

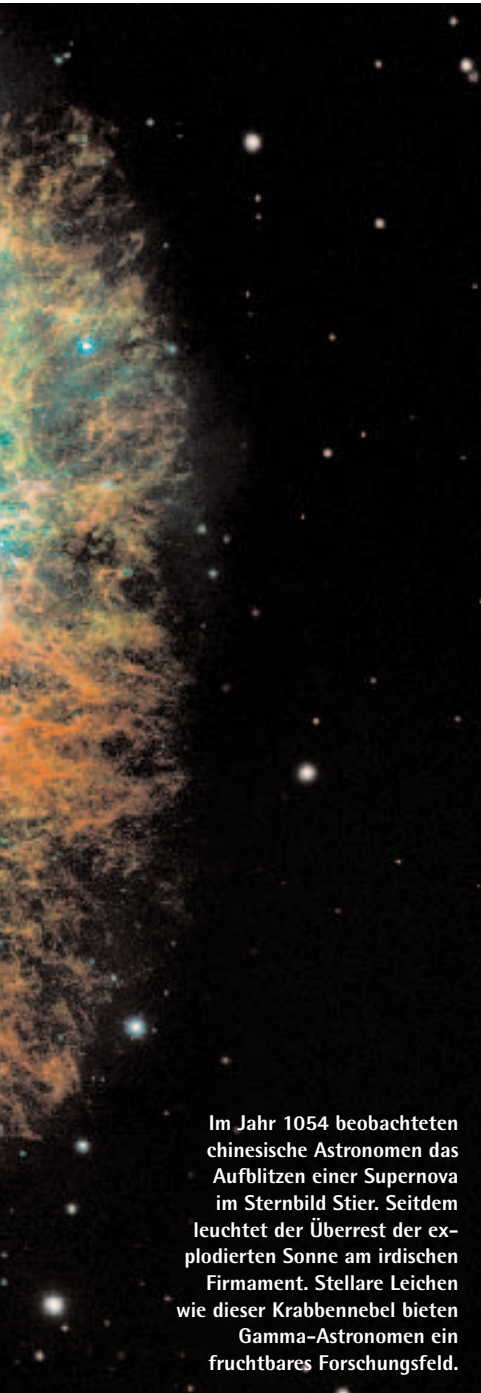
Die Galaxis glüht

*Das sichtbare Licht umfasst nur eine Oktave des gesamten Spektrums der elektro-
abgreifen, enthüllen sie fremde Landschaften und physikalische Prozesse, die opti-
EXTRATERRESTRISCHE PHYSIK in Garching spielen auf der Tastatur des Gamma*



im **Gammalicht**

magnetischen Strahlung. Wenn Astronomen mit Antennen oder Satelliten die Klaviatur des Universums schen Teleskopen verborgen bleiben. Forscher um **ROLAND DIEHL** vom **MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR** lichts. Dabei gewinnen sie tiefe Einblicke in die Milchstraße – und dazu nutzen sie sogar die Radioaktivität.



Im Jahr 1054 beobachteten chinesische Astronomen das Aufblitzen einer Supernova im Sternbild Stier. Seitdem leuchtet der Überrest der explodierten Sonne am irdischen Firmament. Stellare Leichen wie dieser Krabbennebel bieten Gamma-Astronomen ein fruchtbares Forschungsfeld.

FOTO: NASA/ESA/JEFF HESTER, ARIZONA STATE UNIVERSITY

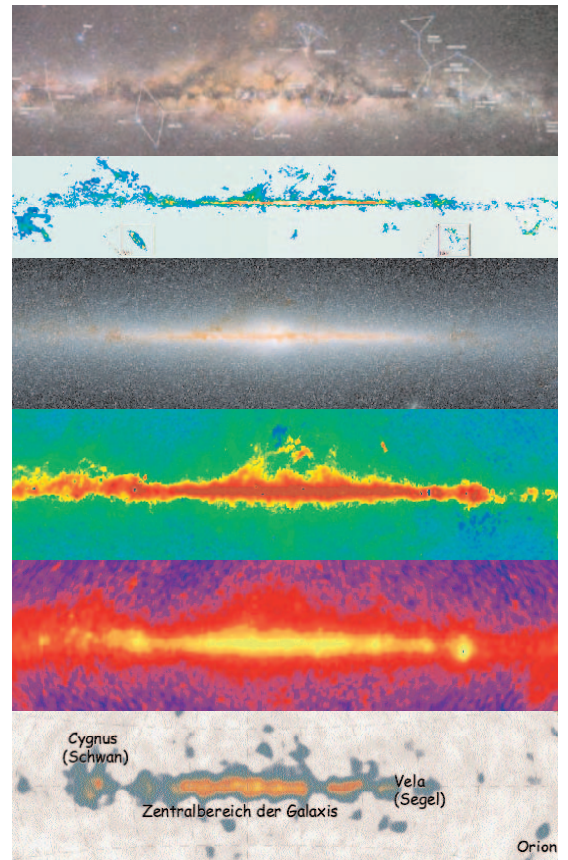
Seit Urzeiten blicken die Menschen auf zu einem diffus leuchtenden Band, das sich in klaren Nächten über den Himmel zieht. Jahrtausende blieb das rätselhafte Glimmen vor allem Gegenstand der Mythologie. Immerhin meinte der griechische Naturphilosoph Demokrit im 5. Jahrhundert vor Christus, diese „Milchstraße“ bestehe aus unzähligen schwachen Sternen – eine damals revolutionäre Behauptung, die tatsächlich erst 2000 Jahre später bestätigt wurde.

