Das Leben eines Sterns – Eine Zeitachse

[1. Einführung 3](#_Toc373372447)

[1.1 The Big Bang - Entstehung des Ganzen 3](#_Toc373372448)

[1.2 Aus Licht wurde Materie 4](#_Toc373372449)

[2. Definition von Sternen oder: was ist ein Stern? 5](#_Toc373372450)

[2.2 Das Hertzsprung-Russel-Diagramm 8](#_Toc373372451)

[2.3 Distanzen, Helligkeiten und Grössen 9](#_Toc373372452)

[3. Entstehung des gemeinen Sterns 9](#_Toc373372453)

[3.1 Erste Zutaten eines Sterns 9](#_Toc373372454)

[3.2 Wolkenkollaps 12](#_Toc373372455)

[3.2.1 Voraussetzungen 12](#_Toc373372456)

[3.2.2 Der Kollapsbeginn 14](#_Toc373372457)

[3.2.3 Geburt des Sterns 15](#_Toc373372458)

[4. Lebenszyklus des Sterns 16](#_Toc373372459)

[4.1 Energiegewinnung 16](#_Toc373372460)

[4.1.1 Die Proton-Proton Kette oder: klassische Kernfusion 16](#_Toc373372461)

[4.1.2 Der CNO-Zyklus 17](#_Toc373372462)

[4.2 Leben während der Wasserstoffbrennphase 18](#_Toc373372463)

[4.3 Spezifische Lebenseigenschaften und Tod eines Sterns 18](#_Toc373372464)

[4.3.1 Sterne der Massen 0.085 bis 0.4 Sonnenmassen 19](#_Toc373372465)

[4.3.2 Leichtgewichtsklasse: 1-3 Sonnenmassen 19](#_Toc373372466)

[4.3.3 Mittelgewichtsklasse: 3-8 Sonnenmassen 22](#_Toc373372467)

[4.3.4 Schwergewicht: Massereiche Sterne ab 8 Sonnenmassen 22](#_Toc373372468)

[3.4 Überreste der Sternenleichen 25](#_Toc373372469)

[3.4.1 Planetarische Nebel 25](#_Toc373372470)

[3.4.2 Supernovaeüberreste 25](#_Toc373372471)

[4. Sterntypen 26](#_Toc373372472)

[4.1 Einzelsterne 26](#_Toc373372473)

[4.1.1 Protostern 26](#_Toc373372474)

[4.1.2 Hauptreihenstern 26](#_Toc373372475)

[4.1.3 Unterzwerge 26](#_Toc373372476)

[4.1.3.1 kühle Unterzwerge 27](#_Toc373372477)

[4.1.5 Gelber Zwerg 27](#_Toc373372478)

[4.1.6 Blauer Riese 27](#_Toc373372479)

[4.1.7 Gelber Riese 28](#_Toc373372480)

[4.1.8 Roter Riese 28](#_Toc373372481)

[4.1.9 Hyperriese 28](#_Toc373372482)

[4.1.10 Weisser Zwerg 28](#_Toc373372483)

[4.1.11 Brauner Zwerg 29](#_Toc373372484)

[4.1.12 Neutronensterne 29](#_Toc373372485)

[4.1.12.1 Pulsare 29](#_Toc373372486)

[4.2 Pulsierende Veränderliche 30](#_Toc373372487)

[4.3 Doppelsterne 30](#_Toc373372488)

[4.4 Eruptive Veränderliche 31](#_Toc373372489)

[4.4.1 Supernova Typ Ia 31](#_Toc373372490)

[4.4.2 Novae und Zwergnovae 31](#_Toc373372491)

[4.4.3 R-Corona-Borealis-Sterne 32](#_Toc373372492)

[4.5 Schwarze Löcher 32](#_Toc373372493)

[5. Vergleich der Lebenslinien eines Sterns und eines Menschenlebens 34](#_Toc373372494)

[6. Fragen zum Text 36](#_Toc373372495)

1. Einführung

Diese Arbeit befasst sich mit einem für uns eigentlich alltäglichen, beziehungsweise allnächtlichem Phänomen: Den kleinen, in verschiedenen Farben funkelnden Lichtpunkten am klaren Nachthimmel, den Sternen. Doch dies sind weit mehr als ein paar wild verstreute hübsche Lichtlein am Firmament, wie dieses Dokument vermitteln wird. Doch bevor wir genauer klären, wie diese heissen Giganten überhaupt entstehen, leben und vergehen muss ein gewisses Vorwissen vorhanden sein, um einen möglichst grossen Überblick über alle Zusammenhänge zu erlangen.

1.1 The Big Bang - Entstehung des Ganzen

Wir beginnen mit dem Anfang. Und damit ist der Anfang von Allem gemeint. Der Big Bang, welcher auch als Urknall bezeichnet wird, ist die allgemein gültige und verbreitetste Theorie, die die Entstehung des Universums erklären soll. Mit dem Big Bang begann die Geschichte von Raum, Zeit und Materie. Dies bedeutet, dass vor diesem Ereignis nichts existierte. Kein Atom, kein Licht, kein Raum und somit keine Zeit. Nur eine homogene Masse mit unglaublich hoher Dichte und Temperatur im Millionen oder sogar Milliardenbereich. Dies steht klar im Widerspruch, und dies ist auch ein Problem, womit dieser Theorie zu kämpfen hat. Druck und Temperatur können ohne Masse nicht existieren. Aber wie kann aus Nichts Etwas entstehen? Diese Frage kann die Physik nicht beantworten. Es gibt den sogenannten Welle-Teilchen-Dualismus. Dies ist ein Prinzip der Quantenphysik, die besagt, dass Objekte der Quantenphysik sowohl Eigenschaften von Teilchen (Partikeln) und Wellen aufweisen können. Dies könnte ein Ansatz sein, welcher erklären könnte, dass sich Wellen aufgrund veränderter Umstände zu Teilchen und schliesslich zu Atomen zusammengeschlossen haben.

Für den menschlichen Verstand ist aber dieser Zustand der Existenz, nicht richtig zu begreifen (zumal ohne Zeit keine Existenz möglich ist). Um doch zu versuchen, den Zustand *vor* dem Urknall darzustellen und zu erklären, ist ein Gedankenspiel sehr nützlich, welches ich zu einem späteren Zeitpunkt anführen werde.

Als kleines Intermezzo muss man an dieser Stelle anmerken, dass man sich hier in einem rein theoretischen Bereich befindet, welchen man nie wirklich wird beweisen können und wahrscheinlich graue Theorie bleiben wird. Warum? Dies ist relativ einfach zu erklären: Dass Wissenschaftler irgendetwas erforschen können, brauchen sie Informationen, beziehungsweise Informationsträger in einer Form, die sie auslesen können. In unserem Themenbereich ist das Licht eine sehr wichtige solche Quelle. Und hier liegt der Kernpunkt. Denn Licht war nicht von Anfang an im Weltraum verstreut. Nach dem Urknall dehnte sich der Raum zwar rasant aus, doch dichter Nebel aus Materie schirmte den Raum komplett vor dem Licht ab. Erst ca. 300'000 Jahre nach diesem gigantischen Ereignis drangen die ersten Strahlen durch die dichten Nebel nach draussen.

Abbildung 1: Künsterlische Darstellung des Urknalls

Daraus folgt, dass die Wissenschaft nur bis zu diesem Punkt zurückblicken kann, da sie erst ab diesem Zeitpunkt eine Informationsquelle besitzen. Weiter geht es nicht zurück!

Deshalb ist die Frage, was eigentlich *vor* dem Urknall war, schlichtweg nicht zu beantworten und fast sinnlos. „Was war vor dem Anfang von Existenz und Zeit?“, ist eine analoge Fragestellung wie: „Was haben Sie vor ihrer Geburt gemacht?“

Und doch dürstest es den Menschen nach dieser Frage, denn unser Verstand kommt mit der Vorstellung, dass aus Nichts Etwas entstehen kann nicht wirklich zurecht.

Die einzige Möglichkeit, noch etwas näher an das Ereignis des Urknalls heranzukommen, wäre mit Hilfe der Spuren, die das Einsetzen der Naturkräfte hinterlassen haben. Damit ist die eigentlich wichtigste Kraft gemeint: Die Gravitation. Die Einsetzung dieser essentiellen Kraft hinterliess Spuren in Form von den sogenannten Gravitaionswellen. Doch diese sind für die Forschung noch nicht genau genug messbar, sodass keine signifikante Messergebnisse erzielt werden können. Denn sie sind, was nach fast 14 Milliarden Jahren auch eigentlich logisch ist, nicht mehr sehr präsent, sondern nur als schwache kosmische Hintergrundstrahlung registrierbar. Doch auch mit diesen Strahlen werden wir im besten Fall nur bis kurz, eine Millisekunde *nach* dem Urknall Erkenntnisse sammeln können.

1.2 Aus Licht wurde Materie

Und doch gibt es auch zu dem vorzeitlichen Zustand unseres Universums eine Theorie, um damit zum oben erwähnten Gedankenexperiment zurückzukehren.

Jetzt wird es ein wenig abstrakt; denn es herrschen folgende Bedingungen:
Wir haben keinen Raum, keine Materie, kein Licht, nur enorm hohen Druck und extreme Temperaturen, welche bekanntlich zwei voneinander abhängige Phänomene sind, und kleinste Teilchen, auch der Zustand der Singularität genannt. Dies bedeutet, alle Materie auf einen Punkt (eindimensional) komprimiert.

Abbildung 2: Darstellungsversuch des Urknalls

Zum einfacheren Verständnis kann man sich hier auch ein winzig kleines Kügelchen vorstellen, in denen diese Bedingungen herrschen. Stellen Sie sich vor, Sie sind jetzt in diesem Kügelchen.

Dort ist es gelb. Einfach nur gelb: Oben, Unten, Links und Rechts, alles nur gelb, auch Sie selbst, alles ist immer gleich monoton. Und da dies so ist, gibt es auch keine Zeit, auch Sie selbst werden kein Zeitgefühl haben, denn Zeit definiert sich, sehr einfach, aber treffend gesagt, durch Veränderung. Sie würden deshalb nicht mal denken können, „hier ist alles gelb“, denn der Moment vor dem Gedanken über den Gedanken hinweg zu der Erkenntnis ist ein Prozess, der ohne Zeit nicht möglich ist.

Doch was war es, was dieses Gleichgewicht gestört hat? Was hat den Urknall denn ausgelöst? Wie löste sich die Singularität in Raum und Zeit auf?

Darüber existieren noch weitere Theorien, welche die Entwicklung und Eigenschaften des Raumes mit einbeziehen und unter anderem Paralleluniversen, weitreichende Dimensionen und so weiter als sehr wahrscheinlich darstellen. Sehr interessantes Themengebiet, doch hier muss ich zu unserem Thema zurückkehren, sonst verlieren wir uns in den Weiten der Rätsel um die Existenz des Lebens.

Kurzum, mit dem Big Bang entstand Materie, Zeit und die allgegenwärtigen Naturkräfte und somit Leben auf mindestens einem Planeten.

Fest steht, dieser Zustand geriet aus dem Gleichgewicht, es entstand Raum, welcher sich rasch ausdehnte und entsprechend abkühlte. Dies zog nur Millisekunden nach dem Knall ein essentielles Ereignis nach sich: Die Entstehung der ersten Atome, welche schon den geltenden Naturgesetzen folgten. Hauptsächlich Wasserstoff und Helium gingen aus den Zusammenschlüssen der subatomaren Quantenteilchen hervor, die nicht mehr die Energie hatten, den enormen Anziehungskräften zu trotzen. Desweiteren entstand neben den elementaren Kräften das wichtigste Element unseres Universums, welches schätzungsweise immerhin ca 80% der Gesamtmaterie ausmacht, und dabei unsere Galaxien und sogar den gesamten Kosmos zusammenhält. Also die zu schnelle Expansion oder aber auch der sofortige Kollaps des Raums verhindert. Ironischerweise weiss man bis heute nicht, was dieses Element, oder gar Elemente sind. Man weiss, dass die Dunkle Materie existiert, bisherige Messungsversuche blieben jedoch noch erfolglos. Zum Teil, da ihre Existenz nicht bewiesen, sondern nur durch Beobachtungen sehr nahe gelegt wird. Die Rede ist von der so genannten Dunklen Materie. Wie der Name schon suggeriert, ist diese Form von Materie nicht sichtbar, sie interagiert nicht einmal mit Licht, und auch von fester, sichtbarer Materie lässt sie sich nicht beeindrucken. Allerdings besitzt sie eine minimale sogenannte [„Gravitations-Wechselwirkung“](http://de.wikipedia.org/wiki/Gravitation). Somit liesse sich *theoretisch* ihre Spur verfolgen. Da diese Wechselwirkung aber so minimal ist, verschwindet sie sehr leicht im ständig vorhandenen Hintergrundrauschen der sichtbaren Materie. Sie stellt eines der grössten astrophysischen Rätsel der Neuzeit dar, was es natürlich sehr spannend macht, diesen Forschungszweig zu verfolgen.

Doch wir befassen uns in diesem Dokument nur mit einer Art von materieller Form, den Sternen. Dafür muss man jedoch erst einmal wissen: Was ist ein Stern denn überhaupt? Was sind die besonderen Eigenschaften, die diesen definieren und von anderen Körpern wie zum Beispiel den Planeten abgrenzen.

2. Definition von Sternen oder: was ist ein Stern?

Man kann sich nicht immer genau sicher sein, was man denn nun am wolkenlosen Himmel entdeckt. Alles funkelt und blitzt, doch was ist nun was? Gehen wir vor wie bei einer Differentialdiagnose. Dafür man klären, was für andere Objekte in Frage kommen, und was diese für Eigenschaften aufweisen.

Abbildung 3: Sternenhimmel über Australien

Wir bleiben mal auf unserem geliebten festen Erdboden, stellen uns auf einen astronomischen Wissenstand von Null und blicken nach oben in den Nachthimmel. Was sehen wir? Klar Sterne! Doch sind wirklich alle Lichter Sterne? Oder anders gefragt: Was könnten es denn noch für Objekte sein, wenn keine Sterne?

Flugzeuge, Hubschrauber und Zeppeline kann man sicher ausschliessen, die bewegen sich erstens viel zu schnell über den Himmel, zudem machen diese meist auch unüberhörbare Geräusche während sie in verschiedenen Farben Signale geben. Man hat bis jetzt kein kosmisches Objekt entdeckt, die diese Eigenschaften auch erfüllen würden. Zwar scheinen sich die Sterne bei Bildern mit langen Verschlusszeiten in Kreisen zu bewegen, dies liegt aber an der Kamera, die mit der Erdrotation sich mitbewegt. Sterne scheinen am Himmel festgenagelt zu sein.

Was kommt denn noch in Frage?

Bekannte Phänomene wie Sternschnuppen und Kometen kann man auch ausschliessen. Sternschnuppen sind kleine Gesteins- oder Metallpartikel, die in der Erdatmosphäre, in die sie mit hoher Geschwindigkeit eindringen, verglühen. Und Kometen sind riesige Eis- und Staubkugeln, die durch das All rasen und nur dann sichtbar werden, wenn sie sich in Sonnennähe aufhalten. Denn dann schmilzt die Oberfläche in kleine Eis- und Staubpartikel, welche dann in einem Schweif hinter dem Kometen von der Sonne angeleuchtet werden.

Abbildung 4: Der Komet "Panstarrs". Der typische lange Kometenschweif, beleuchtet von der Sonne ist gut zu erkennen

Die letzten, von blossem Auge erkennbaren Objekte sind die Planeten. Jetzt wird es schon ein wenig kniffliger, um diese von anderen Objekten zu differenzieren, ohne technische Hilfsmittel zu verwenden. Denn schon die alleinige Definition von Planeten ist unter den Forschern nicht eindeutig geklärt. Doch für die meisten Fälle kann man unter einem Planeten eine meist mehr oder weniger kugelförmige Gesteinsformation verstehen, die in einer Umlaufbahn um einen Stern kreist und durch ihre Gravitation andere Kleinkörper aus der Bahn gedrängt haben.

Abbildung 5: Die Planeten unseres Sonnensystems (mit Pluto) in der entsprechenden Reihenfolge.
Von vorne nach hinten:
Merkur, Venus, Erde (mit Mond), Mars, Jupiter, Saturn, Uranus, Neptun, Pluto

Man unterscheidet zwischen zwei Arten von Planeten: Terrestrische und Gasförmige

Terrestrische Planeten heissen so, wie der Name schon sagt, weil sie in ihrem Aufbau der Erde sehr ähneln. Sprich, hauptsächlich aus Gesteinsförmigen Material und Metall bestehen. Bei ihrer Entstehung waren diese Elemente so heiss, dass sie als breiige Masse um die Sonne trieben und bei fortschreitender Abkühlung und der Schwerkraft sich die schweren Elemente, wie Eisen und Nickel langsam zum Kern zusammenfügten, während die leichten sich an der Oberfläche verfestigten.

Die gasförmigen Planeten hingegen besitzen einen eher sehr kleinen Gesteins- und Eisenkern, den eine enorme Gashülle umgibt, die meist zu Grossteilen aus Wasserstoff besteht. Der grösste Gasplanet in unmittelbarer Nähe besitzt ca 317mal so viel Masse wie die Erde.

Was unterscheidet diese Trabanten der Sonne nun von unserer Sonne, bzw. einem Stern?

Betrachtet man die Sonne, muss man kein Genie sein um zu bemerken, dass sie, im Kontrast zu Planeten, extrem hell leuchtet und, gegenüber gestellt zu anderen Objekten, eine enorme Grösse besitzt. Diese Faktoren hängen praktischerweise auch zusammen. Wenn zwei Körper die gleiche Leuchtkraft besitzen, einer jedoch um den Faktor 2 grösser ist, wirkt der grössere Körper heller.

Nun, die Sonne ist auch sehr gross, nicht nur was die Oberfläche angeht, sondern auch ihre Masse ist beachtlich. Ihr Durchmesser beträgt ungefähr 1.4 Millionen Kilometer! Im Vergleich, die Erde bringt es auf gute 12'000 Kilometer, ist also 120mal kleiner.

