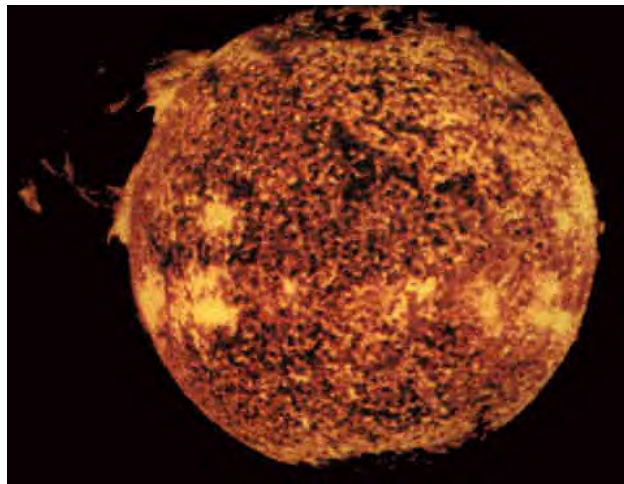
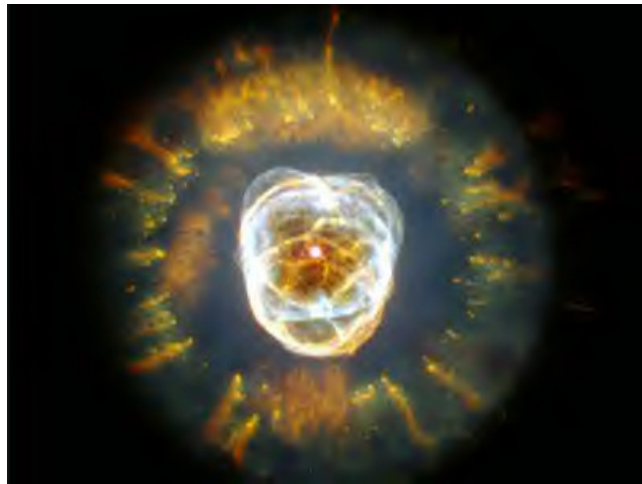


# Sterne

Als Astronomische Objekte  
und  
Ihre Rolle im Dasein des Universums



## **Gliederung:**

1. Vorwort und These
2. Entstehung von Sternen
  - 2.1. Rotation
3. Aufbau eines Sterns
  - 3.1. Schalenbau eines Sterns
  - 3.2. Zentralgebiet
  - 3.3. Strahlungszone
  - 3.4. Konvektionszone
  - 3.5. Photosphäre
  - 3.6. Chromosphäre
  - 3.7. Korona
4. Strahlung
  - 4.1. Wellenstrahlung
  - 4.2. Teilchenstrahlung
    - 4.2.1. Solares Neutrino Defizit
5. Ausgleich der Gravitation durch Strahlendruck
6. Kernfusion und Elemententstehung
  - 6.1. Kernfusion unter Betrachtung quantenmechanischer Aspekte
7. Klassifizierung von Sternen durch ihre Spektren
  - 7.1. Größenklassen von Sternen
  - 7.2. Populationen
8. Das Dasein eines Sterns
  - 8.1. Sterne kleiner Masse
  - 8.2. Sterne großer Masse
  - 8.3. Genauere Erklärung zu genannten und weiteren Sternstadien
    - 8.3.1. Neutronenstern / Pulsare
    - 8.3.2. Quarksterne
    - 8.3.3. Schwarze Löcher
9. Hertzsprung-Russell-Diagramm
10. Doppelsternsysteme
11. Relation von Masse und Lebensdauer
12. Bedeutung und Nutzen
  - 12.1. Elemententstehung und Verteilung durch galaktische Fontänen
  - 12.2. Voraussetzung zum Leben
  - 12.3. Gravitationslinseneffekt als Anwendung
13. Fazit und Schlusswort
14. Einige Begriffserklärungen und Anmerkungen
15. Anhang mit Bildern
16. Quellen

## 1. Vorwort und These

Nach der, zurzeit akzeptierten Theorie, der Urknalltheorie, entstand unser Universum vor etwa 13,7 Milliarden Jahren. Diese relativ genaue Zeitangabe ist durch Messungen von Röntgenstrahlung, welche kontinuierlich vom sichtbaren Teil des Universum ausgeht, und anschließender Auswertung möglich. Nichts existierte vor dem Urknall, weder Raum noch Zeit oder andere Dimensionen<sup>1</sup>. Mit dem Urknall entstanden der Raum, der seit dem mit einer hohen Geschwindigkeit expandiert und die Zeit. Da der Urknall aus einem Ungleichgewicht heraus entstand, konnte sich nicht die komplette Materie und Antimaterie in Strahlung vernichten, wodurch es zur Entstehung von Elementarteilchen wie zum Beispiel Quarks, Elektronen und andere Leptonen kommen konnte<sup>2</sup>. Durch die stetige Expansion kühlte sich das Universum ab und es konnten schließlich Atome entstehen. Die große Mehrzahl dieser Atome war Wasserstoffatome mit nur einem Proton, einen Elektron und Null bis zwei Neutronen pro Atom. Nur ein geringer Teil der Elementarteilchen fanden sich zu, den im Periodensystem darauf folgenden Elementen, Helium mit zwei Protonen, variierter Neutronenzahl sowie zwei Elektronen und Lithium mit immerhin drei Protonen, Elektronen und ebenfalls variierter Neutronenzahl zusammen. Wie entstanden nun aber all die anderen Elemente? Genau diese Fragestellung will ich in den Zusammenhang mit dem Dasein der Sterne und ihrer Rolle im Universum bringen. Um diese Beziehung klären zu können muss man natürlich zuerst die Sterne als einzelnes untersuchen, bevor man ihre Stellung im Universum einzugliedern vermag.

## 2. Entstehung von Sternen

Voraussetzung für das Entstehen eines Sterns ist das Vorhandensein einer Gaswolke im interstellaren Raum. Meist sind diese Gaswolken so gigantisch, dass aus ihnen nicht ein Stern entsteht, sondern Tausende. Deswegen nennt man solche Gaswolken auch Sternentstehungsgebiete oder Sterngeburtsorte (im englischen auch als „Starbursts“ bezeichnet). Solche Sternentstehungsgebiete sind zum Beispiel der Adlernebel (Abb. 1) oder der Orionnebel. Diese vielen Sterne bilden sich aber nicht alle zur gleichen Zeit. Im Gegenteil, einige Sterne entstehen erst, wenn schon wieder andere Sterne, die sich im selben Nebel gebildet hatten, „sterben“.

Wie genau entsteht nun aber ein Stern in so einer Gaswolke?

In solch einer Gaswolke befindet sich eine hohe Anzahl an Teilchen, im Gegensatz zum interstellaren Raum, wo im Durchschnitt ein Teilchen pro Kubikmeter vorhanden ist. In einer Gaswolke hingegen ist die Dichte an Teilchen viel größer und kann zum Beispiel über 100 Teilchen pro Kubikzentimeter enthalten. Diese Dichte ist überhaupt erst nötig damit sich die Wolke verdichtet. Dennoch haben die Teilchen im Vergleich zu ihrer Größe einen geräumigen Abstand zueinander. Durch Anziehungskräfte der Teilchen untereinander verringert sich allerdings dieser Abstand kontinuierlich. Folglich bilden sich in der großen Gaswolke Gebiete mit dichterem Gas heraus (in diesen Gebieten wird später ein Stern entstehen). Dadurch, dass sich immer mehr Teilchen zusammenziehen, wird auch die Gravitationskraft des dichter werdenden Gases erhöht, wodurch noch mehr Gas angezogen wird. Immer mehr Teilchen befinden sich in einem konstanten, bis kaum wachsenden Volumen, wodurch sich die Temperatur der Gaswolke erhöht. Diese Temperaturerhöhung ist folgendermaßen zu

erklären. Anfangs besaßen die Gasteilchen schon eine gewisse, wenn auch nur geringe, Geschwindigkeit und damit auch kinetische Energie. Durch die Verdichtung des Gases wird die kinetische Energie, wie auch die Einzelgeschwindigkeit der Teilchen pro Volumeneinheit größer, wodurch auch die Reibung der Teilchen gegeneinander vergrößert wird. Diese Reibung ist der Grund für die erhöhte Temperatur. Der sich bildende Stern zieht sich durch die größer werdende Eigengravitation immer mehr zusammen, wodurch sich auch wiederum seine Temperatur, aus schon genanntem Grund, erhöht. Die Temperatur ist im Kern des Sternes logischerweise am größten, weil dort der stärkste Druck herrscht. Ist ein Druck für eine Innentemperatur von etwa 1000000 °C erreicht, so beginnen im Kern des Sterns die Kernfusionsprozesse (auf die ich später noch genauer eingehen werde). Der Stern ist „geboren“!

## 2.1. Rotation

Es wurde im ganzen Universum noch kein Stern gefunden, der sich nicht dreht. Das ist kein Zufall, aber woran liegt das? Die Sterne rotieren zwar mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten um ihre Achsen, dennoch ist der Grund stets der gleiche und ist in der Entstehungszeit des Stern zu suchen.

Zu Beginn ist in der großen Gaswolke, in der später Sterne entstehen keine Drehung vorhanden.

Gaswolken sind aber nicht homogen, haben also nicht überall die gleiche Dichte.

In der großen Gaswolke gibt es also Bereiche in denen die Dichte größer ist als in anderen. Dort wird ein Stern entstehen.

In diesen Stellen kommt es zum Anstoßen der Gasteilchen untereinander. Dies geschieht allerdings nicht symmetrisch. Die Gaswolke wird also nicht genau in ihren Mittelpunkt getroffen (dies wäre ein zentraler elastischer oder unelastischer Stoß), was keine Drehung hervorrufen würde.

Der „Dichteklumpen“ beginnt sich zu drehen, weil das Anstoßen von asymmetrischer Art ist. Die Gaswolke wird zum Beispiel auf einer Seite mehr als auf der anderen angestoßen.

