

HANS KLEFFE

# Lebenslauf der Sterne









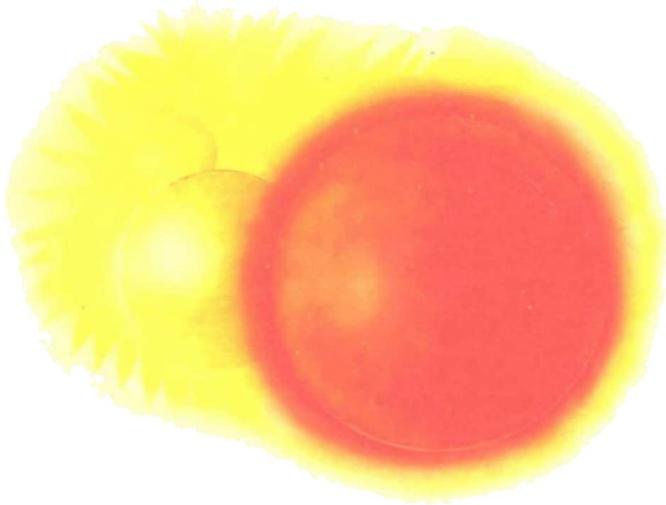
Hans Kleffe Lebenslauf der Sterne

**Wir erforschen die Natur**

Hans Kleffe

# Lebenslauf der Sterne

Illustrationen von Gerd Ohnesorge



Der Kinderbuchverlag Berlin

**ISBN 3-358-00361-2**

## Schauspiel im Weltall

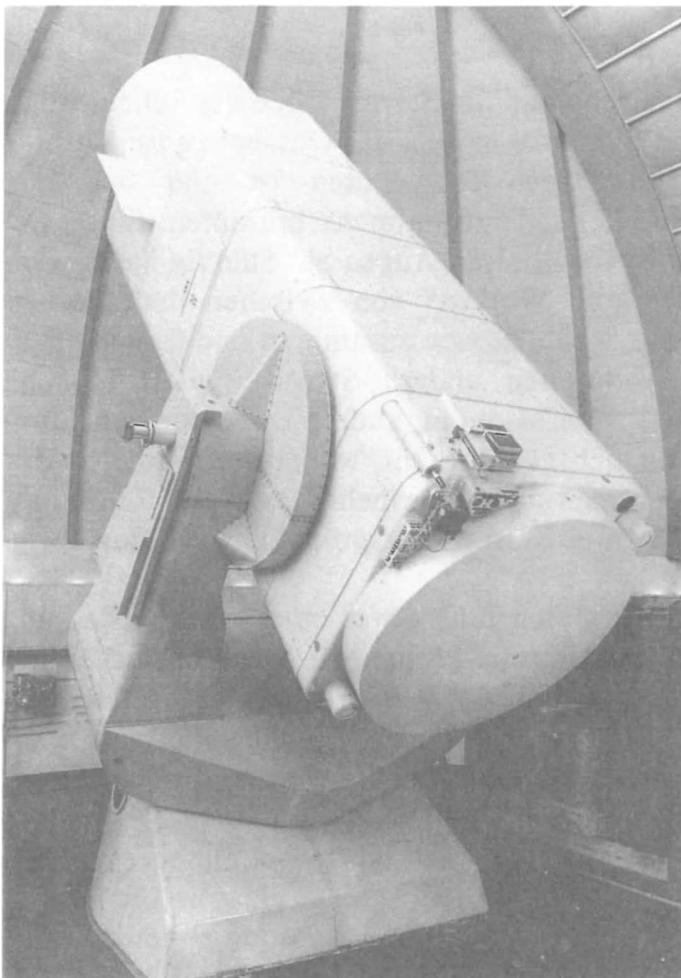
Ewig unveränderlich erscheinen die Sterne. Doch der Schein trügt. Stellen wir uns einen Film vor, in dem das Geschehen im Kosmos durch ein Zeitrafferverfahren festgehalten ist und bei dem 100 000 Jahre zu einer Sekunde zusammenschrumpfen. Ein aufregendes Schauspiel rollt vor unseren Augen ab. Ständig ballen sich neue Himmelskörper aus „Wolken“ von zwischen den Sternen schwebenden Gas- und Staubteilchen zusammen und fangen an zu leuchten. Dagegen verlöschen andere Sterne wieder. Manche leuchten nicht einmal zehn Minuten, andere Dutzende von Stunden. Dann blähen sie sich gewaltig auf, wobei ihre Farbe in Rot übergeht. Schließlich blasen sie immer mehr Gas in den Raum hinaus, so daß nur ein kleiner Kern des ursprünglichen Sterns übrigbleibt.

Verlangsamen wir die Zeitraffung etwas oder schalten sie ganz aus, dann erblicken wir Himmelskörper, die abwechselnd größer und kleiner werden, sie pulsieren. Es sieht so aus, als atmeten sie. Schalten wir gar auf Zeitlupe, bei der die Vorgänge langsamer ablaufen als in Wirklichkeit, dann finden wir Sterne, die ihre Strahlung wie ein Blinkfeuer aussenden.

Immer wieder bieten sich uns auch besonders atemberaubende Anblicke: Plötzlich zerplatzen Sterne in einer gigantischen Explosion. Dabei leuchten sie so hell auf wie Milliarden anderer Sterne zusammengenommen. Sie schleudern den größten Teil ihrer Materie mit Geschwindigkeiten von Tausenden Kilometern je Sekunde rundum in den Raum hinaus. Diese Materiewolken rasen weiter durch das All. Dabei verstreuen und verdünnen sie sich in immer größeren Räumen. Schließlich beobachten wir, wie sich aus Wolken solcher und anderer zwischen den Sternen befindlicher Gas- und Staubmaterie wieder neue Sterne bilden.

### *Sternexplosion lieferte irdische Materie*

Unsere Sonne und ihre Planeten, einschließlich der Erde und allem, was auf ihr lebt – wir Menschen nicht ausgenommen –, bestehen aus Materie, die vor vielen Milliarden Jahren schon einmal Be-



Spiegelteleskop des  
Karl-Schwarzschild-  
Observatoriums Tau-  
tenburg der Akademie  
der Wissenschaften  
der DDR

standteil eines explodierten Sterns gewesen sein muß. Denn die Materie unseres Sonnensystems enthält unter anderem auch chemische Elemente (Grundstoffe), die schwerer als Eisen sind. Sie können nur anlässlich solcher Sternkatastrophen entstehen. Ist es nicht ein eigenartiger Gedanke, daß wir gewissermaßen einem explodierten Stern entstammen?

Sterne leben also – freilich nicht in dem Sinne wie Pflanzen, Tiere und Menschen. Doch sie werden geboren, durchlaufen verschiedene Phasen der Entwicklung, um dann auf die eine oder andere Weise zu Gebilden zu werden, die fortan als – im doppelten Sinne des Wortes – tote Materieklumpen ihre Bahnen durch das All ziehen. Mindestens zwei Generationen von Sternen sind in der

bisherigen Geschichte des Universums schon aufeinandergefolgt.

Das dramatische Geschehen im Kosmos, das unser Gedankenfilm in Zeitraffung und Zeitlupe festhielt, ist in Wirklichkeit nicht direkt zu beobachten, weil ein Menschenleben nur Jahrzehnte dauert. Selbst die Messungen durch viele Generationen von Astronomen aneinandergereiht ergäben erst wenige Jahrtausende. Läßt man davon nur solche gelten, die mit modernen Instrumenten hoher Genauigkeit erfolgten, dann konnte der Mensch die Vorgänge im Weltall sogar erst rund ein Jahrhundert verfolgen. Das Leben der Sterne vollzieht sich aber in zeitlichen Größenordnungen von Millionen und Milliarden Jahren. Eine über Jahrzehnte hin dauernde Beobachtung des Himmels ist für kosmische Zeitmaßstäbe also nichts weiter als eine Art Momentaufnahme, die nur einen winzigen Augenblick des Geschehens festhält. Ist es angesichts dieses Umstands nicht vermessen, wenn die Astronomen etwas über die Entwicklung der Sterne zu wissen glauben?

### *Detektive im Kosmos*

Leicht war es tatsächlich nicht, unter diesen Bedingungen die Geheimnisse der Sterne zu enträtseln, noch dazu, da sie in für uns unerreichbaren Fernen schweben. Einzig die elektromagnetischen Wellen wie das Licht, die Strahlungen im Radiowellenlängenbereich und die Röntgenstrahlen, die von den Himmelskörpern ausgesandt werden, stehen uns als Hinweise zur Verfügung. Aus ihnen muß alles Weitere entschlüsselt werden. Die Arbeit der Astrophysiker (Sternphysiker) ist deshalb mit der von Kriminalisten vergleichbar, die aus Anhaltspunkten wie Fingerabdrücken, Fusseln von Kleidungsstücken, Lacksplittern und anderem den Hergang eines Verbrechens rekonstruieren müssen, das sie selbst nicht beobachtet haben.

Die Radiostrahlung aus dem Weltall können wir erst seit den dreißiger Jahren unseres Jahrhunderts empfangen. Sie stammt übrigens nicht von irgendwelchen technischen Sendern auf anderen Himmelskörpern. Wie alle elektromagnetischen Wellen wird sie auf Grund der Temperatur der Objekte ausgestrahlt und ist somit natürlichen Ursprungs. Weitere Quellen der Radiostrahlung

bilden Vorgänge, die mit äußerst großer Geschwindigkeit ablaufen, sowie Prozesse, die mit dem physikalischen Zustand der Materie zusammenhängen. Röntgenstrahlen aus dem Weltall lassen sich genauer erst registrieren, seit es künstliche Erdsatelliten gibt, die auf Bahnen jenseits der Lufthülle unseren Planeten umlaufen. Denn in der Erdatmosphäre bleiben Röntgenstrahlen stecken, so daß sie nicht bis zur Erdoberfläche gelangen.

Alle diese Beobachtungen und Messungen genügten aber noch nicht, dem Leben der Sterne auf die Spur zu kommen. Es bedurfte der Anwendung modernster Erkenntnisse der Physik, um mit den Daten aus dem Sternenlicht etwas anfangen zu können. Und es war der Einsatz elektronischer Rechenautomaten, der Computer, notwendig, die zu den wichtigsten Hilfsmitteln des modernen Astrophysikers gehören. Denn es mußten so umfangreiche Berechnungen durchgeführt werden, wie sie mit Bleistift und Papier und auch mit mechanischen Rechenmaschinen nur schwer möglich sind, weil diese Rechenweisen dafür viel zu zeitaufwendig sind. Computer allein nützten allerdings noch nichts. Man mußte Programme ausarbeiten, nach denen die Automaten rechnen konnten.

Das Leben der Sterne zu enträtseln war ein atemberaubendes Abenteuer der Wissenschaft, eine der bewundernswertesten Leistungen des menschlichen Geistes. Verfolgen wir nun einiges von dem, was Astrophysiker erforscht haben.

## Wie Sterne geboren werden

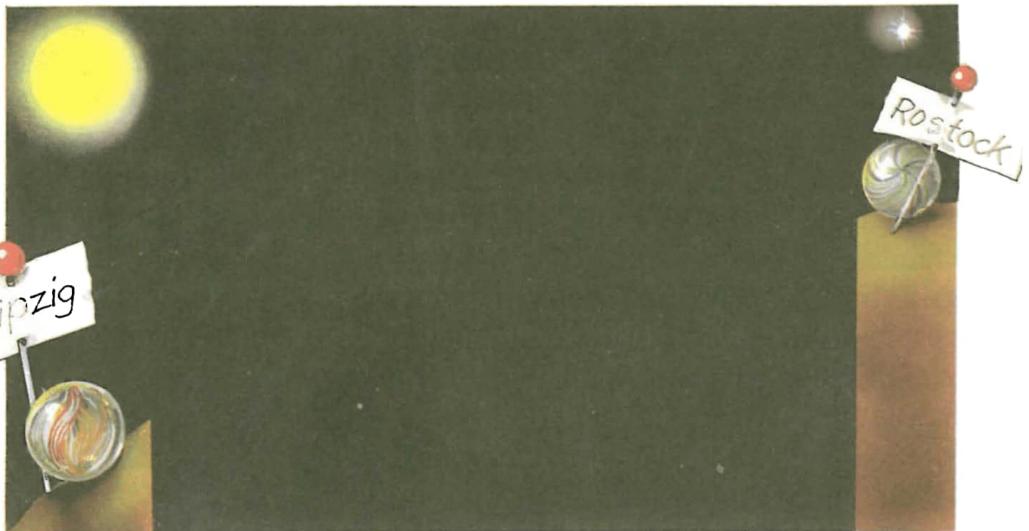
Das Weltall ist nicht „fertig“. Auch heute und in Zukunft werden noch Sterne geboren. Über ihre Entstehung gibt es bisher allerdings erst weniger genaue Erkenntnisse als über die meisten Stadien ihrer späteren Entwicklung. Doch besteht bei den Astronomen fast völlige Übereinstimmung darin, daß sich neue Sterne durch allmähliche Verdichtung der zwischen den bereits vorhandenen Sternen befindlichen Gas- und Staubböden bilden. Diese bezeichnet man als interstellare Materie (lateinisch: *inter* = zwischen; *stella* = Stern). Die Staubteilchen haben einen Durchmesser von nur etwa 1 zehntausendstel mm, die Gasteilchen sind noch sehr viel kleiner.

Interstellare Materie hat eine äußerst geringe Dichte. Unter Dichte versteht man die Masse der Materie, welche in einem bestimmten Raumteil, beispielsweise in  $1\text{ cm}^3$ , enthalten ist. In weiten Teilen des Weltalls befindet sich in  $1\text{ cm}^3$  nur ungefähr 1 Gasteilchen. Zum Vergleich: Die Luft in der Nähe der Erdoberfläche enthält  $26\,850\,000\,000\,000\,000\,000$  Gasteilchen/ $\text{cm}^3$ . Da die Abstände der Sterne voneinander jedoch sehr groß sind, ist auch der zwischen ihnen befindliche Raum so riesig, daß er trotz der äußerst geringen Dichte derart gewaltige Mengen interstellarer Materie bergen kann, wie sie für die Bildung von Sternen ausreicht.

### *Wie leer ist der Weltraum?*

Die unvorstellbaren Weiten des interstellaren Raums wollen wir uns etwas veranschaulichen. Die Sonne hat einen Durchmesser von 1,392 Millionen km. Das entspricht ungefähr dem 110fachen Durchmesser der Erde von rund 12 700 km und dem etwa 1,3millionenfachen Volumen (Rauminhalt) unseres Planeten. Der nächste Nachbar der Sonne, der Stern Proxima Centauri, ist 4,3 Lj (Lichtjahre) von ihr entfernt. Das Lichtjahr ist eine Art „Metermaß“ der Astronomen: Es ist die Strecke, welche das Licht bei seiner Ausbreitungsgeschwindigkeit von 300 000 km/s innerhalb eines Jahres zurücklegt. Das sind 9 460 000 000 000 km. Danach können wir errechnen, daß der Abstand des nächsten Nachbarn unserer Sonne das 29 224 554fache ihres Durchmessers beträgt. Ein Vergleich: Von der Erde ist die Sonne ungefähr 150 Millionen km entfernt. Das entspricht dem 11 811fachen Erddurchmesser. Das Licht durchellt diese Strecke innerhalb von 8 1/3 min.

Verkleinern wir in Gedanken die Sonne auf die Größe einer Murmel von 1 cm Durchmesser, dann befände sich – bei gleichem Maßstab – der Proxima Centauri erst in 29 224 554 cm = rund 292 km Entfernung. Das entspricht etwa dem Abstand zwischen Rostock und Leipzig. Je eine Murmel in diesen beiden Städten und dazwischen gähnende Leere – das ist maßstäblich verkleinert der „Bauplan“ des Universums in der Umgebung unserer Sonne. In anderen Regionen des Weltalls sind die Abstände der Sterne voneinander noch größer. Die unermeßlichen leeren Räume zwischen



Denken wir uns die Sonne und ihren nächsten Nachbarstern Proxima Centauri auf je eine Murmel von nur 1 cm Durchmesser verkleinert, dann wäre im gleichen Verkleinerungsmaßstab die Entfernung zwischen ihnen so groß wie zwischen Leipzig und Rostock. Das veranschaulicht die riesigen Abstände der Sterne voneinander.

den Himmelskörpern erklären, warum die interstellare Materie trotz ihrer geringen Dichte insgesamt eine beträchtliche Masse darstellt.

Sie ist aber nicht gleichmäßig über den Raum zwischen den Sternen verteilt. Vielmehr gibt es örtliche Unterschiede ihrer Dichte. An manchen Stellen ist sie wolkenartig zusammengeballt. Dort befinden sich Tausende bis Millionen Teilchen in einem Kubikzentimeter, dort können neue Sterne entstehen.

Damit dieser Prozeß in Gang kommt, muß an einer Stelle eine besondere Verdichtung entstehen. Das passiert vermutlich sehr oft und an vielen Stellen. Denn ebenso wie die Sterne befinden sich die Teilchen der interstellaren Materie in ständiger Bewegung. Es gibt im gesamten Weltall keine unbewegten Körper. Ihre Bewegung verläuft jedoch nicht immer geordnet; zumindest teilweise ist sie ungeordnet, turbulent. Dadurch entstehen lokale Zusammenballungen, in denen etwas mehr Teilchen je Raumeinheit vorhanden sind als in der Umgebung.

Noch andere Ursachen für die Verdichtung zu solchen Wolken kommen hinzu. Von den Sternen, so auch von der Sonne, strömen ständig Teilchen atomarer, also winzigster Größe mit riesigen Ge-

schwindigkeiten nach allen Richtungen in den Weltraum hinaus. Bei der Sonne bezeichnet man diesen Teilchenstrom als Sonnenwind. Er „durchweht“ das ganze Planetensystem. Von manchen Sternen gehen vermutlich noch viel stärkere Winde aus. Wenn sie auf eine Wolke interstellarer Materie treffen, können sie in dieser eine weitere Verdichtung bewirken.

„Explodierende“ Sterne schleudern – wie erwähnt – Materiewolken mit Geschwindigkeiten von Tausenden von Kilometern je Sekunde aus. Treffen so schnell bewegte Materiateilchen auf interstellare Wolken, tragen sie gleichfalls zu deren Verdichtung bei. Schließlich wandern durch das gesamte Milchstraße genannte System – dem unsere Sonne angehört und das etwa 100 Milliarden, nach neueren Berechnungen sogar 200 Milliarden Sterne umfaßt – wellenförmige Verdichtungen interstellarer Materie. Auch sie vermögen die Verdichtung kosmischer Gas- und Staubwolken auszulösen.

## Urkraft Gravitation

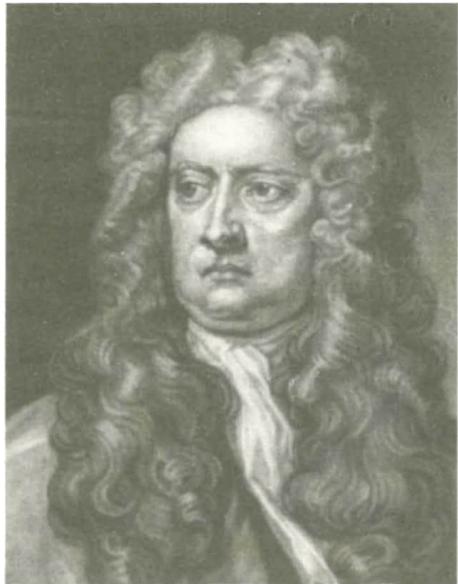
Nun besteht zwischen allen Körpern – und auch die Gas- und Staubteilchen sind in diesem Sinne kleine Körper – eine gegenseitige Anziehungskraft. Sie hat nichts mit Magnetismus zu tun. Diese Anziehungskraft, die der englische Physiker Isaac Newton (1643–1727) erkannte, wird als allgemeine Massenanziehungskraft oder Gravitation bezeichnet. Ihre Stärke ist von der Größe der Masse der einander anziehenden Körper und von der Entfernung zwischen ihnen abhängig. Mit der Größe der Massen nimmt sie zu, mit dem Quadrat des Abstands zwischen ihnen nimmt sie ab.

Da in einer Region verdichteter interstellarer Materie je Raumseinheit mehr Masse angesammelt ist, übt diese eine stärkere Anziehungskraft auf die Teilchen in der Umgebung der Zusammenballung aus. Dadurch werden immer mehr Teilchen zu der bereits vorhandenen Materieansammlung hin angezogen.

Auch innerhalb der verdichteten Stelle selbst nähern sich die Teilchen stärker an.

Das geht aber nicht unter allen Bedingungen endlos so weiter. Bald macht sich eine Gegenkraft bemerkbar. Mit der Verdichtung

Isaac Newton (1643–1727) entdeckte eines der grundlegenden Naturgesetze, die allgemeine Massenanziehungskraft, auch Gravitation genannt.



steigen nämlich die Temperatur und der Druck in dem Gas an. Der Druck ist bestrebt, die interstellare Materie wieder auseinanderzutreiben, wirkt also der weiteren Verdichtung entgegen.

Das können wir uns durch einen Versuch mit der Fahrradluftpumpe veranschaulichen. Halten wir das kleine Loch, durch welches die Luft in den Schlauch gepreßt wird, fest zu und drücken den Kolben in das zylinderförmige Rohr hinein, dann erhöht sich darin der Lufdruck. Sobald wir den Handgriff des Kolbens loslassen, bewegt er sich von selbst rückwärts. Denn die zusammengedrückte Luft dehnt sich jetzt wieder aus.

Ein Gegeneinander von Gravitation und Gasdruck in der interstellaren Materie führt daher häufig dazu, daß sich entstandene leichte Zusammenballungen wieder auflösen.

Damit sich eine interstellare Wolke weiter verdichten kann, muß die durch den erhöhten Druck entstandene Wärme abgeleitet werden. Sonst würde die Erhöhung der Temperatur auch zu einer solchen Steigerung des Drucks führen, daß eine zunehmende Verdichtung nicht möglich wäre. Für die Ableitung der Wärme aus der Wolke spielt der in ihr enthaltene kosmische Staub eine entscheidende Rolle: Er wirkt gewissermaßen als Kühlmittel, weil er die aufgenommene Wärme in Form einer unsichtbaren infraroten Strahlung wieder ausstrahlt. (Das Infrarot ist eine elektromagneti-

sche Wellenstrahlung wie das Licht, jedoch von größerer Wellenlänge als dieses.) Ist diese Kühlung ausreichend, dann verdichtet sich die Wolke mehr und mehr. Die Teilchen fallen immer weiter in Richtung auf das Zentrum der Wolke.

### *Eine Formel für Sterngeburten*

Der englische Astrophysiker James Jeans (1877–1946) berechnete 1926, daß die Gravitation das Übergewicht über den Gasdruck erlangt, wenn sich eine genügend große Masse interstellarer Materie zu einer Wolke zusammenballt. Die Größe dieser Jeansschen Masse hängt von Bedingungen ab, so von der Temperatur, welche die Wolke bei Beginn des Prozesses hat, und von deren Dichte. In jedem Fall muß die Masse sehr viel größer sein als die unserer Sonne. Sie kann bis zum Viertausendfachen davon betragen. Ist die notwendige, wie die Fachleute sagen kritische Masse erreicht oder überschritten, dann verdichtet sich die Wolke weiter. Sie stürzt – getrieben vom Übergewicht der Gravitation – gewissermaßen in sich selbst zusammen. Das vollzieht sich allerdings sehr langsam, im Verlauf einer oder einiger Millionen Jahre.