„Meine dritte Beobachtung betrifft das Wesen der Milchstraße (...) Auf welchen ihrer Abschnitte man das Fernrohr auch richten mag, sogleich zeigt sich dem Blick eine ungeheure Menge von Sternen, von denen mehrere ziemlich groß und sehr auffallend sind; die Anzahl der kleinen jedoch ist schlechthin unerforschlich.“ Im März 1610 schreibt das ein Mann, der mit einem selbstgebauten Fernrohr in unbekannte Regionen vordringt und damit in die Geschichte eingehen wird: Galileo Galilei. Was er entdeckt, ist buchstäblich nicht von dieser Welt, und so trägt die Schrift den Titel *SIDEREUS NUNCIUS* („Sternenbote“). In ihr schildert der italienische Mathematiker und Astronom seine Beobachtungen der Jupitertrabanten, des Erdmonds und eben auch der Milchstraße (Kasten, Seite 23).

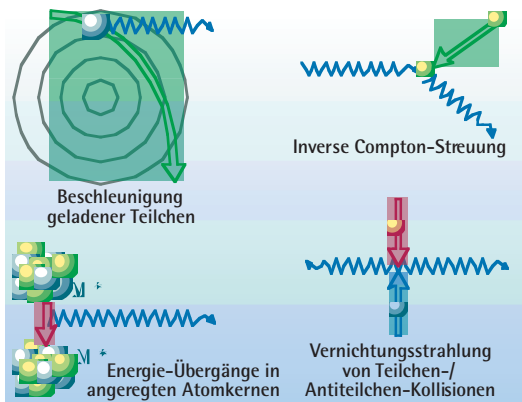
Wer dieses Galaxis genannte System mit bloßen Augen betrachtet, sieht das Licht unzähliger Sterne – Sonnen ähnlich der unseren, die ihre Energie aus Kernfusionsprozessen speisen. Die Oberflächen der Gasbälle sind heiß und leuchten wie eine

brennende Kerze. Nicht nur Sterne erzeugen im Universum eine solche thermische Strahlung. Die Astronomen kennen die unterschiedlichsten Quellen von Wärmestrahlung: explodierende Riesen Sonnen – so genannte Supernovae –, Planeten oder sogar interstellarer Staub, der mit Temperaturen nahe dem absoluten Nullpunkt von minus 273,15 Grad

FOTOS: MELLINGER/COLUMBIA UNIVERSITY/IPAC/MPI FÜR RADIOASTRONOMIE/MPI FÜR EXTRATERRESTISCHE PHYSIK



Unsere Milchstraße durch verschiedene Fenster – also in unterschiedlichen Spektralbereichen – betrachtet: sichtbares Licht, Radiostrahlung des Kohlenmonoxids, Infrarotlicht, gesamter Radiobereich, Gammastrahlung sowie Gammastrahlung einer bestimmten Energie, die dem radioaktiven Zerfall entspringt (von oben).



Im Universum gibt es im Wesentlichen vier unterschiedliche Prozesse, die Gammastrahlung erzeugen (Beschreibung im Lauftext rechts).

ILLUSTRATION: ROHNER NACH VORLAGE VON ROLAND DIEHL, MPI FÜR EXTRATERRESTRISCHE PHYSIK

Celsius leuchten. Während kalte Körper im langwelligen Infrarot glimmen, strahlen die heißen Supernovae einen beträchtlichen Teil ihrer Energie als Röntgenlicht ab und reichen damit hinauf bis in das kurzwellige Ende des Wärmespektrums. Thermische Prozesse können allerdings kaum Licht noch höherer Energien erzeugen – und dennoch ist das Universum erfüllt davon. Woher also stammt diese sehr kurzwellige Gammastrahlung?

EXOTISCH HEISST JENSEITS VON HEISS

Sie entsteht in exotischen kosmischen Regionen durch so genannte nicht-thermische Prozesse. Nicht-thermisch deshalb, weil hier der Begriff Temperatur seine Bedeutung verliert. Roland Diehl vom Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik in Garching bezeichnet diese Bereiche daher als „jenseits von heiß“. Die Forscher messen keine Temperaturen, sondern ausschließlich Strahlungsenergien, die bis zu 10^{20} Elektronenvolt reichen – weit mehr, als man in irdischen Beschleunigern erzeugen kann. „Hätten wir Gamma-Augen, sähen wir die Milchstraße im Licht von Prozessen, wie wir sie aus der Hochenergiephysik der großen Teilchenbeschleuniger-Labore kennen“, sagt Diehl. Statt der normalen Sterne bestimmten Blitze von Pulsaren und

gleißend helles interstellares Gas das Gesamtbild des galaktischen Bandes, das sich besonders deutlich am Himmel abzeichnen würde.

Die Astrophysiker unterscheiden im Wesentlichen vier Quellen kosmischer Gammaquanten:

- **Bremsstrahlung.** Sie tritt auf, wenn ein nahezu lichtschnelles geladenes Teilchen, etwa ein Elektron, im elektrischen Feld eines Atomkerns umgelenkt und dabei abgebremst wird.
- **Inverser Compton-Effekt.** Dabei überträgt ein energiereiches Elektron wie beim Billardspiel einen Teil seiner Energie auf ein Lichtteilchen.
- **Annihilation von Materie und Antimaterie.** Ein Elektron findet sein Antiteilchen (Positron), und das Paar geht vollständig in Gammalicht auf – in Form zweier Photonen.
- **Radioaktiver Zerfall.** Hier verwandelt sich spontan ein Elementarbaustein im Atomkern, und der so umgebaute Kern nimmt unter Aussendung von Gammastrahlung einen stabileren Zustand ein.

