

Astronomie mit Radioaktivität

Zerfallende Isotope geben Einblicke in die Entstehung der Elemente

Roland Diehl und Wolfgang Hillebrandt

Atomkerne kosmischer Materie entstehen in Kernfusions-Reaktionen an besonderen Orten im Universum. Dieser Prozess, die Nukleosynthese, ist Teil der Entwicklung des Universums, insbesondere prägt die Produktion frischer Elemente die Entwicklung des interstellaren Materie und der Galaxien. Ständig findet Kernfusion statt – vergleichsweise stetig im Innern der Sterne und spektakulär in Sternexplosionen, den Novae und Supernovae.

Arthur Eddington hatte bereits um 1920 erkannt, dass nukleare Energie die gravitative Anziehung in Sternen kompensieren muss, also Kernreaktionen den Energiehaushalt und den Aufbau der Sterne entscheidend prägen. In dieser Zeit war klar geworden, dass die chemischen Elemente nicht im Urknall oder zu frühen Zeiten des Universums gebildet wurden, sondern Nukleosynthese als stetiger Prozess die Evolution der Objekte im Universum mitgestaltet. Carl Friedrich von Weizsäcker und Hans Bethe erklärten die Energiebilanz der Sonne mit den Kernreaktionen der leichten Atomkerne von Wasserstoff bis etwa zu Massenzahlen von 18 (Kohlenstoff, Fluor).

Diese Einsicht sollte nicht darüber hinwegtäuschen, dass unsere Kenntnisse über die physikalischen Prozesse, die für die Erzeugung der schwereren Elemente ($A > 20$) verantwortlich sind, vergleichsweise grob und ungenau sind. Das liegt hauptsächlich an der komplexer werdenden Kernphysik und insbesondere auch daran, dass die Reaktionspfade mehr und mehr instabile Isotope einbeziehen (siehe Infokasten „Elementsynthese“). Zudem läuft in der Regel die Nukleosynthese für die schweren Elemente ähnlich schnell ab wie der Energie- und der Materialtransport, wodurch nur schlecht verstandene hydrodynamische Prozesse wie die Konvektion den Kernfusionspfad mitgestalten.

Die Isotopenhäufigkeiten der chemischen Elemente am Ende eines Nukleosynthese-Ereignisses hängen sehr viel empfindlicher von den physikalischen Bedingungen ab als die Elementhäufigkeiten selbst. Messungen von Isotopenzusammensetzungen geben daher wichtige Aufschlüsse über die Umgebung, in der die Nukleosynthese stattfindet. Sie werden allerdings erschwert durch die hohe Dichte in kosmischen Brennzonen, die dazu führt, dass die primäre Information der Röntgen- und Gamma-Photonen durch Streuprozesse zerstört wird. Messwerte aus strahlungsangereg-

ten Sternhüllen und Gaswolken müssen daher mithilfe von Modellen interpretiert werden. Dabei sind ungenau bekannte und sich z. T. rasch verändernde physikalische Randbedingungen wie Dichte, Anregungstemperatur, Ionisationsgrad zu berücksichtigen. Zudem sind die Isotopen-Effekte in der charakteristischen Linienstrahlung oft unmessbar gering, sodass nur Messwerte für unterschiedliche chemische Elemente, in unbekanntem Isotopengemisch, vorliegen.

Hier bringen radioaktive Isotope entscheidende Vorzüge ins Feld: Haben sie hinreichend lange Zerfallszeiten, so entsteht die charakteristische Gamma-Strahlung erst, wenn die Nukleosynthese-Asche durch Sternwinde oder die Explosion des Sterns im dünnen interstellaren Medium verteilt ist. Außerdem werden in kondensierter Nukleosynthese-Asche durch radioaktiven Zerfall ungewöhnliche charakteristische Isotopen-Zusammensetzungen konserviert. Diese beiden Effekte haben in Verbindung mit gereifter Technologie im letzten Jahrzehnt erstmals zu Messungen geführt, die für die Astrophysik brauchbar sind. Dazu gehören sowohl astronomische Messungen von charakteristischen Gamma-Linien als auch massenspektrometrische Untersuchungen im Labor von mikroskopischen Meteoriteneinschlüssen interstellaren Staubs. In diesem Artikel stellen wir diese beiden auf den ersten Blick sehr unterschiedlichen Disziplinen der „Astronomie neugeborener Atomkerne“ im Kontext kosmischer Elemententstehung vor.

Die Entstehung neuer Elemente

Die Historie und das Konzept

Die Grundlagen unserer heutigen Vorstellungen von der Synthese der chemischen Elemente wurden in den 40er-Jahren gelegt, vor allem angeregt von Fred Hoyles systematischen Studien mit dem Ziel, sowohl die astronomischen als auch die kernphysikalischen Aspekte konsistent zu erklären. Das Ehepaar Margaret und

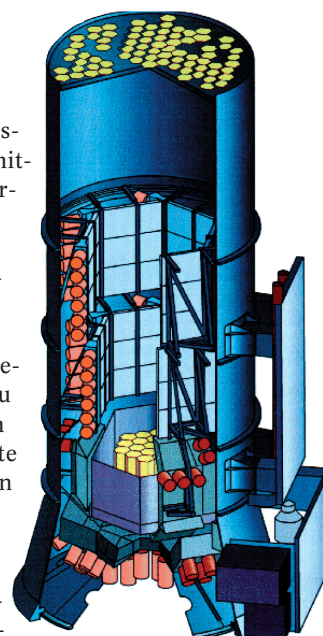


Abb. 1: Der Start des Weltraum-Observatoriums INTEGRAL der ESA ist für Oktober 2002 geplant. Ausgestattet mit einem hochauflösenden Gamma-Linien-Spektrometer wird es spezifische Messungen von radioaktiven Zerfällen im Weltraum ermöglichen.

Priv.-Doz.
Dr. Roland Diehl,
Max-Planck-Institut
für extraterrestrische Physik, Giesenbachstraße,
85748 Garching;
Prof. Dr. Wolfgang
Hillebrandt, Max-
Planck-Institut für
Astrophysik, Karl-
Schwarzschildstr. 1,
85741 Garching

Geoffrey Burbidge, William Fowler und Fred Hoyle („B²FH“, 1957) sowie Al Cameron (1957) formulierten schließlich eine gesamtheitliche Theorie der Elemententstehung, in der sehr unterschiedliche Prozesse zur Erklärung der Entstehungsgeschichte der komplexen Muster beobachteter Element- und Isotopenhäufigkeiten zusammenwirken. Geleitet von den kernphysikalischen Kenntnissen ihrer Zeit und den sehr großen Unterschieden in den Häufigkeiten postulierten sie, dass in der so genannten „primordialen Nukleosynthese“ nur die leichtesten Elemente Wasserstoff und Helium im Urknall entstanden sein sollten, zusammen mit Teilen der Elemente Li, Be und B. Für die anderen Elemente und ihre Isotope postulierten sie als Entstehungsort das Innere von Sternen („stellare Nukleosynthese“). Lediglich einige Isotope leichter Elemente sollten durch Spallationsreaktionen interstellaren Kohlen- und Sauerstoffs mit hochenergetischen Protonen der kosmischen Strahlung entstanden sein. Diese Theorie entsprang in vielen Aspekten eher der Intuition als der strengen Herleitung und den experimentellen Fakten. Dennoch sind ihre Grundzüge bis heute im Wesentlichen bestätigt und ein nützlicher Leitfaden zum Verständnis der kosmischen Elementhäufigkeiten.