Durch diesen Vorgang bei der Sternentstehung erhält die Gaswolke eine Erhaltungsgröße, den Drehimpuls. Der Drehimpuls bleibt in einem System, also in diesem Fall in der Gaswolke, ewig erhalten.

(Der Drehimpuls in der großen Gaswolke, in der sich die Verdichtungen befinden, in denen Sterne entstehen, ist allerdings gleich Null, weil sich die Vektoren der Drehimpulse gegenseitig wieder aufheben.)

Beachten wir nun aber nur eine dieser vielen Gasverdichtungen:

Dieser Teil dreht sich also aus schon genannten Gründen.

Die Gaswolke zieht mehr Materie an und zieht sich unter ihrem Eigengewicht zusammen, wodurch der Radius kleiner und die Geschwindigkeit erhöht wird und zwar in genau dem Verhältnis, dass der Drehimpuls auf Grund seiner Eigenschaften als Erhaltungsgröße konstant bleibt (die Masse bleibt natürlich ebenfalls gleich).

$$L = m \cdot r \cdot v$$

L= Drehimpuls

m= Masse

r= Radius

v= Geschwindigkeit

Durch die Drehung tritt natürlich auch eine andere Kraft auf, die Zentrifugalkraft. Wodurch die Gaswolke auseinander gezogen wird. Um aus der Gaswolke einen Stern entstehen zu lassen muss ein Teil des Drehimpulses durch Reibung der Gasteilchen, wodurch Hitze entsteht, nach außen transportiert werden. (Dort können eventuell Planeten entstehen, die dann auch einen eigenen Drehimpuls besitzen.)

Folglich lässt die Zentrifugalkraft im Zentrum der Wolke nach und das Gas kann zu einem Stern kollabieren.

(Der komplette Drehimpuls der Gaswolke bleibt dabei konstant, nur seine Verteilung ändert sich.)

### **3. Aufbau eines Sterns**

Ich werde den Aufbau eines Sterns am Beispiel unserer Sonne durchführen, weil dieser Stern am besten erforscht ist und Ergebnis als relativ sicher gelten.

#### **3.1. Schalenbau eines Sterns**

Ein Stern ist in Schichten aufgebaut, ähnlich einer Zwiebel und besteht aus dem Zentralgebiet im Kern, der darauf folgenden Strahlungszone, Konvektionszone, Photosphäre, Chromosphäre und schließlich der Korona (Abb. 2). In folgendem Abschnitt werde ich die einzelnen Bestandteile, im Inneren beginnend, genauer beschreiben und erklären. Dabei werde ich von den Beobachtungen über die Sonne ausgehen, da diese am besten erforscht ist, allerdings kann man diese Ergebnisse im Wesentlichen auch auf alle anderen Hauptreihensterne, die Sonne ist ein solcher, dieser Größe übertragen.

### **3.2. Zentralgebiet**

Das Zentralgebiet stellt, wie schon erwähnt, den Kern eines Sterns dar. Dort laufen die Kernfusionsprozesse unter einer Temperatur von 15 Millionen Kelvin und einer Dichte von  $100 \text{ g/cm}^3$  (beide Werte für die Sonne) ab. Der Kern besteht anfänglich hauptsächlich aus Wasserstoff, welcher durch Kernfusion allmählich in Helium umgewandelt wird. So befindet sich in der meiste Zeit eines Sternendaseins Wasserstoff sowie Helium im Zentralgebiet. All diese Informationen über den, für uns nicht sichtbaren, Kern sind durch Neutrinos (entstehen bei Kernfusion, wobei ich später noch eingehen werde) möglich, weil diese fast ohne Wechselwirkung die Sonne verlassen können, sodass man die kaum verfälschten Eigenschaften der Neutrinos, wenn auch sehr schwer, messen kann und damit auf die Zusammensetzung der Sonne schließen kann.

### **3.3. Strahlungszone**

Die darauf folgende Schicht ist die Strahlungszone. Ihren Namen hat diese Sphäre, weil sich die Photonen dort als Strahlung und nicht als Teilchen fortbewegen<sup>3</sup>.

Dieser Bereich umschließt den Kern vollständig, sodass diese Zone, die bei der Kernfusion entstehenden, Gammastrahlen absorbiert.

Die sich immer wiederholende Absorption und Emission der Gammastrahlen hat zur Folge, dass die Strahlung mehrere Millionen Jahre bis zur Sonnenoberfläche benötigt. Das heißt, dass die Strahlung, die auf die Erdoberfläche gelangt von Kernfusionsprozessen, welche vor Millionen von Jahren diese Strahlung erzeugten, stammt (da sind die weiteren acht Minuten, die die Sonnenstrahlung von der Sonnenoberfläche zu uns benötigt eher trivial).

### **3.4. Konvektionszone**

Die dritte, von Innen gesehene, Sphäre ist die Konvektionszone.

In dieser Zone „prallen“ die Gammaphotonen an die solare Materie, sodass diese Photonen langsam einen Teil ihrer Energie verlieren, was zur Folge hat, dass die Energie der Gammastrahlung identisch mit der Wärmeenergie der solaren Materie ist. Unter diesen Voraussetzungen kommt es zu Konvektionsprozessen. Durch die Gammastrahlung wird das solare Gas aufgewärmt, wodurch sich dessen Dichte verringert und an die Oberfläche aufsteigt. Dort emittiert das Gas, die von den Gammastrahlen absorbierte, Energie in Form von Strahlung. Folglich hat das Gas weniger Energie und damit auch eine abnehmende Temperatur, was zwangsläufig mit einer Dichtabnahme zusammenhängt, wodurch das Gas absinkt und wieder für neue Konvektionsprozesse vorhanden ist. Woher der Name der Zone kommt muss ich wohl nicht mehr erwähnen.

### 3.5. Photosphäre

Die folgende Sicht ist die Photosphäre, welche zusammen mit der Chromosphäre die äußerste Sphäre darstellt. Die Photosphäre ist als einzige Schicht direkt erkennbar und ist ungefähr 500 Kilometer mächtig und hat eine Temperatur von ca. 6000 Kelvin. Allerdings ist nicht jeder Teil der Photosphäre gleichwarm. Es gibt Stellen, die um 1000 bis fast 2000 Kelvin unter der Umgebungstemperatur liegen und dadurch dunkler als ihre Umgebung sind. Diese Bereiche werden als Sonnenflecken (Ausmaße von 7000 bis zu 50.000 Kilometern) bezeichnet, welche durch Magnetfelder erzeugt werden. Die Magnetfelder verhindern die Konvektion in diesen Regionen, sodass die Sonnenenergie nicht nach außen gelangen kann.

### 3.6. Chromosphäre

Die Chromosphäre schließt an die Photosphäre an. Dort herrschen Temperaturen von ca. 10.000 Kelvin. Die Chromosphäre bildet die mittlere Atmosphäreschicht der Sonne und ist ca. 2000 Kilometer dick. Sie ist allerdings nur zu Sonnenfinsternissen als glühend roten Ring zu erkennen, da sonst die Photosphäre diesen Anblick überstrahlt. Auch hier ist das Magnetfeld der Sonne für einige Erscheinungen die Erklärung. Das Plasma (Atomkern und Elektronen sind getrennt) besitzt hier natürlich eine viel geringere Dichte als im Sterninneren, sodass es die Magnetfelder nicht einschließen kann und das Magnetfeld die Plasmateilchen beeinflusst. Dies hat zur Folge, dass gigantische Feuer-Fontänen ausbrechen können.

Wie sind aber die Temperaturen von 10.000 Kelvin zu erklären, die höher als in der Photosphäre sind, die aber dichter und trotzdem kühler ist?

Der Energietransport in der Chromosphäre geschieht in Form von Druckwellen.

Weil allerdings die Dichte dieser Schicht nach Außen hin immer mehr abnimmt, muss die Amplitude dieser Druckwelle immer mehr zunehmen, wodurch es zu einer Verdichtung des Plasmas kommt. Dabei entsteht mechanische Energie, welche in Wärmeenergie umgewandelt wird und damit die hohen Temperaturunterschiede zur Photosphäre erklärt.

### 3.7. Korona

Die so genannte Korona bildet die letzte Schicht. Sie besteht aus extrem dünnen, heißen Gas, welches eine Temperatur von mehreren Millionen Kelvin besitzt, und ragt viele Millionen Kilometer in den interstellaren Raum.

Die Korona hat nur eine sehr geringe Dichte, welche, je nach Abstand zur Sonnenoberfläche, zwischen  $10^{-16}$  g/cm<sup>3</sup> und  $10^{-19}$  g/cm<sup>3</sup> schwankt. Die Korona ist, wie die Chromosphäre, nur bei totaler Sonnenfinsternis erkennbar. Sie ist allerdings nur sichtbar, weil die „heißen“, besser gesagt energiereichen, Elektronen des Koronagases das Licht der Photosphäre streuen.

Wie schon erwähnt beträgt die Temperatur der Korona, trotz ihrer geringen Dichte, mehrere Millionen Kelvin. Wie ist das zu erklären? Gar nicht!

Anscheinend verstößt die Korona gegen die Gesetze der Thermodynamik und lässt einen Wärmetransport von kälteren in den wärmeren Bereich zu.

Viele Astronomen versuchen sich die hohe Temperatur durch das Magnetfeld der Sonne zu erklären.

Die Korona gibt ständig Materie ab, die hauptsächlich aus Protonen und Elektronen besteht. Diese abgestrahlte Materie bezeichnet man als Sonnenwind. Die Teilchen bewegen sich so schnell, dass sie selbst in der Umgebung der Erde noch Geschwindigkeiten von bis zu 400 km/s besitzen.

## **4. Strahlung**

Ein Stern sendet sowohl Wellen- als auch Teilchenstrahlung aus. Alle Strahlung der Sonne hat die Kernfusion als erste grundlegende Energiequelle. In den nächsten drei Gliederungspunkten werde ich den weiteren Verlauf der Strahlenentstehung und die Strahlungsarten näher beschreiben.

