

16 Sterne

Mein erstes Astronomiebuch stammt von einem russischen Forscher. Wieder einmal war ich mit meinen Eltern auf Verwandtenbesuch in der damaligen DDR. Im anderen Teil Deutschlands mit seinen gefängnisgrauen Mauern und den nicht gerade zuvorkommenden Staatsorganen war es nicht so einfach, das zwangsweise umgetauschte Geld in etwas Sinnvolles zu verwandeln. Also stürzte ich mich auf naturwissenschaftliche Bücher, denn diese waren weder ideologisch verfärbt noch enthielten sie falsche Tatsachen. Und so kaufte ich mir ein reich bebildertes Buch und nahm es durch den Eisernen Vorhang mit nach Hause.

Mit dem Werk von Boris Woronzow-Weljaminow hatte ich nun das ganze Universum vor mir liegen und erfuhr zum ersten Mal, dass Sterne eine Geschichte haben. Sie werden geboren, durchleben verschiedene Phasen und vergehen auch wieder. Einige sterben dabei geradezu spektakulär. So lernte ich, dass das wichtigste an einem Stern seine Masse ist. Sie bestimmt nicht nur seine Größe, sondern auch seine Temperatur, seine Lebensdauer und schließlich seine Todesart. Die Masse ist deshalb so wichtig, weil alle Sterne am Anfang aus fast demselben Material bestehen. Sie enthalten praktisch nur Wasserstoff und Helium, denn dies war die Ursuppe des Universums, und alle anderen Elemente kamen später hinzu.

Bevor wir uns aber anschauen, wie die Lebensgeschichte eines Sterns mit seiner Masse zusammenhängt, wenden wir uns zunächst unserem eigenen Stern zu. Wie und wann ist die Sonne entstanden und wie wird sie enden?

Die Entstehung unserer *Sonne* können wir nur aus der Beobachtung von Frühstadien ähnlicher Sterne ableiten. Sie könnte die folgende Überschrift tragen: »Es war einmal vor langer Zeit in dieser Galaxis«. Mit einer gigantischen Molekülwolke von 100 Lichtjahren Durchmesser fing alles an. Sie besaß eine tausendfach höhere Dichte als eine normale Sternenumgebung und trug Millionen von Sonnenmassen in sich. Undurchsichtig für das Sternenlicht war sie ein Ort der Kälte und Dunkelheit aus Gas und ein wenig Staub.

Viele Millionen Jahre waberte die Wolke ereignislos vor sich hin, doch dann traf sie die Schockwelle einer gigantischen Sternexplosion. Gebeutel vom plötzlichen Geschwindigkeitsschub schnürten sich Teile ihrer Ränder zu kleineren Gebieten zusammen. Hier war der nun folgende Gravitationskollaps schon nicht mehr aufzuhalten. Unter der Schwerkraft nahmen die neuen Sternensysteme langsam Gestalt an. In einem wilden Pirouettentanz formten sich drehende Scheiben, während sich

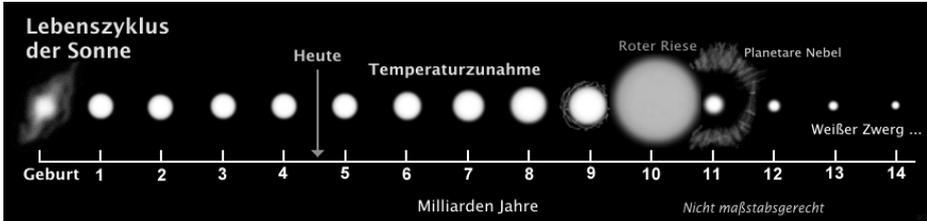
die Zentralbereiche der Abschnürungen weiter verdichteten. In diesen Geburtsarealen heizte sich das Gas durch Reibung schließlich so weit auf, dass den Atomen die Elektronen entrissen wurden. Immer mehr Material sammelte sich in einer drehenden Kugel aus Plasma, die unter ihrem eigenen Gewicht ständig weiter schrumpfte. Dadurch stieg sowohl die Dichte und als auch die Temperatur des Gases in dieser Kugel extrem an. Ob dem Zentralkörper allerdings auch eine leuchtende Zukunft beschieden sein würde, hing einzig und allein von seiner Masse ab.