Nukleosynthese: Der Stand der Theorie

Mittlerweile sind diese Konzepte in detaillierte Nukleosynthese-Modelle überführt worden. Primordiale Nukleosynthese erklärt im Rahmen des Standard-Urknall-Modells der Kosmologie die gemessenen Häufig-

keiten von normalem Wasserstoff, Deuterium, den beiden stabilen Helium-Isotopen und von ⁷Li. Die Übereinstimmung von theoretischen Vorhersagen mit den beobachteten Häufigkeiten wird sogar als eine wichtige Stütze des Urknall-Modells angesehen. Wichtigster Parameter der Theorie ist die (heutige) Dichte der Baryonen im Universum, etwa 4 % der kritischen Dichte, ab der das Universum schließlich wieder kollabieren würde. Die Häufigkeiten der Elemente Li (ohne ⁷Li), Be und B werden gut durch Modelle der kosmischen Strahlung und deren Spallationsreaktionen in der interstellaren Materie erklärt.

Häufigkeitsvorhersagen für diejenigen Elemente, die bei der stellaren Nukleosynthese entstehen, sind dagegen mit größeren Unsicherheiten behaftet. Massereiche Sterne produzieren während ihrer ruhigen (hydrostatischen) Entwicklung die meisten Elemente mit gerader Protonenzahl bis etwa zum Eisen. Während des hydrostatischen Helium-Brennens und zu einem größeren Teil im Helium-Brennen pulsierender Sterne mittlerer Masse liefern Neutronenanlagerungen und β -Zerfälle die s-Prozess-Kerne (siehe Infokasten „Elementsynthese“). Andere Elemente mit ungerader Protonenzahl sowie seltenere Isotope bilden sich während der Supernova-Explosionen massereicher Sterne, ebenso wie die Kerne, die dem r-Prozess zugeordnet werden. Eisen (⁵⁶Fe) wird darüber hinaus in großen Mengen in thermonuklearen Supernovae („Typ Ia“) produziert, etwas ⁷Li, N und andere leichtere Elemente in Novae (siehe Infokasten „Sternklassen“). Sternentwicklungsmodelle werden meist daran gemessen, wie gut sie die „Standard-Häufigkeiten“, das sind näherungsweise die Element- und Isotopenhäufigkeiten der Sonne, reproduzieren, was in der Regel auch recht gut gelingt.

Trotz dieser Erfolge der Theorie gibt es noch viele offene Fragen. Bereits in den noch relativ gut verstandenen ruhigen Phasen der Sternentwicklung beeinflussen Turbulenz und Konvektion die stellare Nukleosynthese und das Mischen der neu erzeugten Elemente. Beide Prozesse lassen sich derzeit nur über „freie“ Parameter berücksichtigen, was physikalisch unbefriedigend ist und zudem die Vorhersagekraft der Modelle stark reduziert. Hinzu kommen Unsicherheiten in einigen wichtigen Kernreaktionsraten. Diese möglichen Quellen systematischer Fehler wirken mehrfach in Modellen: Sie bestimmen die Isotopenzusammensetzung am Ende der hydrostatischen Sternentwicklung und beeinflussen die explosive Nukleosynthese, wenn diese vielfältige Kernreaktionskanäle eröffnet.

Problematisch ist ferner, dass massereiche Sterne „im Computer“ immer noch nicht explodieren. Das kann darauf hindeuten, dass ein wichtiger Teil der relevanten Physik noch nicht verstanden ist. Auch hier wird deshalb das Unwissen parametrisiert: Man wählt eine geeignete Massenzone für den Rand des entstehenden Neutronensterns und gibt der Sternhülle genug Energie (oder Impuls) für eine den Erwartungen nahekommende Explosion. Auf diesem Hintergrund werden dann die Kernreaktionen berechnet. Doch selbst in diesen sehr vereinfachten Explosionsmodellen gibt es Schwierigkeiten. So gelang es bisher noch nicht, eine Zone einer Supernova zu identifizieren, in der die richtigen Bedingungen für den r-Prozess herrschen.

Selbst wenn wir die Nukleosynthese in heutigen Sternen gut verstanden hätten, wüssten wir immer noch nicht, wie die Entwicklung der Element- und Isotopenzusammensetzung unserer Milchstraße seit der

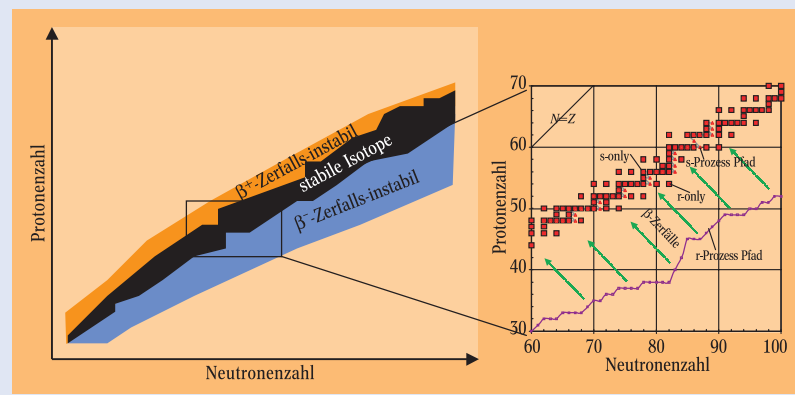
Elementsynthese

Die Elemente von Kohlenstoff bis zu den Actiniden werden unter charakteristischen und unterscheidbaren Nukleosynthese-Bedingungen synthetisiert. Das **Wasserstoff-Brennen** findet in der „Hauptreihen-Phase“ der Sternentwicklung statt, die bis zu Milliarden von Jahren andauert. Hauptprodukte sind ⁴He, ⁷Li, ¹³C, ^{14/15}N und ¹⁵O.

Helium-Brennen kennzeichnet die Riesen-Phase der Sternentwicklung. Sie dauert nur bis zu einem Zehntel so lange wie die Wasserstoffbrennphase. Endprodukte sind hauptsächlich ¹²C, ^{16/18}O und ^{21/22}Ne, aber auch so genannte **s-Prozess**-Elemente (s für *slow*). Letztere sind das Resultat von Neutronen-Einfangsreaktionen, ebenso wie die meisten stabilen Isotope schwerer Elemente jenseits der Eisengruppe bis hin zu Wismut und Blei, die durch sukzessive Neutronenanlagerungen aus den in großer Menge vorhan-

denen Elementen der Eisengruppe gebildet werden. Im **r-Prozess** (r wie *rapid*) ist bei der Anlagerung von Neutronen die β -Zerfallszeit des Produktkerns lang im Vergleich zu den Neutronen-Einfangszeiten, sodass sehr neutronenreiche Isotope gebildet werden, die dann allmählich zum Stabilitätstal hin β -zerfallen (vgl. Diagramm unten). Charakteristische Elemente mit $A > 75$ werden so erzeugt, wobei manche Isotope eindeutig dem r- bzw. s-Prozess zugeordnet werden können (Beispiele markiert als „r-only“ bzw. „s-only“). Wahrscheinlich findet der r-Prozess in Supernova-Explosionen statt.