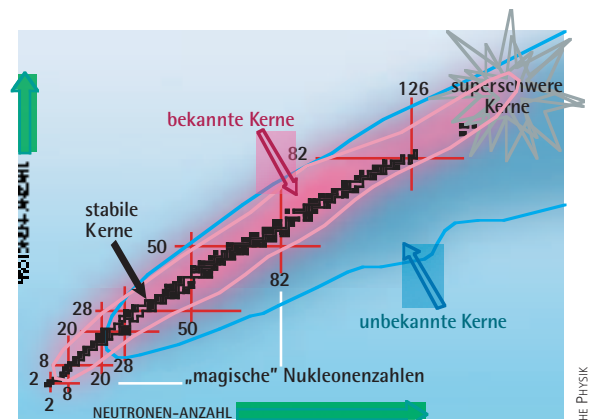
Um zwischen diesen Quellen zu unterscheiden, machen Forscher wie Roland Diehl das, was Joseph von Fraunhofer vor 200 Jahren als Erster mit dem Sonnenlicht angestellt hat: Sie zerlegen die ankommende Strahlung in ein Spektrum und sortieren sie nach der Wellenlänge. So spannt sich ein kleiner Regenbogen auf, dessen unterschiedliche Farben verschiedenen Energien entsprechen. „Aus dem Farbverlauf im Spektrum schließen wir auf die zugrunde liegenden Prozesse“, erläutert Diehl.

Diese Methode mag kompliziert klingen – und doch kennt jeder sie zumindest in Grundzügen aus dem Chemieunterricht: Wird Natrium in die Flamme eines Bunsenbrenners

gestreut, verfärbt sie sich gelb, das Spektrum zeigt eine intensive Linie bei einer Wellenlänge von 598,2 Nanometer (millionstel Millimeter); und Magnesium in den Wunderkerzen erhellt das Weihnachtszimmer in fast weißem Licht. Solche charakteristischen Farbgebungen identifizieren Astrophysiker als Fingerabdrücke der Elemente – je genauer man hinschaut, desto klarer treten die Spektrallinien hervor. Übrigens erscheinen sie in den optischen Spektren der Sonne oder anderer Sterne als dunkle Absorptionslinien, weil die Elemente in den kühleren stellaren Gasatmosphären das Licht des darunter liegenden leuchtenden Sterninnern genau bei jenen Wellenlängen abschwächen, bei denen sie selbst leuchten würden.

NACHRICHTEN AUS DEM ATOMKERN

Bei aller Gemeinsamkeit besteht jedoch ein entscheidender Unterschied zwischen dem optischen und dem Gammabereich: Die Linien im sicht-



Die Welt der Atomkerne erschließt sich auch durch charakteristische Gammastrahlung – und das im Universum ebenso wie im irdischen Teilchenbeschleuniger-Labor.

baren Spektrum künden vom Geschehen in den Atomhüllen, die Linien im Gammalicht aber von Vorgängen in den Atomkernen. Außerdem ist Gammastrahlung sehr energiereich und damit extrem kurzwellig, ihre Wellenlängen liegen zwischen einem milliardstel und zehn billionstel Millimeter. Üblicherweise werden die Spektrallinien durch ihre Energie gekennzeichnet, gemessen in

ILLUSTRATION: ROHNER NACH VORLAGE VON ROLAND DIEHL, MPI FÜR EXTRATERRESTRISCHE PHYSIK

Ein Spiegelei im Universum

Galileo Galilei entdeckte Anfang des 17. Jahrhunderts, dass die Milchstraße aus einzelnen Sternen besteht. Danach vergingen nahezu 150 Jahre, bis sich ein Wissenschaftler wieder Gedanken über dieses Gebilde machte: Thomas Wright of Durham glaubte, die Sterne seien in einer flachen, einem Schleifstein ähnlichen Region angeordnet, die um den gesamten Himmel reicht. Die Milchstraße sei nichts anderes als die Projektion dieses Schleifsteins.

Der deutsche Philosoph Immanuel Kant griff die These auf – und kam der Wahrheit schon sehr nahe. In seiner 1755 erschienenen ALLGEMEINEN NATURGESCHICHTE UND THEORIE DES HIMMELS erklärt er die Milchstraße als ausgedehnte, sehr dünne Schicht von Sternen.

Sonne, Erde und alle übrigen Planeten befinden sich innerhalb dieser Schicht, jedoch nicht in deren Mittelpunkt. Abhängig von der Blickrichtung, in die Ebene der Schicht hinein oder senkrecht aus ihr heraus, sehen wir unterschiedlich viele Sterne.

Wie aber sollten die Astronomen herausfinden, ob der scheinbare Anblick der Milchstraße am Himmel deren tatsächliche räumliche Struktur widerspiegelt? Eine Lösung verhiess die von Friedrich Wilhelm Herschel Ende des 18. Jahrhunderts

erfundene Stellarstatistik: die Erfassung aller im Fernrohr sichtbaren Sterne nach Koordinaten und Helligkeiten. Abgesehen von der Unsicherheit dieser Messungen – so konnten zwar die scheinbaren Sternhelligkeiten bestimmt werden, nicht aber deren absolute Leuchtkräfte und somit auch nicht deren Entfernungen – scheiterte das Unterfangen an einem grundsätzlichen Problem: Die Milchstraße steckt voller Gas- und Staubwolken, die das Sternlicht absorbieren. Das behindert die Sicht auf das Zentrum und verbirgt insgesamt den Blick auf die übergeordnete Struktur.