Der entscheidende Moment vollzog sich beinahe unbemerkt tief im Kern des fast fertigen Sternkinde. Hier zündete die Verschmelzung von Atomkernen das Fusionsfeuer, das die Schwerkraft zum Innehalten zwang. Noch ungestüm stemmte sich die Strahlungsenergie gegen den Zusammensturz der Materie. Und auch heute noch halten sich wie beim Armdrücken die Schwerkraft und der Strahlungsdruck die Waage. Doch beliebig lange wird kein Brennstoff in einem Stern ausreichen.

Währenddessen verklumpten sich in den Außenbezirken des neuen Sonnensystems der Staub zu immer größeren Brocken. Sie stießen fortwährend zusammen, blieben aneinanderhängen und wuchsen dadurch weiter. Die größten von ihnen sogen durch ihre Schwerkraft das leichtere Material wie Staubsauger an sich. Langsam lichtete sich die Scheibe, in der sich nun ringförmige Zonen abnabelten. Die schweren Stoffe, die weit nach innen gefallen waren, bildeten hier feste Planeten, während sich weiter draußen mehr Gas um die Planetenkerne sammelte. Noch begleitete ein ständiges Bombardement die Geburt des neuen Planetensystems. Als fast alles Material aufgebraucht war, kehrte zum ersten Mal seit langer Zeit wieder etwas Ruhe ein. Der junge Stern fegte den noch verbliebenen Staub aus seinem System und tilgte so die Spuren seiner bewegten Entstehungsgeschichte.

So in etwa wird sich die Bildung unseres Heimatsystems zugetragen haben. Obwohl alle unsere Atome bei diesen stürmischen Ereignissen schon dabei gewesen sind, gibt es aber außer den Kometen und Asteroiden keine greifbaren Überbleibsel aus der Zeit dieser völligen Neuordnung der Materie. Seit dem Beginn des Kollapses der ursprünglichen Molekülwolke sind bis hierhin etwa 10 Millionen Jahre vergangen und mehrere Dutzend Sterne entstanden. Viele von ihnen sind nach wie vor in Doppel- oder Mehrfachsystemen gebunden.

Unsere Sonne dagegen ist ein mittelgroßer Einzelgänger, der schon längst von seinen damaligen Nachbarn weggedriftet ist. Das gleichmäßige Verbrennen ihres Wasserstoffs zu Helium dauert nun schon 4,6 Milliarden Jahre an und schafft ausgesprochen stabile Verhältnisse. Auf der Erde haben diese schließlich das Leben hervorgebracht, das nun über seine eigenen Ursprünge nachdenkt. Die Sonne hat zwar noch für weitere sieben Milliarden Jahre Wasserstoff zur Verfügung, wird allerdings langsam immer wärmer. Dies liegt daran, dass sich in ihrem Inneren immer mehr Helium ansammelt und die Brennzone des Wasserstoffs daher weiter nach außen wandern muss. Dadurch wird die Sonne nicht nur größer, sondern ihre



30 Lebenszyklus der Sonne

Oberfläche auch heißer. Schon in etwa einer Milliarde Jahre wird es deshalb auch auf der Erde für das Leben zu heiß werden, sodass wir uns bis dahin etwas einfallen lassen müssen.

Versiegt schließlich der Wasserstoffvorrat, so geht die Sonne zum nächsten möglichen Brennstoff über. Schon seit Milliarden Jahren hat sich das schwerere Helium in ihrem Kern konzentriert, der sich nun weiter unter der Schwerkraft zusammenzieht. Da der Wasserstoff nicht mehr im Zentrum der Sonne brennt, sondern nur noch außen in einer dünnen Schale, bläht sich die Sonne nun auf gigantische Ausmaße auf. Sie ist in dieser Phase mehr als 150-mal größer und 2000-mal heller als heute und verschlingt ihre beiden innersten Planeten. In diesem Stadium als *Roter Riese* verbleibt sie etwa eine halbe Milliarde Jahre lang. Dann ist es in ihrem Inneren so heiß geworden, dass nun das Heliumbrennen einsetzt. Jetzt verschmelzen insgesamt drei Heliumkerne zu einem Kohlenstoffkern. Doch nach 130 Millionen Jahren geht auch das Helium zur Neige. Ein weiteres Mal erlischt das Feuer im Zentrum der Sonne, das nun ganz aus Kohlenstoff besteht.

