

ENTWICKLUNG DER STERNE

In den Sternen sah der Mensch früher keine hellen weit distanzierten Gaskugeln wie heute. Lange Zeit dominierte die Vorstellung von göttlichen Himmelssphären, in deren Inneren die Sterne aufgehängt waren. Sternbilder und ihre jährliche Wiederkehr am Firmament waren zwar schon lange bekannt, aber über das Wesen der Sterne wusste man nur sehr wenig. Heute ist man sich sicher, dass es sich um Sonnen wie die unsere handelt. Sie leuchten in Billionen und Trillionen von Kilometern Entfernung.

Nicht alle Sterne sehen gleich aus: Es gibt rote, blaue, grosse, kleine, flackernde. Trotzdem sind diese Sterne nicht grundverschieden. Es handelt sich um diverse Entwicklungsstadien von Sternen unterschiedlicher Masse.



Das Leben eines Sterns lässt sich gut mit einem Menschenleben vergleichen. Auch hier finden wir das embryonale Stadium, die Geburt, das goldene Alter, den 1. Herzinfarkt mit dem zunehmenden Alter und den Tod. Wie die 200 kg schweren Sumaringer, so leben auch schwere Sterne bedeutend weniger lang als Leichtgewichte. Und ähnlich dem Tod der grossen Pharaonen, so sterben auch massereiche Sterne in einem gewaltigen Finale, das sich nur die allergrössten leisten können.

Stellen Sie sich eine Eintagsfliege vor, die in einer Stadt durch die Marktgasse summt und da an einem Kinderwagen vorbei fliegt, dort um einen älteren Herrn schwirrt, dann an einem rothaarigen Mädchen vorbeisaust. Es dürfte für die Fliege ziemlich schwer sein, sich mittels dieser Eindrücke ein Bild über den Werdegang des Menschen zu machen. Sie wird sich fragen, ob der weise Mann zum Baby wird oder umgekehrt, und was die roten Haare für einen Einfluss darauf haben. Was die Entstehung und Entwicklung der Sterne angeht finden wir Menschen uns in derselben Lage wie das Insekt. Denn von der Bildung bis zum Tod eines Sterns vergehen Millionen bis Milliarden von Jahren. Da es also unmöglich ist, ganze Abläufe zu studieren, ist es schwer, etwas Ordnung ins Durcheinander zu bringen. Angesichts dieser Situation müssen wir uns im klaren sein, dass jede astronomische Erklärung ein Modell wiedergibt. Es hat nicht den Anspruch auf Wahrheit, sondern kann nur einen Vorgang physikalisch mehr oder weniger plausibel erklären. Auch in der folgenden Schilderung des Lebensweges von Sternen handelt es sich um ein Modell. Selbst wenn es nur wenige Zweifler an der Richtigkeit dieser Abläufe gibt, so kommt es doch gelegentlich vor, dass man Änderungen an Theorien aus diesem jungen Zweig der Astronomie anbringen muss. Zum Beispiel erschütterten im Moment Entfernungsmessungen von Supernovae - die Ermittlung der Distanz zu Sternen, die in riesiger Entfernung mit einer gewaltigen Explosion ihr Leben verlieren - die Grundfestungen der Kosmologie. Einige neue Forschergruppen versuchen zu zeigen, dass es nebst der anziehenden Gravitationskraft noch eine weitere über grosse Distanzen ausübende Kraft geben muss, welche abstossend wirkt. Sie haben gemessen, dass die Geschwindigkeit der Galaxien im Raum nicht abnimmt, sondern zunimmt.

Revolutionäre Gedanken haben im Laufe der Zeit ein erstaunliches Weltbild geschaffen, und revolutionäre Gedanken werden es in naher oder ferner Zukunft verändern oder gar umstossen, so wie einstige heute belächelte Weltbilder des Mittelalters. Möglicherweise hat das Verständnis der Sterne vor allem eines zum Ziel: Die Suche nach dem Beginn und die Antwort über die Zukunft des Menschen sowie des ganzen Weltenbaus.