Kernreaktionen bilden überwiegend instabile Isotope, deren Zerfall zu stabilen Isotopen oft über angeregte Kernniveaus verläuft. Die Anregungsenergie wird als Gamma-Linien-Emission sichtbar.



Entstehung der ersten Sterne aus primordialer Materie verlaufen ist. So ergeben Messungen von sehr metallarmen Sternen Elementhäufigkeiten, die sich sehr von denen in der Sonne unterscheiden (mit Ausnahme der r-Prozess-Kerne, deren *relative* Häufigkeiten dann doch wiederum mit denen in der Sonne identisch sind). Für das Verständnis der Nukleosynthese-Bedingungen scheint es also wichtig, Beobachtungen zu reproduzieren, bei denen diese komplexe „chemische Entwicklung“ möglicherweise eine untergeordnete Rolle spielt. Dies trifft auf einzelne Objekte oder für kosmisch kurze bzw. klar abgegrenzte Entwicklungsperioden zu.

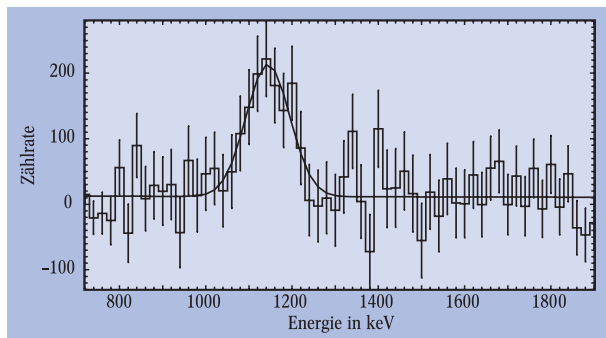


Abb. 2: Erstmals wurde radioaktives ^{44}Ti anhand seiner Gamma-Linie bei 1157 keV im Supernova-Überrest Cas A entdeckt. Das Spektrum wurde mit dem COMPTEL-Instrument auf dem Gamma-Observatorium COMPTON aufgenommen.

Radioaktive Diagnostik

Das Spektrum des Lichts aus Atmosphären normaler Sterne zeigt über charakteristische Linien die Zusammensetzung der Materie, aus der dieser Stern ursprünglich gebildet wurde. Alte Sterne weitab von der galaktischen Gas-Ebene sollten in der Anfangsphase galaktischer Nukleosynthese entstanden sein, also kann man hier einzelne frühe stellare Nukleosynthese-Ereignisse und insbesondere den r-Prozess studieren. Vor kurzem wurden in einem solchen Halo-Stern Spektrallinien von Thorium und Uran entdeckt; diese Elemente mit ausschließlich radioaktiven Isotopen erlauben eine unabhängige nukleare Datierung des Zeitpunkts erster galaktischer Nukleosynthese auf etwa 13 Milliarden Jahre. Ein weiteres Element mit ausschließlich radioaktiven Isotopen, Technetium, wurde bereits 1952 in einem pulsierenden Stern nachgewiesen; diese Messung gilt als erster direkter Nachweis von stellarer Nukleosynthese „in flagranti“, sie zeigt einerseits, dass in diesen Sternen der s-Prozess stattfindet, andererseits, dass die Hülle dieser pulsierenden Sterne mit dem Sterninnern durch Mischprozesse in Austausch steht.

Sterne, die vielfach massiver als unsere Sonne sind, stoßen aufgrund des hohen Strahlungsdrucks ihre äußere Hülle über einen Sternwind ab. Hier kommen wir den Nukleosynthese-Orten näher, denn die inneren Regionen mit konvektiv beigemischten Nukleosynthese-Produkten werden der Messung zugänglich. Mischungsprozesse in diesen teilweise instabilen Entwicklungsphasen eines Sterns sind im Einzelnen aber sehr komplex und selbst durch aufwändige magneto-hydrodynamische Strahlungstransport-Modelle noch nicht verstanden. In den Elementzusammensetzungen der Atmosphäre lassen sich daher die Effekte von Nukleosynthese und Mischvorgängen schwer trennen.

Dennoch bleiben Spektrallinien des Lichts unser Haupt-Informationsträger über Nukleosynthese: Röntgen-Spektroskopie ist ein vielversprechender Ansatz, um Elementhäufigkeiten in der Korona von Sternatmosphären, vor allem aber in heißem interstellarem Gas zu bestimmen, wie wir es in Supernova-Überresten und Sternentstehungsgebieten vorfinden. Elektronische Übergänge bei hochionisierten Atomen liegen im keV-Bereich, der instrumentell in den letzten beiden Jahrzehnten für die Astrophysik erschlossen und durch im vergangenen Jahr in Betrieb genommene Instrumente der dritten Generation hinreichend präzisiert wurde (aktuelle Röntgenobservatorien im Weltraum sind „Chandra“ und „Newton“). Die Interpretation der mit hoher räumlicher Auflösung durchgeführten spektroskopischen Messungen von Supernova-Überresten und Sternentstehungsgebieten setzt allerdings wiederum die Kenntnis des Anregungsmodells voraus, d. h. die thermische und Ionisations-Struktur der Region. Starke Klumpung und Nicht-Gleichgewichts-Situationen erschweren dies, kernphysikalische Interpretationen bleiben indirekt und unscharf.

Linienanregung im diffusen interstellaren Medium ist komplexer, Gas und Staub weisen deutlich unterschiedliche Temperaturen auf, die Molekültemperaturen der Gasphase in relativ dünnem kaltem Gas sind schlecht definiert. Dennoch gelingt es im Radiobereich, molekulare Linienübergänge zwischen Rotations- und Schwingungszuständen wegen ihrer großen Isotopenaufspaltung zu Isotopenhäufigkeits-Messungen zu nutzen. Die Interpretation der so aus Molekül-Linien bestimmten Isotopenhäufigkeiten im Hinblick auf die Nukleosynthese setzt allerdings eine realistische Modellierung der komplexen Chemie auf den Sternoberflächen voraus.