### **4.1. Wellenstrahlung**

Zu der Wellenstrahlung gehören elektromagnetische Strahlen aller Wellenlängen beziehungsweise Frequenzen. Beginnend bei Radiostrahlung über Infrarotstrahlung, sichtbares Licht und ultraviolettes Licht bis hin zu Röntgenstrahlen. Da sich diese Strahlungsarten mit Lichtgeschwindigkeit (in Vakuum 299792,458 km/s) fortpflanzen, benötigen sie zum Beispiel für die im Durchschnitt 149,6 Millionen Kilometer von der Sonnenoberfläche bis zur Erdoberfläche nur ca. acht Minuten.

Aber wo hat diese Strahlung ihren Ursprung? Im Inneren eines Sterns finden Kernfusionsprozesse statt, die unter anderem zur Energiefreisetzung in Form von hochenergetischer elektromagnetischer Strahlung (Gammastrahlung) führen. Durch Absorptions- und Emissionsprozesse, die die Strahlung auf dem Weg zur Sternoberfläche durchläuft, wird die hochenergetische Gammastrahlung teilweise in die anderen Spektren der elektromagnetischen Strahlung umgewandelt.

Diese Umwandlungsprozesse enden größtenteils nach der Photosphäre, da die danach folgende Korona eine zu geringe Dichte für nennenswerte Absorptions- und Emissionsprozesse besitzt. Ein weiterer Prozess der zur Emission von Strahlung führt sind die diskreten Energiesprünge in Atomhüllen, wobei Photonen emittiert werden, wenn ein Elektron eine niedrigere Energiestufe erreicht, was auch in der Korona passiert. Bei positiver oder negativer Beschleunigung von geladenen Teilchen, die von jedem Stern ausgehen, werden ebenfalls Photonen frei.

Außerdem sind Sterne Schwarzkörperstrahler. Solche Objekte setzen mit zunehmender Temperatur auch höherenergetische Wellenstrahlung frei, also

Strahlung mit höherer Frequenz und niedrigerer Wellenlänge, als bei einer geringeren Temperatur. Da die Energie eines Photons mit

$$E = h \cdot f$$

definiert ist gibt ein Stern umso energiereichere Strahlung an seinen Umgebung ab, umso höher seine Temperatur beziehungsweise die Frequenz der emittierten Strahlung ist. Dabei stellt E die Energie, h das plancksche Wirkungsquantum, eine Konstante mit dem Wert (Joule-Sekunden), und f die Frequenz dar. Der Wert der Energie müsste theoretisch um die Anzahl der emittierten Photonen vervielfacht werden um die Gesamtenergie der Strahlung zu berechnen. Allerdings brauche ich wohl kaum zu erwähnen, dass diese Zahl sehr groß ist, wodurch diese Vorgehensweise unvorteilhaft ist. Die Strahlungsleistung  $P_f(T)$  auf einer Einheitsfläche eines solchen schwarzen Körpers kann man wie folgt berechnen.

$$P_f(T) = \frac{2 \cdot h \cdot f^3}{c^2} \cdot \frac{1}{e^{\frac{h \cdot f}{k \cdot T}} - 1}$$

Dabei ist h wieder das plancksche Wirkungsquantum, f die Frequenz und T die Temperatur in Kelvin. Nach dieser Formel geht ebenfalls hervor, dass mit steigender Temperatur auch mehr Strahlung abgegeben wird. Integriert man diese Formel, so erhält man die von der Einheitsfläche abgestrahlte Gesamtleistung.

$$\int_0^{\infty} P_f(T) df = P_s = \sigma \cdot T^4$$

Multipliziert man diese wiederum mit der Oberfläche eines bestimmten Sterns

$$A = 4 \cdot \pi \cdot r^2$$

, so erhält man die, für diesen Stern zutreffende, Gesamtstrahlungsleistung, die unter dem Namen der Leuchtkraft L bekannt ist.

$$L = \sigma \cdot A \cdot T^4$$

T ist stets die Temperatur in Kelvin und  $\sigma$  die Stefan-Boltzmann-Konstante  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$

## 4.2. Teilchenstrahlung

Von Sternen wird nicht nur Wellenstrahlung, sondern auch die so genannte Teilchenstrahlung ausgesendet. Sie besteht aus Protonen, Elektronen und Neutrinos. Diese Teilchen, abgesehen von den Neutrinos, bewegen sich, von der Sonne als Beispiel ausgegangen, mit Geschwindigkeiten von bis zu 1000 km/s, oder gar 2000 km/s. Die durchschnittliche Geschwindigkeit liegt aber nur bei 200 km/s bis 800 km/s. Bei den maximalen Geschwindigkeiten benötigen die Teilchen zum Beispiel von der Sonne zur Erde nur ca. ein bis zwei Tage. In diesem bestimmten Fall (dem der Sonne) wird der Teilchenstrom als Sonnenwind bezeichnet. Treffen diese Teilchen dann auf das Erdmagnetfeld, so werden sie auf unter 500 km/s abgebremst und erreichen die Erdoberfläche größtenteils nur über die magnetischen Pole, was die berühmten Polarlichter hervorrufen kann. Der Teilchenstrom eines anderen Sterns kann natürlich auch eine noch größere Geschwindigkeit besitzen, da diese von verschiedenen Faktoren abhängig ist.

Die Ursache des Teilchenstroms ist in der Korona zu suchen. Die Druckdifferenz von Korona und interstellarem Raum, der einen viel geringere Dichte besitzt, drückt, beziehungsweise zieht, die in der Korona vorhandenen Teilchen regelrecht in den interstellaren Raum hinaus. Eine weitere Ursache für den stetigen Teilchenstrom sind die gewaltigen Eruptionen auf der Oberfläche von Sternen, die die Teilchen mit hohen Geschwindigkeiten herausschleudern. Der Teilchenstrom ist deshalb auch nicht immer konstant, weil diese Ausbrüche nicht gleichmäßig auftreten.

### 4.2.1. Solares Neutrino Defizit

Ich möchte an dieser Stelle noch ein interessantes Thema ansprechen, welches den Physikern lange Zeit ein ungelöstes Rätsel aufgab. Um dieses Problem zu erläutern muss man sich aber vorab mit der Elementarteilchenphysik, um genauer zu sein mit den Neutrinos, beschäftigen.

Neutrinos sind Elementarteilchen, die nahezu keine Wechselwirkung eingehen und die unter anderen bei der Kernfusion entstehen. Es gibt drei Arten von Neutrinos: Elektron-Neutrinos, Myon-Neutrinos und Tau-Neutrinos<sup>4</sup>.

Nun aber zum solaren Neutrino Defizit:

Wie schon erwähnt produziert ein Stern, so auch unsere Sonne, bei der Kernfusion Neutrinos. Allerdings werden bei diesen Reaktionen nur Elektron-Neutrinos gebildet. Man errechnete die Anzahl der Elektron-Neutrinos, die von der Sonne emittiert werden müssten und prüfte diese Anzahl in einem großen Experiment in Kanada, im Sommer 2002, auf das ich hier aber nicht näher eingehen will, nach. Wie sich aber herausstellte kommen nur ca. ein Drittel des errechneten Wertes für Elektron-Neutrinos an.

Was ist also mit den anderen zwei Dritteln der Elektron-Neutrinos passiert?

Sie haben sich umgewandelt! Die Elektron-Neutrinos wandeln sich auf dem Weg Sonne-Erde in Myon-Neutrinos sowie in Tau-Neutrinos um (dieser Vorgang wird als

Neutrinooszillation bezeichnet). Diese Neutrinos konnte das Experiment in Kanada nicht nachweisen, weshalb auch die Neutrinozahl nicht mit den Rechnungen übereinstimmte.

## 5. Ausgleich der Gravitation durch Strahlendruck

Warum bricht der Stern unter seiner Eigengravitation nicht zusammen sondern bleibt stabil? Der Grund dafür ist, dass die nach innen wirkende Gravitation von dem Strahlendruck ausgeglichen wird, da dieser in entgegengesetzter Richtung, also nach außen, wirkt. Die Formel für die Berechnung des Strahlendrucks lautet:

$$p_s = \frac{1}{3} \sigma \cdot T^4$$

wobei Sigma ( $\sigma$ ) die Stefan-Boltzmann-Konstante und T die Temperatur darstellt.

Bei der Stefan-Boltzmann-Konstante handelt es sich um einen sehr kleinen Wert ( $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ ), weshalb der Strahlendruck nur bei sehr hohen Temperaturen eine Rolle spielt. Und genau solche hohen Temperaturen herrschen in den Zentralgebieten von Sternen, weshalb dort der Strahlendruck nicht vernachlässigt werden kann.

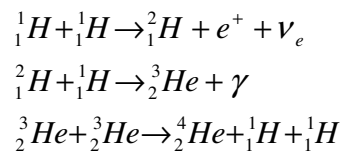
Eine weitere Komponente, die der Gravitation entgegenwirkt ist der Gasdruck ( $p_G$ ). Also ergibt sich für den Gesamtdruck, der gegen die Schwerkraft „arbeitet“:

$$p_{\text{Gesamt}} = p_s + p_G$$

## 6. Kernfusion und Elemententstehung

Die Kernfusion liefert einem Stern die Energie, weshalb er strahlt und wie eben erläutert nicht zusammenbricht, und findet im Zentralgebiet statt. Dort herrschen hohe Temperaturen (in der Sonne zum Beispiel 15 Millionen Kelvin), weshalb die dort vorhandenen Wasserstoffmengen als Plasma vorliegen. Am Anfang der Kernfusion und der Elemententstehung stehen Wasserstoffkerne, also Protonen. Durch die hohe Temperatur und der kinetischen Energie der Protonen ist es ihnen möglich die Abstände zweier Protonen so zu verringern, dass die, durch die Gleichladigkeit (positiv) entstehende coulombsche Abstoßungskraft überwunden werden kann und die gering reichende, aber sehr starke Kernkraft zu wirken beginnt und die Protonen verschmelzen. Diese fusionierten Protonen werden als Deuteron bezeichnet. Allerdings wandelt sich eines dieser Protonen in ein Neutron um, wobei ein Positron und ein Elektron-Neutrino emittiert werden, die aber nur eine geringe Energie besitzen. Dieses Deuteron fusioniert wiederum mit einem weiteren Proton und sendet dadurch ein hochenergetisches Gammaquant aus, was zur Entstehung eines so genannten Helium-3-Kern führt. Auf der gleichen Weise wie eben erläutert entsteht ein weiterer Helium-3-Kern und verschmelzt mit dem anderen Helium-3-Kern zu

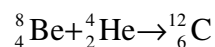
einem Helium-4-Kern, wobei wieder zwei freie Protonen entstehen. Die Gesamtenergie die bei dieser Fusion frei gesetzt wird beträgt 26,72 MeV. Folgende Gleichungen sollen die Kernfusion noch einmal verdeutlichen:



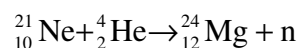
So entsteht ein Heliumkern, aber wie sind die anderen schwereren Elemente entstanden<sup>5</sup>? Es werden einfach größere Atomkerne miteinander verschmolzen. Dies möchte ich an dem Beispiel von Beryllium verdeutlichen. Berylliumkerne entstehen durch die Fusion von zwei Heliumkernen und bestehen demzufolge aus vier Protonen, sowie vier Neutronen.