Wir beginnen den Streifzug durch das Sternenleben mit der

Geburt eines Protosterns aus einer Gaswolke

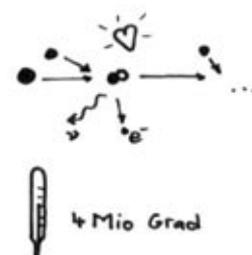
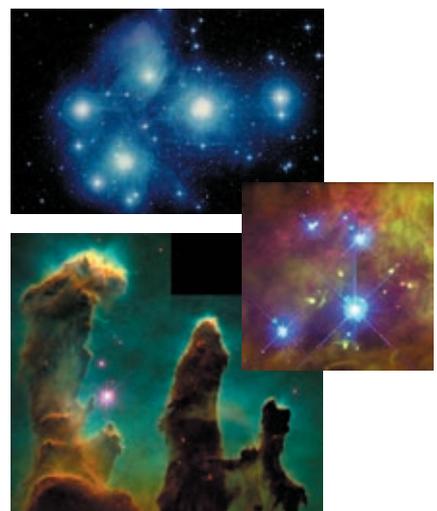
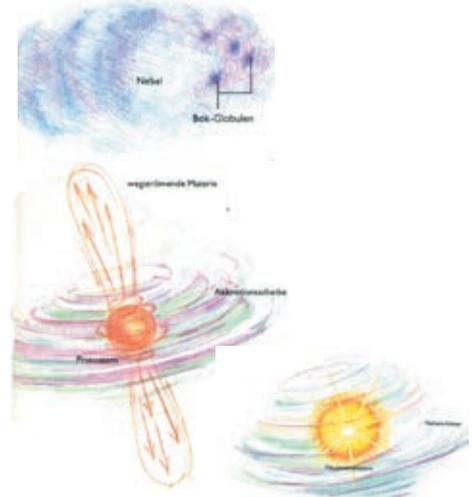
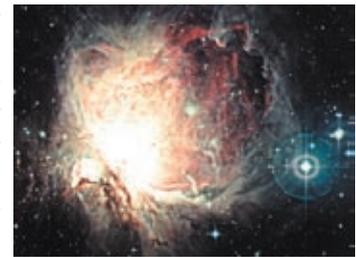
Die Sterne sind nicht gleichmässig über den Himmel verteilt. Sie befinden sich vorwiegend in riesigen Sternansammlungen (sog. Galaxien, siehe Kapitel 8.8). Zwischen den Sternen, im sogenannten interstellaren Raum, gibt es riesige Mengen Gas. Es rührt zum grossen Teil noch vom Beginn des Universums her (Siehe Urknalltheorie oder Inflationäres Szenario, Kapitel 9). Dieses **interstellare Gas** besteht im wesentlichen aus molekularem z. T. ionisiertem Wasserstoff. 10% bis maximal 21% bestehen aus Helium. Schwerere Elemente sind nur mit 1% – 2% vertreten. Das Gas ist ebenfalls nicht gleichmässig verteilt, sondern befindet sich vorwiegend in riesigen Wolken, **interstellare Nebel** genannt. Als Beispiel umfasst der Orionnebel ein Gebiet von bis zu 100 Lichtjahren Durchmesser und enthält einige hunderttausend oder Millionen Sonnenmassen an Materie (1 **Lichtjahr** = 9.46 Billionen Kilometer = Distanz, welche das Licht in einem Jahr zurücklegt). Diese Gasmassen – seien sie noch so leicht und weiträumig verteilt – üben **Gravitationskräfte** (Anziehungskräfte) aufeinander aus. Die Wolke dreht sich jedoch langsam und wegen der daraus resultierenden Fliehkräfte bleibt sie lange Zeit im Gleichgewicht.

Evtl. ausgelöst durch eine Dichtewelle, durch Gasdruck neuer Sterne oder durch den gewaltigen Tod alter Sterne beginnen sich aber Teile dieser Gasmassen aufeinander zu bewegen. Sie bilden **Globulen**, Zellen von grössenordnungsmässig 100 AE (1 **Astronomische Einheit** = 150 Millionen Kilometer = Distanz Erde – Sonne), die dann innerhalb von 100'000 Jahren auf nur 0.25 AE schrumpfen. Dabei nimmt die Drehgeschwindigkeit immer mehr zu, genau wie Eiskunstläufer sich in einer Pirouette schneller drehen, wenn sie die Arme an den Körper legen. Das Innere dieser sich drehenden Wolke kollabiert zuerst und bildet die Anfänge des **Protosterns**. In nur 570 Jahren versammeln sich die Gasmassen aus einem Umkreis von 100'000 Sonnenradien in einer nur noch 1000 Sonnenradien grossen Kugel. Dann wird die Wolke **optisch dick**, d.h. für das Licht undurchlässig. Sie lässt die beim Fall der Gasmassen frei werdende Energie nicht mehr entweichen und im Protostern baut sich ein Druck auf, der eine weitere Kontraktion verhindert. Obwohl der neue Protostern allein durch die frei werdende Energie der aufprallenden Gasmassen schon so hell strahlt wie ein ausgewachsener Stern, liegt er noch unbeobachtbar im Innern einer umhüllenden Wolke verborgen. Diese Phase dauert bei einem sonnenähnlichen Stern etwa 50'000 Jahre an.

Der neue Stern

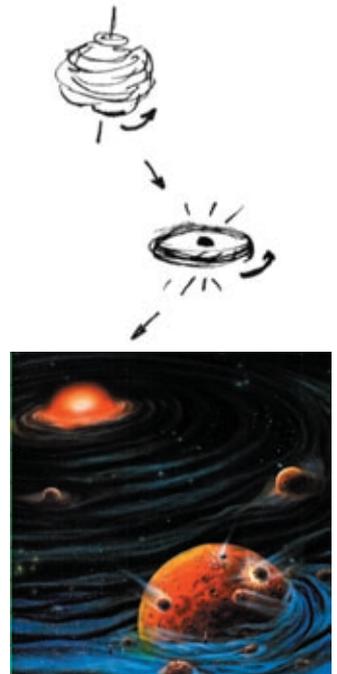
In der Regel entstehen in einem interstellaren Nebel viele Globulen gleichzeitig, die jede (sofern ihre Grösse dazu ausreicht) einen Stern oder ein Planetensystem hervorbringt. Die jungen Sterne bilden dann einen lockeren Sternverband bestehend aus ein paar Dutzend bis wenigen Hundert Sternen. Man nennt solche Gebilde **offene Sternhaufen**. Offen deshalb, weil es am Rande unserer Galaxie auch ältere **Kugelsternhaufen** gibt, welche aus tausenden und abertausenden von Sternen aufgebaut sind und eine kugelige Gestalt zeigen. Das zur Bildung der jungen Sonnen überzählige Gas wird von den neuen heissen Sternen regelrecht ins All hinaus geblasen. Dabei entstehen Fahnen, die an lange Finger oder gar an Elefantenrüssel erinnern. Erst jetzt wird der Stern gegen aussen sichtbar. Dieser Mechanismus verhindert auch, dass Sterne beliebig gross werden, und erklärt warum die grössten von Ihnen nur etwa die einhundertfache Masse unserer Sonne besitzen.

