

Vom Werden und Vergehen der Sterne

Obwohl sie Symbole der Unvergänglichkeit sind, existieren Sterne nicht ewig. Sie entstehen aus Gas- und Staubwolken und brennen je nach Größe Millionen oder Milliarden Jahre. Dann erlöschen sie, explodieren – oder verschwinden im Nichts eines Schwarzen Loches

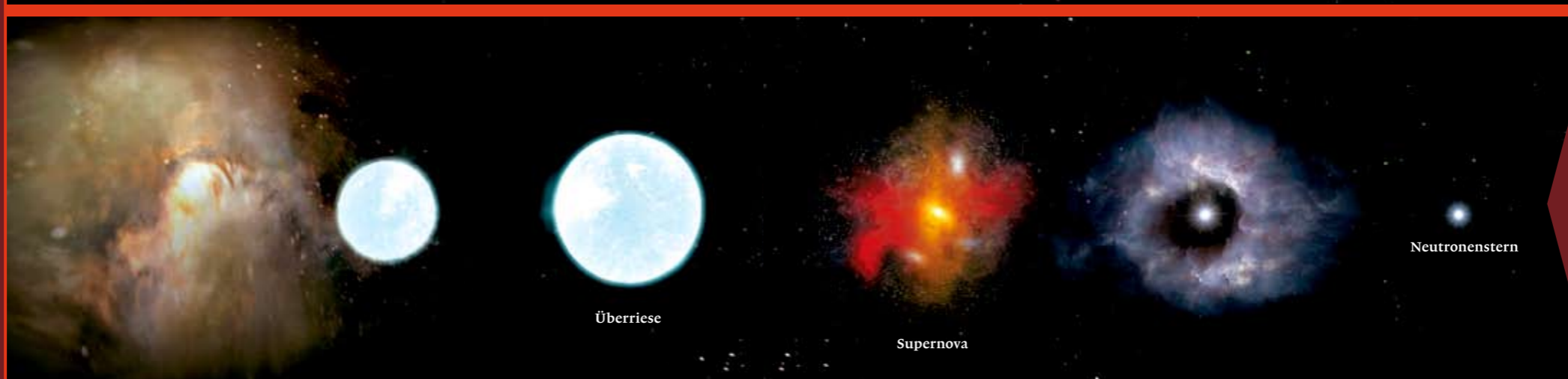
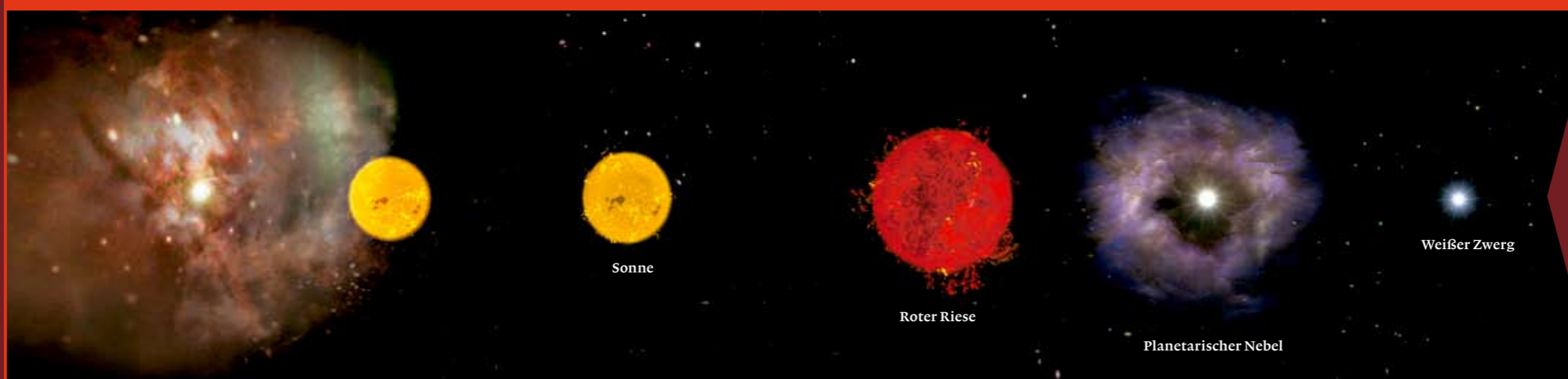
Text: Martin Paetsch