Während dieses Prozesses zerfällt die Wolke in der Regel später in mehrere Teilwolken. Da die erwähnte kritische Masse auch von der Dichte abhängt und diese während des Zusammenstürzens weiter angestiegen ist, vermögen sich jetzt die einzelnen Teilwolken noch stärker zu verdichten. Dabei kann sich aus jeder von ihnen ein eigener Stern bilden. Tatsächlich deuten Beobachtungen von Gebieten des Weltraums, in denen vermutlich Sterngeburten im Gange sind, darauf hin, daß dort nicht nur ein Stern, sondern viele Sterne etwa gleichzeitig entstehen. Eine solche Gruppe kann Dutzende, Hunderte und sogar Tausende von Sternen umfassen.

### *Wolken – 2,5millionenmal größer als die Sonne*

Teilwolken sind noch keine Sterne. Zunächst sind sie riesig groß und haben eine, verglichen mit Sternen, sehr geringe Dichte. Eine Teilwolke von der Masse unserer Sonne kann zum Beispiel den

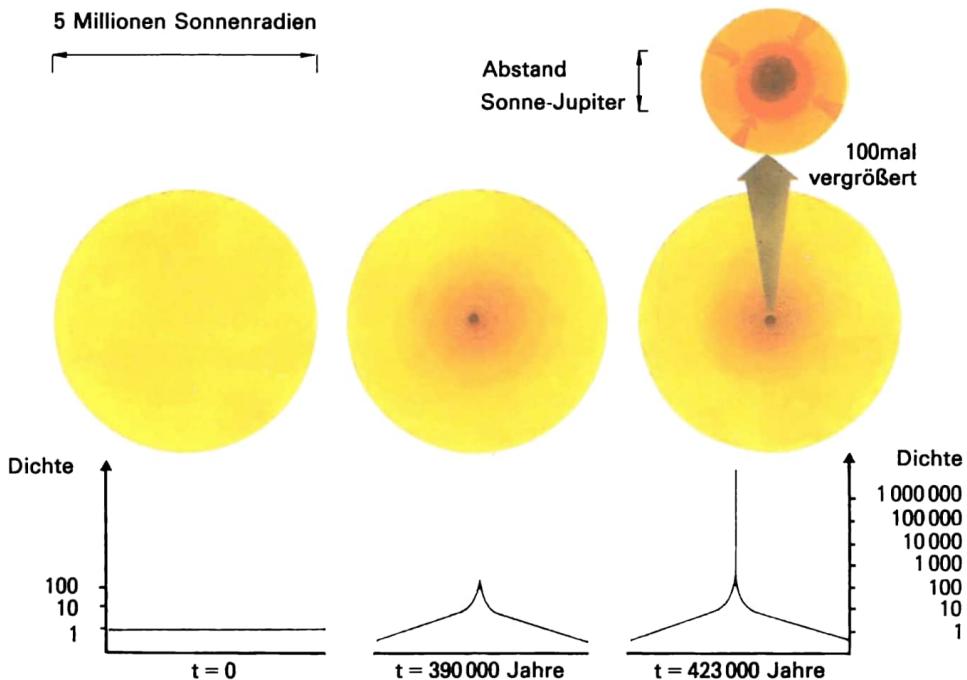
2,5millionenfachen Sonnendurchmesser haben. Das ist reichlich 1/3 Lj. Die Teilwolke, aus der die Sonne hervorging, könnte also zuvor einen Raum erfüllt haben, der viel weiter reichte als das heutige Planetensystem bis einschließlich der Bahn des fernsten Planeten Pluto. Dieser ist im Mittel etwa 40mal weiter von der Sonne entfernt als die Erde, nämlich 5 946 Millionen km.

Wenden wir wieder den gleichen Verkleinerungsmaßstab wie zuvor an, bei dem wir die Sonne zur Größe einer Murmel von 1 cm Durchmesser schrumpfen ließen, dann hätte ihre Ursprungswolke 2,5 Millionen cm = 25 km Durchmesser, die Plutobahn dagegen nur 85 m, die Erdbahn 2,15 m. Es wird uns deshalb nicht verwundern, daß die weitere Verdichtung zum Stern nochmals viele Jahrtausende oder gar eine Jahrmillion dauert. Wie rasch sie vorstatten geht, hängt von der Masse der Wolke ab. Je größer die Masse, desto schneller vollzieht sich die Verdichtung.

### *Sterne, vom Computer konstruiert*

Das Schicksal einer Teilwolke – angenommen von der Masse unserer Sonne – läßt sich mit einem Computer berechnen. Dabei werden gewisse Vereinfachungen vorgenommen. So geht man von einer nichtrotierenden Teilwolke aus, die den fünfmillionenfachen Durchmesser der heutigen Sonne hat. Ihre anfängliche Dichte wird mit 10 Wasserstoffatomen/cm<sup>3</sup> angenommen. Auf Grund der Gravitation stürzt die Wolke weiter in sich zusammen, wobei ihre Dichte zunimmt, am stärksten in der zentralen Region. Beim Herabstürzen der Gas- und Staubteilchen in Richtung auf das Zentrum wird Energie frei. Dies müßte eigentlich zur Erwärmung der Wolke führen. Das geschieht aber zunächst nicht, weil die Energie in Form von Strahlung – aber nicht als sichtbares Licht – ungehindert nach außen in den Weltraum abgegeben werden kann. Denn die Dichte der Wolke ist anfangs so gering, daß die Strahlung durch sie hindurchgeht, ohne von den Gasteilchen absorbiert, verschluckt zu werden.

Da die weitere Verdichtung im Zentrum der Wolke am stärksten ist, bildet sich dort jedoch allmählich ein für Strahlung nicht mehr ganz durchlässiger Kern. Deshalb erhitzt er sich, und der Gasdruck



Schematische Darstellung der Verdichtung einer Wolke interstellaren Gases und Staubs zu einem Stern (nach Computerberechnungen). Links: Die Wolke, die genauso viel Masse enthält wie unsere Sonne, ist zunächst so wenig dicht, daß sie einen Raum vom 2,5millionenfachen Sonnendurchmesser füllt. Mitte: Nach 390 000 Jahren ist bereits eine Verdichtung entstanden. Rechts: 423 000 Jahre nach Beginn des Vorgangs hat sich in der Mitte der Wolke ein Kern gebildet. Seine Dichte ist bereits über einmillionenmal größer als die der ursprünglichen Wolke. Darüber ist der Kern der Wolke nochmals gesondert gezeichnet und vergrößert dargestellt. Die gepfeilte senkrechte Strecke symbolisiert den Abstand Sonne – Jupiter. Der Kern ist also noch immer riesig groß, denn die Jupiterbahn befindet sich 778,3 Millionen km von der Sonne entfernt, das ist die 5,2fache Entfernung Sonne – Erde.

Infolge der Gravitation stürzen auf den Kern immer mehr Teilchen der Wolke herab, bis ein „fertiger“ Stern entstanden ist.

in seinem Inneren steigt an. Dadurch wird die weitere Verdichtung des Kerns jetzt gebremst. Er stürzt zunächst nicht weiter in sich zusammen.

Diesen Kern bezeichnet man als Protostern. Das bedeutet Sternvorstufe.

Der Protostern enthält erst einen Bruchteil der späteren Sonne. Der mit Abstand größte Teil der Materie befindet sich noch in der sehr ausgedehnten Hülle rund um den Protostern.

Aus dieser Hülle regnen nun die Teilchen immer weiter auf den Protostern herab. Beim Aufprall wandelt sich ihre Bewegungsener-

gie in Wärme um. Die Temperatur des Protosterns steigt an. Er sendet jetzt Radiowellen-, Wärme- und Lichtstrahlen aus. Das sichtbare Licht wird jedoch insbesondere von den in der Hülle enthaltenen Staubteilchen absorbiert, so daß er von außerhalb der Wolke nicht sichtbar ist. Radiowellenstrahlung dringt aber bereits nach außen. Die Licht- und Wärmestrahlen des Protosterns heizen den in der Hülle enthaltenen Staub auf, der nun ebenfalls Wärmestrahlen aussendet.

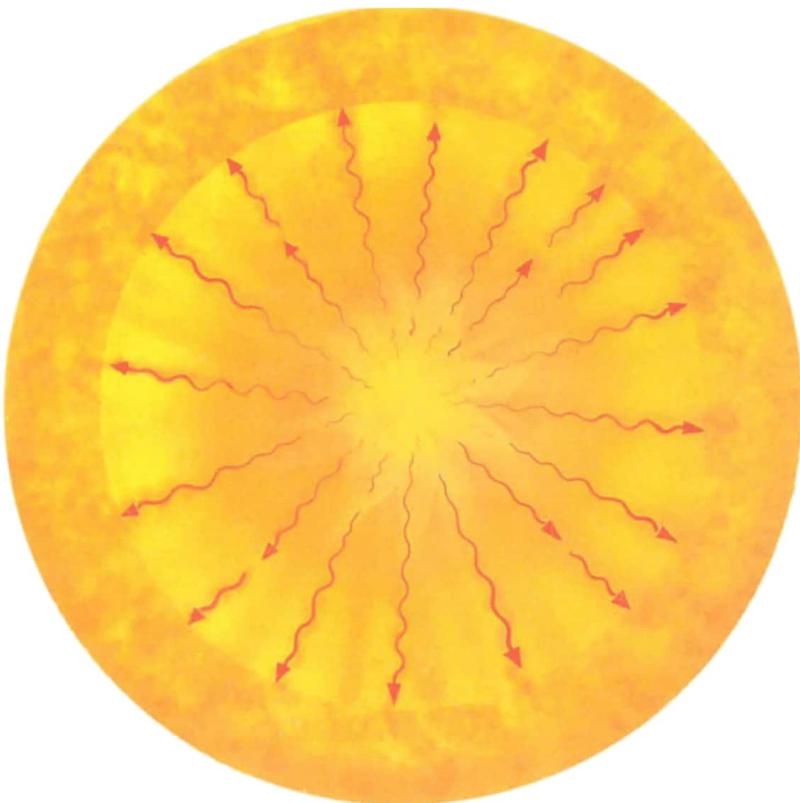
Aus Himmelsgegenden, in denen Sterne entstehen, sind tatsächlich Radiowellen- und Wärmestrahlen zu empfangen. Wärmestrahlen werden auch als Infrarotstrahlen bezeichnet. Sie sind für das menschliche Auge unsichtbar, können aber mit speziellen Geräten registriert werden.

### *Wann beginnt das „Leben“ eines Sterns?*

Die Computerberechnungen zeigen, daß allmählich alle Gas- und Staubteilchen der Hülle auf den Protostern herabstürzen. Immer größer wird damit das Gewicht der Materiemassen, die auf seiner Zentralregion lasten. Druck und Temperatur steigen im Zentrum gewaltig an. Wenn dort etwa 10 Millionen K (Kelvin) erreicht sind, dann ist aus dem Protostern ein „fertiger“ Stern, in unserem Beispiel die Ursonne, entstanden. (In der Physik werden Temperaturen in der Kelvin-Skale angegeben. Sie zählt nicht wie die Celsius-Skale vom Gefrierpunkt des Wassers an ab- und aufwärts, sondern nur aufwärts, und zwar vom absoluten Nullpunkt an. Dieser bezeichnet die niedrigstmögliche Temperatur von  $-273,15^{\circ}\text{C}$ . Minusgrade hat die Kelvin-Skale also nicht.)

Jetzt tritt im Leben des Sterns eine entscheidende Wende ein, ja, eigentlich beginnt sein Leben nun erst. Das ausschlaggebend Neue nennen die Astrophysiker kurz das Wasserstoffbrennen. Dabei werden gigantische Energien freigesetzt.

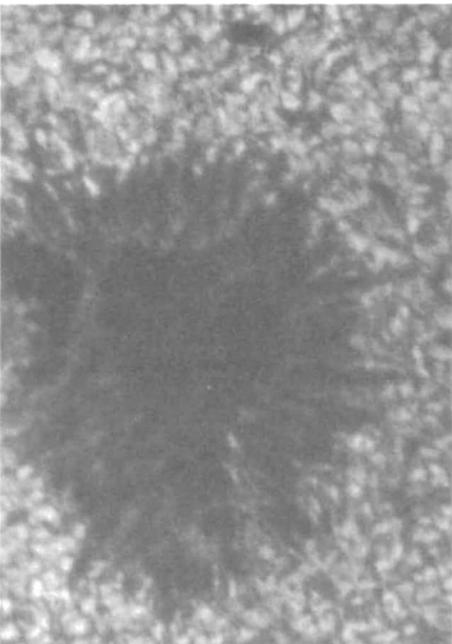
Der Computer errechnete für die Ursonne eine Größe, die nur um 8 Prozent kleiner als die heutige, und eine Oberflächentemperatur, die um 180 K niedriger als die gegenwärtige von etwa 5 800 K war. Das könnte der Zustand der Ursonne vor 4,5 bis 5 Milliarden Jahren gewesen sein. Daß die Sonne nicht älter als höchstens



Der Transport der Energie, die im Zentrum eines Sterns frei wird, nach außen erfolgt teils durch Strahlung (mit geschwungenen Pfeilen dargestellt), teils durch Aufsteigen heißer Gasblasen aus dem Inneren an die Oberfläche (im Bild wolkenartig wiedergegeben). Diese zweite Form des Energietransports beschränkt sich im gegenwärtigen Zustand unserer Sonne auf eine verhältnismäßig schmale Region. Nach neueren Berechnungen dauert es etwa 20 Millionen Jahre, bis die im Zentrum freigewordene Energie an die Sonnenoberfläche gelangt. Ginge im Sonnenzentrum der „Ofen“ aus, dann würde sich daher an der Temperatur der Sonnenoberfläche und der auf der Erde eintreffenden Strahlung lange Zeit kaum etwas ändern.

5 Milliarden Jahre ist, dafür gibt es auch andere Hinweise.

Außerdem ergaben die Rechnungen eine Temperatur im Zentrum der Ursonne von etwa 10 Millionen K bei einer Dichte von  $100 \text{ g/cm}^3$ . Es bedeutet, daß dort in  $1 \text{ cm}^3$  über 13mal mehr Materiemasse zusammengepreßt ist als in  $1 \text{ cm}^3$  Eisen! Wegen der hohen Temperatur kann man die Materie trotzdem als gasförmig betrachten, wenngleich uns ein Gas so viel dichter als Eisen schwer vorstellbar ist. Doch es ist für die Sterne und die interstellare Materie charakteristisch, daß sie sich in Zuständen befinden, wie sie auf der Erde nicht anzutreffen und hier auch gar nicht möglich sind.



Fotoaufnahmen der Sonne, die mit bestimmten Filtern erfolgen, zeigen eine körnige Struktur der Oberfläche. Die einzelnen Körner, Granulen genannt, sind Gasblasen unterschiedlicher Temperatur. Die heißeren werden hell, die kühlern dunkel abgebildet. Außerdem ist im unteren Teil des Bildfeldes ein Sonnenfleck zu sehen. Auch in dem Fleckengebiet ist die Temperatur niedriger als in der Umgebung.

Die Ausgangsmassen der Wolken interstellarer Materie, aus denen sich Sterne bilden, sind in jedem Falle größer als die Masse unserer Sonne. Je masseärmer die Materiewolke, desto niedriger ist die Temperatur im Zentrum des entstehenden Sterns. Wenn sie zu niedrig ist, dann „zündet“ der Wasserstoff nicht und es kann nur ein sogenannter Schwarzer Zwerg entstehen.

Da in seinem Zentrum das Wasserstoffbrennen nicht beginnt, ist der Schwarze Zwerg kein eigentlicher Stern, sondern nur ein sternähnliches Gebilde. Er verbraucht seine Wärmeenergie durch Ausstrahlung in den Weltraum. Da sie nicht ersetzt wird, kühlt er allmählich aus. Seine schon anfangs geringe Leuchtkraft macht ihn für uns unbeobachtbar. Die Existenz der Schwarzen Zwerge lässt sich nur aus theoretischen Erwägungen schlußfolgern.

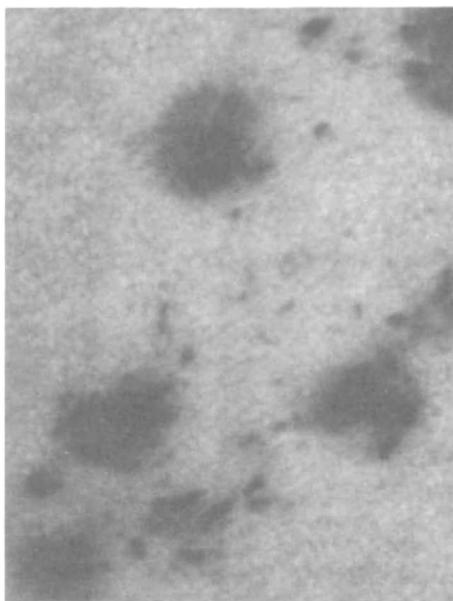
Aus den zuvor genannten Gründen konnte auch der Riesenplanet Jupiter kein Stern werden. Er hat nur knapp 1/1 000 der Sonnenmasse. Zwischen Sternen und Planeten besteht also ein grundlegender Unterschied. Ein Planet ist ein Himmelskörper, der sich um einen Stern bewegt. Gleichwohl werden in der Umgangssprache und in der schöngestigten Literatur die Planeten manchmal als Sterne bezeichnet. Auch das Wort Planet bedeutet soviel wie Wandelstern. Die Astronomen des Altertums, die diesen Begriff präg-

ten, waren sich über den Wesensunterschied zwischen Sternen und Planeten noch nicht im klaren. Sie wußten – von wenigen Ausnahmen abgesehen – ja auch noch nicht, daß sich die Planeten um die Sonne bewegen.

Für die Bildung von Sternen mit mehr als einer Sonnenmasse gibt es kein Hindernis. Es sind Sterne mit etwa 60facher Sonnenmasse bekannt. Die Frühphase ihrer Entstehung verläuft bei Sternen aller Massen im großen und ganzen gleich, bei massereicheren jedoch schneller als bei masseärmeren. Was aber ist das geheimnisvolle Wasserstoffbrennen, mit dem das Leben eines Sterns beginnt? Damit wollen wir uns im nächsten Kapitel beschäftigen.

## Fahndung nach der Sonnenenergie

Die Sonne ist eine riesige Kugel glühenden Gases. Daß es sich nicht einfach in den Weltraum hinein ausbreitet, dafür sorgt die Gravitationskraft. Sie hält die Gaskugel zusammen. Der Druck des Gases bewirkt, daß die Sonne durch die Gravitation nicht immer weiter in sich zusammenfällt. Gravitation und Gasdruck müssen sich die Waage halten, wenn ein Stern stabil bleiben soll. Am heißesten, nämlich etwa 10 Millionen K, ist es im Zentrum der Sonne.

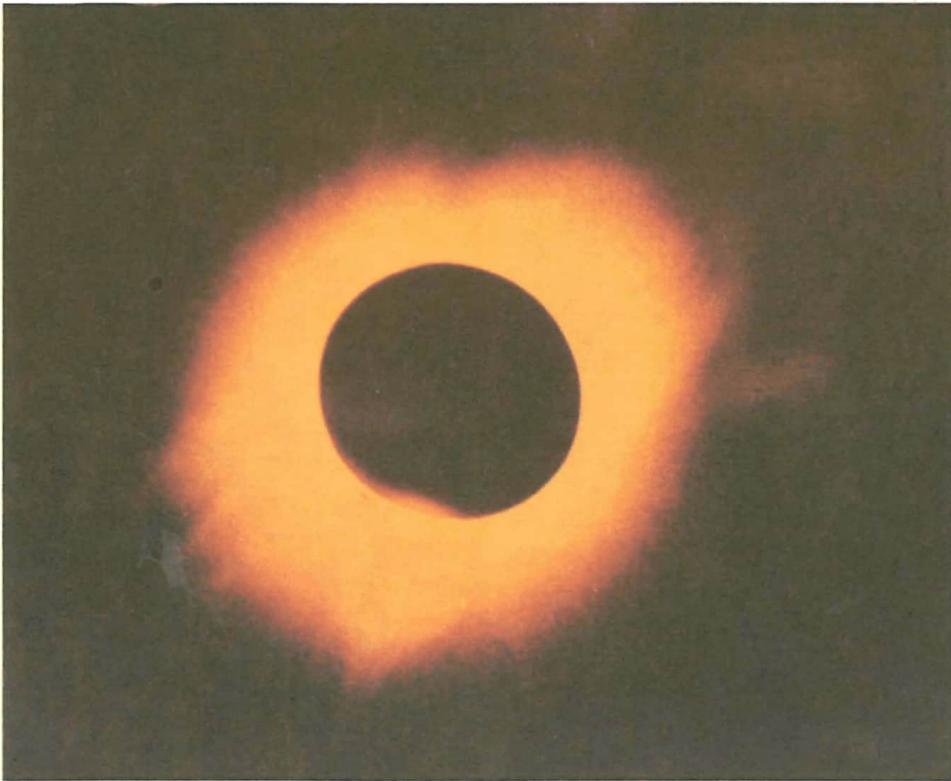


Aufnahme einer Gruppe von Sonnenflecken

(Wärme beruht physikalisch auf der Bewegung von Teilchen atomarer Größe. Je heftiger ihre Bewegung, desto höher die Temperatur. Bei 0 K käme die Wärmebewegung der Teilchen völlig zum Stillstand. Es gibt in der Natur aber keine Teilchen, die eine Temperatur von 0 K haben, also ohne jegliche Wärmebewegung sind. Und es ist auch trotz aufwendiger Experimente bisher nicht gelungen, irgendeinen Stoff künstlich bis auf den absoluten Nullpunkt abzukühlen.)

Wir sprachen davon, daß im Zentrum der Sonne eine Temperatur von rund 10 Millionen K herrscht. Nach außen nimmt sie ab. An der Oberfläche der Sonne beträgt sie nur noch 5 770 K, also weniger als 1/1 000 der im Zentrum. Unaufhörlich strahlt die Oberfläche unvorstellbar große Energiemengen in den Weltraum. Da wir rund 150 Millionen km von der Sonne entfernt sind und die Erde

Die Sonne ist von einem „Kranz“ sehr verdünnten, leuchtenden Gases umgeben. Doch ist diese Korona nur bei totalen Sonnenfinsternissen mit bloßem Auge zu sehen, weil ihre schwache Leuchtkraft von der gleißend hellen Sonne überstrahlt wird.



im Verhältnis zu ihr nur sehr klein ist, fällt lediglich ein winziger Bruchteil der gesamten Sonnenstrahlung auf unseren Planeten, nämlich 1/2 Milliardstel. Dennoch sind das – in ein uns geläufiges Energiemaß umgerechnet – 1,36 Kilowatt auf jeden Quadratmeter! Da diese Strahlung schon mindestens vier Milliarden Jahre im wesentlichen unverändert andauert, muß die Sonne über eine gigantische Energiequelle verfügen. Wie sie funktionieren könnte, darüber zerbrachen sich die Gelehrten lange den Kopf – vergebens.

Bereits im vorigen Jahrhundert berechnete man, daß selbst dann, wenn die Sonne vollständig aus bester Steinkohle bestünde, deren restlose Verbrennung die Strahlung nur etwa 5 000 Jahre aufrecht erhalten würde. Der deutsche Physiker Hermann von Helmholtz (1821–1894) ermittelte, wieviel Energie allein durch die von der Gravitation bewirkte, immer weitere Verdichtung der Sonne frei würde. Er kam zu dem Ergebnis, daß sie etwa 10 Millionen Jahre lang für die Strahlung der Sonne ausreichte.

Auch darin konnte also nicht die Quelle für die ungeheuren Energiemengen liegen.