Mit der Energie, die durch das Kontrahieren der Gasmassen freigesetzt wird, kann ein mittlerer Stern wie die Sonne nur gerade 30 Millionen Jahre lang leuchten (**Kelvin-Helmholtzzeit**). Die gewaltige Leuchtkraft des Sterns muss also anders entstehen. Die Lösung wurde erst 1930 gefunden: Der Stern produziert seine Energie durch **Kernfusion**: dem Verschmelzen von leichteren chemischen Elementen zu schwereren. Alle Sterne beginnen ihren Lebenslauf mit der Bildung von Helium aus Wasserstoff. Dieser Vorgang setzt ein, wenn sich der Protostern durch Schrumpfprozesse auf 4 Millionen Grad aufgeheizt hat.



Planetensysteme

Die Bildung eines **Planetensystems** beginnt, während sich der Protostern noch bildet und seine Energie aus der Kontraktion der Gas- und Staubwolke bezieht. Die immer schneller rotierende Wolke plattet ab und die winzigen Teilchen prallen in der Scheibe zusammen. So formieren sie sich zu immer grösseren Körpern, die zu **Planetesimalen** und schliesslich zu einigen wenigen **Planeten** zusammenfinden. Diese wachsen an, bis der Rohstoff aus der Wolke aufgebraucht ist und die Gase von der Sonne weggeblasen werden. Die unzähligen Meteoritenkrater auf unserem Mond oder dem Planeten Merkur stammen noch aus jenen Anfängen als das Sonnensystem noch voller Trümmer war. Offenbar wäre die Bildung eines Sterns kaum möglich, wenn nicht Planeten oder andere Sterne einen Teil der Drehung (**Drehimpuls**) aufnehmen würden. Unsere Ursonne hätte ohne umgebenden Staubring und ohne die Entstehung eines jupitergrossen Planeten der um sie kreist so schnell rotiert, dass sie sich gar nicht hätte bilden können. Es ist deshalb anzunehmen, dass viele der anderen Sterne eigene Planeten besitzen. Doch mit dem jetzigen Stand der Technik ist es unmöglich diese finsternen und kleinen Kerle auszumachen. Einzig Taumelbewegungen der Sterne sind ein Indiz einzelner Jupitergrosser Planeten, die kürzlich in der Nähe verschiedener Sonnen entdeckt wurden.

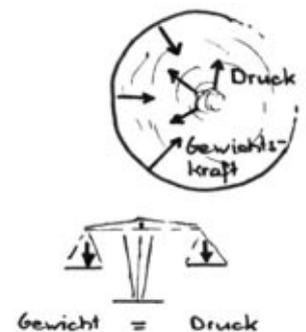


Doppelsternsysteme

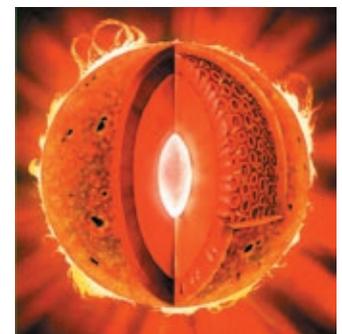
Viele Sterne leben in sehr engen Sterngemeinschaften. Gemeint sind sogenannte **Doppelsterne**, Sterne deren Anziehungskräfte einander so stark beeinflussen, dass sie sich umeinander drehen. Es handelt sich also um eine Art Sonnensystem mit zwei, drei oder mehr Sonnen. Doppelsterne sind keine Kuriosität, sondern eher die Regel. Ein schönes Beispiel ist Albireo, ein Doppelsternsystem bei dem der schwerere Stern bereits zum Roten Riesen angewachsen ist, während der andere noch immer mit beiden Beinen im Leben steht und ein bläuliches Licht ausstrahlt.

Der Stern im goldenen Alter

Egal wie gross der Stern ist, er verbringt die meiste Zeit seines Lebens damit tief im Kern Wasserstoffatome in Heliumatome umzuwandeln. Diese Reaktion, ähnlich der, der Wasserstoffbombe, erzeugt ungeheure Energiemengen. Durch Strahlung und die enorme Hitze bildet sich ein Druck, der den enormen Gravitationskräften entgegenwirkt und verhindert, dass der Stern unter seinem eigenen Gewicht zusammenfällt (es bildet sich ein **hydrostatisches Gleichgewicht**). Während dieser lang andauernden Phase bleiben Helligkeit und Temperatur annähernd konstant. Seien Sie froh darüber, denn auch unsere Sonne befindet sich in diesem Stadium.