Wenn man nun noch die jeweiligen Massen vergleicht, werden einem die Dimensionen vielleicht eher noch bewusst, denn diese ist bei der Sonne etwa 300'000 mal grösser als die der unseres Heimatsplaneten, oder wohl eher -steinchens. Es geht noch weiter: Die Sonne allein macht 99.99% der Masse des gesamten Sonnensystems aus! Und nun muss man auch noch bedenken; unsere Sonne ist eigentlich noch relativ kleiner Stern, obwohl sie einen stolzen Durchmesser von etwa 1'391'000 Kilometern besitzt. Als Vergleich: Die Erde besitzt einen Durchmesser von etwa 12‘700 Kilometern. Die Sonne ist also rund 110 mal grösser. Zu näheren Details kommen wir später.

Abbildung 6: Darstellung des Sonnensystems mit den exakten Grössenverhältnissen, nach ihrer Grösse geordnet

Doch die Grösse allein macht noch keinen Stern aus. Nein, im Aufbau der Körper liegt die Essenz, denn dieser ist komplett unterschiedlich.

Die Sonne besteht, abgesehen von ganz winzigen Teilen von Schwerelementen, ausschliesslich aus Gas. Hauptsächlich aus den zwei Elementen Wasserstoff und Helium, und zwar in einem Verhältnis von 75 zu 25. Und diese Gasmischung ist ziemlich heiss. Die Oberfläche des Gasriesen bringt es auf etwa 5800 Kelvin (ca 5'500° C). Im Erdkern geht man von einer durschnittlichen Temperatur von 6000°C aus, also noch ziemlich akkurat. Doch richtig in sich hat es der Kern eines jeden Sterns. Unsere Sonne erreicht eine Temperatur von 15 Millionen Grad Celsius. Bei solch hohen Temperaturen verschmelzen die Wasserstoff-Kerne zu Helium. Dieser Prozess, auch Kernfusion genannt, setzt enorme Mengen von Energie frei, welche die Sonne in Form von elektromagnetischer Strahlung, Licht, abgibt. Ergo: Sterne leuchten aus eigener Kraft. Diesen Vorgang findet man bei allen Sternen, also eine charakteristische Gemeinsamkeit. Dieses Thema wird uns später vertieft beschäftigen.

Abbildung 7: Die Grössenverhältnisse von Planeten und der Sonne in der effektiven Reihenfolge. Der Abstand zwischen den einzelnen Objekten ist nicht massstabsgetreu

Aber Planeten leuchten doch auch, bzw. kann sie der Freizeitastronome mit blossem Auge, ein wenig Grundwissen und günstigen Umständen annähernd gut erkennen. Als Beispiel anzuführen wären da die Venus, welche weiss und der Mars, der rötlich leuchtet. Besitzen auch diese eine Kernfusion? Nein, aus zwei Gründen ist dies unmöglich. Einerseits sind Planeten viel zu kalt dafür, da man Temperaturen im Millionenbereich benötigt, andererseits besitzt kein Planet genügen freien Wasserstoff, der zu Helium fusionieren könnte. Planeten „leuchten“ nicht, weil sie es von sich aus tun, sie reflektieren bloss das Sonnenlicht, welches auf ihre Atmosphäre oder Oberfläche trifft. Würde man einen Vorhang zwischen Planet und Leuchtquelle aufhängen, wären diese nicht mehr zu erkennen.

Als Fazit kann man hier ziehen, dass sich der Hauptunterschied auf die eigene Leuchtfähigkeit bezieht.

Doch das kann man mit blossem Auge manchmal sehr schlecht erkennen, doch es gibt da einen Trick, denn wir haben keine technische Hilfsmittel.

Sterne funkeln. Rot, weiss, blau, und das willkürlich. Das liegt jedoch nicht am Stern, sondern an seiner Distanz und den Luftverwirbelungen in unserer Atmosphäre, durch die das Licht ja durch muss. Das von einem Punkt ausgehende, vollspektrale Licht wird gebrochen, und mal treffen kürzere oder längere Wellen auf unser Auge, welche die Farben ausmachen. Bei Planeten, welche viel näher sind, wird das Licht von mehreren Punkten (höhere Dichte) und nicht mehr im vollen Spektrum auf uns reflektiert, die verschiedenen Ablenkungen heben sich gegenseitig auf und wir nehmen eine konstante Farbe wahr.

Noch eine kleine Eselsbrücke für den Schluss des Kapitels. Die antiken Griechen haben uns schon einen zweiten Hinweis geliefert, was Planeten von Sternen unterscheidet. Das Wort Planet stammt nämlich aus dem Altgriechischen Wort „Planetés“, was so viel bedeutet wie „der Umherschweifende“ oder „der Wanderer“. Planeten bewegen sich, wandern um die Sonne, ihren Stern. Sterne sind, zumindest von unserem Standpunkt hier auf der Erde aus gesehen, fix am Himmel verankert.

2.2 Das Hertzsprung-Russel-Diagramm

Das Hertzsprung-Russel-Diagramm ist mitunter das wichtigste Diagramm der Astrophysik, deshalb verdient es meiner Meinung nach ein kurzes, eigenes Kapitel. Es bringt Ordnung in all den Wirrwarr aus kryptischen Bezeichnungen und Beschreibungen astrophysischer Objekte, deren Werdegang, Erscheinungsbild und Spektren.

Auf dem Diagramm gibt es ein Band von oben links nach unten rechts, auch als Hauptreihe der Sterne bezeichnet. Auf diesem sind ca. 90% aller Sterne zu finden. Sterne der Hauptreihe beziehen ihre Energie aus dem sogenannten Wasserstoffbrennen, auf welches ich später noch zu sprechen komme. Aus der Hauptreihe heraus gibt es verschiedene Äste: Meist werden in einer allgemeinen Übersicht der Riesen-, der Überriesen- und den Weissen Zwergenast eingezeichnet. Allerdings lässt sich theoretisch jeder einzelne Stern in jedem Stadium auf dem Diagramm einzeichnen. Dies wäre aber ziemlich unübersichtlich und nur sinnvoll, wenn über eine ausgewählte Gruppe von Sternen eine schnelle Übersicht erstellt und vermittelt werden will.

Abbildung 8: Das Hertzsprung-Russel Diagramm mit eingetragener Hauptreihe. Die Spektraltypen hängen direkt mit der Oberflächentemperatur und der Farbe zusammen.

Die Leuchtkraft wird in in Relation zu derjenigen der Sonne gesetzt. Die solar unit 1 entspricht also der Leuchtkraft der Sonne.

Was ist aus dem Diagramm alles ersichtlich?

Direkt sind zwei Grössen auf den ersten Blick erkennbar: Die absolute Leuchtkraft, also wie hell der Stern wirklich ist (angegeben in Relation zur Leuchtkraft der Sonne), und dessen Oberflächentemperatur mithilfe der emittierten Lichtspektren, angeben mit Buchstaben, in absteigender Reihenfolge O, B, A, F, G, K, M. Diese Buchstaben repräsentieren immer eine andere Spektralklasse, dies bedeutet eine andere „Farbe“ und damit Oberflächentemperatur.

Also, aus dem Diagramm leiten sich aufgrund der der zwei Angaben und den physischen Gesetzen die ungefähre Grösse, Lebensdauer und Leuchtfarbe des Objektes ab.

Unterm Strich hilft uns das Hertzsprung-Russel-Diagramm einzelne Sterne eindeutig zu klassifizieren, denn allein die Spektraltypangaben helfen nicht. Die absolute Leuchtkraft hängt nicht nur von der Temperatur, sondern auch von der Grösse des Objekts ab, welche auch in einem direkten Wechselspiel mit der Lebensdauer stehen.

Eine Schwäche dieses Diagramms ist, dass die exakte Oberflächentemperatur nur mit einer relativ hohen Fehlerquote bestimmt werden kann. Dem wurde durch verschiedene, durch das Hertzsprung-Russel-Diagramm inspirierte, abgeleitete Diagramme abgeholfen, wie zum Beispiel das MK-Diagramm, welches sich auf die Absoluten Helligkeiten und den Farbindex bezieht, doch dieses ist für uns eher uninteressant. In dieser Arbeit reicht das Hertzsprung-Russel-Diagramm völlig aus.

Also als Fazit: Das Hertzsprung-Russel-Diagramm hilft Astronomen dabei, bekannte Sterne schnell und übersichtlich zu klassifizieren, oder aber eine Übersicht über allgemeine Sterntypen und deren Lebenspfade darzustellen. Vor allem letzteres wird uns noch eine grosse Hilfe sein.

2.3 Distanzen, Helligkeiten und Grössen

Dies ist einfach und schnell erklärt. Es ist eigentlich, wie oft in der Physik, reine Formeljongliererei. Anhand des Beispiels unserer Sonne erklärt:
Man misst den Winkel der Erde zur Sonne. In einem halben Jahr misst man erneut den Winkel. Nun entsteht ein Dreieck, mit der Sonne als Mittelpunkt auf der Grundseite, in einem gleichschenkligen Dreieck, welches durch Triangulation berechnet werden kann. Kennt man den Abstand und die scheinbare Helligkeit (wird aus den auf der Erde ankommenden Spektren entnommen), können absolute, also die effektive Leuchtkraft berechnet werden. Und mit diesen Werten lässt sich die Oberflächentemperatur berechnen. Dies kann man noch weiter spinnen, doch die wichtigsten Daten kann man so ziemlich genau berechnen.

3. Entstehung des gemeinen Sterns

Nachdem nun geklärt ist, was Sterne sind und Sie in der Lage sind, diese von den häufigsten anderen kosmischen Objekten zu unterscheiden, will ich Ihnen den allgemeinen Entstehungsprozess vorstellen.

Doch bevor wir dazu kommen, eine Frage an Sie. Wie viele Sterne gibt es denn überhaupt? Falls Sie dieses Dokument in einer sternenklaren Nacht lesen, werfen Sie mal einen Blick gen Himmel. Wie viele funkelnde Lichter erkennen sie in etwa?

Forscher haben sie zählen lassen: Man erkennt zwischen 4000 bis 6000 Sterne von blossem Auge. Eine noch akzeptable und einigermassen fassbare Zahl. Doch ich muss Sie desillusionieren, es existieren auf einem erweiterten Blickfeld ein paar Sterne mehr. In unserer Galaxie, der Milchstrasse zählen Wissenschaftler rund 100-200 Milliarden Sterne. Doch dies ist nur eine einzige Galaxie, und von denen gibt es auch wieder einige Millionen. Schlussendlich geht man davon aus, dass in dem uns *zugänglichen* Universum etwa 7x1022 Sterne existieren. Eine unvorstellbare Zahl, für jedes denkende Wesen nicht vorzustellen. (Vergleich als Zitat S 26, Sterne: wie das Licht in die Welt kommt). Die Betonung liegt auf dem Wörtchen „zugänglich“, denn es ist sehr naheliegend, dass dieses Universum nur ein kleiner Bruchteil des gesamten Kosmos ist.

Aus dieser Zahl kann man schliessen, dass die Entstehung aus Prozessen und Materialien hervorgeht, die überall und häufig vorkommen müssen.

3.1 Erste Zutaten eines Sterns

Was braucht man denn für einen Stern. Natürlich: Materie, bzw. Masse. Diese finden wir in Gaswolken, oder allgemeiner gesagt im interstellaren Medium, welches sich im gesamten Weltraum finden lässt.

Doch es braucht natürlich nicht nur die richtige Materie in extremen Ausmassen, sondern noch etwas anderes Essentielles und Elementares: Die Gravitation. Diese herrscht natürlich auch überall. Dies sind die Grundelemente und –gegebenheiten, die zwangsweise vorhanden sein müssen, um etwas entstehen zu lassen.

Da die Materie nicht gleichmässig im Raum verteilt ist, entstehen durch die Gravitation einzelne Ballungszentren, die sich in Form von Wolken und Nebeln im Raum sammeln. Die berühmteste Formation ist der Orion-Nebel, der 1350 Lichtjahre entfernt ist, einen Durchmesser von ca. 30 Lichtjahren besitzt und in prächtigen Farben leuchtet.

Diese Nebel müssen als ein grosses Ganzes betrachtet werden, denn die einzelnen Partikel und Teilchen in diesen Nebeln stehen in einer direkten Wechselwirkung zueinander, welche für die Entstehung der Gasriesen unabdingbar sind. Wie genau wird im Folgenden erläutert werden.



Die ersten Sterne entstanden ca 100-300 Mio. Jahre nach dem Urknall, auch Population-III-Sterne genannt, um das dunkle Zeitalter zu beenden. Das Universum besass damals nur in etwa 3-5% der Grösse von heute und es hatte sich auf 50-80 Kelvin abgekühlt (-223.15°C bis -265.15°C)

Wie auch in der Entwicklungsgeschichte der ersten Lebewesen der Erde, waren diese Sterne ganz anders als diejenigen, die heute noch entstehen. Sie besassen eine Grösse, Masse, Leuchtkraft und Reinheit in ihren Bestandteilen in schierem Ausmass. Ein einziger dieser Population-III Riesen besassen in der Regel mehrere 100 Sonnenmassen. Es ist gar nicht vorzustellen, was für Dimensionen die Grössten unter Ihnen erreicht hatten. Warum war dies so?

Abbildung 9: Der Orionnebel. Er ist einer der aktivsten Sternentstehungsgebiete in unserer Nähe. Er erstreckt sich über einen Raum von 30 Lichtjahren und ist 1350 Lichtjahre entfernt (wikipedia.org)

Dies ist relativ einfach zu erklären: In diesem Stadium des Universums war die vorhandene Materie noch nicht auf einem solch grossen Raum verteilt, dies führte zu gigantischen Nebeln mit mehreren Tausend Lichtjahren Durchmesser, zudem gab es erst kaum nennenswerte Vorkommnisse von Schwermetallen wie Eisen und Blei, sondern die gebildeten Nebel bestanden aus fast reinem Wasserstoff, bzw Helium. Ein wahrer Nährboden für Sterne, da so riesige Wolken zu einem Kollaps kamen.

Doch diese schiere Grösse dieser Titanen hatte einen gravierenden Nebeneffekt: Diese Sterne hatten eine sehr kurze Lebensdauer von wenigen Millionen Jahren. (Als Vergleich, unsere Sonne hat schon 4.5 Milliarden Jahre hinter sich, und somit erst ca 50% ihres Lebens hinter sich)

Sie segneten das Zeitliche entsprechend mit einer gigantischen Explosion, einer Supernova, und gaben somit wieder interstellares Medium frei, welche sich wieder zu Gas- und Staubwolken und Nebeln zusammenschliesst, um neue Sterne hervorzubringen. Doch diese Wolken sind nun vielfältiger an verschiedenen Atomen, die während der Fusionsprozesse entstanden sind. Leider konnte man bis heute keine Überreste eines solchen Sterns entdecken.

Doch eines ist seit den annährend 14 Milliarden Jahren immer gleich geblieben: Die Entstehungsprozesse.

Eine Zutat, welche für eine Sternengeburt essentiell sind, wurde eingangs bereits erwähnt; Materie bzw. Masse, das heisst interstellares Medium und die damit einhergehende Gravitation. Beides ist eigentlich überall vorhanden, wir konzentrieren uns jetzt erst einmal auf unsere Galaxie, genauer die Milchstrassenebene. Sie ist der Ort höchster Dichte, mit ihren Spiralarmen sammelt sie ca. 50% des Gases in separierten Wolken, deren Grössen stark variiert. Von kleinen Wolken mit einem Durchmesser von einem Lichtjahr und 1-100 Sonnenmassen bis zu hochkomplexen Gebilden von bis zu 100 Lichtjahren Durchmesser und einer Masse von bis zu 1‘000'000 Sonnen.

Diese grossen Wolken sind mit nur ca 100-1000 Atomen/ccm weniger dicht aufgebaut, während kleine bis zu 1 Mio Atome/ccm aufweisen können.

In diesen Wolken konzentrieren sich 50% der Masse des interstellaren Gases, doch machen ebe diese nur 1-2% des Gesamtvolumens aus. Jeder kam sicher einmal mit ein paar farbenprächtigen Bildern von den faszinierenden Wolken in Berührung. Die bekanntesten Nebel in der Milchstrasse sind der ca 7000 Lichtjahre entfernte Adler-Nebel und der nächstgelegene, 1350 Lichtjahre entfernte Orion-Nebel.

Logischerweise befinden sich die restlichen 50% des interstellaren Medium in sehr geringer Konzentration im gesamten Raum verteilt: Maximal 100 Atome/ccm kann man im sonst absoluten Vakuum finden, bei Temperaturen um die 100 Kelvin (-173.15°C). Einige kompaktere Gaswolken können jedoch Temperaturen von bis zu 10‘000 bis 1‘000‘000 Kelvin (9‘726.85°C – 999‘726.85°C), also Temperaturen um einiges höher als die Oberflächentemperatur unserer Sonne, erreichen. In einer solchen Hitze ionisieren sich alle Atome.

Abbildung 10: Der Adlernebel. Er ist etwa 7000 Lichtjahre entfernt und 20 Lichtjahre gross. Charakterisitsch für ihn sind die bis zu 9 Lichtjahre langen Stabsäulen, an deren Spitzen sich neue Sterne befinden (wikipedia.org)

Doch wie kann man solche extremen Temperaturen erreichen, da es in der Umgebung eine fast übertriebene Eiseskälte herrscht?

Da spielen verschiedene Faktoren eine Rolle. Einerseits die intensive UV-Strahlung (der Spektren O,B,A) von benachbarten Sternen, andererseits der hochenergetische Teilchenwind von neu entstehenden Sternen. Und ein beträchtlicher Faktor stellen auch die Explosions-Schockwellen von Supernovae dar, die enorme Energien freisetzen.