Aber jetzt ist Schluss, denn für eine weitere Verschmelzungsreaktion ist die Sonne einfach zu leicht. Obwohl sich der Kernbereich unter der Schwerkraft weiter komprimiert, bleibt die Temperatur dort unter der erforderlichen Schwelle für das Verbrennen des Kohlenstoffs. Die Sonne wird nun instabil und wirft schubweise über 500 000 Jahre hinweg mehr als ein Zehntel ihrer Masse ab. Am Ende sprengt sie schließlich ihre verbliebenen Gashüllen nahezu komplett ab, die sie dann kurzzeitig als ein leuchtender Nebel umgeben.

Der anfänglich sehr helle und heiße Kern zieht sich aber weiter zusammen, bis er abschließend in einen stabilen Zustand übergeht. Nur noch die Hälfte der ursprünglichen Sonnenmasse drängt sich hier auf gerade einmal Erdgröße zusammen. Ein Kubikzentimeter der Materie dieses *Weißen Zwergs* wiegt eine ganze Tonne und lässt sich nur quantentheoretisch verstehen.

Wie bei der Stabilität von Atomen spielt auch hier das Pauli-Prinzip die entscheidende Rolle. Zur Erinnerung: Das Pauli-Prinzip verhindert immer, dass sich Materieteilchen mit genau denselben Eigenschaften beliebig dicht beieinander aufhalten können. Bei den Atomen bewirkt es, dass ein Orbital nur mit jeweils zwei Elektronen besetzt sein kann. Deshalb können sich die Atome von Händen und Tischen auch

nicht durchdringen. In einem Weißen Zwerg sorgt das Pauli-Prinzip dafür, dass sich nur jeweils zwei Elektronen im Rahmen der Unbestimmtheitsrelation im selben Energiezustand befinden dürfen. Dadurch wird vielen Elektronen eine wesentlich höhere Energie zugewiesen, als es ihrer Temperatur entspricht. Man bezeichnet einen solch unnatürlichen Materiezustand mit dem Begriff *entartet*. Deshalb bauen die Elektronen mit ihren relativ hohen Geschwindigkeiten einen wirksamen Gegen- druck zur Gravitation auf und stabilisieren mithilfe dieses Entartungsdrucks den Sternenerüberrest. Die dafür erforderliche Energie entziehen sie den sie umgebenden Atomkernen.

Ohne eine weitere Energiequelle wird die Sonne als Weißer Zwerg ihre verbliebene Wärmeenergie über weitere Milliarden Jahre hinweg abstrahlen. Bis sie schließlich die Durchschnittstemperatur des Weltalls angenommen hat, dauert es allerdings noch mindestens Millionen Male länger als unser Universum heute alt ist.

Soweit zur Lebensgeschichte der Sonne. Nachtragen möchte ich noch, warum unser Planetensystem und auch die Sonne überhaupt rotieren. Dies liegt daran, dass sich eine zufällig zusammenfallende Materiemenge so gut wie niemals symmetrisch auf das Schwerkraftzentrum zubewegt. Sie wird vielmehr aneinander vorbei fallen und anfangen, um dieses Zentrum zu kreisen. Dies ist einfach viel wahrscheinlicher als ein gleichförmiger Kollaps. Genau deshalb drehen sich Planeten, Sterne und ganze Galaxien. Und nun sehen wir uns an, was mit Sternen passiert, die wesentlich weniger oder mehr Materie auf sich vereinen als die Sonne.