### *Liefern Himmelssteine Sonnenlicht?*

Auf der weiteren Suche kam man sogar auf eine recht ausgefallene Idee. Im Raum zwischen der Sonne und den Planeten – im interplanetaren Raum – gibt es nicht nur interplanetare Materie, sondern auch viele größere feste Körper, die Meteoriten. Ihre Durchmesser reichen von Bruchteilen eines Millimeters bis zu riesigen Brocken von etwa 10 Millionen t Masse. Gelegentlich fallen kleinere Exemplare solcher „Himmelssteine“ auf die Erde, ganz selten auch sehr große, die dann einen mächtigen Einschlagstrichter erzeugen, wie zum Beispiel den Arizonakrater in Nordamerika von 1 260 m Durchmesser und 175 m Tiefe. Die Sternschnuppen werden ebenfalls durch – allerdings recht kleine – Meteoriten hervorgerufen. Längs ihrer Bahn leuchten in hohen Schichten Gasteilchen der Erdatmosphäre auf.

Die Sonne zieht infolge ihrer riesigen Masse und ihrer entsprechend starken Gravitation besonders viele Meteoriten an. Wenn diese mit hoher Geschwindigkeit – 70 (und vielleicht noch mehr)

km/s – auf die Sonne fallen, wird die in der rasenden Bewegung steckende Energie in Wärme umgewandelt. Könnte diese, der Sonne von außen zugeführte Energie ihre Ausstrahlung speisen?

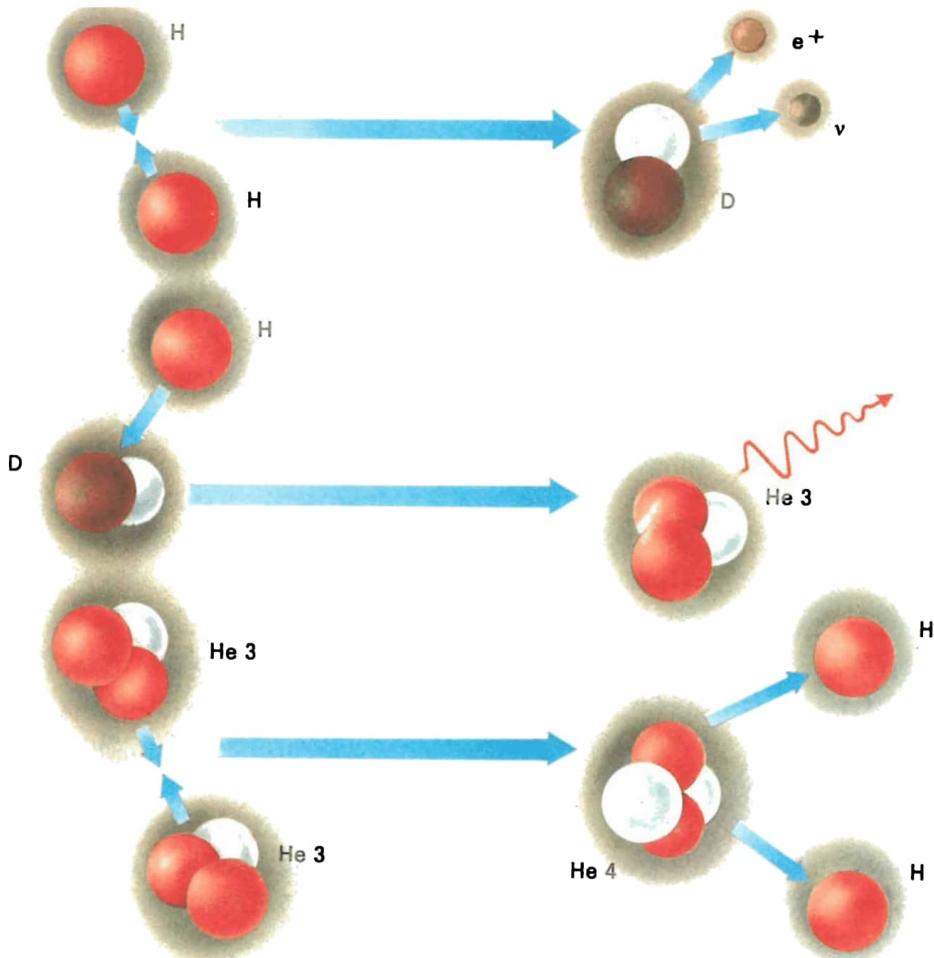
Man errechnete, wieviel Meteoritenmasse jährlich in die Sonne fallen müßte, um die Strahlungsleistung zu ergeben. Es wäre rund ein Hundertstel der Masse der Erde. Nähme die Sonnenmasse in jedem Jahr um diesen Betrag zu, dann würde sich auch ihre Anziehungskraft vergrößern. Das hätte zur Folge, daß die Umlaufbahnen der Erde und der anderen Planeten allmählich enger und ihre Umlaufzeiten kürzer würden. Aus Berichten über Sonnen- und Mondfinsternisse während des Altertums ist aber noch heute zu berechnen, daß die Umlaufzeit der Erde vor 2 000 Jahren nicht länger als heute war. Also scheidet auch dieser Versuch einer Deutung aus.

### *Das Rätsel des Wasserstoffbrennens*

Die richtige Erklärung ahnte der englische Astrophysiker Sir Arthur Eddington (1882–1944). In einem 1926 erschienenen Buch vertrat er die Überzeugung, daß die Strahlung der Sonne nur durch Atomkernenergie gespeist werden kann, und zwar durch die Umwandlung von Wasserstoff in Helium. Bei der Fusion (Verschmelzung) von 1 g Wasserstoff zu Helium wird 20 000 000 mal mehr Energie frei als bei der Verbrennung von 1 g Steinkohle!

Die Sonne besteht zu etwa 70 Prozent aus Wasserstoff und zu 28 Prozent aus Helium. Auf alle übrigen der inzwischen bekannten über 100 Elemente entfallen zusammengenommen nur die restlichen 2 Prozent. Diese Zusammensetzung gilt in etwa auch für die gesamte Materie des Weltalls. Die Erde sowie die ihr ähnlichen Planeten Merkur, Venus und Mars bilden darin eine Ausnahme. In ihnen ist der Anteil der übrigen Elemente viel größer.

Daß die kosmische Materie insgesamt hauptsächlich nur aus Wasserstoff und Helium besteht, ist kein Zufall. Es sind dies nämlich die beiden leichtesten Elemente mit den am einfachsten zusammengesetzten Atomkernen. Atome bestehen aus einem Kern und einer Hülle aus Elektronen, die den Kern – ähnlich wie Planeten die Sonne – auf kreisförmigen oder elliptischen Bahnen umlaufen – freilich in unvorstellbar winzigeren Dimensionen (Ausma-



Schema der Verschmelzung von Wasserstoff- zu Helium-Atomkernen. Oben: Zwei Wasserstoffkerne (H) vereinigen sich zu einem Kern des schweren Wasserstoffs (D = Symbol für Deuterium, was soviel wie schwerer Wasserstoff bedeutet). Dabei werden ein elektrisch positiv geladenes Teilchen, Positron genannt ( $e^+$ ), und ein Neutrino (symbolisiert durch den kleinen griechischen Buchstaben  $\nu$  [sprich: ny]) ausgestrahlt. Mitte: Dringt ein weiterer Wasserstoffkern in den Deuteriumkern ein, dann bildet sich Helium 3 (He 3). Der geschlängelte Pfeil deutet an, daß dabei Energie abgestrahlt wird. Unten: Zwei Kerne des Helium 3 verschmelzen zu einem Atomkern Helium 4 (He 4). Dabei werden zwei Kerne des einfachen Wasserstoffs (H) freigesetzt.

ßen). Der Wasserstoffkern besteht aus nur einem Teilchen, das Proton genannt wird. Es ist elektrisch positiv geladen. Der Heliumkern enthält zwei solcher Protonen und ein oder zwei weitere Teilchen, als Neutronen bezeichnet, weil sie nicht elektrisch geladen, sondern neutral sind.

Wenn sich zwei Wasserstoffkerne, also zwei Protonen, vereinigen, dann bildet sich über eine Kette weiterer Vorgänge, die wir hier nicht im einzelnen verfolgen wollen, ein Heliumkern. Dieser Verschmelzung steht jedoch ein schweres Hindernis entgegen. Da sich gleichnamige elektrische Ladungen gegenseitig abstoßen und die beiden Wasserstoffkerne gleichnamig positiv geladen sind, könnten sie sich eigentlich gar nicht vereinigen. Auf sehr kurze Abstände ist die elektrische Abstößungskraft äußerst stark. Sie kann nur überwunden werden, wenn die beiden Protonen mit besonders hoher Geschwindigkeit und dementsprechend großer „Wucht“ aufeinanderprallen.

## *10 Millionen Kelvin und mehr*

Da die Bewegungsenergie von Teilchen um so größer ist, je höher deren Temperatur, können die Protonen die für die Fusion nötige Wucht bei ausreichend hohen Temperaturen erreichen. Ab etwa 10 Millionen K ist das der Fall. Für unsere Sonne begann das Wasserstoffsieden, als diese Temperatur in ihrem Zentrum entstanden war. Es ist keine wirkliche Verbrennung. Die Fusion von Wasserstoff zu Helium wird nur der Einfachheit und Kürze des Wortes halber von den Astronomen häufig als Wasserstoffsieden bezeichnet.

Außer durch Vereinigung zweier Protonen kann die Umwandlung von Wasserstoff zu Helium auch noch auf Umwegen erfolgen. Dies nennt man kurz den Kohlenstoffzyklus, weil – unter anderem – Kerne des Elements Kohlenstoff dabei eine Art Vermittlerrolle spielen. Die zuerst beschriebene Form der Umwandlung von Wasserstoff zu Helium heißt zum Unterschied davon die Proton-Proton-Kette. Bei 10 Millionen K und etwas darüber überwiegt die Proton-Proton-Kette, bei merklich höheren Temperaturen, wie sie in den Zentren von Sternen mit größeren Massen als der unserer Sonne herrschen, der Kohlenstoffzyklus.

Die Kernfusion kann inzwischen auch auf der Erde künstlich hervorgerufen werden, bislang allerdings nur in explosiver Form. Darauf beruht die Zerstörungskraft der Wasserstoffbombe. Seit den fünfziger Jahren arbeiten Tausende von Wissenschaftlern in den

größeren Industriestaaten angestrengt daran, diesen Prozeß nicht explosiv, sondern langsam und gesteuert ablaufen zu lassen, um daraus nutzbare Energie zu gewinnen. Daß dies bisher trotzdem nicht gelang, beweist, wie schwierig es ist, die Bedingungen dafür zu schaffen. Die Kernfusion würde noch viel mehr Energie liefern als die Kernspaltung in den herkömmlichen Kernkraftwerken.

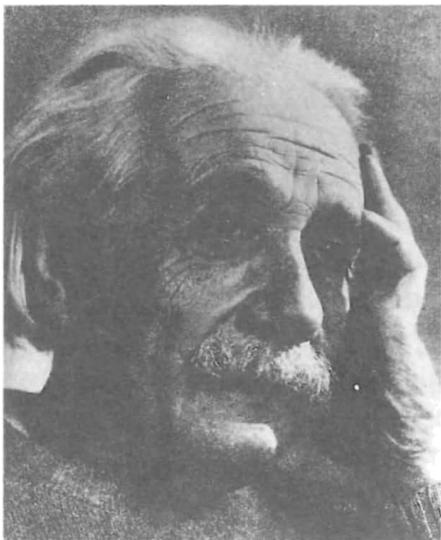
Warum wird bei der Verschmelzung von Atomkernen soviel Energie frei? Die Kerne der verschiedenen chemischen Elemente können heute sehr genau „gewogen“ werden. Das ist allerdings nicht mit gewöhnlichen Waagen möglich, weil die einzelnen Kerne dafür viel zu leicht sind, sondern nur mit komplizierten Apparaturen. Die Massen der Atomkerne werden nicht in Gramm angegeben. Dabei entstünden riesige Zahlenreihen mit einer Null vor dem Komma und mehr als 20 Nullen hinter diesem. Deshalb wird ein spezielles Maß, die atomphysikalische Masseneinheit, auch atomare Masseneinheit genannt, dafür benutzt. Sie hat das Formelzeichen u.  $1 \text{ u} = 0,000\,000\,000\,000\,000\,000\,001\,660\,277 \text{ g}$  oder, anders geschrieben,  $1,660\,277 \cdot 10^{-24} \text{ g}$ .

Der Kern des Wasserstoffatoms ist ein Proton genanntes Teilchen, das eine Masse von  $1,007\,28 \text{ u}$  hat. Die Kerne der anderen Elemente enthalten mehrere Protonen und außerdem Neutronen genannte Teilchen. Ein Neutron hat eine Masse von  $1,008\,67 \text{ u}$ . Da der durch Verschmelzung von Wasserstoffkernen entstehende Atomkern des Heliums aus zwei Protonen und einem oder zwei Neutronen besteht, müßte er eigentlich eine Masse von

$$\begin{aligned} 2 \cdot 1,007\,28 &= 2,014\,56 \text{ u} \\ + 2 \cdot 1,008\,67 &= \underline{\underline{2,017\,34 \text{ u}}} \\ &= 4,031\,90 \text{ u} \end{aligned}$$

haben. In Wirklichkeit beträgt sie jedoch nur  $4,00151 \text{ u}$ . Bei der Fusion von Wasserstoff zu Helium ist also etwas Masse scheinbar verschwunden. Man bezeichnet dies als Massendifferenz oder Massendefekt.

Die fehlende Masse ist aber nicht wirklich verschwunden, sondern hat sich in Energie umgewandelt. Denn wie der Physiker Albert Einstein (1879–1955) erkannte, sind Masse und Energie einander äquivalent, gleichwertig, einander entsprechend. Masse und Energie sind verschiedene Erscheinungsformen der Materie, die sich ineinander umwandeln können. Einstein fand auch die For-



Albert Einstein (1879–1955) entdeckte die Äquivalenz (Gleichwertigkeit) von Masse und Energie. Dies lieferte den Schlüssel zum Verständnis dafür, warum bei der Verschmelzung von leichten zu schweren Atomkernen und anderen Kernumwandlungen sehr große Energiemengen frei werden.

mel für diese Äquivalenz. Sie lautet:  $E = mc^2$ . Darin bedeutet  $E$  die Energiemenge,  $m$  die Masse und  $c$  die Lichtgeschwindigkeit von rund 300 000 km/s. Die Formel in Worten ausgedrückt: Die Energie ist dem Produkt von Masse mal Quadrat der Lichtgeschwindigkeit äquivalent.

Die rechte Seite der obigen Gleichung ergibt eine riesige Zahl, da die Masse mit dem Quadrat der Lichtgeschwindigkeit zu multiplizieren ist:  $300\,000 \cdot 300\,000 = 90\,000\,000\,000$ . Das erklärt, warum schon die winzigen Massendifferenzen, welche bei Kernverschmelzungen auftreten, sehr großen Energiemengen entsprechen. Könnte man ein einziges Gramm Masse restlos in Energie umwandeln, dann ergäbe das eine Energiemenge, die eine elektrische Arbeit von 25 Millionen kWh (Kilowattstunden) zu leisten imstande wäre. Eine solche Energiemenge reichte aus, um die Haushalte und Betriebe einer mittelgroßen Stadt einen ganzen Monat lang mit Elektroenergie zu versorgen.

In der Sonne werden in jeder Sekunde etwa 4 Milliarden kg Masse in Energie umgewandelt. Das lässt uns ungefähr ahnen, welche gigantische Strahlungsleistung sie dadurch in das Weltall abgeben kann.

Da die Masse der Sonne jedoch unvorstellbar groß ist, verliert sie durch den Massendefekt im Verlauf von 10 Milliarden Jahren noch nicht einmal ein Tausendstel ihrer heutigen Masse.

## Kann man die Zukunft der Sonne vorherberechnen?

Daß die Sonne irgendwann erkalten muß, weil jeder „Ofen einmal ausgeht“, und dann alles Leben auf der Erde endet, weil es hier zu kalt wird, ist eine weitverbreitete Meinung. Das Wasserstoffbrennen kann ja nicht endlos weitergehen. Die Sonne enthält zwar riesige, aber nicht unbegrenzte Mengen an Wasserstoff. So erscheint die genannte Meinung einleuchtend. Wollen wir sehen, ob sie auch stimmt.

Es läuft auf die Frage hinaus, ob man nur die Entstehung von Sternen oder auch ihre weitere Entwicklung und ihre Zukunft berechnen kann. Dabei müßten wir an das Ergebnis, das wir für die Ursonne erhalten haben (Seite 16), anknüpfen. Seitdem hat sich in ihrem Zentrum schon einiges Helium, das durch die Verschmelzung von Wasserstoff zusätzlich entstand, angereichert. Bei jeder neuen Million Jahre müssen die Berechnungen daher von einer etwas anderen Zusammensetzung des Sonnenzentrums ausgehen.

Die Berechnungen ergeben, daß sich in den ersten 10 Milliarden Jahren nach Beginn des Wasserstoffbrennens nicht viel ändert. Von dieser Zeit ist inzwischen erst etwa die Hälfte vergangen. Doch wird die Sonne in den 10 Milliarden Jahren auf die ungefähr doppelte Größe anwachsen. Auch die Oberflächentemperatur steigt allmählich. Rund 5 Milliarden Jahre nach der Gegenwart wird es infolge der stärkeren Sonnenstrahlung also schon schwerwiegende Klimaprobleme auf unserem Planeten geben. Denn eine größere Sonnenoberfläche strahlt natürlich auch mehr Licht und Wärme zur Erde.

Im Zentrum der Sonne finden bis dahin wesentliche Veränderungen statt. Immer mehr Helium reichert sich dort an. In 12 Milliarden Jahren, also etwa 7 Milliarden Jahre nach der Gegenwart, ist schließlich aller Wasserstoff im Zentrum verbraucht. Den Kern der Sonne bildet jetzt eine Heliumkugel. Im Sonnenzentrum ist daher kein Wasserstoffbrennen mehr möglich, es beginnt nun in einem Gebiet, das die Heliumkugel schalenförmig umgibt. Von hier aus frißt es sich weiter nach außen. Bis zur Oberfläche der Sonne kann es allerdings nicht vordringen. Denn in den äußeren Bereichen ist die Temperatur für das Wasserstoffbrennen nicht

hoch genug. Das beim „Schalenbrennen“ entstehende Helium wird dem Zentrum einverleibt. Die Heliumkugel im Mittelpunkt der Sonne nimmt dadurch an Größe zu.

### *Wenn die Sonne den Merkur verschluckt*

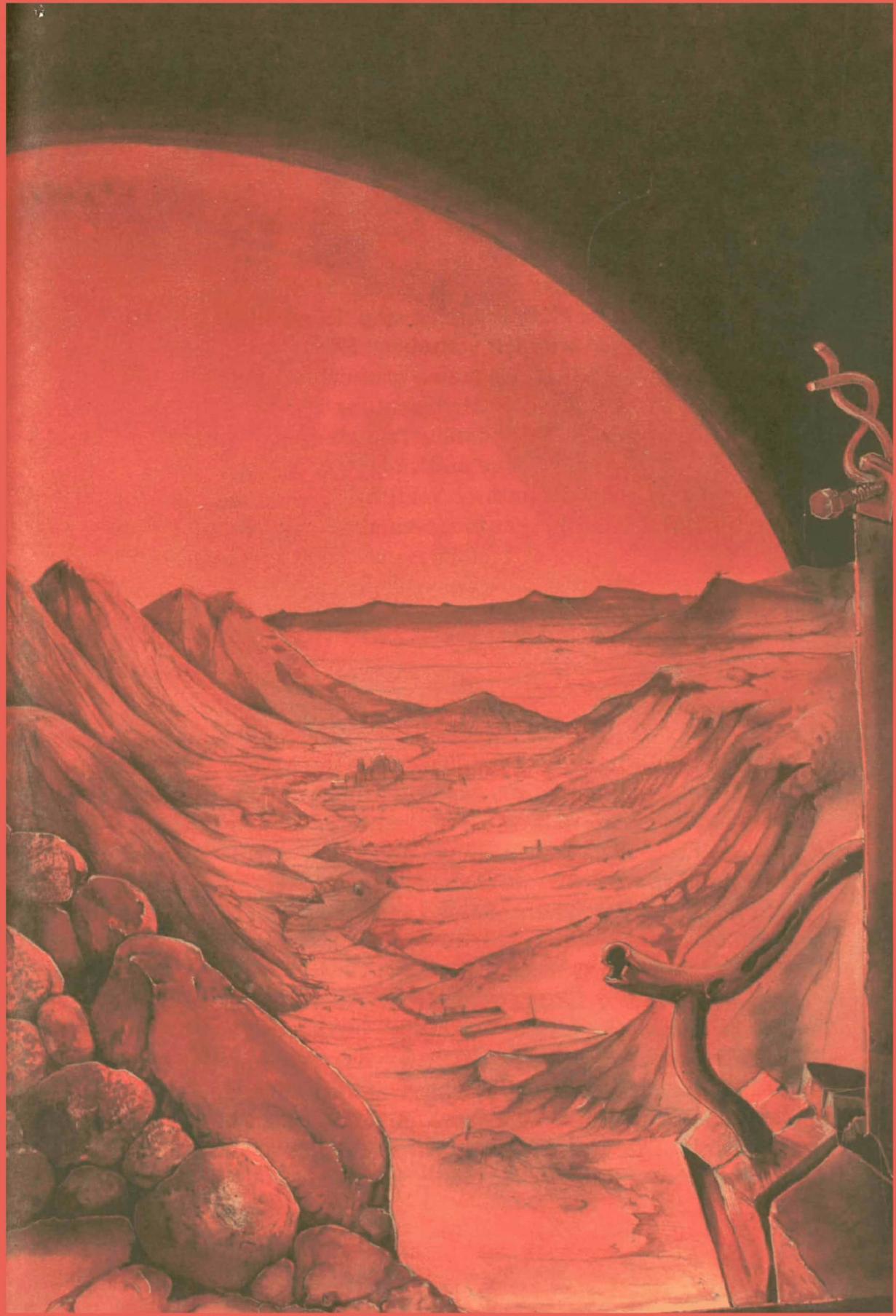
In dieser Lebensphase des Sonnenballs kommt es zu wesentlich dramatischeren Vorgängen als in den ersten 12 Jahrtausenden. Die Gashülle, welche die Heliumkugel umgibt, vergrößert sich innerhalb von nur etwa 1 Milliarde Jahren auf das ungefähr 100fache. Unsere Sonne hat dann also nicht mehr 1,392 Millionen km, sondern rund 140 Millionen km Durchmesser. Der Planet Merkur verschwindet in ihr.

Die Oberfläche der aufgeblähten Sonne kommt der Erde bedrohlich nahe. Ihr Abstand beträgt nur noch 80 Millionen km statt 150 Millionen km. Der Sonnenball füllt dann am Tage etwa die Hälfte der gesamten Himmelsfläche aus – ein für uns kaum vorstellbarer Anblick.

Die Sonne leuchtet in diesem Zustand nicht mehr gelblichweiß, sondern rot, etwa so, wie sie manchmal bei Sonnenaufgang oder -untergang erscheint. (Zu diesen Tageszeiten ist sie aber nicht wirklich rot. Dies wird vielmehr nur vorgetäuscht. Weil das Licht infolge des tiefen Sonnenstands einen besonders langen Weg durch die Gashülle der Erde zurücklegen muß, filtert die Atmosphäre die anderen Farben des Lichts fast vollständig heraus und lässt nur Rot hindurch. Nach 12 Milliarden Jahren wird die Farbe der Sonnenoberfläche aber wirklich rot sein.)