Nun, wie eingangs oben erwähnt bestanden die Population-III-Sterne aus fast reinem Wasserstoff und Helium, doch durch die thermonuklearen Fusionsprozesse entstanden neue, schwerere Elemente. Aus diesem Grunde besteht das heutige interstellare Medium nicht mehr aus reinen Wasserstoff und Helium, sondern weisen „Unreinheiten“ in Form von schweren, im Allgemeinen als Metalle zusammengefasste, Elemente auf. In Zahlen ausgedrückt sieht dies wie folgt aus:

Wasserstoff: 70.4%

Helium: 28.1%

Schwere Elemente: 1.5%

Wobei hier unter den schweren Elementen eigentlich alle anderen Formen von Atomen gemeint sind, die schwerer als Helium sind; von Kohlenstoff, Sauerstoff und Stickstoff über Eisen und Silizium etc., dies schliesst auch verschiedene Molekülformen ein, welche ihre ganz eigene wichtige Rolle in der Sternentstehung spielen.

Dies bedeutet, dass alle Atome aus Sternen stammen, ausser den beiden Grundelementen Wasserstoff und Helium. Diese entstanden wenige Millisekunden nach dem Urknall, als die Temperaturen fielen und sich die subatomaren Teilchen nicht mehr die Energie hatten, sich frei zu bewegen, sich zu Hadronen und dann zu Pro- und Neutronen zusammenschlossen.

3.2 Wolkenkollaps

3.2.1 Voraussetzungen

Und damit zurück zu unserer Sternengeburt, bzw des interstellaren Mediums mit der gemeinen Gaswolke. Jetzt geht’s ans Eingemachte. Wie entstehen nun unsere Lichtkugeln? Wenn es nur Gravitation und Masse bräuchte, würden die Sterne ja nur so aus den Wolken ploppen. Und deshalb braucht es noch mehr; die letzten Zutaten sind magnetische Felder und kosmische Strahlung. Ersteres ist eine sehr schwache Kraft, sie macht nur wenige Millionstel Gauss aus. Zum besseren Vergleich: Die Sonne besitzt ca 1000 Gauss, die Erde 0.3)

Die kosmische Strahlung hingegen macht schon einiges mehr aus. Sie besteht hauptsächlich aus Protonen (10% Heliumkerne, 2% Elektronen, 1% schwere Elementkerne, gelegentlich Antiprotonen und Positronen)

Diese kosmische Strahlung besitzt eine sehr hohe kinetische Energie, da sie mit annähernder Lichtgeschwindigkeit den Raum durchquert. Sie trifft auf das interstellare Medium, dadurch entstehen verschiedene Wechselwirkungen: die Ionisation durch direkte Kollision und die Aufheizung bzw. die Emission hochenergetischer Röntgenstrahlung.

Resultat: Die Strahlung büsst ihre gesamte Energie durch Kollision ein, ausser sie entkommt den Magnetfeldern entlang der Galaxie.

Nochmals den gesamten Prozess zusammengefasst: Gas- und Staubwolke -> kollabiert unter eigener Gravitation -> thermonuklearer Fusionsprozess wird gestartet. Dafür muss sich die Wolke aber zuerst abkühlen.

Innerhalb der Wolke entstehen durch die ungleichmässige Materieverteilung Ballungszentren, welche einen potenziellen Geburtsplatz darstellen, denn durch die Gravitation wird immer mehr Materie angezogen. Dafür ist das grundlegendste Gesetz der Astrophysik verantwortlich, das Gravitationsgesetz:
„*Die anziehende Kraft zwischen zwei Körpern ist proportional zum Produkt ihrer Massen und nimmt mit dem Quadrat der Entfernung zwischen den beiden Objekten ab. Als Proportionalitätskontstante fungiert hier die sogenannte Gravitionskonstante G*“[[1]](#footnote-1)

Klingt kompliziert, ist es aber nicht. Es wird hier die Wirkung der Gravitation auf zwei massereiche Körper beschrieben: Je näher sich zwei Körper sind, desto stärker ist die gegenseitige Anziehungskraft. Ist ja eigentlich logisch.

Gut, dies hiesse soweit, dass, sobald sich solche Ballungszentren einer kritischen Masse nähern, diese kollabiert und wir einen Stern hätten. Vorausgesetzt wir haben es mit einer ruhenden, homogenen Wolke aus Wasserstoff zu tun. Doch leider ist es nicht so einfach, da es verschiedene Kräfte gibt, die „trotzig“ dagegenhalten, dass Wolken kollabieren können: thermischer Druck (ideales Gasgesetz: gleiches Volumen und höhere Temperatur -> proportionaler Druckanstieg), Drehimpuls und magnetischer Druck verhindern die zentralisierte Massenansammlung in Wolken.

Wie kann man diese nach aussen gerichteten Kräfte nun überwinden? Ganz einfach; mehr Masse auf ein sehr kleines Volumen komprimiert überwindet diese Barriere.

Eine kleine, sehr heisse Wolke hat absolut keine Chance, jemals einen Stern hervorzubringen. Ein gewisser Sir James Hopwood Jeans hat dies näher untersucht und dazu ein Gesetz formuliert (Jeans-Gesetz, siehe Glossar)

Doch es bedarf noch mehr, diese ziemlich mächtigen Kräfte zu überwinden und die Wolke in den Idealzustand zu bringen. Zwei Stichworte zum effektiven Abkühlen der Wolke: Synchrotronstrahlung und der inverse Compton-Effekt. (S95, 1-Lit.Stern)

Zu Beginn des Materienzusammenzugs einer Wolke, herrscht noch keine grosse Dichte, womit die Synchrotronstrahlung und auch die inverse-Compton-Photonen die Wolke sehr leicht hinter sich lassen können, womit dieser Energie entzogen und damit die Temperatur gesenkt wird.

Doch noch ist sie nicht kühl genug. Jetzt greifen Stoss- und Rekombinationsprozesse in das Geschehen ein. In den noch ziemlich heissen Gaswolken haben die einzelnen Atome und Moleküle eine hohe Bewegungsenergie, dadurch stossen immer wieder Atome zusammen und versetzen sich so gegenseitig in einen energetisch angeregten Zustand.

Ergo: Hüllenelektronen werden in eine Schale höherer Ebene versetzt. Beim zurückspringen dieses Elektrons auf seine ursprüngliche Position, wird ein Photon entsprechender Energie frei, welches die Wolke verlässt. Beim Rekombinationsprozess geschieht etwas Ähnliches mit Ionen: Treffen ionisiertes Atom und ein freies Elektron aufeinander, fängt sich das Ion dieses Elektron und neutralisiert sich somit. Dabei wird auch wieder ein entsprechendes Photon frei.

Resultat: Die Wolke kühlt ab. Und dies im Idealfall bis auf ungefähr 100 Kelvin. Dadurch zieht sich die Wolke zusammen, da der innere Druck abfällt, womit wieder mehr Atome gegeneinander stossen, was wiederum den oben beschrieben Stossprozess günstig beeinflusst, womit der Kühlvorgang beschleunigt wird.

Wir nähern uns langsam dem Ziel: Dem Wolkenkollaps. Doch 100 Kelvin sind immer noch zu heiss, es dürfen maximal ca 20 Kelvin herrschen.
Doch dafür muss ein neuer Kühlungsprozess her, denn bei solch niedrigen Temperaturen funktionieren oben genannte Prozesse nicht mehr.

Jetzt kommen die Moleküle ins Spiel. Diese können auch auf andere Art und Weise Energie verlieren, allerdings weniger effizient. Die Energie in den knapp 100 Kelvin kalten Wolken ist zu gering, um die Teilchen elektromagnetisch anzuregen, stattdessen werden die Moleküle zum Beispiel durch Stösse in Schwingungen und Rotationen versetzt. Um diese Zustände zu erreichen ist logischerweise weniger Energie von Nöten, doch entsprechend kleiner ist auch der Wirkungsgrad des einzelnen Prozesses der Abkühlung, die bei der „Beruhigung“ des Teilchens entsteht. Einfach ausgedrückt: Die abgegebene Energie in Form des Photons ist um einiges kleiner, sprich im Infrarot- und Radiowellenbereich, welche die Wolke dann verlässt. Dies zieht die Schlussfolgerung mit sich, dass eine reine Gas- und Staubwolke kaum Chancen hat zu kollabieren, man braucht verschiedene Moleküle. Diese sind doch sehr empfindlich gegenüber UV-Strahlung, die pausenlos intensiv von den schon bestehenden Sternen emittiert wird. Hier kommt den auf der Erde als mühsam empfundener Staub ins Spiel: Dieser dient am Rande der Wolke als Filter für die energiereiche Strahlung, aber auch als Katalysator für chemische Reaktionen: An seiner relativ rauen Oberfläche können Teilchen andocken und leichter reagieren, während das Staubkorn an sich keine Beteiligung an der Reaktion erfährt -> Unabdingbar für die Sternentstehung. Womit auch wieder einmal mehr klar wird: Im Kosmos hat jedes noch so kleines Teilchen, jede Zutat und jeder Prozess seine dringende Notwendigkeit. Würde auch nur etwas fehlen, würde die gesamte Existenz anders aussehen.

Somit befinden wir uns am Ziel: Unsere Wolke hat die Idealtemperatur von 10 bis 20 Kelvin erreicht.

Doch wie kommt es vom fast absoluten Nullpunkt, bei der keine Bewegung der Elementarteilchen herrscht zum Start des energiereichsten und heissesten Prozess, den wir bis heute kennen?

3.2.2 Der Kollapsbeginn

Nochmals zur Erinnerung: Essentiell für den sogenannten Wolkenkollaps ist die Überwindung der nach aussen gerichteten Kräfte innerhalb der Wolke, sprich thermischer Druck, Drehimpuls und magnetischer Druck. Der thermische Druck ist irgendwann durch die starke Abkühlung kein Thema mehr. Bleibt noch der Drehimpuls, beziehungsweise die Zentrifugalkraft, welche die zweite starke Naturkraft darstellt.

Das Problem dabei ist, dass dieser Drehimpuls nicht direkt verringert werden kann, wie es bei der Temperatur der Fall war. Die Gründe, warum Kreisel sich auf der Erde nicht ewig drehen, liegen in der Gravitation und Reibung durch die Luft und die Auflagefläche. Diese sind bei interstellaren Objekten nicht gegeben.

Doch auch hier sorgen die Naturgesetze für Abhilfe. Man merkt schon: Alles ist eine Abfolge von Prozessen, die so ablaufen *müssen*, weil entsprechende Umstände herrschen. Eine in sich stimmende, vollautomatische Maschine.

Die Lösung des Drehimpulsproblems in einem Wort: Fragmentierung. Eine Wolke ist alles andere als homogen in ihrer Zusammensetzung bezüglich Materie, Dichte und Temperatur. Als Konsequenz des schon erwähnten Jeans-Gesetzes entstehen viele kleinere Zentren in der Wolke selbst. Deren Drehimpulse sind nur ein Bruchteil so gross wie der originale. Dieser Prozess lässt sich einige Male wiederholen. Es entstehen immer kleinere Fragmente. Die eigentliche Energie des Drehimpulses bleibt zwar die gleiche, aber der Effekt der Zentrifugalkraft wird so stark minimiert, sodass sie vernachlässigt werden kann. Dies können Sie sich so vorstellen: Wenn man sich auf einem Punkt dreht und die Arme ausstreckt, dreht man sich relativ langsam und die Arme werden nach aussen gezogen. Zieht man nun die Arme ein (verkleinert seine „Drehachse“), dreht man sich zwar schneller, doch die Energie bleibt zentral, es wird gefühlt nichts oder nur wenig nach aussen gezogen, bzw eine Kraft verspürt, die vom Zentrum gegen aussen gerichtet ist.

Dies bedeutet, dass durch den Drehimpuls Energie nach aussen getragen wird, wobei aber der Kollaps durch die Zentrifugalkräfte verhindert wird. Die Wolke zieht sich also parallel zur Rotationsachse zusammen aufgrund des herrschenden Gas-, Temperatur-, Magnedrucks und der Fliehkräfte werden die Wolkenfragmente zur protostellaren Scheibe {BILD PROTOSTELLARE SCHEIBE] mit kompaktem Zentrum abgeflacht.

Wie sich die Hürden des Gas-, Temperaturdrucks und der Fliehkräfte umgehen lassen, wurde schon geklärt.

Doch es herrscht noch einen magnetischen Druck, denn durch die ständig intensive Strahlung der Umgebung sind alle Atome im Plasma ionisiert. Dies bedeutet, dass Magnetfelder entstehen, die die Wolke zusammenziehen lassen und diese komprimiert. Somit haben wir einen kompakteren Kern, sodass eine erhöhte Wahrscheinlichkeit der Entionisierung besteht. Daraus folgt, dass immer mehr Atome im Kern eine neutrale Ladung besitzen, was den magnetischen Druck aufhebt, was einen ungehinderten Kollaps zulässt.

3.2.3 Geburt des Sterns

Die Atome nähern sich im Kern immer mehr an stossen zusammen und bilden einen, durch die Gravitation, immer grösseren Kern. Unsere Molekülwolke kollabiert dynamisch, die dabei freigesetzte Gravitationsenergie wird in thermische Energie umgewandelt. Da die Wolke noch sehr lichte ist, kann diese Energie ungehindert den Brennpunkt der Handlung verlassen. Doch eine logische Konsequenz ist, dass die Dichte der Wolke kontinuierlich anwächst.

Nach ca 400‘000 Jahren ist so ein kompakter Kern entstanden, sodass die thermische Energie nicht mehr entweichen, sondern von der Wolkenmasse absorbiert wird. Damit steigt der darin herrschende Druck und stoppt damit den Kollaps fast vollständig, sodass fast ein hydrostatisches Gleichgewicht entsteht, bei ca 500 Kelvin. Und das schon, nachdem knapp 0.5% der ursprünglichen Wolkenmasse im Kern gesammelt wurde.

Die sogenannte Kelvin-Helmholtz-Kontraktion setzt ein, der Kern schrumpft langsamer. Die umgebende Wolkenmaterie strömt weiter in den Kern, folglich steigt der Druck und Temperatur weiter an, die Atome fangen an Elektronen zu verlieren, der Kollaps schreitet voran. Erst nachdem eine Temperatur von ca 1800 Kelvin erreicht wurde, sind alle Atome ionisiert, und ein „zweiter“, quasi hydrostatischer Kern bildet sich heraus und der Kollaps steht wieder fast auf Null, wobei aber mittlerweile fast die komplette Materie in den Kern gepresst wurde. Es sind ca 100‘000 Jahre vergangen seit Kollapsbeginn. Dieses Objekt wird als Protostellares Objekt oder Protostern (ein Sternvorläufer) bezeichnet. Dieser ist noch nicht ohne weiteres zu sehen, obwohl er ziemlich heiss und damit hell ist. Er befindet sich noch einer relativ dichten Gaswolke, die nur Infrarotlicht durchlässt. Erst nach ca 1 Million Jahre ist diese vom Protostern genug gelichtet worden. Übrig gebliebenes Hüllengas bietet Nährboden für eventuell noch zu entstehende Planeten.

Um die weiteren Erklärungen zu vereinfachen gehen wir von einer Masse einer Sonne für unseren Protostern aus. Dieser wandert an der sogenannten, für seine Masse spezifischen Hayashi-Linie entlang hinunter. Der Radius nimmt ab und wird somit immer dunkler, doch Temperatur und Druck steigen im Kern somit weiter an. Dieser wird immer grösser und dichter und transportiert nun seine Energie durch Strahlung nach aussen: Der Stern ist grösstenteils radiativ. Bis zu diesem Zeitpunkt sind nun 2 Millionen Jahre vergangen. Der Kern des Protostern erhitzt sich immer mehr und der jugendliche Stern nähert sich langsam der Hauptsternreihe des Hertzsprung-Russel-Diagramms. Diese erreicht er, wenn der Kern 15 Millionen Kelvin erreicht und somit der Funken für das Wasserstoffbrennen gesetzt wurde. Damit haben wir unseren allgemeinen, ausgewachsenen Stern, der ziemlich genau unsere Sonne entspricht. Natürlich gibt es auch noch andere Sternarten, diese sind hauptsächlich durch ihre Masse bestimmt, welche aber auch erst meist in der Sterbensphase des jeweiligen Sterns wirklich bedeutsam wird.

4. Lebenszyklus des Sterns

In diesem Kapitel widmen wir uns den Mechanismen, die dafür sorgen, dass die Sterne am leben bleiben. Oder etwas anders ausgedrückt, wie unsere Sonne uns das Leben ermöglicht, indem sie unentwegt Energie spendet. In einem Wort ausgedrückt: Kernfusion. Seit ihrer Entdeckung sind die Menschen fasziniert von ihrer Effektivität und Reinheit. Wäre es möglich, eine solche Fusion unter Laborbedingungen durchzuführen, wäre das Energieproblem und das damit verbundene Umweltproblem dauerhaft gelöst. Doch leider wird dies noch lange, wenn nicht sogar für immer, eine utopische Vorstellung bleiben, obwohl man schon einige Fortschritte in diesem Gebiet verzeichnen kann.

Doch wie funktioniert diese Kernfusion? Zuerst einmal, was wird da wie fusioniert. Im Kern eines Sterns, der hauptsächlich aus Wasserstoff und Helium besteht, herrschen hohe Temperaturen von etwa 15 Millionen Kelvin. Dabei haben alle Atome ihre Elektronen verloren und teilweise genug Energie um ihre abstossenden Kernkräfte (Coulomb-Kraft ) zu überwinden, doch dazu später mehr, denn theoretisch würden 15 Millionen Kelvin dazu nicht ausreichen.

4.1 Energiegewinnung

4.1.1 Die Proton-Proton Kette oder: klassische Kernfusion

Als erstes verschmelzen zwei Wasserstoffatome zu einem Deuteron (2H Isotop), das heisst wir haben nun einen Kern aus einem Proton und einem Neutron. Wer ein bisschen mitgedacht hat, wird bemerken, dass somit ein Proton „verloren gegangen“ ist. Dies trifft nur bedingt zu, denn dieses Proton ist spontan zu einem Neutron, einem Positron und einem Neutrino zerfallen. Dabei spielen die Teilchen verschiedene Rollen: Das Neutrino sorgt dafür, dass die Energie- und Impulsgesetze nicht verletzt werden, während das Positron die positive Ladung des Protons trägt.