Der einfachste Fall tritt ein, wenn nicht genügend Masse vorhanden ist, um überhaupt eine Kernfusion zu zünden. Hier sind Druck und Temperatur zu gering, als dass die Protonen mit ihrer Geschwindigkeit die gegenseitige elektrische Abstoßung überwinden können. Es entsteht dann lediglich ein *jupiterähnlicher* Riesenplanet.

Aber ab etwa 1,2% der Sonnenmasse setzen in einem sogenannten *Braunen Zwerg* die ersten Verschmelzungsprozesse ein. Die Temperatur im Inneren eines solchen Körpers ist allerdings immer noch zu gering, um zwei Protonen miteinander zu verschmelzen. Stattdessen verschmelzen einige der schwereren Atomkerne mit einem Proton, wobei aber längst nicht so viel Energie frei wird wie bei einem normalen Wasserstoffbrennen. Diese Zwergsterne geben daher nur eine relativ schwache Wärmestrahlung ab und sind nur schwer zu beobachten, obwohl sie vermutlich sehr zahlreich sind.

Bei Massen zwischen 8% und 60% der Sonne finden wir mit den *Roten Zwergen* die nächste Bevölkerungsgruppe der Sterne. Sie leuchten rund hundert bis tausendmal schwächer als die Sonne. Wie bei einem glühenden Stück Metall hängt die Farbe eines Sterns ebenfalls streng von seiner Temperatur ab. Rote leuchtende Sterne sind also an ihrer Oberfläche kühler als unsere gelbe Sonne. Weil auch ein Roter Zwerg

in seinem Zentrum nicht so heiß ist, brennt er quasi auf kleiner Flamme, sodass sein Wasserstoff viel länger ausreicht als bei der Sonne. Deshalb sind auch noch keine Roten Zwerge während der bisherigen Lebenszeit unseres Universums erloschen. Sie werden allerdings niemals das Stadium des Heliumbrennens erreichen, denn dafür besitzen sie nicht genügend Masse. Ebenso wie unsere Sonne werden sie in ferner Zukunft als Weiße Zwerge enden.

Ganz anders sieht es auf der entgegengesetzten Seite der Massenskala aus. Hier leben die schwereren Sterne nicht nur kürzer und heftiger, sondern sie sterben auch wesentlich spektakulärer. Im Vergleich zu unserer Sonne laufen in ihnen die Verschmelzungsprozesse bei höheren Temperaturen ab, was sich nicht nur in einer größeren Leuchtkraft, sondern auch in einer anderen Farbe niederschlägt. Die schwersten Sterne leuchten daher weiß oder sogar blau. Diese *Blauen Riesen* umfassen bis zu 50 Sonnenmassen, haben Oberflächentemperaturen von bis zu 50 000 Grad und sind bis zu 100 000-mal heller als die Sonne. Dafür verpulvern sie ihren Vorrat an Brennstoff aber auch innerhalb von wenigen Millionen Jahren. Sie brennen wie eine Wunderkerze im Vergleich zu einem Teelicht.

Im Inneren dieser Sterne herrscht wegen ihrer größeren Masse ein viel größerer Druck und damit auch eine wesentlich höhere Temperatur. Der Sonne war die nächste Brennstufe noch verwehrt, aber die schwersten blauen Sterne können auch noch Kohlenstoff, Stickstoff, Sauerstoff, Neon und am Ende Silizium miteinander verschmelzen. Dabei entsteht Eisen als schwerstes Element beim Siliziumbrennen. Im Laufe seines Daseins geht solch ein Stern aber immer schneller seinem Ende entgegen. Während das Kohlenstoffbrennen mit 10 000 Jahren schon extrem kurz ist, dauert das Sauerstoffbrennen nur noch wenige Jahre, wogegen das Siliziumbrennen nach gerade einer Woche auch schon wieder vorbei ist.

Aber was passiert nun? Im Zentrum des Sterns sind nur noch Eisenatomkerne vorhanden. Doch leider gibt es keine Kernreaktion mehr, mit der man noch Energie aus dieser Materie herausholen könnte. Auch eine weitere Temperaturerhöhung würde daher nichts bewirken. Das Spiel ist aus, denn der Fusionsofen des Sterns ist nun für immer erloschen. Nach Millionen Jahren des Ausgleichs durch den Strahlungsdruck gewinnt die Schwerkraft erneut die Oberhand. Und wie immer schlägt sie gnadenlos zu.

