAM, M. MEIXNER (STSCI), AND T.A. RECTOR (NRAO) / IRIDESCENT GLORY OF NEARBY PLANETARY NEBULA SHOWCASED ON ASTRONOMY DAY / CC BY 4.0; RECHTS: C.D. OTT, CALTECH (SIMULATION), S. DRASCO, CAL POLY, SAN LUIS OBSIPO (VISUALIZATION)

stoff-12-Kerne zu einem hochangeregten Magnesium-24-Zwischenkern, der dann zu Neon-20 und Helium-4 beziehungsweise in einem zweiten Reaktionsweg zu Natrium-23 und einem Proton zerfällt. Diese leichten Reaktionsprodukte lagern sich dann wegen der kleineren elektrostatischen Abstoßung schnell wieder an die vorhandenen Kerne an, so dass die endgültige Häufigkeitsverteilung eine Mischung aus Neon-20, Sauerstoff-16 und Magnesium-24 ist.

Diese Elemente können dann durch Konvektion, also durch das Aufsteigen erhitzten Materials, an die Oberfläche trans-



PLANETARISCHE NEBEL

Planetarische Nebel wie der Helixnebel bestehen aus ionisiertem Gas (links). Dieses wurde von einem Stern in der Mitte des Nebels ins All geschleudert, der seinen Helium-Brennstoff aufgebraucht hatte. Auf diese Weise wird die interstellare Materie mit Elementen wie Kohlenstoff, Sauerstoff und Magnesium angereichert. Noch schwerere Elemente werden von Supernovae ins All geschleudert. Teilweise laufen die Synthesereaktionen erst während der Sternexplosion ab. Diese komplizierten Prozesse modellieren Wissenschaftler in Computersimulationen (rechts).

portiert werden, wo sie dann teilweise durch Strahlungsdruck ins All geschleudert werden. So bilden sich etwa die Planetarischen Nebel mit einem Zentralstern, dessen Oberfläche mit Kohlenstoff angereichert ist. Ein Beispiel hierfür ist der Helixnebel im Sternbild Wassermann (siehe »Planetarische Nebel«).

Ähnlich laufen die nachfolgenden Brennprozesse ab, die in immer kürzerer Folge einsetzen. Neonbrennen ist die Photodissoziation – also die durch ein Photon ausgelöste Aufspaltung – eines Neon-20-Kerns in Sauerstoff-16 und Helium-4. Sauerstoffbrennen basiert auf der Fusion von zwei Sauerstoff-16-Kernen zu Schwefel-32 (und Silizium-28 nach Abspaltung eines Heliumkerns) und Siliziumbrennen erneut auf der Photodissoziation von Silizium-28, wobei die freigesetzten Protonen und Heliumkerne durch schnelle Anlagerung eine Umwandlung des Umgebungsmaterials bis hin zu Eisen bewirken. In einem zwiebel förmigen Modell lässt sich plastisch beschreiben, wie sich immer weitere Brennschalen ausbilden. Dabei kann es auch in den Zonen zwischen den Schalen zu Kernreaktionen kommen, über welche dann Neutronen freigesetzt werden.

Wie genau die Fusion beim Kohlenstoffbrennen abläuft, ist noch weitgehend ungeklärt. Jedenfalls spielen verschiedene Effekte eine Rolle. So führt etwa die Eigenheit, dass Kernmaterie nicht komprimiert werden kann, möglicherweise dazu, dass bei niedrigen Energien die Fusionswahrscheinlichkeit sinkt. Mit Beschleunigerexperimenten an schwereren Kernen wurde dies bereits demonstriert (siehe »Sternphysik in irdischen Beschleunigern«). Auch Resonanzstrukturen in den Zwischenprodukten der Fusionsreaktion können die Reaktionswahrscheinlichkeit beeinflussen.

Eine zuverlässige theoretische Beschreibung dieser Faktoren im stellaren Kohlenstoff- und Sauerstoffbrennen steht noch aus. Zwar lässt sich mancher kernphysikalischer Beobachtungsbefund durchaus phänomenologisch gut beschreiben, aber die Vorhersagen über die Stärke im stellaren Energiebereich bleiben weitgehend unsolid.

Sternkollaps und Supernova

Die Fusion von leichten Kernen in schwere ist also die Energiequelle von Sternen während ihres langen und stabilen Lebens. Wie aber gelangen die Fusionsprodukte

aus dem Innern des Sterns heraus ins interstellare Medium? Denn nur dann stehen sie als Rohstoff für spätere Stern generationen, Planeten und letztlich auch für Lebewesen zur Verfügung.

Sterne mit wenigen Sonnenmassen blasen über starke Winde Teile ihrer Außenhülle weg, wobei – verstärkt durch Mischprozesse im Stern – auch frisch produzierte Elemente nach außen gelangen. Für Sterne mit mehr als etwa acht bis neun Sonnenmassen kommt es nach dem Versiegen des nuklearen Brennmaterials zu einem apokalyptischen Ereignis, nämlich einer Supernova-Explosion. In deren Verlauf wird der größte Teil der Sternmasse ins interstellare Medium geschleudert.

In massereichen Sternen ist die Temperatur während des Siliziumbrennens so hoch, dass Kernreaktionen, die über die starke oder elektromagnetische Wechselwirkung vermittelt werden, mit ihrer umgekehrten Reaktion im Gleichgewicht stehen. Als Folge stellt sich eine Häufigkeitsverteilung der Kerne gemäß ihren jeweiligen nuklearen Bindungsenergien ein. Da Eisen- und Nickelkerne die höchsten Bindungsenergien pro Nukleon haben, dominieren sie schließlich die Verteilung. In

diesem Gleichgewicht kommt es auch nicht mehr zu Energieerzeugung durch Kernreaktionen und nicht mehr zum Aufbau noch schwererer Elemente. Dem Sterninnern fehlt nun die Energiequelle, die bisher die Kontraktion durch die Schwerkraft ausbalancierte – ein Kollaps des Sterns erscheint unausweichlich.

Aber für eine gewisse Weile stellt sich dem Kollaps noch der Entartungsdruck der extrem dicht gepackten freien Elektronen entgegen. Diese negativ geladenen Teilchen sind in Sternen immer vorhanden, weil sie die positive Ladung der Atomkerne ausgleichen. Ihr Entartungsdruck basiert auf einer quantenmechanischen Eigenschaft: Als Teilchen mit Spin $\frac{1}{2}$ können zwei Elektronen nicht gleichzeitig am selben Ort denselben Quantenzustand annehmen.

Wie der Astrophysiker Subrahmanyan Chandrasekhar (1910–1995) gezeigt hatte, gelingt die Balance zwischen Entartungsdruck und Schwerkraft nur bis zu einer Grenze von etwa 1,4 Sonnenmassen. Übersteigt die Masse des Eisens im Sterninnern diesen Wert, ist der Kollaps nicht mehr aufzuhalten. Zugleich erreichen die entarteten Elektronen bei Dichten größer als 10^9 Gramm pro Kubikzentimeter so hohe

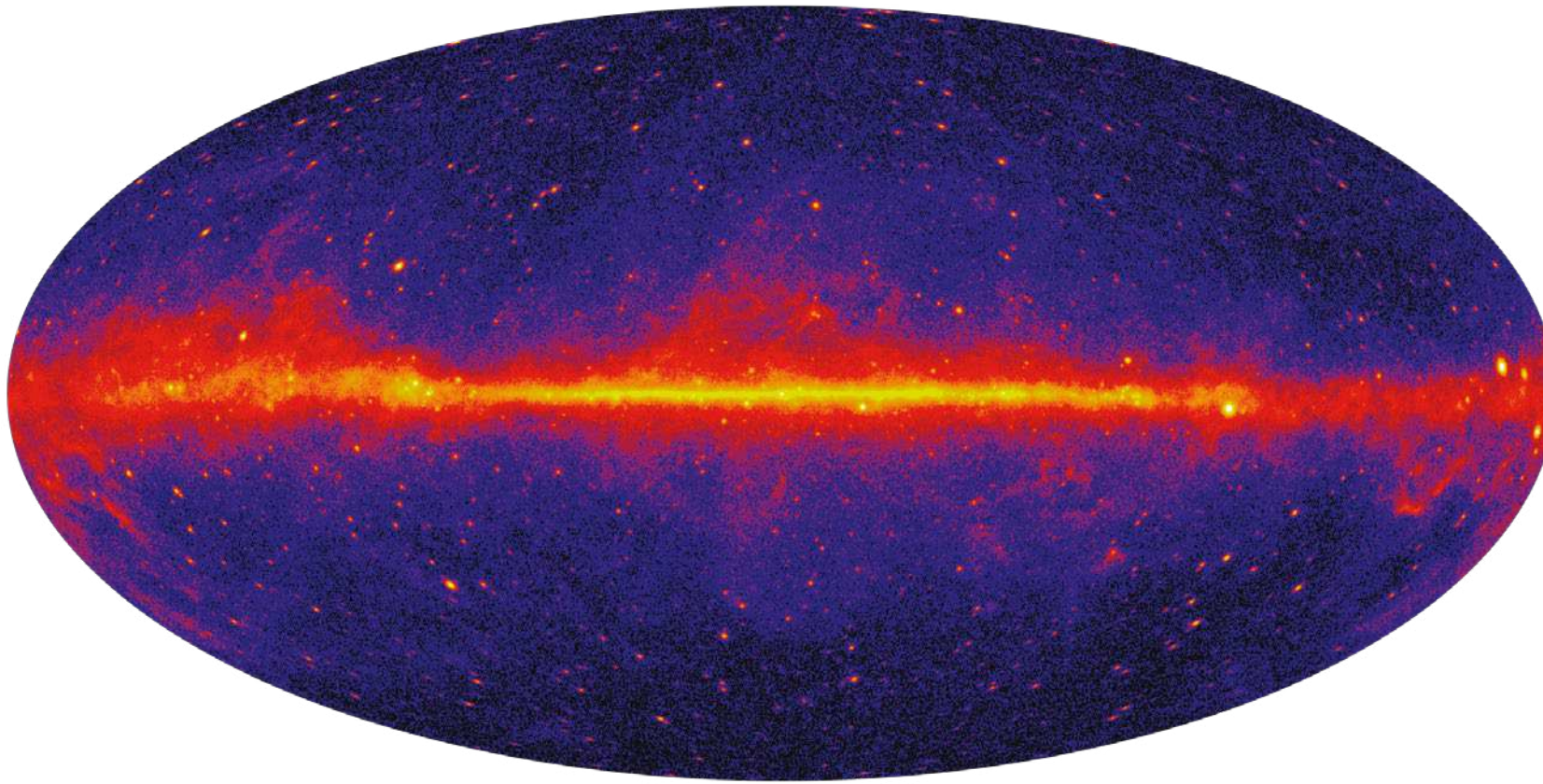
Energien, dass es energetisch günstiger wird, wenn die Protonen in den vorhandenen Atomkernen Elektronen einfangen und sich in Neutronen verwandeln. Dieser Prozess beschleunigt den einsetzenden Kollaps des stellaren Zentralbereichs, weil er die Anzahl der Elektronen – und somit deren Entartungsdruck – verringert. Ferner erzeugt der Elektroneneinfang auch Neutrinos, die den Stern verlassen und ihm Energie entziehen, ihn also abkühlen.

Der Kollaps endet abrupt, wenn der stellare Zentralbereich auf Dichten zusammengedrückt ist, wie sie im Innern von Atomkernen vorliegen – etwa 10^{14} Gramm pro Kubikzentimeter. Damit entspricht dieser zentrale Bereich des Sterns einem einzigen, gigantischen Atomkern! Außerhalb davon ist der Kollaps des Sterns aber noch in vollem Gang. Dieses einstürzende Material prallt nun von dem nicht weiter zu komprimierenden Inneren ab, wodurch sich eine Stoßwelle ausbildet.

Lange Zeit hatten die Astronophysiker angenommen, dass diese Stoßwelle die Supernova-Explosion auslöst. Computersimulationen haben aber gezeigt, dass deren Energie allein nicht ausreicht, um den kollabierenden äußeren Bereich des Sterns zu

durchdringen und die Sternhülle abzustößen. Vielmehr muss zusätzlich Energie aus heißeren inneren Regionen durch turbulente Materieströmungen und Neutrinos nach außen transportiert werden. Obwohl Neutrinos nur sehr selten mit Materie in Wechselwirkung treten, übertragen sie einen Teil der beim Kollaps des Sterninneren frei werdenden Gravitationsenergie auf die äußeren Schichten des Sterns, heizen diese auf, verhelfen der Stoßwelle zu weiterem Schwung und lösen die Supernova-Explosion aus.

Während das kompakte Sterninnere zusammen mit weiterem Material als Relikt übrig bleibt und später einen Neutronenstern formt, werden die äußere Sternhülle und mit ihr die im Lauf der Brennphasen gebildeten Elemente ins interstellare Medium katapultiert. Durch die hohen Temperaturen, die mit der Explosion verbunden sind, kommt es kurzzeitig zu sehr schnellen Kernreaktionen, die für die genaue Häufigkeitsverteilung der ausgestoßenen Elemente von Bedeutung sind. Auch durch Turbulenzen bedingte Mischprozesse sind hier nicht unwichtig. Ihre quantitative Behandlung verlangt eine dreidimensionale Beschreibung gerade der Spätpha-



DAS RADIOAKTIVE UNIVERSUM

Messungen der Gammastrahlung am Himmel zeigen die 511-Kiloelektronvolt-Vernichtungsstrahlung (rot und gelb), die von Zerfällen neutronenarmer Kerne über Antielektronen stammt. Die Quellen liegen sowohl im Band der Milchstraße als auch in fernen Galaxien.

se der Explosion, was bislang noch nicht in Computersimulationen zufriedenstellend erreicht wurde.

Das Supernova-Relikt – quasi ein Proto-Neutronenstern – kühlt durch Emission von Neutrinos weiter ab. Deren Anzahl ist dabei in den ersten 20 Sekunden so hoch, dass sie einen signifikanten Massenverlust von der Oberfläche des neugeborenen Neutronensterns erzeugt. Dieser so genannte Neutrino-getriebene Wind ist Ort einer ganz speziellen Elemententstehung.

Wegen der hohen Temperaturen besteht das von der Oberfläche mit einigen tau-

send Kilometer pro Sekunde weggerissene Material aus freien Protonen und Neutronen. Im Abstand von einigen hundert Kilometern von der Oberfläche erreichen sie kühlere Regionen, wo sie sich zu größeren Kernen zusammenfügen.

Welche Reaktionen mit welchem Ergebnis dort ablaufen, hängt sehr stark vom relativen Anteil der Protonen im Material ab. Dieser Anteil ist örtlich und zeitlich variabel, weil er durch Absorption von Neutrinos (durch Neutronen) und ihren Antiteilchen (durch Protonen) beeinflusst wird und somit unmittelbar vom Neutri-

nofluss und dessen Zusammensetzung abhängt.

Überwiegen die Protonen im Material, entstehen über eine Folge von schnellen Protoneneinfangreaktionen und Beta-Plus-Zerfällen Atomkerne mit Massenzahlen im Bereich bis zu 90 oder 100. Manche Synthesewege werden dabei deutlich abgekürzt: Das protonenreiche Nickel-56 zum Beispiel würde mit einer Halbwertszeit von sechs Tagen über die Umwandlung eines Protons in ein Neutron zu Kobalt-56 zerfallen. Stattdessen wird in den speziellen Umgebungsbedingungen Kobalt-56 viel schneller erzeugt, indem der Nickel-56-Kern ein freies Neutron einfängt und dafür ein Proton abspaltet. Die dabei verbrauchten Neutronen werden kontinuierlich durch den Einfang von Antineutrinos an freien Protonen nachgeliefert.

Der vom Proto-Neutronenstern ausgehende enorme Fluss an Neutrinos durchquert die äußeren Sternschichten, bevor diese abgesprengt werden, und löst auch dort Kernreaktionen aus. Zum Beispiel haben die Neutrinos genug Energie, um aus Atomkernen ein Proton oder ein Neutron herauszuschlagen; dieser Prozess wird Spallation genannt. So erzeugt die Spallation an Kohlenstoff-12 entweder Bor-11 oder Kohlenstoff-11. Da Letzterer mit einer Halbwertszeit von 20 Minuten zu Bor-11 zerfällt, ist das Endresultat in beiden Fällen Bor. Dieser Prozess ist auch der dominante Mechanismus, über den Bor-11 in der Natur entsteht.

Neutrino-induzierte Reaktionen tragen auch zur Produktion von Fluor-19, Lanthan-138 und Tantal-180 bei, wobei Tantal-180 das seltenste Isotop des am seltensten vorkommenden Elements ist – und als einziger Kern in einem angeregten Zustand langlebiger ist als im Grundzustand. Die Protonen und Neutronen, die durch Neutrino-induzierte Spallationsprozesse freigesetzt werden, tragen als sekundäre Produkte zur Produktion von Radioisotopen wie Natrium-22 und Aluminium-26 bei, die beide eine wichtige Rolle in der Gammastrahlen-Astronomie spielen.

Das Universum, die Sterne und wir

Die beschriebenen Reaktionsprozesse bedingen neben der Häufigkeit der jeweiligen Elemente auch den Lebenslauf der Sterne. Was mit der ersten Sternengeneration begann, setzte sich in den späteren Generationen der Sterne fort und bestimmt bis heute die chemische Entwicklung unseres Universums.

Umgeben sind wir von Sternen unterschiedlicher Masse in den verschiedensten Entwicklungsphasen. Gelegentlich beobachten wir ihr gewaltsames Ende in Form von Novae, Supernovae oder – wie jüngst mittels Gravitationswellen möglich geworden – verschmelzenden Neutronensternen. In all diesen explosiven Prozessen entstehen neue Elemente. Dass deren Produktion beständig erfolgt, zeigen die Beobachtungen radioaktiver Elemente im Universum mit Gammastrahlenteleskopen. Dabei erlauben es die sehr unterschiedlichen Halbwertszeiten von Isotopen wie Titan-44 (60 Jahre), Aluminium-26 (700 000 Jahre) oder Eisen-60 (zwei Millionen Jahre), die jüngere Vergangenheit der Elemententstehung in unserer Umgebung nachzuvollziehen.

Wie wir gesehen haben, verknüpft die Frage nach dem Ursprung der Elemente

unterschiedliche Forschungsgebiete wie Kern-, Astro- und Geophysik. Sie zeigt, wie im Kleinsten ablaufende quantenmechanische Vorgänge die Entwicklung des gesamten Kosmos steuern. Wenn wir also die Energieproduktion oder Elementhäufigkeit im Universum beobachten, wenn wir nach dem Ursprung der natürlichen Radioaktivität auf unserer Erde und in unserem eigenen Körper fragen, kommen wir an der Physik der kleinsten Skalen nicht vorbei. Das Verständnis dieser Reaktionsprozesse, von Kernfusionen und -zerfällen, liefert deswegen den Schlüssel zum Verständnis unserer eigenen Ursprünge.

Der US-amerikanische Astronom und Fernsehmoderator Carl Sagan (1934–1996) wusste dies poetisch zusammenzufassen: »Der Stickstoff in unserer DNA, das Kalzium in unseren Zähnen, das Eisen in unserem Blut, der Kohlenstoff in unseren Apfelkuchen sind im Innern kollabierender Sterne entstanden: Wir alle bestehen aus Sternenstaub.« ↩

(Sterne und Weltraum, November 2018)

Sternphysik in irdischen Beschleunigern

Viele der Kernreaktionen, die den Lebenslauf der Sterne und deren spektakuläres Ende bestimmen, sind unzureichend bekannt. Die Prozesse, über die Wasserstoff, Helium und Kohlenstoff im Sterninnern zu jeweils schwereren Elementen »verbrennen«, sind extrem langsam und garantieren deswegen die lange Leuchtdauer von Sternen. Diese Umstände machen es so schwer, die genauen Abläufe im Labor zu untersuchen: Sterne haben Milliarden von Jahren und Unmengen an Brennstoff zur Verfügung, während ein Wissenschaftler nur wenige Monate bis Jahre auf ein Experiment verwenden kann und eine begrenzte Finanzausstattung hat. Deswegen beruhen viele der Reaktionsraten, die in Rechnungen zur Sternentwicklung eingehen, nur auf Daten aus Beschleunigerexperimenten, die auf

So wird die im Bau befindliche Beschleunigeranlage FAIR (Facility for Antiproton and Ion Research) nach Fertigstellung aussehen. In ihren unterirdischen Speicherringen lassen sich zum Beispiel kurzlebige Atomkerne untersuchen, die auch bei der Explosion von Sternen entstehen. Im Hintergrund sind die Gebäude der Gesellschaft für Schwerionenforschung zu erkennen.