Gamma-Astronomie radioaktiver Substanzen

Der radioaktive Zerfall eines Isotops ist überwiegend unbeeinflusst von seiner Umgebung. Deshalb weisen die Gamma-Linien unmittelbar auf die Existenz

Sternklassen

- **Hauptreihen-Sterne:** Sterne, deren Energie aus zentralem Wasserstoffbrennen geliefert wird.
- **Riesensterne:** Sterne, in denen der zentrale Wasserstoffvorrat aufgebraucht ist und die Energie aus schneller ablaufenden Kernfusionsketten wie dem Helium-Brennen bezogen wird. Instabile Schichtungen führen zu pulsierendem Verhalten.
- **Massereiche Sterne:** Sterne mit mehr als 8- bis 10-facher Masse der Sonne, in denen die Zentraltemperatur damit hinreichend hoch werden kann, um mindestens Kohlenstoff-Fusionsreaktionen zu zünden.
- **Weißer Zwergsterne:** Stern-Überreste, die nicht massiv genug sind, um Fusionsreaktionen schwererer Elemente zu zünden. Entartete Materie liefert den Druck, der den Gravitationskollaps verhindert.
- **Neutronensterne:** Stern-Überreste, in denen die Atome durch Schwerkraft soweit komprimiert wurden, dass Materie fast ausschließlich aus Neutronen besteht. Sie entsprechen einem einzi-

gen Atomkern mit einem Durchmesser von ca. 20 km.

- **Novae:** Systeme aus einem weißen Zwergstern und einem normalen Stern. Der Sternwind des normalen Sterns wurde auf dem Zwergstern akkumuliert, sodass schließlich eine Wasserstoff-Explosion auf der Hülle des Zwergsterns zündet.

- **Supernovae:** Sternexplosionen wesentlich heller als Novae. Wir unterscheiden den Gravitationskollaps am Ende der verschiedenen Kernbrennphasen (Kernkollaps-Supernova, core collapse, cc-SN), in dem das Fehlen einer weiteren energieliefernden Kernfusionsreaktion zum Kollaps bis zum Neutronenstern oder Schwarzen Loch führt. Daneben gibt es thermonukleare Supernovae (Typ Ia), bei denen ein weißer Zwergstern durch Materiezustrom so massiv wird, dass zentrales Kohlenstoffbrennen zündet und der Zwergstern explodiert (d. h. kein verbleibender kompakter Stern wie bei cc-SN).

dieser radioaktiven Isotope hin. Gamma-Strahlung durchdringt, anders als langwelligere Strahlung von Röntgen bis hin zum Infrarot, auch die dichteren Gas- und Staub-Schichten entlang der Ebene der Milchstraße, liefert also Messungen frei von den sonst oft erheblichen Absorptions-Korrekturen. Je nach Halbwertszeit ist damit ein direkter bis zeitlich verzögerter Nachweis von Elemententstehungsprozessen über die Messung charakteristischer Gamma-Linien möglich. Die im Jahr 1982 gelungene Beobachtung von diffuser Gamma-Strahlung des ^{26}Al -Isotops, das eine Zerfallszeit von 1 Million Jahre hat, wird als erster solch direkter Beweis für Nukleosynthese gesehen; allerdings blieben die dahinterstehenden Quellen Objekt von Spekulationen. Eindeutig war das Signal zerfallender ^{56}Ni - und ^{57}Co -Isotope von der Supernova SN1987A in unserer Nachbargalaxie LMC, der Großen Magellanschen Wolke in einer Entfernung von ca. 160 000 Lichtjahren; von mehreren Instrumenten wurden die unterschiedlichen Gamma-Linien registriert. Mit ihren kurzen Zerfallszeiten (siehe Tabelle 1) können diese Isotope nur während des Gravitationskollapses oder der folgenden Explosion erzeugt worden sein. Zur Kernfusion derartig großer Mengen radioaktiven Nickels sind nämlich hohe Dichten (ca. $10^{10}\text{--}10^{13}\text{ kg m}^{-3}$) und hohe Temperaturen ($3\text{--}5\times 10^9\text{ K}$) erforderlich, Bedingungen, die beim Kollaps des Sterninneren unter dem Druck der Gravitation entstehen. Hierbei wird nach unseren Vorstellungen die zunächst überwiegend aus schweren Elementen von Silizium bis Eisen bestehende Materie so stark aufgeheizt, dass sie sich in freie Nukleonen und α -Kerne zersetzt. Bei der Expansion und Abkühlung der Supernova-Materie finden diese sich dann zu neuen Atomkernen zusammen. Wegen des hohen Anteils von α -Kernen erwartet man unter diesen Bedingungen die Synthese von Isotopen, die aus Vielfach- α -Kernen bestehen; ^{56}Ni ist dabei wegen seines Maximums an Bindungsenergie für Nukleonen ein bevorzugtes Endprodukt.

Aber auch radioaktives Titan (^{44}Ti) wird unter diesen Bedingungen synthetisiert. Dieses Isotop zerfällt innerhalb von 90 Jahren über Scandium als Zwischenprodukt zu Calcium, begleitet von Gamma-Linien der Energien 68, 78, und 1157 keV. Die Messung dieser Gamma-Linien von der Supernova SN1987A ist eine der großen Herausforderungen an die nächste Generation von Gamma-Teleskopen. Der kosmische Zerfall von ^{44}Ti wurde erstmalig im Jahr 1994 nachgewiesen,

und zwar in dem ca. 300 Jahre alten Supernova-Überrest Cas A in unserer Milchstraße (Abb. 2). Das ^{44}Ti -Nachleuchten ist wegen der vergangenen 300 Jahre bereits auf 1 % seines Anfangswertes abgeklungen, dennoch war das Signal stark genug, um aus dieser Entfernung noch erkannt zu werden. Allerdings überrascht es, dass wir keine anderen, vor allem jüngeren Supernova-Überreste in ^{44}Ti strahlen sehen: In der Milchstraße sollten im Mittel etwa zwei Supernovae durch Gravitationskollaps („cc-SN“; siehe Infokasten „Sternklassen“) pro Jahrhundert entstehen, sodass einige von ihnen bereits mit derzeitigen Instrumenten sichtbar sein sollten, vor allem aus dem zentralen Bereich der Milchstraße. Unsere bisherige Suche nach ^{44}Ti -Quellen bestätigt das jedoch nicht, sodass wir heute annehmen, dass ^{44}Ti -Ausstoß bei einer cc-Supernova von anderen Größen wie etwa der Masse des Sterns, seinem Drehimpuls oder dem noch unverstandenen Explosionsmechanismus empfindlich abhängt. Es könnte sein, dass dieses weit innen in der Explosion erzeugte ^{44}Ti überwiegend nach der Explosion zurückfällt auf den kompakten Rest-Stern. Damit wäre dann keine Gamma-Emission zu messen, da ein verbleibendes schwarzes Loch ebenso wie eine Neutronenstern-Atmosphäre diese neuen Atomkerne wieder zerstört.