Daher kann die Stellarstatistik niemals das System als Ganzes erfassen, sondern nur die Umgebung der Sonne bis zu einem Umkreis von rund 10 000 Lichtjahren. Der Durchbruch gelang erst, als die Astronomen Mitte des 20. Jahrhunderts gelernt hatten, den Himmel mit anderen Augen zu betrachten: mit Radioteleskopen.

Wasserstoff ist das häufigste Element im Weltall. Als Teil der interstellaren Materie erfüllt der neutrale Wasserstoff (H I) den Raum zwischen den Sternen und damit die Milchstraße. Das heißt: Die Verteilung der Wolken aus Wasserstoffgas zeichnet die Form des gesamten Systems nach, ähnlich wie Knochen den menschlichen Körper. Wie aber lassen sich diese kosmischen „Knochen“ sichtbar machen? Die Antwort liefert die Welt des Allerkleinsten: Im Grundzustand des Wasserstoffs sind die Rotationsachsen des Atomkerns und des ihn umkreisenden Elektrons antiparallel ausgerichtet. Stoßen zwei Wasserstoffatome zusammen, richten sich die Rotationsachsen von Kern und Elektron parallel zueinander aus – und fallen nach einer gewissen Zeit wieder in den Grundzustand zurück.

Bei diesem Prozess wird Energie frei und als elektromagnetische Welle abgestrahlt. Deren Länge beträgt 21,049 Zentimeter (Frequenz: 1420,4 Megahertz) und liegt damit im Radiobereich des elektromagnetischen Spektrums. Trotz der extrem geringen Dichte der interstellaren Materie stoßen ständig Atome zusammen und

lassen die H I-Gebiete im Licht der 21-Zentimeter-Linie leuchten. Diese Strahlung durchdringt nahezu ungehindert die Staubvorhänge und kann von Radioteleskopen aufgefangen werden. Der Dopplereffekt der galaktischen Rotation ermöglicht es, aus der gemessenen Wellenlänge die Entfernung der Strahlungsquelle entlang der Sichtlinie zu ermitteln. Dank dieses neuen Fensters zum All entdeckten die Astronomen die Spiralstruktur der Milchstraße.

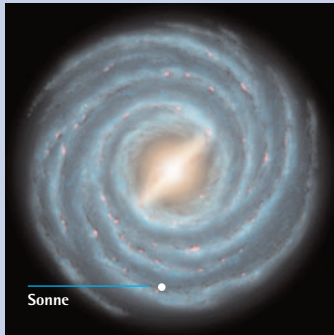
Doch in den 1970er-Jahren fanden die Forscher heraus, dass der Wasserstoff allein als Indikator für die Form nicht ausreicht, weil er zum Beispiel in den Spiralarmen weniger stark konzentriert ist als erwartet. Die Suche begann aufs Neue.

Als wichtigster Indikator entpuppten sich interstellare Molekülwolken; sie leuchten im Licht von Kohlenmonoxid (CO) bei einer Wellenlänge von 2,6 Millimetern. Jetzt gelang es allmählich, das Porträt der Milchstraße zu verfeinern. Demnach gleicht die Galaxis (von griechisch *gala*: Milch) einem leicht verworfenen Rad von 100 000 Lichtjahren Durchmesser und 5000 Lichtjahren Dicke. Um die Nabe mit dem Schwarzen Loch liegt eine leuchtende, sphärische Ausbeulung (*bulge*), in die eine etwa 15 000 bis 25 000 Lichtjahre lange zigarrenförmige Struktur – eine Art Balken – eingebettet ist.

Rund 15 000 Lichtjahre vom Zentrum entfernt umgibt den Zentralbereich ein Ring, der überwiegend aus dichteren Staub- und Gaswolken mit darin eingebetteten Sternen besteht. Charakteristisches Merkmal der Galaxis sind mehrere Arme. Sie tragen meist die Namen jener Sternbilder, in denen wir sie am Firmament beobachten: Sagittarius- und Perseusarm, Norma- und Scutum-Crux-Arm, Drei-Kiloparsec-Arm und Äußerer Arm. Unser Planetensystem liegt inmitten des Orionarms, 26 000 Lichtjahre vom Zentrum entfernt und 50 Lichtjahre nördlich der galaktischen Hauptebene. Umgeben ist das etwa 150 Milliarden Sonnen zählende System vom galaktischen Halo mit Tausenden Kugelsternhaufen sowie einem sphärischen Bereich aus sehr dünnem Wasserstoffplasma.

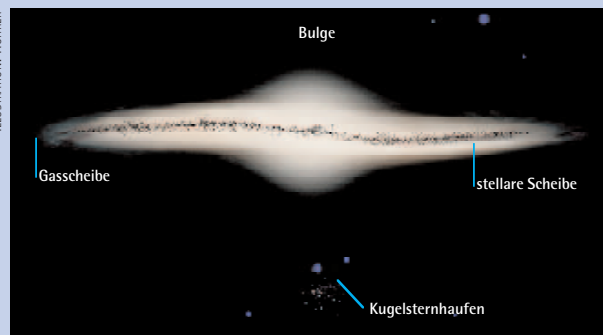
Die gesamte Galaxis rotiert, die zentrumsnahen Objekte schneller, die zentrumsfernen langsamer. Der Verlauf dieser differenziellen Rotation lässt sich nicht durch die sichtbare Masse allein erklären – und ist ein Hauptargument für die Existenz der unsichtbaren Dunklen Materie.