Illustrationen: Tim Wehrmann

Der Sturm brach unvermittelt übers Sonnensystem herein: Für einen Moment blendeten energiereiche Gamma- und Röntgenstrahlen die Messgeräte von 15 Raumfahrzeugen. Auf der Erde wurden Radioverbindungen gestört, wie es auch bei heftigen Sonnenausbrüchen geschieht.

Doch was da am 27. Dezember 2004 auf die Erde traf, kam vom anderen Ende der Milchstraße. In 50 000 Lichtjahren Entfernung, so vermuten Astronomen, hatten unvorstellbare innere Kräfte eine nur wenige Kilometer große Kugel aus dicht gepressten Elementarteilchen zum Beben gebracht: einen **Neutronenstern** namens SGR 1806-20, eine Art riesenhaften Atomkern.

Dabei hatte SGR 1806-20 in einer Zehntelsekunde mehr Energie frei-



Die Illustrationen sind nicht maßstabsgerecht

ALLE STERNE entstehen aus Gas- und Staubwolken: Resten früherer Sonnenexplosionen. Wie lange sie existieren, hängt von ihrer Größe ab. Hat ein Stern weniger als zehn Prozent der Masse unserer Sonne, reicht die Schwerkraft in seinem Inneren nicht aus, um Materie so weit zusammenzupressen und zu erhitzen, dass eine Wasserstoff-Kernfusion stattfinden kann, die Energie liefert. Ein solcher **Brauner Zwerg** glüht nur, erkaltet nach einigen Milliarden Jahren und endet schließlich als dunkle Materiekugel.

HIMMELSKÖRPER von der Größe der **Sonne** leuchten rund zehn Milliarden Jahre. Dann geht der Wasserstoff in ihrem Inneren zur Neige, der Kern schrumpft, erhitzt sich, und in komplexen Prozessen bläht der Stern sich auf. Dieser **Rote Riese** pulsiert und stößt Teile seiner Hülle ab, die zum **planetarischen Nebel** werden – Rohstoff für neue Sterne. Kommt die Kernfusion dann zum Erliegen, schrumpft der Kern um 99 Prozent zu einem **Weißem Zwerg**, der nun über viele Jahrmilliarden ausglüht und schließlich als kalter Körper durchs All treibt.

GROSSSTERNE mit mehr als der zehnfachen Masse unserer Sonne leuchten viel heller – und verbrauchen ihren Brennstoff in weniger als 20 Millionen Jahren. Dann bricht ein solcher **Überriese** unter seinem eigenen Gewicht zusammen, wodurch eine Schockwelle ausgelöst wird, die in einer **Supernova**-Explosion die äußere Hülle ins All schleudert – Baumaterial für neue Sterne. Zurück bleibt ein extrem dichter, schnell rotierender **Neutronenstern**, der im Lauf der Zeit immer langsamer rotiert und schließlich so schwach strahlt, dass er nicht mehr beobachtet werden kann.

MANCHE SONNEN haben 100-mal so viel Masse und strahlen 500 000-mal so hell wie unser Zentralgestirn. Das Dasein dieser **Hyperriesen** ähnelt dem der Überriesen – nur verläuft es schneller und mit anderem Ende: Denn ist die Masse des nach der Explosion entstehenden Neutronensterns größer als 3,2 Sonnenmassen, bricht er unter der eigenen Schwerkraft zusammen – und wird zu einem ungeheuer dichten und schweren toten Stern: einem **Schwarzen Loch**.