Die Sonne verkörpert in dieser Phase den Sterntyp des Roten Riesen. Ihre Oberflächentemperatur ist dann zwar um etwa 1 800 K auf 4 000 K gesunken. Da sie jedoch sehr viel größer geworden und der Erde beträchtlich näher gerückt ist, treffen weit mehr Licht- und Wärmestrahlen an der Erdoberfläche ein. Hier herrscht jetzt eine höllische Hitze. Alle Ozeane und anderen Gewässer verdampfen. Die einstigen Meeresböden liegen trocken. Von Lebewesen ist

Nach etwa 7 Milliarden Jahren wird die Erde eine glutheiße Wüste ohne einen Tropfen Wasser sein. Der Sonnenball füllt dann etwa die Hälfte des Taghimmels aus.



weit und breit keine Spur mehr. Ihre Überreste sind längst zu Staub zerfallen. Sogar das Metall Blei schmilzt an der Erdoberfläche; seine Schmelztemperatur beträgt  $600\text{ K} = 327\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

### *Und doch vielleicht nur Hirngespinste?*

An dieser Stelle drängt sich uns vielleicht die Frage auf, ob das nicht doch alles nur Phantastereien sind. Können wir solchen Computerberechnungen wirklich vertrauen? Es gibt Indizien dafür, daß sie stimmen, und diese Hinweise stammen nicht mehr aus dem Computer, sondern aus der Beobachtung der Sterne am Himmel selbst. Eigentlich sind die daraus erwachsenen Hinweise auf das künftige Schicksal der Sonne und anderer Sterne älter als die Computerberechnungen. In unserer Schilderung wurde die geschichtliche Reihenfolge der Erkenntnisse umgekehrt, weil die fertigen Resultate der Berechnungen einfacher und anschaulicher darzustellen sind als das Verfahren, nach dem die Astronomen schon vorher zu gleichen Schlußfolgerungen über den Lebenslauf der Sterne gelangten.

Rote Riesen und noch größere, sogenannte Überriesen, gibt es unter den Sternen in großer Zahl. Ein Beispiel von vielen ist der Stern A des Doppelsternsystems Zeta Aurigae im Sternbild Fuhrmann. Sein Durchmesser beträgt das 245fache des Durchmessers der Sonne! In diesem Stern würde der innere Bereich unseres Sonnensystems, einschließlich der Bahnen der Planeten Merkur, Venus und Erde, Platz finden. Einen anderen – ebenfalls rötlichen – Überriesen können wir mit bloßem Auge im Sternbild Orion erkennen. Es ist der Betelgeuze. Seine Lage im Sternbild zeigt das Bild.

## **Das wichtigste Diagramm der Astronomen**

Die Wissenschaftler kamen – schon bevor es Computer gab – auf noch einem ganz anderen Weg zu der Erkenntnis, daß sich Sterne im Verlauf ihres späteren Lebens in Rote Riesen und Überriesen verwandeln. Die Schlußfolgerungen, mit denen die Astronomen arbeiteten, sind allerdings ein wenig kompliziert. Veranschaulichen



In dieser Darstellung des Sternbildes Orion ist der rote Überriese Betelgeuze rot markiert. In der Natur läßt sich seine rötliche Farbe mit bloßem Auge erkennen. Er übertrifft unsere Sonne an Leuchtkraft um das 10 000fache, und sein Durchmesser ist 730mal größer.

wir uns das Grundprinzip ihrer Überlegungen zunächst durch einen Vergleich!

Da der Mensch in seinem kurzen Leben nur einen winzigen Zeitabschnitt aus dem Millionen und Milliarden Jahre dauernden Lebensweg der Sterne erfassen kann, ergeht es ihm ähnlich wie einer Eintagsfliege. Während ihres kurzen Lebens existieren in der Menschenwelt Säuglinge, Kleinkinder, Schulkinder, Jugendliche, Erwachsene und Greise. Wäre die Eintagsfliege mit Verstand begabt, dann könnte sie daraus zwei verschiedene Schlüsse ziehen. Entweder, die Säuglinge bleiben zeitlebens Säuglinge, die Kleinkinder immer Kleinkinder und so weiter, oder aber die verschiede-

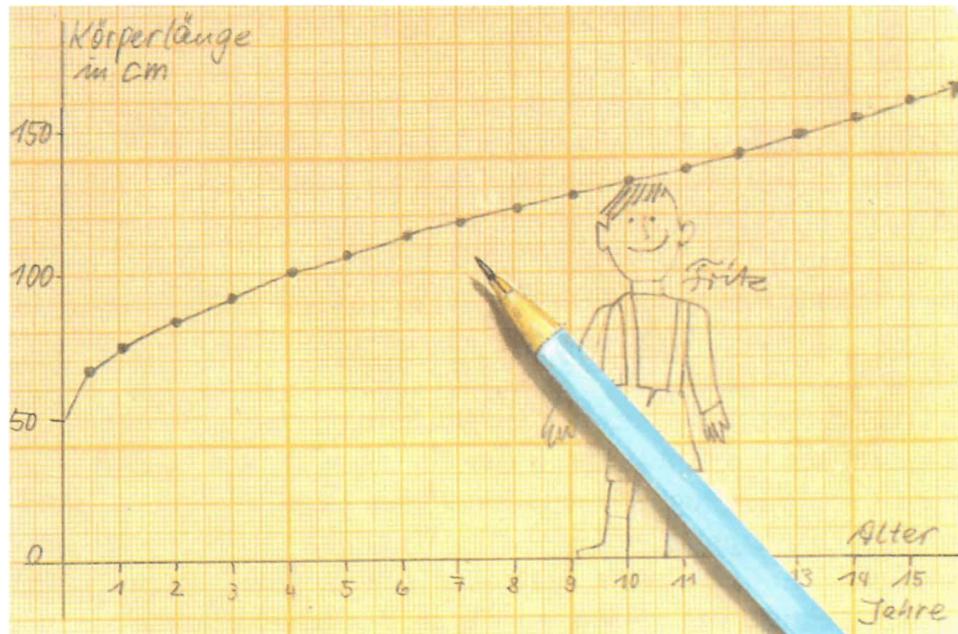
nen Formen, in denen die Menschen der Eintagsfliege begegnen, stellen aufeinanderfolgende Entwicklungsphasen derselben Gattung Mensch dar. – So ergab sich auch für die Astronomen die Frage, ob die vielen verschiedenen Sternzustände mit ihren unterschiedlichen Eigenschaften vielleicht nur aufeinanderfolgende Stadien ihrer Lebensgeschichte darstellen.

Um der Reihenfolge dieser Phasen auf die Spur zu kommen, stellten sie ein Diagramm auf. Es wird nach dessen Erfindern, dem Dänen Ejnar Hertzsprung (1873–1967) und dem Amerikaner Henry Norris Russell (1877–1957), Hertzsprung-Russell-Diagramm (abgekürzt: HRD) genannt. Diagramme haben in der Geschichte der Wissenschaft sehr oft zu neuen Erkenntnissen geführt. Um uns zunächst damit vertraut zu machen, was ein Diagramm ist, wollen wir ein ganz einfaches Beispiel dafür voranstellen.

### *Wachstumskurve auf Millimeterpapier*

Nehmen wir an, Herr Schulze sei bei der Geburt seines Sohnes Fritz auf den Gedanken gekommen, dem Sprößling zum 15. Geburtstag ein Diagramm zu überreichen, welches das Wachstum seiner Körperlänge im Verlauf der ersten 15 Lebensjahre wiedergibt. Alle halbe Jahre mißt er, wie groß der Sohn geworden ist. Auf Millimeterpapier zeichnet er eine waagerechte und eine senkrechte Linie, also zwei Achsen eines Koordinatensystems. Auf der waagerechten markiert jeder Zentimeter von links nach rechts ein Lebensjahr, jeder halbe ein halbes. Auf der senkrechten Achse bedeutet jeder Millimeter von unten nach oben je einen Zentimeter Körperlänge. Für die bei der Geburt ermittelte Körperlänge – in unserem Beispiel sind es 50 cm – zeichnet Herr Schulze in das Diagramm einen Punkt an die Stelle des Millimeterpapiers, die in 50 mm Höhe über dem Skalenpunkt der waagerechten Achse liegt, der die Geburt bezeichnet. Für die Größe im Alter von sechs Monaten – es seien 68 cm – zeichnet er einen Punkt an die Stelle des Millimeterpapiers, die 68 mm über dem Skalenstrich der waagerechten Achse liegt, der das Lebensalter  $\frac{1}{2}$  Jahr markiert.

Entsprechend werden die in den späteren Lebensjahren gemessenen Körpergrößen eingetragen und zum Schluß alle Punkte durch



So könnte das Diagramm des Körperlängen-Wachstums eines Knaben während der ersten 15 Lebensjahre aussehen.

eine Linie verbunden. Das fertige Diagramm zeigt die Beziehungen zwischen dem Körperlängenwachstum und dem Lebensalter. Wenn sich Fritz durchschnittlich entwickelt hat, also nicht besonders klein oder sehr groß geraten ist, könnte es zum Beispiel so aussehen wie im Bild dargestellt. Wir stellen fest, daß er nicht in allen Lebensphasen gleich schnell, sondern in manchen schneller, in anderen langsamer gewachsen ist – also ganz normal.

Das Hertzsprung-Russell-Diagramm stellt die Beziehungen zwischen der Oberflächentemperatur und der Leuchtkraft von Sternen dar. Wie man diese beiden Daten ermittelt, sei hier übergangen. Es wurde in vielen populärwissenschaftlichen Büchern über Astronomie beschrieben. Zur Leuchtkraft soll hier nur so viel angemerkt werden: Sie ist nicht gleichbedeutend mit der Helligkeit, in der uns die Sterne erscheinen. Denn ein äußerst leuchtkräftiger, aber sehr weit entfernter Stern kann weniger hell erscheinen als ein leuchtschwächerer, der wesentlich näher zu uns steht. Die leuchtkräftigsten Sterne strahlen über 100 000 mal mehr Energie aus als die Sonne. Es gibt aber auch Sterne mit einer Leuchtkraft bis herab zu etwa einem Hunderttausendstel derjenigen der Sonne. Die Oberflä-

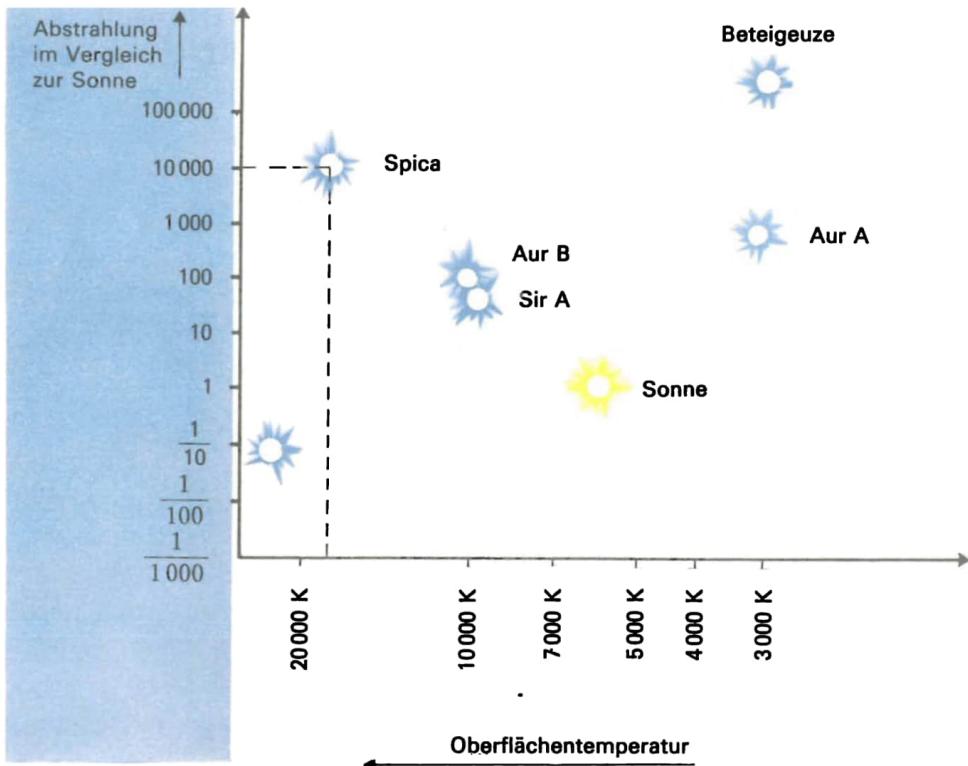
chentemperaturen der Sterne betragen zwischen weniger als 3 000 K und über 20 000 K.

Wir können ferner davon ausgehen, daß leuchtkräftigere Sterne auch eine größere Masse haben als leuchtschwächere. Meßbar ist die Masse leider bei nur wenigen Sternen – etwa zweihundert. Es zeigte sich, daß die Leuchtkraft mit etwa der dritten Potenz der Masse ansteigt. Das bedeutet, daß ein Stern von 2facher Sonnenmasse eine 2<sup>3</sup>fache, also  $2 \cdot 2 \cdot 2 = 8$ fache Sonnenleuchtkraft besitzt, ein solcher von 3 Sonnenmassen eine 3<sup>3</sup>fache, also  $3 \cdot 3 \cdot 3 = 27$ fache und so weiter.

Das HRD begegnet uns in allen Büchern, die auch nur einen Abschnitt über die Entwicklung der Sterne enthalten. Dabei wird beim Leser allerdings ein grundsätzliches Verständnis für das Lesen von Diagrammen vorausgesetzt. Wenn wir uns hier etwas ausführlicher damit befassen, dann ist dies eine Vorbereitung für die spätere Lektüre von anspruchsvolleren Büchern über Astronomie. Im HRD markiert die waagerechte Achse von rechts nach links (!) die Oberflächentemperaturen in K, die senkrechte von unten nach oben die Leuchtkräfte. Als Maßeinheit wird die Leuchtkraft der Sonne gewählt. Der mit 1 bezeichnete Skalenstrich bedeutet also 1, die Marke 1/100 den 100. Teil und der Strich neben der Zahl 1 000 die 1 000fache Sonnenleuchtkraft.

### *„Fingerabdrücke“ der Sterne*

Für jeden Stern wird in das Diagramm ein Punkt eingezeichnet. Wie das geschieht, sei an einigen Bildbeispielen gezeigt. Dort sind Punkte für nur wenige Sterne eingetragen. Da die Sonne genau 1 Sonnenleuchtkraft und eine Temperatur von 5 770 K hat, steht der sie symbolisierende Punkt in Höhe der 1 der Leuchtkraftskale, ungefähr über der Mitte zwischen den Markierungen für 5 000 K und 7 000 K der waagerechten Temperaturskale. Der Stern Spica hat die 10 000fache Sonnenleuchtkraft und eine Oberflächentemperatur von 18 000 K. Dementsprechend wird der Punkt in Höhe des Skalenstrichs für 10 000 Sonnenleuchtkräfte über die Stelle der Temperaturskale gesetzt, die ein wenig rechts von der Marke für 20 000 K liegt.



Hertzsprung-Russell-Diagramm einiger ausgewählter Sterne. Erläuterung im Text.

Aus der Lage des Punktes für den schon erwähnten Roten Überriesen A des Doppelsterns Zeta Aurigae (im Diagramm mit „Aur A“ gekennzeichnet) ersehen wir, daß seine Leuchtkraft zwischen der 100- und 1 000fachen der Sonne liegt und seine Oberflächentemperatur nur etwa 3 000 K beträgt. Für einen Stern ist das recht kühl. Bei ungefähr gleicher Temperatur hat der Rote Überriese Beteigeuze sogar die mehr als 100 000fache Sonnenleuchtkraft. Dabei müssen wir beachten, daß die Leuchtkraftskale nicht im gewöhnlichen, sondern im logarithmischen Maßstab gezeichnet ist. Das bedeutet: Von einem Skalenstrich zum nächsten verdoppelt sich die Leuchtkraft nicht, sondern sie verzehnfacht sich jeweils.

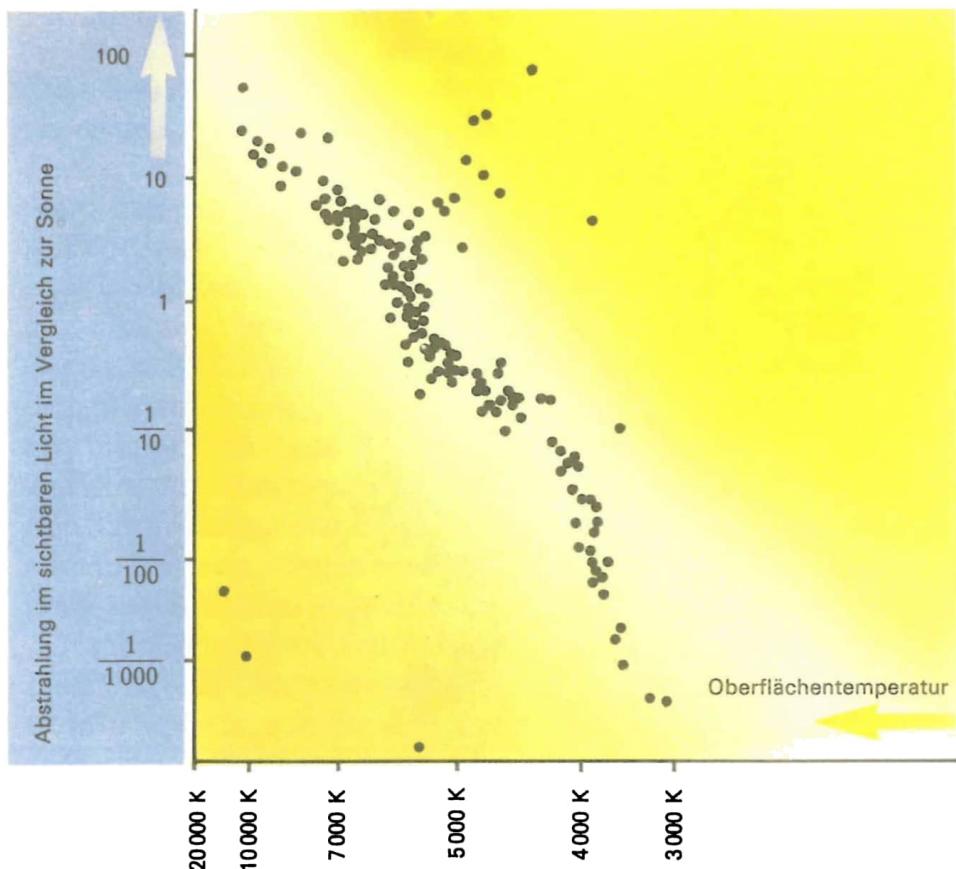
Wenn Sterne wie Zeta Aurigae A und Beteigeuze trotz ihrer geringen Oberflächentemperatur derart gigantische Leuchtkräfte besitzen, dann ist dies logischerweise nur dadurch zu erklären, daß sie sehr groß sein müssen. Denn nur dann können sie, dank ihrer enormen Oberfläche, soviel Energie in den Weltraum strahlen.

An dieser Stelle könnte man fragen, warum die Größe der Riesensterne auf so umständliche Weise aus dem HRD geschlußfolgert und nicht direkt gemessen wird. Eine solche Messung der Größe ist nur bei ganz wenigen Sternen möglich. Das hängt damit zusammen, daß sie so sehr weit entfernt sind. Selbst riesig große Sterne sind deshalb auch im Fernrohr nicht als Scheibchen mit einem meßbaren Durchmesser zu erkennen, sondern nur als Lichtpunkte. Aus der Größe der Lichtflecke, mit denen sie auf fotografischen Himmelsaufnahmen abgebildet werden, läßt sich ihr Durchmesser ebenfalls nicht ableiten.

### *Legionen Roter Riesen*

Nun könnte man noch einwenden, daß die beiden genannten Sterne vielleicht einzigartige Ausnahmen bilden, von denen keine verallgemeinernden Schlüsse auf die Gesamtheit der anderen Sterne gezogen werden dürfen. Dieser Einwand wird jedoch widerlegt, wenn man in das HRD Punkte nicht nur für einige wenige, sondern für sehr viele Sterne einzeichnet. Das Bild zeigt ein solches HRD für Sterne aus der näheren Umgebung der Sonne. Wir sehen, daß die Punkte der meisten Sterne in einem verhältnismäßig schmalen Streifen liegen, der sich von rechts unten nach links oben zieht. Man nennt ihn die Hauptreihe des HRD und die Sterne, welche den dortliegenden Punkten entsprechen, Hauptreihensterne. (Um kein Mißverständnis aufkommen zu lassen: Die Lage der Punkte im HRD hat nichts mit der räumlichen Anordnung der Sterne im Weltall zu tun.) Ungefähr in Höhe zwischen der 1- und 10fachen Sonnenleuchtkraft biegt von der Hauptreihe ein Ast nach rechts oben ab. Die auf ihm liegenden Punkte symbolisieren die Roten Riesen.

Daß der Übergang ins Stadium der Roten Riesen mit einer Alterserscheinung der Sterne zu tun hat, darauf weisen die Hertzsprung-Russell-Diagramme solcher Sterne, die gemeinsam einem Sternhaufen angehören, noch deutlicher hin. Von ihnen dürfen wir annehmen, daß sie etwa gleich alt sind. Erinnern wir uns an die gruppen- und haufenweise Entstehung von Sternen! Ein HRD des Sternhaufens M 3 – dies ist seine Katalognummer – wird im Bild

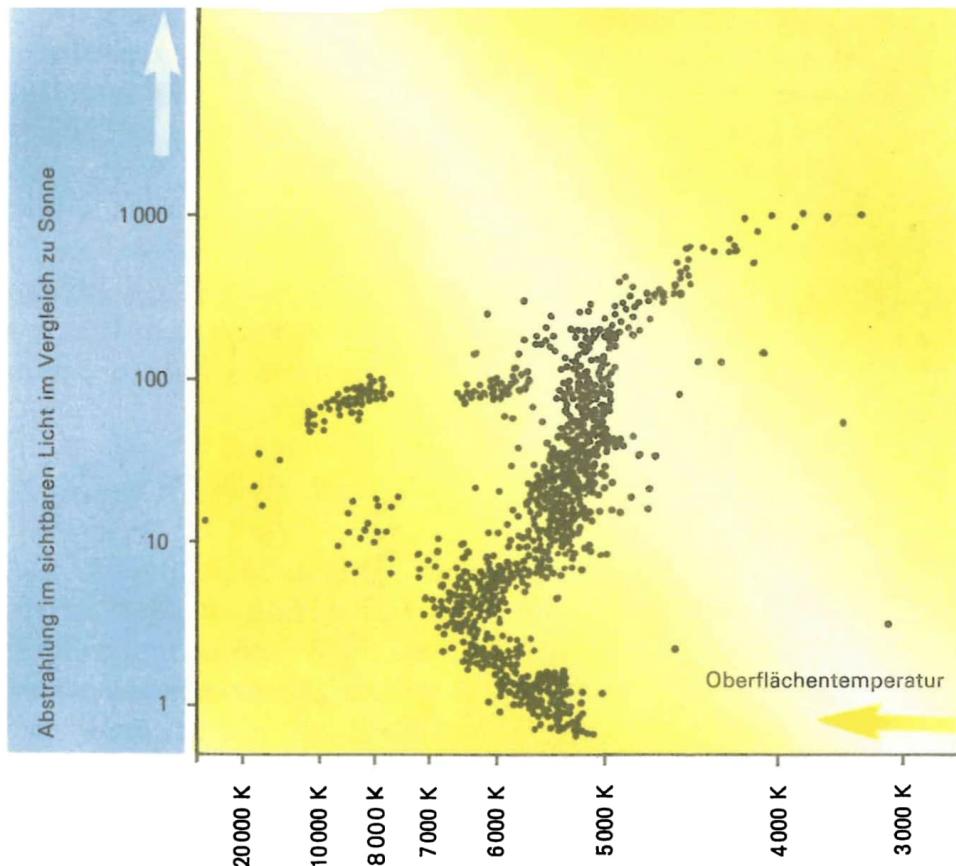


Hertzsprung-Russell-Diagramm von Sternen aus der näheren Umgebung der Sonne

wiedergegeben. Darin biegt in Höhe von etwa 5 Sonnenleuchtkräften ein aus vielen Punkten bestehender Ast nach rechts oben in das Gebiet der Roten Riesen ab. Es gibt in diesem Sternhaufen also sehr viele Rote Riesen.