Und noch ein Problem haben die Astronomen: Die Spiralarme wickeln sich trotz der Rotation nicht auf, sondern bleiben über mehrere Milliarden Jahre in Form. Eine Erklärung dafür sind Stoßwellen, welche die Materie in den Spiralarmen verdichten und sich durch das gesamte System fortpflanzen wie ein Stau auf der Autobahn. Über die Ursache der Dichtewellen rätseln die Forscher noch.



Einem Feuerrad gliche die Galaxis, könnte man sie von einem Standort weit außerhalb ihrer Ebene betrachten. Unsere Sonne ist nur einer von etwa 150 Milliarden Sternen.

ILLUSTRATION: ROBERT HURT/JSC/CALTECH/JPL/NASA



Aus dieser Perspektive ähnelt das Milchstraßensystem einem Spiegelei in der Pfanne – lediglich 5000 Lichtjahre dick im zentralen Bereich, aber nach außen flach verlaufend und 100 000 Lichtjahre im Durchmesser.

ILLUSTRATION: ROHNER

der oben verwendeten Einheit Elektronenvolt.

Trotz ihrer hohen Durchschlagskraft – und zum Glück für das irdische Leben – fängt die Erdatmosphäre die kosmische Gammastrahlung ab. Daher sind die Hochenergie-Astrophysiker auf Satelliten angewiesen – wie das europäische Observatorium *Integral* (INTERNATIONAL Gamma-Ray Astrophysics Laboratory). Mit solchen Sternwarten, die im Weltraum jenseits der irdischen Lufthülle kreisen, entdeckten die Wissenschaftler im Gammaskpektrum der Galaxis eine scharfe Spektrallinie

bei 511 Kiloelektronenvolt: exakt dort, wo man den Fingerabdruck der Annihilation von Elektronen und Positronen erwartet („Die dunklen Seiten der Milchstraße“, Seite 40 ff.).

RADIOAKTIVITÄT SIGNALISIERT PRODUKTIVITÄT

Die Gammastrahlung aus der Milchstraße verrät aber noch mehr. Im Jahr 1978 fanden Forscher im Spektrum eine Linie bei 1808,65 Kiloelektronenvolt. Tatsächlich entspricht sie der von der Kernphysik vorausgesagten Energie des Aluminiumisotops ^{26}Al mit einer Halbwertszeit von

ungefähr 700 000 Jahren. In den 1990er-Jahren haben Forscher um Roland Diehl diese relativ langlebige Radioaktivität über weite Bereiche entlang der Milchstraßenebene aufgespürt. Das galt als direktes Zeugnis dafür, dass Radioaktivität im Kosmos weit verbreitet ist und auch innerhalb der Galaxis, also mehr oder weniger in der Gegenwart, neue Atomkerne in großen Mengen produziert werden.

Dieser Befund der Max-Planck-Wissenschaftler überraschte vor dem Hintergrund einer anderen Entdeckung: In Meteoritenproben des

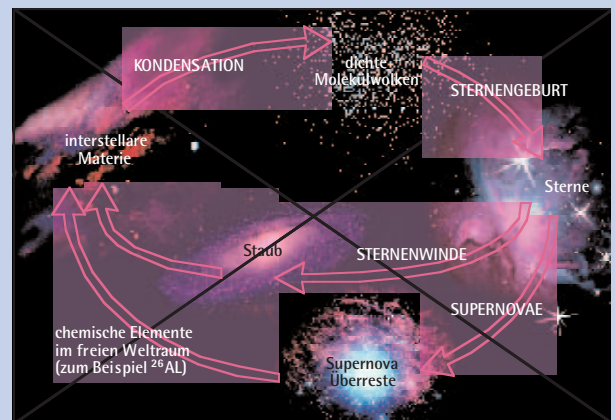
Der Kreislauf der Elemente

Das Universum gleicht einem chemischen Labor: Die Natur hat 83 chemische Elemente mit insgesamt 284 Atomkern-Konfigurationen (Isotopen) hergestellt. Die beiden häufigsten, Wasserstoff und Helium, entstanden schon beim Urknall vor rund 14 Milliarden Jahren und machen auch heute noch etwa 98 Prozent der normalen (baryonischen) Materie im Weltall aus; damals bildeten sich auch geringe Mengen an Lithium und Beryllium. Die Fusionsreaktoren im Innern der Sterne fungierten dann im weiteren Entwicklungsprozess als Retorten für die schwereren Elemente bis hin zum Eisen.

So können massereiche Sterne über Kernfusion die Energie erzeugen, die sie vor dem Zusammensturz durch die gewaltige Schwerkraft bewahrt, bis schließlich das Sterninnere aus Eisen – dem stabilsten Element – besteht. Elemente, die schwerer sind als Eisen (also auch Silber, Gold, Blei, und Platin), werden dann durch sukzessive Anlagerung von Neutronen erzeugt. Dieser Prozess findet wohl im Innern vieler Sternarten, vermutlich aber auch in Supernova-Explosionen oder auch im Verschmelzungsfeuerwerk zweier Neutronensterne statt.