RESTE EINER SONNE: der Nebel N49 in der Großen Magellanschen Wolke. In ihrem Zentrum existiert noch der einstige Kern des Sterns – als so genannter Magnetar

gesetzt als unsere Sonne in mehr als 100 000 Jahren. Das Sternbeben erzeugte den höchsten bislang gemessenen Wert von Röntgen- und **Gammastrahlen** aus den Tiefen des Alls.

Ein Signal wie dieses ist nur eines von vielen: Ringsum am Himmel blinkt, pulst und fackelt es unentwegt in allen Wellenlängen. Dieser schwache Widerschein ferner Ausbrüche erinnert daran, dass im Universum ständig Sterne entstehen und vergehen.

Doch nicht alle Sterne teilen das gleiche Schicksal: Während die einen unscheinbar dahinschwinden, explodieren andere mit enormer Wucht. Solche stellaren Dramen sehen Astronomen zwar immer nur als Momentaufnahme. Mit Modellen der Sternentwicklung können sie jedoch den Werdegang von Jungsonnen vorhersagen – und zugleich erklären, wie sich etwa Neutronensterne und andere bizarre Objekte gebildet haben.

So exotisch und verschieden sie auch enden mögen – alle Sterne sind einst in Gaswolken entstanden. Diese dunklen Schwaden, die vielerorts durch den Kosmos schweben, bestehen haupt-

sächlich aus Wasserstoff. Schockwellen, wie sie von Sternexplosionen ausgelöst werden, können diese Wolken zusammendrücken. Unter ihrer eigenen Schwerkraft beginnen sie dann zu kollabieren: Die Wasserstoffmoleküle stürzen ins Zentrum der Wolke, stoßen dabei gegeneinander und heizen das Gas immer stärker auf.

Bei einer Temperatur von ein bis zwei Millionen Grad und ausreichend hohem Druck setzt dann die Kernfusion ein: Aus Wasserstoff entsteht **Helium** (Kasten Seite 106). Bei der thermonuklearen Umwandlung im Innern des Gasballs wird Energie frei, die als teilweise sichtbare Strahlung abgegeben wird – eine neue Sonne beginnt zu leuchten.

Der Druck des inneren Feuers hindert den gerade entstandenen Stern zugleich daran, unter seinem Gewicht weiter zusammenzustürzen. Solange der Fusionsofen läuft, bleibt der Gasball stets im Gleichgewicht.

Der Rest der dunklen Molekülwolke rotiert nun um diese Sonne: als **proto-planetare Scheibe**, aus der später Planeten hervorgehen können.

Allerdings scheitern einige Sterne, noch ehe ihre Existenz richtig begonnen

hat. Die Astronomen nennen sie **Braune Zwerge**. Denn ein sich bildender Stern (Protostern) muss mindestens ein Zehntel der Masse unserer Sonne haben, damit normale Wasserstoffkerne miteinander verschmelzen können – andernfalls laufen in seinem Innern nur unergiebige Fusionen ab. So erkalten etwa Braune Zwerge nach anfänglichem Aufleuchten wieder und werden zu schwachen Funzeln: Ihr Ofen kommt nicht in Gang.

Auch bei den erfolgreich gezündeten Sternen ist die Masse entscheidend: Je weniger sie wiegen, desto länger und ruhiger verläuft ihre Existenz.