Nun wollen wir ein Ergebnis von Computerberechnungen vorwegnehmen, mit denen wir uns im nächsten Kapitel näher beschäftigen werden. Es besagt, daß massereiche Sterne nicht nur schneller als masseärmere entstehen, sondern sich auch schneller weiterentwickeln, weil sie ihre Energie rascher verausgaben. Während massereiche Sterne schon nach – im astronomischen Sinne – kurzer Zeit Alterserscheinungen zeigen, tritt dies bei masseärmeren erst viel später ein.

Daher sind von massereichen Sternen schon mehr Generationen aufeinanderfolgt als von anderen.



Hertzsprung-Russell-Diagramm des Sternhaufens M 3. Erläuterung im Text.

In einem Haufen von Sternen, die alle etwa gleichzeitig entstanden sind, werden sich daher bereits zahlreiche „vergreiste“ Sterne befinden. Das stimmt gut mit den vielen Roten Riesen überein, die wir im HRD des Sternhaufens M 3 finden. Noch augenscheinlicher wird die den alternden Sternen bevorstehende Wandlung zu Roten Riesen, wenn wir die Diagramme von Sternhaufen unterschiedlichen Alters vergleichen. Je älter der Sternhaufen, desto mehr Rote Riesen finden sich in ihm. Das HRD und die Computerberechnungen bestätigen sich also gegenseitig und führen zu dem Schluß, daß die Sterne früher oder später – je nach Größe ihrer Masse – zu Roten Riesen werden und dieses Schicksal folglich unserer Sonne ebenfalls unabwendbar bevorsteht. Doch braucht uns das nicht zu beunruhigen. Denn bis dahin hat es noch über 5 Milliarden Jahre Zeit ...

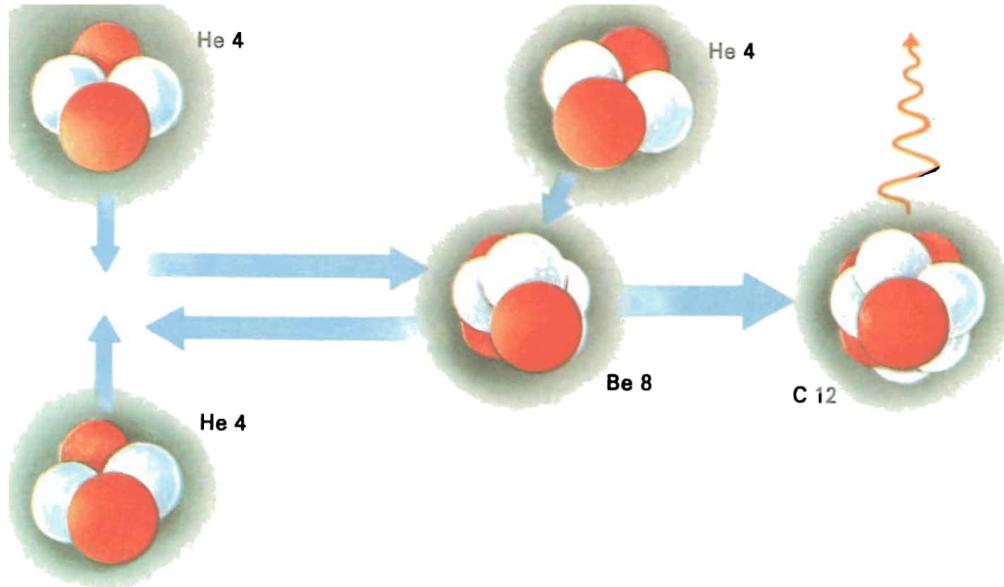
# Kosmische Energieverschwender

Sterne mit etwa gleicher Masse wie die Sonne haben auch ein etwa gleiches Schicksal wie diese. Doch schon bei Sternen mit deren zweifacher Masse verläuft es wesentlich anders. Je mehr Masse ein Stern hat, desto größer ist sein Vorrat an Kernbrennstoff. Deshalb sollte man denken, daß massereiche Sterne besonders lange leben. In Wirklichkeit ist es genau umgekehrt. Je massereicher ein Stern, desto kürzere Zeit lebt er von dem Wasserstoffbrennen in seinem Zentrum. Während unsere Sonne sparsam Milliarden Jahre mit dem Wasserstoff in ihrer Zentralregion haushält und ruhig vor sich hin brennt, verbrauchen ihre massereichen Geschwister die riesigen Brennstoffvorräte tausendmal schneller und zehren deshalb nur Jahrtausende von ihnen. Die Größe der Masse eines Sterns bestimmt also von vornherein seinen Lebenslauf und – wie wir später noch sehen werden – auch die Art und Weise, wie er endet.

Nach Computerberechnungen zehrt ein Stern von 1 Sonnenmasse 10 Milliarden Jahre vom Wasserstoffbrennen in seinem Zentrum, ein Stern von 2facher Sonnenmasse nur knapp 1 Milliarde Jahre, von 5 Sonnenmassen etwa 100 Millionen, von 10 Sonnenmassen weniger als 10 Millionen und von 30 Sonnenmassen nur 1 Million Jahre. 100 Milliarden Jahre müßte dagegen ein Stern von halber Sonnenmasse „leben“ können.

## *Brennende Kugelschalen*

Verfolgen wir nun – ebenfalls von Computern errechnet – als Beispiel den Lebensweg eines Sterns von 7facher Sonnenmasse! 26 Millionen Jahre nach dem Zünden des Wasserstoffs ist diese Energiequelle im Zentrum bereits erschöpft. Die äußeren Bereiche des Sterns enthalten zwar noch sehr große Mengen davon, doch ist dort die Temperatur zu niedrig für das Wasserstoffbrennen. Im Zentrum des Sterns hat sich durch die Umwandlung des Wasserstoffs in Helium eine Kugel aus diesem Gas gebildet. In der daran unmittelbar angrenzenden Zone ist es heiß genug für das Wasserstoffbrennen. Die Heliumkugel ist deshalb von einer wasserstoffbrennenden Schale umgeben. Dieses Schalenbrennen, das bei der



Schema der Fusion von Helium- zu Kohlenstoff-Atomkernen. Links: Zwei Heliumkerne (He 4) verschmelzen zu einem Berylliumkern (B 8) (Bildmitte). Er zerfällt allerdings fast sofort wieder. Wenn aber während der kurzen Zeit seiner Existenz ein weiterer Heliumkern (He 4) in den des Berylliums eindringt, entsteht ein Kohlenstoffkern (C 12) (rechts im Bild). Dabei wird wieder Energie abgestrahlt (geschlängelter Pfeil).

Sonne erst nach 10 Milliarden Jahren beginnt, fängt in dem Stern von 7facher Sonnenmasse schon nach 26 Millionen Jahren an.

Noch rascher vollzieht sich der Übergang zum Roten Riesen. In nur etwa 500 000 Jahren bläht sich die wasserstofffreie Hülle, welche die Heliumkugel und die wasserstoffsiedende Schale umgibt, gewaltig auf. Dabei sinken die Dichte und die Temperatur der Hülle. Denn jedes Gas, das sich ausdehnt, kühlt dabei ab. Im Zentrum vollziehen sich während dieser kurzen Zeit ebenfalls einschneidende Veränderungen. Die Heliumkugel verdichtet sich. Damit ist eine weitere Steigerung der Temperatur verbunden. 26,5 Millionen Jahre nach Beginn des Wasserstoffbrennens, also nach der „Geburt“ des Sterns, wird dort eine Temperatur von etwa 100 Millionen K erreicht.

Dabei setzt ein neuer energieliefernder Prozeß ein, bei dem das aus dem Wasserstoff entstandene Helium zu Atomkernen des Elements Kohlenstoff verschmolzen wird. Die „Asche“ des Wasser-

stoff, das Helium, wird also selbst wieder zu einem Brennstoff, als dessen „Asche“ nun Kohlenstoff entsteht. Damit hat der Stern nun mehr zwei Energiequellen: das Heliumbrennen im Zentrum und das Wasserstoffbrennen in einer Schale, welche die zentrale Heliumkugel umgibt.

Aber auch das Helium des 7-Sonnenmassen-Sterns wird sehr schnell verbraucht. Nach weiteren 6 Millionen Jahren befindet sich im Zentrum eine sehr kleine Kohlenstoffkugel, die aus dem Helium entstand. Sie ist schalenförmig von einer Schicht aus Helium umgeben, in der die Umwandlung dieses Elements in Kohlenstoff weitergeht. Vorübergehend hat der Stern jetzt zwei Bereiche für das Schalenbrennen. In einer Schale um den Kohlenstoffkern findet das Heliumbrennen statt, an der Grenze zwischen der Heliumschicht und dem außenliegenden Wasserstoff das Wasserstoffbrennen. Diese zuletzt genannte Quelle erlischt aber, wenn das Wasserstoffbrennen bis in Bereiche vordringt, in denen die Temperatur dafür nicht mehr ausreicht.

### *Sterne, die sich „aufpusten“*

Die Verhältnisse im Stern sind somit schwerer durchschaubar und daher auch schwieriger berechenbar geworden. Doch bestätigen die Rechnungen noch eine merkwürdige „Alterserscheinung“, die bei zahlreichen Sternen beobachtet wird. Sie pulsieren, werden also abwechselnd größer und kleiner. Man nennt solche Himmelsobjekte Delta-Cephei-Sterne oder kurz Cepheiden (sprich: Ke-fe-i-den), nach dem Stern Delta im Cepheus. Dies ist ein nach einer altgriechischen Sagengestalt benanntes Sternbild. So hieß ein König der Äthiopier. Er heiratete Cassiopeia, nach der man gleichfalls ein Sternbild benannt hat.

Bei dieser Gelegenheit sei angemerkt, daß die einzelnen zu einem Sternbild gehörenden Sterne mit griechischen Buchstaben gekennzeichnet werden. Delta ist ein Buchstabe des griechischen Alphabets und Cephei der Genitiv von Cepheus. Delta Cephei bedeutet daher Stern Delta des Cepheus. Daß er seine Helligkeit periodisch, also regelmäßig wechselt, entdeckte bereits 1784 der Engländer John Goodricke, ein taubstummer Mann, der jung verstarb.

Inzwischen weiß man, daß dieser Stern seinen Radius, also seinen halben Durchmesser, um etwa 2,7 Millionen km abwechselnd vergrößert und verkleinert. Erinnern wir uns daran, daß der Durchmesser der Sonne 1,392 Millionen km beträgt. Um rund das Doppelte dieser Größe bläht sich also der Delta Cephei auf, danach schrumpft er um den gleichen Betrag. Seine Ausdehnung erfolgt mit Geschwindigkeiten bis zu 30 km/s. Nach irdischen Maßstäben kann man das als eine Superexplosion bezeichnen. Doch die Astronomen nehmen diesen Ausdruck dafür nicht in Anspruch. Die enorme Ausdehnungsgeschwindigkeit läßt uns ahnen, welche gigantischen Prozesse im Inneren eines solchen Sterns ablaufen müssen. Hier gehen die Kernverschmelzungsprozesse nicht mehr ruhig und gleichmäßig vonstatten.

Auch die Leuchtkraft der Delta-Cephei-Sterne wechselt periodisch. Das scheint leicht erklärliech. Muß doch bei der Vergrößerung des Sterns die ebenfalls vergrößerte Oberfläche mehr Licht und andere Energiestrahlen aussenden. So naheliegend diese Erklärung für den Helligkeitswechsel wäre – sie trifft in dem Fall nicht zu. Bei typischen Cepheiden tritt die höchste Leuchtkraft nämlich nicht ein, wenn sie den größten Durchmesser haben, sondern – genau umgekehrt – in der Phase, in der sie wieder zusammenschrumpfen. Zur Zeit des größten Durchmessers sinken dagegen ihre Leuchtkraft und Oberflächentemperatur. Wenn die wechselnde Größe nicht die Ursache ist, dann kann sie nur im Wechsel der Oberflächentemperatur liegen. Sie schwankt in der Tat sehr beträchtlich, um etwa 1000 K. Während der Stern schrumpft, steigt sie an.

Man kennt inzwischen die Ursache dieses eigenartigen Verhaltens: Die Cepheiden können die in ihrem Zentrum erzeugte Energie manchmal leichter und ein andermal schwerer nach außen in den Weltraum abgeben. Wenn der Stern am größten ist, hat seine Hülle eine geringere Dichte. Sie absorbiert deshalb weniger von der aus dem Zentrum kommenden Energie, saugt weniger von ihr auf, und kühlts sich ab. Dadurch schrumpft sie schließlich wieder zusammen, wobei ihre Dichte erneut ansteigt. Folglich absorbiert sie jetzt auch mehr Energie aus dem Zentrum, erhitzt sich von neuem und dehnt sich aus. So beginnt das gleiche Spiel von vorn. Daß die Änderungen der Strahlungsabsorption den Leuchtkraftwechsel ver-



Aus der Sonnenoberfläche schießen von Zeit zu Zeit riesige Massen glühender Gase empor. Wenn sie von der Erde aus betrachtet am Sonnenrand erscheinen, bezeichnet man sie als Protuberanzen.

ursachen und lange Zeit in Gang halten können, bewies der sowjetische Mathematiker Sergej Zhevakin in einer 1953 vorgelegten wissenschaftlichen Arbeit.

Die beschriebenen Pulsationen erfolgen bei etwa 35 Prozent der zahlreichen bekannten Cepheiden innerhalb von nur drei bis sechs Tagen, bei einigen sogar innerhalb eines Tages. Auf dem Planeten eines Cepheiden, der ausreichenden Abstand von seiner „launischen“ Sonne hat, wechselt also die Temperatur im Rhythmus weniger Tage zwischen höllischer Hitze und klirrender Kälte. Andere Cepheiden brauchen bis zu 70 Tage für eine Wechselperiode.

Man bezeichnet die Cepheiden auch als pulsationsveränderliche oder pulsierende Sterne. Ihre Pulsationsperiode bleibt immer gleich. Nur selten ist eine plötzliche Änderung oder eine Unregelmäßigkeit beobachtet worden. Während seiner Lebenszeit als Roter Riese oder Überriese kann ein Stern mehrere Male dieses Stadium, in dem er periodisch pulsiert, durchlaufen. Für einen Modellstern von 7 Sonnenmassen berechnete der Computer, daß er fünfmal in dieses Stadium gerät. Beim erstenmal dauert es nur einige tausend Jahre, beim zweitenmal 350 000 Jahre. Wenn er diese „Krankheit“ überwunden hat, kann man ihm später nicht mehr anmerken, daß er einmal ein pulsierender Stern war. Der deutsche Astrophysiker Karl Schwarzschild (1873–1916) verglich das Pulsieren deshalb einmal mit den Masern. Bei dieser Krankheit bekommt man einen Hauthausschlag. Wenn man sie übersteht, ist einem später nicht anzusehen, daß man die Masern hatte. Unsere Sonne kann kein pulsierender Stern werden. Das bleibt den massereicheren Sternen vorbehalten.

Etwa 90 Prozent aller veränderlichen, also ihre Leuchtkraft wechselnden Sterne sind Cepheiden. Bei den restlichen 10 Prozent wird der Helligkeitswechsel durch periodisch wiederkehrende starke Ausbrüche von Materie verursacht, die man als Eruptionen (lateinisch: *eruptio* = Ausbruch) bezeichnet. Darüber hinaus gibt es zahlreiche Sterne, bei denen ein Wechsel der Helligkeit nur vortäuscht wird. Sie gehören einem Doppelsternsystem an. Dabei tritt von Zeit zu Zeit einer der Sterne – von der Erde aus gesehen – vor den anderen und verdeckt ihn ganz oder teilweise.

## Vom Roten Riesen zum Weißen Zwerg

Ziehen wir eine vorläufige Bilanz: Masseärmere Sterne wie unsere Sonne werden nach Milliarden Jahren zu Roten Riesen, massereiche nach Millionen Jahren zu Roten Überriesen. Diese durchlaufen mehrmals ein Stadium des Pulsierens. Dann „beruhigen“ sie sich wieder. Mit dem Zustand des Roten Riesen oder Überriesen endet das Leben der Sterne aber noch nicht. Wenn das Helium im Zentrum eines Überriesen vollständig in Kohlenstoff umgewandelt ist, steigt dort die Temperatur früher oder später weiter an. Dabei

setzt ein noch anderer energieliefernder Prozeß, das Kohlenstoffbrennen, ein. Die „Asche“ des Heliumbrennens ist somit zu neuem Brennstoff geworden. Kohlenstoffkerne verschmelzen jetzt zu Kernen noch schwererer Elemente. Dabei entsteht allerdings nicht wie bisher nur ein bestimmtes neues Element, sondern verschiedene.

Die Zusammensetzung des Sterns in dessen Zentrum wird daher so schwer durchschaubar, daß selbst die ausgeklügeltesten Computerrechenprogramme das fernere Schicksal des Sterns nicht mehr so genau vorhersagen können wie in den bisherigen Stadien der Entwicklung. Gleichwohl ist das weitere Geschehen im Stern den Astrophysikern nicht unbekannt. Es läßt sich aus Beobachtungen und allgemeinen Erkenntnissen über die Naturgesetze der Physik ableiten.

Bevor wir uns damit beschäftigen, sei angemerkt, daß der Aufbau zunehmend schwererer Elemente mit immer größeren Atomkernen in den Sternen nicht endlos weitergeht. Spätestens beim Eisen ist eine Grenze gesetzt. Denn beim Verschmelzen von Eisen zu Kernen noch schwererer Elemente würde keine Energie mehr freigesetzt, sondern, im Gegenteil, verbraucht. Um Eisenkerne mit anderen zu verschmelzen, müßte man ihnen daher enorme Energiemengen zuführen. Das hat allerdings nichts damit zu tun, daß Eisen ein besonders fester Stoff ist, sondern beruht auf anderen komplizierten Gründen, denen wir hier nicht nachgehen wollen.

### *Wo 1 Kubikzentimeter Materie 10 000 Kilogramm wiegt*

Welches ist also die nächste Phase im Leben der Sterne? Da wir sie nicht mehr eindeutig berechnen können, müssen wir am Himmel selbst Ausschau nach Sternen halten, die sich bereits in diesem nächsten Stadium befinden. Welche Art von Sternen dies sein könnte, dafür geben uns die gerade noch möglichen Computerberechnungen bereits einen wertvollen Hinweis. Sie zeigen nämlich, daß nach Erschöpfung des Heliums im Zentrum dort eine ungeheure Verdichtung der Materie eintritt. Sie erreicht eine Größenordnung von  $10 \text{ t/cm}^3$ ! Das bedeutet, daß  $1 \text{ cm}^3$  Materie eine Masse von 10 000 kg in sich birgt. Auf der Erde können wir uns einen solchen Stoff nicht vorstellen. Schon lange bevor die Astronomen

über Computer verfügten, wußten sie, daß es Sterne gibt, die sehr klein sind und eine solche unvorstellbare Dichte haben. Sie nennen sie Weiße Zwerge.

Sterne können nämlich „gewogen“ werden, ohne daß man eine Waage zu Hilfe nimmt. Auch die Erde können wir ja nicht im herkömmlichen Sinne wägen. Trotzdem ist uns ihre Masse ebenso wie die der Sonne genau bekannt. Die Masse beider Himmelskörper läßt sich indirekt aus dem Gravitationsgesetz von Newton errechnen. Dies zu erläutern würde uns aber zu weit von unserem eigentlichen Gedankengang wegführen.

### *Was von Roten Riesen übrigbleibt*

Um den weiteren Lebensweg der Sterne zu verfolgen, ergibt sich daher die Frage: Ist dieser äußerst dichte Kern im Zentrum eines Roten Riesen und Überriesen vielleicht das, woraus später ein Weißer Zwerg wird? Um ein solcher Zwerg zu werden, brauchte der Kern des Roten Riesen und Überriesen lediglich seine wenig dichte Gashülle abzuwerfen, sich also gewissermaßen seiner Hülle zu „entkleiden“. Kommen wir auf das Beispiel eines Sterns von 7 Sonnenmassen zurück, so ergeben die Rechnungen, daß sein dichter Kern ungefähr 1 Sonnenmasse und seine Hülle etwa die übrigen 6 Sonnenmassen Materie enthält.

Die Astronomen suchten also am Himmel nach Anzeichen dafür, daß Rote Riesensterne sich ihrer Gashülle entledigen. Das Abströmen derart großer Materiemassen müßte sich doch irgendwie bemerkbar machen. Sie wurden dabei reichlich fündig. Solches Abströmen von Materie aus Riesensternen findet tatsächlich statt. In ganz geringfügigem Maße ereignet es sich übrigens schon bei unserer heutigen Sonne, obwohl sie noch längst kein Roter Riese ist. In jeder Sekunde bläst sie 1,2 Milliarden kg Masse in Form winzigster Gasteilchen mit Geschwindigkeiten bis zu 800 km/s nach allen Seiten in den Weltraum. Doch macht auch dies selbst in 10 Milliarden Jahren nur einen winzigen Bruchteil der Sonnenmasse aus. Dieser ständige Teilchenstrom ist der schon erwähnte Sonnenwind. Er bewirkt zum Beispiel, daß die Gassschweife der Kometen von der Sonne hinwegerichtet sind. Wie eine Rauchfahne reißt der Son-

nenwind die Gasteilchen, welche sich aus dem festen Kern des Kometen bei Annäherung an die Sonne ablösen, mit sich fort. Außerdem übt auch das Sonnenlicht einen winzigen Druck aus und treibt dadurch die Teilchen des Kometengases von der Sonne hinweg. Die Intensität des Sonnenwindes und seine Strömungsgeschwindigkeit konnten inzwischen durch künstliche Erdsatelliten und interplanetare Sonden gemessen werden.

Sterne, die bereits zu Roten Riesen und Überriesen geworden sind, verströmen wesentlich größere Mengen Materie aus ihren gewaltigen Gashüllen in den Raum. Es gibt Sterne, die zehnmillionenfach mehr Masse abblasen und dadurch schon innerhalb von 100 Millionen Jahren einen großen Teil ihrer Gesamtmasse verlieren. Die Abströmgeschwindigkeiten betragen bis zu 2 000, ja 3 000 km/s.

Besonders interessant ist das Doppelsternsystem, zu dem der Rote Riese Mira im Sternbild Walfisch gehört. Sein Begleiter, ein Weißer Zwerg, umläuft die Mira in jeweils 261 Jahren einmal. Dieser Zwergstern „flackert“. Seine Helligkeit wechselt also sehr schnell – eine Eigenschaft, die bei anderen Weißen Zwergen niemals beobachtet wurde. Die nächstliegende Erklärung für den flackernden Zwergstern ist diese: Der Stern Mira schleudert Materie mit wechselnder Stärke aus. Wenn die heißen und rasend schnellen Gasmassen auf die Oberfläche des Weißen Zwergs prallen, wird ihre Bewegungsenergie in Wärme umgewandelt. Diese trägt wesentlich zum Leuchten des Zwergsterns bei. Da die Gasströme nicht gleichmäßig, sondern mit wechselnder Intensität auftreffen, kommt es zum Flackern des Sternenlichts.