Ein anderer Supernova-Explosionstyp („Typ Ia“) geht nach unseren derzeitigen Vorstellungen von kompakten weißen Zwergsternen aus, die überwiegend aus Kohlenstoff und Sauerstoff bestehen. Hier ist die von einem Begleitstern über seinen Sternwind übertragene Materie auf dem weißen Zwerg die Ursache für eine explosive Kettenreaktion, im Verlauf derer der weiße Zwerg durch eine thermonukleare Explosion vollkommen zerrissen wird. Da diese kompakten Sterne mit ihrer hohen Dichte und dem entarteten Elektronengas lokal hervorragende Bedingungen für Kernfusionsreaktionen bieten, bedarf es nur einer Zünd-Explosion auf der Oberfläche oder des Überschreitens einer kritischen Massengrenze und damit Zentraltemperatur; dann beginnt Kohlenstoff-Fusion im Inneren des Zwergs, die sich innerhalb von Sekunden ausbreitet. Wegen der hohen Dichte von rund 10^{12} kg m^{-3} entstehen sehr hohe Temperaturen von einigen 10^9 K , und das Kernbrennen erreicht einen Gleichgewichtszustand, in dem die Nukleonen ihren energetisch günstigsten Zustand einnehmen. Dabei wird 0,3–1 Sonnenmasse an radioaktivem ^{56}Ni erzeugt, dem Isotop mit der höchsten Bindungsenergie pro Nukleon. Die gewaltige Energie, die beim Zerfall

über Kobalt zu Eisen entsteht (Zerfallszeiten 8,8 bzw. 111 Tage), heizt die gesamte Supernova-Hülle stark und nachhaltig auf und bewirkt so wochenlanges helles Leuchten.

Die dichte Hülle verhindert in den ersten Tagen allerdings auch, dass selbst die durchdringende Gamma-Strahlung des Zerfalls von ^{56}Ni zu ^{56}Co ohne Streuprozesse nach außen dringt, jedenfalls wenn die Kernfusion innen beginnt. Wenn alternativ die aufgesammelte Begleitstern-Materie an der Zwerg-Oberfläche die explosive Nukleosynthese zündet, dann sollte ein Teil des erzeugten Nickels weiter an der Oberfläche sichtbar sein; die

Tabelle 1: Radioaktive Zerfallsketten, die zum Studium der Element-Entstehungsgeschichte astronomisch nutzbar sind. Bereits gemessene Gammalinien sind blau dargestellt. In der letzten Zeile wurde auch das Positron aufgenommen, weil die Positronen-Annihilationstrahlung der β -zerfallsaktiven kurzlebigen radioaktiven Isotope in der Astronomie eine große Bedeutung hat.

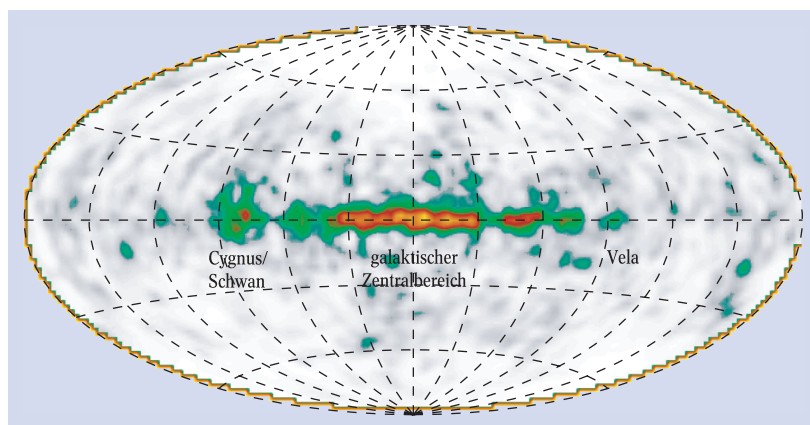
Isotop	Zerfallszeit	Zerfallskette	γ -Linienenergie (keV)	Ursprung
^7Be	77 d	$^7\text{Be} \rightarrow ^7\text{Li}^*$	478	Novae
^{56}Ni	111 d	$^{56}\text{Ni} \rightarrow ^{56}\text{Co}^* \rightarrow ^{56}\text{Fe}^* + e^+$	158, 812, 847, 1238	Supernovae
^{57}Ni	390 d	$^{57}\text{Co} \rightarrow ^{57}\text{Fe}^*$	122	Supernovae
^{22}Na	3,8 y	$^{22}\text{Na} \rightarrow ^{22}\text{Ne}^* + e^+$	1275	Novae; WR-Sterne
^{44}Ti	89 y	$^{44}\text{Ti} \rightarrow ^{44}\text{Sc}^* \rightarrow ^{44}\text{Ca}^* + e^+$	1157 , 78, 68	Supernovae
^{26}Al	$1,04 \times 10^6\text{ y}$	$^{26}\text{Al} \rightarrow ^{26}\text{Mg}^* + e^+$	1809	Supernovae, WR-Sterne
^{60}Fe	$2,0 \times 10^6\text{ y}$	$^{60}\text{Fe} \rightarrow ^{60}\text{Co}^*$	1173, 1332	Supernovae
e^+	 10^5 y	$e^+ + e^- \rightarrow \text{Ps} \rightarrow \gamma\gamma..$	511, < 511	Alle Positronen-Zerfälle

charakteristischen Gamma-Linien (bei 158 und 812 keV) wären ein klarer Beweis für dieses Szenario. Eine weitere Diagnostik von der ^{56}Ni -Zerfallskette ist das Zwischenprodukt ^{56}Co . Es zerfällt nämlich mit einer Zeitkonstante von 111 Tagen zum Endprodukt ^{56}Fe unter Aussendung charakteristischer Gamma-Linien bei 847 und 1238 keV. Da nach dieser Zeit die Supernova in jedem Fall für Gamma-Strahlung durchsichtig ist, kann man aus der Gamma-Strahlen-Intensität unmittelbar die Gesamtmenge an erzeugtem ^{56}Ni bestimmen. Verschiedene diskutierte Explosions-Verläufe unterscheiden sich um mehr als eine Größenordnung in der Menge des erzeugten ^{56}Ni , sodass hier eine für unser Supernova-Verständnis entscheidende Messgröße vorliegt. Bisher stützen Studien sich auf die Simulation der sekundären, aber optisch beobachtbaren Spektren und Helligkeitsverläufe und variieren den Gesamtgehalt an ^{56}Ni , bis die Simulation die Messung wiedergibt. Da in solche Simulationen diverse Annahmen über die Zusammensetzung der Materie und die Explosionsdynamik eingehen, sind die systematischen Unsicherheiten der so bestimmten Nickelmengen beträchtlich. Nun treten in großen Spiralgalaxien diese thermodynamischen Supernovae vergleichsweise selten auf, etwa im Verhältnis 1:4 seltener als cc-Supernovae. Mit der begrenzten Empfindlichkeit der derzeitigen Gamma-Teleskope (ca. 10^{-5} Gamma-Photonen pro cm^2s) gab es bisher nur zwei Messgelegenheiten (SN1991T und SN1998bu). Daraus jeweils abgeleitete Nickelmengen sind widersprüchlich und liegen einen Faktor von ca. 2 abseits des Erwarteten – die Resultate könnten statistisch verfälscht sein. Die Hoffnungen liegen auf der Nachfolgeneration der Gamma-Teleskope; bei entsprechender spektraler Auflösung wird die Linienform der gemessenen Gamma-Strahlung die Kinematik der Explosion direkt abbilden und unser Verständnis des Explosionsprozesses entscheidend weiterbringen.