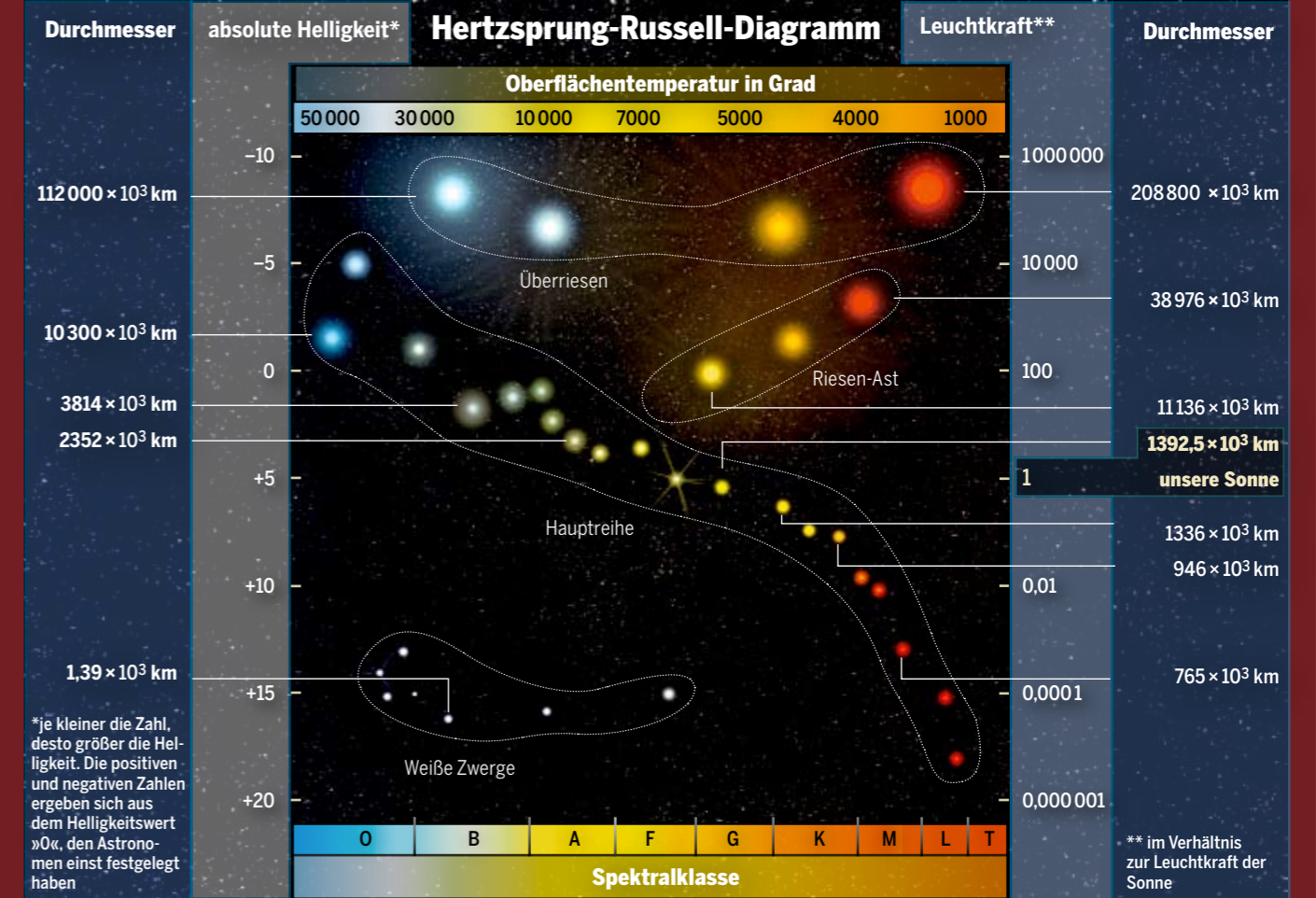
Unserer Sonne beispielsweise, die schon seit mehr als 4,5 Milliarden Jahren leuchtet, wird noch mindestens fünf Milliarden Jahre existieren. Dann erlischt das Wasserstoffbrennen, das unser Zentralgestirn derzeit in innerer Balance hält. Der Kern, der zu diesem Zeitpunkt nur noch aus Helium besteht,



PLANETARISCHE NEBEL wie der Helix-Nebel entstehen, wenn ein Roter Riesenstern Materie ins All abstößt

sackt in sich zusammen und erhitzt sich weiter. Daraufhin kommt es in den umliegenden Gasschichten, die noch Wasserstoff enthalten, zu neuen Fusionsreaktionen – das so genannte Wasserstoffschalenbrennen setzt ein.