GS/HELMHOLTZZENTRUM FÜR SCHWERIONENFORSCHUNG

die in Sternen vorherrschenden Energien extrapoliert wurden.

Reaktionen in den explosiven Endphasen der Sterne stellen uns vor ganz andere Herausforderungen. Die Explosionen dauern oft nur wenige Sekunden und erzeugen viele kurzlebige radioaktive Kerne, die somit eine Vielzahl an neuen Reaktionspfaden ermöglichen, weitab des gut erforschten Bereichs der nuklearen Landkarte. Will man die Dynamik dieser Explosionsprozesse und die damit verknüpfte Elementsynthese verstehen, muss man diese kurzlebigen Kerne künstlich herstellen und ihre Eigenschaften experimentell ermitteln. Da bislang nur wenige solcher Experimente durchgeführt werden konnten, basieren auch die in Simulationen von Supernovae verwendeten Reaktions- und Zerfallsdaten oft auf theoretischen Rechnungen oder Extrapolationen.

Die in der nuklearen Astrophysik tätigen Forscher gehen deshalb in zwei Stoßrichtungen vor: Zum einen sollen langsame Kernreaktionen wie zum Beispiel Stickstoff-14 zu Sauerstoff-15 im Wasserstoffbrennen und Kohlenstoff-12 zu Sauerstoff-16 im Heliumbrennen möglichst ohne Störsignale gemessen werden. In normalen Beschleunigerexperimenten würden die wenigen Ereignisse im Rauschen der kosmischen Strahlung untergehen, die permanent auf die Erdoberfläche trifft. Deswegen wurden für solche Untersuchungen spezielle Labore tief in

der Erde geschaffen – zum Beispiel das LUNA-Labor im Autobahntunnel durch das Gran-Sasso-Massiv in den Apenninen östlich von Rom oder das 1500 Meter tiefe CASPAR-Labor in einer ehemaligen Goldmine in Süd-Dakota. Diese Anlagen ermöglichen den Experimentatoren, solche Reaktionen über Monate hinweg ohne störende kosmische Strahlung zu untersuchen. Wegen des hohen Zeit- und Ressourcenaufwands werden derartige Experimente zumeist in großen internationalen Kollaborationen durchgeführt.

Zum anderen sollen kurzlebige Kerne im Labor hergestellt werden. Dafür kann man zum Beispiel schwere Kerne auf leichte schießen und den gewünschten kurzlebigen Kern aus den Fragmenten herausfiltern. Dieses Verfahren wird heutzutage an der GSI, der Gesellschaft für Schwerionenforschung, und in Zukunft an der internationalen Forschungseinrichtung »Facility for Antiproton and Ion Research« – kurz FAIR – bei Darmstadt angewandt. FAIR bietet noch die weltweit einzigartige Möglichkeit, die Fragmentprodukte in einer Reihe von Speicherringen zu halten und zu den verschiedenen Zielstationen zu leiten, wo die Physiker eine ganze Reihe von unterschiedlichen Experimenten durchführen können. In diesen Ringen lassen sich Teilchen mit um Größenordnungen verschiedenen Energien kühlen und speichern. Das erlaubt es, nicht nur die Stärke von Kernreaktionsprozessen mit kurzlebigen Kernen zu messen, sondern auch

deren Masse, Lebensdauer und andere kernphysikalische Parameter zu ermitteln. Ein besonderer Vorteil der Speicherringe ist, dass der gleiche kurzlebige Kern mehrere tausend Mal zur experimentellen Beobachtung zur Verfügung steht, was sowohl einen extremen Gewinn an Präzision bedeutet, als auch die Möglichkeit bietet, äußerst seltene Kerne zu untersuchen.

FAIR ist ein internationales Projekt, das sich gerade in der Nachbarschaft der GSI im Bau befindet. Während die Frage nach dem Ursprung der Elemente eine der treibenden Kräfte für den Bau dieser Anlage war, lässt sich auf Grund der hohen Flexibilität parallel eine Vielzahl weiterer Experimente durchführen. Diese reichen von den Grundlagen der Theorie der starken Wechselwirkung über die Bedingungen kurz nach dem Urknall bis zu Präzisionsmessungen zum Test der elektroschwachen Wechselwirkung. Nicht zuletzt sei auch die Entwicklung medizinischer Verfahren zur Krebsforschung und anderer Krankheiten genannt.



DER URSPRUNG DER ELEMENTE

Durch Neutroneneinfang zu den schwersten **Atomkernen**

von Franz Käppeler, Gabriel Martinez-Pinedo
und Friedrich-Karl Thielemann

Sterne sind kosmische Hochöfen: Sie produzieren die Stoffe, aus denen wir und alle Materie in unserer Umgebung bestehen. Doch die während ihrer Entwicklung ablaufenden Kernfusionen können die Herkunft der schwersten Elemente nicht erklären. Die aktive Forschung im Zusammenspiel von Kern- und Astrophysik hat die explosiven Wege erkundet, denen wir die Hälfte der Elemente von Eisen bis Blei und Wismut und alle noch schwereren Elemente verdanken.

Etwa 98 Prozent aller sichtbaren Materie im heutigen Universum bestehen aus Wasserstoff und Helium, den beiden leichtesten Elementen. Alle übrigen Atomsorten machen nur einen kleinen Anteil aus, sind aber für unsere Lebensgrundlagen von existenzieller Bedeutung. Woher diese schweren Elemente stammen, war lange Zeit unbekannt. Erst in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts waren verschiedene Teildisziplinen der Physik so weit entwickelt, dass die Wissenschaftler in kleinen Schritten einer Lösung dieser Frage näher kamen.

Eine wichtige Erkenntnis gelang in den 1930er Jahren, als Physiker wie Hans Bethe

Franz Käppeler leitete bis zu seiner Emeritierung 2007 am Institut für Kernphysik der Universität Karlsruhe eine Arbeitsgruppe zur Erforschung der Elementsynthese in Roten Riesen. Er ist aktiv an einem Experiment zur Neutronenphysik am CERN beteiligt. **Gabriel Martinez-Pinedo** ist Professor am Institut für Kernphysik der Technischen Universität Darmstadt und Leiter der Abteilung Kernstruktur und Astrophysik am GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung in Darmstadt. **Friedrich-Karl Thielemann** ist Professor emeritus für theoretische Physik der Universität Basel. Sein Hauptarbeitsgebiet ist die explosive Nukleosynthese, das heißt die Elemententstehung in stellaren Explosionen und deren Einfluss auf die Entwicklung von Galaxien.

(1906–2005) und Carl Friedrich von Weizsäcker (1912–2007) die Energiequelle unserer Sonne entschlüsselten: In ihrem Innern verschmelzen bei hohen Temperaturen und Drücken die Kerne von Wasserstoff zu Helium. Mit solchen Kernfusionsreaktionen, bei denen Energie frei wird, ist auch der Aufbau von schwereren Elementen bis hin zum Eisen zu erklären.

Aber Elemente, die noch schwerer sind als Eisen, woher stammen sie? Hinweise ergaben sich Anfang der 1950er Jahre durch spektroskopische Beobachtungen an einem bestimmten Typ von Sternen, die ihre Helligkeit mit langen Perioden verändern. In den Spektren dieser Roten Riesen, die mit den großen Teleskopen der Mount Wilson und Palomar Observatories aufgenommen wurden, fanden sich neben Absorptionslinien, die von schweren Elementen wie Zirkon und Barium erzeugt wurden, auch solche, die auf Technetium hinwiesen. Dieser Befund überraschte, waren doch alle auf der Erde bekannten Isotope dieses Elements radioaktiv, also instabil. Das Isotop mit der längsten Lebensdauer, Technetium-98 mit 43 Protonen und 55 Neutronen im Kern, zerfällt mit einer Halbwertszeit von 4,2 Millionen Jahren. Verglichen mit

AUF EINEN BLICK

Explosive Elemententstehung

- 1 Die Entstehung von chemischen Elementen ist auf das Engste mit der Entwicklung von Sternen verknüpft.
- 2 Etwa die Hälfte der Elemente von Eisen bis zu Blei und Wismut wird in den späten Stadien der Sternentwicklung erzeugt.
- 3 Die andere Hälfte und sogar alle Elemente schwerer als Wismut entstehen in explosiven Prozessen: entweder durch eine seltene Klasse von Supernovae oder durch verschmelzende Neutronensterne.

Glossar

Betazerfall: Die Umwandlung eines Neutrons in ein Proton, ein Elektron und ein Elektron-Antineutrino wird als Beta-Minus-Zerfall bezeichnet. Hierbei wandelt sich ein durch Neutroneneinfang instabil gewordener Atomkern in den Kern des nächsthöheren Elements um. Das dabei entstehende Proton verbleibt im Kern, das gleichzeitig entstehende Elektron und das Elektron-Antineutrino werden aus dem Kern ausgestoßen. Der umgekehrte Prozess – die Umwandlung eines Protons in ein Neutron im Atomkern – wird als Beta-Plus-Zerfall bezeichnet.

Isotop: Die Atomkerne eines bestimmten chemischen Elements enthalten stets gleich viele Protonen, können sich aber in der Anzahl der Neutronen unterscheiden. Diese verschiedenen Isotope eines Elements verhalten sich chemisch gleich, haben jedoch je nach Neutronenzahl unterschiedliche Massen.

Massenzahl: Die Anzahl aller Protonen und Neutronen im Atomkern, auch Nukleonenzahl genannt.

Nuklid: Bezeichnung für einen Atomkern, der durch eine bestimmte Protonenzahl und eine bestimmte Neutronenzahl charakterisiert ist. Nuklide mit gleicher Protonenzahl gehören zum selben chemischen Element und sind die Isotope dieses Elements.

Protonenzahl: Die Anzahl der positiv geladenen Protonen im Atomkern (die im neutralen Atom identisch ist mit der Anzahl an Elektronen in der Atomhülle, die das chemische Verhalten bedingt) bestimmt das chemische Element. Synonyme Begriffe sind Kernladungszahl und Ordnungszahl.

r-Prozess: Ein Neutroneneinfangprozess, der bei hohen Neutronendichten und Temperaturen abläuft, wie sie typischerweise in verschmelzenden Neutronensternen und einer seltenen Klasse von Supernovae auftreten (r steht für das Englische »rapid«, schnell). Dabei entstehen innerhalb sehr kurzer Zeit aus Atomkernen durch Einlagerung von Neutronen schwere, instabile Zwischenprodukte, die durch radioaktiven Zerfall in stabile, neutronenreiche Atomkerne zerfallen.

s-Prozess: Ein Neutroneneinfangprozess, der – im Gegensatz zum r-Prozess – bei niedrigeren Neutronendichten und Temperaturen abläuft, wie sie in weit entwickelten Roten Riesen auftreten (s steht für das Englische »slow«, langsam). Durch Anlagerung eines Neutrons entsteht aus einem Atomkern ein schwereres Isotop dieses chemischen Elements. Ist dieses Isotop instabil, wandelt es sich durch Betazerfall in einen Atomkern des nächsthöheren Elements um.

VERSCHMELZENDE NEUTRONENSTERNE

Explosive Prozesse im Universum wie verschmelzende Neutronensterne (hier eine künstlerische Darstellung) und Supernova-Ausbrüche sind die einzigen Möglichkeiten zur Erzeugung der schwersten Elemente. Unmittelbar nach der Verschmelzung breitet sich ein intensiver Blitz aus Gammastrahlung in engen Bündeln in gegenüberliegenden Richtungen aus. In herumwirbelnden Wolken aus ausgestoßener Materie entstehen durch Kernreaktionen Elemente wie Gold, Platin und Uran.

dem Alter der bereits weit entwickelten Riesensterne ist diese Halbwertszeit sehr kurz. Hätte das Ausgangsmaterial, aus dem sich diese Sterne einst bildeten, bereits Technetium enthalten, wäre es bis zum Zeitpunkt der Beobachtung längst zerfallen. Es gab also nur eine Erklärung: Das Technetium musste in den Roten Riesen selbst entstanden sein. Demnach muss es neben der Verschmelzung von leichten Atomkernen noch weitere Mechanismen geben, mit denen Sterne Elemente aufbauen. Wie wir zeigen werden, ist es hauptsächlich der Einfang von Neutronen.

Elementsynthese und Sternentwicklung sind verknüpft

Die wesentlichen Prinzipien der stellaren Nukleosynthese wurden 1957 erkannt: In diesem Jahr erschienen zwei Arbeiten, die den Grundstein für das Forschungsgebiet der nuklearen Astrophysik legten: »Synthesis of the Elements in Stars« von E. Margaret Burbidge, Geoffrey R. Burbidge, William A. Fowler und Fred Hoyle sowie »Nuclear Reactions in Stars and Nucleogenesis« von Alastair Cameron.

Diese Arbeiten zeigten, dass die Elemententstehung auf das Engste mit der

Sternentwicklung verknüpft ist. Unmittelbar nach dem Urknall waren nur die leichtesten Elemente vorhanden: Wasserstoff, Helium und das seltene Lithium. Aus diesen Stoffen bildeten sich die ersten Sterne. Für den weitaus größten Teil ihrer Lebensdauer fusionieren Sterne Wasserstoff zu Helium. Wenn der Wasserstoffvorrat zu Ende geht, steigen Temperatur und Dichte durch Kontraktion des Zentralbereichs so stark an, dass nunmehr Helium zu Kohlenstoff und Sauerstoff fusioniert. Gleichzeitig verlagert sich das Wasserstoffbrennen in eine Schale um den heißen Zentralbereich. Als Folge davon blähen sich die Sterne zu Roten Riesen auf. Wie ihr weiterer Werdegang verläuft und welchen Einfluss dies auf die Elemententstehung hat, hängt entscheidend von der Masse der Sterne ab.

In Roten Riesen mit bis zum Achtfachen der Sonnenmasse steigen nach dem Ende des zentralen Heliumbrennens Temperatur und Dichte im Zentrum zwar erneut an, doch reicht dies nicht aus, weitere Brennphasen zu zünden. Die Fusion von Atomkernen endet dann bei den Elementen Kohlenstoff, Stickstoff und Sauerstoff sowie bei Neon und Magnesium, welche

noch durch Einfang von Helium an Sauerstoffkernen erzeugt werden.

Jedoch setzt nun bei den relativ moderaten Temperaturen und Dichten in diesen Sternen ein anderer Prozess ein, durch den noch schwerere Elemente entstehen: Atomkerne können einzelne Neutronen einfangen, wodurch ein neues, in der Regel instabiles Isotop entsteht. Durch anschließenden Betazerfall wandelt sich das Neutron in ein Proton um, und ein Element mit der nächsthöheren Ordnungszahl entsteht. Wichtig sind die unterschiedlichen Zeitskalen dieser Prozesse: Die mittlere Zeit, die bis zum Einfang eines weiteren Neutrons vergeht, ist länger als die Zeit, die das instabile Isotop braucht, um durch Betazerfall in einen stabilen Atomkern überzugehen. Deshalb sprechen die Astrophysiker vom langsamen Neutroneneinfangprozess oder kurz s-Prozess (für Englisch »slow«). Dieser ist für etwa die Hälfte der Elementhäufigkeiten zwischen Eisen und Blei verantwortlich.

Die neu entstandenen Elemente gelangen durch Mischungsvorgänge an die Sternoberfläche, von der sie durch starke Sternwinde und die Ausbildung eines planetarischen Nebels an das interstellare

Medium abgegeben werden. Vom ehemaligen Zentralbereich des Sterns bleiben lediglich im Mittel 0,6 bis maximal 1,4 Sonnenmassen zurück. Dieser Rest besteht überwiegend aus Kohlenstoff und Sauerstoff und setzt selbst keine Energie mehr frei – ein Weißer Zwerg ist entstanden, der nur noch auskühlt. Ein Kollaps zu einem kompakteren Objekt erfolgt nicht, weil der Weiße Zwerg durch einen quantenphysikalischen Effekt stabil gehalten wird: Die freien Elektronen erzeugen einen ausreichenden Druck, welcher der Gravitation entgegenwirkt.

Sterne mit mehr als acht Sonnenmassen erreichen in ihren Zentralbereichen wesentlich höhere Temperaturen und durchlaufen nach und nach verschiedene Brennphasen: Nach dem Heliumbrennen setzt die Fusion von Kohlenstoff ein, gefolgt von Neon-, Sauerstoff- und Siliziumbrennen. Während in der letzten Phase die Zone des Siliziumbrennens schalenförmig nach außen läuft, bleiben im Zentrum Eisen und Nickel zurück. Die Energieproduktion dort endet nun, weil Umwandlung in schwerere Kerne eine negative Energiebilanz hätte. Damit erlischt der stellare Reaktor im Zentralbereich, der sich durch das nach außen



NASA/CXC/SAO

ENDSTADIEN DER STERNENTWICKLUNG

Massereiche Sterne mit mehr als dem Achtfachen der Sonnenmasse entwickeln sich sehr schnell. Wenn der Fusionsbrennstoff aufgebraucht ist, kollabiert ihr Zentralbereich zu einem Neutronenstern oder einem Schwarzen Loch. In der dadurch ausgelösten Supernova-Explosion entsteht durch Kernreaktionen ein weites Spektrum an Elementen, die mitsamt der weggeschleuderten Hülle des Sterns in den interstellaren Raum hinausgetrieben werden.

laufende schalenförmige Siliziumbrennen vergrößert, bis eine Massengrenze von etwa 1,4 Sonnenmassen erreicht wird. Ab diesem Wert kann auch der Quantendruck der freien Elektronen der Gravitation nicht standhalten. Es folgt ein vollständiger Kollaps zu einem Neutronenstern – bis zu einer Maximalmasse von etwa zwei Sonnenmassen, stabilisiert durch den Quantendruck des dichten Neutronengases und abstoßende Kernkräfte – oder anderenfalls zu einem Schwarzen Loch. Neutrinos, die in hoher Anzahl aus dem entstehenden heißen Neutronenstern entweichen, lösen eine Super-

DER PLANETARISCHE NEBEL NGC 6826

Massearme Sterne mit nur wenigen Sonnenmassen blähen sich am Ende ihrer Milliarden Jahre langen Entwicklung zu Roten Riesen auf, die ihre Hülle als Planetarischen Nebel abstoßen. Dieser enthält neben den im Wasserstoff- und Heliumbrennen erzeugten Elementen Helium, Kohlenstoff und Stickstoff auch schwerere Atomkerne, die durch langsamen Neutroneneinfang entstanden sind. Der verbleibende Zentralbereich, ein kompakter Weißer Zwerg, lässt auf Grund seiner hohen Temperatur den Nebel hell aufleuchten.



nova-Explosion aus. Deren Stoßwelle heizt die umliegenden Zonen zu extremen Temperaturen auf, was in der sich rasch ausbreitenden Sternhülle zu explosiver Elemententstehung führt. Mitsamt der weggeschleuderten Hülle werden auch die neu entstandenen schweren Elemente in den interstellaren Raum hinaus verbreitet.