Um nun zum Beispiel Kohlenstoffkerne „herzustellen“ verschmilzt der Berylliumkern mit einem weiteren Heliumkern.



Es gibt natürlich auch Fusionen, bei denen wieder frei Neutronen entstehen, wie zum Beispiel bei der Verschmelzung von einem Neonkern mit einem Heliumkern zu einem Magnesiumkern.



Auf diese Weise können alle Elemente des Periodensystems bis Eisen hervorgebracht werden. Um noch schwere Kerne zu bilden ist die Temperatur jedes Sterns zu gering. Alle Elemente nach Eisen bis hin zu Uran entstehen nur bei Supernovaexplosionen, da nur so die benötigten Energien hervorgerufen werden können.

All die Elemente die bei der Kernfusion im Zentralgebiet gebildet werden bestehen ohne Elektronen (nur die Kerne der Elemente sind vorhanden), da im Inneren die Temperaturen so hoch sind, dass dort das Plasma als Aggregatzustand vorherrscht. Das heißt, dass Atomkerne und Elektronen getrennt voneinander sind. Erst wenn die Temperaturen sinken, zum Beispiel, wenn die Kernfusion erlischt, oder das Plasma durch eine Supernova in den interstellaren Raum geschossen wird und abkühlen können die Atomkerne die Elektronen „einfangen“ und werden zu wirklichen Atomen.

Die Proton-Proton-Reaktion wird noch einmal auf der Abbildung 3 veranschaulicht.

### 6.1. Kernfusion unter Betrachtung quantenmechanischer Aspekte

Durch die enorme Hitze und der kinetischen Energie der Protonen im Sterninneren ist die Proton-Proton-Reaktion zwar möglich, aber unter diesen Umständen könnten die Sterne, eingeschlossen unsere Sonne nie eine solche Leuchtkraft erreichen, weil nicht genügend Protonen miteinander reagieren. Wie kommt es aber zu der hohen Fusionsrate? Die Antwort findet man in der Quantenphysik.

Ein quantenmechanischer Effekt namens Tunneleffekt ist die Ursache. Dieser „drückt“ die benötigte Fusionstemperatur sogar auf nur fünf Millionen Kelvin. Ich möchte die Wirkung des Tunneleffekts nun bildlich erklären, wobei ich mit folgendem Gedankenexperiment beginnen möchte:

Man stelle sich einen Hügel und eine davor liegende Kugel vor. Die Kugel bewegt sich durch ihre kinetische Energie den Hügel hinauf, wobei diese Energieform in potenzielle Energie umgewandelt wird. Hat die Kugel zu wenig Energie, so kann sie den Hügel nicht bewältigen, hat sie aber genügend kinetische Energie, so erreicht sie die Höhengipfel und rollt auf der anderen Seite wieder hinab (Ich gehe hier nicht auf die Beziehungen von  $E(\text{pot})$  und  $E(\text{kin})$  ein, weil dies nur eine Verdeutlichung darstellen soll). Diesen erwähnten Hügel kann man auch als Analogie zu den so genannten Potenzialwall sehen, den die Kugel überwinden muss. Ein Potenzialwall stellt die aufzubringende Energie für eine Folge, ein Ereignis oder einer Reaktion dar. So beschreibt die klassische Physik die Überwindung des Potenzialwalles (in unserem Beispiel die Überquerung des Hügels von Kugel).

In der Quantenmechanik ist es aber möglich den Potenzialwall zu „durchtunneln“ oder zu „überspringen“. Man stelle sich unsere eigentliche Problemsituation der Kernreaktion wieder vor. Zwei Protonen kommen sich so nahe, dass sie sich abstoßen, da sie ja beide positiv geladen sind. Dadurch kommt es zur Bildung eines Potenzialwalles, den die Protonen überwinden müssen um zu fusionieren. Nach der klassischen Physik erhalten die Protonen die Energie um den Potenzialwall zu überwinden durch Wärme. Allerdings kann es auch zum Tunneleffekt kommen. Dabei befindet sich das Proton in dem einen Augenblick noch auf der einen Seite des Potenzialwalles und im nächsten Moment sofort auf der anderen Seite, ohne den Potenzialwall wirklich zu überwinden zu haben. Es entsteht der Eindruck, dass der Potenzialwall einfach „durchtunnelt“ wurde. Besser ist es allerdings zu sagen, dass der Potenzialwall übersprungen wurde. Dies alles hat zur Folge, dass nun die Protonen ohne Überwindung, in klassischer Hinsicht, des Potenzialwalles fusioniert sind. Aber wie kommt dieser Effekt genau zustande? Aus folgendem Grund:

In der quantenmechanischen Welt ist nichts genau bestimmt. Das heißt, dass man auch die Energie eines Teilchens, auch unserer Protonen die fusionieren, nicht genau bestimmen kann, (was in der Heisenbergschen Unschärferelation ausgedrückt wird). Deshalb gibt es immer winzige, endliche Wahrscheinlichkeiten, dass die Energie eines quantenmechanischen Teilchens groß genug ist, um den Potenzialwall zu überwinden / zu durchtunneln.

Ich möchte die Winzigkeit dieses quantenmechanischen, aber dennoch fundamentalen, Effekts an folgender Zahl fest machen. Denn nur einer von  $10^{18}$  Stößen von Protonen führt zu einer Fusion durch Tunneleffekt. Nur durch die unglaublich riesige Anzahl an Protonen sind die vielen Proton-Proton-Reaktionen möglich.

## 7. Klassifizierung von Sternen durch ihre Spektren

Sterne kann man durch viele Eigenschaften Charakterisieren. Unter anderem auch durch ihre typischen Spektren. Dies gilt allerdings nur für Sterne, die ihr Spektrum über einen längeren Zeitraum, wie zum Beispiel über mehrere Milliarden Jahre, nicht ändern. Also ist die Klassifikation nicht bei den so genannten Veränderlichen Sternen möglich, da sich dort die Spektren in Perioden von weniger als einem Jahr ändern (manche sogar in nur einigen Tagen).

Lässt man also einen Lichtstrahl auf ein Beugungsgitter oder ein Prisma fallen, so entsteht ein charakteristisches Spektrum dieses Lichtes. Nun gibt es drei Arten von Spektren, die so genannten Spektraltypen. Das kontinuierliche Spektrum, das Emissionsspektrum und das Absorptionsspektrum. Im ersten Fall, also im kontinuierlichen Spektrum, entsteht ein zusammenhängendes Farbband, wie es zum Beispiel bei Licht der Sonne der Fall ist. Beim Emissionsspektrum treten im Spektrum nur verschiedenfarbige Linien auf. Der Grund dafür liegt daran, dass solche Spektren durch Licht erzeugt werden, was von heißen Gasen aus emittiert wurde. Durch die einzelnen Linien in diesem Spektrum lassen sich dann Rückschlüsse über die elementare Zusammensetzung des Gases schließen. Das Absorptionsspektrum entsteht, wenn das von einem Stern emittierte Licht von dessen oberflächennahen Schicht Bereiche bestimmter Wellenlängen absorbiert. Die dunklen Linien, die dann im Spektrum auftreten, zeigen welche Substanzen das Licht absorbiert haben (Spektralanalyse).

Durch diese verschiedenen Spektrallinien, die durch die verschiedenen Spektraltypen entstehen, lassen sich nun die Sterne klassifizieren. Die unterschiedlichen Spektren der Sterne sind insbesondere von deren Temperatur anhängig. Durch diese Erkenntnis entwickelte man eine Reihung verschiedener Spektralklassen nach abnehmender Oberflächentemperatur, welche mit Buchstaben des Alphabets bezeichnet wurden.

Die einzelnen Spektralklassen sind hier mit kurzer Erklärung aufgelistet:

O – Absorptionslinie des ionisierten Heliums; starke Linien von C, Na, O und Si.

Oberflächentemperatur ca. 22000 °C. Typischer Vertreter: Zeta Puppis

B – Absorptionslinien des neutralen Heliums; Linien von H, C, O und ionisierten Si.

Es handelt sich um blauweiße Sterne; Temperatur ca. 14000 °C

Typischer Vertreter: Riegel

A – Schwache Linien des neutralen Heliums;

starke Wasserstofflinien in der Klasse A0

; starke Linien von Mg und ionisierten Si; Es sind weiße Sterne;

Temperatur ca. 10000°C Typischer Vertreter: Wega

F – Abnahme des Wasserstoffs, Linien von ionisierten Ca verstärken sich;

Metalllinien treten auf; Es sind weißlich gelbe Sterne, Temperatur ca. 6700°C

Typischer Vertreter: Canopus

G – Schwache Wasserstofflinien; stark ausgeprägte Linien von ionisierten Ca;

Es treten Banden der Cyangruppe (CN) und der CH-Ionen auf;

Es sind gelbe Sterne; Temperatur ca. 5500°C; Typischer Vertreter: Sonne

K – Schwächere Linien von ionisierten Ca; stärkere Linien des neutralen Ca;

Metalllinien vorherrschend; gelb bis orangefarbene Sterne;

Temperatur ca. 3800°C; Typischer Vertreter: Pollux

M – Titanoxid-Banden (ist auf Moleküle zurückzuführen); rote Sterne;

Temperatur ca. 1800°C; Typischer Vertreter: Beteigeuze

Jenseits von M gibt es auch noch die Spektralklassen R, N und S, welche aber kaum bekannt sind. Innerhalb der oben beschriebenen Klassen erfolgt eine weitere Gliederung durch die Zahlen von 0 bis 9 um die Sterne noch genauer einzuordnen.