Thermonukleare Explosionen auf weißen Zwergsternen sind nach unserem Verständnis ebenfalls verantwortlich für das Auftreten so genannter „klassischer Novae“; das von einem Begleitstern übertragene Material zündet in diesem Fall eine langsamer verlaufende Wasserstoff-Explosion, die oberen Schichten des weißen Zwergsterns erfahren Kernbrennen und synthetisieren leichtere Elemente von Kohlenstoff bis vielleicht Schwefel. Der langsamere Verlauf der Nova erlaubt der Zwergatmosphäre zu expandieren und damit die Verbrennung letztlich auszulöschen. Bisherige Versuche, diese Art der Explosion physikalisch zu modellieren, sind teilweise erfolgreich und konsistent mit dieser Beschreibung, sagen allerdings die Menge der durch die Nova abgestoßenen Hülle um einen Faktor 10 zu gering voraus. Konvektive Mischung von akkretiertem Material mit Atmosphärenmaterial des weißen Zwergsterns beeinflusst ebenso wie Temperaturverlauf und Dichte wesentlich die nukleare Brennzone; umgekehrt legen die erzeugten Isotope Zeugnis ab von diesen physikalischen Größen. Spektroskopische Messungen im Optischen, Infraroten und Ultraviolett erschließen uns zwar die chemischen Elemente in den Hüllen naher Novae, aber weder Isotopentrennung noch quantitative Messungen sind zur Klärung der inneren Prozesse möglich. Daher ruhen auch hier große Hoffnungen auf der Beobachtung von Gamma-Linien radioaktiver Isotope, insbesondere von Positronen-Annihilationsstrahlung der β -zerfallsaktiven kurzlebigen radioaktiven Isotope, vom ^{22}Na -Isotop (Zerfallszeit 3,8 Jahre)

und ^7Be -Isotop (Zerfallszeit 78 Tage). Für die nächste Generation von Instrumenten müsste die Nova näher als 5000 Lichtjahre sein; Novae treten in der Milchstraße mit einer Rate von ca. 40 pro Jahr auf.

Das relativ langlebige ^{26}Al -Isotop hat durch die Messungen des Gamma-Strahlen-Observatoriums Compton zu einer Übersichtskarte von Nukleosynthese-Orten in der gesamten Milchstraße beigetragen (Abb. 3). Innerhalb der langen Zerfallszeit von ^{26}Al (1 Million Jahre) tragen viele Supernova-Explosionen, die Winde vieler massereicher Sterne sowie Novae und andere Quellen zum Gesamtbild bei. Andererseits ist diese Zeitspanne kurz im Vergleich zu den Zeitskalen galaktischer Prozesse (ein Umlauf der Sonne um das Zentrum der Galaxie dauert hundertfach länger, Gruppen massereicher Sterne bilden sich und lösen sich auf in mehr als zehnfacher Zeit). Damit liefert die Abbildung von Nukleosynthese im Licht der ^{26}Al -Gamma-



Strahlung bei 1809 keV eine Momentaufnahme der Galaxis, integrierend über alle Nukleosynthesequellen. Die Interpretation der Himmelskarte im ^{26}Al -Licht besagt, dass massereiche Sterne den dominanten Beitrag liefern, Novae und massearme Sterne tragen nur wenig bei. Damit liefert die ^{26}Al -Himmelskarte auch die Verteilung der massereichen Sterne innerhalb der gesamten Galaxis, frei von verdeckenden Effekten etwaiger Dunkelwolken, die viele Sternkataloge beeinträchtigen. Aus dieser Verteilung wird klar, dass bestimmte Regionen in der Milchstraße in jüngster Vergangenheit eine höhere Sternbildungsrate hatten, etwa im Sternbild des Schwans (Cygnus). Aus dem Vergleich der ^{26}Al -Leuchtkraft mit Sternzählungen hat man so Hinweise auf verdeckte Sternpopulationen erhalten. Derzeit untersuchen wir mit Modellrechnungen, ob wir die Entwicklung massereicher Sterne in Gruppen und ihre Auswirkungen auf das sie umgebende Gas im Zusammenhang verstehen. Damit können wir die detaillierten Messungen an Sternatmosphären mit den Messungen von heißem und kaltem Gas in interstellaren Regionen und mit dem von Sternen zurückgeführten Gasanteil in Verbindung bringen, also unser Verständnis des gesamten Materiezyklus über die Sternentwicklung hinaus einem lokalisierten Test unterwerfen, unter Ausnutzung von astronomischen Messungen vom Radio- bis in den Gamma-Strahlen-Bereich.

Labor-Astronomie mit Radioaktivität

Victor Goldschmidt hat bereits 1937 Pionierarbeiten im Labor zu Elementhäufigkeiten in Materialproben durchgeführt. Seine Analyse der chemischen Zusammensetzung verschiedener Erdmaterialien legte die

Abb. 3: Bild derzeitiger Nukleosynthese-Aktivität in der Milchstraßengalaxie. Die Karte zeigt den Himmel in 1,809 MeV-Emission von radioaktivem ^{26}Al (in galaktischen Koordinaten, die Intensität wächst von grün über rot nach gelb).

Grundsteine zur Meteoritenforschung, er erarbeitete die systematischen Effekte, die das Ausfällen eines Elementes aus der Gasphase durch Bildung von Kristallen bestimmen. So bestimmt z. B. die unterschiedliche freierwerdende Energie beim Oxidieren, ob andere Elemente gegenüber Eisen bei der Oxidation bevorzugt werden und damit in steinartigen Meteoriten angereichert sind, oder ob Eisenoxid bevorzugt gebildet wird, und andere Elemente dann mit dem zurückbleibenden metallischen Eisen eisenartige Meteoriten bilden. Wenn bereits kondensierte Substanzen vorliegen, so hängt es von der Substitutionsmöglichkeit ab, ob ein Element in der Gasphase verbleibt oder statt eines chemisch ähnlichen Atoms in die Kristallstruktur der Substanz eingebaut wird.¹⁾ Aus Goldschmidts Überlegungen wurde eine für die kosmische Staubbildung wichtige Grundregel erkannt: Das relative Verhältnis von C und O hat weitestreichende Konsequenzen, denn bei C-Überschuss ist die Bildung kohlenstoffbasierter Moleküle wie CH_2 der Anfang großer Molekülketten bis hin zu den PAH-Substanzen (Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe) und der Bildung von kosmischem Staub, während bei O-Überschuss Oxidation vorherrscht und damit mineralische Substanzen wegen ihrer hohen Kondensationstemperaturen dominieren. Das Verständnis solcher systematischen Effekte bei der Bildung, beim Aufschmelzen, und letztlich bei der chemischen Analyse von Materialproben von Erdkruste und -mantel, Mondgestein und Meteoriten führte dazu, dass für die Bestimmung von kosmischen Elementhäufigkeiten Meteoritenanalysen gleichwertig neben Sternatmosphärenmessungen stehen, wie im Jahr 1956 von Hans Suess und Harold Urey in ihrer Arbeit „Elementhäufigkeiten“ wegweisend gezeigt wurde.