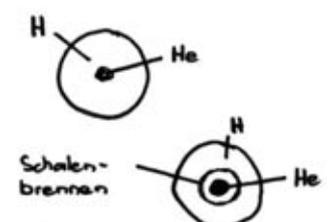


Obwohl grosse Sterne einiges mehr an Brennstoff zur Verfügung haben, verpuffen sie ihre Energie viel schneller. Der Grund: Je heisser das Innere des Sterns ist, desto rascher laufen die Fusionsprozesse ab. Bei mittleren Sternen wie die Sonne beträgt die Temperatur im Zentrum etwa 15 Millionen **Kelvin** (0 Kelvin = -273.16 °Celsius, 273.16 Kelvin = 0 °Celsius). In solch kühlen Sternen läuft nur die **Proton-Proton-Reaktion** ab. In grösseren Sternen gewinnt der **Kohlenstoffzyklus** sehr schnell an Wichtigkeit, denn dieser hängt mit der dritten Potenz von der Temperatur ab! So haben supermassive Sterne eine Lebensdauer von nur 10 Millionen Jahre, während mittlere Sterne wie die Sonne etwa 10 Milliarden Jahre zu leuchten haben.

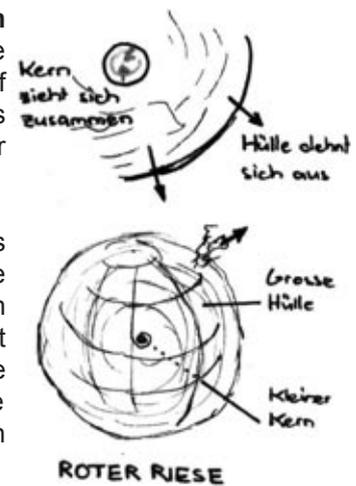


Das Ende der Wasserstoff-Phase – Der Stern wird zum roten Riesen

Wenn 10% des Wasserstoffs verbraucht sind, entsteht im Innern ein Heliumkern hoher Dichte. Dann erlischt dort das Wasserstoffbrennen und verlagert sich in eine Schale um den Helium-Kern. Der schwere Kern zieht sich zusammen, bis er genügend heiss ist für die **Heliumfusion** (Triple-Alpha-Reaktion, wandelt Heliumatome in Kohlenstoff um). Gleichzeitig dehnt sich die Hülle des Sterns aus. Der Durchmesser wächst auf das Hundertfache. Seine Oberflächentemperatur fällt auf vielleicht 3000 Kelvin ab



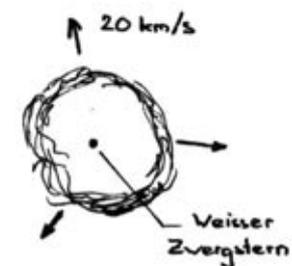
und der Stern wechselt seine Farbe von blau oder gelb nach rot: Er wird zum **Roten Riesen**. Entzündet sich die Heliumfusion, so findet die Wasserstoffusion in der Schale noch immer statt. Die Sternenhülle dehnt sich noch weiter aus. Der genaue Ablauf der Umstellung der Kernreaktionen hängt unter anderem vom Energietransport aus dem Stern ab, namentlich von den Konvektionszonen oder Strahlungszonen und der jeweiligen Masse des Sterns resp. des Zentralgebietes.



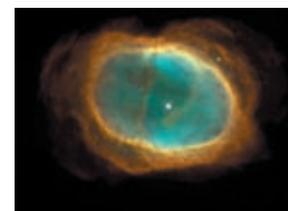
Nachdem im Kern das Helium ausgegangen ist und der Energieausstoss etwas abgenommen hat, zieht sich der Kern abermals etwas zusammen. Auch die Hülle des Sterns schrumpft vorerst ein wenig, bevor sie sich wiederum ausdehnt und den Stern abermals zu einem Roten Riesen werden lässt. Seine äusserste Gashülle ist schon so weit vom Zentrum weg, dass der Stern diese kaum noch halten kann (Die Gravitationskraft ist abhängig vom Abstand!). Die Sternhülle wird instabil. Gasströme erheben sich, fallen zurück und schichten dabei die neuen Elemente von innen nach aussen um.

Weisse Zwergsterne: Aschehaufen massearmer Sterne im Universum

Von nun an unterscheiden sich die Lebenswege verschieden grosser Sterne. Während grössere Sterne ab etwa 11 Sonnenmassen diese Midlife-crisis überstehen (siehe nächster Abschnitt) wird die Temperatur kleinerer Sterne nie hoch genug, um eine andere Fusionsreaktion (wie z.B Fusion von Kohlenstoff zu Neon oder Magnesium) zu zünden. Der Kern zieht sich weiter zusammen bis die Atome sich so dicht aneinander schmiegen, dass der Druck der Elektronen genug gross wird, ein weiteres Zusammenfallen des Sterns zu verhindern. Ein solcher stellarer Aschehaufen nennt sich **Weisser Zwerg**. Er hat in etwa die Grösse der Erde und eine Oberflächentemperatur von über 40'000 Kelvin. Das Sternrelikt wird sich abkühlen und binnen weiterer Milliarden Jahre sein Licht für immer verlieren. Weisse Zwerge sollten nicht verwechselt werden mit sogenannten **Braunen Zwergen**. Jenes sind ganz einfach schwach glühende Möchtegern-Sterne, deren Masse bei der Entstehung nicht gereicht hat, um sie durch Zündung der Kernfusion zum Leuchten zu bringen.

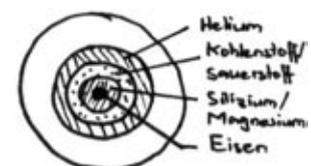


Die schwach gebundene Hülle des ursprünglichen Roten Riesen wird von der freiwerdenden Strahlung mit etwa 20-30 km/s Entweichgeschwindigkeit ins All abgestossen. Sie bildet einen sogenannten **Planetarischen Nebel**.