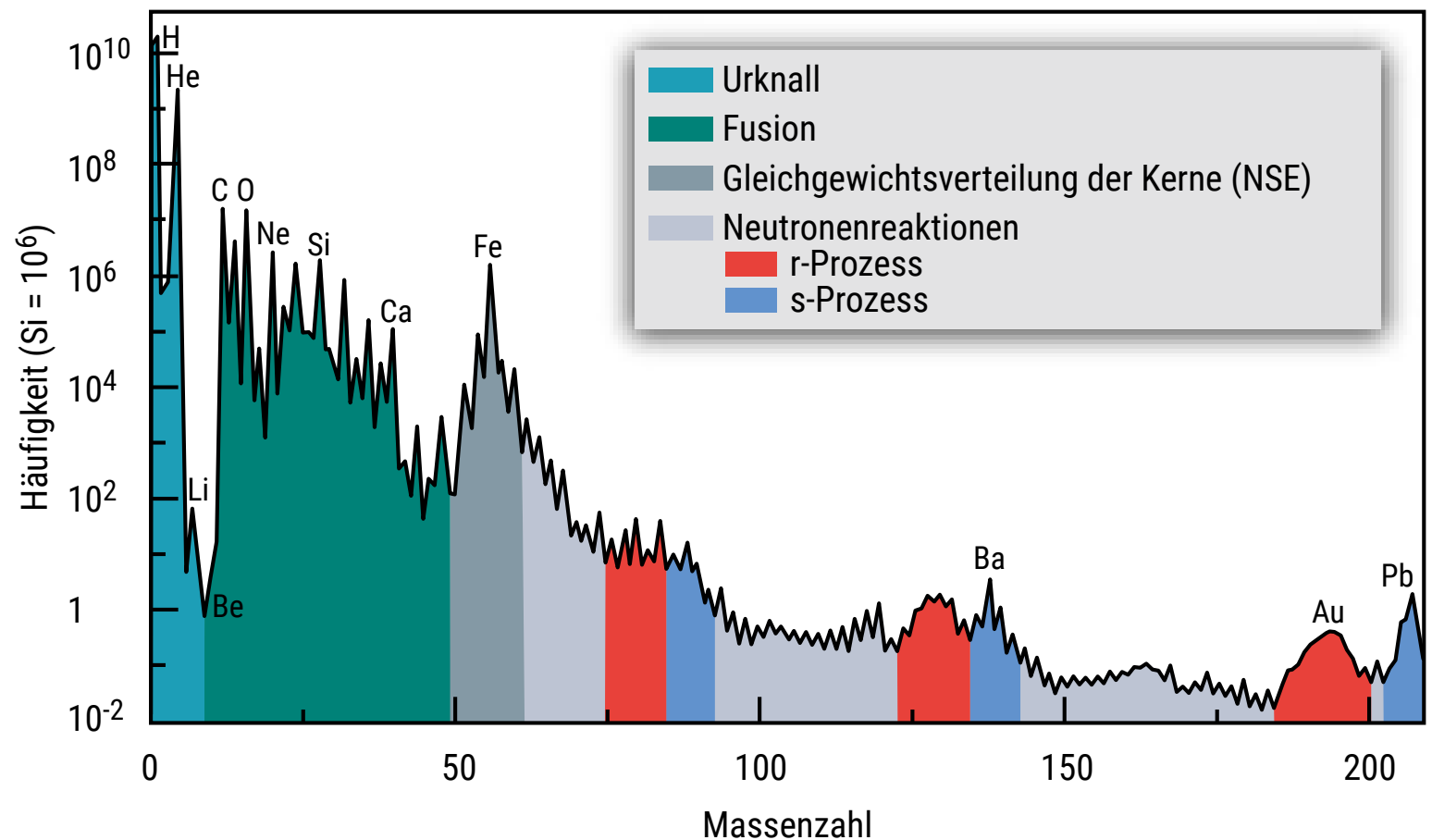
Gegenstand aktueller Forschung ist weiterhin, unter welchen Bedingungen die nicht im s-Prozess erzeugten schweren Elemente bis hin zu Thorium, Uran und Plutonium gebildet werden. In den letzten Jahren haben die Wissenschaftler zwei realistische Szenarien herausgearbeitet:

Das erste Szenario besagt, dass unter bestimmten Umständen – wenn schnelle Rotation und starke Magnetfelder vorliegen – bei einer seltenen Art von Supernova ein kurzer, aber extrem intensiver Neutroneneinfangprozess stattfindet. Da hier wegen der hohen Neutronendichte die Zeit zwischen zwei Neutroneneinfängen kürzer ist als der Betazerfall eines instabilen Zwischenkerns, spricht man hier vom schnellen Neutroneneinfangprozess oder kurz r-Prozess (für Englisch »rapid«).

Im zweiten Szenario – das in späteren Phasen der Galaxienentwicklung vermut-

Isotopenhäufigkeit im Sonnensystem

Die beobachteten Häufigkeiten der Isotope im Sonnensystem als Funktion der Massenzahl unterscheiden sich um mehrere Größenordnungen – jeder Teilstrich auf der vertikalen Achse dieses Diagramms bedeutet eine Änderung um den Faktor 10. Am häufigsten sind Wasserstoff (H) und Helium (He), die seit dem Urknall keine großen Veränderungen erfahren haben. Nach rechts folgen bis zum Eisen (Fe) die Produkte der Fusionsreaktionen, die den verschiedenen stellaren Brennphasen und Supernova-Explosionen entstammen. Die Elemente um Eisen und Nickel werden bei extrem hohen Temperaturen gebildet, die zu einer Gleichgewichtsverteilung führt (NSE = nuclear statistical equilibrium). Die Kerne oberhalb der Massenzahl 60 wurden praktisch vollständig durch Neutroneneinfang gebildet. Die Maxima bei den Massen 130 bis 140 und 190 bis 210 sind jeweils Signaturen für den r- und den s-Prozess.



lich das dominierende ist – ergibt sich ein sehr effizienter r-Prozess bei der Verschmelzung von zwei Neutronensternen, wie sie am Ende der Entwicklung eines Doppelsternsystems erfolgen kann. Ein solches Ereignis führte 2017 erstmalig zum simultanen Nachweis von Gravitationswellen und eines Gammastrahlenausbruchs sowie der nachfolgenden Emission von blauem und infrarotem Licht.

In der Summe tragen die Neutroneneinfangreaktionen im s- und r-Prozess je etwa zur Hälfte zu den beobachteten Häufigkeiten der schweren Elemente bei. Lediglich ein kleiner Teil der natürlich vorkommenden Isotope, die so genannten p-Kerne, entsteht durch Neutronenemission von stabilen Kernen bei extrem hohen Temperaturen in Supernovae.

Die Signaturen der unterschiedlichen Syntheseprozesse lassen sich in der im Sonnensystem beobachteten Häufigkeitsverteilung der Elemente erkennen (siehe »Isotopenhäufigkeit im Sonnensystem«). Diese Häufigkeitsverteilung wurde bei der Entstehung des Sonnensystems quasi eingefroren und hat sich in den vergangenen 4,5 Milliarden Jahren als geschlossenes System erhalten; sie spiegelt somit die Zusam-

mensetzung des lokalen interstellaren Mediums rund neun Milliarden Jahre nach dem Urknall wider.

Der s-Prozess: Langsamer Neutroneneinfang

Der Aufbau von Elementen über den s-Prozess ist mit den stellaren Spätphasen nach dem Wasserstoffbrennen verknüpft. In diesen Entwicklungsstadien blähen sich die Sterne durch das einsetzende Heliumbrennen zu Roten Riesen auf. Hauptsächlich fusioniert Helium zu Kohlenstoff und Sauerstoff; bei Temperaturen ab etwa 250 Millionen Grad fusioniert Helium aber auch mit den relativ seltenen Isotopen Kohlenstoff-13 und Neon-22, wobei die für den s-Prozess notwendigen freien Neutronen entstehen. Ihre Dichte ist relativ niedrig und entspricht in etwa den Werten, wie sie auch für kommerzielle Kernreaktoren üblich sind.

Diese geringe Neutronendichte ist ein charakteristisches Merkmal des s-Prozesses. Sie führt dazu, dass die typischen Zeitabstände zwischen aufeinanderfolgenden Neutroneneinfängen – nämlich einige Monate bis Jahre – wesentlich länger sind als die Lebensdauer der allermeisten instabi-

len Atomkerne. Dadurch bleibt die Elementproduktion über den s-Prozess auf diejenigen Atomkerne beschränkt, die sich in der Nuklidkarte entlang des Stabilitätsstreifens gruppieren (siehe »Die Landkarte der Kerne«). Da die hierfür maßgeblichen Reaktionsraten experimentell genau bekannt sind, ist die stellare Nukleosynthese durch den s-Prozess recht gut verstanden.

Ausgehend vom ausgeprägten Häufigkeitsmaximum beim Eisen verläuft der s-Prozess als eine Sequenz von Neutroneneinfangreaktionen an den stabilen Kernen. Sobald auf diese Weise ein radioaktives Isotop erreicht wird, führen Betazerfälle zum nächsthöheren Element. Der sich so ausbildende Synthesepfad ist am Beispiel des Bereichs zwischen Krypton und Yttrium in »Der s-Prozess in der Nuklidkarte« skizziert. Ein typisches Merkmal des s-Pfads in der Nuklidkarte sind die Verzweigungen durch die Konkurrenz zwischen den beiden Möglichkeiten Neutroneneinfang und Betazerfall, die immer dort auftreten, wo die Lebensdauer eines instabilen Kerns in etwa so lang ist wie die typische Zeit für den Einfang eines weiteren Neutrons.

Generell lässt sich der s-Prozess im Verlauf der Sternentwicklung zwei grundsätz-

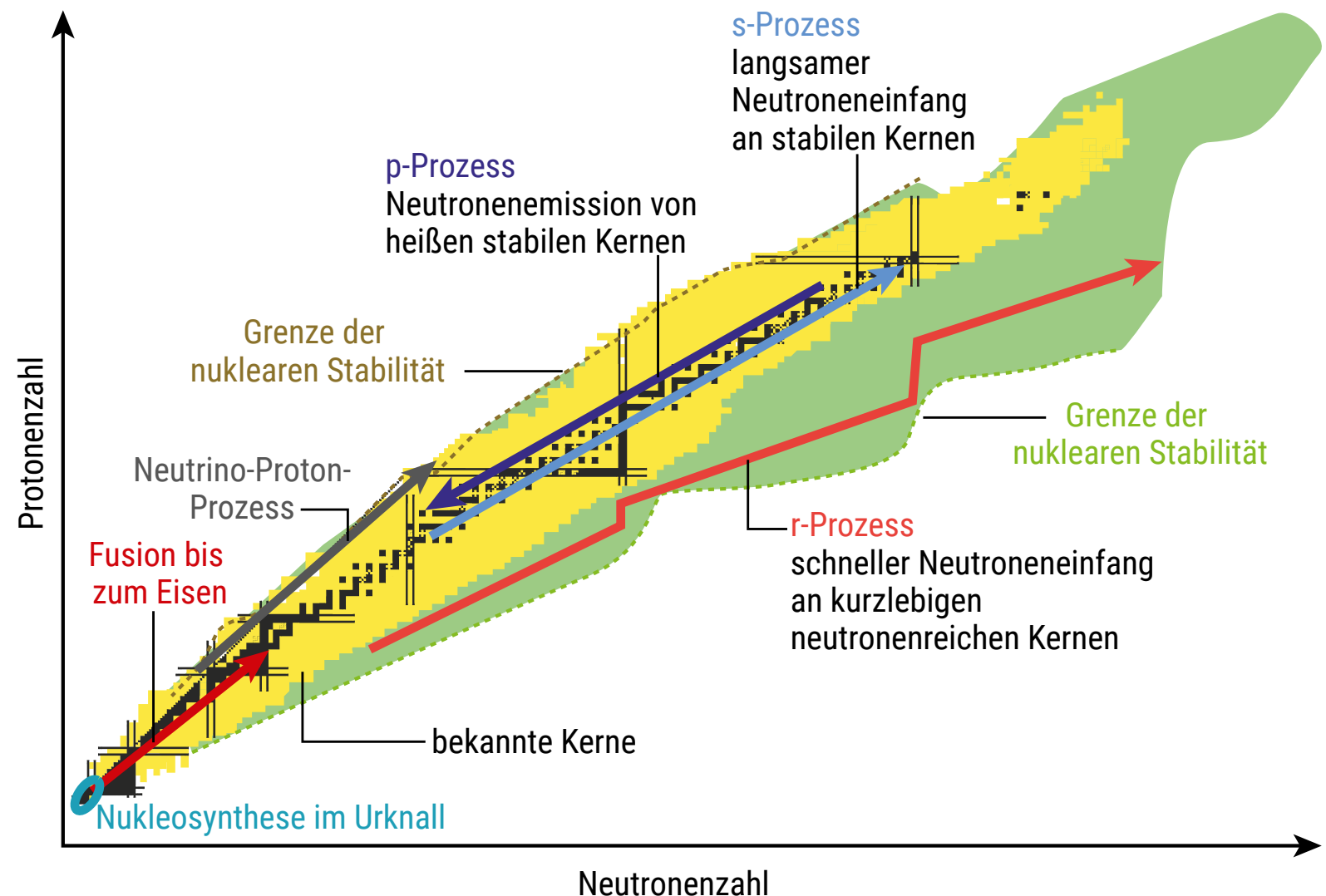
Die Landkarte der Kerne

Während Chemiker die Elemente nach ihrer Protonen- oder Ordnungszahl im Periodensystem der Elemente einordnen, nutzen Physiker eine so genannte Nuklidkarte. In ihr ist jeder Atomkern (auch Nuklid genannt) nicht nur durch die Protonenzahl, sondern auch durch seine Neutronenzahl charakterisiert. Nuklide mit gleicher Protonenzahl, aber verschiedener Neutronenzahl sind die Isotope eines Elements.

In der Nuklidkarte sind alle bekannten Nuklide horizontal nach ihrer Neutronenzahl und vertikal nach ihrer Protonenzahl eingetragen (Bild). Beginnend mit dem Wasserstoff links unten erstreckt sich diese Landkarte der Kernphysik bis zu den schwersten physikalisch möglichen Nukliden nach rechts oben. Die Nuklidkarte ist keine einfache Gerade, sondern fächert zu größeren Protonen- und Neutronenzahlen auf; zudem verläuft sie leicht gekrümmt, weil schwere Atomkerne tendenziell mehr Neutronen als Protonen enthalten.

Entlang einer zentralen Linie in der Nuklidkarte sind die 254 stabilen Atomkerne versammelt sowie die 32 quasistabilen Kerne mit Halbwertszeiten von mehr als einer Milliarde Jahren. Unter- und oberhalb dieser Stabilitätszone liegen Nuklide, die instabil sind. Bisher wurden rund 3000 instabile Atomkerne künstlich hergestellt; Schätzungen gehen von weiteren 6000 noch unbekannten Nukliden aus.

Die in diesem Artikel diskutierten Syntheseprozesse für die schweren Elemente lassen sich verschiedenen Bereichen der Nuklidkarte zuordnen: Der s-Prozess verläuft nahe bei etwa gleicher Protonen- und Neutronenzahl ab, während der r-Prozess teilweise die Grenzen der nuklearen Stabilität erreicht – also Kerne, bei denen die Neutronen noch im Kern gebunden sind, obwohl sie grundsätzlich instabil sind. Auch eingezeichnet ist der p-Prozess, welcher die Aufspaltung von Kernen durch Photoneneinfang beschreibt.



lich verschiedenen Szenarien zuordnen, die von der Masse des betreffenden Sterns abhängen, und die als Hauptkomponente beziehungsweise schwache Komponente des s-Prozesses bezeichnet werden:

In den Spätphasen von Sternen mit einer bis drei Sonnenmassen wird der Energiehaushalt durch alternierendes Wasserstoff- und Heliumbrennen gedeckt, das schalenförmig an der Oberfläche des sich ausbildenden Zentralbereichs aus Kohlenstoff und Sauerstoff abläuft. Neben diesen Fusionsreaktionen wird durch Helium-induzierte Nebenreaktionen ein Neutronenfluss erzeugt, der zwar gering ist, aber wegen seiner langen Dauer zu einer starken Gesamtdosis führt. Dadurch wird das in diesen schalenförmigen Zonen produzierte Eisen weitgehend vom s-Prozess aufgebraucht und zu schwereren Kernen verarbeitet. So erklären sich vorwiegend die Häufigkeiten der schweren Kerne von Zirkon bis Blei und Wismut. Diese Hauptkomponente des s-Prozesses endet grundsätzlich bei den kurzlebigen instabilen Polonium-Isotopen; alle schwereren Kerne, einschließlich der Thorium- und Uran-Isotope, können demnach nur im r-Prozess entstehen.

Das zweite Szenario betrifft massereiche Sterne mit mehr als acht Sonnenmassen. Sie durchlaufen alle Brennphasen in wesentlich kürzerer Zeit und tragen deshalb bereits früher zur Anreicherung des interstellaren Mediums mit schweren Elementen bei. Die effektive Neutronendosis im zentralen Heliumbrennen fällt in diesen Sternen deswegen erheblich geringer aus, und der s-Prozess ist im Wesentlichen auf die Produktion der s-Häufigkeiten zwischen Eisen und Zirkon beschränkt. Man nennt deshalb diesen Kanal auch die schwache Komponente des s-Prozesses.

In beiden Fällen gibt es Mechanismen, die das frisch synthetisierte Material in das interstellare Medium abgeben. Bei den Sternen, die sich zu Roten Riesen entwickeln, ist es die Abstoßung der gesamten Sternhülle in Form eines Planetarischen Nebels, wobei der aus Kohlenstoff und Sauerstoff bestehende Zentralbereich als Weißer Zwerg endet. Bei den massereicheren Sternen ist es die finale Supernova-Explosion, in der die äußeren Zonen mit den darin enthaltenen s-Häufigkeiten ausgestoßen werden.

Grundsätzlich gilt: Wenn wir die Elementproduktion in Sternen verstehen wol-

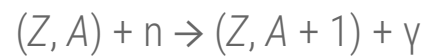
len, müssen wir die Eigenheiten der dabei ablaufenden Kernreaktionen möglichst genau kennen. Beim s-Prozess geht es dabei primär um die charakteristische Wahrscheinlichkeit für den Einfang eines Neutrons. Um diese Größe, den Wirkungsquerschnitt, zu bestimmen, müssen wir auf Experimente an Teilchenbeschleunigern zurückgreifen. Nur diese können Neutronen mit Energien im Bereich des stellaren s-Prozesses erzeugen, die rund eine Million Mal höher sind als die Neutronenenergien in den üblichen Kernreaktoren.

Eine solche Neutronenquelle gibt es zum Beispiel am Europäischen Forschungszentrum CERN in der Nähe von Genf, wo durch Beschuss eines massiven Bleiblocks mit energiereichen Protonen bis zu 300 Neutronen pro Proton erzeugt werden. Die derzeit zur Verfügung stehenden Detektoren wurden für die Bestimmung der im s-Prozess ablaufenden Reaktionen optimiert. Mit ihnen lassen sich die Wirkungsquerschnitte für den Einfang von Neutronen durch stabile Kerne mit einer Genauigkeit von wenigen Prozent vermessen. Sogar im Fall radioaktiver Kerne, die zu Verzweigungen im s-Prozess führen, experimentell aber sehr schwer zugänglich sind, gibt

Der s-Prozess in der Nuklidkarte

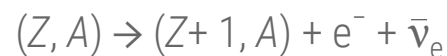
Anhand eines Ausschnitts der Nuklidkarte lässt sich der typische Reaktionspfad beim s-Prozess illustrieren. Zwei unterschiedliche Kernreaktionen spielen dabei eine Rolle: Neutroneneinfang und Betazerfall.

Beim **Neutroneneinfang** fängt ein Nuklid mit der Kernladung Z und der Massenzahl A ein freies Neutron n ein, wodurch sich die Massenzahl um eine Einheit vergrößert:



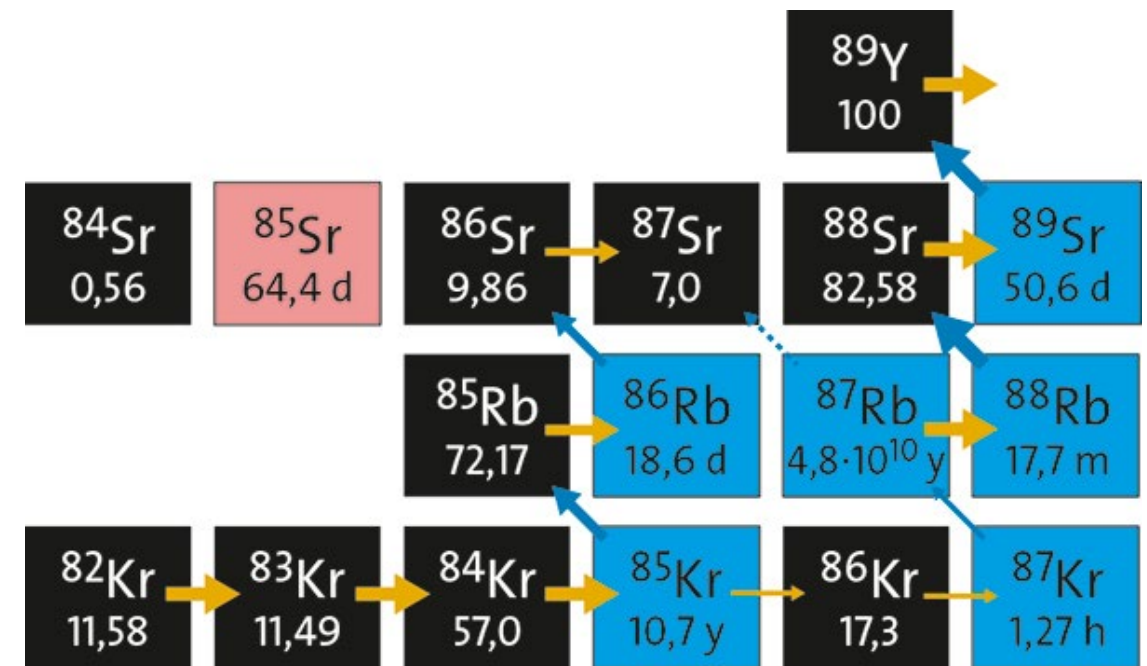
Da die Kernladung gleich bleibt, ist durch den Neutroneneinfang ein schwereres Isotop des gleichen Elements entstanden. Die frei werdende Energie wird durch die Emission von Photonen (γ) abgegeben.