Im nächsten Schritt gesellt sich ein weiteres Proton zum Deuteron hinzu, welches ein γ-Quant (ein hochenergetisches Photon) aussendet und sich in ein Helium-3 (3He) verwandelt, ein Heliumisotop. Zum Schluss noch verschmelzen zwei dieser 3He Isotope zu einem vollständigen Heliumatom, wobei zwei Protonen freigesetzt werden. Unter dem Strich sind also 4 Wasserstoffatome am Fusionsprozess eines Heliumatoms beteiligt. [ABBILDUNG FUSIONSPROZESS]

Jetzt wieder etwas Unglaubliches: Dieser einzelne Fusionsprozess dauert mehrere Milliarden Jahre! Der erste Schritt benötigen die zwei Protonen im Durchschnitt etwa 10 Milliarden Jahre, für Schritt zwei nur wenige Sekunden und für die letzte Phase noch einmal etwa 1 Million Jahre. Warum? Und wie können Sterne dennoch genügend Deuteronen und Heliumkerne hervorbringen? Zwei Faktoren spielen da eine Rolle.

Als erstes kommen hier die Coulomb-Kräfte, beziehungsweise der Coulomb-Wall ins Spiel. Die Atomkerne müssen, um zu fusionieren, sich sehr nahe kommen. Doch diese sind alle positiv geladen. Probieren Sie einmal, zwei gleich gepolte Magnete aufeinander zu bewegen. Ist gar nicht so einfach, dieses Phänomen kennt jeder.

Und auch auf atomarer Ebene sind diese Kräfte enorm, sogar noch grösser als jeglicher Magnet hier auf der Erde. Um diesen sogenannten Coulomb-Wall zu überwinden bräuchte es theoretisch eine kinetische Energie von mehr als 8 Milliarden Kelvin. Doch die Quantenmechanik erlaubt es, dass manchmal ein Proton diesen Wall „untertunnelt“ (Tunneleffekt). Doch dies geschieht sehr selten.

Der zweite Grund ist die schiere Masse an Wasserstoffkernen, die sich stark komprimiert im und um den Kern tummeln. Unzählbare Kollisionen in jedem Moment, da schlüpft immer wieder ein Atom unter dem Coulomb-Wall hindurch.

Damit wäre aber immer noch nicht geklärt, woher die enorme Energie stammt, die von Sternen jede Sekunde emittiert werden. Hier sei der Begriff des Massendefekts erwähnt. Endlich einmal ist es gut, wenn etwas defekt oder besser gesagt „verloren“ geht.

Wenn wir die jeweiligen Massen eines Wasserstoffatoms und eines Heliumatoms ansehen und vergleichen, stellen wir fest; die jeweiligen Massen stimmen nicht genau so überein, wie es zu erwarten gewesen wäre. Der Heliumkern hat eine Masse von 4.029106u und der Wasserstoffkern 4.0026u. Und genau da ist der Kernpunkt der Sache! Diese 0.66% werden als Massendefekt bezeichnet, denn diese Menge an Materie ist während der Proton-Proton Kette in Energie umgewandelt worden.

Klingt nicht nach viel, ist es im Einzelfall gesehen auch nicht. Auch die zusätzliche Energie, die durch Neutrinos mitgetragen wird, bringt nicht viel mehr. Unterm Strich reicht die Energie einer Fusion dazu aus, ein Gramm Wasser um 1°Celsius zu erhitzen. Doch die schiere Menge an vorhandenem Wasserstoff bringt die Sonne dazu mit rund 365 Millionen Watt zu leuchten. Es müssen umgerechnet also ständig ca 600 Millionen Tonnen Wasserstoff verbrannt werden. Dabei entstehen 595 Millionen Tonnen Helium, der Rest wird als Strahlung, hauptsächlich als γ-Quant abgegeben. Dies bedeutet, die Sonne verliert immer mehr an Gewicht.

Mit diesen Zahlen lässt sich berechnen, wie lange unsere Sonne noch Brennstoff hat. Ginge man von ihrem gesamten Wasserstoffvorrat aus, könnte sie 80 Milliarden Jahre überleben. Jedoch ist nur der 15 Millionen Kelvin heisse Kern dazu imstande, Fusionen durchzuführen. Dies bedeutet, die Lebenszeit wird auf geschätzte 10 Milliarden Jahre verkürzt. Wir befinden uns also ziemlich exakt in der Hälfte des Sonnenlebens. Angemerkt sei hier, dass mit dem „Leben“ hier die Verweilung des Sterns auf der Hauptreihe gemeint ist. Denn wenn der Kern verbrannt ist, bedeutet dies noch eine ganze Weile nicht das Ende des Sterns. Meiner Ansicht nach wird es dann erst richtig interessant. Doch dazu später mehr.

Abschliessend muss noch gesagt werden, was mit diesen γ-Quanten aus dem Kern passiert. Durch die enorm hohe Dichte können diese nicht ungehindert an die Oberfläche der Sonne dringen. Sie werden durch ständige Kollisionen mit Elektronen und Absorptionsprozessen stetig abgeschwächt, bis sie als schwache elektromagnetische Wellen im sichtbaren, Röntgen- und Infrarotbereich die Sonne verlassen.

4.1.2 Der CNO-Zyklus

Eine zweite Form der Energiegewinnung der Sterne stellt der CNO-Zyklus dar. Er funktioniert im wesentlichen gleich wie der pp-Prozess. Ein grosser Unterschied stellt sich jedoch schon durch die Namensgebung heraus: Es ist ein Zyklus, und keine Reaktionskette. Dies bedeutet, dass dieser Zyklus immer wieder von vorne beginnt, ein Kreisprozess.

Dieser ist eigentlich in 2 Phasen zu unterteilen. Der Hauptprozess beginnt mit Kohlenstoff (12C) und der Nebenzyklus mit Sauerstoff (16O).

Die Hauptreihe funktioniert so:
Ein C-Atom kollidiert mit einem Proton, ein γ-Quant wird frei und ein N-Atom entsteht. Dieses zerfällt in ein Positron, ein Neutrino und ein C-Isotop, welches sich wieder ein Proton aneignet und zu einem (anderen) N-Isotop umgewandelt wird, während wieder ein γ-Quant freigesetzt wird. Diesmal jedoch kommt unter der Abgabe eines γ-Quants noch ein Proton hinzu, sodass ein O-Isotop entsteht. Dieses zerfällt wieder in ein Positron, ein Neutrino und ein N-Isotop, welches mit einem vierten Proton kollidiert, dabei wird ein He-Atom abgegeben und wir sind wieder am Anfang [ABBILDUNG CNO-ZYKLUS]

Der Neben- oder Sauerstoffzyklus funktioniert genau gleich, ausser dass hier der Sauerstoff die Rolle als Katalysator übernimmt

[ABBILDUNG CNO-NEBENZYKLUS]

Um diese Prozesse loszutreten braucht es neben den „Grundbedingungen“ natürlich noch die nötigen schweren Elemente wie Kohlenstoff und Sauerstoff. Dies bedeutet, dass ein Stern die nötige Konzentration dieser Elemente aufbringen muss, was bei den Population-III Sternen schwierig gewesen sein dürfte, da diese aus purem H und He bestanden haben. Doch eben genau diese Sterne haben diese schweren Elemente produziert, woraus einige der heute lebenden Population-I Sterne ihre Energie beziehen. Doch wie wird entschieden, ob jetzt die pp-Kette oder der CNO-Zyklus zum Einsatz kommt? Wie so oft, regelt sich auch dies über die Kerntemperatur eines Sterns, welche direkt von der Grösse, beziehungsweise der Masse des Sterns bestimmt wird. Bis etwa 17 Millionen Kelvin ist die pp-Kette ergiebiger, danach ist der CNO-Zyklus weit effizienter, denn der Wirkungsgrad von der pp-Kette steigt proportional zu der Temperatur hoch 4, beim CNO-Zyklus mal hoch 12 bis 18.

Dies bedeutet, dass massereiche Sterne, die im Kern folglich höhere Temperaturen besitzen, auf den CNO-Zyklus zurückgreifen, während leichte und kleinere Sterne auf die pp-Kette setzen. Unsere Sonne, die relativ klein ist, gewinnt ihre Energie zu 90% aus der pp-Kette und die restlichen 10% aus dem CNO-Zyklus. Damit ist auch geklärt, warum massereiche Objekte ihren Wasserstoffvorrat so viel schneller verbrennen als leichte Sterne. Um eine grobe Übersicht zu schaffen ein paar Zahlen:

Unsere Sonne lebt ca. 10 Milliarden Jahre. Ein Stern mit der 10-fachen Masse ist schon nach 25 Millionen Jahren ausgebrannt, während ein Objekt mit der halben Sonnenmasse rund 40 Milliarden Jahre überlebt.

4.2 Leben während der Wasserstoffbrennphase

Die Zusammensetzung des Sterns ändert sich natürlich mit dem fortschreitenden Wasserstoffbrennen. Der Kern besteht mit der Zeit immer mehr aus Helium. Der Kern hat, bis auf die Verluste durch den Massendefekt, immer etwa die gleiche Masse, jedoch benötigen immer weniger Teilchen (He) ein geringeres Volumen im Kern. Dies hat die Schrumpfung des Kerns zur Folge, und damit steigt der Strahlen- und Temperaturdruck stetig an, was zu einer langsamen, aber konstanten Erhöhung des Kernfusionsprozesses nach sich zieht. Damit erhöht sich die Energieproduktion und der Stern wird immer heller. Unsere Sonne leuchtet seit ihrer Geburt vor 4.5 Milliarden Jahren um ca 40% heller. Ein weiterer Nebeneffekt ist die Erhöhung des allgemeinen Sternradius, bei der Sonne beträgt der bisher 5%. Beides, Leuchtkraft und Radius werden bis zu ihrem Ende noch beachtlich zunehmen.

Eine letzte essentielle Frage drängt sich hier auf: Wie und warum bleiben die Sterne trotz dieser enormen Kräfte im Kern und der Gravitation von aussen sehr stabil? Warum kollabiert der Stern bei einem Energiedefizit nicht, oder explodiert bei einem Energieüberschuss?

Ein raffinierter, aber einfacher Prozess sorgt dafür. Stellt sich ein Energiedefizit ein, muss der Stern auf seine potenziellen Energiereserven zurückgreifen. Was passiert dabei? Klar, er schrumpft. Temperatur- und Strahlendruck werden erhöht und damit die Fusionsprozesse angeregt. Bei einem Energieüberschuss geschieht das genaue Gegenteil. Der Stern dehnt sich ein wenig aus, es wird Druck vom Kern genommen, der Fusionsprozess wird verlangsamt und das Energielevel pendelt sich ein. Daraus resultiert, dass alle Sterne ein wenig pulsieren. Dies funktioniert jedoch nur, weil die Energie liefernden Prozesse temperaturabhängig sind, sonst wären die Sterne nicht imstande, diese zu kontrollieren.

4.3 Spezifische Lebenseigenschaften und Tod eines Sterns

Bisher konnte man alle Sterne, egal welcher Masse als ziemlich gleichgestellt ansehen. Zwar verliefen manche Prozesse schneller, andere langsamer, einige kleine Unterschiede stellten sich immer heraus, jedoch waren alle Prozesse und Eigenschaften im Grossen und Ganzen deckungsgleich. Bei der Verendung eines spezifischen Sterns kann man dies nicht mehr tun, da die Unterschiede zu gravierend sind. Die Unterteilungskriterien unterliegen der direkten Masse eines Sterns, welche in Gewichtsklassen unterteilt werden. Da Sterne eine enorm hohe Masse besitzen, wären reine Zahlen nur verwirrend, und man könnte nichts damit anfangen. Daher haben sie die Astronomen darauf geeinigt, unsere Sonne als Masseinheit zu verwenden. Dies bedeutet, unsere Sonne hat eine Masse von einer Sonnenmasse. Ein Stern mit 2 Sonnenmassen ist also doppelt so massereich wie unser Zentralgestirn, und so weiter. Sie werden feststellen, unsere Sonne ist ein sehr kleiner Stern.

In folgenden Unterkapiteln werde ich vertieft auf diejenige Lebensphase der Sterne fokussieren, nachdem sie die Hauptreihe verlassen haben. Denn erst da entfalten sich die differenzierten Eigenschaften der einzelnen Objekten vollständig.

4.3.1 Sterne der Massen 0.085 bis 0.4 Sonnenmassen

Diese Sterne, auch rote Zwerge genannt sind etwas Spezielles. Sie sind eine Erscheinung, welche eine Eigenschaft besitzen, die nur wenige haben: Sie könnten theoretisch seit der Entstehung des Universums existieren. Der Grund dafür ist einfach erklärt: Um ihren gesamten Wasserstoff zu verbrennen, brauchen diese roten Zwerge mehrere Dekaden an Milliarden Jahren. Ergo: Sie verbrennen länger Wasserstoff als das Universum existent ist! Über ihre Endformen kann nur spekuliert beziehungsweise sie könnten berechnet werden, denn die ersten roten Zwerge werden erst in ca 50 Milliarden Jahren ihren Brennstoff verbraucht haben. Da gibt es uns schon lange nicht mehr. Deshalb und aus der erwarteten eher unspektakulären Verendung wenden wir uns den interessanteren Kandidaten zu: Den Sternen von 1 bis 8 Sonnenmassen, beziehungsweise den interessantesten von allen, den massereichen Sternen mit über 8 Sonnenmassen.

4.3.2 Leichtgewichtsklasse: 1-3 Sonnenmassen

Interessant ist diese Klasse, weil dieses Schicksal unsere Sonne ereilen wird. Wir sind vorhin beim Wasserstoffbrennen stehen geblieben. Bleiben wir gerade beim Beispiel unserer Sonne. Ihre besten Jahre hat sie hinter sich, da sie nun schon seit etwa 10 Milliarden Jahren ihre Reserven verbrennt. Dabei bliebt sie stetig auf dem Band der Hauptreihensterne, die sich eben durch Wasserstoffbrennen und hydrostatisches Gleichgewicht auszeichnen. Doch dieses gerät nun stark ins Wanken: Dem Kern geht der Wasserstoff aus, dieser besteht nunmehr aus Helium. Der Druck und Temperatur reichen nicht aus, weitere Fusionsprozesse einzuleiten. Es kommt zu einem Druck- und Temperaturabfall im Kern, da keine Strahlungsenergie mehr nach aussen dringt. Nur in einem schmalen Band *um* den Kern herum besteht noch eine schwache Wasserstofffusionierung, auch Wasserstoff-Schalenbrennen genannt. Aus diesem regnet ständig weiteres Helium auf den Kern hinab, was den nach innen gerichteten Druck noch weiter erhöht. Dies führt aufgrund der Gravitationsgesetze zu einem schrumpfen des Kerns und die Atome werden auf ein immer kleineres Volumen gepresst, und dies auf extremste Weise. Die Abstände verringern sich auf atomare Dimensionen. Dies bedeutet, dass die Gesetze der klassischen Physik hier nicht mehr greifen, sondern auf die Theorien der Quantenmechanik zurückgegriffen werden muss. Der Übersicht und Einfachheit halber beschränke ich diese Ausführungen aber nur auf das Nötigste.

Als erstes wird die natürliche Existenz der Elektronen gestört, da sie dem sogenannten Pauli-Prinzip unterworfen sind. Dies bedeutet dass pro Quantenzelle nur zwei Elektronen gleichzeitig existieren können, die sich in ihrer Spinrichtung, also Eigendrehung, unterscheiden. Anders gesagt: Es dürfen nur zwei Elektronen das selbe Energieniveau besitzen Dementsprechend müssen die Elektronen immer auf eine Quantenzelle höherer Energie ausweichen. Elektronen können also nicht auf eine beliebig geringes Volumen zusammengepresst werden. Wird es dennoch versucht, entsteht ein gewaltiger Druck, auch Fermi-Druck oder Entartungsdruck genannt, welche sich aktiv gegen die Gravitationskraft stellt. Ist dieser Entartungsprozess so stark fortgeschritten, dass jede Quantenzelle belegt ist, spricht man von der vollständigen Entartung des Elektronengases.

Anders als bisher entsteht der nach aussen gerichtete Druck nicht aufgrund hoher Temperaturen, sondern der Fermi-Druck erhält seine Energie durch die eng gepackte Materie und den daraus resuliterenden Kampf der Elektronen um Platz. So gesehen kann entartete Materie eiskalt sein, aber enormem Druck standhalten. Zur Veranschaulichung: 1ccm vollständig entartete Materie wiegt ca 1 Tonne. Die Heliumatome spielen da keine Rolle, sie bekommen von all dem gar nichts mit. Die Quantenphysik kann den Grund dafür erklären, doch dies würde den Rahmen sprengen.

Zurück bei unserem Stern; was geschieht? Der Heliumkern schrumpft, während noch immer ein Wasserstoff-Schalenbrennen weitere Heliumatome produziert, welche sich auf den Kern legen und somit den Druck erhöhen, was den Kern immer schneller schrumpfen lässt. Aufgrund der Gravitation zieht der gesamte Stern nach, was den Druck auf die Wasserstoffschale erhöht. Dies wiederum hat zur Folge, dass die Wasserstoffschale die Fusionsrate erhöht und stetig noch intensiver und heisser brennt. Daraus folgt ein massiv erhöhter von der Schale aus nach aussen gerichteter Druck, was den Stern massiv aufblähen lässt. Die direkte Konsequenz: Die Oberflächentemperatur sinkt bis auf 3000 Kelvin. Im Hertzsprung-Russel-Diagramm heisst das: Weg von der Hauptreihe nach rechts oben; eine höhere Leuchtkraft mit niedrigerer Effektivtemperatur. Wir haben nun ein Objekt, welches als Roter Unterriese bezeichnet wird.

Doch wir sind noch lange nicht am Ende der Reise. Die Oberflächentemperatur kann nicht unter 3000 Kelvin sinken, aufgrund eines thermostatisches Gesetzes. Die äussere Hülle besteht aus Wasserstoff, welches sich bei diesen geringen Temperaturen ionisiert, allerdings jetzt negativ anstatt positiv. Damit wird die Hülle für Strahlung ziemlich undurchlässig. Damit wird die Hülle wieder erhitzt und das überflüssige Elektron wird wieder abgegeben, damit wieder Strahlung entweichen kann. Somit ergeben sich die ungefähr 3000 Kelvin Effektivtemperatur.