Die Hitze bläht den Gasball zu einem **Roten Riesen** auf. Der Durchmesser unserer Sonne schwillt dann von derzeit 1,4 Millionen Kilometern auf mindestens



Klassifikation

Der bunte Zoo der Sterne

Anhand seiner Leuchtkraft und Farbe lassen sich Größe und Entwicklungsstadium eines Himmelskörpers ermitteln

Sterne lassen sich vor allem an zwei Merkmalen unterscheiden: ihrer Farbe und Helligkeit. Die Farbe spiegelt die Temperatur wider – blaue Sterne sind heißer, rote kühler. Die Helligkeit hängt sowohl von der Entfernung eines Sterns zur Erde als auch von seiner tatsächlichen Leuchtkraft ab. Deswegen haben Astronomen den Wert der **absoluten Helligkeit** eingeführt: Sie gibt an, wie hell ein Stern leuchtet, wenn er zehn **Parsec** (ca. 310 Billionen Kilometer oder 3,26 Lichtjahre) von der Erde entfernt ist.

Um 1910 begannen zwei Astronomen unabhängig voneinander, Sterne nach ihrer Farbe/Temperatur und absoluten Helligkeit zu sortieren. Der Däne Ejnar Hertzsprung legte seiner Einteilung ein Koordinatensystem aus Farbe und absoluter Helligkeit zugrunde und kam auf zwei große Gruppen:

- die „Hauptreihe“, die von hellen, heißen zu leuchtschwächeren Sternen verläuft (zu diesen gehört unsere Sonne);

- den „Riesen-Ast“, auf dem sich kühlere, aber sehr große Sterne befinden.

Der US-Astronom Henry Norris Russell gelangte zum gleichen Ergebnis. Nach beiden Forschern ist jenes Schema (Hertzsprung-Russell-Diagramm) benannt, das seither den Astronomen erleichtert, die Sterne am Himmel einzuordnen.

Später kamen in diesem Diagramm zwei weitere Großgruppen hinzu:

- die „Überriesen“ mit mehr als zehnfacher Sonnenmasse, die sehr viel heller leuchten als die Riesen;
- die heißen, aber kleinen Weißen Zwerge, die nun einen eigenen Zweig unterhalb der Hauptreihe bilden.

An dem Schema ist auch abzulesen, in welcher Entwicklungsphase sich Sterne gerade befinden, denn sie verbringen den größten Teil ihres Daseins auf der Hauptreihe: Massereichere Sterne sind im oberen Teil der Hauptreihe bei den heißen Sternen zu finden, massearme, kühlere Sterne im unteren Teil.

Gegen Ende seines Daseins bläht sich ein sonnenähnlicher Stern zunächst auf – und wird in dieser Phase in den Riesen-Ast des Diagramms eingeordnet.

Da er nach etwa einer weiteren Milliarde Jahren schließlich zu einem Weißen Zwerg schrumpft, wird er dann auch dementsprechend dieser Gruppe zugerechnet.

Oft wird auf einem Hertzsprung-Russell-Diagramm an Stelle der Temperatur die „Spektralklasse“ des Sternes angegeben. Von blauen (= heißen) bis zu roten (= kühlen) Sternen gibt es sieben **Spektralklassen** mit den Bezeichnungen O, B, A, F, G, K und M. Dazu gibt es in jeder Klasse jeweils Untergruppen – die **Spektraltypen** von 0 bis 9.

Unsere Sonne zum Beispiel ist ein Stern des Spektraltyps G2. Für die erst in jüngerer Zeit entdeckten Braunen Zwerge (Seite 103) wurde das Hertzsprung-Russell-Diagramm auf der kühlen Seite um die Spektralklassen L und T erweitert.