Beim **Betazerfall** wandelt sich ein Neutron im Kern in ein Proton um:



Hier erhöht sich die Kernladung Z um eine Einheit, das Element hat sich also in ein anderes mit der nächsthöheren Ordnungszahl umgewandelt. Die Massenzahl, also die Summe aus Neutronen und Protonen, bleibt dabei erhalten. Aus Gründen der Ladungserhaltung entsteht beim Betazerfall auch ein negatives Elektron e^- , das aus dem Kern ausgestoßen wird. Zudem wird ein ladungsfreies und fast masseloses Elementarteilchen emittiert, das einen Teil der Überschussenergie wegträgt, in diesem Fall ein Elektron-Antineutrino $\bar{\nu}_e$.

Der Gesamtprozess sei hier am Beispiel der Neutroneneinfangsequenz von Krypton bis Yttrium illustriert (Bild). Gelbe Pfeile symbolisieren den Einfang eines Neutrons, blaue Pfeile einen Betazerfall. Die jeweilige Stärke der Pfeile entspricht schematisch der Häufigkeit des Prozesses. Stabile Isotope sind schwarz dargestellt (mit Angabe des Anteils am Isotopengemisch), instabile Isotope, die zu Betazerfall neigen, blau (mit Angabe der Halbwertszeit).



Das Element Krypton hat mehrere stabile Isotope, die sich durch sukzessiven Neutroneneinfang aus Krypton-82 bilden können. Krypton-85 jedoch ist ein Verzweigungspunkt: Hier konkurrieren Betazerfall (mit einer Halbwertszeit von knapp elf Jahren) und Neutroneneinfang. Fängt der Kern vor dem Zerfall ein weiteres Neutron ein, entsteht das stabile Krypton-86. Andernfalls zerfällt er in das ebenfalls stabile Rubidium-85. Dieses wandelt sich nach Einfang eines Neutrons in das instabile Isotop Rubidium-86 um, das rasch (mit einer Halbwertszeit von knapp 19 Tagen) in das stabile Strontium-86 zerfällt. In welchem Verhältnis letztlich Krypton-86 und Strontium-86 entstehen, wird vom Neutronenfluss im Stern bestimmt.

Nuklide mit sehr langer Lebensdauer, wie etwa Rubidium-87 (Halbwertszeit 48 Milliarden Jahre), wirken im s-Prozess wie stabile Kerne. Erst über sehr lange Zeiträume hinweg werden die ursprünglichen Häufigkeiten von Rubidium-87 und dem Tochterkern Strontium-87 durch den Zerfall verändert. Der weitere Elementaufbau zu Yttrium-89 erfolgt über den im Bild skizzierten Weg.

Die Grafik zeigt auch das seltene, stabile Isotop Strontium-84. Über die s-Prozessreaktionen führt kein Pfad dorthin. Es ist ein Beispiel für einen Kern, der über den p-Prozess gebildet wird.

es diesbezüglich erste erfolgreiche Ansätze. Damit zeichnet sich ab, dass auch in diesen Fällen die theoretisch berechneten Werte durch genauere Messungen ersetzt werden können.

Mit dieser durchgehend experimentell gesicherten kernphysikalischen Grundlage ergibt sich eine fundierte Basis, wie sie für s-Prozess-Untersuchungen im Rahmen von detaillierten Sternmodellen unerlässlich ist. Diese Basis ist deshalb so wichtig, weil zwischen den im Labor bestimmten Wirkungsquerschnitten und den im s-Prozess erzeugten Häufigkeiten ein direkter Zusammenhang besteht. Große Wirkungs-

querschnitte, also hohe Einfangwahrscheinlichkeiten, eines Nuklids führen dazu, dass die Kerne rasch weiter umgewandelt werden; von dem Nuklid selbst können sich somit nur kleine Häufigkeiten aufbauen. Umgekehrt sind Nuklide mit kleinen Wahrscheinlichkeiten für den Einfang eines Neutrons entsprechend häufiger, da sie in geringerem Maße von der Reaktion verbraucht werden.

Diese Korrelation führt im Bereich der Hauptkomponente des s-Prozesses dazu, dass das Produkt aus s-Häufigkeit und dem jeweiligen Wirkungsquerschnitt für den Neutroneneinfang über weite Massenbe-

reiche konstant ist, obwohl sich die Querschnitte und damit die Häufigkeiten selbst um mehr als das Hundertfache unterscheiden. Dies bedeutet, dass man aus einer Querschnittsmessung im Labor unmittelbar die s-Häufigkeit des betreffenden Isotops ableiten kann! Dies zeichnet den s-Prozess vor allen anderen Mechanismen der Elemententstehung aus. Experimentell so festgelegte Häufigkeiten stellen deshalb äußerst empfindliche Randbedingungen für den Vergleich mit anderen Prozessen dar.

Eine weitere Konsequenz der auf wenige Prozent genau bekannten s-Häufigkeiten ist die Möglichkeit, die solaren Häufig-

keiten durch simple Subtraktion in ihre s- und r-Anteile zu zerlegen. Die Übereinstimmung der so bestimmten r-Prozess-Häufigkeiten mit dem Vorkommen der »reinen« r-Kerne – Kerne, die nicht vom s-Prozess-Pfad erreicht werden können – bestätigt die Schlüssigkeit der s-Prozess-Beschreibung auf eindrucksvolle Weise. Die viel schwierigere Modellierung der r-Prozess-Häufigkeiten wird durch die so gewonnene Information etwas einfacher.

Explosive Prozesse

Wenn der zentrale Bereich eines massereichen Sterns nach dem Verbrauch des Fusionsbrennstoffs kollabiert, heizt er sich auf unvorstellbare Temperaturen von mehr als 100 Milliarden Grad auf. Die damit verbundene thermische Energie kann nicht durch elektromagnetische Strahlung abgestrahlt werden, da die Photonen wegen der hohen Materiedichte vielfach gestreut werden und somit im Innern gefangen sind. Neutrinos, fast masselose Teilchen, die praktisch nicht mit Materie in Wechselwirkung treten, können jedoch in weniger als einer Sekunde entweichen.

Dieser Effekt wurde erstmals 1987 mit unterirdischen Neutrinodetektoren nach-

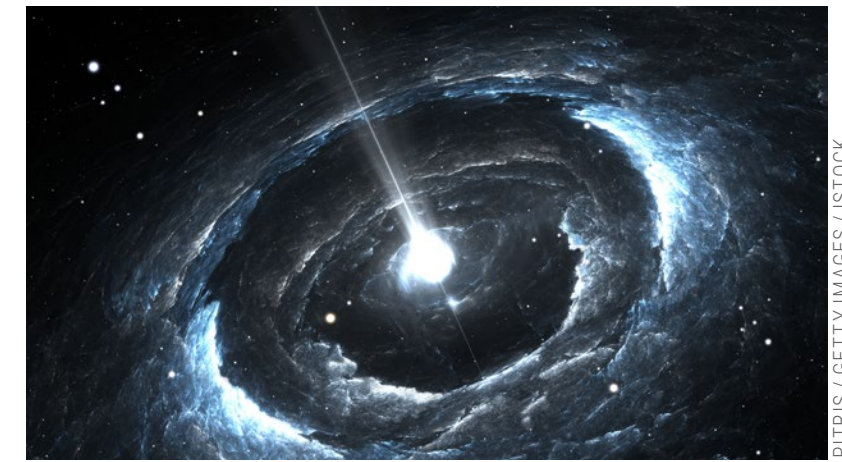
gewiesen, als die Supernova 1987A in der Großen Magellanschen Wolke aufleuchtete. Neutrinos gibt es in drei so genannten Flavours (Englisch für: Geschmacksrichtungen): Elektron-Neutrinos, Myon-Neutrinos sowie Tau-Neutrinos. Hinzu kommen jeweils noch die entsprechenden Antiteilchen.

Mit einer sehr kleinen Wahrscheinlichkeit können Elektron-Neutrinos und ihre Antiteilchen durch Neutronen und auch Protonen eingefangen werden. Unter den besonderen Bedingungen des kollabierenden Sterns wird etwa ein Prozent der von Neutrinos weggeführten Energie in den darüberliegenden Schichten von Neutronen und Protonen absorbiert, was dort zu einer schlagartigen Aufheizung und dem Auslösen der Supernova-Explosion führt.

Da Neutronen und Protonen leicht unterschiedliche Massen haben, verlaufen die beiden möglichen Einfangreaktionen



nicht mit gleicher Wahrscheinlichkeit. Vielmehr wird bei etwa gleicher Energie von Neutrinos und Antineutrinos die Produktion von Protonen bevorzugt – die Materie



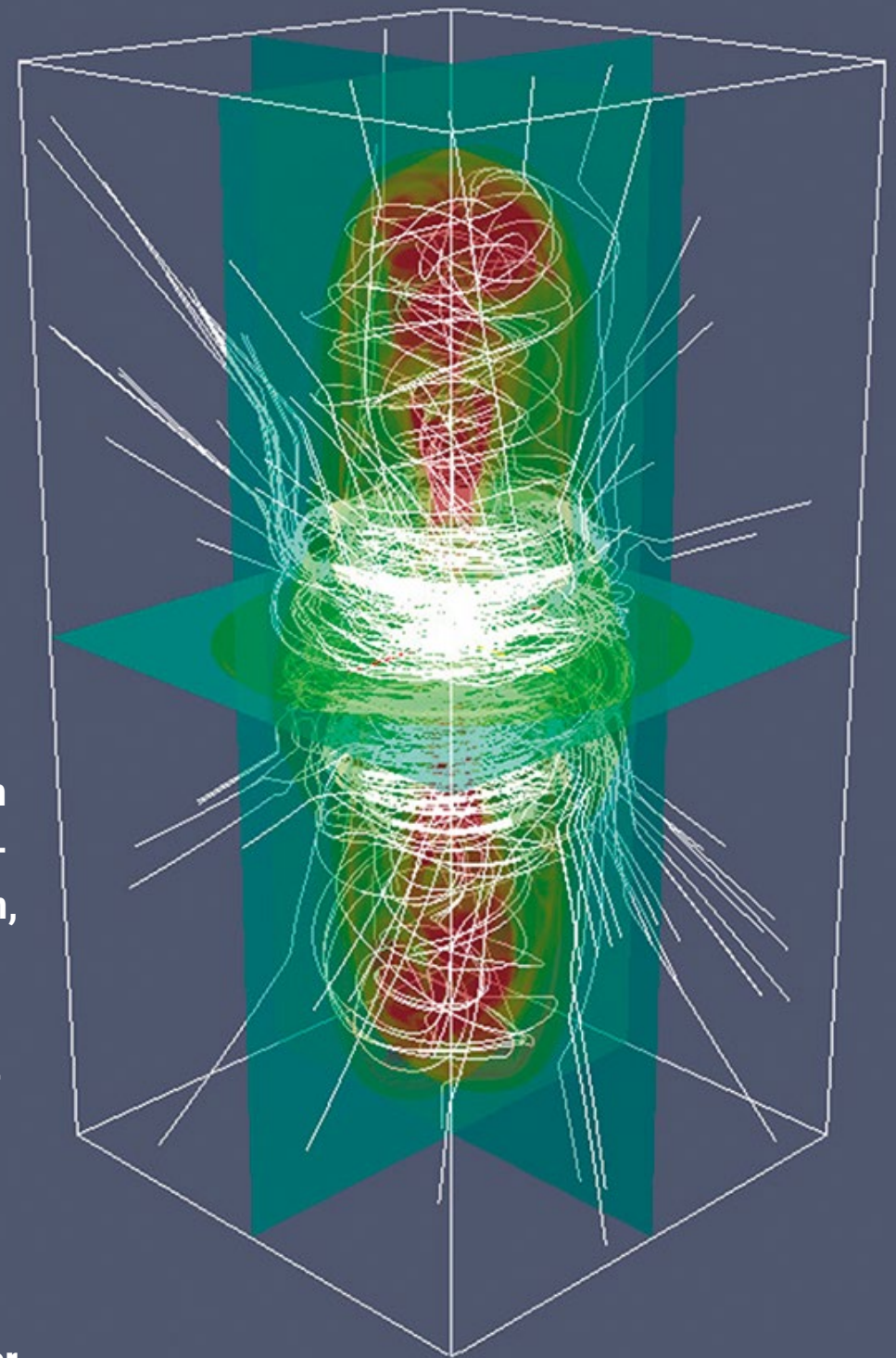
Die Beobachtung verschmelzender Neutronensterne brachte neue Einblicke in die explosive Elemententstehung

wird protonenreich. Die Energie der Protonen und ihre Anzahl ist ausreichend, dass sie von Atomkernen eingefangen werden können. Ähnlich wie beim Neutroneneinfang führt dies zum Aufbau schwerer Kerne, und zwar bis zur Massenzahl von etwa 100. Der Unterschied ist nur, dass der Einfang eines Protons die Protonenzahl um eine Einheit erhöht, die Reaktionspfade in der Nuklidkarte also senkrecht nach oben verlaufen. Dieser Prozess wird Neutrino-Proton-Prozess genannt.

Im intensiven Strahlungsfeld, das sich im kollabierenden Zentralbereich des massereichen Sterns aufbaut, kommt es auch zu Kernreaktionen, die einer Umkehr des Neutronen- und Protoneneinfangs entsprechen: Energiereiche Photonen werden eingefangen und Neutronen aus den Kernen ausgestoßen. Dieser Prozess der Photodesintegration kann in weiter außen liegenden Zonen, die in der Sternentwicklung die Bedingungen des Neonbrennens erfahren haben, bei Temperaturen von etwas mehr als einer Milliarde Grad die dort vorhandenen schweren Kerne spalten. Dabei entsteht eine Verteilung von überwiegend instabilen Atomkernen, die durch Beta-Plus-Zerfälle zu stabilen Kernen zerfallen.

SELTENE SUPERNOVA-FORMEN

Seltene Formen von Supernovae könnten hohe Neutronendichten erzeugen. Falls die explodierenden massereichen Sterne schnell rotieren und starke Magnetfelder haben, führt die Aufwicklung der Magnetfelder dazu, dass im Kollaps zum Neutronenstern extrem neutronenreiche Materie entlang der Polachse ausgeworfen wird und so über den r-Prozess schwere Elemente erzeugt. Der Mechanismus, hier im Computer simuliert, ist aber noch spekulativ.



Diese stabilen p-Kerne liegen in der Nuklidkarte auf der protonenreichen Seite der Stabilitätszone und sind in der Regel etwa 100- Mal seltener als benachbarte stabile Isotope des gleichen Elements. Allerdings findet man im unteren Massenbereich (bis zur Massenzahl 100) deutlich höhere Häufigkeiten, die mit Photon-induzierten Reaktionen nicht erklärt werden können. Hier scheint aber der oben beschriebene Neutrino-Proton-Prozess eine Lösung dieses Problems darzustellen.

Der r-Prozess: Schneller Neutroneneinfang

Da der s-Prozess bei Blei und Wismut endet, stellt sich sofort die Frage: Wie sind die Elemente Thorium und Uran entstanden? Eine Möglichkeit dafür ist der r-Prozess mit seinen extrem hohen Neutronendichten. Hier findet der Neutroneneinfang wesentlich schneller statt, als der Betazerfall die Kerne umwandeln kann. Das Ergebnis sind instabile Kerne weitab der Stabilitätszone der Nuklidkarte. Dieser Prozess findet in der Abkühlphase von Sternexplosionen statt, bei Temperaturen von etwa drei Milliarden Grad, falls die Materie noch neutronenreich genug ist. Da bei diesen Tempera-

turen noch hochenergetische Photonen vorhanden sind, halten sich Neutroneneinfänge und Photodesintegrationen die Waage.

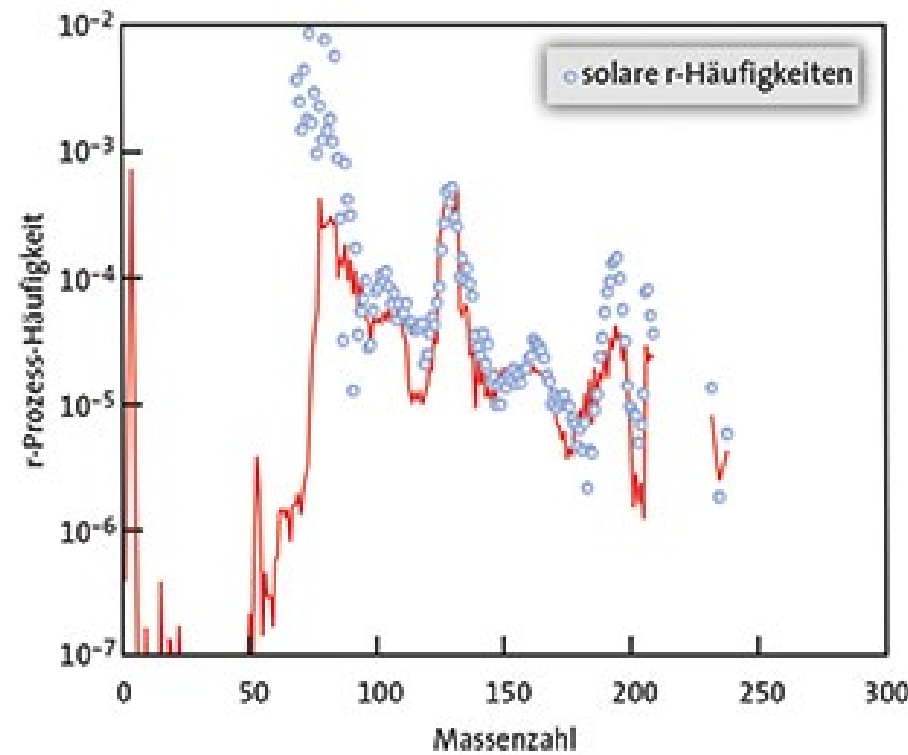
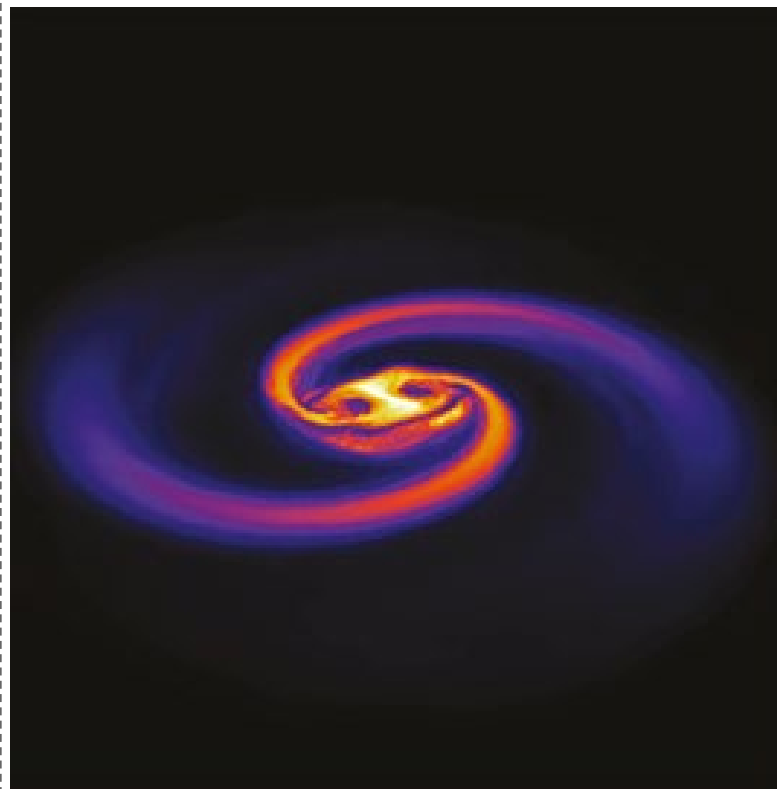
Auf diese Weise kommt es zu Häufigkeitsmaxima innerhalb jeder Isotopenkette, die weitab der stabilen Kerne liegen. Der Reaktionspfad des r-Prozesses wird dabei durch die Konturlinie konstanter Neutronenbindungsenergie von ein bis zwei Megaelektronvolt definiert. Das letzte Neutron eines Kerns weitab der Stabilitätszone ist nur mit dieser relativ geringen Energie gebunden – bei stabilen Kernen ist diese Bindungsenergie um das Fünf- bis Zehnfache höher. In der Nuklidkarte zeigt sich jeweils bei Kernen mit abgeschlossenen Neutronenschalen ein charakteristischer Knick (siehe »Die Landkarte der Kerne«). Der Aufbau schwerer Elemente erfolgt durch Betazerfälle entlang dieser Konturlinie, wobei sich am oberen Ende des Knicks und bei Kernen mit den längsten Halbwertszeiten auf Grund ihrer Lage nahe der Stabilität Maxima ausbilden. Wenn diese Kerne am Ende des r-Prozesses zu stabileren zerfallen, entstehen die typischen Maxima in den r-Prozess-Häufigkeiten, die gegenüber den Maxima des s-Prozesses nach links ver-

schoben sind (siehe »Isotopenhäufigkeit im Sonnensystem«).