Die heutzutage anerkannte MK-Klassifikation enthält zusätzlich zu den Spektren auch Angaben zu den Leuchtklassen, welche durch römische Ziffern gekennzeichnet werden. Dabei steht I für Überriese, II für Heller Riese, III für Normaler Riese, IV für Unterriese und V für einen Hauptreihenstern. Eine komplette Bezeichnung könnte heißen: G2 V – unsere Sonne.

## 7.1. Größenklassen von Sternen

Eine weitere Möglichkeit Sterne zu klassifizieren ist durch ihre Helligkeit und ihrer Entfernung erreichbar. Diese Einteilung erfolgt durch so genannte Größenklassen, wovon es zuerst nur sechs Klassen, oder Magnitudo, gab. Die hellsten Sterne werden mit der ersten Größenklasse bezeichnet. Darauf folgen die Sterne, also die der zweiten Klasse, welche nicht ganz so hell sind. Diese Abstufung nach der Helligkeit zieht sich bis hin zu der sechsten Klasse, welche gerade noch mit dem bloßen Auge erkennbar sind. Dieses, gerade vorgestellte, System wurde erstmals in

der Antike angewandt, und teilt nur Sterne ein, die ohne technische Hilfsmittel beobachtet werden können. Da im Laufe der Zeit, und besonders im 20. Jahrhundert, die Observation des Himmels durch immer leistungsstärkere Teleskope zugenommen hat, muss auch die Skala der Größenklassen erweitert werden. Die 23ste Größenklasse ist gerade noch mit den besten Teleskopen der Welt und sehr langer Belichtungszeit zu erkennen. Die heutzutage absolut höchste Größenklasse ist die 27ste, welche nur mit den besten Weltraumteleskopen beobachtbar ist. Es gibt übrigens auch negative Größenklassen, welche zum Beispiel die Sonne oder der Mond besitzt, da diese so nah sind.

Nun aber noch etwas Genaueres zu den Größenklassen.

Zwischen jeder Größenklasse liegt der Faktor 2,512. Das heißt, dass jede Klasse 2,512-mal heller ist als die darauf folgende. Die Sterne der zweiten Größenklasse sind also 2,512-mal heller als die der dritten. Die Größenklassen werden mit Hilfe von Bolometern und Radiometern gemessen, wodurch die Angaben auf bis zu Hundertstel genau sind. Ich möchte an dieser Stelle noch anmerken, dass für die Größenklassen die scheinbare und nicht die absolute Helligkeit benutzt wird. Die absolute Helligkeit würde die Helligkeit eines Sterns in einer gedachten Entfernung von 10 Parsec ( $1\text{pc} = 3,262\text{ ly}$ ) angeben. Hier noch einmal der Zusammenhang zwischen scheinbarer ( $m$ ) und absoluter Helligkeit ( $M$ ), wobei die Entfernung  $r$  in Parsec angegeben werden muss.

$$M = m + 5 - 5 \cdot \lg r$$

Die Schreibweise für die Größenklassen ist wie folgt: "Größenklasse"  $^m$ , also zum Beispiel  $6^m$ , wobei das hoch  $m$  die Einheit darstellt.

## 7.2. Populationen

Es ist auch möglich die Sterne auf eine andere Art zu untergliedern. In diesem Fall erfolgt die Unterteilung in so genannte Populationen, die von dem Alter der Sterne abhängen. Diese Einteilung von Sternen durch ihr Alter entwickelte der deutsche Astronom Walter Bade, der allerdings später in die USA auswanderte. Es gibt die Population I -, Population II - und die Population III -Sterne. Ich möchte meine Ausführungen bei den Population-III-Sternen beginnen. Diese Sterne existierten nach dem Urknall. Sie waren die ersten Sterne, die nach dem Big Bang entstanden und sind somit die ältesten Sterne, die es je im Universum gab. Bis jetzt gibt es allerdings keine Anzeichen dafür, dass solche Sterne noch existieren.

Die Population-II-Sterne sind die etwas jüngeren, aber dennoch sehr alten Sterne. Die Population-I-Sterne sind die jüngsten Sterne. Sterne die aber gerade erst entstanden sind, wie es sich in den Spiralarmlen einer Galaxie ereignet, werden in der Extremen Population I zusammengefasst. Die Population unterscheiden nicht nur im Alter, sondern auch in ihrem chemischen Aufbau. So haben Sterne der Population II einen geringeren Metallanteil als die Sterne der Population I. Das liegt daran, dass sich die Sterne der Population II im so genannten primordialen interstellaren Medium gebildet haben, wo es eher wenig Metalle gab.

Diese Sterne explodierten dann und setzten ihre fusionierten Metalle frei, die dann für die Entstehung für Population-I-Sterne zur Verfügung stehen, die nun einen höheren Metallanteil besitzen.

## **8. Das Dasein eines Sterns**

Unter diesem Gliederungspunkt möchte ich die Entwicklung von Sternen nach der Entstehung beschreiben, da ich dieses schon im ersten Kapitel gemacht habe. Ich werde auch nicht direkt auf die Hauptreihensterne eingehen, weil ich diese ebenfalls schon ausführlich beschrieben habe. Aber was passiert nach dem Stadium der Hauptreihe, wenn der Stern wieder instabil wird? Dazu ist es erforderlich die Sterne in zwei Kategorien einzuteilen. In Sterne mit kleiner Masse und Sterne mit großer Masse.

### **8.1 Sterne kleiner Masse**

Zuerst betrachten wir denn Fall eines Stern mit kleiner Masse, das heißt mit einer Masse von unter vier- bis fünffacher Sonnenmasse. Ein wichtiges Merkmal solcher Sterne ist, dass es zu keiner Vermischung der Sternmaterie kommt. Das hat zur Folge, dass der fusionierte Wasserstoff im Kern nicht durch Wasserstoff aus den umgebenden Schichten ersetzt werden kann. Die umgebende Schale brennt aber ihrerseits selbst weiter, während der Wasserstoff im Kern völlig zu Helium verbrannt wird. Der nun gänzlich aus Helium bestehende Kern zieht sich zusammen und erwärmt sich dadurch. Auch in den äußeren Schichten kommt es zu Strukturänderungen. Die ständige Zunahme der Dichte im Kern führt dazu, dass es zur so genannten Entartung der Materie kommt. Das ist eine Zustandsform der Materie, die unter normalen Umständen nicht vorkommt. Nun dehnt sich der Stern enorm aus und erreicht nun das Stadium des Riesen. Das hat zur Folge, dass sich seine Oberflächentemperatur absinkt, weil sich die abgestrahlte Energie nun auf eine größere Fläche verteilen muss. Dies steht im totalen Gegensatz zu Sternkern, da dieser sich immer mehr erhitzt. Es sind keine Kernfusionsprozesse vorhanden, die Strahlung gegen die nach innen wirkende Gravitation ausgleichen könnten. Dadurch zieht sich der Kern noch mehr zusammen. Irgendwann wird die Temperatur durch den hohen Druck so hoch, dass das Helium im Kern beginnt zu fusionieren. Das führt zu einer sprunghaften Temperaturerhöhung, wodurch sich das Gas ausdehnt und es zur Explosion kommt – der Heliumblitz. Hat sich das Helium im Kern komplett zu Kohlenstoff umgewandelt, kann dieser sich dann, angenommen die Masse ist hoch genug, auch explosionsartig entzünden. Diese Prozesse führen zu einem großen Materieverlust an der Sternoberfläche, da durch die Explosionen ein plötzlicher Strahlendruck entsteht, der die Oberflächenschichten abstößt. Diese bilden dann einen so genannten planetarischen Nebel, der sich kugelförmig mit hoher Geschwindigkeit vom Sternrest entfernt. Hat der Rest des Sterns eine Masse die größer ist als die 1,4 fache Sonnenmasse, so entsteht daraus ein „weißer Zwerg“, der mit der Zeit verlischt. Allerdings dauert dieses Abkühlen länger als das Universum bis jetzt existiert, was bedeutet, dass noch nie ein weißer Zwerg vollkommen erloschen ist.

## 8.2. Sterne großer Masse

Diese Sterne haben eine Masse von mehr als fünf Sonnenmassen. Solche Sterne haben mehrere Phasen in denen sie sich zusammenziehen und wieder ausdehnen, wobei immer schwerere chemische Elemente fusioniert werden. Mit der Größeränderung ändert sich auch seine Helligkeit. In der Zeit dieser Prozesse bilden sich Schichten im Stern, die durch nuklear brennende Schalen voneinander getrennt werden. In diesen Schichten befinden sich die Elemente, die zuvor im Kern fusionierten. Die schweren Elemente fusionieren im Inneren des Sterns, da dort die Temperaturen ihr Maximum haben und die leichteren Elemente verbrennen in den äußeren Schalen. Die Sterne mit einer fünf- bis neunfachen Sonnenmasse können die Elemente bis hin zum Sauerstoff erzeugen. In noch größeren Sternen entstehen sogar Elemente bis hin zu Silizium und Eisen. Nach der Fusion zu Eisen sind keine weiteren Kernprozesse mehr möglich, sodass sich der Stern zusammenzieht. Liegt die Masse des Sterns unter 10 Sonnenmassen, so kann es in den verschiedenen Schichten nochmals zu plötzlicher Kernfusion kommen, sodass der Stern seine Hüllen im Zuge einer „Supernova“ wegdrückt. Der Kern des Sterns ist nun unter solchen starken Druck, dass die Protonen und Elektronen so stark zusammengepresst werden, wodurch sie sich in Neutronen umwandeln – ein Neutronenstern ist entstanden. Übersteigt der Stern die 10-fache Sonnenmasse, so kollabiert der Stern unter seiner eigenen Gravitation zu einem schwarzen Loch.