Währenddessen läuft es im und am Kern immer heisser: Der Kern schrumpft, der Druck steigt, die Wasserstoffschale brennt immer intensiver. Wie reagiert die Hülle darauf, ohne die Effektivtemperatur zu ändern, da dies aufgrund des oben erwähnten Faktors nicht wirklich möglich ist? Sie dehnt sich aus. Aus unserem 1 Sonnenmassen-Stern ist am Ende der Prozesse ein Roter Riese geworden, je nach Spektraltyp. Ein Objekt, welches einen 100-mal grösseren Radius und ca die 1000-fache Leuchtkraft des Ursprungsterns besitzt. Auf dem H-R-Diagramm hat sich der Stern von der Hauptreihe entfernt, sich auf den Unterriesenast geschwungen und sich auf den Riesenast begeben und steigt diesen weiter hinauf.

Für diese gesamte Entwicklung bis zum Roten Riesen benötigt unsere Sonne in etwa 200 Millionen Jahre, was eine relativ kurze Zeitspanne darstellt, wenn man die bisherige Lebensdauer von 9-10 Milliarden Jahre betrachtet.

Doch wir befinden uns erst auf halbem Weg zum Ende hin. Nun setzt eine weitere Lebens- oder besser gesagt Brennphase ein: Das Helium brennen. Der Kern ist bisher stetig geschrumpft, dabei wurde potenzielle Energie frei und hat diesen aufgeheizt, zusätzlich zu der Energie des Wasserstoff-Schalenbrennens. Hat der Kern eine Temperatur von etwa 100 Millionen Kelvin erreicht, startet ein neuer Fusionsprozess, das Helium brennen oder auch Triple-Alpha-Process. Was geschieht da? Grob umrissen: insgesamt drei He-Atome fusionieren zu Kohlenstoff.
Doch dieser Prozess ist um einiges heikler und unbeständiger als die bisher besprochenen Fusionsmechanismen. Zwei Heliumkerne treffen aufeinander und verschmelzen unter Abgabe eines γ-Quants zu einem Berilliumatom. Doch dieses ist sehr instabil und bricht fast sofort wieder in zwei Heliumkerne auseinander. Dies bedeutet, bevor das passieren kann, muss ein drittes Heliumatom auf das Be-Atom treffen und zu einem Kohlenstoffatom fusionieren. Doch auch dieses ist ziemlich instabil und zerfällt mit einer Wahrscheinlichkeit von 1000:1 wieder in die Ausgangsbestandteile Be und He. Doch aufgrund der riesen Menge an gleichzeitig stattfindenden Reaktionen spielen diese instabilen Formen kaum eine Rolle.

Mit dem Beginnen der Fusionsprozesse steigt die Temperatur im Kern natürlich wieder rapide an, was auch die Fusionsrate noch mehr anheizt. Doch es geschieht optisch nichts. Der Kern bleibt wie er ist. Zumindest bis der innere Temperaturdruck so gross geworden ist, dass er der entarteten Materie, exakter gesagt dem Fermi-Druck die Stirn bieten kann. Dann explodiert der Kern im ziemlich treffenden Namen „Heliumblitz“. Der Kern dehnt sich schlagartig aus und die Entartung der Materie wird aufgehoben. Dabei wird eine Leuchtenergie von 100 Millionen Sonnen freigesetzt. Dies bedeutet nun aber auch, dass die Heliumfusionsrate rasant abnimmt, da Druck und Temperatur sich auf einem tieferen Level eingependelt haben. Der Rote Riese schrumpft auf run 1/10 seiner Grösse mit einer Leuchtkraft von ca 1/100 im Vergleich zu seiner Heliumblitzzeit. In nur 100‘000 Jahren rutscht der Stern vom Ast der Roten Riesen auf den sogenannte Horizonantalast. Ein Band, welches sich waagerecht über das H-R-Diagramm zieht, welches massearme Sterne nach ihrer Roten Riesen Phase bevölkern, und dies in einem hydrostatischen Gleichgewicht des Heliumbrennens, vergleichbar mit der Hauptreihe des Wasserstoffbrennens.

Nur entstehen beim Helium brennen als Folgereaktionen noch weitere Atome neben dem Kohlenstoff, indem sich immer weitere Heliumatome an das vorangegangene Molekül anbinden: Von C nach O nach Ne nach Mg nach Si. Doch die energetische Ausbeute aus diesen Prozessen ist so gering, sodass sie kaum der Rede wert ist. Trotzdem ist sie essentiell.

Während dieser Phase auf dem Horizontalast geraten diese Objekte, auch RR-Lyrae-Sterne genannt, in Schwingungen und scheinen wie ein Herz mit Frequenzen von 5-30h zu pulsieren. Die Ursache liegt in der Kontraktion des Sternes.

Das Helium brennen dauert typischerweise nur einige 100 Millionen Jahre, denn der Kern hat eine enorm hohe Temperatur von ca. 200 Millionen Kelvin. Folglich laufen die Fusionsprozesse sehr schnell ab. Dabei ist das Heliumbrennen energetisch um 90% weniger ergiebig als das Wasserstoffbrennen, daher ist der Vorrat an Helium schnell aufgebraucht, wenn die Leuchtkraft erhalten werden will. Ist das Helium langsam aufgebraucht, bildet sich wie zuvor beim Hauptreihenstern eine kleine Schale um den Kern, in dem weiterhin Helium verbrannt wird. Diese wird gespiesen von einer Wasserstoff-Brennschale, die über der Heliumschale liegt. Nun geschiegt alles ziemlich analog zum Hauptreihenstern am Ende des Wasserstoffbrennens. Der innere Kern kühlt ab und zieht sich zusammen. Die Materie entartet, die Gravitation steigt und damit erhöht sich auch die Temperatur, was die Reaktionsöfen weiter antreibt und begibt sich somit auf den asymptotischen Riesenast. Die Leuchtkraft erhöht sich, der Stern bläht sich erneut auf, doch diesmal um ein vielfaches mehr als noch als Roter Riese. Ein Stern in dieser Phase erreicht einen Durchmesser von 300 bis 400 Millionen Kilometer. Im Falle unserer Sonne bedeutet dies, dass die Planeten Merkur und Venus und vielleicht sogar die Erde von ihr verschluckt werden würden. In knapp 4.5 Milliarden Jahren ist es soweit.

Während seiner Reise auf den Riesenästen hat der Stern schon durch selbst entwickelte Strahlenwinde und seine Kontraktion 10-20% seiner Masse abgestossen. Doch gegen Ende des asymptotischen Riesenastes lässt er nochmals 20-30% seiner Masse in den Weiten des Alls zurück, aufgrund thermischer Instabilitäten im Kern, die die beiden Brennschalen verursachen. Denn diese brennen nicht gleichzeitig, sondern abwechselnd in einer Periode von ca 10‘000 bis 100‘000 Jahren. Durchschnittlich hat der Stern nun die Hälfte seiner Masse verloren, möglich sind aber auch bis 90%. Das Helium-Schalenbrennen liefert weiterhin Kohlenstoff, welches auf den toten Kern fällt, welcher sich immer weiter zusammenzieht und somit Temperaturen um 100‘000 Kelvin entwickelt. Dabei wird ultraviolettes Licht emittiert, welches die abgestossenen Gashüllen in einem fantastischen Farbenspiel zum Leuchten bringen, welche planetarische Nebel genannt werden. Nach 50‘000 Jahren ist auch der letzte Kern verbrannt und der Kern kommt langsam zur Ruhe. Er besteht noch aus ca 0.6 Sonnenmassen und hauptsächlich aus Kohlen- und Sauerstoff. Der Kern schrumpft noch bis zu dem Zeitpunkt, an dem die gesamte Materie völlig entartet ist. Unsere Sonne ist nun ein Weisser Zwerg. Zunächst noch gut am Himmel sichtbar, doch mangels Energiequelle kühlen diese Objekte immer weiter ab, bis sie schliesslich nicht mehr zu sehen sind. Ab diesem Zeitpunkt nennt man sie dann bald einmal Schwarze Zwerge. Dies sind die endgültigen Sternenleichen: Ein Klumpen entartete Materie aus Kohlen- und Sauerstoff, der genau so kalt und dunkel ist, wie das ihn umgebende All.

4.3.3 Mittelgewichtsklasse: 3-8 Sonnenmassen

Der Übersicht und des Verständnisses halber beschränke ich die folgenden Ausführungen auf Sterne mit 5 Sonnenmassen. Die meisten Prozesse und Reaktionen von den massearmen Sternen finden auch hier statt, weshalb man sich ausschliesslich auf die Unterschiede konzentrieren kann.

Die offensichtlichsten und gravierendsten Differenzen zu den Sternen tieferer Gewichtsklassen: Alle Prozesse laufen wesentlich schneller ab. Die Lebensphase auf der Hauptsternreihe beträgt gerade mal 56 Millionen Jahre, während es vorhin noch 10 Milliarden waren! Doch alle Prozesse laufen vom Prinzip her gleich ab: Nach dem Wasserstoffbrennen geht es in das Wasserstoff-Schalenbrennen über, die Sternhülle fängt an zu kontrahieren, während sie auf das 25-fache ihrer Grösse expandiert. Der Kern schrumpft. Diese Gegesätzlichkeit wird auch als Spiegelprinzip bezeichnet.

Es dauert etwa 3 Millionen Jahre, bis der Stern diese Phase durchlaufen und der Kern eine Temperatur von 100 Millionen Kelvin erreicht hat. Eine weitere Eigenart, bevor wir zu den weiteren Prozessen voranschreiten: Es gibt keinen Heliumblitz. Warum nicht? Das Heliumbrennen zündet schon bevor der Kern vollständig entartet ist, somit gibt es keine schlagartige Energieentladung, da diese auch nicht nötig ist. Dies ist bei Sternen ab 2.5 Sonnenmassen zu beobachten. Ein weiteres Detail stellt die energetische Leistungsverteilung dar: Während bei den Leichtgewichten die meiste Energie aus dem Wasserstoffbrennen stammte, sind es hier normalerweise rund 60%, die aus dem Wasserstoff-Schalenbrennen stammen.

Aber auch diese Prozesse währen nur kurz; knapp 11 Millionen Jahre, dann setzen das abwechselnde Wasserstoff- und Helium-Schalenbrennen ein, wobei Kern und Hülle wieder zu kontrahieren oder pulsieren beginnen.

Die Leuchtkraft des Sterns nimmt um das 10-fache zu und die Hülle wirft zunehmend mehr Masse ab, womit der Weisse Zwerg sichtbar wird. Und es sind gerade einmal erst 80 Millionen Jahre vergangen.

In dieser Phase der Pulsation nennt man diese massereichen Sterne Cepheiden. Sie sind pulsationsinstabil und geraten dadurch in Schwingungen. Die Perioden der Lichtwechsel sind erstaunlich exakt: Beobachtungen ergaben eine Periode von 50 Tagen. Daraus liess sich berechnen, dass sich die Hülle mit rund 30 Kilometern in der Sekunde ausdehnt und wieder zusammenzieht. Um noch weitere lange Ausführungen zu vermeiden, kann man hier praktischerweise auf das H-R-Diagramm verweisen:
Erinnern Sie sich noch an die RR-Lyra-Sterne auf dem Horizontalast? Die Cepheiden funktionieren eigentlich gleich, nur eine Stufe „weiter oben“. Auch sie liegen im sogenannten Instabilitätsstreifen, in welchem die Sterne durch Kontraktion und den Spiegeleffekt zu Pulsationsveränderlichen mutieren. Der einzige Unterschied zu den massearmen Sternen unter 5 Sonnenmassen besteht darin, dass die massereichen Sterne diesen Streifen zweimal durchlaufen und dort zu Cepheiden werden.

Doch auch diese Art der Sterne wird einem Weissen Zwerg enden, der langsam auskühlt.

4.3.4 Schwergewicht: Massereiche Sterne ab 8 Sonnenmassen

Diese Objekte sind die weitaus wunderlichsten und somit interessantesten. Und sehr essentiell für das Gesicht des Alls, wie wir es heute kennen. Auch diese Sterne funktionieren im wesentlichen genau gleich: Alle Prozesse haben denselben Ursprung und Wirkung.

Doch zunächst sei ein logischer Unterschied zu den Sternen der unteren Gewichtsklassen erwähnt: Diese Gasriesen brennen noch intensiver, heisser und heller. Logische Konsequenz: Sie finden noch schneller ihr Ende, als alle anderen Sterne minderer Masse. Eine gute Faustregel lautet also: Je massereicher der Stern, desto schneller hat er seine Wasserstoffvorräte verbraucht. Es ist weniger eine Faustegel als ein Gesetz, denn es *ist* faktisch immer so. Theoretisch gibt es Objekte, die bis zu 100 Sonnenmasse und mehr wiegen, doch hier beschränken wir uns auf die heute bisher entdeckten Objekte. Im Mittel leben Sterne von 10-20 Sonnenmassen nur etwa 15 Millionen Jahre. Also viel zu kurz, um Leben entstehen zu lassen. Danach begeben verlassen sie die Hauptreihe und entwickeln sich in nur 80‘000 Jahren zu einem Roten Riesen. In diesem Stadium verweilt er dann noch 900‘000 Jahre.

Um einen Vergleich anzustellen: Sterne ab 25 Sonnenmassen sind schon nach 7 Millionen Jahren vom Wasserstoffbrennen in das Heliumbrennen in gestalt der Roten Überriesen übergegangen. Doch auch dieses Stadium ist nach 700‘000 Jahren vorbei. Also sehr kurze Zeitspannen. Diese können Radien, 1500-fach so hoch wie der Sonne annehmen. Auch in der Leuchtkraft übertreffen sie unseren Stern um bis zu das 100‘000-fache. (wikipedia)

Sterne ab dieser Grössenordnung besitzen nicht nur das Heliumbrennen, sondern besitzen aufgrund ihrer Gravitation und den daraus resultierenden hohen Temperaturen noch weitere Nukleosynthesen. Die Endprodukte des jweilig vorhergehenden Brennvorgangs dienen hierbei wieder als Grundstoff für die weitere Synthese, denn der Kern verdichtet sich aufgrund der immer zunehmenden Gravitation weiter, was seine Temperatur auf eine Höhe treibt, welche weitere Fusionierungen zünden. Somit folgt nach dem Heliumbrennen die Verschmelzung von Kohlenstoff, dann das Neonbrennen, Sauerstoffbrennen und zum Schluss noch das Siliziumbrennen. Doch wie schon einmal erwähnt, ist der Energiegewinn immer geringer bis kaum nennenswert. Damit dies nicht vergessen geht: Nach der effektiven Brennphase zündet die Schalenbrennphase. Wenn also der Kern 700 Millionen Kelvin erreicht und damit den Kohlenstofffusionsprozess gezündet hat, diesen nach knapp 300 Jahren wieder aufgibt, entsteht eine Schale mit Kohlenstoff, die unter der Helium- und der Wasserstoffschale weiterbrennt. Also es entsteht immer eine weitere Schicht unter der anderen, in diesem Beispiel wäre es bis jetzt also ein Dreischalenbrennen.

Nach dem Kohlenstoffbrennen setzt bei einer Kerntemperatur von 1200 Millionen Kelvin das Neonbrennen ein, welches das Endprodukt der Kohlenstoffsynthese war. Dabei herrschen so hohe Temperaturen im Kern, dass das Neon wieder in Wasserstoff und Helium zerlegt wird, auch Photodesintegration genannt. Daraus folgende Reaktionen bilden ein Neonisotop, Magnesium und Silizium. Diese vierte Brennphase dauert nur 10 Jahre. Die nächste Brennphase ist noch von kürzerer Dauer. Sie startet mit 1800 Millionen Kelvin und bildet in einem halben Jahr aus dem Sauerstoff Magnesium, Silizium, Phosphor und Schwefel. Der Kern fängt unterdessen immer stärker an zu pulsieren, bis eine Kerntemperatur von 5000 Millionen Kelvin erreicht und damit das Siliziumbrennen initiiert wird. Der Reaktionsprozess an sich ist relativ kompliziert, doch man kann vereinfacht sagen: Aus zwei Siliziumkernen entsteht ein Eisenkern. Es werden keine weiteren Fusionsprozesse gestartet aus dem einfachen Grund, dass jeder weiterer Versuch der Synthese Energie kosten würde, anstatt welche zu liefern. Unser massereicher Stern hat nun eine Form, die an eine Zwiebel erinnert, von innen nach aussen: Der entartete Eisenkern, rundherum die angeordneten Brennschalen von Silizium, Sauerstoff, Neon, Kohlenstoff, Helium und Wasserstoff. Diese Bereiche sind auf ein minimales Gebiet zusammengepresst, während dieses Zentrum von einem riesig aufgeblähten Stern umhüllt wird.

Die grobe Lebensphase der massereichen Sterne wäre mit obiger Schilderung abgeschlossen, und wir können uns mit den mitunter spektakulärsten Erscheinungen im gesamten Kosmos zuwenden. Dem Tod eines solchen Giganten, wenn seine Zeit als roter Überriese vorbei ist. Sterne niedrigerer Gewichtsklasse erlöschen nach dem Ende ihrer Energievorräte einfach und kühlen als Weisse Zwerge einfach aus. Rote Überriesen und grössere Erscheinungsformen setzen da auf eine weit imposantere Art, das Zeitliche zu segnen.

Wir befinden uns an dem Punkt, an welchem keine neuen Fusionsprozesse gestartet werden und das Schalenbrennen auch erloschen ist. Der Kern ist von 20 bis 30 Sonnenmassen auf 1-5 Sonnenmassen geschrumpft. Da ohne den Fusionsofen im Innern kein Strahlendruck gegen aussen herrscht, kontrahiert der Kern und zieht sich zusammen. Was passiert? Die ohnehin schon entartete Materie wird noch mehr zusammengepresst, über den Status der vollständigen Entartung hinaus. Die Elektronen haben nicht nur kaum Platz, sich auszubreiten, im Gegenteil: Sie werden *in* den Kern ihrer jeweiligen Atome gepresst und verschmelzen dort aufgrund ihrer extrem hohen Energie mit den Protonen zu Neutronen. Dieser Prozess wird als „inverser β-Zerfall“ bezeichnet, in Anlehnung an das Phänomen, welches bei der Kernspaltung einsetzt, nur eben genau umgekehrt. Anstatt dass ein Neutron spontan in ein Elektron (das β-Teilchen), ein Positron und Antineutrino zerfällt, vereinigt sich ein Proton mit einem Elektron, wobei ein Neutron und ein Neutrino entstehen. Das bedeutet, dass unser Stern nun nur noch aus einem sehr dichten Kern aus Neutronen besteht. Da Neutrinos nicht oder kaum mit der Materie aus Protonen und Neutronen interagieren, verlassen ca. 95% den Kern ungehindert, womit eine Menge an Energie verloren geht und der Kern schnell abkühlt und weiter schrumpft.