Die Häufigkeitsvorhersagen für den r-Prozess hängen stark von den Eigenschaften der Kerne extrem instabiler und sehr neutronenreicher Isotope ab. Obwohl weltweit große Anstrengungen unternommen werden, diese instabilen Isotope zu erzeugen und ihre Eigenschaften experimentell zu bestimmen, beruht der weitaus größte Teil der für diese Rechnungen benötigten Information weitab der Stabilitätszone auf sehr unsicheren theoretischen Vorhersagen. Neue Anlagen wie der Beschleuniger FAIR bei Darmstadt werden die Datenbasis erheblich verbessern. Durch Vergleich mit den beobachteten Häufigkeiten im Sonnensystem lassen sich dann wesentliche Rückschlüsse auf diese Beschreibung der Atomkerne ziehen.

Tanz der Neutronensterne

Wie entstehen nun die hohen Neutronendichten, die für den r-Prozess benötigt werden? Lange Zeit gingen die Forscher davon aus, dass Supernova-Explosionen von massereichen Sternen der gesuchte Mechanismus ist. Die Entdeckung des Neutrino-Proton-Prozesses hat aber gezeigt, dass das



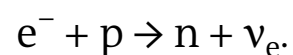
Verschmelzende Neutronensterne

Verschmelzende Neutronensterne erzeugen über den r-Prozess schwere Elemente. Wie Simulationen zeigen, wird der Hauptanteil der Masse in dem entstehenden Schwarzen Loch gebunden, aber ein kleiner Teil der extrem neutronenreichen Materie (blau) wird ausgestoßen (links). Die daraus resultierende Häufigkeitsverteilung schwerer Elemente erklärt recht gut die r-Prozess-Anteile, die in unserem Sonnensystem beobachtet werden (rechts).

LINKS: ROSSWOG, S. ET AL.: DETECTABILITY OF COMPACT BINARY MERGER MACRONOVAE. CLASSICAL AND QUANTUM GRAVITY 34, 2017, FIG. 3; RECHTS: F. KÄPPELER, G. MARTINEZ-PINEDO, F.-K. THIELEMAN / SUW-GRAFIK

ausgestoßene Material der inneren Zonen eher leicht protonenreich ist. Damit fällt diese Option größtenteils weg.

Der Supernova-Mechanismus käme nur dann in Frage, wenn die massereichen Sterne schnell rotieren und starke Magnetfelder aufweisen. Da die Materie im Kollaps sehr dicht und die Energie der freien Elektronen sehr hoch ist, können in dieser extrem heißen Materie Protonen durch Elektroneneinfang in Neutronen umgewandelt werden:



Anders als in regulären Supernova-Explosionen, wo durch den Einfang von Neutrinos und Antineutrinos wieder leicht protonenreiche Materie entsteht, kann in der hier angedeuteten Klasse von seltenen Supernovae neutronenreiche Materie durch Aufwicklung der Magnetfelder sehr schnell entlang der Rotationsachse ausgestoßen werden, bevor die Neutrinos einen zu starken Einfluss haben.

Dieses Szenario ist noch spekulativ und hängt stark von der Rotation und den Magnetfeldern ab, die sich aus der Sternentwicklung noch nicht genau ableiten lassen.

Bestätigt sich dieses Modell jedoch, würde diese seltene Art von Supernova massereicher Sterne – etwa eine von hundert bis eine von tausend – eine Option für den r-Prozess darstellen.

Ein alternatives Szenario ist die Verschmelzung zweier Neutronensterne. Nach bisherigen Erkenntnissen sind mehr als die Hälfte aller Sterne in Doppelsternsystemen gebunden. Falls beide Sterne so massereich sind, dass sie zu Supernovae und Neutronensternen führen, entsteht ein System aus zwei sich umkreisenden Neutronensternen. Durch Abstrahlen von Gra-

itationswellen verliert das System über lange Zeit hinweg Bahnenergie, so dass sich die beiden kompakten Himmelskörper beständig annähern, bis sie schließlich verschmelzen. Was dabei passiert, gehört zu den heftigsten Prozessen, die sich im Universum ereignen können.

Erstmals nachgewiesen wurde die Verschmelzung zweier Neutronensterne 2017 anhand der Gravitationswellen, die durch die Erschütterung der Raumzeit ausgelöst wurden – die Wissenschaftler gaben dem Ereignis den Namen GW170817. Mit mehreren Teleskopen auf der Erde und im Welt- raum ließ sich auch der kurz danach erfol- gende Gammastrahlen-Ausbruch sowie Licht bei blauen und infraroten Wellenlän- gen nachweisen. Aus Simulationen wissen wir, dass bei der Verschmelzung von Neu- tronensterne etwa 0,1 bis 1 Prozent der neu- tronreichen Materie ausgestoßen wird, während der Rest zu einem Schwarzen Loch kollabiert. Die dynamisch aus einer Scheibe herausgeschleuderte Materie ist von der Neutrino-Wechselwirkung nahezu unbe- einflusst und bleibt sehr neutronenreich, anders als das polar ausgestoßene Material. Dies führt zu einer starken und zu einer schwachen r-Prozess-Komponente.

Die Entwicklung im kosmischen Kontext

Die in den hier diskutierten Prozessen er- zeugten schweren Elemente werden auf ef- fektive Weise in das interstellare Medium zurückgemischt, sei es durch Sternwinde, Planetarische Nebel, Supernova-Explosio- nen oder aus der Verschmelzung von Neu- tronensterne. Die hier nicht besproche- nen Supernovae vom Typ Ia, die nicht End- punkt der Entwicklung massereicher Sterne sind, sondern durch die Explosion von Weißen Zwergen in Doppelsternsys- temen mit Masseaustausch ausgelöst wer- den, produzieren zwar Eisen und Nickel, aber keine schweren Elemente; es wird le- diglich diskutiert, ob dort auch ein p-Pro- zess stattfinden kann.

Indem aus der mit schweren Elementen angereicherten interstellaren Materie er- neut Sterne entstehen und sich der gesamte Prozess mehrmals wiederholt, erhöht sich mit jeder Sterneneration der Anteil neuer Elemente in der gesamten Galaxie. Es stellt sich nun die Frage: Lässt sich der Beitrag der genannten Syntheseprozesse im Verlauf der galaktischen Entwicklung beobachten und verifizieren? Da diese Prozesse zusammen mit dem nuklearen Brennen ausschließlich im Innern der Sterne ablaufen, zeigen die

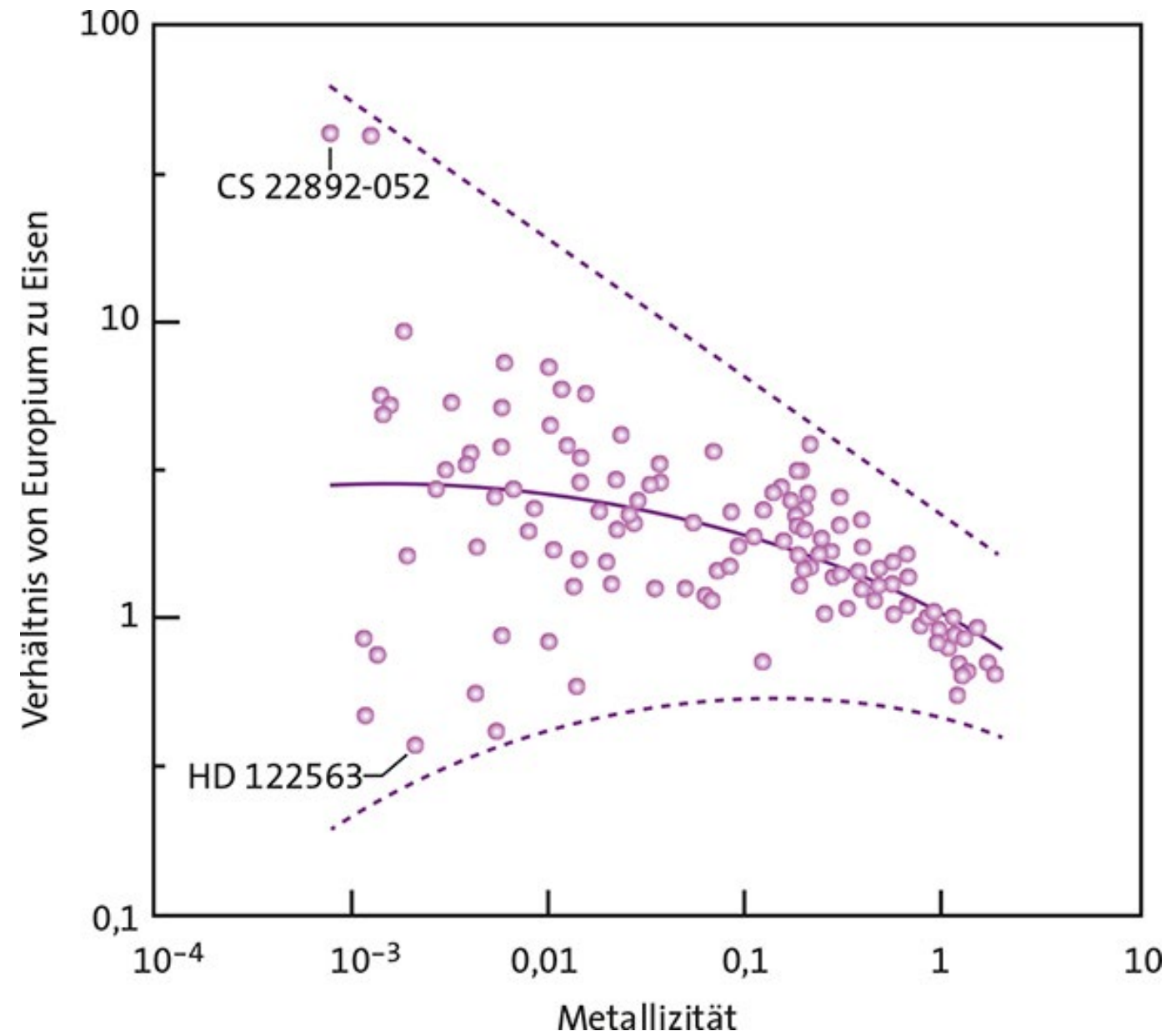
äußeren Schichten die unveränderte An- fangszusammensetzung. Man kann also die ursprüngliche Komposition der Materie, aus welcher der Stern entstand, auf seiner Ober- fläche mit Hilfe der Absorptionslinien im Spektrum nachweisen. Dies eröffnet die Möglichkeit, die Häufigkeitsverteilungen so- wohl auf sehr alten Sternen wie auch auf jungen Sternen zu bestimmen.

Ein Indikator für das Alter der Sterne ist das Häufigkeitsverhältnis von Eisen zu Wasserstoff – von den Astronomen Me- tallizität genannt. Da Wasserstoff schon im Urknall, Eisen aber erst in Sternexplosio- nen freigesetzt wurde, war dieses Verhält- nis anfänglich gleich null. Es wird häufig im logarithmischen Maßstab, normiert auf das Verhältnis in der Sonne, dargestellt. Da sich massereiche Sterne schnell, masse- arme hingegen langsam entwickeln, wird man zuerst die Beimischung von masse- reichen Sternen zum interstellaren Medi- um erwarten, später erst die Beimischun- gen von massearmen Sternen. Entspre- chend tragen Supernovae früher zur chemischen Entwicklung von Galaxien bei als Planetarische Nebel.

Da Supernovae eine mögliche Quelle von r-Prozess-Elementen und Planetari-

sche Nebel Quellen von s-Prozess-Elementen sind, müsste man also eine Entwicklung von einer reinen r-Prozess-Zusammensetzung zur heutigen solaren Komposition sehen, die durch spätere Beimischung von reinen s-Prozess-Anteilen entstanden ist. Da die einzelnen Isotope der Elemente unterschiedliche s- und r-Anteile aufweisen, führt dies auch für die Elemente – als Summe ihrer jeweiligen Isotope – zu unterschiedlichen s- beziehungsweise r-Prozess-Anteilen. Daraus ergibt sich zum Beispiel, dass die Lanthan-Häufigkeit vom s-Prozess und die von Europium vom r-Prozess dominiert ist. Tatsächlich findet man in den ältesten Sternen ein reines r-Prozess-Verhältnis von Lanthan zu Europium, das allmählich zunimmt, sobald der Eisenanteil ein Prozent des heutigen Werts erreicht hat, um dann asymptotisch in die solare Komposition überzugehen.

Wie kann man nun noch genauere Aussagen über den r-Prozess-Ursprung machen? Als mögliche Entstehungsorte haben wir bereits eine seltene Klasse von Supernovae mit Vorläufersternen, die schnell rotieren und ein starkes Magnetfeld haben, sowie verschmelzende Neutronen-



VERHÄLTNIS VON EUROPIUM ZU EISEN

Die starke Streuung im Verhältnis von Europium zu Eisen in der frühen Galaxie bei kleinen Metallizitäten lässt auf seltene Produktionsprozesse schließen. Sowohl das Elementverhältnis als auch die Metallizität sind logarithmisch aufgetragen und auf das Sonnensystem (Wert = 1) normiert.

sterne angegeben. Beide Ereignisse sind 100- bis 1000- Mal seltener als reguläre Supernovae. Das heißt, dass sich ihr Auswurfmaterial mit dem interstellaren Medium nicht so schnell homogen vermischt und deshalb starke Schwankungen der Elementverhältnisse zu erwarten sind, bis sich schließlich nach langer Zeit ein Mittelwert einstellt. Genau das sehen wir, wenn wir das beobachtete Verhältnis von Europium zu Eisen als Funktion der galaktischen Entwicklung darstellen (siehe »Verhältnis von Europium zu Eisen«). Ein Mittelwert stellt sich erst bei einer Metallizität von etwa einem Zehntel des solaren Werts ein. Der danach folgende Abfall des Verhältnisses ergibt sich durch die starke Eisenproduktion in Supernovae vom Typ Ia, die sich erst über lange Zeiten hinweg von massearmen Sternen zu Weißen Zwergen entwickeln mussten, bevor sie zur chemischen Entwicklung des Universums beitragen konnten.

Im Moment ist es noch strittig, ob Neutronensternverschmelzungen, die sich auch verzögert entwickeln, schon bei Metallizitäten von einem Tausendstel des solaren Werts vorkommen können. Hier basiert die Verlangsamung darauf, dass erst

Neutronensterne aus Supernova-Explosionen mit Eisenproduktion entstehen müssen, und diese erst nach der langwierigen Abstrahlung von Gravitationswellen verschmelzen.

Die chemische Entwicklung und Anreicherung der schweren Elemente bietet eine einzigartige Möglichkeit, unsere Vorstellung von den astrophysikalischen Szenarien des r-Prozesses und ihrer zeitlichen Einordnung in der Geschichte der Galaxien zu überprüfen. Leider gibt es noch keinen direkten Nachweis einzelner Elemente durch Beobachten einer Explosion. Im Gegensatz dazu wurde der s-Prozess, der in den Spätphasen von massereichen Sternen abläuft, über die eingangs geschilderte Beobachtung des Elements Technetium direkt nachgewiesen.

Wir wissen immerhin, dass der radioaktive Zerfall von frisch produzierten Kernen für verschiedene Helligkeitsphänomene verantwortlich ist, etwa in Nova- und Supernova-Explosionen. Deshalb ist zu vermuten, dass astrophysikalische Phänomene, die große Mengen an r-Prozess-Kernen produzieren, ebenfalls solche Signaturen tragen. Neutronensternverschmelzungen etwa können über kurze Gammastrahl-

blitze identifiziert und anschließend als »Nachglühen« im optischen oder infraroten Licht beobachtet werden, was indirekten Aufschluss über die Zusammensetzung geben kann. Die Beobachtungen von GW170817 zeigten, dass in diesem Fall das Maximum nach ungefähr einer Woche erreicht wird und die Helligkeit einer typischen Nova um einen Faktor 1000 übertrifft. Diese ersten Beobachtungen einer Kilonova konnten somit wenigstens teilweise die grundlegende Frage nach dem Ursprung des r-Prozesses beantworten. Ob solche Effekte auch in den erwähnten – noch spekulativen – Supernovae mit schneller Rotation und starken Magnetfeldern beobachtet werden können, ist noch offen. So bleibt dieses Forschungsfeld eines, in dem noch einige weiße Flecken auf der Landkarte zu füllen sind. ↩

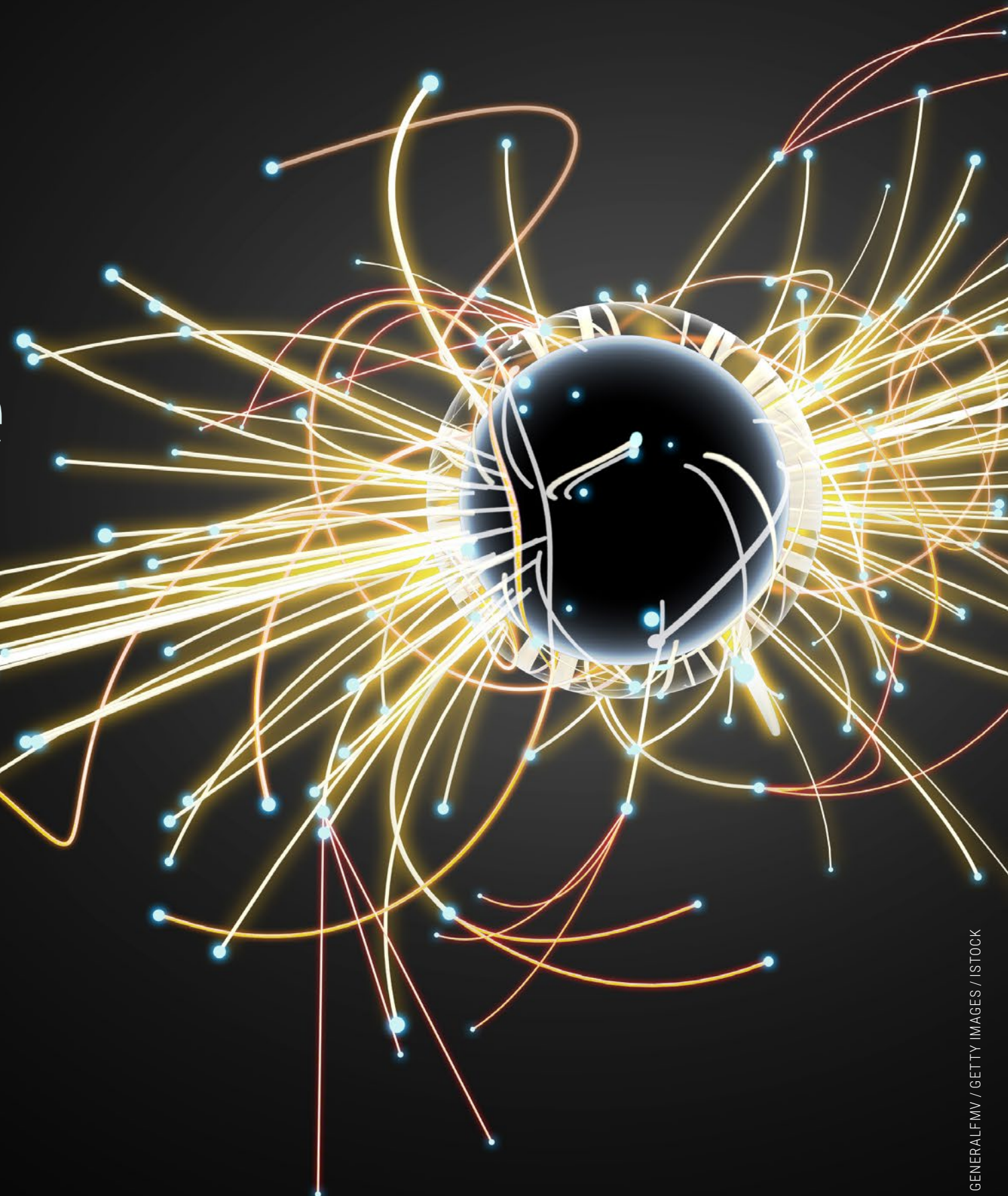
(Sterne und Weltraum, Dezember 2018)

NEUE ELEMENTE

Insel der Schwergewichte

von Christoph E. Düllmann und Michael Block

Wissenschaftler erzeugen Atome mit immer mehr Kernbausteinen und erweitern so das Periodensystem. Doch die neuen Elemente zerfallen extrem schnell wieder. Allmählich rücken freilich Kombinationen von Protonen und Neutronen in Reichweite, die theoretisch besonders stabil sein sollten.