## 8.3. Genauere Erklärung zu einigen Sternstadien

### 8.3.1. Neutronenstern / Pulsare

Wie schon erwähnt haben Neutronensterne eine sehr hohe Dichte, da sich die Elektronen und Protonen unter enormen Druckeinfluss zu Neutronen umgewandelt haben. Dadurch haben diese Sterne auch einen sehr kleinen Radius. Eine Masse von 1,5- bis 2,5-facher Sonnenmasse ist auf ein Radius von nur ca. 20 km konzentriert. Die Dichte eines solchen Sterns bewegt sich in den Größenordnungen von  $10^{15}$  g/cm<sup>3</sup>. Folgende Analogie um sich diese enorme Dichte vorzustellen: Auf der Erde würde 1 cm<sup>3</sup> dieser Materie ca. 1 Milliarde Tonnen wiegen. Weil Neutronensterne bei einer Supernovaexplosion entstehen sind sie von ihren abgestoßenen Hüllen umgeben, welche einen kugelförmigen Nebel um die „Sternleiche“ bilden.

Wie strahlt aber ein Neutronenstern? Schließlich kann keine Strahlung mehr im Sterninneren erzeugt werden, weil die Kernfusion ausgesetzt hat. Die Strahlung, die der Stern dennoch abgibt, hat ihre Ursache in seinem starken Magnetfeld. Wenn nämlich die Rotationsachse zu den Magnetpolen etwas geneigt ist, so entstehen enorme elektrische Felder. Dort werden dann Elektronen und Protonen, die sich auf der Sternoberfläche befinden (hier hat der Druck nicht zur „Neutronisierung“ ausgereicht) auf annähernd Lichtgeschwindigkeit beschleunigt, wodurch diese dann Photonen emittieren (im Radiowellenbereich).

Und nun noch zu den Pulsaren. Diese sind nichts anderes als rotierende Neutronensterne – und Neutronensterne rotieren anfänglich immer. Und das sehr schnell, da der Drehimpuls des kollabierenden Sterns erhalten bleibt, sich aber sein

Radius ändert (gleicher Effekt wie bei der Sternentstehen – siehe 2.1 Rotation). Das Rotationsintervall solcher Sterne liegt bei ungefähr einer Sekunde bis hin zu Hundertstelsekunden. Aber nicht jeder rotierender Neutronenstern ist auch ein Pulsar. Wie schon erwähnt stammt die Strahlung eines Neutronensterns von seinem Magnetfeld. Die meiste Strahlung wird dabei an den Magnetpolen abgegeben. Dadurch entstehen an den magnetischen Polen „Strahlenkegel“, ähnlich wie bei einem Leuchtturm (Abb. 4). Liegt die Achse der Magnetpole parallel zur Erde, so ist es ein Pulsar. Denn immer wenn die Strahlenkegel in unsere Richtung zeigen nehmen wir einen Impuls dieser Strahlung wahr, als würde der Stern an- und ausgeschaltet werden. Allerdings dreht sich ein Pulsar nicht ewig. Durch die Radiostrahlungsemission verliert er immer mehr Drehimpuls beziehungsweise Rotationsenergie, bis er irgendwann stillsteht.

### **8.3.2. Quarksterne**

Es sei vorweg gesagt, dass es sich bei Quarksternen um eine bloße Theorie handelt und, dass noch nie ein Quarkstern beobachtet wurde. Ein solches Objekt stellt nach der Theorie ein Zwischenstadium von Neutronenstern und schwarzen Loch dar. Die Materie solcher Sternleichen besteht aus Quarks. Das sind die Bestandteile aus denen die Nukleonen, als Protonen und Neutronen, bestehen.

Das bedeutet im gleichem Zuge auch, dass Quarks viel kleiner sind als Kernbausteine, so dass auch der Quarkstern an sich, der ja aus dieser Materie besteht, kleiner sein muss als zum Beispiel ein Neutronenstern, der ja nur aus „großen“ Neutronen besteht.

Meiner Meinung nach bleibt dies eine Theorie, da keine freien Quarks existieren können, die dann einen Stern bilden könnten. Dazu ist die Anziehungskraft, der starken Kernkraft, der Quarks untereinander viel zu groß.

### **8.3.3. Schwarze Löcher**

Der extremste Fall den ein Stern nach seinem Dasein geschehen kann, ist zu einem schwarzen Loch zu kollabieren. Dies kann allerdings nur sehr massereichen Sternen passieren, weil der dazu benötigte Druck enorm groß sein muss. Aber was genau ist denn nun ein schwarzes Loch? Eine Singularität! Das bedeutet, dass sich die gesamte Masse des Sterns auf einen Punkt konzentriert hat, was natürlich zur Folge hat, dass die Dichte dort unendlich groß ist. Des Weiteren sei gesagt, dass die Zeit, sowie der Raum in einer Singularität den Wert Null besitzen. In einem schwarzen Loch steht die Zeit also still. Dies alles sind nur mathematische Erklärungsversuche. In der Sichtweise der Quantenmechanik sieht das anders aus, denn in dieser sind keine Singularitäten möglich. Allerdings erst eine Quantenmechanik der Gravitation könnte eventuell aus diesem Problem der Singularität herausführen – die Entdeckung blieb aber bis jetzt aus und dies wird wahrscheinlich auch noch eine Weile so bleiben. Deswegen ist die allgemeine Theorie der Singularität zurzeit noch als richtig angesehen.

Ein schwarzes Loch sendet keinerlei elektromagnetische Strahlung aus, aber woran liegt das? Das Gravitationsfeld dieser Objekte ist so stark, dass der Raum so stark gekrümmt wird, dass selbst Licht ein schwarzes Loch nicht verlassen kann. Die benötigte Entweichungsgeschwindigkeit ist also größer als die Lichtgeschwindigkeit. Nun lässt sich der Raum in dem selbst das Licht das Gravitationsfeld nicht verlassen kann durch den „Schwarzschildradius“  $r$  definieren und wie folgt berechnen.

$$r = \frac{2 \cdot G \cdot m}{c^2}$$

Dabei ist  $m$  die Masse des schwarzen Loches,  $c$  die Lichtgeschwindigkeit und  $G$  die

Gravitationskonstante mit dem Wert  $6,6725 \cdot 10^{-11} \frac{\text{m}^3}{\text{kg} \cdot \text{s}^2}$ .

Die Theorie von schwarzen Löchern und ihrer Existenz ist zwar noch nicht richtig bewiesen, denn noch gilt sie als sehr wahrscheinlich.

## 9. Hertzsprung-Russell-Diagramm

Die wichtigsten Merkmale eines Sterns sind seine Temperatur und seine absolute Helligkeit. Die Temperatur steht im direkten Zusammenhang mit der Farbe des Sterns und somit auch mit dessen Spektralklasse. Die absolute Helligkeit ist die Größe die abgibt, wie viel Energie der Stern abstrahlt. Im Jahre 1913 hatten die Physiker Henry Norris Russell und Ejnar Hertzsprung unabhängig voneinander die gleiche Idee. Sie stellten einen Zusammenhang der oben genannten Größen her, welcher graphisch darzustellen ist. Dass so entstandene Hertzsprung-Russell-Diagramm stellt auf der waagerechten Achse die Temperatur, welche von links nach rechts abnimmt, und auf der Senkrechten die absolute Helligkeit (auf der Abbildung Leuchtkraft), die von unten nach oben zunimmt, dar.

Um ein solches Diagramm zeichnen zu können geht man stets von einer bestimmten Auswahl von Sternen aus. Zum Beispiel die Sterne, von denen man die Entfernung kennt und so die absolute Helligkeit über

$$M = m + 5 - 5 \cdot \lg r$$

ausrechnen kann, die man ja für das Hertzsprung-Russell-Diagramm benötigt. Um nun noch die verschiedenen Temperatur dieser Sterne zu ermitteln benötigt man die Spektralklassen dieser Sterne. Nun ist es möglich die Sterne in das Diagramm einzuzeichnen. Es wird sich die charakteristische Form ergeben, die auch auf der Abbildung 5 des Anhangs erkennbar ist. Auf diesem Bild sind auch die einzelnen Bereiche, wo sich die Sternarten, die im vorhergehenden Gliederungspunkt beschrieben wurden, aufhalten eingezeichnet, weshalb ich darauf nicht mehr näher

eingehen möchte. Durch das Hertzsprung-Russell-Diagramm ist es also möglich die wichtigsten Eigenschaften eines Sterns einzutragen und schnell wieder abzulesen.

## 10. Doppelsternsysteme

Ich möchte an dieser Stelle noch auf ein bestimmtes Phänomen der Sternkonstellation im Universum eingehen. Und zwar das der Doppelsternsysteme. Es gibt zwei große verschieden Arten von Doppelsternen: physische Doppelsterne und optische Doppelsterne. Ich möchte hier aber nur auf die wirklichen, physischen Doppelsterne eingehen.

Ein physisches Doppelsternsystem besteht aus zwei Sternen, die um einen gemeinsamen imaginären Schwerpunkt kreisen. Dabei wird der Hellere als Hauptkomponente und der andere Stern als Begleiter bezeichnet. Wie erkennt man aber nun physische Doppelsterne? Durch den Doppler-Effekt! Bewegt sich einer der Sterne gerade so um den Schwerpunkt, dass er sich von dem Beobachtungsort (z.B. Erde) entfernt, so wird die Frequenz seiner elektromagnetischen Strahlung ins Rote verschoben. Bewegt er sich in unsere Richtung, so erfolgt die Verschiebung der Frequenz in den Blaubereich. Hier die Formeln des Dopplereffekts für Doppelsterne, wobei  $c$  die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum,  $v_E$  die Relativgeschwindigkeit des Empfängers, also der Erde,  $v_S$  die Relativgeschwindigkeit des Senders, also einer Komponente des Doppelsternsystems die eigentlich und  $f$  die verschobene Frequenz darstellt:

$$f' = f \frac{c + v_E}{c - v_S}$$

Das obere Rechenzeichen ist stets bei Annäherung und das untere bei Entfernungszunahme zu benutzen.