### *Das Geheimnis der Ringnebel*

Durch welche Vorgänge im Inneren der Roten Riesen und Überriesen die Ausschleuderung von Materie hervorgerufen wird, ist eine noch ungeklärte Frage. Eine andere Frage lautet: Kann ein Riesenstern durch das Ausschleudern von Materie allmählich seine gesamte, den sehr dichten Kern umgebende wenig dichte Gashülle verlieren und so zum „nackten“ Weißen Zwerg werden? Es sind bis heute etwa 700 Himmelsobjekte bekannt, die uns das tatsächlich



Ringnebel im Sternbild Leier (Lyra)

vorzuführen scheinen. Ein besonders eindrucksvolles Beispiel dafür ist ein ringförmiger Gasnebel im Sternbild Leier. Man kann ihn schon mit einem Fernrohr geringerer Leistungsfähigkeit erkennen. In der Mitte des Rings befindet sich ein Stern vom Typ Weißer Zwerg. Was liegt näher als die Annahme, daß der Ringnebel aus Gasmassen besteht, die der zum Weißen Zwerg gewordene Stern ausgestoßen hat?

In Wirklichkeit hat der Nebel keine ringförmige, sondern eine hohlkugelförmige Gestalt. Die Gasmasse ist jedoch so dünn, daß wir durch die Hohlkugel hindurchsehen können. Nur in den Gebie-

ten, die, von der Erde aus gesehen, am Rande der Kugel liegen, befinden sich hintereinander gestaffelt so viele Gasteilchen, daß sie als nebelartiges Gebilde erscheinen. Die Gasmassen bewegen sich mit einer Geschwindigkeit von 50 km/s nach außen, also in Richtung von dem in der Mitte befindlichen Weißen Zwerg hinweg. Dieser hat eine so hohe Temperatur, daß seine Energiestrahlung auch die Gasteilchen des hohlkugelförmigen Gebildes zum Aufleuchten bringt. Dieses Leuchten begann wahrscheinlich erst, als der Weiße Zwerg nackt zum Vorschein kam. Hier sind wir also wahrscheinlich fast Augenzeugen der „Geburt“ eines Weißen Zwergs aus einem Roten Riesen. Solche ringförmigen nebelartigen Gebilde werden planetarische Nebel genannt, weil sie im Fernrohr ähnlich wie ein Planetenscheibchen aussehen. (Zum Unterschied von den Sternen, die auch im Teleskop nur punktförmig erscheinen, werden die sehr viel näheren Planeten bei starker Vergrößerung als kleine Scheibchen sichtbar.)

Auch unsere Sonne wird nach dem Stadium als Roter Riese ihr Leben einmal als Weißen Zwerg beenden.

## Wenn Sterne explodieren

Nicht alle zu Roten Riesen gewordenen Sterne verströmen ihre weniger dichten Gashüllen aus Wasserstoff verhältnismäßig allmählich in den Weltraum. Es gibt auch solche, die ganz plötzlich gewissermaßen explodieren und dabei ihre Hüllen mit riesigen Geschwindigkeiten von sich schleudern. Das dürfen wir uns allerdings nicht so vorstellen wie eine Sprengstoffexplosion auf der Erde, die innerhalb einer Sekunde abläuft. Unserer Sonne kann auch in ferner Zeit eine derartige Katastrophe nicht passieren, sondern nur Sternen, die wenigstens das Fünffache ihrer Masse haben.

In der Zeit, aus der genauere astronomische Beobachtungen schriftlich überliefert sind, hatten Astronomen erst dreimal das Glück, Augenzeugen einer solchen Sternexplosion innerhalb des Milchstraßensystems zu sein, dem unsere Sonne angehört. Das war in den Jahren 1054, 1572 und 1604 der Fall. Wenn wir bedenken, daß dieses System, das man auch eine Galaxie (griechisch:

gala = Milch) nennt, aus etwa 100 Milliarden oder sogar 200 Milliarden Sternen besteht, dann scheinen solche Ereignisse recht selten zu sein.

Dabei begehen wir aber den Fehler, menschliche Zeitmaßstäbe auf das kosmische Geschehen anzuwenden. Da die Vorgänge in der Sternenwelt in Jahrmillionen und -milliarden ablaufen, sind 1000 Jahre in der Geschichte des Universums nur eine kurze Zeit und drei Ereignisse innerhalb eines Jahrtausends daher nicht als besondere Seltenheiten zu betrachten. Außerdem wird angenommen, daß sich in unserem Milchstraßensystem innerhalb eines Jahrhunderts eine oder einige wenige solcher Sternexplosionen ereignen, jedoch in Gebieten, in denen die Sterne hinter dunklen Wolken kosmischen Staubs stehen und daher von der Erde aus nicht sichtbar sind.

In der Fachsprache heißen diese Sternkatastrophen Supernova-Ausbrüche. Das Wort Nova (Plural: Novae) bedeutet eigentlich so viel wie „neuer Stern“. Denn es mußte den Astronomen früher so erscheinen, als wäre plötzlich ein neuer Stern am Himmel aufgegangen, der zuvor nicht vorhanden war. In Wirklichkeit gab es ihn schon vorher, aber er leuchtete nur so gering, daß man ihn entweder gar nicht oder nur schwach sah. Erst durch sein „Aufflammen“ zu einer wesentlich größeren Leuchtkraft wurde er auffällig.

### *Sterne mit der Leuchtkraft von Milliarden Sonnen*

Außer den Supernovae gibt es auch Novae, mit denen wir uns später noch kurz beschäftigen werden. Sie sind etwa 10 000 mal häufiger als Supernovae. Das Wort „Super-“ besagt, daß sich die Leuchtkraft der Gebilde noch sehr viel stärker steigert als bei den Novae. Eine Supernova sendet plötzlich so viel Licht und andere elektromagnetische Wellenstrahlen aus wie zehn oder noch mehr Milliarden Sonnen zusammengenommen! Es gibt verschiedene Typen solcher Sterne.

Ihre Explosion ist eine „Alterserscheinung“ ihrer Entwicklung. Sie kann erst einsetzen, wenn im heißen Zentralgebiet des Sterns alle chemischen Elemente, die sich für die Verschmelzung zu immer schwereren Atomkernen eignen, verbraucht sind und folglich

keine energieliefernden Kernfusionen mehr möglich sind. Erinnern wir uns daran, daß dieser Prozeß beim Eisen endet. Ist im Zentrum ein Kern aus Eisendampf entstanden, dann kann dieser daher nicht mehr zu noch schwereren Stoffen verschmolzen werden. Es wurde auch bereits erwähnt, daß sich für den stabilen Zustand eines Sterns zwei Kräfte die Waage halten müssen: der in Richtung auf das Zentrum wirkende Gravitationsdruck und der nach außen gerichtete, durch die energieliefernden Prozesse erzeugte Druck. Ist dieses Gleichgewicht gestört, stürzt der Stern auf Grund der Gravitation in sich zusammen.

Dabei wird schlagartig Energie freigesetzt und die Gashülle, die das Zentralgebiet umgibt, in den Weltraum hinausgeschleudert. Um zur Supernova zu werden, muß sich im Zentrum eines Sterns aber nicht unbedingt ein Kern aus Eisen gebildet haben. Auch die früher erwähnten Weißen Zwerge können einen Supernova-Ausbruch erfahren haben, bevor sie zu solchen Zwergen wurden, wenn sich ihr Kohlenstoffkern – durch immer weitere Fusion des umgebenden Heliums zu Kohlenstoff – über eine bestimmte Grenzmasse hinaus vergrößerte.

### *Ersehnte Himmelssensationen*

Die Astronomen warten gespannt auf einen neuen Supernova-Ausbruch in unserer Galaxie, um ihn mit allen Hilfsmitteln der modernen Astrophysik zu erforschen – bisher jedoch vergebens. Außer unserem Milchstraßensystem gibt es schätzungsweise noch 10 Milliarden andere Galaxien im Universum. In etlichen von ihnen werden gelegentlich immer wieder Supernovae beobachtet. Aber selbst unsere Nachbargalaxie, der Andromedanebel, ist 2 Millionen Lj von uns entfernt. Wenn dort ein Stern zur Supernova aufflammt, dann steigt seine Leuchtkraft zwar auf das Milliardenfache. Infolge der großen Entfernung wäre er aber trotzdem kaum mit bloßem Auge zu erkennen. Sein Aufleuchten fällt nur dem Beobachter am Fernrohr oder bei der Durchmusterung fotografischer Himmelsaufnahmen und ihrem Vergleich mit früheren Fotos auf, in denen dieser Stern als einzelnes Objekt noch nicht abgebildet war.

Eine Supernova im Andromedanebel beobachtete der deutsche Astronom Karl Hartwig am 31. August 1885 an der Sternwarte von Dorpat (heute: Tartu/UdSSR). Aber weder er noch die wenigen Astronomen, die vor Jahrhunderten Supernovae in unserer Galaxie

Der Andromedanebel – eine unserem Milchstraßensystem ähnliche und ihm benachbarte Galaxie. Bei klarer Luft ist er mit bloßem Auge gerade noch als schwaches Lichtfleckchen zu erkennen.



bemerkten, wußten, was sie eigentlich sahen. Ende vorigen Jahrhunderts war noch nicht einmal bekannt, daß der Andromedanebel in Wirklichkeit kein Gasnebel, sondern ein Milchstraßensystem aus Milliarden einzelner Sterne ist. Gewißheit darüber, daß das Weltall aus Milliarden weiterer Galaxien besteht, brachten erst Forschungen seit den zwanziger Jahren unseres Jahrhunderts.

Die Supernova, welche japanische und chinesische Astronomen im Jahre 1054 entdeckten, war derart hell, daß sie zwei Wochen lang sogar am Tageshimmel gesehen werden konnte, während zu dieser Zeit das Licht von Sternen gegen das der Sonne normalerweise verblaßt. Lange hält die Steigerung der Leuchtkraft einer Supernova aber nicht an. Nach kurzer Zeit klingt die Erscheinung so weit ab, daß der Stern nicht mehr oder bestenfalls durch das Fernrohr weiter zu erkennen ist.

An der Stelle des Himmels – im Sternbild Taurus (Stier) –, an der 1054 der Supernova-Ausbruch sichtbar war, befindet sich noch heute ein ausgedehnter Gasnebel. Er wird als Krebs- oder häufig – nach seinem englischen Namen – als Crabnebel bezeichnet. Der Nebel besteht aus riesigen Gasmassen, die sich mit Geschwindigkeiten von einigen tausend km/s (!) so voneinander entfernen, als kämen sie alle aus einem gemeinsamen Punkt im Raum. Auf Grund der Ausdehnung des Nebels und der Geschwindigkeit seiner Gasteilchen ist zu errechnen, daß sie um das Jahr 1000 ihre rasende Bewegung von der Stelle aus angetreten haben müssen, an der 1054 die Supernova aufleuchtete. Kein Astronom zweifelt deshalb heute mehr daran, daß der Krebsnebel eine von der Supernova ausgeschleuderte Materiemasse darstellt.

### *Geburtshelfer für neue Sterne*

Bei Supernova-Ausbrüchen geben Sterne also Stoff in das Weltall zurück, reichern den Bestand an interstellarer Materie und somit an Baustoff für neuzubildende Sterne wieder an. Wie schon erwähnt, kann auch der Teilchenstrom der ausgeschleuderten Materie, wenn er auf eine Wolke interstellarer Materie trifft, deren weitere Verdichtung und damit die Neubildung eines Sterns oder mehrerer Sterne auslösen.



Crabnebel, auch Krebsnebel genannt. Er besteht aus Materie, die beim Ausbruch der Supernova des Jahres 1054 in den Weltraum geschleudert wurde.

Da in dem Stern vor seinem Ausbruch bereits leichtere Elemente zu schwereren Elementen verschmolzen wurden, ändert sich dadurch allmählich die chemische Zusammensetzung der kosmischen Materie. Viele Atomkerne werden mit so hoher Geschwindigkeit in den Raum geschleudert, daß sie sich schnell durch das ganze galaktische System ausbreiten und somit einen Teil der primären kosmischen Strahlung liefern. Diese Atomkerne bestehen aus Teilchen, die mit Geschwindigkeiten nahe der des Lichts durch

das All rasen. Sie fallen auch ständig in die Gashülle der Erde ein und zersplittern infolge ihrer hohen Bewegungsenergie Atomkerne der Erdatmosphäre. Dabei entstehen ganze Schauer weiterer sehr energiereicher Teilchen, die man als sekundäre kosmische Strahlung bezeichnet. Sie gelangen bis zur Erdoberfläche.

So interessant ein erneuter Supernova-Ausbruch in unserem Milchstraßensystem für die Wissenschaft wäre – wir wollen uns nicht wünschen, daß er in der näheren Umgebung unserer Sonne passiert! Denn dies würde für längere Zeit die Intensität der kosmischen Strahlung erheblich erhöhen. Die normalerweise ständig vorhandene ist für die lebenden Organismen verträglich. Eine wesentliche Steigerung der Strahlenintensität könnte jedoch die Lebensvorgänge, die des Menschen nicht ausgenommen, beeinträchtigen und zum Beispiel zur Häufung bestimmter Erkrankungen führen.

### *Ließ eine Supernova die Saurier aussterben?*

Forschungen über die Entwicklung der Pflanzen- und der Tierwelt im Verlauf der Geschichte unserer Erde ergaben, daß vor etwa 70 Millionen Jahren plötzlich viele Tierarten, darunter die Saurier, ausstarben. Man hat dies in ursächliche Verbindung mit dem möglichen Ausbruch einer Supernova in der Nähe des Sonnensystems gebracht. Beweisbar ist das allerdings nicht, zumal inzwischen auch Anzeichen anderer mutmaßlicher Ursachen für diesen Umschwung in der Organismenwelt gefunden wurden. Das ändert aber nichts daran, daß der Supernova-Ausbruch eines relativ nahen Sterns wahrscheinlich nicht ohne schwerwiegende Folgen für das Leben auf der Erde bliebe.

Supernovae bilden auch eine Quelle derjenigen chemischen Elemente, die schwerer als Eisen sind. Vermutlich laufen bei den Ausbrüchen Prozesse ab, die so hohe Energien liefern, daß dabei solch schwere Elemente gebildet werden. Wie schon angedeutet, müssen dafür den Teilchen, die sich zu Atomkernen schwerer als die des Eisens vereinigen sollen, beträchtliche Mengen an Energie zugeführt werden. Insgesamt ist der Anteil derartiger Stoffe im Universum allerdings äußerst gering. Da auch die Erde solche Stoffe ent-

hält, war das Baumaterial unseres Sonnensystems vor vielen Jahrtausenden teilweise schon einmal Bestandteil eines explodierten Sterns. Unsere Sonne ist auf Grund ihres „jungen“ Alters von nur etwa 4,5 Milliarden Jahren ebenfalls ein Stern der „zweiten Generation“. Denn das ganze Weltall ist viel älter, man schätzt es auf 18 bis 20 Milliarden Jahre.

## Signale der „kleinen grünen Männchen“

Im Februar 1968 erschien in der englischsprachigen Zeitschrift „Nature“ ein Beitrag, der so sensationell war, daß ihn sofort die meisten Zeitungen weiterverbreiteten. Schon lange hatten sich die Menschen Gedanken darüber gemacht, ob wir Erdenbürger die einzigen denkenden Wesen im Weltall sind oder ob nicht auch viele andere Sonnen Planeten haben, auf denen sich Leben zu immer höheren Formen und schließlich zu menschenartigen Wesen entwickelte. Mit Sicherheit wissen wir heute, daß kein anderer Planet unseres Sonnensystems von solchen Lebewesen bewohnt ist. Lediglich für den Mars ist bisher nicht völlig auszuschließen, daß dort einfachste Lebensformen existieren. Aber auch dies ist sehr unwahrscheinlich. Doch in Anbetracht des Umstands, daß es Milliarden Galaxien gibt, von denen jede wiederum Milliarden Sonnen umfaßt, erscheint es naheliegend, daß etliche davon ebenfalls Planeten haben, auf denen Leben entstand. Faszinierend ist der Gedanke, mit solchen denkenden Bewohnern anderer Sonnensysteme durch Funk- oder Lichtsignale in Kontakt zu treten.

Nebenbei bemerkt wäre dies sehr schwierig; nicht nur, weil wir ihre und sie unsere Sprachen nicht kennen, sondern vor allem wegen der langen Laufzeiten der Signale. Radiowellen breiten sich zwar wie Licht mit der Geschwindigkeit von 300 000 km/s aus. Die Nachrichten wären also, hin und zurück, doppelt so lange unterwegs, wie der Abstand der fernen Planeten zur Erde in Lichtjahren beträgt. Außerdem können von der Erde aus sehr weitreichende Signale – wenn überhaupt – immer nur sehr stark gebündelt in eine bestimmte, eng umgrenzte Richtung ausgestrahlt werden. Umgekehrt müßten die Techniker des angepeilten Planeten ihre Empfangsantennen genau auf unser Sonnensystem ausgerichtet haben.

Das wäre ein unwahrscheinlicher Zufall. Was die Zeitungen im Februar 1968 meldeten, deutete aber dennoch – zumindest wenn man sich von dem Wunsch als dem Vater des Gedankens leiten ließ – darauf hin, daß es endlich gelungen sei, Radiosignale von einem anderen bewohnten Himmelskörper empfangen zu haben. Was war passiert?

Die Radioastronomie, das heißt die Registrierung der aus dem Weltall eintreffenden elektromagnetischen Strahlungen des Radiowellenlängenbereichs, hatte inzwischen einen großen Aufschwung genommen. Radiowellen werden von der Sonne, anderen Sternen und Sternsystemen sowie von interstellarer Materie ausgesandt. Da sie die Erdatmosphäre durchdringen und nunmehr technisch empfangen und ausgewertet werden können, hat sich den Astrophysikern eine neue Informationsquelle erschlossen. Zum Unterschied von der Beobachtung des Sternenlichts, die nur bei Nacht möglich ist, können Radiowellen auch am Tage empfangen werden.

In vielen Observatorien der Erde hatte man deshalb Radioteleskope mit immer größeren Parabolspiegelantennen errichtet. In der englischen Universitätsstadt Cambridge war im Juli 1967 ein neues Teleskop fertiggestellt worden, das dem besonderen Zweck diente, die zeitlich schnellen Veränderungen der eintreffenden Radiostrahlung festzustellen. Wodurch werden diese Veränderungen hervorgerufen? Die kosmischen Radiowellen müssen auf dem Weg zur Erde den als Sonnenwind bezeichneten Teilchenstrom durchdringen. Der Sonnenwind „weht“ aber nicht ständig mit gleicher, sondern etwas wechselnder Stärke. Ähnlich wie das Licht der Sterne flimmert, weil es auf dem Weg zur Erdoberfläche Luftsichten unterschiedlicher Beschaffenheit durchdringt, werden die kosmischen Radiowellen durch den Sonnenwind etwas verändert. Die aus über 2 000 zusammengeschalteten Einzelantennen bestehende Anlage des Radioteleskops von Cambridge war in besonderem Maße dafür geeignet, auf diese Weise hervorgerufene sehr schnelle zeitliche Schwankungen der Radiostrahlung zu registrieren.

## *Rätselhafte Radioimpulse*

Tag und Nacht wurden bestimmte Zonen des Himmels auf der Radiowellenlänge von 3,7 m „abgehördet“ und die Stärke der Signale in Form von Kurven auf Registrierpapier aufgezeichnet. Jede Woche entstanden so 210 m beschriebene Papierstreifen. Die junge Wissenschaftlerin Jocelyn Bell hatte die Kurven auszuwerten. Dabei fiel ihr etwas ganz Ungewöhnliches auf. Von einer bestimmten Stelle des Himmels kamen Radiowellenimpulse, die sich in immer gleichem Abstand von 1 1/3 s wiederholten.

Eine solche sehr kurze und stets gleichbleibende Periodenlänge war bis dahin von keinem natürlichen kosmischen Objekt beobachtet worden. Deshalb schien es fast so, als wären die Signale von denkenden Wesen auf technische Weise erzeugt worden, vielleicht in der Absicht, sich Bewohnern anderer Planeten bemerkbar zu machen. Damals war gerade ein utopischer Roman verbreitet, in dem „kleine grüne Männchen“ von einem außerirdischen Himmelskörper eine Rolle spielten. Deshalb sprach man von diesen eigenartigen Wellen – allerdings scherhaft – als von den Signalen dieser kleinen grünen Männchen.

Wenig später empfing man aber auch von einer anderen Stelle des Himmels stets in genau 1,2 s wiederkehrende Radioimpulse. Daß zwei Arten denkender Wesen aus zwei ganz verschiedenen Regionen des Universums Signale ausgerechnet in Richtung unseres Sonnensystems aussenden, war zu unwahrscheinlich. Man mußte also nach einer Erklärung dafür suchen, wie solche mit technischer Präzision wiederholten Signale auf natürliche Weise entstehen können und was für eigenartige Himmelskörper imstande sind, sie zu erzeugen. Den Astrophysikern war damit ein schwieriges Rätsel aufgegeben. Heute nennt man diese Himmelsobjekte Pulsare. Das bedeutet nicht, daß sie pulsieren, sich also abwechselnd aufblähen und wieder zusammenziehen wie die schon früher beschriebenen Roten Riesen während bestimmter Phasen ihrer Entwicklung. Vielmehr heißen sie Pulsare, weil sie gepulste, wie Pulsschläge rhythmisch aufeinanderfolgende Radiowellen aussenden.

Radioteleskop von Jodrell Bank in England. Der Durchmesser des Parabolspiegel-Reflektors beträgt 76 m.



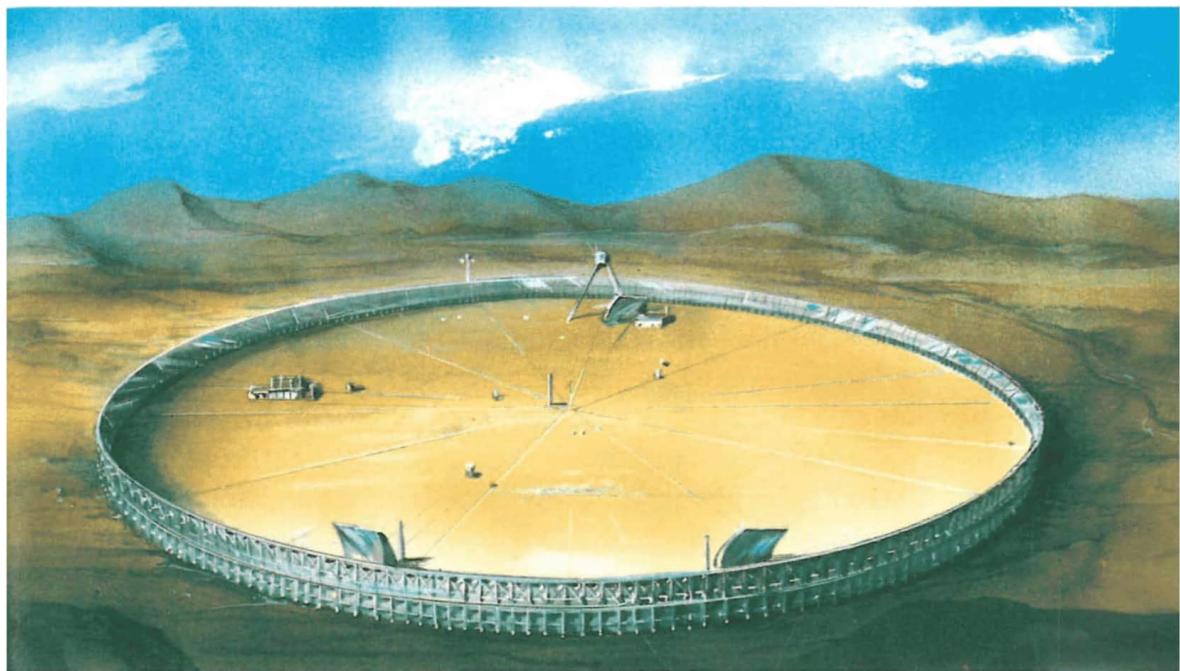
Das erstaunlichste an diesen Radiowellen war ihre äußerst kurze Periodenlänge, also der zeitliche Abstand der einzelnen Impulse. Längst waren Sterne bekannt, die ihre Helligkeit mit Perioden von Tagen oder Stunden verändern. Den „Schnelligkeitsrekord“ hielt ein Weißer Zwerg im Sternbild Herkules mit einer Periodenlänge von nur 70 s. Diesen unterboten die Pulsare bei weitem. Ihre Perioden lagen zwischen wenigen hundertstel bis zu 4,3 s.