Nun sind wir an dem Punkt angereicht, an dem es interessant wird. Der inverse β-Zerfall hat alle Elektronen vernichtet, woraufhin der Kern nicht mehr durch das Pauli-Prinzip stabilisiert werden kann. Dies hat zur Folge, dass der Kern unter seiner eigenen Gravitation kollabiert. Ein Gamma Ray Burst entsteht (wie genau ist unklar), der in wenigen Sekunden mehr Energie in Form eines gigantischen Lichtstrahls aus Gammastrahlen emittiert, als die Sonne in 1 Milliarde Jahren. Die äusseren Hüllen stürzen auf den harten Neutronenkern im Inneren und schnellen repulsartig als enorme Druck- und Schockwellen zurück in den Raum, mit Geschwindigkeiten von 10‘000 Kilometer in der Sekunde. Die nach Aussen strömenden Neutrinos heizen die Sternhülle so stark auf, sodass dieser in einer gewaltigen Explosion auseinander gerissen wird. Die Energie, die dabei freigesetzt wird, ist enorm und nicht vorstellbar. Als Zahl ausgedrückt beträgt sie 1046 Joule. Für diese Menge einen Vergleich zu finden ist sehr schwer, da es zu den energiereichsten Phänomenen im gesamten Kosmos zählt. Es würde ausreichen, das 1 Milliarden-fache unseres Wassers der Weltmeere rund 20 Milliarden mal von 0°Celsius auf 100°Celsius zu erhitzen. Es entsteht eine Leuchtkraft, die um ein vielfaches grösser ist, als diejenige aller Milliarden Sterne einer Galaxie zusammen gerechnet. [BILD SUPERNOVAEXPLOSION]

Dieses Schauspiel wird von den Astronomen als Supernovaexplosion (des Typs II) bezeichnet.

Nach dieser Explosion bleib ein kleiner, nur ein paar zehn Kilometer grosser, extrem dichter Kern, der aus Neutronen besteht, zurück. Ein Gebilde, welches Neutronen dicht an dicht aneinander presst und dessen Dichte enorme Ausmasse erreicht hat. Ein Teelöffel Neutronensternsubstanz wiegt in etwa so viel, wie alle Menschen der Erde zusammen, also mehrere Milliarden Tonnen pro Kubikzentimeter. Diese Objekte sind noch kaum erforscht, da es eben gerade aufgrund ihrer enormen Dichte es sehr schwer ist, Kenntnisse über sie zu sammeln.

Um den einst sehr mächtigen und imposanten Stern breitet sich die abgestossene Sternenhülle als Supernovarest aus. Er besteht hauptsächlich aus Wasserstoff und Helium, aber natürlich auch all die anderen schweren Elemente, die während seiner Brennphase entstanden sind. Damit wird das interstellare Medium um viele Milliarden Tonnen an schweren Elementen angereichert, was bedeutet, dass die nachfolgenden Sternengenerationen immer mehr Metalle und schwere Elemente enthalten als ihre Vorfahren.

Eine Supernovaexplosion, beziehungsweise ihre Gasreste, bleiben für ca. 100'000 Jahre sichtbar, dann hat sich das Gas im Raum verteilt.

Dies ist die „klassische“ Weise, wie sich ein Stern aus seinem Leben verabschiedet. Doch man hat in den letzten Jahren ein neues, etwas anderes Phänomen entdeckt, welches bis heute noch nicht ganz geklärt ist. Man entdeckte einige Gamma Ray Bursts, die sekundenlang das All durchleuchteten, doch es folgte keine Supernovaexplosion darauf. Theorien besagen, dass, wenn der Stern eine gewisse Masse überschreitet, er direkt in ein Schwarzes Loch kollabiert, welches bekanntlich nicht einmal Licht aus seinem Gravitationsfeld entkommen lässt. Ergo gäbe es für uns auch nichts zu beobachten. Doch bewiesen ist dies nicht.

3.4 Überreste der Sternenleichen

Wir haben bis jetzt immer nur über eine Hälfte der Sternenleichen gesprochen, nämlich den verfestigten Kern, der sich entweder langsam auskühlt, als Neutronenstern noch weiter Licht emittieren. Noch nicht besprochen wurde das Schwarze Loch, doch dies hat auch einen Grund. Diese Objekte sind das mystischste und unfassbarste, was je existiert hat und je existieren wird. Sie stellen fast alles in Frage, was wir vor –und auch nach- ihrer Entdeckung über die Physik zu wissen glaubten. Doch dazu später mehr.

Obwohl es schon mehrfach erwähnt wurde: Diese Überreste sind keineswegs „Abfallprodukte“ oder ein paar schöne Bilder im Kosmos, sie bieten den Nährboden für neue Sterne und andere kosmische Objekte. Sie sind sogar essentiell und dringend notwendig für einige, für uns alltägliche Erscheinungen!

3.4.1 Planetarische Nebel

Wenden wir uns einer schönen Erscheinung zu, dem Nebenprodukt von einem sterbenden oder gestorbenen Stern. Wobei Nebenprodukt fast ein wenig abwertend klingt. Wir sprechen über Nebel. Doch die kosmischen Nebel unterscheiden sich grundlegend von denjenigen auf der Erde, obwohl auch diese ihre Schönheit besitzen.

Als erstes seien hier die Planetarischen Nebel erwähnt. Diese sind die wundervollsten Strukturen, die die Natur erschaffen hat. Dies zeigt sich unter anderem darin, dass sie eigentlich nicht mit Worten zu beschreiben sind. Ich kann nur empfehlen, neben den Bildern hier, einmal im Internet zu nach ihnen zu suchen. Doch das nur am Rande.

Nun, Planetarische Nebel entstehen, wenn massenarme Sterne anfangen ihr Leben auszuhauchen, also wenn ein Roter Riese seine äussere Gashülle abwirft. Daraus ergibt sich der Fakt, dass diese Nebel aus dem Gas der sterbenden Sterne. Die Gesamtmasse dieser Nebel beläuft sich auf etwa 0.2 bis 0.3 Sonnenmassen, die sich über einige Lichtjahre erstrecken können. Warum leuchten die Nebel überhaupt, und warum so farbenreich? Der 30‘000 bis 150‘000 Kelvin heisse Weisse Zwerg im Zentrum beleuchtet und bestrahlt die Gasatome und ionisiert sie durch die Ultraviolette Strahlung, was die Atome anregt. Die Farben entstehen dadurch, dass nicht nur Wasserstoff und Helium in diesen Nebeln enthalten sind, sondern auch andere Elementarstoffe wie Stickstoff, Kohlenstoff, Sauerstoff und weitere, in den Kernfusionsprozessen entstandene Materie. Dies ergibt ein breites Farbenspektrum.

Diese Wolken verharren natürlich nicht an Ort und Stelle. Sie dehnen sich mit ca. 25 Kilometer konzentrisch aus. Dies bedeutet, nach etwa 10‘000 Jahren hat sich die Dichte des Nebels so stark reduziert, dass sie nicht mehr sichtbar sind. Eine relativ kurze Zeit, danach erinnert nur noch der Zwerg an den ehemals gigantischen Stern, bis auch dieser erkaltet ist.

3.4.2 Supernovaeüberreste

Desweiteren gibt es da noch die Supernovae-Überreste. Auch hier bieten sich dem Auge geniale, einzigartige Gebilde aus Lichtspielen.

Diese Nebel sind Überreste einer Supernovaexplosion und damit noch farbenreicher, da sie noch weitere schwere Elemente enthalten. Zudem haben sie eine etwas andere Struktur, aufgrund der hohen Kräfte, die kurz zuvor bei der Explosion gewirkt haben. Hinzu kommt, dass die Schockwelle der Explosion in die Materie hineinrast und damit die Materie aufheizt und zum Leuchten bringt. Hinzu kommt der Pulsar im Zentrum, der durch seine extrem hochenergetischen Magnetfelder

und Strahlenkeulen Elektronen in die Nebel schiesst, welche die Atome noch weiter anregt.

Zu Anfang breitet sich der Nebel etwa 200 Jahre ungebremst mit 10‘000 Kilometern pro Sekunde aus. Nach dieser Zeit hat der Nebel einen Durchmesser von etwa 7 Lichtjahren erreicht. Die Wechselwirkung zwischen den Materieteilchen der Hülle und denen des interstellaren Mediums bremst die fortschreitende Ausdehnung allerdings zunehmend ab auf wenige 100 Kilometer pro Sekunde. Bis dahin sind etwa 100‘000 Jahre vergangen. In den darauf folgenden 100‘000 Jahren wird die Geschwindigkeit noch weiter verringert und zum Stehen gebracht, das heisst auf 10 Kilometer pro Sekunde, was auch der Geschwindigkeit des interstellaren Mediums entspricht. An diesem Punkt angelangt, verblasst das Gas allmählich und wird vom Medium absorbiert.

4. Sterntypen

Bei den bisherigen Ausführungen und Erklärungen sind die häufigsten Sterntypen und-arten schon mindestens einmal kurz erwähnt worden. Dennoch existieren noch weitere Formen der Gasbälle, die im Folgenden noch (einmal) kurz erläutert werden.

Sterne sind keine homogenen Masseansammlungen aus Wasserstoff und Helium, in denen in einer Ruhe und Stabilität die energetischen Fusionsprozesse ablaufen. Es herrschen fast unkontrollierbare Kräfte, und die wirken sich manchmal auch auf ihre Erscheinung aus. Dies sind sogenannte veränderliche Sterne. Diese werden wiederum in drei Kategorien unterteilt: Pulsierende Veränderliche, Bedeckungsveränderliche beziehungsweise Doppelsterne und eruptiv Veränderliche, welche ich später noch kurz erläutern werde

4.1 Einzelsterne

 Zunächst folgt diese ist eine kurze Aufzählung der häufigsten „einfachen“ Sterntypen, einige davon sollten Ihnen bekannt vorkommen.

4.1.1 Protostern

Dies ist eine Vorgruppe des Hauptreihensterns. Der Kern ist frisch kollabiert, schrumpft und sammelt nun immer mehr Materie aus dem ihm umgebenden stellaren Materie, bis der Kern eine Temperatur von 15 Millionen Kelvin erreicht hat, sodass die erste Stufe der Kernfusion zünden kann und zu den Hauptreihensterne gezählt wird.

4.1.2 Hauptreihenstern

Nach der Phase als Protostern befinden sich die meisten Sterne im normalen Lebensabschnitt je nach Masse länger oder kürzer auf der sogenannten Hauptreihe des Hertzpsrung-Russel-Diagramms (wenige Ausnahmen). Als normal wird hier die Phase der Kernfusion von Wasserstoff zu Helium bezeichnet, in welcher der Stern stabil ist. Wenn der Wasserstoff im Kern verbraucht ist, schert der Stern aus der Hauptreihe aus auf den sogenannten Riesen- oder Überriesenast.

4.1.3 Unterzwerge

Diese sind etwas leuchtschwächer als normale Hauptreihensterne und liegen deshalb im Diagramm etwas unter ihnen, werden aber dennoch dazu gezählt.

4.1.3.1 kühle Unterzwerge

Diese besitzen die Spektralklassen G, K und M, leuchten also rötlich bis gelb und sind damit ziemlich kühl auf ihrer Oberfläche (3000 Kelvin). Sie treten häufiger in den äussersten Bereichen der Milchstrasse auf, und werden aufgrund ihres mangels an schweren Elementen zu den Population-II Sternen gezählt.

#### **4.1.3.2 heisse Unterzwerge**

Wie der Name schon sagt, sind sie sehr verwandt mit den kühlen Unterzwergen, nur dass sie bläulich leuchten, also eine enorme Temperatur von 10‘000 bis 30‘000 Grad besitzen. Wie und woher diese Objekte kommen, ist noch nicht vollständig geklärt. Man vermutet, dass dies Sterne sind, die sich in der Heliumsfusionsphase befinden, jedoch ihre äussere Gashülle abgeworfen haben.

#### **4.1.4 Roter Zwerg**

Zu dieser Gattung zählen Sterne bis ca. 0.8 Sonnenmassen. Sie besitzen die Spektralklassen K oder M, leuchten also rötlich und im infraroten Bereich und sind ziemlich kühl bis auf spontane Energieausbrüche. Sie sind aufgrund ihrer sehr geringen absoluten Helligkeit nicht oder nur sehr schwer mit einem Teleskop zu beobachten. Aufgrund ihrer Grösse haben sie eine extrem hohe Lebenserwartung von ca. 20 Milliarden bis 1 Billion Jahre. Also älter als unser Universum, ergo ist bis jetzt noch *kein* roter Zwerg gestorben. Laut den Berechnungen sind sie zu klein, um Helium fusionieren zu können, daher werden sie sehr wahrscheinlich direkt als Weisse Zwerge langsam ausglühen und schliesslich als Schwarzer Zwerg im All verbleiben.

4.1.5 Gelber Zwerg

Zu dieser Kategorie gehört auch unsere Sonne. Es sind Sterne der Hauptreihe von 0.8 bis 1.2 Sonnenmassen, besitzen die Spektralklasse G, leuchten also gelb und besitzen eine Oberflächentemperatur von 5000 bis 6000 Kelvin.

4.1.6 Blauer Riese

Blaue Riesen befinden sich im Gegensatz zu den Roten Riesen auf der Hauptsternreihe, befinden sich also im normalen Lebensabschnitt eines Sterns, wandeln also anders als ihre Namensverwandten immer noch Wasserstoff in Helium um. Ihre blaue Farbe rührt von den extremen Oberflächentemperaturen von 10‘000 bis 50‘000 Kelvin her, sind also dementsprechend sehr massereich (Spektralklasse B bis O)

Demensprechend hoch ist sein Energieverbrauch und seine Lebenserwartung meist unter 1 Milliarde Jahren. Dann entwickelt er sich zu einem Gelben und schliesslich zu einem Roten Riesen weiter.

4.1.7 Gelber Riese

Diese sind eine Zwischenform von Sternen, die sich langsam zu Roten Riesen entwickeln. Sobald Massereichere Sterne wie die Sonne und Blaue Riesen ihren Wasserstoffvorrat verbraucht haben, dehnen sie sich langsam aus und kühlen an ihrer Oberfläche langsam ab. Dabei leuchten sie gelb und sind der Erscheinung unserer Sonne sehr ähnlich, aber deutlich grösser. Sie befinden sich nicht mehr auf der Hauptreihe, sondern zwischen dieser und dem Riesenast, auf welchem sich die Gelben Riesen zu Roten Riesen entwickeln.

4.1.8 Roter Riese

Diese uns altbekannten Phänomene müssen nicht mehr gross vorgestellt werden. Sterne, die ihren Lebensabend erreichen, also ihren Wasserstoff verbraucht haben, entwickeln sich zu Roten Riesen, indem der Kern komprimiert und die Heliumfusion gestartet wird. Dabei dehnt sich der Stern aus, die Oberfläche kühlt ab und emittiert dabei rotes Licht und Infrarot.

#### **4.1.8.1 Roter Überriese**

Dies ist eine Untergruppe der Roten Riesen. Sie sind extrem massereich und noch einmal um einiges grösser als der Rote Riese. Ihre Durchmesser würden, wenn sie an der Stelle unserer Sonne wären, über die Mars- bis hin zur Jupiterbahn reichen. Sie sind so schwer, dass in ihrem Kern schwerere Elemente wie Helium erzeugt werden. Aus ihnen können Neutronensterne entstehen.

4.1.9 Hyperriese

Dies ist eine extrem seltene Form von stellaren Objekten. Sie besitzen bis zu 100 Sonnenmassen und sind damit die massivsten Sterne die man kennt. Ihre Leuchkraft übertrifft diese der Sonne um Faktoren von 100‘000 bis Millionenfach. Sie leben nur extrem kurz (1-2 Millionen Jahre) und sind auch nicht sehr stabil.

Es gibt blaue, gelbe und rote Hyperriesen, je nach Oberflächentemperatur. Man vermutet, dass extrem massereiche Sterne sich zu ihrem Lebensende hin zu einem Hyperriesen entwickeln. Der hellste und massereichste Stern ist ein Objekt mit dem schönen Namen R136a1. Er hat eine Oberflächentemperatur von ca 40‘000 Kelvin, leuchtet 10 Millionen mal heller als die Sonne und besitzt eine Masse von 260 Sonnenmassen. Dies ist fast das Maximum an Masse, die ein Stern haben kann, ohne instabil zu werden, da der Strahlendruck sonst zu hoch wäre.

Eine weitere Eigenheit dieser Sterntyps stellt die Tatsache dar, dass er nicht zu einem Roten Riesen mutiert, sondern als Leuchtstarke Blaue Veränderliche seinen Lebensabend verbringt. Dies dauert ungefähr 10‘000 Jahre. Dann explodieren diese Giganten in einer Supernova oder einer Hypernova. Letztere ist allerdings noch nie beobachtet worden und stellt ein theoretisches Modell dar, wobei ein Kern direkt zu einem schwarzen Loch kollabiert.

4.1.10 Weisser Zwerg

Weisse Zwerge beschreiben die Endphase eines massearmen Sterns, der seine gesamten Wasserstoff- und Heliumvorrat verbraucht hat. Sie sind etwa so gross wie die Erde und besitzen eine Oberflächentemperatur von 8‘000 bis 50‘000 Kelvin. Doch durch ihre geringe Grösse sind sie relativ leuchtschwach. Auch unsere Sonne wird einmal ein Weisse Zwerg sein.