Diese Verschiebungen treten periodisch auf, da sich einmal der eine Stern und einmal der andere Stern in dieselbe Richtung bewegt, und da sich dies immer wieder durch die gegenseitige Anziehung wiederholt.

Sobald man die große Bahnhalbachse  $a$  der Sterne kennt, kann man mit folgender Beziehung, dem Schwerpunktansatz, die Masse der Sterne errechnen.

( $M_1 / M_2 =$  Massen der Sterne;  $a =$  großen Halbachsen der Bahnen)

$$\frac{M_1}{M_2} = \frac{a_2}{a_1}$$

Dies ist allerdings auch mit der Kepler-Gleichung möglich.

Aber wie kommt es zur Entstehung solcher Doppelsterne?

Eine Möglichkeit ist, dass die Sterne aus derselben Gaswolke entstanden sind. Dies ist die wahrscheinlichste und damit häufigste Variante. Eine weitere Chance zur Bildung eines Doppelsterns ist, dass ein Stern einen nahe gelegenen anderen Stern durch seine Gravitation anzieht und „einfängt“, was aber nur sehr selten vorkommt.

Bei Doppelsternen kann es zu einem spektakulären Materieaustausch kommen, indem der massereichere, also auch gravitationsstärkere Stern dem anderen Stern kontinuierlich Materie „absaugt“, wodurch die Masse des einen Sterns zunimmt und des anderen abnimmt.

Beobachtungen haben gezeigt, dass Doppelsterne weit häufiger als zuerst angenommen im Universum auftreten. Der genaue Prozentsatz der Doppelsternsysteme ist nicht bekannt, aber Schätzungen besagen einen Anteil zwischen 30 und 70%. Auf der Abbild 6 im Anhang ist zur besseren Veranschaulichung ein Doppelsternsystem graphisch dargestellt. Darauf kann man erkennen, dass ein Neutronenstern dem anderen Stern des Systems durch sein höheres Gravitationsfeld Materie „absaugt“.

## 11. Relation von Masse und Lebensdauer

Die „Lebensdauer“ eines Sterns, also die Zeit in der er in seinem Kern fusioniert und so Strahlung produziert, ist im wesentlichen von der Masse des betreffenden Sterns abhängig.

Je größer die Masse eines Sterns ist, desto schneller endet auch sein Dasein als solcher. Aber woran liegt das?

Bei einem massereicheren Stern ist auch der nach innen wirkende Gravitationsdruck größer als bei einem masseärmeren Stern. Diesem Schweredruck wirkt wie schon erwähnt der Strahlendruck durch die Kernfusion im Zentralgebiet entgegengesetzt.

Ist nun der Stern sehr schwer muss auch der Strahlendruck größer sein, was nur durch erhöhte Kernfusionsprozesse möglich ist. Das hat zur direkten Folge, dass der Stern mehr Materie pro Zeiteinheit fusionieren „muss“. Demnach ist die fusionsfähige Materie schneller aufgebraucht, als bei einem leichteren Stern.

Man kann also sagen, dass ein massereicher Stern, im Gegensatz zu einem masseärmeren Stern, seine Materie schneller fusioniert, und deshalb auch eher sein Dasein beendet. Masse und Lebensdauer sind also umgekehrt proportional

$$m \sim \frac{1}{t}$$

, wobei m die Masse und t die Lebensdauer darstellt.

Der größte Lebensabschnitt eines Sterns ist die Zeit, in der er seinen Wasserstoffvorrat im Kern verbrennt und ist wie folgt berechenbar

$$t = 10^{10} \cdot \frac{m}{L}$$

, dabei ist t die Zeit, m die Masse und L die schon früher angesprochene Leuchtkraft des Sterns. So erhält man allerdings nur eine Annäherung der Lebenszeit eines Sterns, weil die anderen Stadien der Entwicklung in die Berechnungen nicht einbezogen werden.

Durch die Formel wird deutlich, dass auch die Leuchtkraft eine große Rolle für die Dauer des Daseins eines Sterns spielt.

## 12. Bedeutung und Nutzen

Sterne haben eine sehr große Bedeutung in den Galaxien und auch im gesamten Universum, können aber auch von der Wissenschaft zur Forschung des solchen genutzt werden.

### 12.1. Elemententstehung und Verteilung durch galaktische Fontainen

Was sind wir? Sehen wir es einmal ganz pragmatisch – Kohlenstoffeinheiten. Und wie entsteht Kohlenstoff und alle anderen Elemente jenseits von Lithium im Universum – durch Kernfusion in Sternen. Auf die genaue Entstehung der Elemente bin ich schon in meinem sechsten Gliederungspunkten eingegangen und das Ausbreiten der Elemente vom Stern weg durch Supernovaexplosionen habe ich auch schon erwähnt. Allerdings gibt es noch einen Effekt, der die Elemente in einer Galaxie verteilt – der Prozess der galaktischen Fontaine. Wenn sich in einem Sternentstehungsgebiet, mit bis zu 1000 Sternen, die Sterne in relativ gleicher Zeit entstehen (10 – 100000 Jahre), was oft der Fall ist, dann explodieren diese auch zur gleichen Zeit (auch hier ist wieder eine astronomische Zeitspanne gemeint). Explodieren also diese Sterne, so wird jeder davon eine Gashülle abstoßen, die dann mit den abgestoßenen Gashüllen der anderen Sterne zusammenprallen. Das heiße Gas wird dann den Weg des geringsten Widerstands nehmen. Und dies ist der in Richtung des galaktischen Halos, das ist der Bereich über und unter der galaktischen Scheibe, da dort der Druck geringer ist, als in der galaktischen Scheibe selbst. Dies geschieht mit Geschwindigkeiten zwischen 10 und 100 km/s. Befindet sich das heiße Gas nun über oder unter der Scheibe, so wird es sich durch Aussendung von Strahlung abkühlen, was zusätzlich zu der Gravitation der galaktischen Scheibe dazu führt, dass das Gas wieder an einer anderen Stelle, als wo es aus der Scheibe ausgetreten ist, in die Scheibe eindringt. Dieser Prozess dauert ungefähr 10 Millionen bis 100 Millionen Jahre. Nun steht das Gas von den explodierten Sternen, was natürlich schwere Elemente, durch die vorangegangene Kernfusion, beinhaltet, zur Entstehung neuer Sterne, mit Planeten, wie zum Beispiel unserer Erde, worauf

eventuell Leben entstehen kann, zur Verfügung, da das Gas ja wie schon erwähnt Eisen, Nickel und andere Elemente beinhaltet. Die galaktische Fontaine ist also von fundamentaler Bedeutung für unser Leben und für die Lebensentstehung allgemein.

## **12.2. Voraussetzung zum Leben**

Im unserem Fall spielt unsere Sonne, als Stern, die entscheidende Rolle für unser Leben. Durch die Sonne erhalten wir all unsere Energie. Die Sonne sendet diese Energie in Form von Strahlung auf die Erde. Diese Strahlung enthält unter anderem auch Infrarotstrahlung, welche für den Wärmetransport verantwortlich ist, und Licht.

Die Strahlung der Sonne ist auch der Auslöser für wichtige atmosphärische Prozesse. Die Pflanzen erhalten ihre Energie durch Photosynthese, deren wichtigster Bestandteil das Sonnenlicht ist. Diese Pflanzen können wir dann direkt, oder erst über den Umweg Tier, essen und erhalten so lebensnotwendige Energie. Allgemein kann man zum Leben sagen, dass nur etwas Leben kann, solange es einen Energieunterschied zwischen ihm und seiner Umgebung aufrecht erhalten kann, da dies die Voraussetzung für Ereignisse aller Art ist. Ist ein System im Gleichgewicht passiert nichts mehr! Wir haben aber, dank der Sonne, ein Ungleichgewicht (Sonne – Erde), welches „das Leben“ auf unseren Planeten übertragen hat.

## **12.3. Gravitationslinseneffekt als Anwendung**

Dieser Effekt kann zur direkten Anwendung in der Astronomie benutzt werden und funktioniert wie folgt. Nach Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie krümmen Massen bzw. Energien (nach  $E=mc^2$  ist Masse ein Äquivalenz zu Energie) die Raumzeit. Hier ist allerdings nur die Krümmung des Raums von Bedeutung (eigentlich kann man die Dimensionen der Raumzeit nicht trennen, hier zeigt es sich aber von Vorteil nur den Raum zu betrachten).

Da ein Stern eine beträchtliche Masse besitzt krümmt er demzufolge den Raum. Wird nun elektromagnetische Strahlung, zum Beispiel von einer entfernten Galaxie, in die Nähe eines Sterns emittiert, so wird diese Strahlung von der Masse des Sterns abgelenkt. Folglich entsteht ein Brennpunkt in dem sich die Strahlung der Galaxie bündelt. Der Stern fungiert als Lupe, nur wird das Licht, und andere Strahlung, durch die Masse, und nicht durch den Übergang von einem dünneren Medium in ein dickeres, wieder in ein dünneres und durch verschiedene Strecken, die das Licht in dem dickeren Medium zurück legen muss, abgelenkt. Kennt man nun den Brennpunkt kann man die Galaxie in einer enormen Vergrößerung beobachten.

Bei der Vergrößerung kommt es allerdings zur Verdopplung, Vermehrfachung oder Verzerrung des Observations-Objektes, weil die Gravitationslinsen nicht so perfekt, wie optische Linsen wirken (Abb. 7 - Objekt A und B ist das gleiche).

Ein großes Problem, was beim Gravitationslinseneffekt mit Stern als Gravitationslinse auftritt ist, dass die Brennpunkte immer sehr weit vom Stern entfernt sind.