Grössere Sterne nach der Midlife-crisis

Bei genug grossen Sternen wird der zusammenfallende Kern heiss genug um Kohlenstoff und Sauerstoff in weitere Produkte zu verwandeln: Wenn im Kern das Helium ausgeht, beginnt der Stern sich wie alle anderen in dieser Lebensphase zusammenzuziehen. Aber die den Stern umgebende Hülle mag den Kern durch die Schwerkraft so stark zusammendrücken, dass die Temperatur im Kern heiss genug wird, um Kohlenstoff und Sauerstoff umzuwandeln in weiter Elemente, eventuell sogar bis zu den Elementen Silizium und Eisen. Der Rote Riese gleicht dann einer Zwiebel: Ein Eisenkern ist umhüllt von einer Siliziumschale, welche von einer Reihe von Schalen leichterer Elemente umschlossen wird.



Mit der Fusion von Eisen beendet der Stern seine Brennstoffvorräte. Eisen ist das schwerste chemische Element, welches unter Energieabgabe fusioniert werden kann. Die Fusion von schwereren Elementen gelingt nur unter Aufnahme von Energie, und die Natur vermeidet alle Aktionen, bei denen der Energie- und der Ordnungsgrad am Ende grösser sind als zu Beginn. Sie kennen das: Das Umgraben des Gartens und das Sortieren des Werkzeugkastens gelingen beide nur unter grösstem Druck und sind mit riesigen Anstrengungen verbunden.



Tod eines massereichen Sterns – Neutronensterne und Supernovae

Erreicht der mittlere Eisenkern eines massiven Sterns im letzten Lebensabschnitt eine Gesamtmasse von 1.4 Sonnenmassen (**Chandrasekhar Limit**), so nimmt die Gravitation Überhand. Der Elektronendruck im Innern des weissen Zwerges wird zu schwach und der Eisenkern sackt binnen einer Sekunde von der Grösse der Erde auf eine Kugel von etwa 20 Kilometern Durchmesser zusammen. Bei diesem Akt werden selbst die Atome zerstört. Elektronen und Protonen vernichten sich gegenseitig und bilden Neutronen, die nun dicht beieinander liegen. Das entstehende Sternrelik heisst deshalb **Neutronenstern**.

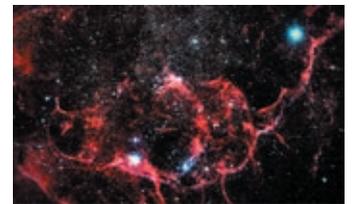
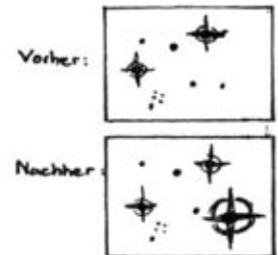
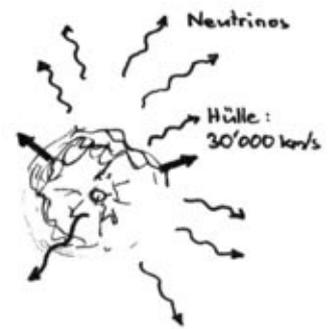
Die bei der Kontraktion entstehende Energie wird durch 10 Milliarden Billionen Billionen Billionen frei werdende Neutrinos – sichtbar masselose Teilchen, die kaum mit normaler Materie in Kontakt treten - ungehindert nach aussen getragen. Dabei wird mehr Energie in Form dieser geheimnisvollen Neutrinos frei, als alle andern Billionen über Billionen Sterne im beobachtbaren Universum im sichtbaren Licht zur selben Zeit aussenden. Ein Ausbruch dieser Art nennt sich **Supernova**. Er ist weit über die Galaxie hinaus sichtbar und versendet mit Lichtgeschwindigkeit die letzte Botschaft des sterbenden Sterns.

Ein Bruchteil dieser Elementarteilchen treibt die durch den Zusammenfall des Kerns entstandene Dichte- und Hitzewelle nach aussen. Die Sternhülle wird mit 20'000 km/s bis 30'000 km/s explosionsartig ins All hinausgeschleudert und bildet einen **Planetarischen Nebel**. Dieser Nebel wird sich mit den Jahrtausenden im interstellaren Raum verteilen. Er enthält nebst Wasserstoff und Helium nun auch schwerere Elemente, die im Sternennern oder wie die schwereren von ihnen erst während der Supernova entstanden sind.

„Das Eisen in unserem Blut, das Kalzium in unseren Nägeln und der Sauerstoff, den wir atmen, sie alle bildeten sich innerhalb sterbender Sterne. Ironischerweise ist es der Tod eines Sterns, der die Galaxie mit denjenigen Rohstoffen versorgt, die Grundlage für die nächste Generation von Sternen, Planeten und von Leben sind.“

Magazin Astronomy, Juli

1997



Pulsare sind Neutronensterne

1967 entdeckte Jocelyn Bell seltsame Signale aus dem All: Pulse mit einer Länge von einer zwanzigstel Sekunde, die etwa alle 1.3 Sekunden auftraten. Vorerst wurden die Signale als LGM's (von Little Green Men – die Frage nach anderen Zivilisationen im Universum wurde gerade heftig diskutiert) bezeichnet. Bis heute sind hunderte solcher **Pulsare** bekannt. Es sind, wie 1968 ein britischer Kosmologe erstmals behauptete, schnell rotierende Neutronensterne. Ihr Magnetfeld ist sehr stark und bündelt die intensive Radiostrahlung, so dass diese die Sternenoberfläche wie ein Leuchtfener nur an einer eng begrenzten Stelle verlassen kann.