Der schwere Stern fällt einfach in sich zusammen. In seinem Kern entscheidet sich jetzt, ob eine allerletzte Möglichkeit besteht, den totalen Kollaps aufzuhalten. Wie immer hängt dabei alles von seiner Masse ab. Besitzt der Eisenkern mehr als drei Sonnenmassen, so gibt es kein Halten mehr und der Zentralbereich wird zu einem sogenannten *Schwarzen Loch*. Diese Objekte werden wir uns im übernächsten Kapitel näher ansehen.

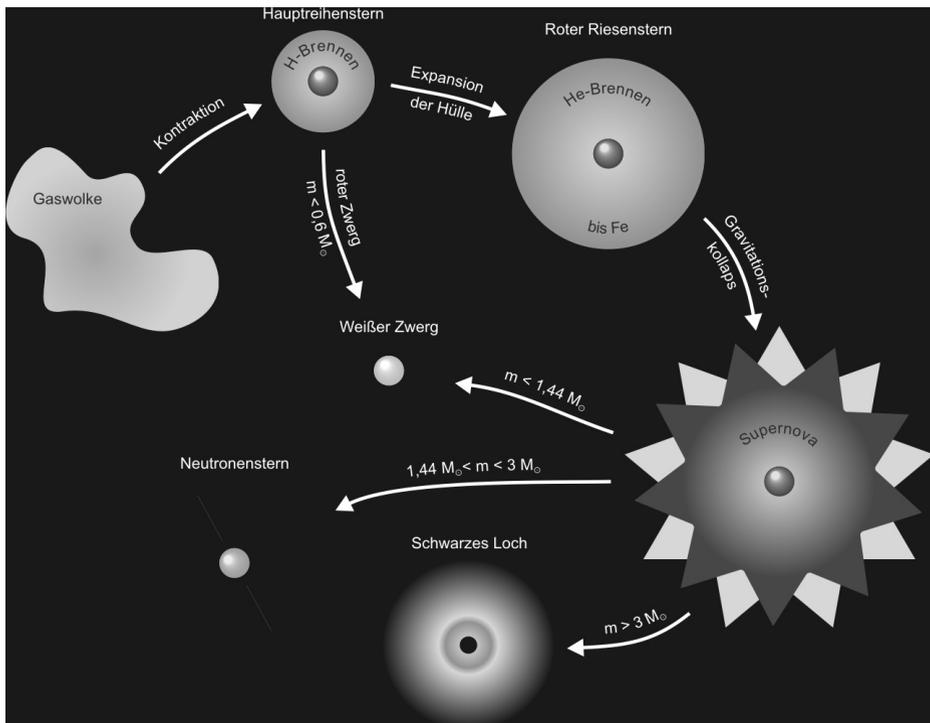
Ist der Sternkern aber leichter, so geschieht etwas fast genauso Merkwürdiges. Der Druck wird so groß, dass die Elektronen bildlich in die Protonen hineinge-

quetscht werden. Dieser umgekehrte Neutronenzerfall geschieht in Bruchteilen einer Sekunde im gesamten Sternkern, sodass die Elektronen und Protonen verschwinden und nur noch Neutronen und Neutrinos übrig bleiben. Wenn dies passiert, gibt es auf einmal gigantisch viel Platz zwischen den Teilchen.

Erinnern Sie sich noch an den Vergleich mit dem Atom und dem Atomkern? Ein Atom hat die Größe eines Fußballstadions, in dem ein Kirschkern oder ein Stecknadelkopf liegt. Und dieser gesamte Raum steht nun plötzlich zur Verfügung. Ein Stern, der vorher lauter Fußballstadien enthielt, kann auf eine winzige Größe zusammenfallen, weil er jetzt nur noch aus Kirschkernen besteht. Und genau dies geschieht, nachdem sich Protonen und Elektronen in Neutronen verwandelt haben.