1080 Stunden lang hatten Forscher aus Russland und den USA mit einem Teilchenbeschleuniger Trillionen von Kalziumionen auf schwerere Atomkerne geschossen. Das Ergebnis des Dauerbombardements: drei Atome eines neuen Elements. Wenige Millisekunden später waren sie wieder verschwunden.

Nachdem die Wissenschaftler am russischen Vereinigten Institut für Kernforschung die infolge der Kernreaktion detektierten Signale und die emittierte Strahlung genau aufgeschlüsselt hatten, waren sie sich ziemlich sicher, einen Augenblick lang das Element Nummer 118 erzeugt zu haben, also Atome mit 118 Protonen im Kern. Nach Jahre dauernden, mehrmaligen Überprüfungen wurde es 2016 offiziell ins Periodensystem aufgenommen und Oganesson genannt, nach Juri Oganjesjan, dem 1933 geborenen rus-

sischen Pionier der Erforschung superschwerer Elemente.

Im vergangenen Jahrzehnt haben Forscher das Periodensystem ständig erweitert. Die Anzahl der Protonen im Atomkern – Ordnungszahl oder Kernladungszahl genannt – charakterisiert jeden Grundbaustein der Natur. Gleichzeitig mit Oganesson wurden die Elemente mit 113, 115 und 117 Protonen offizielle Mitglieder des Periodensystems. Einer von uns (Düllmann) hat einige der ersten chemischen Experimente mit verschiedenen Vertretern superschwerer Elemente durchgeführt, der andere (Block) hat an den ersten direkten Messungen ihrer Masse und anderen Untersuchungen gearbeitet. Jedes neu entdeckte Element ist aufregend, weil es unbekannte Materie darstellt, der die Menschen nie zuvor begegnet sind. Wir können sie allerdings nicht behalten. Die wenigen Atome, die wir erschaffen, existieren nur einen Wimpernschlag lang. Dann zerfallen sie, weil sich die positiv geladenen Protonen im Kern gegenseitig abstoßen.

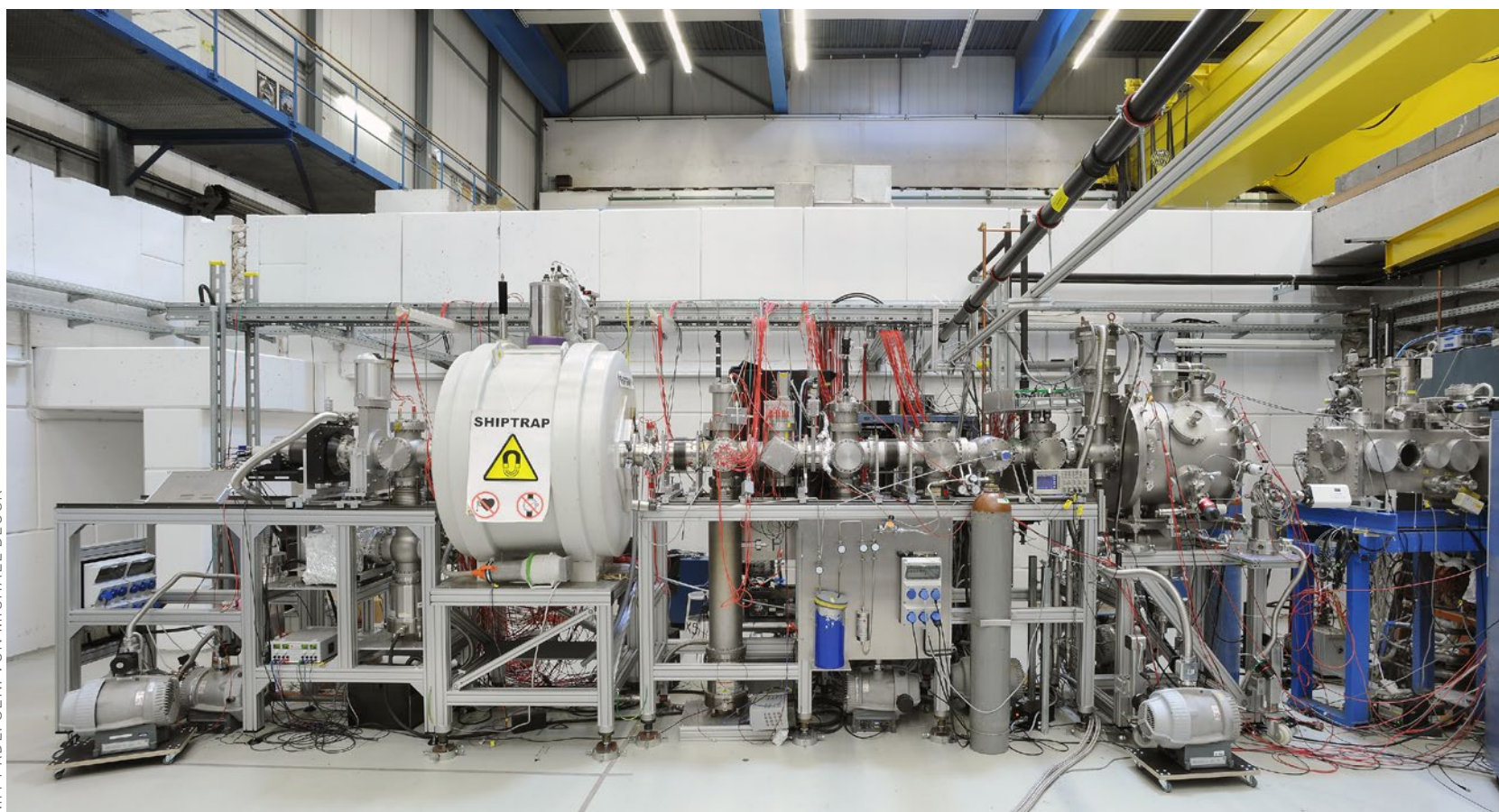
Vermutlich durchbrechen jedoch bestimmte noch unentdeckte superschwere Elemente und ihre Isotope – das sind Varianten mit unterschiedlicher Neutronen-

AUF EINEN BLICK

Zuwachs im Periodensystem

- 1 Wissenschaftler versuchen zunehmend schwerere, bislang unbeobachtete Elemente zu erzeugen. Die Techniken zur Synthese sowie zur Untersuchung der physikalischen und chemischen Eigenschaften werden dabei immer ausgefeilter.
- 2 Die meisten dieser Elemente sind äußerst kurzlebig. Theoretiker hoffen jedoch auf Atome mit »magischen« Anzahlen von Protonen und Neutronen, die lange stabil sind – vielleicht sogar über viele Jahre.
- 3 Derartige Atome würden die so genannte Insel der Stabilität im Periodensystem bilden. Forscher glauben, ihr mit einigen der jüngst entdeckten Elemente allmählich näher zu kommen.

Christoph E. Düllmann ist Kernchemiker und erforscht die Synthese und die Eigenschaften superschwerer Elemente. **Michael Block** ist Kernphysiker und entwickelt Präzisionsmessungen für diese Atome und ihre Kerne. Beide arbeiten an der Johannes Gutenberg-Universität Mainz, dem GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung in Darmstadt und dem Helmholtz-Institut Mainz.



SHIPTRAP

Atome mit hohen Ordnungszahlen werden mit Teilchenbeschleunigern erzeugt und in hochempfindlichen Geräten vermessen, wie diesem am GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung in Darmstadt.

zahl – dieses Muster flüchtiger Existenzen. Einige könnten theoretisch über Minuten, Tage oder gar Jahre bestehen, bevor sie zerfallen. Sollte das tatsächlich der Fall sein, würden sie einer noch unerforschten Region im Periodensystem angehören, der so genannten Insel der Stabilität. Hier sorgt eine besondere Anordnung der Kernbausteine dafür, dass die Atome lange überdauern könnten, statt nur kurzlebige Laborprodukte zu sein. In letzter Zeit scheinen sich Forscher dem Ufer dieser Insel zu nähern.

Langsames Vortasten zu völlig neuen Spielarten der Materie

Flerovium (Ordnungszahl 114) zum Beispiel zerfällt langsamer, als einige Berechnungen für ein derart protonenreiches Atom vorausgesagt hatten. Und die Halbwertszeit (die Zeit, nach der die Hälfte der Atome in leichtere Kerne zerfallen ist) einiger der neu entdeckten superschweren Elemente nimmt zu, je mehr der ladungs-freien Neutronen diese enthalten. Die Beobachtung deckt sich mit der Vermutung, dass die Insel der Stabilität irgendwo dort

im Periodensystem liegt, wo Atome um die 114 Protonen enthalten sowie mehr Neutronen als alle bis heute im Labor erschaffenen Elemente. Die Lebensdauer ist deutlich länger als von theoretischen Modellen vorhergesagt, die keinen Einfluss einer Stabilitätsinsel berücksichtigen. Das hat unzählige Wissenschaftler dazu motiviert, schwere Elemente zu erforschen. Jetzt hoffen wir, die Grenzen der Insel der Stabilität zu kartieren und ihr Zentrum zu finden, in dem die langlebigsten Isotope liegen.

Inzwischen haben Forscher faszinierende Erkenntnisse über die seltsamen Bewohner der Extremregion des Periodensystems zusammengetragen. Die Laborverfahren sind inzwischen so weit entwickelt, dass wir bestimmen können, wie sich superschwere Elemente chemisch verhalten, etwa ob sie bei Raumtemperatur als Metall oder Gas vorliegen. Und sollten wir es jemals schaffen, größere Mengen dieser Elemente herzustellen, würden sie wohl Eigenschaften zeigen, die sie von allen bekannten Stoffen unterscheiden. Selbst wenn sie dafür zu schnell zerfallen, werden sie uns helfen, die Chemie und die grundlegenden Eigenschaften von Materie besser zu verstehen.

Die chemischen Elemente sind im Periodensystem systematisch zusammengefasst. Das Ordnungsprinzip wurde vor 150 Jahren vor allem von dem russischen Chemiker Dmitri Mendelejew und praktisch gleichzeitig von dem deutschen Chemiker Julius Lothar Meyer entwickelt. Es listet die Elemente nach der Anzahl ihrer Protonen auf und ordnet sie in den Spalten in Gruppen, die mit anderen Stoffen auf ähnliche Weise reagieren und Verbindungen eingehen.

Seither fragen sich Forscher, wie weit sich das Periodensystem wohl erstreckt. Das schwerste Element, das man in größeren Mengen in der Natur findet, ist Uran mit 92 Protonen. Mit jedem zusätzlichen Proton nimmt die positive Ladung zu – und damit die Coloumb-Kraft, mit der sich Teilchen gleicher Ladung gegenseitig abstoßen. Sie wirkt der so genannten starken Wechselwirkung entgegen, die Atomkerne zusammenhält. Schwerere Kerne zerfallen darum tendenziell mit immer kürzerer Halbwertszeit.

Die Stabilität eines Elements hängt jedoch nicht nur von der Anzahl der Protonen ab, sondern auch davon, wie diese zusammen mit den Neutronen im Kern angeordnet sind. Die späteren Nobelpreisträger Maria Goeppert-Mayer und J. Hans D. Jensen haben in den späten 1940er Jahren ein Modell entwickelt, dem zufolge die Kernbausteine so genannte Schalen besetzen. In ihnen findet eine bestimmte Anzahl an Protonen und Neutronen Platz – so wie Elektronen in den Elektronenschalen um den Atomkern. Atomkerne mit vollständig besetzten Schalen gelten als besonders stabil.

Wissenschaftler entwickelten das Schalenmodell für Atomkerne, als sie bestimm-

te »magische« Zahlen identifizierten: Kerne mit 2, 8, 20, 28, 50 oder 82 Protonen beziehungsweise Neutronen sind stabiler und zerfallen nicht so schnell wie andere. Die Zahlen entsprechen voll besetzten Schalen. Bei den heute bekannten Elementen sind sie für Protonen und Neutronen gleich, allerdings muss das nicht für unbekannte superschwere Elemente gelten. Sind in einem Kern sowohl die Protonenschalen als auch die Neutronenschalen voll besetzt, bezeichnet man ihn als doppelt magisch.

Vieles dabei verstehen Wissenschaftler noch nicht. Welches sind etwa die magischen Zahlen der noch unentdeckten Elemente? Theoretisch sollte es einen doppelt magischen superschweren Atomkern mit 114 Protonen und 184 Neutronen geben. Aber obwohl wir Element 114 im Labor herstellen können, haben wir bislang kein Fleroviumisotop mit 184 Neutronen erzeugt. Schon frühe Vorhersagen aus den 1960er Jahren ließen vermuten, dass dieses Isotop unglaublich stabil sein würde, mit einer Halbwertszeit, die vielleicht an das Alter der Erde heranreicht. Damals kam zum ersten Mal die Idee einer Insel der Stabilität auf. Doch wir wissen nicht, ob 114 und 184

tatsächlich ein magisches Paar sind. Andere Berechnungen sagen Kombinationen aus 120 oder 126 Protonen und teilweise 172 statt 184 Neutronen vorher.

Die Bindungsenergie, die den Kern zusammenhält, ist eng mit einer zunächst verblüffenden Beobachtung verbunden: Die Masse eines Atoms ist geringer als die Summe der Massen seiner einzelnen Bausteine, also der freien Elektronen, Protonen und Neutronen. Albert Einstein lieferte mit seiner berühmten Formel $E = m \cdot c^2$ eine Erklärung für diesen so genannten Massendefekt. Die Gleichung drückt aus, dass die scheinbar fehlende Masse tatsächlich in Form von Bindungsenergie vorliegt. Indem wir Atome mit unterschiedlicher Protonen- und Neutronenzahl wiegen, können wir Zusammensetzungen mit einer stärkeren Bindung identifizieren. So bestimmen wir, wie stabil die verschiedenen Kombinationen der Kernbausteine sind.

Welche Zahl auch immer die nächste magische sein wird – wir scheinen allmählich tatsächlich auf die Insel der Stabilität zuzusteuern. Die bisherigen Messdaten haben nämlich gezeigt, dass die Halbwertszeit superschwerer Elemente für eine gegebene Kernladungszahl mit der Anzahl an

Neutronen zunimmt. Den Trend illustriert zum Beispiel Element 112 (Copernicium): Während das Isotop Copernicium-277 mit 165 Neutronen lediglich etwa 0,6 Millisekunden lang besteht, ist Copernicium-285, das acht Neutronen mehr enthält, rund 50 000-mal stabiler. Das Muster setzt sich höchstwahrscheinlich bis zum Zentrum der Insel der Stabilität fort.

Diese theoretische Möglichkeit hat eine Suche nach superschweren Elementen auch in der Natur ausgelöst. Obwohl wir sie bislang nicht gefunden haben, so das Argument, könnten sich Spuren davon direkt vor unserer Nase befinden. Sie haben sich vielleicht neben anderen Elementen, die schwerer als Eisen sind, bei Kollisionen zweier Neutronensterne gebildet und anschließend im Universum verteilt. In dem Fall könnten sie in der kosmischen Strahlung vorhanden sein, die aus den Tiefen des Alls zu uns gelangt, oder in Gesteinen auf der Erde überlebt haben.

Mit verschiedenen Methoden wollen Forscher die Atome aufspüren. So deuten Berechnungen darauf hin, dass Element 110 (Darmstadtium) recht stabil wäre und sich chemisch ähnlich wie Platin verhalten

Die Elemente zerfallen schnell, trotzdem verraten neue Messtechniken einiges über ihre chemischen Eigenschaften

Periodensystem der Elemente

Ordnungszahl
(Anzahl der Protonen im Kern)

H 1																			He 2
Li 3	Be 4											B 5	C 6	N 7	O 8	F 9	Ne 10		
Na 11	Mg 12											Al 13	Si 14	P 15	S 16	Cl 17	Ar 18		
K 19	Ca 20	Sc 21	Ti 22	V 23	Cr 24	Mn 25	Fe 26	Co 27	Ni 28	Cu 29	Zn 30	Ga 31	Ge 32	As 33	Se 34	Br 35	Kr 36		
Rb 37	Sr 38	Y 39	Zr 40	Nb 41	Mo 42	Tc 43	Ru 44	Rh 45	Pd 46	Ag 47	Cd 48	In 49	Sn 50	Sb 51	Te 52	I 53	Xe 54		
Cs 55	Ba 56	* 57–71	Hf 72	Ta 73	W 74	Re 75	Os 76	Ir 77	Pt 78	Au 79	Hg 80	Tl 81	Pb 82	Bi 83	Po 84	At 85	Rn 86		
Fr 87	Ra 88	** 89–103	Rf 104	Db 105	Sg 106	Bh 107	Hs 108	Mt 109	Ds 110	Rg 111	Cn 112	Nh 113	Fl 114	Mc 115	Lv 116	Ts 117	Og 118		
119	120	Lanthanoide (*) und Actinoide (**) werden wegen ihrer ähnlichen chemischen Eigenschaften zusammengefasst.																	
Hypothetische Positionen der noch unentdeckten Elemente 119 und 120 * *		La 57	Ce 58	Pr 59	Nd 60	Pm 61	Sm 62	Eu 63	Gd 64	Tb 65	Dy 66	Ho 67	Er 68	Tm 69	Yb 70	Lu 71			
		Ac 89	Th 90	Pa 91	U 92	Np 93	Pu 94	Am 95	Cm 96	Bk 97	Cf 98	Es 99	Fm 100	Md 101	No 102	Lr 103			

Periodensystem der Elemente

In der wichtigsten Tabelle der Chemiker sind alle bekannten Elemente nach der Anzahl der Protonen (Ordnungszahl) in ihrem Atomkern angeordnet. Forscher versuchen das Periodensystem zu erweitern, indem sie nach noch schwereren Elementen fahnden. Diese superschweren Elemente (rot) müssen im Labor erzeugt werden, da sie für ein natürliches Vorkommen zu instabil sind und umgehend wieder zerfallen.

JEN CHRISTIANSEN, NACH: CHRISTOPH DÜLLMANN / SCIENTIFIC AMERICAN MÄRZ 2018

könnte, falls es die magische Anzahl von 184 Neutronen enthält. Mittels Röntgenfluoreszenz und Massenspektrometrie haben Experten nach Darmstadtium in Platinernen gefahndet, waren bei der Suche aber nie erfolgreich. Die Resultate zeigen, dass die Häufigkeit unterhalb von einem Darmstadtiumatom pro einer Milliarde Teilchen liegen muss.

Von der erfolglosen Suche in der Natur zur künstlichen Produktion im Labor

Auch von der kosmischen Strahlung erhoffen sich Wissenschaftler schon länger Hinweise auf superschwere Elemente. Zum Beispiel befand sich an Bord der Long Duration Exposure Facility, eines NASA-Satelliten aus den 1980er Jahren, das Ultra Heavy Cosmic-Ray Experiment. Bis heute gibt es je-

doch keine eindeutigen Belege. Die Bemühungen werden weitergehen – schließlich wäre eine Entdeckung außerordentlich bedeutsam. Nicht zuletzt könnten neue Elemente die Synthese von Materialien mit einzigartigen Eigenschaften erlauben.

Da in der Natur noch keine superschweren Elemente gefunden wurden, müssen wir sie im Labor erschaffen. Dazu reichen

wir die Atomkerne gewöhnlicher Elemente mit noch mehr Protonen an. Bis zu einem gewissen Punkt können wir so die energiereichen kosmischen Prozesse imitieren, bei denen schwere Elemente entstehen. Kerne, die zu viele Neutronen enthalten, neigen zum so genannten Betazerfall, bei dem ein Neutron zu einem Proton wird. So bildet sich ein Element mit einer um eine Einheit größeren Ordnungszahl. Durch den Beschuss schwerer Atome mit Neutronen können wir Elemente bis zur Ordnungszahl 100 (Fermium) erzeugen. Bei keinem Fermiumisotop oder den noch schwereren Elementen ist jedoch bislang ein solcher Betazerfall beobachtet worden.