Seltene, noch massereichere Sterne enden als schwarze Löcher

Falls die Masse des Neutronensterns die dreifache Sonnenmasse überschreitet, ist auch der Neutronenstern kein stabiler Zustand. Durch die Gravitationskraft kontrahiert der Stern weiter, wobei sein Radius den sogenannten **Schwarzschildradius** unterschreitet. Es entsteht ein **Schwarzes Loch** mit seltsamen Eigenschaften, die nicht mit der irdischen Physik erklärbar sind. Von einem Ort innerhalb dieses Radius kann selbst das Licht nicht entweichen, weshalb schwarze Löcher auch wirklich schwarz erscheinen. Sie lassen sich nur anhand verschiedener Effekte vermuten. Im speziellen seien die Lichtablenkung durch Gravitationslinsen und die starke Radiostrahlung stark beschleunigter, ins Schwarze Loch fallender Materie (sogenannter Todesschrei der Materie) erwähnt.



Klassifizierung der Sterne

Nach der Betrachtung des Lebenslaufs ist es nun mal an der Zeit, etwas Ordnung in das heillose Durcheinander von Sternen zu bringen. Unsere Mitmenschen klassifizieren wir täglich mit diversen charakteristischen Grössen wie verheiratet, blond, schlank, nett, etc. Auch für die Sterne gibt es solche **charakteristischen Zustandsgrößen**: Es sind dies Masse, Leuchtkraft, Radius, Dichte, Oberflächentemperatur, Magnetfelder, chemische Zusammensetzung, u.s.w. Direkt beobachtbar sind nur Helligkeit, Farbe und Spektraltyp (siehe unten).

Die meisten Sterne weisen Massen ähnlich der unserer Sonne auf. Leichtere Sterne gibt es weitaus mehr als schwerere. Selten erreichen superschwere Sterne gegen 100 Sonnenmassen, eine magische Grenze, die nicht überschritten wird. Die Leuchtkräfte streuen in einem weiten Bereich vom 10^{-4} bis zum 10^5 -fachen der Leuchtkraft unserer Sonne. Neben der **absoluten Helligkeit** (=Leuchtkraft) betrachtet man auch die **relative Helligkeit**. Diese stellt den Bezug zur Distanz her, indem wir nahe Sterne heller empfinden als weit distanzierte. Die Helligkeit wird in **Magnituden** gemessen. Die Zunahme einer Magnitude erhöht die Helligkeit jeweils um das 2.512fache, eine Zunahme von 5^m (mag. 5) um das 100fache (siehe Abschnitt 7.3.1). Die Temperatur des Sterns hängt weitgehend von der Masse und vom Entwicklungsstadium des Sterns ab. Die Oberflächentemperatur eines Sterns liegt zwischen 3'000 Kelvin und etwa 50'000 Kelvin, typisch zwischen 4'000 Kelvin und 10'000 Kelvin.

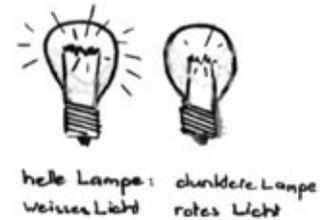
Je nach Temperatur und Spektrum (Intensität des abgestrahlten Lichtes bezüglich verschiedenen Wellenlängen resp. Farben, siehe Abschnitt 6.6) zählt man die Sterne zu einzelnen **Spektralklassen**. Man unterscheidet **O, B, A, F, G, K, M, R, N**, und **S –Sterne**. Die Reihenfolge dieser Spektralklassenbezeichnungen kann man sich mit folgendem einfachen englischen Satz merken: "Oh Be A Fine Girl Kiss Me Right Now, Smack" (Auch Astronomen sind eben nur Menschen). O-Sterne sind heisse Sterne mit Oberflächentemperaturen von über 25'000 Kelvin, während M-Sterne Temperaturen von weniger als 3'500 Kelvin aufweisen und **Rote Zwerge** genannt werden (So gibt es also weisse, braune und rote Zwerge). Unsere Sonne gehört zu den G-Sternen mit einer Oberflächentemperatur von etwa 6'000 Kelvin und gelblicher Farbe, 80% ihrer Nachbarsterne sind hingegen M- oder K-Sterne.

Temperatur und Farbe hängen eng zusammen. Erhitzen Sie ein Stück Draht über einem Bunsenbrenner. Zuerst wird der Draht rotglühend werden, dann verändert sich die Farbe von rot nach gelb bis weiss, bei 1450 - 1535 Grad Celsius wird das Drahtstück schmelzen. Genau so verhalten sich fast alle Körper (Genauer alle **schwarzen Strahler**): Ihre Farbe verändert sich mit der Temperatur. Auch die Glühbirnen strahlen um so helleres aber auch weisseres Licht ab, je heisser sie sind. Rote Riesensterne sind deshalb bedeutend kühler als ihre blau leuchtenden, jungen, massereichen Sternkollegen. Das Farbspektrum ist bei rot und weiss keineswegs zu Ende. Kältere Körper strahlen im infraroten Bereich, heissere im blauen oder gar im ultravioletten.