Sie entstehen, wenn der Rote Riese seine äusseren Hüllen in das All abwirft und somit nur noch der Kern, der Weisse Zwerg, übrig bleibt. Dieser hat eine enorme Dichte: 1 Kubikzentimeter würde hier 1 Tonne wiegen.

4.1.11 Brauner Zwerg

Dies ist eine spezielle Form eines kosmischen Objektes. Es stellt nämlich eine Mittelklasse zwischen Planet und Stern dar. Liegt die Masse eines Protosterns unter 0.1 Sonnenmassen, reicht die innere Kerntemperatur nicht aus, um Wasserstoff zu fusionieren. Stattdessen laufen nur energetisch schwache Fusionen im Kern ab, wie die Lithium- und die Deuteriumfusion. Das Ergebnis ist ein schwach rötliche glimmender Stern: ein Brauner Zwerg

4.1.12 Neutronensterne

Neutronensterne sind wie schon erwähnt Sternenleichen von massereichen Sternen von ursprünglich 8-30 Sonnenmassen. Kleinere Sterne werden zu Weissen Zwergen, grössere kollabieren zu einem stellaren Schwarzen Loch. Anders ausgedrückt: Bleibt nach der Supernovaexplosion ein Kern mit der Masse >3 Sonnenmassen zurück, kollabiert dieser zu einem stellaren Schwarzen Loch.

Man hat versucht, herauszufinden, wie es in einem solchen Neutronenstern aussieht, und dies ist nicht einfach. Die Materie ist so dicht komprimiert, sodass ein Kubikzentimeter dieser Materie rund 100 Millionen Tonnen wiegt.

Der Netronenstern ist etwa 10 Kilometer gross, also geringfügig grösser als die Erde. Alle weitere Angaben sind absolut ohne Gewähr, denn solche Umstände können nicht künstlich erzeugt werden. Sie widersprechen jeglichen Gegebenheiten der „klassischen“ Physik. Es sind Ergebnisse von Modellrechnungen, die *höchstwahrscheinlich* stimmen.

Die Kruste besteht aus Eisen-, Nickel- und Kryptonatomen, sowie einem entarteten Elektronengas, wie wir es bereits kennen. Stösst man in den Kern des Neutronensterns vor, werden die Atome immer neutronenreicher und bilden zusammen mit Elektronen und Protonen eine Art Flüssigkeit. Eigentlich müssten Neutronen innhalb von etwa 900 Sekunden um die Hälfte zerfallen sein (Halbwertszeit 900s), doch die beim Zerfall frei werdende Elektronen finden keine freien Quantenzellen mehr. Also können die Neutronen nicht zerfallen. Und damit haben wir auch den Grund für die Stabilität der Sterne gefunden: Erneut greift hier das Pauli-Prinzip. Der Kern des Neutronensterns, also eigentlich der Kern eines Kerns, besteht (spekuliert) aussen aus Elektronen, superfluide Neutronen und Protonen. Als superfluid werden Flüssigkeiten ohne Reibungskoeffizienten bezeichnet. Der innere Kern könnte aus einem Kristallgitter aus Neutronen bestehen, oder aber es ist möglich, dass die Neutronen dort in ihre Bestandteile aufgelöst wurden. Dies würde bedeuten, dass dort freie Quarks existieren. Man hat Objekte gefunden, bei denen dies wirklich der Fall sein könnte: Dass die Neutronensterne so stark komprimiert wurden, dass die meisten Neutronen zerfallen und die freien Quarks der Materie eine stellare Form bilden. Dies würde eine weitere Zwischenform zu einem Schwarzen Loch hin darstellen.

4.1.12.1 Pulsare

Neben ihrer sehr fremdartigen Materie, was sie für Astronomen sehr interessant gestaltet, besitzen viele Neutronensterne eine weitere Eigenschaft, welche ihnen den Namen „Pulsare“ eingebracht hat. Ein wenig irreführend dieser Name, da die Sternenleiche an sich nicht pulsiert wie z.B. die Cepheiden oder andere Pulsierende Veränderliche (zu denen kommen wir später). Die Neutronensterne produzieren eine elektromagnetische Strahlung, die in Form von Impulsen auf der Erde ankommen.

Durch die Verdichtung der Materie entsteht ein gewaltiges Magnetfeld von bis zu 1000 Gauss. Als Vergleich: Unsere Sonne besitzt gerade mal 1 Gauss. Zudem dreht sich der Stern immer schneller, aufgrund der Erhaltungsgrösse des Drehimpulses. Der Kern schrumpft, das heisst der Radius wird kleiner, dementsprechend dreht das Objekt schneller. Gut zu sehen bei dem schon einmal beschriebenen Experiment, indem die Arme bei einer Drehung eingezogen werden.

Also haben wir hier ein Objekt mit magnetischen Dipolen hoher Feldstärke und schneller Rotation. Interessanterweise fällt die Rotationsachse nicht mit der Magnetfeldachse zusammen. Stattdessen liegen Polkappen (der Ort, an dem die Feldlinien senkrecht aus dem Stern schiessen), leicht schief zur Rotationsachse. Und an diesen Polkappen werden durch die enormen magnetischen Kräfte Elektronen aus dem Stern gerissen und stark beschleunigt. Damit entsteht an beiden Polkappen eine sogenannte elektromagnetische Keule. Wenn ein Pulsar nun richtig ausgerichtet ist, streift eine solche Keule die Erde, und wir können diese Radiosignale empfangen und messen, welche mit einer erstaunlichen periodischen Präzision bei uns ankommen. Pro Umdrehung des Sterns entsteht ein Impuls. Dreht sich ein Pulsar also 10mal in der Sekunde, registrieren wir 10 Impulse pro Sekunde auf der Erde. Viele solcher Pulsare drehen sich im Bereich bis zu 3 Sekunden um die eigene Achse.

[BILD NEUTRONENS/PLUSAR STERNSCHEMA]

4.2 Pulsierende Veränderliche

Diesen Sterntypen sind wir teils schon begegnet. Zum Beispiel den Cepheiden und die RR-Lyrae-Sterne. Diese pulsieren aufgrund der Temperatur und Druckschwankungen im Kern, sobald das Heliumbrennen einsetzt, dabei ändert sich die Helligkeit stetig. Doch es gibt noch weitere Vertreter dieser Gruppe.

Zum Beispiel die δ-Scuti-Sterne. Diese haben eine ungewöhnlich kurze Periode: Innerhalb weniger Stunden ändern sie stetig ihre Helligkeit. Sie werden auch als Zwerg-Cepheiden bezeichnet, da sie schwächer leuchten als die RR-Lyrae-Sterne.

Auf der anderen Seite stehen da die Mira-Sterne. Diese haben nicht nur eine grosse Spannweite, was die Helligkeitsänderung betrifft, sondern besitzen auch eine hohe Periodendauer: In 100-1000 Tagen kann sich die Helligkeit um den Faktor 500 verändern. Die Leuchtkraft wird dabei kaum von der Oberflächentemperatur, sondern von der Grösse beeinflusst. Mira Sterne stehen kurz vor dem Abwurf ihrer Sternhülle und somit vor ihrem Schicksal als Weisser Zwerg in einem Planetarischen Nebel langsam auszukühlen. Dies sind die häufigsten Vertreter. Nebenbei gibt es noch weitere Sterne, diese unterscheiden sich einfach in Leuchtraftfaktor und Periodendauer. Natürlich gibt es auch noch Sterne, die halbregelmässig und unregelmässig pulsieren, deren speziellen Eigenschaften lassen sich bequem aus deren Namen ableiten.

4.3 Doppelsterne

Sterne sind nicht immer alleine unterwegs, sondern haben manchmal einen Partner, mit welchem sie sich gemeinsam umkreisen. Einer unserer nächsten Sterne, Proxima Centauri ist zum Beispiel so ein Doppelsternsystem.

Es gibt 2 Möglichkeiten, dass solche Doppelsterne entstehen. Am häufigsten geschieht dies in der Phase im Interstellaren Medium, als sich die ersten Masseverdichtungen zeigten und sich die Wolke fragmentierte. Wenn nun zwei dieser verdichteten Wolkenfragmente sich ziemlich nahe stehen, befinden sich die Sterne nach dem Kollaps direkt im Gravitationsfeld des anderen und sind somit aneinander gebunden.

Die zweite Möglichkeit besteht darin, dass ein Stern sich während seines Lebens einen Partner einfängt. Dafür ist jedoch noch ein dritter Stern nötig, der einen der beiden Sterne so stark abbremst, dass dieser nicht aus dem Gravitationsfeld des ersten entkommen kann. Doch die Anwesenheit von 3 Sternen auf so kleinem Raum ist sehr selten.

Einige dieser Doppelsternsysteme sind gut mit einem Fernrohr zu erkennen, andere brauchen Instrumente, die Spektralunterschiede wahrnehmen können, denn manchmal sind die Stern zu nah zueinander oder verdecken sich gegenseitig während der Umkreisung.

4.4 Eruptive Veränderliche

Das Schauspiel dieser Himmelphänomene ist sehr imposant, geradezu fantastisch. Es sind Erscheinungen gewaltigen Energieausbruchs. Zu ihnen zählen Supernovae, die damit ihr Leben beenden. Eine weitere Gruppe sind die Novae und Zwergnovae, die als Doppelsternsystem auftreten. Sie stehen sehr nahe zu einander, sodass der gravitationsstärkere dem schwächeren Materie abzieht und selbst aneignet, und damit die Umgebung mit gleissendem Licht erfüllt. Als letzte Gruppe kann man noch die R-Corona-Borealis Sterne nennen.

4.4.1 Supernova Typ Ia

Supernovae des Typs II sind uns schon einmal begegnet, doch es gibt noch andere Erscheinungsformen. Für den Typ II sind immer Einzelsterne Vorläufer, für Typ Ia jedoch werden Doppelsternsysteme benötigt. Dieses muss so eng sein, dass sich die beiden Objekte auf einem gemeinsamen Gravitationsfeld umkreisen, dem sogenannten Roche-Potenzial. Um den Prozess besser veranschaulichen zu können nennen wir die beiden jetzt Stern 1 und Stern 2.

Nehmen wir weiter an, Stern 2 ist massereicher und daher schon schneller am Ende seines Lebenszyklus. Er ist ein Weisser Zwerg, während Stern 1 immer sich immer noch auf der Hauptreihe befindet. Dieser dehnt sich langsam zu einem Roten Riesen aus. Dabei kommt er dem Weisse Zwerg so nahe, sodass Materie am sogenannten Lagrange-Punkt von der äusseren Gashülle auf den zweiten Stern überströmen kann, welcher sich diese Materie zuerst in einer Akkretionsscheibe und schlussendlich aneignet und ihn wachsen lässt. Sobald er die kritische Masse von 1.44 Sonnenmassen überschritten hat, zündet durch den inneren Druck der Heliumfusionsprozess. Aber der entartete Kern wird durch den Fermi-Druck stabilisiert, also dehnt er sich nicht aus und schrumpft auch nicht. Die innere Temperatur wird immer grösser und weitere Fusionsprozesse zünden, bis der Druck zu hoch wird und der Weisse Zwerg als Supernova des Typ Ia zerfetzt wird.

4.4.2 Novae und Zwergnovae

Es spielt sich sehr vieles ähnlich ab wie bei der Supernova Typ Ia. Nur ist zuerst einmal alles um einiges kleiner, aber die Ausgangssituation bleibt die Selbe. Zwei umkreisende stellare Objekte, der eine ein Roter Riese, der andere ein Weisser Zwerg. Materie des Roten Riesen strömt auf den Weissen Zwerg durch den Latrange-Punkt über, welcher sich die Materie aneignet. Bis hierhin geschieht genau das selbe. Doch nun, bevor der Weisse Zwerg die kritische Masse von 1.44 Sonnenmassen überschreitet, zündet explosionsartig das Wasserstoffbrennen, was den Stern um 500‘000 bis 1 Million mal heller als unsere Sonne strahlen lässt. Dabei sprengt er alle noch verbliebenen Gashüllen mit mehreren Tausend Kilometern ab. Ein weiterer essentieller Unterschied: Der Weisse Zwerg bleibt dabei aber bestehen, geht also nicht in den frühen Sternentod. Dies bedeutet, dass dieses Ereignis sich einige Male wiederholen lässt.

Dieser Prozess funktioniert auch, wenn anstatt des Weissen Zwergs ein Stern des Spektraltyps O (also ein blauer und heisser Stern), als Gegenpart zum Roten Riesen steht. Technisch bleibt alles beim Alten.

Genauso bei den Zwergnovae. Bei diesem Phänomen spielt sich nochmals alles eine Runde kleiner ab. Allerdings steigt die Helligkeit des Zwergsterns nur um das höchstens 250-fache. Dies reicht nicht aus, um weitere Kernfusionsprozesse zu zünden. Die Masse- und Energieausbrüche stammen von Instabilitäten in der Akkretionsscheibe, welche einen erhöhten Massetransport zur Folge haben. Die dabei freigewordene Gravitationsenergie verhilft dem Stern zu seinen Energieschüben.

4.4.3 R-Corona-Borealis-Sterne

Diese verhalten sich ganz anders als „normale“ Eruptive Veränderliche, weshalb sie hier gesondert erwähnt werden. Normalerweise sind Eruptive Veränderliche durch kurze, heftige Energieausbrüche und Helligkeitssteigerungen charakterisiert sind, ist bei den Corona-Borealis-Sternen genau das Gegenteil der Fall. Nach monate- oder jahrerlangen konstanter Leuchtkraft, stürzt die Leistung binnen weniger Tage um mehrere Stufen. In der darauf folgenden Zeit erholt sich der Stern wieder zur alten Leistung.

Diese seltsame Verhaltensweise geht darauf zurück, dass diese R-Corona-Borealis Sterne keine direkten Eruptive Sterne an sich sind. Sie selbst erfahren *keine* Leistungseinbrüche. Nun zur Erklärung:
Diese Sterne sind Rote Riesen, die in ihrer Hülle allerdings weniger Wasserstoff, dafür umso mehr Stickstoff und Kohlenstoff enthalten. Diese werden manchmal –eben doch eruptiv, dehalb werden sie auch so genannt- ausgestossen. Im kalten Weltraum erstarren die Kohlenstoffpartikel zu einem dunklen Nebel oder Schleier um den Stern herum und schlucken somit viel Licht und „dimmen“ so den Stern. Durch die starke Strahlenemissionen und –winde wird die Kohlenstoffwolke doch wieder weggeblasen und der Stern erstrahlt in alter Grösse.

 4.5 Schwarze Löcher

Es war nicht einfach zu entscheiden, unter welchen Themenbereich diese Phänomene fallen. Nicht nur, dass es einfach ist, mit diesem Thema ganze Bücher zu füllen, sondern hinzu kommt noch die fremdartige Verhaltensweise, die mit nichts zu vergleichen ist. Diese Eigenschaften macht sie für viele Astronomen und Astrophysiker für die brisantesten Objekte. Allerdings machen es eben genaus diese Charakteristika auch schwierig, sie zu erforschen und zu verstehen. Ich würde gerne auf die gängigsten Theorien genau eingehen, doch dies würde den Rahmen dieser Arbeit weit sprengen. Eins zuerst vorweg: Hier befinden wir uns in einem Bereich der reinen Mathematik und theoretischen Physik. Sehr viele Erkenntnisse basieren auf Modellrechnungen, die auf der Physik basieren, die wir kennen und als „richtig“ erachten plus einigen unbewiesenen Theorien wie der Stringtheorie. Doch bis zu diesem Zeitpunkt scheinen alle Ergebnisse ziemlich gut zusammen zu passen.

Grundsätzlich sind Schwarze Löcher Sternenleichen von extrem massereichen Sternen, die in einer Super- oder Hypernova kollabiert sind. Sie sind so massiv, dass nicht einmal Licht ihrem direkten inneren Gravitationsfeld, dem Ereignishorizont (erscheint als der schwarze Ring), entkommen kann. Daher lassen sie sich nicht direkt beobachten, denn wir können nur wahrnehmen, was Informationen in Form von verschiedenen Wellen emittiert. Dies bei einem Schwarzen Loch nicht der Fall, sondern das totale Gegenteil. Es strahlt nichts ab, es absorbiert alles. Sie besitzen manchmal eine Scheibe aus Licht, die wie ein Ring um den Kern zirkuliert, bevor es in den äusseren Ereignishorizont fällt. Überschreitet irgendein Teilchen die Grenze dieses Ereignishorizonts, gibt es kein Zurück mehr. Es verschwindet in… Naja, eigentlich weiss niemand so wirklich genau, wohin die ganze Materie verschwindet und was mit ihr geschieht.

Doch besser erst einmal ganz von vorne:
Schwarze Löcher sind –vereinfacht gesagt- eine extremere Form von Neutronensternen und Quarksternen. Sie entstehen dann, wenn entweder zwei oder mehr Neutronensterne sich verbinden oder der Rote Riese schon von Anfang an so massereich ist, dass der Kern nach der Supernovaexplosion nicht stabil bleiben kann, also der Pauli-Druck nicht ausreicht, sondern der Materiekollaps der Neutronen immer weiter voranschreitet, bis die gesamte Materie auf einem einzelnen Punkt, auf einer Nadelspitze, zusammenkomprimiert ist. Wir kennen mittlerweile viele solcher Löcher, doch die meisten sind relativ klein mit wenigen Sonnenmassen. Doch in den Zentren der Galaxien, auch in unserer, befindet sich ein supermassives Schwarzes Loch von einer Masse mit 4.31 Millionen Sonnenmassen, komprimiert auf einen Punkt! Das Ergebnis sind Kräfte, die sich über die Grösse unseres gesamten Sonnensystems erstrecken. Der Raum und die Zeit selbst können innerhalb des Ereignishorizonts herrschenden Kräften nicht trotzen. Im Zentrum des Schwarzen Lochs gibt es keine Zeit, kein Raum. Jedenfalls sicherlich nicht so, wie wir es kennen. Diese sind ineinander verknüpft und verdreht und ab einem gewissen Punkt eben nicht mehr existent.