Um Elemente mit Ordnungszahlen von 100 und höher herzustellen – wie etwa das eingangs vorgestellte Oganesson –, bringen Forscher zwei Kerne so nahe zusammen, dass sich die starke Wechselwirkung bemerkbar macht. Diese Kraft hat eine extrem kurze Reichweite; darum müssen sich die Kerne fast berühren, um sie zu spüren. Für einen solch geringen Abstand ist es nötig, die Abstoßungskraft der positiv geladenen Protonen zu überwinden. Dazu beschleunigen wir einen der Kerne auf zirka ein Zehntel der Lichtgeschwindigkeit und schießen

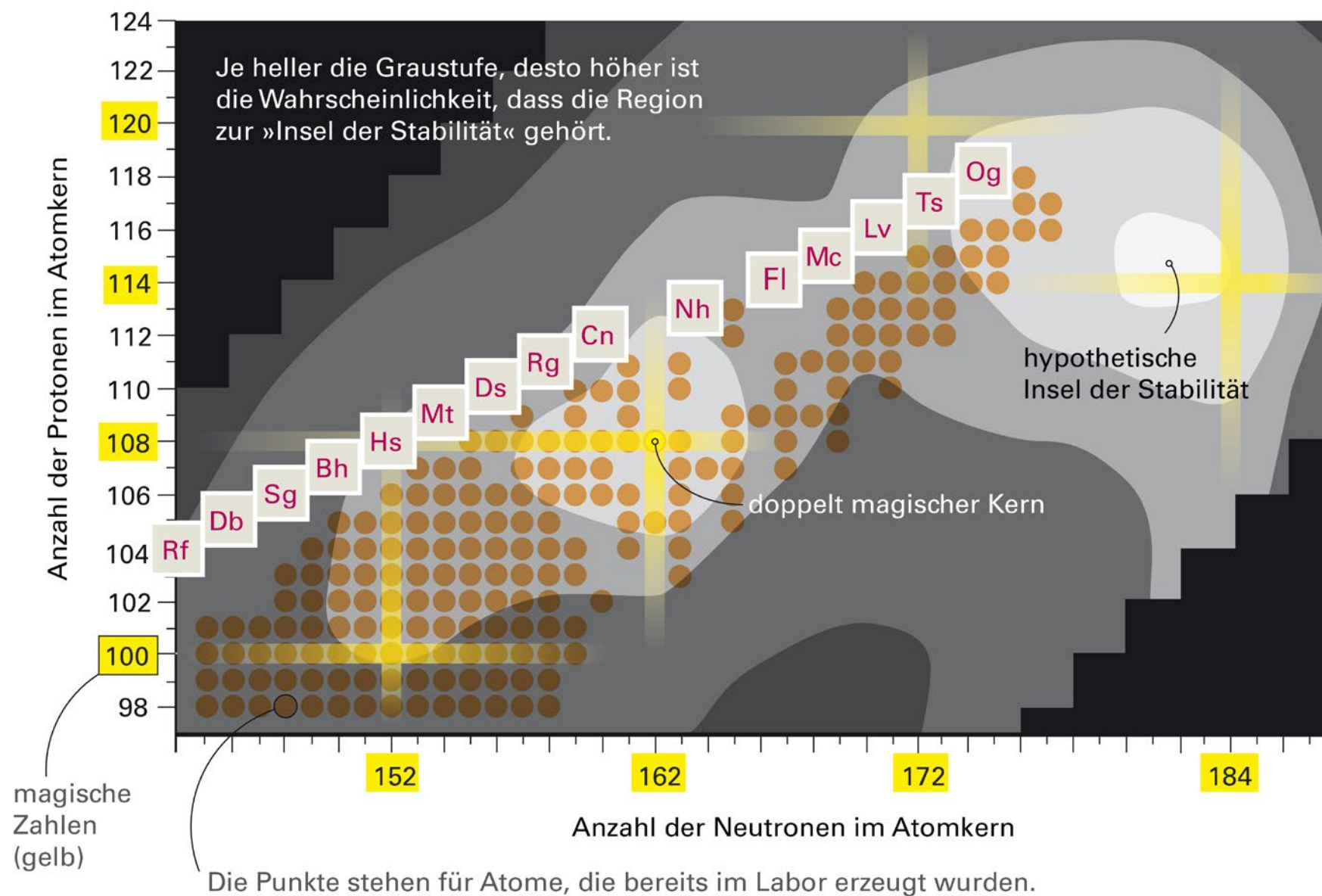
ihn auf den anderen. Dieser Impuls reicht gerade eben aus, die Coloumb-Kraft zu überwinden und Oberflächenkontakt zwischen den beiden Kernen herzustellen. Die Wahrscheinlichkeit für einen solchen Volltreffer ist allerdings extrem gering. Darüber hinaus fusionieren zwei Kerne umso schlechter, je mehr Protonen involviert sind. Und selbst wenn ein verschmolzener so genannter Verbundkern entsteht, zerfällt dieser oft umgehend wieder in leichtere Fragmente. Die geringe Chance, überhaupt einen Verbundkern zu erhalten, und das hohe Risiko für dessen Zerfall machen es äußerst schwierig, immer schwerere Elemente zu synthetisieren.

Trotzdem sind Forscher damit sehr erfolgreich gewesen: Die Elemente mit den Ordnungszahlen 113, 115, 117 und 118 wurden alle auf diese Weise erschaffen und von der Internationalen Union für reine und angewandte Chemie (IUPAC) 2016 offiziell anerkannt. Element 113 bekam den Namen Nihonium. Nihon ist eine von zwei Arten, auf Japanisch »Japan« zu sagen – unter anderem dort wurden die Atome hergestellt. Auch Element 115, Moscovium, heißt nach dem Ort seiner Entdeckung, dem Vereinigten Institut für Kernforschung nahe Mos-

kau. Nummer 117, Tenness, ehrt den US-Bundesstaat Tennessee – das dort beheimatete Oak Ridge National Laboratory steuerte Berkelium (Ordnungszahl 97) zur Synthese des Elements bei. Das 118 Protonen schwere Oganesson komplettiert die neuen Mitglieder des Periodensystems.

Nun fahnden Forscher unter Hochdruck nach Nummer 119, die dem Periodensystem eine neue Zeile hinzufügen würde. Obwohl mehrere Teams – inklusive unserer eigenen – an den weltweit leistungsfähigsten Teilchenbeschleunigern Wochen und Monate investiert haben, war die Kampagne bislang nicht erfolgreich. Ein Hindernis: Die Methode, die zu Oganesson und anderen superschweren Elementen führte, funktioniert nur bis zur Ordnungszahl 118. Leider gibt es keine ausreichenden Mengen an Kernen mit mehr als 98 Protonen, auf die man Kalziumionen (20 Protonen) schießen könnte. Wissenschaftler versuchen deshalb herauszufinden, welche Kombinationen verfügbarer und bekannter Elemente die besten Chancen bieten, noch unbekannte zu erzeugen.

Die neuen Elemente zerfallen blitzschnell, doch es gibt große Fortschritte bei den Messtechniken, die uns trotz der kur-



JEN CHRISTIANSEN, NACH: CHRISTOPH DÜLLMANN / SCIENTIFIC AMERICAN MÄRZ 2018

Insel der Stabilität

Jedes Proton in einem Atomkern erhöht die positive Ladung, die andere Protonen abstößt. Daher steigt die Wahrscheinlichkeit, dass ein instabiler Kern zerfällt, mit zunehmender Protonenzahl. Einige noch unentdeckte Kerne könnten sich dem Trend widersetzen, weil sie ganz bestimmte Anzahlen von Protonen und Neutronen enthalten. Die Teilchen besetzen im Kern jeweils so genannte Schalen. Wenn diese vollständig gefüllt sind, heißt die entsprechende Anzahl an Protonen und Neutronen magisch, und der Kern ist sehr stabil. Für einige Zahlenkombinationen ist der Effekt der Theorie nach besonders ausgeprägt. Zum Beispiel wird erwartet, dass 114 Protonen und 184 Neutronen eine doppelt magische Zahlenkombination ist, auch wenn Forscher noch kein Atom mit dieser Kombination an Kernbausteinen erzeugt haben. Sollten sie es schaffen, könnte es auf der hypothetischen Insel der Stabilität mit langlebigen superschweren Elementen liegen.

zen Lebensdauer einiges über ihre chemischen Eigenschaften verraten können. Das schwerste derart untersuchte Element ist Flerovium (Nummer 114). Im Periodensystem sitzt es direkt unter Blei, es sollte also ein Schwermetall sein. Aber laut theoretischen Erwägungen, die bis ins Jahr 1975 zurückreichen, verhält es sich möglicherweise eher wie ein Edelgas, das kaum mit anderen Stoffen reagiert.

Das Verhalten hängt letztlich von den vielen Protonen im Kern ab. Die extrem hohe positive Ladung der Atomkerne schwerer Elemente beschleunigt die negativ geladenen Elektronen in deren Hülle auf bis zu 80 Prozent der Lichtgeschwindigkeit. Das erzeugt ganz anders geformte und gelagerte Bahnen als bei den Elektronen leichter Elemente. Bei Flerovium beispielsweise liegen die Energieniveaus der beiden äußeren Elektronenschalen deutlich weiter auseinander als in vergleichbaren, aber kleineren Atomen wie Blei. Wenn Blei eine chemische Bindung eingeht, liefert dieser Vorgang eher die nötige Elektronenenergie, um den Abstand zu überwinden, als es bei Flerovium der Fall wäre. Flerovium ist daher möglicherweise deutlich reaktionsträger als sein eine Periode höher

stehendes Pendant. Darum könnte es eher einem Edelgas ähneln als einem typischen Metall wie Blei.

Das ist jedoch schwer genau vorherzusagen. Verschiedene Theorien sind sich einig darin, dass Flerovium relativ reaktionsträge sein sollte. Aber vermutlich ist es reaktiver als echte Edelgase und könnte etwa schwache metallische Bindungen mit Elementen wie Gold eingehen. Da es bisher nicht gelungen ist, Flerovium in größeren Mengen herzustellen, weiß niemand, wie es aussieht. Manche Vorhersagen gehen davon aus, dass es eine silbrig weiße oder blassgraue Farbe hat und bei Raumtemperatur fest ist.

Die möglichen Eigenschaften von Flerovium faszinieren die Forscher und haben sie zu verschiedensten Experimenten angespornt, obwohl sich nur wenige Atome des Elements pro Tag erzeugen lassen. Obendrein haben selbst die langlebigsten aktuell bekannten Fleroviumisotope nur eine Halbwertszeit von ein bis zwei Sekunden. Eine der besten Anlagen zur Synthese von Flerovium ist die TransActiniden-Separator und Chemie Apparatur (TASCA; Transactinide sind Elemente ab Ordnungszahl 104) am GSI Helmholtzzentrum für

Schwerionenforschung in Darmstadt. Dort beschießen wir eine rotierende Zielscheibe, die mit Plutonium-244 beschichtet ist, mit Kalzium-48. Wenn dabei Fleroviumatome entstehen, lenkt ein Magnet sie in ein Trägergas, das sie in ein spezielles Instrument spült. Dieses besteht aus zwei 32 Zentimeter langen, mit Siliziumdetektoren versehenen Halbschalen, die sich jeweils in einem Abstand von etwa einem halben Millimeter gegenüberstehen. So bildet die Anordnung der Detektoren einen engen Kanal. Ein schnell fließendes Trägergas zwingt das Flerovium hier hindurch. Die Detektoren sind mit einer dünnen Goldschicht überzogen, mit der wir die Wechselwirkung von Flerovium mit dem Metall untersuchen können. Beim Einlass in den Detektorkanal herrscht Raumtemperatur. Sollte Flerovium chemisch einem Metall ähneln, würde es sich in diesem Bereich beim Kontakt an die Goldoberfläche anheften und dort bis zu seinem Zerfall verweilen. Das Ende des Kanals kühlen wir mit flüssigem Stickstoff auf unter minus 160 Grad Celsius. Denn die für Edelgase typischen schwachen Bindungen halten Atome nur bei sehr niedrigen Temperaturen fest. Sollte sich Flerovium wie ein solches

**WHAT IS
AVAXHOME?**

AVAXHOME-

the biggest Internet portal,
providing you various content:
brand new books, trending movies,
fresh magazines, hot games,
recent software, latest music releases.

Unlimited satisfaction one low price
Cheap constant access to piping hot media
Protect your downloads from Big brother
Safer, than torrent-trackers

18 years of seamless operation and our users' satisfaction

All languages
Brand new content
One site

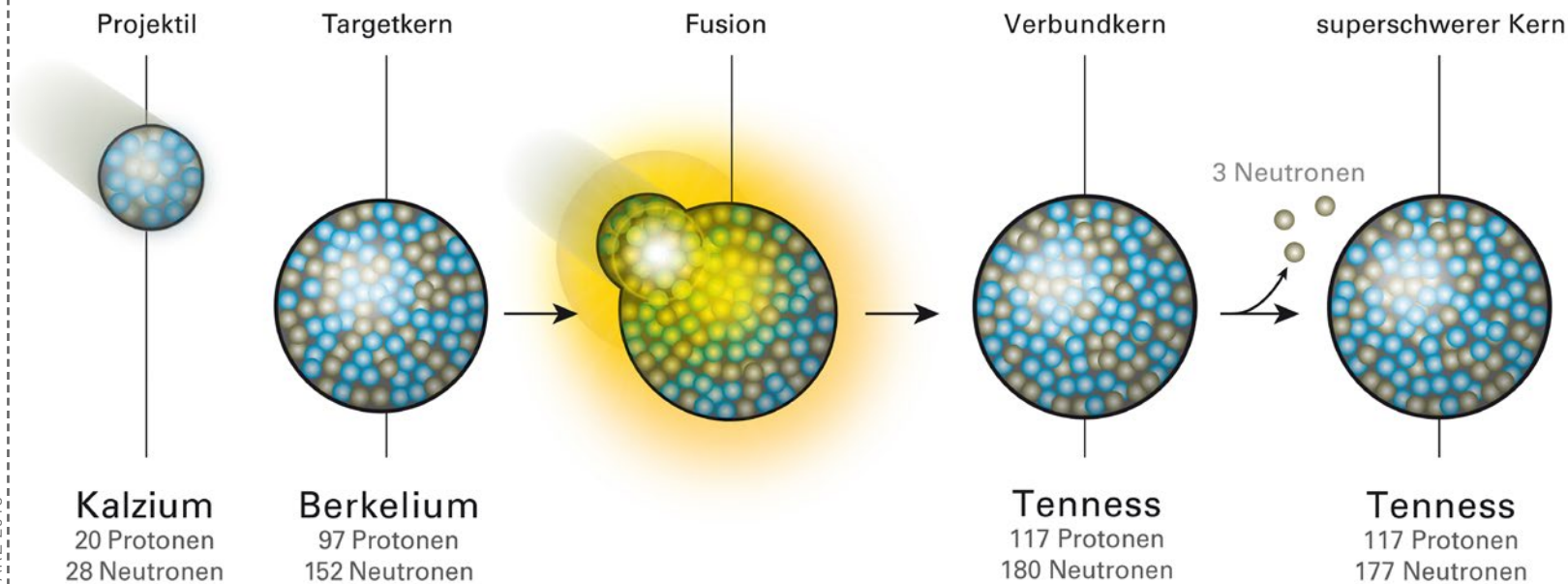


AVXLIVE .ICU

AvaxHome - Your End Place

We have everything for all of your needs. Just open <https://avxlive.icu>

Rezept für superschwere Elemente



Um ein Element mit besonders vielen Kernbausteinen herzustellen, schießen Forscher einen Atomkern auf einen anderen, in der Hoffnung, dass beide miteinander verschmelzen. Dabei muss das Projektil mit etwa einem Zehntel der Lichtgeschwindigkeit auf das Ziel zurasen, um die abstoßenden Kräfte der beiden positiv geladenen Kerne zu überwinden. Wenn sie sich fast schon berühren, setzt die anziehende Kraft der so genannten starken Wechselwirkung ein, die Protonen und Neutronen im Atomkern zusammenhält. Zum Beispiel entsteht durch das Verschmelzen von Kalzium und Berkelium das Element Tenness mit 117 Protonen und 177 Neutronen.

verhalten, würde es also erst im hinteren Teil des Kanals an der Oberfläche andocken – wenn überhaupt.

Mit Detektoren und Laserlicht auf der Spur der atomaren Struktur

Während eines Versuchs an der TASCA beobachtete unsere Forschungsgruppe zwei Atome, die im ungekühlten Bereich des Detektorkanals zerfielen. Flerovium schien also eine metallähnliche Bindung eingegangen zu sein. Ein zuvor in Russland durchgeführtes Experiment lieferte drei Fleroviumatome. Eines davon zerfiel ebenfalls bei Raumtemperatur, die anderen zwei detektierten die beteiligten Forscher vom schweizerischen Paul Scherrer Institut hingegen bei etwa minus 90 Grad Celsius. Das interpretierten die Forscher als edelgasähnliches Verhalten. Wir analysieren inzwischen neue Daten, die wir am Helmholtzzentrum gewonnen haben, um die Eigenschaften dieses spannenden Elements zu klären.

Ein anderer Zugang zu den chemischen Eigenschaften ist es, die atomare Struktur zu untersuchen, indem man die Elektronenbahnen mit Hilfe von Lasern vermisst. Im September 2016 und im Juni 2018 pub-

lizierten wir mit unseren Teams die Ergebnisse der ersten Laserspektroskopie-Experimente mit dem superschweren Element Nobelium (Ordnungszahl 102). Zunächst stellten wir mehrere Nobeliumatome pro Sekunde her, indem wir Bleiatome (82 Protonen) mit Kalziumatomen (20 Protonen) bombardierten. Anschließend bremsten wir sie in Argongas ab und beschossen sie mit Laserpulsen. Hatten die Pulse die richtige Energie, konnte ein Elektron sie absorbieren und gewann dadurch genügend Energie, dass es dem Nobelium entfliehen konnte. Indem wir die Frequenz des Lasers variierten, ließ sich präzise die zur Entfernung des Elektrons nötige Energie messen. Diese so genannte Ionisierungsenergie ist eine der charakteristischen Eigenschaften chemischer Elemente. Sie bestimmt, mit welcher Wahrscheinlichkeit ein Element mit anderen reagiert und eine Bindung eingeht. Wir haben diese Versuche zuerst mit Nobelium-254 durchgeführt und sie später auf die Isotope mit 252 und 253 Kernteilchen ausgedehnt, um zu verstehen, wie sich die Anzahl an Neutronen auf die energetische Lage des Elektronenniveaus auswirkt. Die Ergebnisse verraten etwas über die Gestalt der positiv geladenen Atomker-

ne der Isotope – je nach deren Größe und Form ändert sich das Verhalten der sie umkreisenden Elektronen. Obwohl sich das Elektronenniveau dadurch nur um zirka ein Millionstel ändert, lässt sich der Effekt bestimmen. Man beobachtet dabei den Zuwachs der Größe des Atomkerns durch das Hinzufügen von Neutronen. Außerdem bestätigen die Messungen, dass der Nobeliumatomkern in diesen Isotopen wie ein amerikanischer Football geformt ist. Die theoretischen Kernmodelle, die unsere Daten gut beschreiben, sagen sogar vorher, dass die schweren Atomkerne nicht homogene Körper sind, sondern durch eine deutlich reduzierte Protonendichte im Zentrum eine hohle Struktur entwickeln.

Wissenschaftler haben auch schon chemische Bindungen zwischen superschweren Elementen und leichteren Atomen geknüpft. Ein Beispiel ist die Synthese eines Moleküls mit Seaborgium (Element 106). 2013 hat eine Gruppe von Forschern um einen von uns (Düllmann) bei einem Versuch am japanischen RIKEN Nishina Center for Accelerator-Based Science Seaborgiumisotope mit einer Halbwertszeit von rund zehn Sekunden erzeugt. Nach anschließender Zugabe von Kohlenmonoxid

bildete das schwere Element eine Hexacarbonyl-Verbindung, in der sich sechs Moleküle Kohlenmonoxid um ein zentrales Seaborgiumatom lagerten.

Seaborgium verhielt sich ähnlich wie seine bekannteren Verwandten Wolfram und Molybdän, die gleich viele Valenzelektronen besitzen, also Elektronen in der äußersten Schale. Während des etwa zweiwöchigen Experiments ging Seaborgium mit Kohlenmonoxid dieselbe Hexacarbonyl-Verbindung ein wie Wolfram und Molybdän, und es zeigte obendrein eine ähnliche Wechselwirkung mit Siliziumoxid-Oberflächen. Eine der nächsten Fragen, die zu klären sind, lautet, welches der drei Elemente das stabilste Hexacarbonyl-Molekül bildet. Die ersten Berechnungen aus den späten 1990er Jahren deuteten auf Seaborgium hin, neuere sehen hingegen Wolfram vorne.