Der Reaktor eines massearmen Sterns wie unserer Sonne verwandelt über Jahrmilliarden Wasserstoff zu Helium. Geht das Brennmaterial zur Neige, besteht das Sterninnere nur noch aus Helium, der „Asche“ des Wasserstoffs. In diesem Stadium bläht sich der Gasball zum Roten Riesen auf. Bei Sternen, die mehr Masse besitzen als die Sonne, entflammt dann das Helium und fusioniert zu Kohlenstoff und Sauerstoff. Sterne in solchen späten Lebensstadien entwickeln starke Winde: Das Licht aus dem Innern wird so stark, dass es die äußere Hülle mitreißt. Schicht um Schicht der Gashülle weht ins Weltall – und von dem Riesenstern bleibt nur der kompaktere Zentralteil, ein Weißer Zwerg, übrig. Auf diesem Weg gelangen auch Teile der im Stern produzierten chemischen Elemente nach außen und vermischen sich mit der interstellaren Materie, die den vergleichsweise leeren Raum zwischen den Sternen ausfüllt.

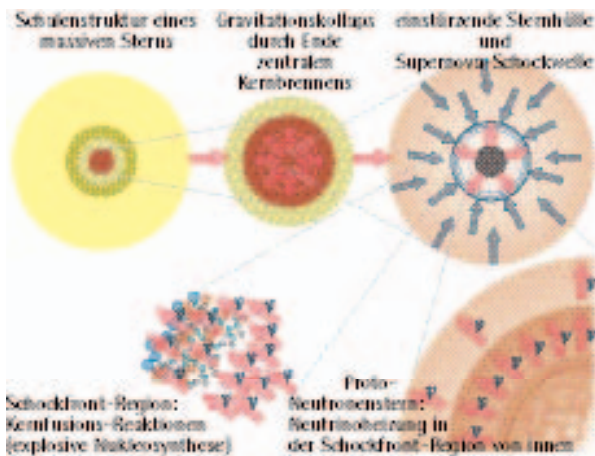
Sterne leben kürzer und intensiver, je mehr Masse sie haben. Die Kernreaktionen in ihren Zentren bringen immer schwerere Elemente hervor. Diese geordnete Nukleosynthese erfolgt zunehmend schneller. So entstehen etwa Magnesium oder Aluminium und schließlich Eisen. Weil der Atomkern von Eisen eine sehr hohe Bindungsenergie besitzt, fordert die Produktion noch schwererer Elemente ein gehöriges Maß an Energie. Daher bedarf es einer dynamischen Umgebung mit zeitweise hoher Neutronendichte – Bedingungen, wie sie in einer Supernova herrschen. Der Theorie



Werden und Vergehen im Kosmos: Die vereinfachte Darstellung zeigt den Kreislauf der Elemente. Sterne werden aus der interstellaren Materie geboren und geben nach sehr unterschiedlich langer Entwicklungszeit ihre „Asche“ an das Medium zurück. Elemente wie ^{26}Al treiben nur eine vergleichsweise kurze Zeit in den interstellaren Gaswolken, die über Zeiträume von 100 Millionen Jahren existieren.

zufolge läuft dort der r-Prozess im Zeitraum von Sekunden nach Beginn der Explosion ab und bildet durch sukzessive Neutronenanlagerung an Eisenatomkernen Elemente wie Germanium, Blei oder Platin. Eine weitere Elementenküche sehen die Astrophysiker in der Stoßfront, die mit hoher Geschwindigkeit und großer kinetischer Energie durch den platzenden Stern rast und eine Art „explosive Kernfusionsflamme“ hinter sich herzieht.

Ob mehr oder weniger sanfter Sternwind oder heftiger Knall: Stets vermischt sich die elementenreiche Sternschlacke mit der interstellaren Materie. Und so gelangt auch ^{26}Al in den freien Raum. Die Gammastrahlung dieses Isotops lässt sich etwa über eine Million Jahre messen; so viel Zeit vergeht zwischen der Freisetzung und dem Einweben in das interstellare Medium. Irgendwann fragmentiert diese gut durchmischte Materie zu Wolken, aus denen sich Kugeln zusammenballen, in denen neue Fusionsreaktoren anspringen – und sich der Kreislauf schließt. Die Sonne zählt zu einer solch späteren Sterneneration. Auch unser Körper besteht aus Atomen, die einst in Sternen steckten: Wir sind Kinder des Kosmos.



Supernovae als Retorten: Wenn massereiche Sterne am Ende ihres Lebens explodieren, erzeugen sie große Mengen solcher Elemente, die schwerer sind als Wasserstoff und Helium. Dabei laufen im Innern dieser berstenden Sonnen komplizierte Prozesse ab. Am Ende entstehen aus solchen Supernovae kompakte Neutronensterne oder exotische Schwarze Löcher.

frühen Sonnensystems hatte man bereits Ende der 1970er-Jahre die Zerfallsspuren desselben Aluminiumisotops ^{26}Al nachgewiesen. Dessen radioaktive Energie hatte offenbar dazu beigetragen, die Materie im „embryonalen“ Sonnensystem aufzuschmelzen und damit die Bildung von Gestein gefördert, aus dem sich vor etwa viereinhalb Milliarden Jahren die Planeten formten. So hatte man einerseits das Gammasignal von ^{26}Al aus der Galaxis, das die Entstehung dieses Isotops in kosmologisch gesehen jüngster Vergangenheit markiert; auf der anderen Seite fand man Hinweise auf erhebliche Mengen ^{26}Al , das die Kinderstube des Sonnensystems mitgestaltete.

Das Isotop ist anscheinend allgegenwärtig. „Wir glauben, dass ^{26}Al überwiegend ein Nebenprodukt kosmischer Nukleosynthese-Prozesse ist“, sagt Roland Diehl. Mit anderen Worten: Die Astrophysiker messen überall dort Radioaktivität, wo neue Atomkerne in großen Mengen produziert werden. Auch das Aluminium entsteht im Innern massereicher Sterne, wird bei stellaren Explosionen freigesetzt und hinterlässt seine Fingerabdrücke in der Gammastrahlung so genannter Supernova-Überreste, etwa in den Spektren der Objekte SN 1987 A oder Cassiopeia A.