Seit einem Jahrzehnt ist nun die *präsolare* Nukleosynthese direkt zugänglich geworden: In Meteoriten konnten interstellare Staubkörner (Abb. 4) identifiziert werden als kleinste Einschlüsse mit Isotopenverhältnissen, die um Größenordnungen von denjenigen in der Sonne abweichen. Sie passen allerdings zu kosmischen Nukleosynthese-Ereignissen.

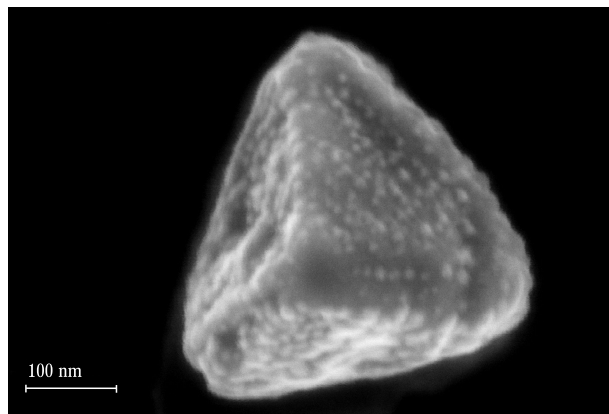


Abb. 4:
Interstellares
Staubkorn aus SiC

Der Weg kosmischer Materie in Meteoriten ist lang: Interstellarer Staub wird nach seiner Kondensation von Eisschichten unterschiedlicher Zusammensetzung überzogen. Da im interstellaren Gas Wasserstoff, Kohlenstoff, Sauerstoff und Silizium häufig vorkommen, sind die Vereisungsschichten meist aus Wassereis oder Verbindungen dieser Elemente aufgebaut. Sie bilden die Hauptmasse interstellarer Staubkörner, um das originäre Kondensat herum. Im Lauf seines Wegs durch das interstellare Medium werden Staubkörner durch

Kollisionen, durch Eintreten in heiße Gasschichten (z. B. in der Nähe heißer Sterne oder Supernovae) oder durch kosmische Strahlung häufig teilweise wieder zerstört; meist erodiert die Zerstörung allerdings nur den kondensierten Mantel. Die ursprünglichen Kondensate aus der Nähe der Nukleosynthese-Orte werden weniger stark verändert, sodass wir sie sogar in Materie auf der Erde finden, vergleichbar einer Nadel im Heuhafen, als mikroskopische Beimischungen von Meteoriten-

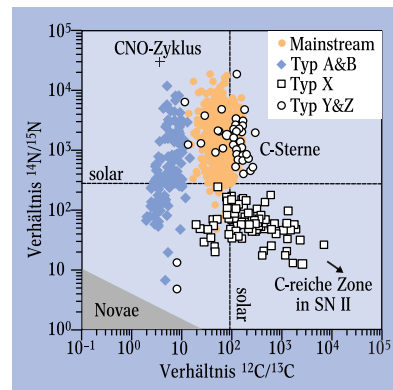


Abb. 5:
Isotopensignaturen
in präsolaren
Staubkörnern:
Die Kohlen- und
Stickstoff-Isotopen-
verhältnisse
erlauben es, die
erwarteten
Ursprungs-Orte
einzelner Körner
zu charakterisie-
ren. Die Typeinteil-
lungen beruhen
auf anderen Isoto-
penverhältnissen.

ten. Planetenbildung, Kollisionen, Blitzentladungen und die Erzeugung energiereicher Plasma-Jets in der frühen Phase des Sonnennebels haben die kondensierte Materie in ihrer chemischen Zusammensetzung zum Teil erheblich modifiziert. Im Labor analysiert man bei der Suche nach *präsolaren* Anteilen die Einschlüsse in erkennbar wenig prozessiertem früh entstandenen Meteoritenmaterial, den „kohligen Chondriten“.²⁾

Die hohe erreichte Präzision der Isotopenanalyse selbst kleinster Einschlüsse hat eine „Labor-Astrophysik mit Radioaktivität“ möglich gemacht: Heute können rund 100 Nanometer kleine Bereiche getrennt isoto-pen-analysiert werden, sodass man in den Größenbereich interstellarer Staubs vordringt und die Isotopenzusammensetzung der einzelnen Staubkörner bestimmt. Die dabei verwendeten Verfahren beruhen überwiegend auf der Auslösung und Analyse von Sekundär-Ionen durch Atomstrahl-Bombardement der Materieproben, wobei verschiedene Fokussierungs- und Analyseverfahren bezüglich Isotopen- und räumlicher Auflösung unterschiedliche Instrumente ergeben. Bisher werden präsolare Körner in Meteoritenmaterial angereichert durch sukzessives Wegätzen der einbettenden Meteoritenmaterie; dem liegt die Annahme zugrunde, dass präsolare Staubkörner vorwiegend in den „resistentesten“ Bestandteilen der Meteoriten auftreten. So wurden als unterschiedliche Staubkornarten mit präsolarem Ursprung Diamantkörner, aber auch Graphite, Siliziumcarbid, Siliziumnitrid, spezielle Oxide und andere bei hohen Temperaturen kondensierende Carbide gefunden. Korngrößen von einigen μm sind typisch für die analysierten Körner.

Erkannt werden interstellare Staubkörner an Auffälligkeiten in spezifischen Isotopenverhältnissen. So ist z. B. im Sonnensystem das $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ -Isotopenverhältnis ziemlich genau 89 ± 10 , während man in Meteoriteinschlüssen Werte im Bereich zwischen 1 und 10 000 messen kann (Abb. 5). Derartige Abweichungen lassen sich nun unmittelbar mit den bekannten Nukleosyntheseprozessen vergleichen: Wasserstoff-Fusion nach dem CNO-Zyklus erzeugt vergleichsweise hohe Anteile des ^{13}C -Isotops; im Gegensatz dazu wird bei Helium-Fusion und den späteren Brennprozessen (z. B. C-

1) So erklärt sich wegen fehlender Substitutionskanäle die Anreicherung von Europium in Calcium-Kristallstrukturen, andererseits auch die Thorium- und Uran-Überhäufung in der Erdkruste.

2) Das Material des Sonnensystems hat sich etwa 4,6 Milliarden Jahre vor der heutigen Zeit als „solares Gas“ von den Mischungsprozessen im interstellaren Medium abgekoppelt. Die Nukleosynthese-Prozesse im Sterninnern und in Nova- und Supernova-Explosionen fanden lange vorher statt.

Brennen, bis hin zu explosivem NSE-Brennen in Supernovae) der geradzahlige Anteil ^{12}C stark bevorzugt, als ganzzahliges Vielfache der dann häufigen α -Kerne. Damit alleine ist also eine mögliche Zuordnung der Herkunft unterschiedlicher Staubkörner machbar. Genauer werden solche Bestimmungen, wenn andere Isotopenverhältnisse (vgl. $^{14}\text{N}/^{15}\text{N}$ in Abb. 5) hinzugenommen werden.