Mit immer weiter verfeinerten Geräten war außerdem festzustellen, daß sich auch ein und derselbe Radiowellenimpuls in seiner Stärke innerhalb äußerst kurzer Zeiten veränderte. Solche Intensitätsschwankungen erfolgten bis herab zu 0,8 millionstel s. Aus Gründen, die wir hier nicht im einzelnen verfolgen wollen, ist daraus die Größe des Raumgebiets zu errechnen, von dem die Strahlung ausgeht. Das führte zu einer neuen Überraschung. Bei den erwähnten 0,8 millionstel s konnte die Region der Sternoberfläche, von der die Strahlung ausging, nämlich nicht größer als höchstens 250 m sein! Der Durchmesser von Neutronensternen, wie Pulsare auch genannt werden, liegt zwischen 12 km und 300 km.

### *100 Milliarden Kilogramm Materie in 1 Kubikzentimeter*

Bis jetzt sind über 300 Pulsare entdeckt worden. Nach Schätzungen gibt es in unserem gesamten Milchstraßensystem jedoch etwa 100 000. Sie müssen sehr klein sein. Ihr Radius kann nicht mehr als etwa 300 km betragen. Gehen wir von der Annahme aus, daß sie anderen Sternen vergleichbare Massen haben, dann handelt es sich also um Himmelskörper, in denen die Materie noch weit stärker verdichtet ist als in den Weißen Zwergen. Für den Zentralbereich der Pulsare wurden Dichten von  $10^{14}$  bis  $10^{15}$  g errechnet. 1 cm<sup>3</sup> enthält demnach eine Masse von 100 Billionen bis zu 1 Billiarde g. Das entspräche der Ladung von 6,6 Millionen beziehungsweise 66 Millionen Güterwagen mit jeweils 15 t Ladung.

Solche Sterne waren bis dahin nicht nur völlig unbekannt, sondern auch für kaum möglich gehalten worden. Selbst die Weißen Zwerge haben noch Durchmesser von mehreren zehntausend km bei Dichten von einigen tausend kg/cm<sup>3</sup>. Schon eine solche Dichte können wir uns unter irdischen Verhältnissen nicht vorstellen. Wie



Zu der sowjetischen Sternwarte von Selentschukskaja im Kaukasus gehört auch das Radioteleskop Ratan 600. In einem Ring von 600 m Durchmesser sind 895 verstellbare Reflektoren angeordnet.

aber sollte sich Materie in den Pulsaren noch viel stärker verdichten können? Und wie ist zu erklären, daß diese Gebilde keine kontinuierliche, also andauernde Radiowellenstrahlung aussenden, sondern sie – wie die Leuchttürme das Leuchtfeuer – periodisch aussenden?

## Was ist ein Neutronenstern?

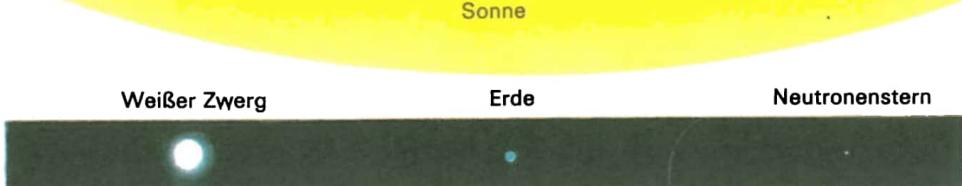
Um zu verstehen, warum sich Materie so verdichten kann, daß ein Stern trotz seiner riesigen Masse nur wenige Kilometer Durchmesser hat, müssen wir uns mit einigen Grundkenntnissen der Atom- und Kernphysik vertraut machen. Atome bestehen aus einem Kern, der zwar sehr klein ist, aber über 99 Prozent der Masse des Atoms enthält, und aus einem oder mehreren sehr viel leichteren Teilchen, Elektronen genannt. Sie umlaufen den Kern auf kreisförmigen oder elliptischen Bahnen. Die Gesamtheit der Elektronen eines Atoms nennt man die Atomhülle.

Der Durchmesser des Atoms wird durch den der Elektronenbahnen, also durch die Atomhülle bestimmt. Er zählt nach  $10^{-8}$  cm, also hundertmillionstel cm, der des Atomkerns aber nur nach  $10^{-13}$  cm, also zehnbillionstel cm. Die Atomhülle hat folglich einen etwa 100 000fachen Durchmesser als der Kern. Können alle Elektronen von den Atomen abgestreift werden, dann schrumpfte das Volumen in unvorstellbarer Weise.

Hinzu kommt etwas anderes. Die Atomkerne aller Elemente, mit Ausnahme des einfachen Wasserstoffs, sind ihrerseits nochmals aus zwei Arten von Teilchen zusammengesetzt, aus Protonen und Neutronen. Jedes Proton hat eine positive elektrische Ladung. Die Neutronen sind dagegen ungeladen, elektrisch neutral. Freie, nicht an einen Atomkern gebundene Neutronen zerfallen stets schon nach kurzer Zeit in ein elektrisch positives Proton und ein negatives Elektron. Unter den physikalischen Bedingungen, die in sehr dichten Sternen herrschen, findet aber auch das Umgekehrte besonders häufig statt: Je ein Elektron und ein Proton vereinigen sich zu einem Neutron. Das Elektron wird gewissermaßen in das Proton hineingedrückt. Da beide Ladungen gleich groß sind, aber entgegengesetzte Vorzeichen (+ und -) haben, heben sie sich gegenseitig zu Null auf. Aus dem Proton ist damit ein Neutron geworden.

Von den Pulsaren wird heute angenommen, daß es sich bei ihnen um Sterne handelt, die fast nur noch aus Neutronen bestehen. Solche Himmelskörper können enorme Dichten erreichen. Ein Neutronenstern von der Masse unserer Sonne hätte nicht mehr 1,392 Millionen km, sondern nur noch 20 bis 30 km Durchmesser. (Nebenbei bemerkt: Die Sonne könnte niemals ein Neutronenstern werden, weil für die Umwandlung in diesen Zustand das mindestens Anderthalbfache ihrer Masse erforderlich wäre.)

Für die Verdichtung der Materie spielt nicht nur das Abstreifen der Elektronen von den Atomen und die Vereinigung von Elektronen und Protonen zu Neutronen eine Rolle, sondern auch das Verhältnis zwischen dem Gravitationsdruck und dem Druck, den das Elektronen „gas“ ausübt. Erinnern wir uns daran, daß ein Stern nur dann stabil bleiben und seinen Durchmesser beibehalten kann, wenn sich der in Richtung zum Zentrum wirkende Gravitationsdruck und der nach außen gerichtete Druck die Waage halten. Lediglich von einer bestimmten Masse des Sterns an überwiegt der



Größenvergleich zwischen der Sonne, einem Weißen Zwerg, der Erde und einem Neutronenstern. Um maßstabsgetreu zu bleiben, konnte von der Sonne nur ein kleiner Ausschnitt angedeutet werden. Aus der schwachen Krümmung des Sonnenrandes gewinnen wir eine ungefähre Vorstellung davon, wie groß die ganze Sonnenkugel im gleichen Maßstab dargestellt sein müßte. Der Neutronenstern wäre – ebenfalls maßstabsgerecht dargestellt – so klein, wie er sich aus technischen Gründen gar nicht drucken läßt.

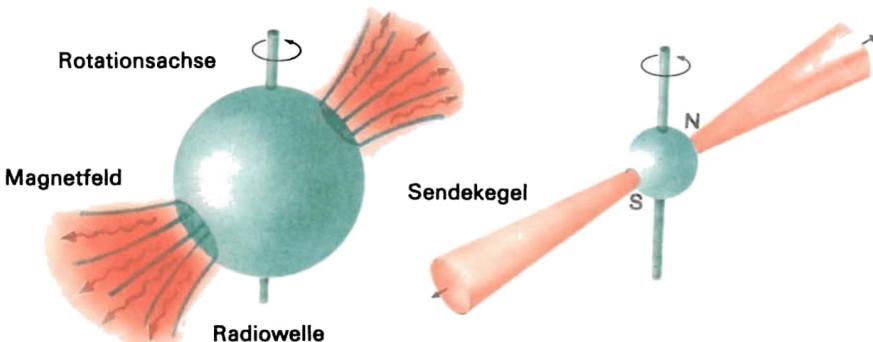
Gravitationsdruck den des Elektronen„gases“. Dadurch stürzt die Materie des Sterns in sich zusammen und erreicht ungeheure Dichten. Ist eine Dichte von etwa 1 Million kg/cm<sup>3</sup> erreicht, dann vereinigen sich immer mehr der ursprünglich noch vorhandenen freien Elektronen mit Protonen zu Neutronen. Die Dichte nimmt dadurch weiter zu. Erst wenn der Druck des Neutronen„gases“ so groß geworden ist, daß er dem Gravitationsdruck wieder die Waage hält, ist ein stabiler Zustand erreicht, und es findet keine weitere Verdichtung mehr statt. Dies gilt allerdings ebenfalls nur bis zu einer bestimmten Grenzmasse der Sterne. Ist sie überschritten, dann tritt eine noch weitere Verdichtung der Materie ein, und es entstehen jene sonderbaren Himmelsobjekte, die man „Schwarze Löcher“ nennt. Wir werden uns mit ihnen im letzten Kapitel beschäftigen.

Noch ein weiterer Vorgang spielt bei der Umwandlung in einen Neutronenstern eine Rolle. Vereinigen sich Elektronen und Protonen zu Neutronen, entstehen Neutrinos genannte Teilchen. Diese können den Stern trotz seiner großen Dichte durchdringen und dadurch Energie nach außen in das Weltall abführen. Sie kühlen auf diese Weise den Stern gewissermaßen ab. Da zwischen Druck und Temperatur ein gesetzmäßiger Zusammenhang besteht, sinkt durch die Abkühlung der Druck des Neutronen„gases“, der dem Gravitationsdruck entgegenwirkt.

## *Das Geheimnis der kosmischen Radioleuchtfeuer*

Selbst in einem Neutronenstern bleiben noch ausreichend Protonen und freie Elektronen übrig, um der Sternmaterie eine elektrische Leitfähigkeit zu verleihen. Da bewegte elektrische Ladungen stets Elektromagnetismus erzeugen, bleibt auch ein Magnetfeld vorhanden. Es wird angenommen, daß darauf sowie auf der schnellen Umdrehung des Neutronensterns die gepulste Aussendung von Radiowellen beruht.

Mit dem Stern rotiert sein Magnetfeld. Dies ist im rechten Teil des Bildes schematisch angedeutet. Der senkrechte Strich kennzeichnet die Umdrehungsachse, der halboffene gepfeilte Kreis die Rotationsrichtung, N den magnetischen Nord- und S den magnetischen Südpol. Die von den Polen ausgehenden Magnetfeldlinien



Schema eines Pulsars. Erläuterung im Text.

sind im linken Teil des Bildes durch die schwach gekrümmten Linien markiert. Entlang diesen Feldlinien bewegen sich mit nahezu Lichtgeschwindigkeit Elektronen, im Bild durch gewellte und gepfeilte rote Linien angedeutet.

Auf ihrer Bahn strahlen die Elektronen elektromagnetische Wellen – Radiowellen und eventuell auch Licht – gebündelt in Richtung ihrer Bewegung aus, also nicht wie die Oberfläche eines normalen, leuchtenden Sterns gleichmäßig nach allen Seiten. So entstehen die im rechten Bildteil gezeigten beiden Strahlenkegel. Mit der Umdrehung des Sterns bewegen sie sich wie der Lichtstrahl eines rotierenden Scheinwerfers. Nur immer dann, wenn einer der beiden Kegel in Richtung auf unser Sonnensystem weist, empfan-

gen wir die Strahlung. Folglich trifft sie nicht ständig, sondern nur gepulst ein. Die Periodenlänge der Pulse hängt dabei von der Umdrehungszeit der Neutronensterne ab. Doch nicht jeder Neutronenstern muß zugleich auch ein Pulsar sein.

### *Sterne, die in Sekunden rotieren*

Da die Periodenlänge äußerst kurz ist, kann man daraus schließen, daß Pulsare rasend schnell rotieren. Von einem normalen Stern würden dabei, infolge der aus der schnellen Umdrehung resultierenden enormen Fliehkraft, die äußeren Materieschichten abreißen und in den Weltraum geschleudert. Nur weil Neutronensterne eine so hohe Dichte haben und sehr klein sind, herrscht an ihrer Oberfläche eine derart starke Anziehungskraft, daß diese die Fliehkraft überwiegt. Dadurch hält der Stern zusammen. Um zu verstehen, warum Neutronensterne so schnell rotieren, ist eine weitere physikalische Gesetzmäßigkeit zu berücksichtigen. In der Umdrehung eines Körpers steckt auch eine Form der Bewegungsenergie. Sie wird Drehimpuls genannt. Nach dem Naturgesetz von der Erhaltung der Energie geht dieser Drehimpuls bei der Verringerung des Durchmessers eines Sterns nicht verloren, sondern bleibt erhalten. Dies geschieht in der Weise, daß bei kleiner werdendem Durchmesser des Sterns seine Rotationsgeschwindigkeit ansteigt. (Diese Gesetzmäßigkeit haben wir sicher schon bei Fernsehübertragungen von Eiskunstlauf-Veranstaltungen beobachtet. Wenn der Eisläufer mit ausgestreckten Armen rotiert, eine Pirouette dreht, so wird seine Umdrehung schneller, sobald er die Arme anwinkelt und dadurch seinen Durchmesser gewissermaßen verkleinert. Die Steigerung der Rotationsgeschwindigkeit tritt also von selbst, ohne zusätzliche Kraftanstrengung des Sportlers ein. Umgekehrt dreht er sich wieder langsamer, wenn er seine Arme ausstreckt.)

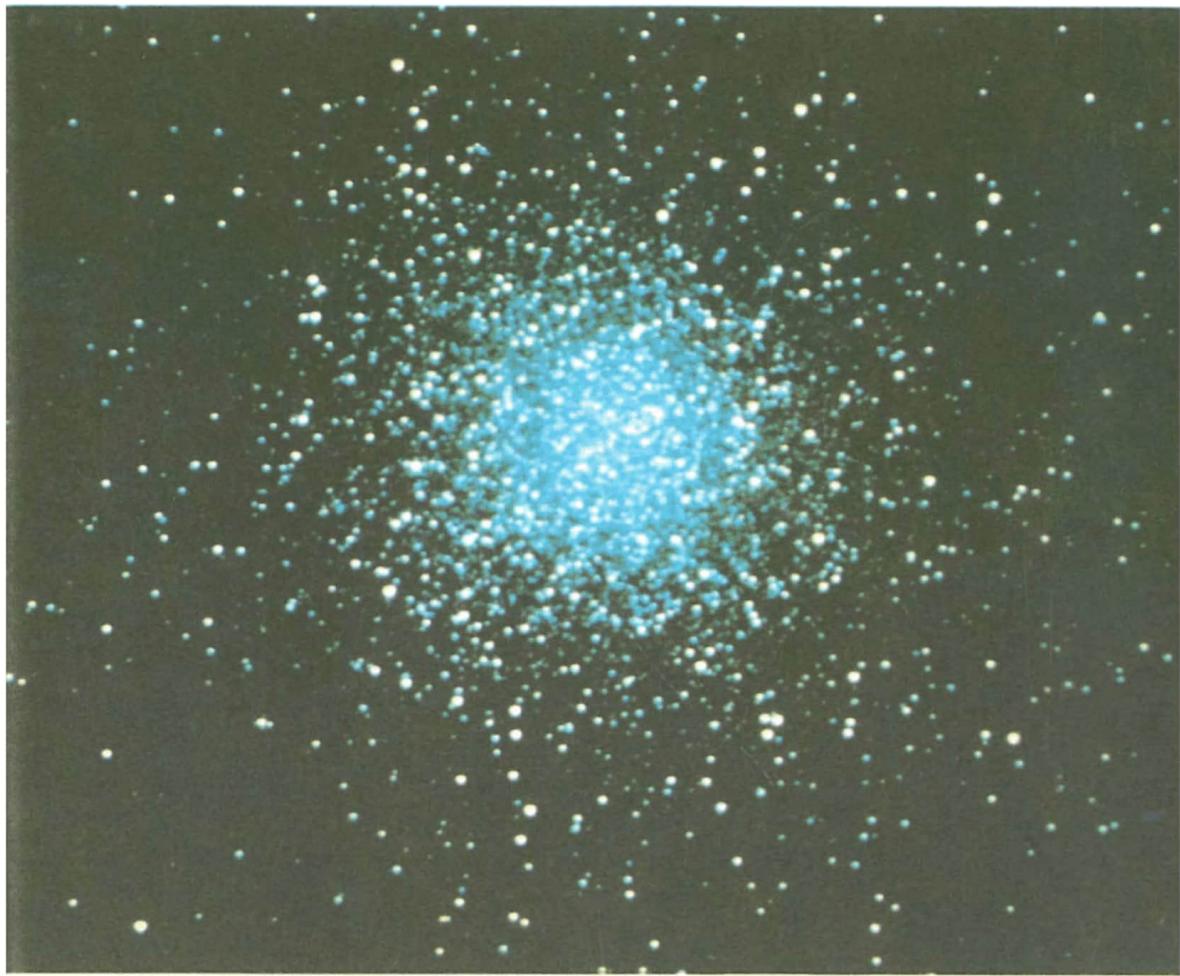
So muß auch bei einem Neutronenstern die Rotationsgeschwindigkeit um so größer werden, auf einen je kleineren Durchmesser er schrumpft.

## *Blinklichter im All*

Als man mehrere Pulsare aufgefunden hatte, ergab sich die Frage, ob sie auch sichtbares Licht gepulst ausstrahlen. Das festzustellen war außerordentlich schwer. Mit dem Auge wäre es selbst am Fernrohr nicht zu bemerken gewesen, weil wir derart schnell aufeinanderfolgende Lichtblitze nicht einzeln erkennen und unterscheiden können. Auch fotografische Himmelsaufnahmen, die in der Astronomie längst eine viel größere Rolle spielen als die direkte Fernrohrbeobachtung, nützen in diesem Falle nicht. Denn die Fotos müssen viele Minuten oder Stunden belichtet werden, weil erst durch die langzeitige Einwirkung des Lichts eine Abbildung entsteht. Dabei summiert sich die Lichteinwirkung mit der Zeit, bis sie ausreicht, um nach der Entwicklung der Platte einen geschwärzten Punkt zu ergeben, der den Stern darstellt. (Alle Himmelsaufnahmen sind ja zunächst Negative, zeichnen also die hellen Sterne als schwarze Punkte auf. Die Bilder, die wir in Büchern abgedruckt finden, sind Kopien der Negative und geben daher die Sterne als helle Punkte auf dunklem Grund wieder.) Infolge der erforderlichen Langzeitbelichtung ist also überhaupt nicht zu unterscheiden, ob ein Stern ständig oder nur gepulst ausstrahlt.

Das Prinzip, nach dem schließlich die Lösung des Rätsels gefunden wurde, wollen wir uns durch einen vereinfachenden Vergleich veranschaulichen. Setzen wir an die Stelle der Augen zwei Fernsehkameras, auf die – im Rhythmus der Pulsperiode des Sterns – abwechselnd das durch das Fernrohr sichtbare Abbild der betreffenden Stelle des Himmels entworfen wird. Kamera A erhält das Bild jedesmal in dem Moment, in dem der Pulsar seine Radiostrahlung aussendet, Kamera B dagegen in der Zwischenzeit, während der kein Radioimpuls eintrifft. So müßte sich zwischen beiden Fernsehbildern ein Unterschied zeigen. Während der an die Kamera A angeschlossene Bildschirm ständig alle Sterne der betreffenden Himmelsregion zeigt, müßte derjenige Stern, der ein Pulsar ist, auf dem mit der Kamera B verbundenen Bildschirm fehlen.

In Wirklichkeit war das Verfahren, mit dem der Nachweis gelang, noch komplizierter. Es wurden alle Sterne des in Frage kommenden Himmelsfeldes, unter denen sich der Pulsar befand, einzeln und mit Hilfe von Lichtquantenzählern untersucht. Licht setzt



Sternhaufen im Herkules

sich nämlich aus einzelnen schwachen Lichtblitzen zusammen, ähnlich wie ein Haufen Sand aus Körnchen besteht. Die Lichtblitze werden als Lichtquanten bezeichnet. Um ein Quant wahrzunehmen, müßten wir unsere Augen zunächst lange Zeit an tiefe Dunkelheit gewöhnen. Von allen Sternen und fast allen anderen Lichtquellen werden stets unvorstellbar viele Lichtquanten in ganz kurzen Zeitabständen ausgesandt, so daß wir die Zusammensetzung des Lichts aus einzelnen Quanten normalerweise nicht erkennen.

Mit Hilfe geeigneter Meßgeräte sind die Lichtquanten jedoch zu zählen. Wird nun das von einem Stern ausgehende Licht wiederum im Rhythmus der Pulsperiode nacheinander auf mehrere Zählge-

räte verteilt, dann müssen, falls es sich nicht um einen Pulsar handelt, alle Apparaturen etwa gleich viele Quanten registrieren. Sendet der Stern jedoch gepulstes Licht aus, dann wird derjenige Zähler, der stets in dem Moment angeschlossen ist, in dem der Lichtimpuls eintrifft, die weitaus meisten Quanten ermitteln; die übrigen dagegen fast keine, nämlich nur die wenigen, die auch von dem nie völlig dunklen Hintergrund des Nachthimmels ausgehen.

### *Suche nach dem Überrest einer Supernova*

Bei der Erforschung der Pulsare glückte eine besonders aufregende Entdeckung, die aufschlußreich für die weitere Entwicklung solcher Sterne ist, die zur Supernova wurden. Es gelang nämlich, inmitten des früher beschriebenen Krebsnebels einen Pulsar nachzuweisen, der nicht nur Radio-, sondern auch Lichtstrahlung gepulst aussendet. Radiopulsare wurden inzwischen auch an weiteren Stellen des Himmels gefunden, an denen vorhandene Gasmassen auf einen früher stattgefundenen Supernova-Ausbruch hindeuten. Andererseits gibt es auch Pulsare, die nicht von solchen Gasmassen umgeben sind. Umgekehrt ist nicht in jeder Gassmasse, von der man annimmt, daß sie von einer Supernova stammt, ein Pulsar zu entdecken.