Auf diese Weise lässt sich die galaktische Radioaktivität gut erklären: Die Nukleosynthese lief in massereichen Sternen sicher schon vor Milliarden Jahren ab, sie sorgt

aber noch heute für Nachschub an Radioisotopen. Cassiopeia A etwa ist erst vor 350 Jahren in der Milchstraße explodiert. Wenn Astrophysiker die Gammalinien von Isotopen wie ^{26}Al , ^{56}Co (Cobalt) oder ^{44}Ti (Titan) studieren, lernen sie viel über den kosmischen Kreislauf der Elemente (Kasten links).

EINE SUPERNOVA ALS GEBURTSHELFERIN?

Doch was hat die Geburt unseres Sonnensystems mit einer Supernova zu tun? Manche Wissenschaftler vermuten, dass eine solche kosmische Katastrophe buchstäblich den Anstoß für die Zusammenballung interstellarer Materie zum solaren Urnebel gegeben hat – „eine fast schon anthropozentrische Sicht“, wie Diehl meint, „dann hätte uns eine ganz in der Nähe befindliche Nukleosynthese-Quelle einen Extrabonus verschafft“. Daran knüpft der Max-Planck-Forscher die Frage, welche ^{26}Al -Beiträge aus solchen besonderen Regionen unseren Blick auf die Milchstraße als Ganzes verzerren. Und: Wie viel Radioaktivität enthält die Galaxis eigentlich insgesamt?

Die Antworten darauf erhoffen sich Diehl und seine Kollegen von einem Spektrometer mit der Be-

zeichnung SPI an Bord des Satelliten *Integral*. Das Instrument konstruierten Wissenschaftler um Volker Schönfelder vom Garching Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik gemeinsam mit französischen Kollegen des Centre d'Etude Spatiale des Rayonnements in Toulouse sowie einigen anderen europäischen Forschergruppen. SPI bestimmt die Energie der Gammastrahlung mit bisher unerreichter Genauigkeit. Die Germaniumdetektoren des Instruments werden auf 90 Grad Kelvin (minus 183 Grad Celsius) gekühlt, und eine raffinierte periodische Heizung kuriert deren empfindliche Kristallstrukturen von Schäden, die durch das heftige Bombardement der kosmischen Strahlung verursacht werden. So halten die Sensoren ihre Messpräzision über Jahre hinweg aufrecht – was angesichts der langwierigen Prozedur dringend notwendig ist: Gammaphotonen von ^{26}Al -Zerfällen treffen das Instrument relativ selten, typischerweise in Zeitabständen von Minuten. Und bis die Astrophysiker einige tausend dieser Gammaphotonen gesammelt haben, um ein brauchbares Spektrum zu erzeugen, vergehen viele Monate.

In der Zeitschrift *NATURE* präsentierte das Team um Roland Diehl kürzlich neueste Ergebnisse. Die Wissenschaftler hatten mit SPI entlang der Milchstraßenebene nach

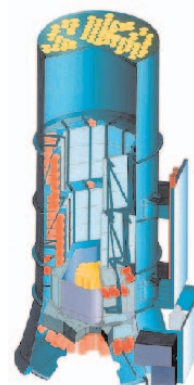
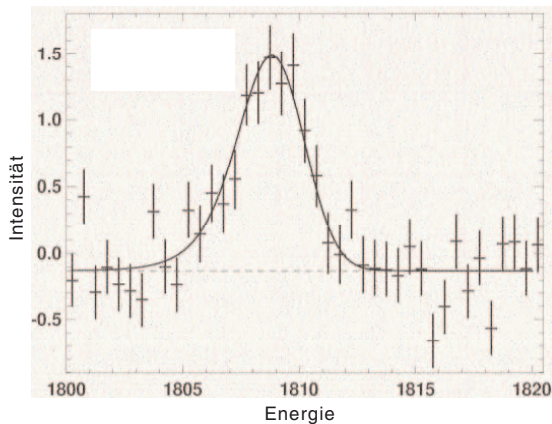


Foto: CESR



Das Gammaspektrometer SPI auf dem Satelliten *Integral* (oben links). Anders als Licht lassen sich Gammastrahlen nicht bündeln, eine Abbildung wird durch den Schattenwurf einer Lochmaske aus Wolfram (oben rechts) erreicht. Eine Art Kamera aus 19 Halbleiterdetektoren (unten rechts) weist die Gammalichtteilchen dann als Spannungsimpulse nach.



GRAFIK: MPI FÜR EXTRATERRESTISCHE PHYSIK

Mit dem Gammaspektrometer SPI haben Wissenschaftler des Max-Planck-Instituts für extraterrestrische Physik die Gammalinie des radioaktiven Aluminium-²⁶ erstmals so präzise vermessen, dass sie aus Änderungen ihrer Form auf astrophysikalische Prozesse schließen können.

Variationen in der Gammastrahlung gefahndet, um deren Ursprungsorte zu lokalisieren. Dabei nutzten die Forscher ein natürliches Phänomen und seine physikalische Folge: die differenzielle Rotation der Milchstraße und den Dopplereffekt.