Birgit Fuhrmeister

Je weniger Masse eine Sonne hat, desto länger und ruhiger verläuft ihre Existenz

Unter der Hülle des Roten Riesen bleibt ein bläulich-weißer Kern zurück

das Hundertfache an. Durch die starke Ausdehnung sinkt die Temperatur der Oberfläche, die nun rötlich leuchtet. Zumindest Merkur, der sonnennächste Planet, wird dann in den Gasmassen verschwinden.

Da die Sonne einen Teil ihrer Masse ins All bläst, lässt ihre Anziehungskraft auf die Erde nach. Damit aber vergrößert sich deren Umlaufbahn, wodurch sie vor dem totalen Untergang verschont bleiben könnte. Doch der einstmalige blaue Planet wird dann längst verdorrt sein.

Im heißen Kern einer solchen roten Riesen Sonne setzt schließlich ein neuer nuklearer Brennprozess ein, bei dem Helium zu Kohlenstoff und Sauerstoff fusioniert. Diese Energiequelle stabilisiert den Stern für eine Milliarde Jahre. Geht auch das Helium zur Neige, be-

ginnt der Rote Riese zu pulsieren und stößt seine äußeren Schichten ab.

Die weggesprengte Materie leuchtet einige zehntausend Jahre lang als planetarischer Nebel, ehe sie wieder zum Baustoff für neue Sterne wird. Eine solche flüchtige Schönheit ist zum Beispiel der Helix-Nebel im Sternbild Wassermann.

Im Zentrum dieses strahlenden Leuchentuchs bleibt, seiner Hüllen beraubt, ein heißer, bläulich-weiß leuchtender Kern aus Kohlenstoff und Sauerstoff zurück: ein Weißer Zwerg. Ist unsere Sonne dereinst zu einem solchen geschrumpft, entspricht ihr Durchmesser nur noch

dem der heutigen Erde. Dafür ist ihre Dichte enorm hoch: Ein Kubikzentimeter würde unter irdischen Bedingungen eine Tonne wiegen.

Im Laufe von Jahrtausenden kühlt der Sonnenrest dann weiter aus, sein Leuchten wird zu einem schwachen Glimmen.

Ein besonders gewaltsames Ende ist jenen Sternen vorbestimmt, die mehr als das Zehnfache der Sonnenmasse haben. Nach einer sehr viel kürzeren Karriere blähen auch sie sich auf. Allerdings werden aus ihnen keine Riesen – sondern **Überriesen**.

Im glühenden Inneren dieser Giganten werden immer schwerere Elemente gebildet, bis am Ende Eisenkerne entstehen. Da eine Fusion von Eisenatomen aber keine weitere Energie bringt, nimmt der Druck des inneren Feuerofens schlagartig ab, und der Sonnenkern kol-



1500 LICHTJAHRE beträgt der Durchmesser dieser Wolke: eine Brutstätte von neuen Sternen in der Spiralgalaxie M33

labiert innerhalb einer Sekunde auf das Ausmaß von wenigen zehn Kilometern Durchmesser.

So heftig ist der Zusammenbruch, dass die Kerne der Eisenatome in ihre Bestandteile – **Neutronen** und **Protonen** – zerlegt werden. Unter enormem Druck verschmelzen die Protonen mit freien **Elektronen** und bilden so weitere Neutronen. Es entsteht ein Neutronenstern.

Der plötzliche Kollaps erzeugt eine Schockwelle, welche die ehemals äußeren Hüllen des Sterns in Stücke reißt. Als **Supernova** leuchten diese Reste dabei für kurze Zeit so hell wie eine Milliarde Sonnen. Heiße Trümmer fliegen in alle Richtungen. Durch Neutronenbeschuss aus dem kollabierten Stern entstehen in den Trümmern schwere Elemente wie etwa Gold – sie verteilen sich als Rohstoff für neue Sterne im Weltraum.