Die Aussendung gepulsten Lichts konnte überhaupt nur noch bei einem weiteren Stern beobachtet werden. Seine Pulsperiode ist größer als die des Pulsars im Krebsnebel, und die ihn umgebenden Gasmassen sind nicht mehr so kompakt wie dieser, sondern schon zerfasert und über ein größeres Raumgebiet im Sternbild Vela verstreut. Anscheinend liegt der hier stattgefundene Supernova-Ausbruch viel länger zurück als der vom Jahre 1054. Daher haben sich die ausgeschleuderten Gasmassen bereits viel weiter vom „Explosionsort“ entfernt und bilden keine zusammenhängende Masse mehr.

Berücksichtigen wir nun noch, daß bei etlichen Pulsaren, die über längere Zeit beobachtet wurden, eine allmäßliche Verlängerung der Pulsperiode festzustellen war, dann kann man über den Zusammenhang zwischen Pulsaren und Supernovae etwa folgende Vermutung anstellen: Anfangs bleibt als Überrest einer Supernova



Dieses schleierartige Gebilde ist der Überrest einer vor etwa 20 000 Jahren explodierten Supernova im Sternbild Schwan (Cygnus).

ein Pulsar mit sehr kurzer Periodenlänge zurück, die noch kürzer als die des Pulsars im Krebsnebel ist. Zunächst wird auch Licht gepulst ausgestrahlt. Mit der Zeit verlangsamt sich jedoch der Rhythmus, weil der Stern Rotationsenergie verliert und sich langsamer dreht. Auch die Lichtaussendung wird immer schwächer und hört schließlich ganz auf, so daß nur noch die Radiostrahlung übrigbleibt. Darum senden nur die Sternreste der jüngsten Supernovae gepulstes Licht aus, die sehr viel zahlreicheren älteren dagegen nicht mehr.

Ob Neutronensterne und Pulsare nur die Überbleibsel einer Su-

pernova sind oder auch auf andere Weise entstehen können, ist eine derzeit noch offene Frage.

Nicht jeder Neutronenstern muß uns auch als Pulsar erscheinen. Denn ob seine Strahlung die Erde trifft, hängt von dem Winkel zwischen der Rotationsachse des Sterns und der Sichtlinie von der Erde aus ab. Da hierbei die verschiedensten Winkel vorkommen, kann nicht jeder Neutronenstern als Pulsar beobachtbar sein.

### *Riesen, die einen Zwerge „füttern“*

Große Rätsel geben den Astrophysikern die bereits erwähnten Novae auf. Dies sind Sterne, welche innerhalb weniger Stunden ihre Leuchtkraft um das Tausend- bis Millionenfache steigern. Es wurde schon gesagt, daß sie viel häufiger als Supernovae sind. So leuchten zum Beispiel in unserer Andromedanebel genannten Nachbargalaxie jährlich 20 bis 30 Novae auf. Im Verlauf von Monaten oder auch einigen Jahren nimmt ihre Leuchtkraft wieder ab. Eine Nova gehört stets einem Doppelsternsystem an, wobei beide Sterne eng benachbart und gleichzeitig entstanden sind. Doch hatten beide unterschiedliche Anfangsmassen. Der massereichere Stern verbrauchte seinen Kernbrennstoff schneller und wurde früher zum Weißen Zwerp als der andere.

In einem solchen System eng benachbarter Sterne, von denen der eine ein Weißer Zwerp ist, herrschen hinsichtlich der gegenseitigen Anziehungskraft sehr komplizierte Verhältnisse. Sie führen dazu, daß von dem „normalen“ Stern Materie auf den Weißen Zwerp überströmt. Sein Inneres ist noch heiß genug, um Wasserstoff zu Helium zu verschmelzen. Aber der Weiße Zwerp ist ja bereits „ausgebrannt“, hat also keinen Wasserstoff mehr in seinem Zentralgebiet. Wenn jedoch von dem Nachbarstern Wasserstoff auf den Weißen Zwerp strömt, bildet sich an dessen Oberfläche eine immer dicker werdende Schicht wasserstoffreicher Materie. Der untere Teil der Schicht erhitzt sich zunehmend. Wenn dort, wo sie die ursprünglich zum Weißen Zwerp gehörende Materie berührt, etwa 10 Millionen K entstanden sind, zündet mehr oder weniger schlagartig der Wasserstoff. Die dem Zwerp aufgesprühte Decke aus Wasserstoff wird dabei in einer gigantischen Explosion in das



Pferdekopfnebel im Sternbild Orion

Weltall geschleudert. Dabei kommt es zu einem starken Anstieg der Leuchtkraft.

Man kann eine Nova also nicht einfach als eine bloß harmlosere Form der Supernova betrachten, denn die Materie, die auf der Nova „explodiert“, war nicht von vornherein Bestandteil des Sterns, sondern wurde ihm erst von der anderen Komponente des Doppelsternsystems allmählich zugeführt. Ein Argument für diese Erklärung wird darin gesehen, daß bei einigen Novae wiederholte Lichtausbrüche stattfanden, so zum Beispiel bei dem Stern T Pyxidis in den Jahren 1890, 1902, 1920, 1944 und 1966. Es ist vorstellbar, daß der eine Stern den anderen laufend mit Wasserstoff „füt-

tert“. Jedesmal, wenn dabei auf dem Weißen Zwerg eine hinreichend große Wasserstoffdecke entstanden ist, setzt ein explosionsartiger Kernfusionsprozeß ein.

## Sterne, die ihr Licht gefangenhalten

Bleibt am Ende der Entwicklung eines Sterns eine genügend große Masse übrig, dann kann er weder ein Weißer Zwerg werden noch auf die Dauer ein Neutronenstern bleiben. Selbst der Druck des Neutronen „gases“ reicht in diesem Falle nicht mehr aus, um der Gravitationskraft die Waage zu halten. Der Stern stürzt immer weiter in sich zusammen, verdichtet sich folglich stärker und schrumpft auf einen noch kleineren Durchmesser. Die Sonne würde bei einem solchen Vorgang zum Beispiel von 1,392 Millionen km auf nur 6 km Durchmesser oder weniger zusammenfallen, die Erde auf eine knapp 1 cm große Kugel. Allerdings können sich weder die Sonne noch die Erde so stark verdichten, weil ihre Massen dafür zu klein sind.

Ein derart verdichteter Stern hat eine merkwürdige Eigenschaft. Licht und andere elektromagnetische Wellen, die von ihm ausgehen, können sich nicht mehr geradlinig endlos in den Weltraum ausbreiten, sondern werden von der Anziehungskraft des Sterns im Bogen wieder zurückgeholt. (Das ähnelt einem Wurf auf der Erde. Schleudern wir einen Ball nach oben, kehrt er auf Grund der Erdanziehungskraft zum Boden zurück.)

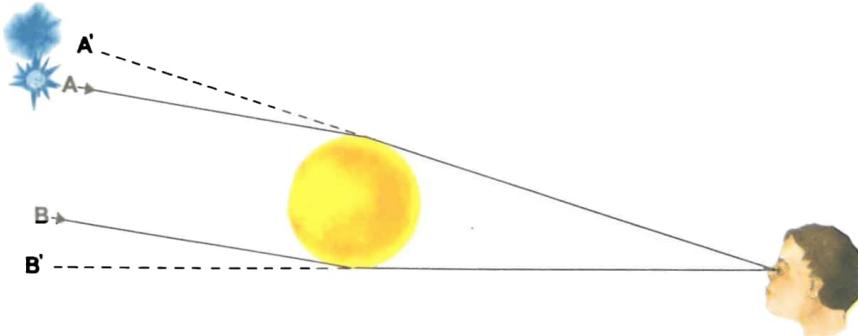
So ergeht es allen elektromagnetischen Strahlungen eines solchen Sterns. Sie können über einen gewissen Umkreis des Sterns nicht hinausgelangen. Auch Lichtstrahlen, die zu ihnen dringen, werden gewissermaßen aufgesaugt. Derartige Himmelskörper bleiben deshalb grundsätzlich unsichtbar. Man nennt diese Gebilde daher Schwarze Löcher.

Daß sie ihr Licht „gefangenhalten“, beruht auf der extrem starken Anziehungskraft, die an der Oberfläche eines solchen Sterns herrscht. Erinnern wir uns daran, daß die allgemeine Massenanziehungskraft, die Gravitation, mit der Größe der Masse eines Körpers zu- und mit der Entfernung von seinem Massenschwerpunkt abnimmt. In einem Stern der geschilderten Beschaffenheit ist eine

riesige Materiemasse auf winzigstem Raum zusammengeballt. Die Entfernung der Oberfläche des Schwarzen Lochs von seinem Massenmittelpunkt ist aus diesem Grund sehr klein. Folglich ist die Anziehungskraft an der Sternoberfläche enorm groß.

Daß auch Licht und andere elektromagnetische Wellen der Massenanziehungskraft unterliegen, folgt aus der schon früher erwähnten, von Albert Einstein erkannten Äquivalenz (Gleichwertigkeit) von Masse und Energie. Licht und andere elektromagnetische Strahlen stellen ebenfalls eine Form der Energie dar und entsprechen deshalb einer, wenn auch sehr kleinen, Masse. Somit werden sie wie alle Massen von anderen Massen angezogen. Bei einer Sonnenfinsternis des Jahres 1919 konnten Wissenschaftler erstmals den Beweis für die Richtigkeit dieser Theorie erbringen.

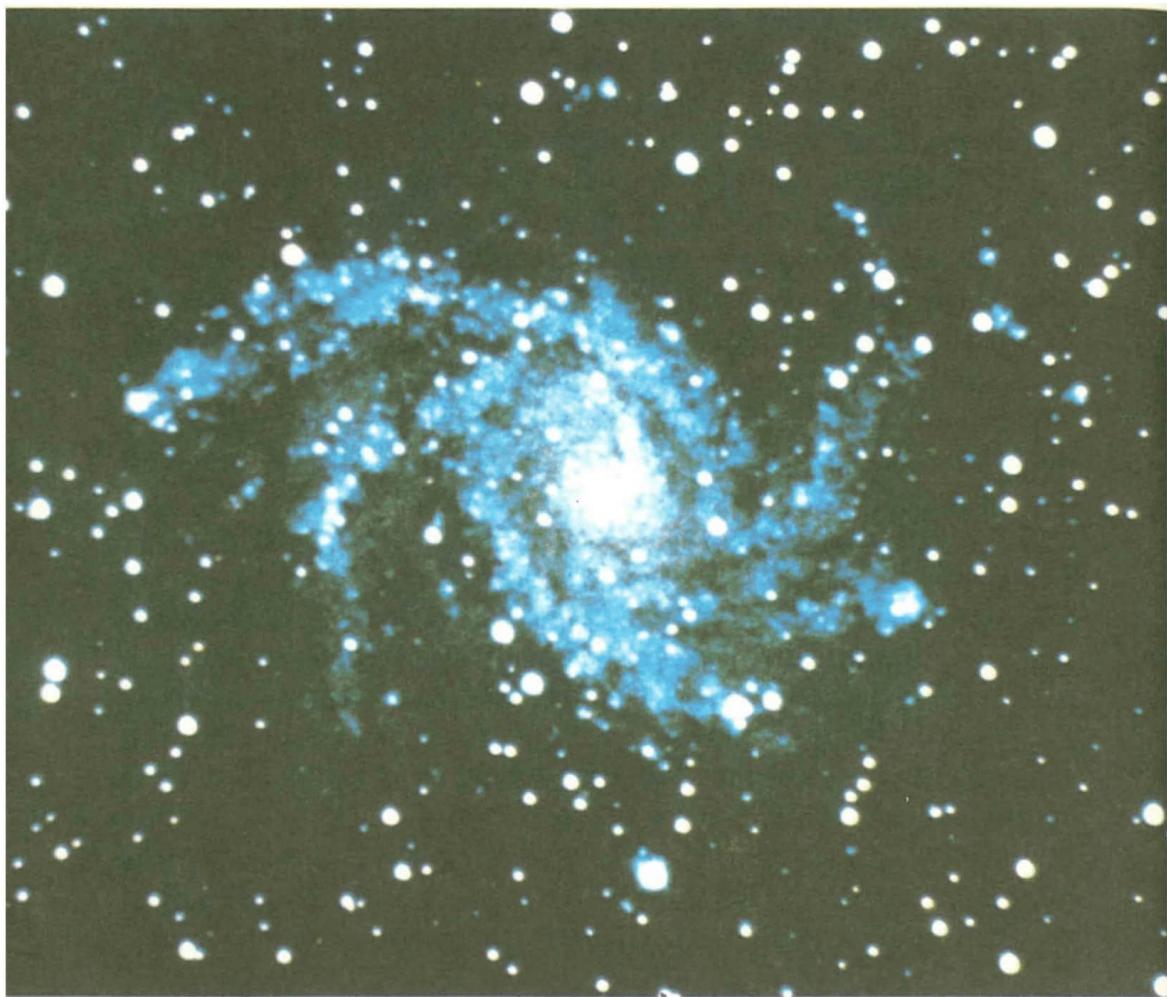
Normalerweise breiten sich Lichtstrahlen stets geradlinig aus. Die Erde hat eine zu geringe Masse und folglich eine zu geringe Gravitation, um eine meßbare Ablenkung des Lichts aus der Geraden zu bewirken. Die Masse der Sonne ist dagegen bereits groß genug, um Lichtstrahlen, die von Sternen ausgehen und auf dem Wege zur Erde die Sonne ganz dicht passieren, etwas aus ihrer geraden Richtung abzulenken und zu krümmen. Danach breiten sie sich wieder geradlinig weiter bis zur Erde aus. Dies ist im Bild schematisch dargestellt. Bei einer totalen Sonnenfinsternis werden



Ablenkung des Lichts im Gravitationsfeld der Sonne

für ganz kurze Zeit auch am Taghimmel Sterne sichtbar, die, von der Erde aus gesehen, dicht neben der Sonne zu stehen scheinen. Sie lassen sich fotografieren.

Da wir beim Licht, das auf der Erde eintrifft, stets eine geradlinige Ausbreitung voraussetzen, sehen wir den Stern in Fortsetzung



Spiralförmige Galaxie im Sternbild Cepheus

der im Bild gestrichelt gezeichneten Geraden, also etwas seitlich von dem Punkt verschoben, an dem er sich in Wirklichkeit befindet.

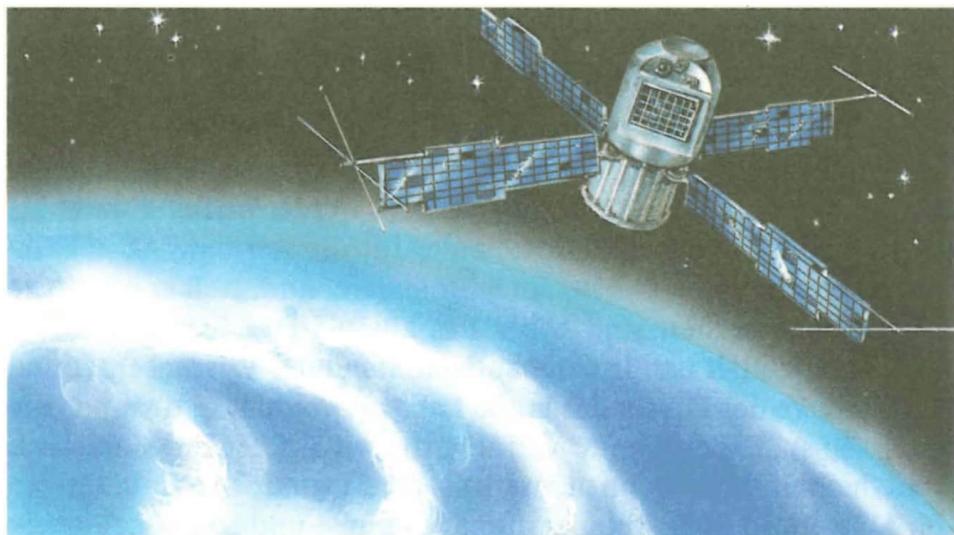
Vergleichsaufnahmen desselben Himmelsfeldes, die zu einem Zeitpunkt erfolgen, währenddessen die Lichtstrahlen des Sterns nicht dicht an der Sonne vorbeigehen, zeigen den Stern dann an seinem wirklichen Ort. Damit ist erwiesen, daß das Licht im Gravitationsfeld der Sonne tatsächlich gekrümmmt wird. Bei der Sonne ist die Umlenkung der Lichtstrahlen allerdings sehr gering, weil die Anziehungskraft an ihrer Oberfläche sehr viel kleiner ist als die, welche an den Oberflächen von Schwarzen Löchern herrscht.

Diese eigenartigen Himmelskörper können sich nur noch indirekt durch die Anziehungskraft bemerkbar machen, die sie auf andere Sterne und Materiemassen des Weltalls ausüben. Es wird vermutet, daß möglicherweise ganze Sterne und Sternsysteme in Schwarze Löcher hineinstürzen, die sich in den großen Weiten des Weltalls befinden und wahrscheinlich auch im Zentrum unseres Milchstraßensystems. Doch sind diese Forschungen über Schwarze Löcher längst nicht abgeschlossen. Wichtige Ergebnisse werden auf Erdsatelliten montierte Spezialteleskope bringen, welche die aus dem Weltall kommenden Röntgenstrahlen auffangen und die Lage der kosmischen Röntgenstrahlenquellen möglichst genau ermitteln. Beim Hineinstürzen in Schwarze Löcher könnte Materie durch die starke Anziehungskraft nämlich derart beschleunigt werden, daß dabei Röntgenstrahlen entstehen.

Wenn sich alle diese Vermutungen als richtig erweisen, geht das Weltall sehr allmählich einem ziemlich langweiligen Ende entgegen. Die Neubildung von Sternen müßte immer seltener werden, weil immer mehr Materie in Weißen Zwergen, Neutronensternen und Schwarzen Löchern kompakt zusammengehalten wird. Allerdings vollzieht sich das in Zeiträumen, für die alle Zeitmaßstäbe menschlicher Geschichte viel zu klein sind.

Manche Menschen stellen gelegentlich die Frage, was uns die

Der mit einem Röntgen-Teleskop ausgestattete Satellit Uhuru, auch Explorer 42 genannt





Trifidnebel im Sternbild Schütze (Sagittarius)

Erforschung der Sterne eigentlich nützt, da wir auf ihre Entwicklung nicht den geringsten Einfluß nehmen können, warum soviel Geld und Arbeitskraft dafür aufgewendet werden? Man könnte als ein Argument anführen, daß viele der für die Astrophysik entwickelten komplizierten Geräte auch für andere, unmittelbar nützliche Zwecke anzuwenden sind. Aber das allein ist nicht ausschlaggebend. Das Weltall ist für den heutigen Stand der Wissenschaft und insbesondere der Physik das große Labor geworden, in dem uns die Natur selbst „Experimente“ vorführt, die wir auf der Erde künstlich nicht herbeiführen können, weil es derart große Ansammlungen von Massen, so hohe Temperaturen, so große und so geringe Dich-

ten und noch manche anderen ungewöhnlichen Bedingungen auf unserem Planeten nicht gibt.

Die Erforschung des kosmischen Geschehens bereichert deshalb unsere Erkenntnisse über die Materie und ihre Eigenschaften insgesamt um vieles, was wir ohne das „Naturlabor Weltall“ nicht wissen könnten. Darüber hinaus gehört es zur Bestimmung des Menschen, der zum Unterschied vom Tier mit einem wunderbaren Verstand begabt ist, unter anderem auch sein Wissen über die Welt immer mehr zu erweitern. Diesen Drang nach Erkenntnis um der Erkenntnis willen schon bei jungen Menschen zu wecken ist neben der Vermittlung von Wissen das Anliegen dieses Buches.

# Inhaltsverzeichnis

Schauspiel im Weltall 5

Sternexplosion lieferte irdische Materie 5

Detektive des Kosmos 7

Wie Sterne geboren werden 8

Wie leer ist der Weltraum? 9

Urkraft Gravitation 11

Eine Formel für Sterngeburten 13

Wolken – 2,5millionenmal größer als die Sonne 13

Sterne, vom Computer konstruiert 14

Wann beginnt das „Leben“ eines Sterns? 16

Fahndung nach der Sonnenenergie 19

Liefert Himmelssteine Sonnenlicht? 21

Das Rätsel des Wasserstoffbrennens 22

10 Millionen Kelvin und mehr 24

Kann man die Zukunft der Sonne vorherberechnen? 27

Wenn die Sonne den Merkur verschluckt 28

Und doch vielleicht nur Hirngespinste? 30

Das wichtigste Diagramm der Astronomen 30

Wachstumskurve auf Millimeterpapier 32

„Fingerabdrücke“ der Sterne 34

Legionen Roter Riesen 36

Kosmische Energieverschwender 38

Brennende Kugelschalen 39

Sterne, die sich „aufpusten“ 41

Vom Roten Riesen zum Weißen Zwerg 44

Wo 1 Kubikzentimeter Materie 10 000 Kilogramm wiegt 45

Was von Roten Riesen übrigbleibt 46

Das Geheimnis der Ringnebel 47

Wenn Sterne explodieren	49
Sterne mit der Leuchtkraft von Milliarden Sonnen	50
Ersehnte Himmelssensationen	51
Geburtshelfer für neue Sterne	53
Ließ eine Supernova die Saurier aussterben?	55
Die Signale der „kleinen grünen Männchen“	56
Rätselhafte Radioimpulse	58
100 Milliarden Kilogramm Materie in 1 Kubikzentimeter	60
Was ist ein Neutronenstern?	61
Das Geheimnis der kosmischen Radioleuchtfeuer	64
Sterne, die in Sekunden rotieren	65
Blinklichter im All	66
Suche nach dem Überrest einer Supernova	68
Riesen, die einen Zwerg „füttern“	70
Sterne, die ihr Licht gefangenhalten	72

**Einband-Vorderseite:** Großer Orionnebel

**Einband-Rückseite:** Offener Sternhaufen im Sternbild Stier (Taurus)

**Einband-Innenseiten:** Peter Schenk d. Ä., *Atlas contractus*, Karte des nördlichen und südlichen Sternhimmels (etwa 1705)

Bildnachweis:

ADN (1)

Archiv (12)

W. Högner (1)

Karl-Schwarzschild-Observatorium, Tautenburg (1)

Sächsische Landesbibliothek

Deutsche Fotothek Dresden (2)

Urania-Verlag (1)

ISBN 3-358-00361-2



1. Auflage 1988

© DER KINDERBUCHVERLAG BERLIN – DDR 1988

Lizenz-Nr. 304-270/115/88

Satz und Repro: INTERDRUCK Graphischer Großbetrieb Leipzig – III/18/97

Druck und buchbinderische Verarbeitung: Messedruck Leipzig

LSV 7841

Für Leser von 12 Jahren an

Bestell-Nr. 632 945 0

00:- )







ab 12 J.



Ewig unveränderlich erscheinen uns die Sterne. Doch der Schein trügt. In Wirklichkeit ereignen sich im Weltall Vorgänge, die einem atemberaubenden Schauspiel vergleichbar sind. Nur laufen sie zumeist in Zeiträumen ab, die jenseits menschlicher Vorstellungskraft liegen. Ständig entstehen aus Gas und Staub neue Sterne, während andere in einer gigantischen Explosion enden. Überreste von Sternen erlangen sonderbare Eigenschaften, die von irdischer Materie unbekannt sind. Wie diese Geheimnisse enträtselt wurden, schildert dieses Buch.



**DER KINDERBUCHVERLAG BERLIN**

ISBN 3-358-00361-2