Sind die Ursprungsorte erst einmal grob identifiziert, so liefern dann andere, weniger klar vorhersagbare Isotopenhäufigkeiten besonders interessante Diagnostiken der Nukleosynthesebedingungen an diesen Orten. Hier kommt radioaktiven Isotopen besondere Bedeutung zu, da sich deren Signatur über den Zerfall zu Tochterisotopen klar aufbaut und von den anderen, ebenfalls von Probe zu Probe variierenden Isotopenmustern deutlich abhebt. So wurde in ca. 20 % der locker gebauten Graphitkörner des Murchison-Meteoriten mit vorher unklarem Ursprungsort, den „X-Grains“, ein Exzess an ^{44}Ca diagnostiziert, der auf ^{44}Ti -Ursprung zurückgeführt wird und daher einen Supernova-Ursprung dieser Körner klar beweist; die übrigen bestimmten Isotopenverhältnisse dieser Körner wurden dann diagnostiziert und erweisen sich als sehr ähnlichen, die wir bei solchen Kernkollaps-Supernovae erwarten würden. Insbesondere wurden für diese X-Grains sehr hohe $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al}$ -Verhältnisse bestimmt, die auf Beimischungen aus weiter außen liegenden Supernovazonen zum Staubkondensat hinweisen.

Lektionen und Ausblick

Mit den Instrumenten, die im Bereich der Gamma-Astronomie und der Labor-Massenspektroskopie im vergangenen Jahrzehnt entwickelt und betrieben wurden, ist eine „Astronomie mit radioaktiven Substanzen“ begründet worden. Die Instrumente an Bord des Compton Observatory haben von 1991 bis 2000 dazu bahnbrechende Messungen gemacht, die die Möglichkeiten einer solchen Astronomie erkennen lassen: Supernovae und Supernova-Überreste wurden als radioaktive Quellen erkannt und über Radioaktivität wurde die aktuelle Nukleosynthese-Aktivität in der Galaxis abgebildet. Diese Gamma-Linien-Astronomie ist (neben den in Vorbereitung befindlichen Gravitationswellen- und Neutrinomessungen) die einzige Methode, den Explosionsmechanismus von Supernovae direkt zu studieren. Prozesse in der unmittelbaren Umgebung schwarzer Löcher, aber auch in der Entstehungsphase des Sonnensystems, hinterlassen charakteristische Spuren in radioaktivem Material, deren Erforschung jenseits der Empfindlichkeitsgrenzen derzeitiger Instrumente liegt. Die ESA-Mission INTEGRAL soll im Herbst 2002 als Nachfolge-Experiment gestartet werden (Abb. 1), um spektral hochauflösende Details und tiefere Nachbeobachtungen von Gamma-Linien durchzuführen, mit denen präzisere, quantitative Erkenntnisse zu kosmischer Nukleosynthese in Aussicht stehen.

In der Labor-Massenspektroskopie sind mit den derzeitigen Instrumenten bereits eine Vielzahl verschiedenartiger Staubkornarten präsolaren Ursprungs erkannt worden. Noch vor kurzem hätten wir eine derartige Langzeit-Konservierung von Materialproben von im Kosmos neu entstandenen Atomkernen bis zum Transport auf unsere irdischen Labortische für phantastisches Wunschdenken gehalten. Die erstmalige Identifikation von präsolaren Silikaten mit den neuen

Instrumenten der 2. Generation („nanoSIMS“, Secondary-Ion-Mass-Spectroscopy) deutet das experimentelle Neuland an; nun wird die quantitative Auswertung von Isotopenverhältnissen verschiedener Elemente am gleichen präsolaren Korn durch diese Instrumente möglich!

Mit diesen beiden direkten Zugangsarten und ihrer Kombination mit den indirekteren, aber räumlich hochauflösenden Elementkartographierungen im Röntgen- und Radio-Bereich ist zu erwarten, dass sowohl über die Bedingungen kosmischer Nukleosynthese als auch über die Eigenschaften instabiler Isotope weitab vom „Tal der stabilen Elemente“ Neuland erforschbar wird. Damit wird die über 40 Jahre alte wegweisende Kategorisierung kosmischer Nukleosynthese (B^2FH) mit astrophysikalisch und kernphysikalisch präzisierten Inhalten gefüllt, damit wir letztlich die Herkunft der uns umgebenden Elementervielfalt verstehen lernen.

Weiterführende Literatur

- D. Arnett, *Supernovae and Nucleosynthesis*, Princeton University Press (1996)
- T. J. Bernatowicz, R. M. Walker, *Physics Today* **12**, 26 (1997)
- E. M. Burbidge, G. R. Burbidge, W. A. Fowler, F. Hoyle, *Rev. Mod. Phys.* **29**, 547 (1957)
- D. D. Clayton, *Principles of Stellar Evolution and Nucleosynthesis*, Cambridge University Press (1982)
- R. Diehl und D. H. Hartmann, *Astronomy with Radioactivities*, MPE Rep 274 (1999)
- R. Diehl und F. X. Timmes, *PASP*, Vol. 110, **748**, 637 (1998)
- W. Hillebrandt und J. Niemeyer, *Ann. Rev. A&A* **38**, 191 (2000)
- B. E. J. Pagel, *Nucleosynthesis and Chemical Evolution in Galaxies*, Cambridge University Press (1997)
- N. Prantzos und R. Diehl, *Phys. Rep.* **267**, 1 (1996)
- V. Schönfelder, *Phys. Bl.*, April 1998, S. 325
- V. Schönfelder (Hrsg.), *The Universe in Gamma-Rays*, Springer Verlag, Berlin 2001
- E. Zinner, *Ann. Rev. Earth Planet Sci.* **26**, 147 (1998)

Die Autoren

Roland Diehl studierte Kernphysik in Mainz und arbeitete zwei Jahre in der Industrie, bevor er seine Begeisterung für die Astrophysik entdeckte. Am MPI für extraterrestrische Physik wirkt er seit 1979 u. a. als Co-Experimentator der Gammateleskope COMPTEL sowie SPI/INTEGRAL. Dabei verknüpft er die kosmische Gamma-Spektroskopie mit der Kernphysik. Seit seiner Habilitation 1998 lehrt er als Privatdozent an der TU München. In seiner Freizeit bewegt er sich gerne in der Natur, vorzugsweise flott mit dem Mountainbike.



Wolfgang Hillebrandt arbeitet seit über 30 Jahren auf dem Gebiet der nuklearen Astrophysik. Nach seiner Habilitation 1977 in Darmstadt wechselte er 1978 zum Max-Planck-Institut für Astrophysik (vormals MPI für Physik und Astrophysik), wurde Honorar-Professor der TU München, wissenschaftliches Mitglied des Max-Planck-Instituts und ist seit 1996 auch Direktor am Institut. Wenn ihm seine Arbeit über alles, was im Universum explodiert, noch etwas Zeit lässt, segelt er auf dem Starnberger See oder besucht die bayerischen Alpen.