Diese Neutronenmaterie bildet ein ultrakompaktes Objekt mit der Dichte eines Atomkerns. Der entstandene *Neutronenstern* ist quasi ein einziger Atomkern von etwa 20 km Durchmesser und beinhaltet zwischen 1,4 und 3 Sonnenmassen. Ein Kubikzentimeter dieser Materieform wiegt um die 10^{12} kg oder eine Milliarde Tonnen, was dem Gewicht von etwa 2000 Supertankern entspricht.

Ein Neutronenstern wird genau wie ein Weißer Zwerg durch das Pauli-Prinzip stabilisiert. Auch hier wird ein Entartungsdruck aufgebaut, denn die Neutronen



31 Sternentwicklung in Abhängigkeit von der Masse (M_{\odot} = Sonnenmasse)

dürfen sich als Materieteilchen ebenfalls nicht beliebig nahe kommen und auch keine beliebigen Energiezustände einnehmen. Nur wenn die Masse eines Neutronensterns etwa drei Sonnenmassen überschreitet, reicht auch dieser Gegendruck nicht mehr aus. Alle Materie versinkt dann in dem Strudel eines Schwarzen Lochs.

Bisher haben wir bei der Beschreibung des Sternenkollaps nur den zentralen Bereich und sein endgültiges Schicksal betrachtet. Nun wenden wir uns dem übrigen Stern zu. Seine Hülle stürzt noch immer auf den kollabierten Kern zu. Wenn aber sich ein Neutronenstern gebildet hat, so stellt dieser fast schlagartig eine feste Grenze dar, die jede einfallende Druckwelle zurückwirft.

Auch die Neutrinos, die bei dem umgekehrten Neutronenzerfall entstanden sind, können bei der ungeheuren Dichte der Sternmaterie nicht mehr ungehindert entweichen. Sie sind gefangen und bauen ganz plötzlich einen gigantischen, nach *außen* gerichteten Druck auf. Dieser ist so gewaltig, dass der gesamte äußere Stern explosionsartig auseinandergerissen wird. Die Materie wird in einer solchen *Supernova* auf bis zu 10% der Lichtgeschwindigkeit beschleunigt. Dabei wird so viel Energie frei, wie die Sonne während ihrer gesamten Lebenszeit erzeugt.

Durch die hohe Geschwindigkeit der Explosionswolke werden riesige Mengen der im Stern erbrüteten schweren Elemente großräumig im umgebenden Weltraum verteilt. Man kann eine Supernova daher mit einer kolossalen kosmischen Dreckschleuder vergleichen. Aber während der Explosion entstehen auch noch zusätzlich die ganz schweren Elemente. Nur hier und in roten Riesensternen herrschen die Bedingungen, unter denen die Elemente ab dem Eisen bis einschließlich Uran gebildet werden können. Auf jeden Fall werden sie nun in den Raum zwischen den Sternen geblasen.

Nur weil sterbende Sterne ihre schweren Atomkerne freisetzen, konnten wir unsere Geschichte der Sonnenentstehung überhaupt mit einer Dunkelwolke aus Gas und Staub beginnen. Ohne Supernovaexplosionen und ohne den Massenverlust bei Roten Riesen gäbe es nämlich gar keinen Staub im Weltall und folgerichtig auch keine Planeten.

Tatsächlich standen der ersten Sternengeneration unseres Universums ausschließlich Wasserstoff und Helium zur Verfügung. An ein Planetensystem war damals noch lange nicht zu denken. Nur weil die massereichen Sterne auch sehr kurzlebig sind, können sie die schweren Elemente nicht nur relativ schnell erzeugen, sondern durch ihre Explosionen auch noch effektiv verteilen. Erst die nachfolgenden Sternengenerationen wie die Sonne, die sich immerhin neun Milliarden Jahre nach dem Beginn des Universums gebildet hat, können daher ein Planetensystem besitzen. Die Erde, und damit auch wir, besteht also fast nur aus Atomen, deren Kerne vor der Geburt unseres Sonnensystems in anderen Sternen und Sternexplosionen entstanden sind.