Dies sind nur einige Beispiele für die Art von Versuchen, die Wissenschaftler mit superschweren Elementen durchführen, und für die vielen offenen Fragen, die sie damit zu beantworten hoffen. Zwar sind die neuesten Mitglieder des Periodensystems zugegebenermaßen recht exotisch. Dennoch liefern Experimente immer mehr Infor-

mationen darüber, wie sie in das Schema passen, das vor 150 Jahren auf Grundlage alltäglicher Elemente erstellt wurde. Unabhängig davon, ob wir das Zentrum der Insel der Stabilität jemals erreichen und ob sich die dortigen Elemente tatsächlich als so langlebig herausstellen werden, erfahren wir bereits jetzt anhand superschwerer Elemente viel über die chemischen Grundbausteine der Natur. ↩

(Spektrum der Wissenschaft, Dezember 2018)

Düllmann, C. E. et al. (Hg.): Special Issue on Superheavy Elements. Nuclear Physics A 944, 2015

Laatiaoui, M. et al.: Atom-at-a-Time Laser Resonance Ionization Spectroscopy of Nobelium. In: Nature 538, S. 495–498, 2016

Raeder, S. et al.: Probing Sizes and Shapes of Nobelium Isotopes by Laser Spectroscopy. In: Physical Review Letters 120, 232503, 2018

Spektrum
der Wissenschaft

KOMPAKT



MATERIE- ANTIMATERIE

Faktencheck | Fünf Fragen zur Antimaterie
Frühes Universum | Das Higgs-Boson und die Dominanz der Materie
Gluonen | Der Klebstoff der Welt

HIER DOWNLOADEN

FÜR NUR
€ 4,99

UMSTRITTENES PRÜFVERFAHREN

Der Streit um die Neuen im Periodensystem

von Edwin Cartlidge

Gleich vier neue Einträge erhielt die berühmte Tabelle der Elemente im Jahr 2015. Doch nicht alle Forscher können sich darüber so richtig freuen.

Eigentlich hatten sich die Organisatoren fröhliche Stimmung erhofft auf ihrem Chemie-Symposium in Schweden im Mai 2016. Die Nobelstiftung hatte eingeladen. Der Anlass: Vier neue Elemente, nur wenige Monate zuvor entdeckt, sollten offiziell ins Periodensystem der Elemente aufgenommen werden. So kamen renommierte Physiker und Chemiker aus aller Welt auf dem Schloss Bäckaskog bei Kristianstad zusammen, um sich über den Stand der Atomforschung auszutauschen. Als besonderer Höhepunkt und Ehre für die Entdecker war die feierliche Namensgebung der neuen Elemente geplant. Doch es kam anders.

Zwar würdigten viele der anwesenden Forscher die Entdeckerleistung ihrer Kollegen — und freuten sich über die damit einhergehende Publicity für ihr Fachgebiet. Nicht wenige aber wirkten besorgt, manche gar empört. Denn im Vorfeld der Konferenz hatten sich Indizien gehäuft, dass

bei der Begutachtung der Forschungsergebnisse, die die Existenz der neuen Elemente belegen sollten, nicht alles mit rechten Dingen zugegangen war. Nun fürchteten manche um die Glaubwürdigkeit des Periodensystems.

Zum Ende der Konferenz kam es dann zum Eklat. Ein Redner hatte um Abstimmung per Handzeichen im Saal gebeten. Sollten die Namen der neuen Elemente trotzdem feierlich benannt gegeben werden? Das Ergebnis: Die meisten Forscher votierten dafür, die Namensgebung zu verschieben — zur großen Verärgerung der russischen Forscher, die an der Entdeckung federführend beteiligt gewesen waren. »Entrüstet verließen sie gemeinsam den Saal«, beschreibt der Chemiker Walter Loveland von der Oregon State University die Szene. »So was hatte ich vorher noch nie erlebt.«

Siebte Zeile jetzt vollständig

Trotz der nun offenkundigen Zweifel unter den Experten wurden die Namen der neuen Elemente dann kurz nach der Konferenz von der International Union of Pure and

Applied Chemistry (IUPAC) bekannt gegeben: Nihonium (Ordnungszahl 113), Moscovium (115), Tenness (117) und Oganesson (118). Zusammen bringen sie die Zahl der bekannten Elemente auf 118 und vervollständigen, rund 150 Jahre nachdem Dmitri Mendelejev das Periodensystem erdacht hatte, seine siebte Zeile.

Dieser Zug der Chemiker-Union verärgerte aber vor allem die Physiker der Schwesterorganisation International Union of Pure and Applied Physics (IUPAP). »Als Forscher kann ich nicht einfach etwas glauben, ohne selbst die Beweise gesehen zu haben«, beschwert sich etwa Atomphysiker Claes Fahlander von der Universität Lund in Schweden. Zwar denkt er, dass die Daten der russischen Forscher ausreichen, um die Entdeckung von Moscovium und Tenness zu untermauern. Die offizielle Anerkennung aber hielt er für verfrüht. Allein ist er mit dieser Einschätzung nicht. Was genau stört die Physiker also?

Traditionell fiel den Chemikern allein die Rolle zu, neue Elemente ins Periodensystem aufzunehmen — immerhin hatten sie jahrhundertlang erfolgreich Elemente

mit chemischen Mitteln identifiziert. Seit wenigen Jahrzehnten aber führen die Atomphysiker die Jagd nach Elementen an. Mit modernen Beschleunigern bringen sie Atome zur Kollision, und ab und an verschmelzen dabei zwei Atomkerne zu einem schwereren Element.

Auch infolge dieser methodischen Verschiebung werden Entscheidungen über neue Elemente seit 1999 von einem gemeinsamen Komitee aus Experten der IUPAC und der IUPAP gefällt: der so genannten Joint Working Party (JWP). Den Vorsitz hat heute der Nuklearchemiker Paul Karol, emeritierter Professor an der Carnegie Mellon University in Pittsburg (Pennsylvania, USA). Zwischen 2012 und 2016 bestand das JWP aus Karol und vier Physikern.

Geschwisterzank zwischen Chemikern und Physikern

Die Entscheidung des JWP über die vier neuen Elemente hatte das IUPAC in einer Pressemitteilung am 30. Dezember 2015 veröffentlicht. Allerdings ohne vorher die Zustimmung des Exekutivkomitees der IUPAC einzuholen. Das wäre eigentlich der offizielle Weg gewesen. Das Exekutivkomitee reich-

te seine Zustimmung einen Monat später nach. Entscheidender aber: Die Daten, auf denen die Entscheidung des JWP beruhte, waren den Physikern der IUPAP nicht einmal vorgelegt worden. »Das hätten wir schon erwartet«, moniert Bruce McKellar von der University of Melbourne (Australien), damals Präsident der IUPAP. In einem Interview gestand Paul Karol dem Fachjournal »Nature«, er habe den Inhalt des Abschlussberichts nahezu ausschließlich mit den Chemikern der IUPAC abgesprochen.

Dieser Alleingang des IUPAC brachte den Unmut, der zwischen den Schwesterorganisationen brodelte, zum Überkochen. »Über Jahre hat die Chemiker-Union den Prozess der Prüfung neuer Elemente auf unfaire Weise dominiert«, sagt etwa die Physikerin Cecilia Jarlskog von der Universität Lund. Auf der Konferenz in Schweden ließ Jarlskog, damals Präsidentin des IUPAP, ihrem Frust über die Zustände freien Lauf: Die Chemiker-Union stelle sich mit ihren eigenmächtigen Ankündigungen ins Rampenlicht. Außerdem besäßen »nur Physiker die Kompetenz«, die Daten aus den Teilchenbeschleunigern zu prüfen.

Zu dieser Ohrfeige gesellte sich bald heftige Kritik am Prüfverfahren. Die Daten für

»Als Forscher kann ich nicht einfach etwas glauben, ohne selbst die Beweise gesehen zu haben«

[Claes Fahlander]

die Elemente 115, 117 und 118 stammten aus einer russisch-amerikanischen Kollaboration unter Leitung des Atomphysikers Yuri Oganessian vom Joint Institute for Nuclear Research (JINR) in Dubna (Russland). Die für das Element 116 hatten Forscher des RIKEN Nishina Center for Accelerator-Based Science bei Tokio eingereicht. Den Anspruch auf die Entdeckung der Elemente 115 und 117 leitete die russisch-amerikanische Gruppe aus einer Analyse radioaktiver Zerfallsketten ab, die sich zeigen sollten, wenn die Elemente zeitgleich bei Teilchenkollision entstehen.

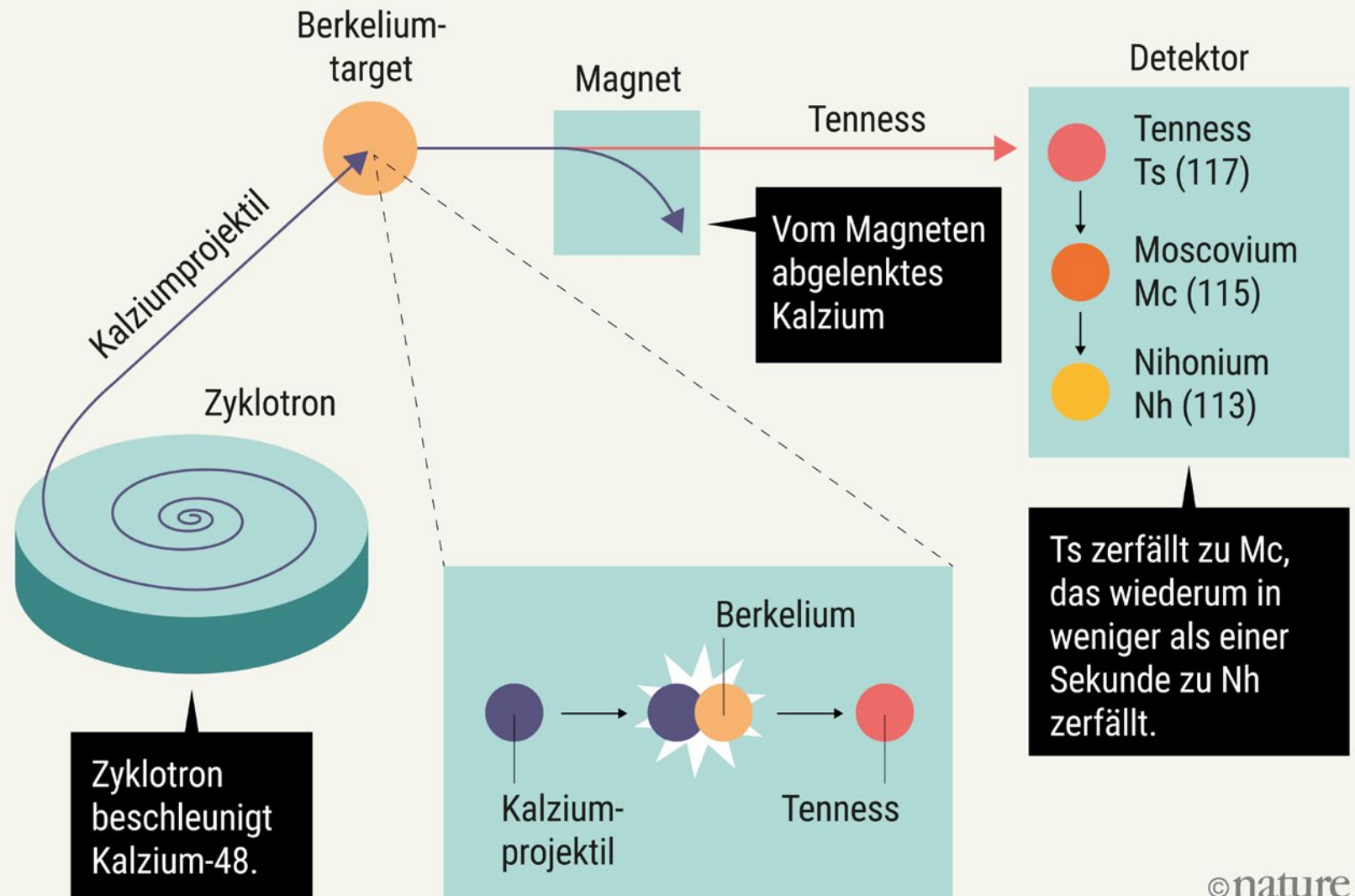
Allerdings ist die statistische Analyse solcher Zerfallsketten ausgesprochen anfällig für Fehler, vor allem wenn zwei Elemente mit ungerader Ordnungszahl interagieren können. Claes Fahlander aus Lund etwa berichtete im Jahr 2016, dass die beobachteten Zerfallsverhältnisse nur sehr unwahrscheinlich bei den Elementen 115 und 117 auftreten dürften — ein Kritikpunkt, der dem JWP bereits im Februar 2015 vorlag.

Noch wurde keine Entscheidung widerrufen

Das JWP-Mitglied Robert Barber, Atomphysiker an der University of Manitoba in Win-

WIE MAN NEUE ELEMENTE BAUT

Eine Arbeitsgruppe aus Russland und den USA beschloss Berkelium (Ordnungszahl 97) mit Kalzium-48 (Ordnungszahl 20), um Tenness (Ordnungszahl 117) herzustellen, das sich wiederum durch radioaktiven Zerfall in leichtere Elemente aufspaltet.



©nature

»Über Jahre hat die Chemiker-Union den Prozess der Prüfung neuer Elemente auf unfaire Weise dominiert«

[Cecilia Jarlskog]

nipeg (Kanada) meint zwar, er und seine Kollegen wären über den Effekt möglicher Interaktionen »sehr besorgt« gewesen. Letztlich sei man sich dann aber einig gewesen, dass es zu den eingereichten Daten keine Alternative gebe. Auch Loveland steht hinter der Entscheidung des JWP. Selbst wenn sich die JWP in ein paar Details geirrt haben sollte, habe das Gremium noch keine seiner Entscheidungen widerrufen müssen, berichtet er. Und der JWP-Vorsitzende Karol wendet ein, man habe sich bei der Prüfung gewissenhaft am offiziellen Kriterienkatalog orientiert. »Alles in allem waren wir sehr zufrieden mit dem Abschlussbericht«, sagt er.

Doch nicht alle Forscher überzeugen solche Antworten. Sogar der Atomphysiker und Mitentdecker Vladimir Utyonkov kritisiert die Zusammensetzung des JWP. Zwar hält auch er das Argument über mögliche Interaktionen für nicht stichhaltig. Dennoch findet er, dass im JWP zu wenige Forscher mit Expertise in der Synthese schwerer Elemente sitzen. Das habe deutlich aus den Entwürfen für den Abschlussberichts gesprochen. Die meisten Teilnehmer der schwedischen Konferenz stimmten dieser Kritik zu: Als der Atomphysiker

David Hinde von der Australian National University in Canberra fragte, ob sie die Schlüsse des Gremiums »aus wissenschaftlicher Sicht zufrieden stellend« sind, bejahten nur eine Hand voll der rund 50 Anwesenden die Frage.

Unsaubere Prüfung

Tatsächlich gibt es Hinweise darauf, dass die Prüfung durch das JWP nicht sauber war. Laut der Geschäftsführerin der Chemiker-Union Lynn Soby war das JWP dabei in zwei Schritten vorgegangen. Erst wurden die eingereichten Daten an mehrere Labore geschickt, mit der Bitte um Begutachtung. Auf der Grundlage der Gutachten schrieb das JWP dann abschließende Bewertungen, die zur Freigabe noch an das Komitee für Terminologie, Nomenklatur und Symbole der Chemiker-Union geschickt wurden, allerdings nur, um auf sprachliche und Formatierungsfehler hin geprüft zu werden, berichtet Soby.

Jedoch waren einige der Forscher, die die Forschungsergebnisse begutachten sollten, selbst an der Datenerhebung beteiligt gewesen. Und mindestens einer der vermeintlich unabhängigen Gutachter war von einem der Entdeckerlabore vorgeschla-

Das Periodensystem der Elemente auf »Spektrum.de«

1 H																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																								
--------	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr



gen worden. Wenn das stimmt, hat die Verantwortung für die wissenschaftliche Prüfung fast vollständig in den Händen jener Labore gelegen, die die Ergebnisse produziert hatten.

Das hält Soby durchaus für angemessen. Immerhin seien die Gutachter ja Experten auf ihrem Fachgebiet, unterstreicht sie. Der Mitentdecker Vladimir Utyonkov war einer von ihnen. Er selbst aber war davon ausgegangen, dass der Chemikerverband 15 unabhängige Experten mit der wissenschaftlichen Prüfung beauftragt hatte. Aus seiner Perspektive sollten er und zwei seiner Kollegen aus Dubna nur die Fakten und Abbildungen in den Berichten auf Korrektheit prüfen. »Mir ist schleierhaft, wie man uns als unabhängige Prüfer sehen konnte«, sagt er.

Elemente unten rechts sind notorisch instabil

Auch McKellar (der damalige IUPAP-Präsident) sagt, er habe Zweifel an der Arbeitsweise des JWP gehabt, betont aber, dass die meisten Physiker und Chemiker, die er damals befragte, die Prüfergebnisse des JWP für weitgehend schlüssig hielten. Jan Reedijk, damals Präsident der Abteilung für

Anorganische Chemie des IUPAC verteidigt die frühe Pressemeldung mit dem Hinweis, man habe nur versuchen wollen, Leaks zu vermeiden und die Labore mit Anspruch auf die Entdeckerehre nicht zu lange warten zu lassen.

Elemente unten rechts im Periodensystem sind notorisch instabil und brechen oft in Sekundenbruchteilen durch radioaktiven Zerfall auseinander. Die Forscher hatten daher Jahre gebraucht, um genügend Daten zu sammeln. Als im Dezember 2015 dann das Peer-Review des Journals »Pure and Applied Chemistry« überstanden war, habe man die Entdeckung einfach zügig bestätigen wollen, erklärt McKellar. »Als klar war, dass das Review erfolgreich war, habe ich eine Stunde später meine Zustimmung erteilt.«

Um weiteren Ärger zu vermeiden, haben die beiden Verbände sich nun auf eine neue Verfahrensweise für die Prüfung chemischer Elemente geeinigt. Laut der erweiterten Vorschriften, die im Mai 2018 veröffentlicht wurden, sollen die Präsidenten sowohl der IUPAC als auch der IUPAP die Gelegenheit haben, die Schlüsse des JWP zu überprüfen bevor eine öffentliche Erklärung abgegeben wird. Und um die Quali-

»Ich kriege heute noch Albträume, wenn ich daran denke, wie fahrlässig wir waren«

[Cecilia Jarlskog]

tät des Prüfverfahrens selbst zu gewährleisten, soll das JWP in Zukunft einen (wirklich) unabhängigen Peer-Review-Prozess beauftragen.

Kritiker wie Cecilia Jarlskog beruhigt das wenig. »Ich glaube nicht, dass sich durch die neuen Regeln etwas ändern wird«, spekuliert sie. Im Rückblick wünsche sie sich, sie und der Rest der Physikergemeinde hätten besser aufgepasst und den Prozess der Prüfung besser überwacht, insbesondere die Auswahl der Gutachter durch das JWP. »Ich kriege heute noch Albträume, wenn ich daran denke, wie fahrlässig wir waren«, sagt sie. ↩

Der Text ist im Original unter dem Titel »The battle behind the periodic table's latest additions« am 13. Juni 2018 in »Nature« erschienen: Nature 558, 175-176 (2018)doi: 10.1038/d41586-018-05371-y
(Spektrum – Die Woche, 27/2018)

Spektrum der Wissenschaft KOMPAKT

THERMODYNAMIK

Von Ordnung **und** Unordnung

Zweiter Hauptsatz | Wie aus Chaos Ordnung entsteht
Stabile Verbindungen | Heute kochen wir Elemente-Suppe!
Zeitkristalle | Bizarre Materie in endloser Schwingung

HIER DOWNLOADEN

FÜR NUR
€ 4,99

CHEMIE

Ist das Periodensystem falsch herum?

von Lars Fischer

Fachleute schlagen vor, das Periodensystem mit den leichten Elementen unten anzuordnen. Ist das sinnvoll?

ISTOCK / TEEKID



Spektrum
der Wissenschaft
DIE WOCHE

NR

12

21.03.
2019

- > Mysteriöser Stern meldet sich nach zehn Jahren wieder
- > Schlange mit Reißzahn entdeckt
- > Haben auch Menschen einen Magnetsinn?

TITELTHEMA: MEERWASSERENTSALZUNG

Trinkwasser mit schmutzigem Geheimnis

Wenn man Salzwasser in Trinkwasser verwandelt, bleiben Milliarden Tonnen konzentrierte Lauge zurück – sie enthält neben Salz auch problematische Chemikalien. Was tun?



NATURKATASTROPHEN

Trifft der nächste Tsunami China?



KÜNSTLICHE INTELLIGENZ

Wie viel verrät ein Gesicht wirklich?



MATHE-»NOBELPREIS«

Abelpreis für Karen Uhlenbeck

Mit ausgewählten Inhalten aus **nature**

Im Abo nur
0,92 €
pro Ausgabe

Jetzt bestellen!
**Das wöchentliche
Wissenschaftsmagazin**
als Kombipaket im Abo:
Als App und PDF

HIER ABONNIEREN!

Jeden Donnerstag neu! Mit News, Hintergründen, Kommentaren und Bildern aus der Forschung sowie exklusiven Artikeln aus »nature« in deutscher Übersetzung. Im Abonnement nur 0,92 € pro Ausgabe (monatlich kündbar), für Schüler, Studenten und Abonnenten unserer Magazine sogar nur 0,69 €.