Eine solche Explosionswolke ist der berühmte Krebs-Nebel (Seite 16). Dieser Supernova-Überrest liegt genau an jener Stelle, an der im Jahre 1054 chinesische Gelehrte einen nie zuvor beobachteten Lichtpunkt aufflammen sahen.

Inmitten dieses Trümmerhaufens wiesen Astronomen einen Neutronenstern nach, der eine Besonderheit aufwies: Er verriet sich durch kurze Radioblitzschläge, zurückzuführen auf seine hohe Rotationsgeschwindigkeit. Solche Neutronensterne heißen **Pulsare** (Seite 100).

Eine besondere Klasse von Neutronensternen sind die **Magnetare**, die stärksten bekannten Magnete. Diese Extremsterne speien bei ihren Beben immer wieder Feuerbälle aus hochenergetischen Partikeln ins All – so im Jahr 2004, als der Strahlenausbruch von SGR 1806-20 die irdische Atmosphäre traktierte.

Doch selbst die Beben von Partikelschleudern wie SGR 1806-20 sind noch schwach im Vergleich zu manchen Explosionen, deren Nachleuchten aus der Tiefe des Universums zu uns dringt.

Etwa einmal am Tag registrieren Beobachtungsstationen einen extrem energiereichen Gammastrahlenausbruch. Der Ursprung dieser Blitze war lange Zeit unbekannt. Zumindest für einige der Ausbrüche könnten die größten aller Sterne verantwortlich sein – die seltenen **Hyperriesen**, von denen in der Milchstraße kaum mehr als ein Dutzend bekannt sind.

Manche dieser Giganten werden 200-mal so groß und 100-mal so schwer wie unsere Sonne. Die Wasserstoffvorräte in ihrem Zentrum verfeuern sie in gerade mal zwei Millionen Jahren – nach kosmischen Maßstäben nur ein Augenblick. In ihrem kurzen Dasein schleudern sie



MEHRERE TAUSEND NEUE STERNE haben sich in den Gas- und Staubwolken des Orion-Nebels geformt. Im Zentrum gibt es vier leuchtstarke Sonnen, deren Strahlen die Materie um die jungen Sterne wegblasen und bizarre Strukturen in der Wolke erzeugen

große Gasmassen ins All. So stieß der Riesenstern R Cassiopeiae, der 500 000-mal heller strahlt als unsere Sonne, bei einem vor kurzem beobachteten Ausbruch fast 10 000 Erdmassen ab.

Einige dieser Rekordsterne können, so eine Theorie, als **Hypernova** explodieren. Bei einem solchen Ausbruch kollabiert der rotierende Kern, der jedoch so massiv ist, um sich als Neutronenstern zu stabilisieren.

Tief im Sterninnern konzentriert sich die extrem verdichtete Masse des ehemaligen Kerns. Und es entsteht das ungeheuerlichste aller Himmelsobjekte: ein **Schwarzes Loch** – ein Materieschlund, dessen Anziehungskraft nicht einmal das Licht entkommt (Seite 94).

memo | sterne
»» ALLE STERNE bilden sich in kosmischen Gas- und Staubwolken.
»» BEI EIN BIS ZWEI MILLIONEN Grad Temperatur kann eine neue Sonne zünden.
»» DAS ENDE eines Sterns ist von der Größe abhängig – Giganten explodieren.

Während Gasmassen in das kreiselförmige Loch stürzen, entgeht ein Teil der Materie dem Abgrund – wohl abgelenkt und beschleunigt durch Magnetfelder entlang seiner Rotationsachse. Fast mit Lichtgeschwindigkeit schießen die Partikel als gleißende Fontänen (**Jets**) ins

All. Sie reißen die Sternhülle auseinander und verursachen einen gewaltigen Blitz aus Gammastrahlen.