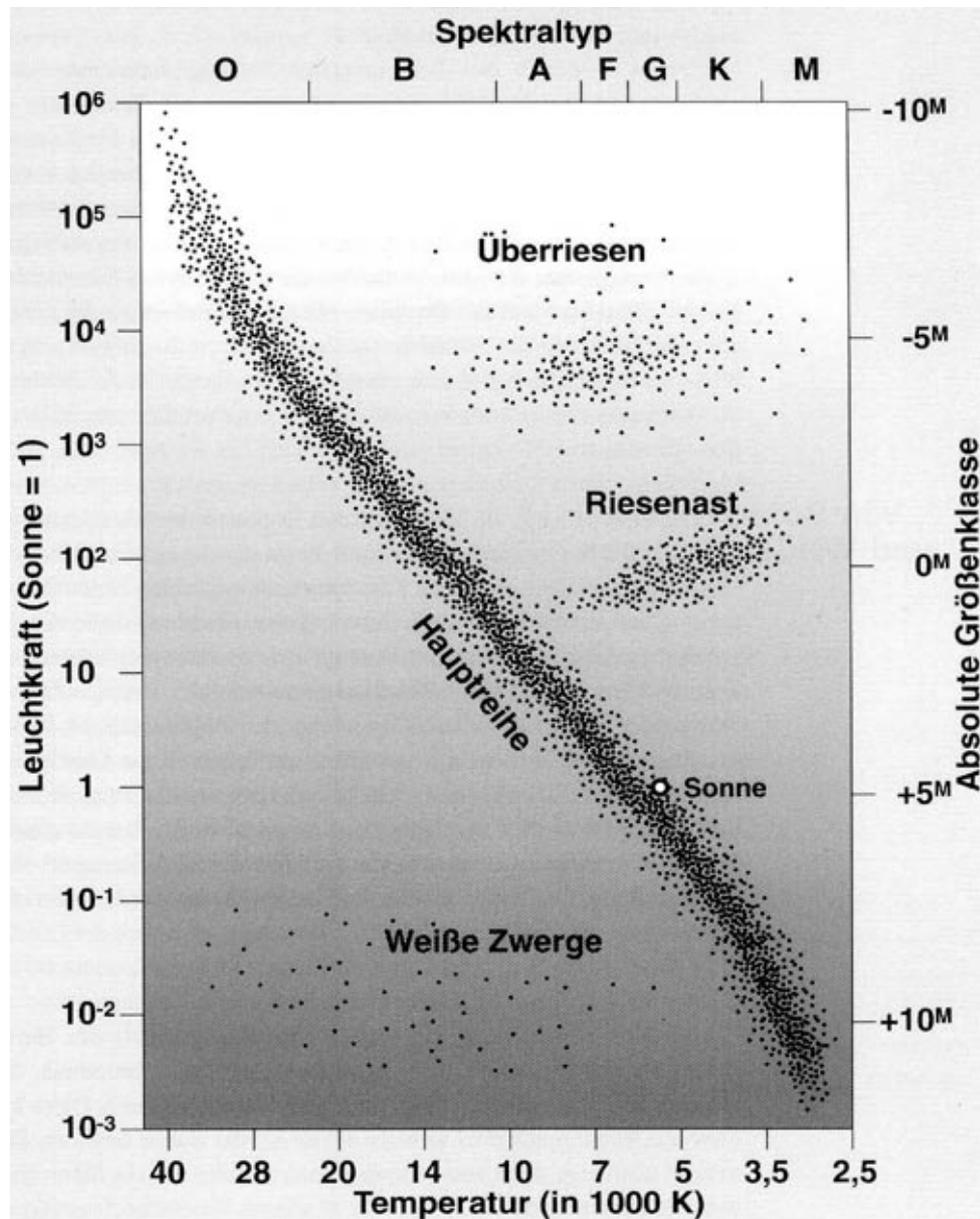
Das Hertzsprung – Russel – Diagramm

Ein notwendiges Werkzeug zur Beschreibung der Sternentwicklung ist das **Hertzsprung-Russel-Diagramm** (HRD). Die senkrechte Achse stellt eine Skala für die wahre (oder absolute) Helligkeit der Sterne dar. Die schwächsten stehen unten, die hellsten oben. Auf der waagerechten Achse befindet sich eine Skala für die den Temperaturen entsprechenden Spektralklassen (O, B, A, F, G, K, M). Am heissen Ende der Skala stehen die blauen O-Sterne mit Oberflächentemperaturen von über 25'000 Kelvin.

Das Muster des HRD hängt eng mit der Entwicklung der Sterne zusammen. Entsteht ein neuer Stern, so taucht er auf der sog. **Hauptreihe** (die unverkennbare Diagonale) auf. Dort bleibt er den längsten Teil seines Lebens. Sehr kleine Sterne mit etwa $\frac{1}{4}$ Sonnenmasse treten als **rote Zwerge** rechts unten in Erscheinung, massenreiche Sterne beginnen ihr Leben am linken oberen Ende der Hauptreihe. Wird ein Stern



zum Roten Riesen, so nimmt sein Durchmesser (und somit seine Helligkeit) zu, die Temperatur des Sterns nimmt ab. Ein solcher Stern bewegt sich im HRD also nach rechts oben, er wird von der Hauptreihe weggeführt. Die Sonne gehört der Hauptreihe etwa 10 Milliarden Jahre an, rote Zwerge brauchen 200 Milliarden Jahre, bis sie die Hauptreihe verlassen. Zum Vergleich: Das Alter des Universums wird – sofern wir von einem **“Urknall”** ausgehen – auf etwa 10-20 Milliarden Jahre geschätzt.