Die Galaxis rotiert um ihren Zentralbereich, allerdings nicht starr wie ein Rad, sondern in unterschiedlichen Entfernungen von der „Nabe“ verschieden schnell, sodass sich die „Nachbarschaften“ entlang des Radius verändern. Am Ort der Sonne etwa liegt die Geschwindigkeit bei rund 220 Kilometer pro Sekunde. Blicken wir nun von unserem Beob-

achtungsplatz in Richtung des galaktischen Zentrums, sehen wir Sterne oder Gaswolken, die sich entweder auf uns zu oder von uns weg bewegen. Hier kommt der Dopplereffekt ins Spiel, den jeder erlebt, der im Fernsehen ein Formel 1-Rennen verfolgt: Rast der Bolide am Außenmikrofon vorbei, klingt das Motorengeräusch zunächst höher und dann tiefer. In der optischen Entsprechung werden die Lichtwellen einer Quelle bei Annäherung an einen ruhenden Beobachter gestaucht (höhere Frequenz), bei Entfernung vom Beobachter gedehnt (niedrigere Frequenz). Weil die Farbe von Frequenz und Wellenlänge abhängt, erscheint das Licht im ersten Fall ins Blaue, im zweiten Fall ins Rote verschoben.

Tatsächlich fanden die Forscher eine solche Verschiebung in der Farbe (Energie) der Gammalinie von ²⁶Al. Das passt sehr gut zu der Annahme, dass die radioaktiven Quellen tatsächlich den inneren Bereichen der Galaxis angehören und nicht etwa den davor liegenden Regionen; außerdem rotieren sie gerade mit jenen Geschwindigkeiten, die man aus anderen Beobachtungen für die Zentralbereiche der Milchstraße ermittelt hat. Roland Diehl geht noch einen Schritt weiter: „Weil wir die geometrische Struktur

der Galaxis einigermaßen gut kennen, können wir die gemessene Intensität den jeweiligen Abständen zu den Quellen zuordnen und so die Gesamtmenge an radioaktivem Aluminium-26 abschätzen.“

Das Ergebnis überrascht: Die Garchinger Astrophysiker fanden in der Milchstraße drei Sonnenmassen an Aluminium-26. „Dabei ist das Isotop im Universum extrem selten. In der jungen Sonne etwa betrug sein Anfangsanteil im Vergleich zu jenem des stabilen Isotops Aluminium-27 lediglich ein Fünfhunderttausendstel“, erläutert Diehl.

EINE LANDSCHAFT HINTER GASWOLKEN

In der Tat sollten in der Milchstraße sehr effektive ²⁶Al-Fabriken existieren. Theoretiker verdächtigen schon länger Supernovae als Hauptlieferanten dieses Isotops. Diehl und seine Kollegen schließen aus ihren Messungen, dass innerhalb der Milchstraße pro Jahrhundert zwei massereiche Sterne als Supernovae explodieren müssen, um den ²⁶Al-Nachschub zu gewährleisten. Damit sehen die Wissenschaftler nicht nur die Theorie bestätigt, sondern auch Befunde an anderen, unserer Milchstraße vergleichbaren Galaxien: Dort nämlich beobachten die Astrophysiker exakt eine solche Rate an Sternexplosionen.

Die Gammastrahlung eröffnet den Blick auf eine Landschaft, die im optischen Fenster hinter dichten interstellaren Gaswolken verborgen liegt. In den nächsten Jahren wollen die Forscher ihre Messungen mit *Integral* fortsetzen und weiter präzisieren. War es früher das Licht unzähliger Sterne, das die Menschen faszinierte, so begeistert die Forscher heute das diffuse Leuchten der Radioaktivität. „Jedes Isotop steuert seine eigene Geschichte bei“, sagt Roland Diehl. Die von Aluminium-26 ist besonders erhellend, nicht nur für das Verständnis des Innenlebens unserer Galaxis, sondern auch der Frühgeschichte unseres Sonnensystems.

HELMUT HORNING

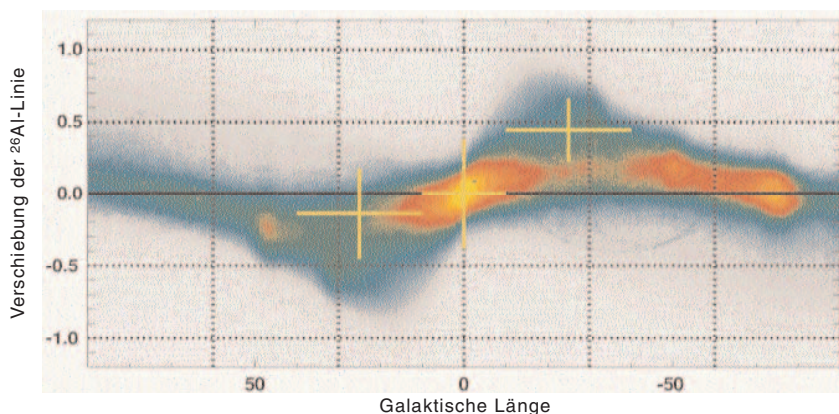


FOTO: MPI FÜR EXTRATERRESTISCHE PHYSIK

Verschiebungen der Linie des Aluminium-26 liefern – über den Dopplereffekt – Einblick in die Dynamik der inneren Bereiche der Galaxis. Die Grafik zeigt die Energie der Gammalinie und damit die Bewegungsrichtung der zentralen Milchstraße in Abhängigkeit von der galaktischen Länge: Regionen rechts des Kernbereichs (0 Grad) entfernen sich, Regionen links davon laufen auf den Beobachter zu; im ersten Fall messen die Forscher eine geringere, im zweiten eine höhere Energie der Aluminiumlinie.