Liegt die Erde auf oder in der Nähe der Achse eines dieser energiereichen Strahlenbündel, können Teleskope den Ausbruch registrieren. Alle bislang beobachteten Blitze waren mehrere Milliarden Jahre lang unterwegs: Sie stammen also vermutlich von Sternriesen, die in der kosmischen Frühzeit zu Schwarzen Löchern kollabierten.

Bei ihrem Untergang strahlten diese Hyperriesen für einen Augenblick eine Milliarde Mal heller als ihre Heimatgalaxie.

In Nahdistanz von einigen tausend Lichtjahren hätte eine solche Explosion für die Erde verheerende Folgen: Wenn ihre Strahlung nach Tausenden von Jahren bei uns ankäme, würde sie innerhalb von zehn Sekunden große Teile der irdischen Ozonschicht auf Jahre zerstören, die Atmosphäre verdunkeln und einen Klimawechsel herbeiführen.

Eine solche Katastrophe könnte sich, so glauben manche Wissenschaftler, vor 440 Millionen Jahren abgespielt haben.

Damals ging die Hälfte aller im Meer lebenden Tierarten zugrunde – möglicherweise nach einem kosmischen Blitzeinschlag. □

Martin Paetsch, 35, ist Wissenschaftsjournalist in Hamburg.

Atomphysik

Die Physik der Sonnen

Eine Kette komplizierter Kernfusionen liefert den Sternen Energie

Sterne von der Größe der Sonne sind die meiste Zeit ihrer Existenz stabil und gewinnen dabei Energie aus der Verschmelzung von je vier Wasserstoffkernen zu einem Heliumkern. Dieser Prozess findet anfangs im Sonneninneren statt. Allerdings wird der Wasserstoffvorrat eines jeden Sterns durch diese Fusionsprozesse langsam aufgezehrt, und zwar von innen nach außen.

Ist der Wasserstoff im Kern erst einmal verbraucht, verlagern sich die Fusionsprozesse quasi um eine Etage nach oben: in eine Schale um den Kern, wo noch genug Wasserstoff vorhanden ist.

Dadurch erhitzt sich die den Kern umhüllende Schicht; das Gas in dieser Hülle dehnt sich dramatisch aus und kühlt dabei ab – der Stern wird zum Roten Riesen.

Das Zentrum der Sonne dagegen beginnt sich zusammenzuziehen – und erhitzt sich dadurch ebenfalls. In ihm verschmelzen nun je zwei Heliumkerne zu einem Berylliumkern. Dieser verbindet sich gleich darauf mit einem weiteren Heliumkern zu Kohlenstoff.

Fusioniert dieser nun mit einem vierten Heliumkern, entsteht Sauerstoff.

Ist im Zentrum alles Helium verbraucht – bei einem Stern von Sonnengröße nach 100 Millionen Jahren –, besteht dieser fast ausschließlich aus Kohlen- und Sauerstoff.

Nun geschieht im Prinzip das Gleiche wie nach dem Versiegen der Wasserstoffvorräte: Über dem Kohlenstoff-Sauerstoff-Kern – der abkühlt, sich dann zusammenzieht und durch den dabei zunehmenden Druck nun wiederum Hitze produziert – bildet sich eine Schale, in der sich die Heliumfusion fortsetzt.

Das Brennen in der Heliumschale ist jedoch nicht stabil – es springt an und stockt wie ein stotternder Motor. Immer wenn es wieder aufflackert, dehnt sich die brennende Schicht aus, wodurch der Stern schließlich sogar seine Hülle abstößt.

Der nun exponierte Sonnenkern, der nur noch etwa 60 Prozent der ursprünglichen Sonnenmasse hat, besteht aus extrem dichtem Material (Kohlenstoff, Sauerstoff sowie Elektronen) und kühlt ab: ein langsam ausglühender Sternenrest. Die frühere Hülle dieses erdgroßen Weißen Zwerges existiert noch mehrere zehntausend Jahre als planetarischer Nebel, ehe sie in interstellaren Gaswolken aufgeht. *Birgit Fuhrmeister*