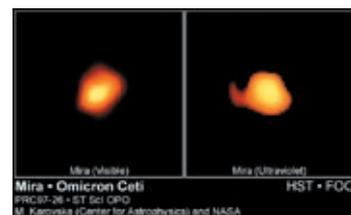
Altersbestimmung von Sternhaufen

Das Hertzsprung-Russell-Diagramm wird benutzt um zum Beispiel das Alter eines Sternhaufens abzuschätzen. Die Sterne des Haufens sind alle etwa zur gleichen Zeit entstanden. Da die heißen, hellen Sterne sich zuerst von der Hauptreihe weg bewegen (also zuerst ihre Vorräte aufgebraucht haben) sind die Koordinaten des oberen Endes der Hauptreihe im Diagramm ein Hinweis auf die Helligkeit der Sterne welche gerade in diesem Moment zum Roten Riesen werden. Die Helligkeit ist eng verbunden mit der Masse eines Sterns, und diese ihrerseits korreliert mit seiner Lebenserwartung. So kann - eins nach dem anderen - mit Hilfe des Diagrammes auf das Alter der sterbenden Sterne und somit auf das Alter des ganzen Sternhaufens geschlossen werden.



Veränderliche Sterne

Veränderliche Sterne oder kurz **Veränderliche** werden Sonnen mit wechselnder Helligkeit genannt. Es gibt mehrere Arten von Veränderlichen. So gehören einige Doppel- oder Mehrfachsternsysteme zu ihnen. Dies sind Sterne, welche sich direkt durch ihre Anziehungskräfte beeinflussen. Mehr als die Hälfte der beobachteten Sterne befinden sich in einem solchen Sternsystem. Zeigen zwei Doppelsterne mit der Stirnseite so zur Erde, dass sich beide Komponenten abwechselnd verdecken, so verändern diese ihre Gesamthelligkeit. Weiter gibt es meist junge, eruptive Veränderliche, die ihre Helligkeit ändern, indem von Zeit zu Zeit grosse Flares (Sonnenfackeln) auf ihrer Oberfläche explodieren und heisse Gase in den Raum schleudern. Einige der Sterne sind nicht überall gleichmässig hell und verändern ihr Licht mit der Rotationsperiode. Die R Coronae Borealis Sterne gehören zu den Roten Riesen und umgeben sich regelmässig mit einer Russwolke. Dies vermindert ihre Leuchtkraft um einen Faktor bis zu 10'000. Bei manchen Roten Riesen ist die äusserste Gashülle schon so weit vom Zentrum weg, dass der Stern diese kaum noch halten kann. Die Sternhülle kann nun unkontrolliert nach innen und aussen pulsieren und der Stern wird möglicherweise zu einem Mira-Stern, der seine Helligkeit bis mehr als das Tausendfache ändern kann. Berühmt sind vor allem die **Cepheiden**-Veränderlichen. Ihre Gashülle pulsiert angetrieben durch innere Prozesse stetig nach innen und aussen, die Strahlung schwankt aber nur zwischen 10 und 20 Prozent. Da ihre absolute Helligkeit feststeht, sobald man ihre Periode kennt, zieht man diese Sterne oft zur Distanzberechnung zu. Bei den RR-Lyrae-Sternen laufen



Liste von Typen veränderlicher Sterne			
Typ	Sterne, Funktionweise	Periode	Helligkeitsschwankung
Bedeckungsveränderliche:			
Doppelsternsysteme mit Stirnseite zur Erde	Zeitweise sind beide nur der eine oder nur der andere (evtl. dunklere) Begleiter zu sehen		
Rotationsveränderliche	Weisen unterschiedl. Oberflächentemperaturen auf.	Eine Sternumdrehung (zwischen 12 h und 100 Tagen)	
Eruptiv-Veränderliche			
UV-Ceti-Sterne	Kühle dM- Hauptreihensterne, die explosionsartig heisse Gase in den Raum austossen	Unregelmässig	Bis 6m, Dauer: einige 10 min.
R-Coronae-Borealis-Sterne (R-CrB-Sterne)	Rote Riesen, die sich regelmässig mit Russwolke umgeben		Faktor 10'000
RW-Aurigae-Sterne und T-Tauri-Sterne	Junge Eruptivveränderliche der Spektralklasse G noch vor der Hauptreihe		
T-Tauri-Sterne			
Novae	Nahe Doppelsternsysteme mit weissem Zwerg als Begleiter, der dem Begleiter Materie entzieht und unter heftigsten Kernreaktionen verbrennt.	Mehrmals beobachtbar, in Abständen von 10 Tage bis zu Jahrzehnten	
Regelmässige Veränderliche			
Cepheiden (Typ I)	Sterne mit pulsierenden Gashüllen	1 – 50 Tage	10% - 20%
Cepheiden (Typ II) (= W-Virginis Veränderliche)	Alte Sterne, sechs mal schwächer als Cepheiden vom Typ I	Längerperiodisch als Cepheiden vom Typ I	10% - 20%
RR-Lyrae-Sterne	Alte kohlenstoffarme Sterne mit pulsierender Oberfläche (Starke Verwandtschaft mit Cepheiden-Veränderlichen)	Stunden bis 1.5 Tage	1 bis 2m