Doch wie können wir von etwas wissen, was augenscheinlich nicht da ist? Man kann ihren Fussabdruck erkennen, ihre Auswirkungen auf die direkte Umgebung:

Das Gas oder allgemein Materie, die in die Nähe dieses Lochs gerät wird immer mehr beschleunigt, fast auf Lichtgeschwindigkeit. Dabei erhitzt sie sich stark, und emittiert Strahlung vor allem im UV- und Röntgenbereich. Diesen „Todesschrei“ der Materie, bevor sie den Ereignishorizont übertritt und nie mehr gesehen wird, kann man mit entsprechenden Radioteleskopen messen und analysieren.

Ihre physikalischen Auswirkungen sind noch weit grösser als erste Beobachtungen hätten vermuten lassen.

Einstein beschrieb als erster eine theoretische Form der Schwarzen Löcher in seiner Allgemeinen Relativitätstheorie, doch er war der festen Überzeugung, dass solche stellaren Monster nicht existieren würden. Es darf sie nicht geben, eine solche zerstörerische Kraft darf nicht existent sein. Nur weil etwas existieren *kann*, heisst das nicht, dass es auch existiert. Nun, in diesem Fall existiert das Unvorstellbare. Diese Objekte sind so massiv, dass der Raum nicht nur einfach gekrümmt, sondern wie ein Wasserfall trichterförmig in die Tiefe stürzt. Das Ergebnis ist, dass, je näher man einem Schwarzen Loch kommt, die Zeit immer langsamer vergeht. Das heisst: Würde sich ein bemanntes Raumschiff sich dem Ereignishorizont nähern, würde die Zeit immer langsamer vergehen. Würde es dann zu der Erde zurückkehren wären für sie nur einige Stunden vergangen, während es auf der Erde mehrere Jahre wären. Würden sie sich allerdings dem Ereignishorizont immer weiter nähern, würde das Raumschiff und auch die Mannschaft selber immer länger gezogen, wie Spaghetti. Bis die Materie auseinandergerissen und vollkommen zerstört wird. Obwohl, nicht ganz: Sie wird komplett in Energie umgewandelt. Hier kommt Einsteins berühmte Formel zu Einsatz: E = m \* c2 . Das sind enorme Energien, die sich in Form von Jets ins All strahlen können. Ist dies der Fall, wird dieses kosmische Gebilde „Quasar“ genannt. Die Energie und Leuchtkraft übertrifft die der Sonne um das mehrere Milliardenfache.

Der Fakt, dass der Raum trichterförmig ins Bodenlose stürzt, hat eine Welle von Theorien losgetreten, die interessanterweise Ansatzweise erklärt werden können, auch wenn sie unfassbar klingen. Die Annahmen dafür sind zwar reine Theorie, und wir werden wahrscheinlich auch nie ihre Richtigkeit verifizieren können, doch allein die Vorstellungen, dass diese Löcher ein Tor zu einem Paralleluniversum darstellen könnten, sind fantastisch. Oder aber sie sind Wurmlöcher; Löcher in der Zeit, wobei man beim Passieren dieses Lochs in einer anderen Zeit und/oder Dimension herauskommt.

Desweiteren zeigen einige Berechnungen, dass in einem Schwarzen Loch höhere Geschwindigkeiten herrschen können als die Lichtgeschwindigkeit. Falls dies zuträfe, würde dies die ganze Physik neu definieren.

Die letzte Frage wäre noch: Wie können diese Löcher wachsen, wenn doch alle Materie zerstört wird? Die gesichertste Methode ist diejenige, dass, wenn zwei Galaxien kollidieren, sich die zentralen Schwarzen Löcher gegenseitig einfangen und fusionieren, wobei die Massen sich addieren. So wird es auch der Milchstrasse und ihrer Nachbargalaxie Andromeda ergehen, in etwa 5 Milliarden Jahren.

Das war jetzt viel Information auf einmal, deshalb noch einmal eine kurze Zusammenfassung über das Wesen der kosmischen Monster:
Sie sind Sternenleichen extrem massereicher Sterne mit einem enormen Gravitationsfeld, welches nichts entkommen lässt, nicht einmal Licht. Dabei wird Materie und Partikel in reine Energie umgewandelt. Sie krümmen Raum und Zeit ins unvorstellbare Chaos, aber eröffnen dabei das Tor zu fantastischen Theorien und Vorstellungen.

5. Vergleich der Lebenslinien eines Sterns und eines Menschenlebens

Abschliessend für dieses Dokument, um eine bessere Übersicht über das Zeitgeschehen zu erhalten, wäre doch ein Vergleich des Lebens von unserer Sonne zu einem Menschenleben interessant. Damit fasse ich auch die essentiellen Punkte des Sternenlebens und daher auch die Arbeit zusammen.

Wir haben zuerst Interstellares Medium, welches sich zu einer Wolke aus hauptsächlich Wasserstoff und Helium mit einigen Anteilen an Metallen verdichtet. Zwecks der Abkühlung und der damit verbundenen Überwindung der verschiedenen Kräfte, die sich von innen gegen aussen gegen einen Kollaps wehren, fragmentiert die Wolke und strahlt Energie ab. Dabei entstehen Ballungszentren von Materie, die immer mehr Masse anziehen und annektieren. Es bildet sich ein fester Kern, der beständig schneller wächst. Die ihn umgebende Materie wird durch den Drehimpuls senkrecht zur Rotationsachse des Kerns zu einer Protostellaren Scheibe abgeflacht. Das Vorstadium, der Protostern ist erreicht.

Bei der menschlichen Entwicklung wäre analog dazu eine Eizelle befruchtet worden und die Zellteilung hätte begonnen. Diese wäre so lange vorangeschritten, bis wir nun den fertig entwickelten Embryo hätten und der Geburtsvorgang eingeleitet wird.

Unser Protostern hat nun so lange Masse angesammelt, sodass Druck und Temperatur in extreme Bereiche gestiegen sind. Bei 15 Millionen Kelvin zündet der erste thermonukleare Fusionsprozess. Dabei wird Wasserstoff zu Helium fusioniert, was grosse Energien freisetzt. Bei diesem „Knall“ entstehen die Planeten aus der Protostellaren Scheibe.

Diese Stadien sind schwer zu vergleichen. Der Säugling ist nun auf der Welt, aber auch bei ihm wurde sozusagen der Funken des Lebens entfacht, eine grosse Hürde wurde mit seiner Geburt bewältigt. Er fängt an, schnell zu wachsen.

Auch die junge Sonne, die immer noch von einer grossen, flachen Scheibe aus Nebel umgeben ist, wächst weiter und schneller voran, bis fast sämtliche Materie, die ihren Gravitationsfeld nicht entkommen kann, von ihr aufgenommen wird. Sie ist nun voll entwickelt, befindet sich im hydrostatischen Gleichgewicht und strahlt ziemlich konstant Energie in Form von Lichtwellen in den Raum. Er ist nun ein Stern der Hauptreihe. Die Planeten haben sich auf ihrer jeweiligen Bahn eingependelt.

Der Säugling ist mittlerweile zu einem ausgewachsenen Menschen herangewachsen und befindet sich in der Blüte seines Lebens und kann sich an diesem und seiner Gesundheit erfreuen.

Doch langsam geht unserer Sonne der Wasserstoff aus. Der Kern schrumpft. Dabei wird der innere Druck und somit die Temperatur der Kerns erhöht. So lange, bis der Heliumfusionsprozess gestartet wird. Dabei wird Helium in Kohlenstoff umgewandelt. Wasserstoff wird, so lange noch vorhanden, in einem Schalenbrennen weiter zu Helium fusioniert, welches weiteren Brennstoff für den Kern liefert. Die Sonne hat nun das stolze Alter von ca. 9.5 Milliarden Jahren erreicht.

Während der Kern schrumpft, fängt die Oberfläche der Sonne an, sich langsam auszudehnen. Ein Gelber Riese entsteht, der die ersten Planeten verschlucken wird. Die Sonne verlässt die nun die Hauptreihe auf dem Riesenast.

Werden auch die Heliumressourcen knapp, zieht sich der Kern weiter zusammen und die Oberfläche dehnt sich weiter aus und kühlt dabei ab. Die Sonne dehnt sich zu einem Roten Riesen aus und verschluckt nun alle Planeten bis hin zum Mars. Sie hat nun das Alter von etwa 10.7 Milliarden Jahren.

Äquivalent befindet sich auch unser Mensch langsam aber sicher auf dem Weg zu seinem Lebensabend. Seine junge und wilde Zeit hat er schon ein Weilchen hinter sich,

es geht in seine 60iger Jahre. Er geht seiner Arbeit weiter gewissenhaft nach, doch nicht mehr mit der gleichen Energie und Elan wie früher.

Der Rote Riese muss auf immer mehr seiner potenziellen Energie zurückgreifen, der Kern schrumpft weiter und sein Energiehaushalt gerät etwas aus dem Gleichgewicht und er beginnt zu kontrahieren.

Der Kern kann dem immer stärkeren Druck, der auf ihn ausgeübt wird, nicht mehr standhalten und kollabiert schlagartig in einer Supernova. Dabei wird ein Impuls frei, welcher die Gashülle um ihn herum abwirft. Die Kernfusion ist erloschen. Ein Weisser Zwerg ist entstanden. Dennoch leuchtet er noch einige Jahre, bis er langsam aber sicher in den Weiten des Alls zu einem Schwarzen Zwerg ausgekühlt ist.

Wir befinden uns nun am Lebensabend unseres Menschen. Ein paar körperliche Gebrechen, die aber keine schwerwiegenden Probleme darstellen und schlichtweg auf das Alter zurückzuführen sind. Er kann einige Jahre noch geniessen, bis immer grössere gesundheitliche Probleme auftreten. Die Lebensenergie schwindet langsam aber sicher, bis er schliesslich sein Leben langsam ausklingen lässt.

6. Fragen zum Text

The Big Bang

1. Worin besteht die aktuelle Theorie des Urknalls? Beschreiben Sie den Prozess mit Stichpunkten.
2. Was macht die Theorie des Urknalls so schwierig zu beweisen?
3. Wie nahe (zeitlich) können wir theoretisch an das Ereignis des Urknall herantreten uns belegbare Fakten sammeln? Und weshalb bis zu diesem Zeitpunkt?
4. Beschreibe den Zustand der Ursuppe gemäss der erwähnten Theorie im Skript und gehe auf folgende Punkte ein: Was für Probleme und Schwierigkeiten stellen sich bei dieser Theorie? Was macht die diese Theorie nicht oder kaum begreifbar für unseren Verstand?
5. Wie alt ist unser Universum jetzt?

Erste Fakten zu den Sternen

1. Worin bestehen die typischen Charakteristika des allgemeinen Sterns und wie unterscheidet er sich damit von anderen kosmischen Objekten? Greifen Sie dabei auf ihr gesamtes Wissen zurück, beschreiben Sie sowohl die Differenzierung der Sterne von blossem Auge, also auch diejenige der physikalischen Eigenschaften.
2. Was für einen Massenanteil hat die Sonne in unserem Sonnensystem?
3. Sie wissen, dass die Sonne eine enorme Gravitationskraft besitzt. Warum bleiben die Planeten konstant auf ihren Bahnen?
4. Sterne scheinen an unserem Firmament in verschiedenen Farben zu funkeln. Wechseln sie wirklich ständig ihre Farbe oder warum erscheint uns dies auf der Erde so?
5. Beschreiben und erklären Sie, wie das Hertzsprung-Russel-Diagramm zu lesen und zu verstehen ist. Was für Informationen kann man ablesen? (siehe Abbildung rechts)
6. Worin bestehen die Schwächen des Diagramms? Was sind die Stärken?
7. Folgender Wert von einem stellaren Objekt ist gegeben: Spektralklasse O.
8. Arbeiten Sie alle möglichen Informationen anhand des -Russel-Diagramms heraus.

Sternentstehung

1. Wo können Sterne überhaupt entstehen? Was für Voraussetzungen müssen gegeben sein?
2. Benennen Sie ein noch aktives Sternentstehungsgebiet. Wie alt und wie gross ist es?
3. Definieren Sie folgende Begriffe: Interstellares Medium, thermonukleare Fusion, Protostern.
4. Was unterscheidet den Protostern vom „ausgewachsenen“ Stern?
5. Wie produziert der Stern seine Energie, um für mehrere Millionen bis Milliarden Jahre konstant hell zu leuchten?
6. Was ist das hydrostatische Gleichgewicht und welche Kräfte spielen dabei eine Rolle?
7. Was sind Population-III-Sterne und wodurch zeichnen sich diese aus?
8. Entstehen heute noch Population-III-Sterne mehr? Wenn nicht, warum?
9. Inwiefern spielen Population-III-Sterne immer noch eine nachhaltige Rolle im heutigen Kosmos?
10. Erläutern Sie in Stichworten die Entstehung eines typischen Sterns. Gehen Sie dabei auch auf die grössten Probleme ein, die die Entstehung verhindern könnten, und wie sie umgangen werden. Zeichnen Sie gegebenenfalls eine Skizze.

Lebensphase der Sterne

1. Was für Voraussetzungen müssen gegeben sein, dass eine Kernfusion zündet?
2. Beschreiben Sie in Stichworten und einer Skizze die beiden Arten der Kernfusion.
3. Wann kommt welche Kernfusionsart bevorzugt zum Einsatz? Warum?
4. Die Coulomb-Kräfte zwischen den Atomen sind ja enorm, und es wäre eine sehr hohe Menge an Energie nötig, um diese „traditionell“ zu überwinden. Wie gelingt es aber dennoch, dass der Coulomb-Wall überwunden wird? Gelingt dies häufig?
5. Wir wissen, die Kernfusion ist das Herz der Sterne. Durch sie gewinnt er Energie. Doch wie genau ist dies der Fall? Woher kommt diese Energie?
6. Wie wirken sich die verschiedenen Kernfusionsphasen auf den Phänotyp des Sterns aus?
7. Was versteht man unter dem sogenannten „Schalenbrennen“? Wie weit kann diese gehen und wovon hängt diese ab?
8. Was ist das wichtigste Merkmal zur Differenzierung? Nennen Sie die Klassen!
9. Wie sehen mögliche Entwicklungswege von Sternen aus? Also wann und warum verlassen sie die Hauptreihe?
10. Was ist der Horizontalast?
11. Beschreiben Sie den Lebenspfad der Sterne. Gehen Sie dabei auf alle Klassen und die bekanntesten möglichen Endformen ein.
12. Weshalb leben massereiche Sterne weniger lang als Sterne mit geringeren Massen, obwohl sie durch ihre Masse einen höheren Druck und Temperatur im Kern besitzen, was weitere Fusionsprozesse zündet?
13. Nehmen sie zu folgender Aussage Stellung: „Nach dem Tod/Kollaps eines Sterns sind die entstandenen Planetarischen Nebel vielleicht schön anzusehen, doch sonst sind sie nicht mehr für etwas zu gebrauchen“.
14. Nennen Sie die Ihnen bekannten Endformen von Sternen und erklären Sie kurz, wann diese entstehen.

Sterntypen

1. Was zeichnet einen Hauptreihenstern aus? Sind alle Sterne mindestens einmal Hauptreihensterne?
2. Was für ein Sterntyp ist unsere Sonne? Wie alt ist sie und wie wird sie sich wann entwickeln?
3. Ist der Blaue Riese im Grunde genommen gleichzusetzen mit dem Roten Riesen? Worin bestehen die Unterschiede?
4. In welche Spektralklasse(n) sind Rote Riesen einzuteilen?
5. Beurteilen Sie folgende Aussage in ihrer Richtigkeit: „Braune Zwerge sind Übergangsformen von Weissen Zwergen zu Schwarzen Zwergen.“
6. Welche Voraussetzungen müssen gegeben sein, sodass ein Neutronenstern entsteht?
7. Was ist ein Neutronenstern? Wodurch zeichnet er sich aus?
8. Wie wird der Sternenkern zum Neutronenstern? Was geschieht mit den Protonen und warum?
9. Wie ist es zu erklären, dass ein Neutronenstern, obwohl er etwa nur die Grösse der Erde besitzt, um ein vielfaches schwerer ist? (Ist Masse nicht auch an Grösse gekoppelt?)
10. Zu welcher einer Sternengruppe gehören die RR-Lyra-Sterne und die Cepheiden? Wo auf dem Hertzsprung-Russel-Diagramm sind sie ungefähr zu finden?
11. Weshalb ist die Bezeichnung „eruptive Veränderliche“ für R-Corona-Borealis-Sterne nur bedingt zutreffend?
12. Beschreiben Sie, wie Doppelsternsysteme entstehen können.
13. Sind Planeten in einem Doppelsternsystem denkbar?
14. Was ist der essentielle Unterschied zwischen einer Supernova Typ Ia und einer Nova?
15. Inwiefern differenzieren sich Schwarze Löcher von den anderen Endformen der Sterne?
16. Warum stellen Schwarze Löcher immer noch ein grosses Rätsel für die Physik dar? Inwiefern sprengen sie den Rahmen der klassischen (Astro-)physik?
17. Warum sind Schwarze Löcher so schwer zu untersuchen?
18. Wie wirken sich Schwarze Löcher auf ihre direkte Umgebung aus?
19. Was macht das Schwarze Loch für Sie persönlich unfassbar?

Allgemeine Fragen zum Text

1. Kommentieren Sie folgenden Aussage: „Sterne sind unabdingbar für das Entstehen von Leben.“ Stimmen Sie dieser Aussage zu? Begründen Sie ihre Antwort! Greifen Sie dabei auf ihr gesamtes Wissen zurück.
2. Wir wissen, dass durch Kernfusion Elemente bis zu Silizium entstehen. Warum wird Silizium nicht weiter fusioniert? Woher stammen denn all die anderen Elemente auf der Periodentabelle?
3. Wissenschaftler forschen nun schon seit einiger Zeit an einer Möglichkeit, eine ähnliche Energiegewinnung wie die von Sternen unter Laborbedingungen zu ermöglichen, die sogenannte „kalte Fusion“. Was denken Sie: ein echter Fortschritt, der viele aktuelle Probleme lösen könnte oder der Nachforschungen kaum wert?
1. Zitat: Sterne, Wie das Licht in die Welt kommt, H. Lesch und J. Müller, S 94 [↑](#footnote-ref-1)