Deshalb wird oft auf massereichere Objekte, wie Quasare, zurückgegriffen, da hier das Licht stärker abgelenkt wird und sich somit die Brennweite verkürzt.

### **13. Fazit und Schlusswort**

Diese Ausarbeitung macht klar, dass das Dasein von Sternen unentbehrlich für das Universum ist, wie wir es derzeit kennen. Ohne Sterne wäre das Universum kalt, weil keine Strahlung emittiert werden würde, was zur Folge hätte, dass Leben nie möglich gewesen wäre.

Und trotz der langen Erforschung der Sterne geben sie uns selbst heute noch in unserer hoch technisierten Welt und mit unseren geschickt konstruierten Hilfsmitteln viele Rätsel auf. So haben Sterne wohl für immer eine gewisse Faszination.

### **14. Einige Begriffserklärungen und Anmerkungen**

<sup>1</sup> Nach der so genannten Stringtheorie, welche sich allerdings noch im

Anfangsstadium befindet, gibt es mehr als vier Dimensionen, welche allerdings so sehr ineinander geschachtelt sind, dass sie nicht erkennbar sind. Dies ist zum Beispiel mit folgender Analogie zu verdeutlichen: Betrachtet man ein Haar aus einer großen Entfernung, so lässt sich nur eine Dimension erkennen, die Länge.

Verringert man den Abstand, so ist auch Breite, und bei genaueren Hinsehen, auch

die Tiefe erkennbar.

<sup>2</sup> Mit dem Urknall entstand sowohl „normale“ Materie als auch Antimaterie, die genau die umgekehrten Eigenschaften wie Materie besitzen (die Masse ist gleich).

Ein Beispiel hierfür ist das Elektron mit seinem Antiteilchen, dem Positron. Treffen diese beiden Teilchen zusammen vernichten sie sich gegenseitig zu Strahlung, also zu Photonen. Dies ist möglich, weil Masse äquivalent zu Energie ist, was Einstein in seiner wohl berühmtesten Formel  $E=mc^2$  ausdrückte.

<sup>3</sup> Licht beziehungsweise elektromagnetische Strahlung kann sowohl als Teilchen, den so genannten Photonen, als auch als Strahlung (Transversalwellen) auftreten.

Diese Eigenschaft der elektromagnetischen Strahlungen nennt man Wellen-Teilchen-Dualismus.

<sup>4</sup> Diese Neutrinoarten und weitere drei Elementarteilchen (Elektronen, Myonen, Tau) bilden die Gruppe der Leptonen.

<sup>5</sup> Es gibt noch einen anderen Prozess um Heliumkerne aus Wasserstoffkernen zu bilden. Dies kommt allerdings nur bei sehr massereichen Sternen mit Temperaturen über 15 Millionen Kelvin vor, außerdem ist das Vorhandensein anderer Elemente wie Kohlenstoff nötig, die als Katalysatoren fungieren. Dieser Prozess wird als Kohlenstoff-Stickstoff-Sauerstoff-Zyklus bezeichnet.

15. Anhang mit Bilder



Abbildung 1



Abbildung 2

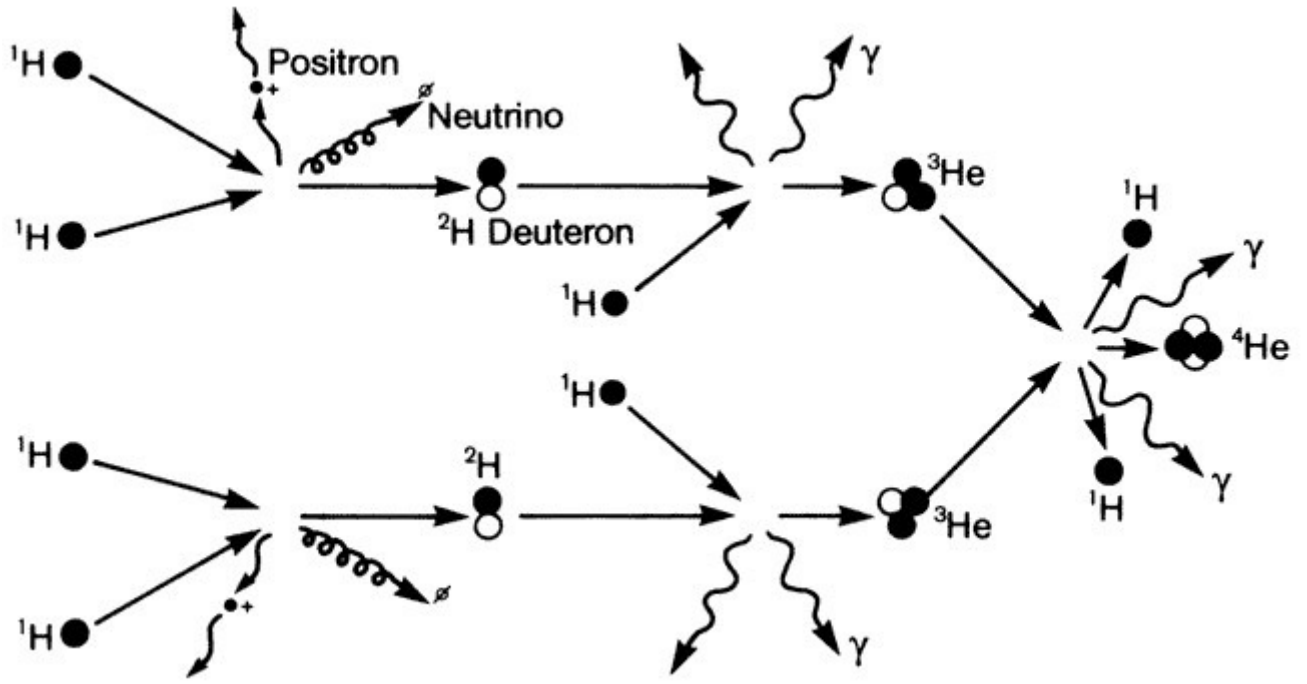


Abbildung 3

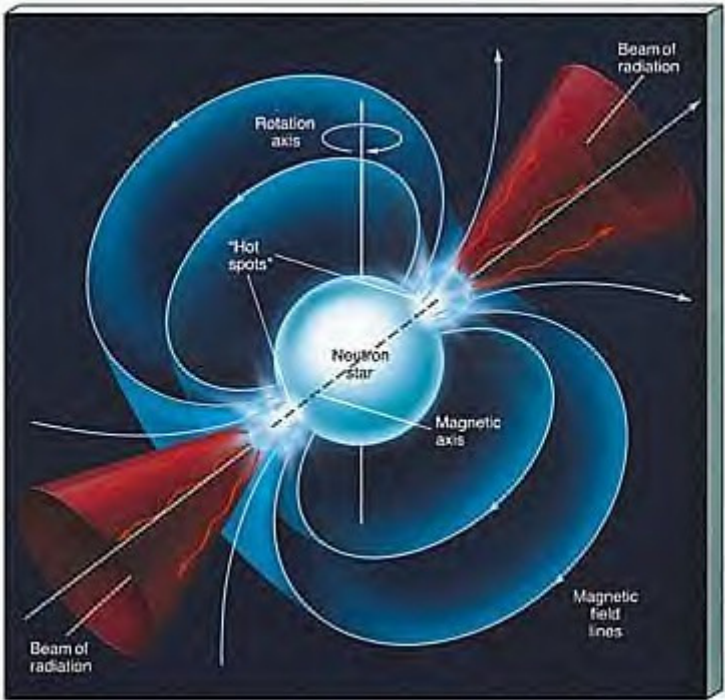


Abbildung 4

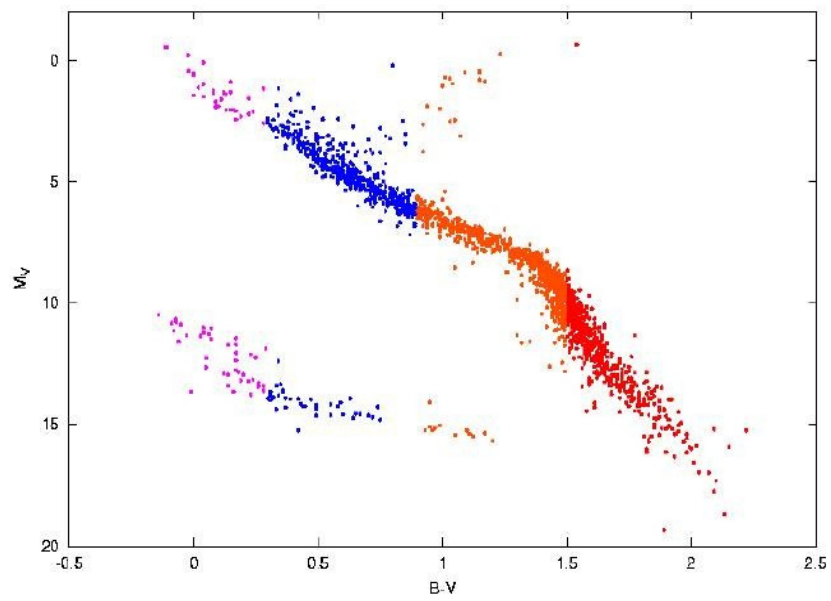


Abbildung 5

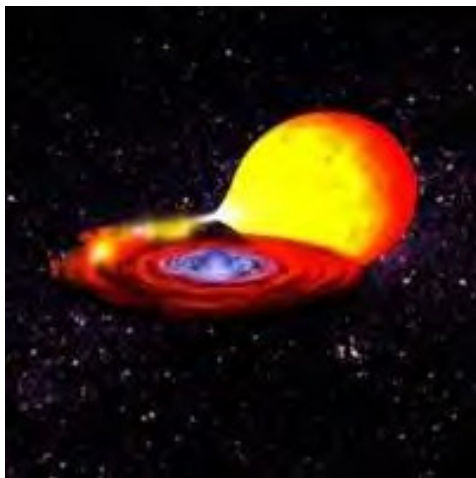


Abbildung 6

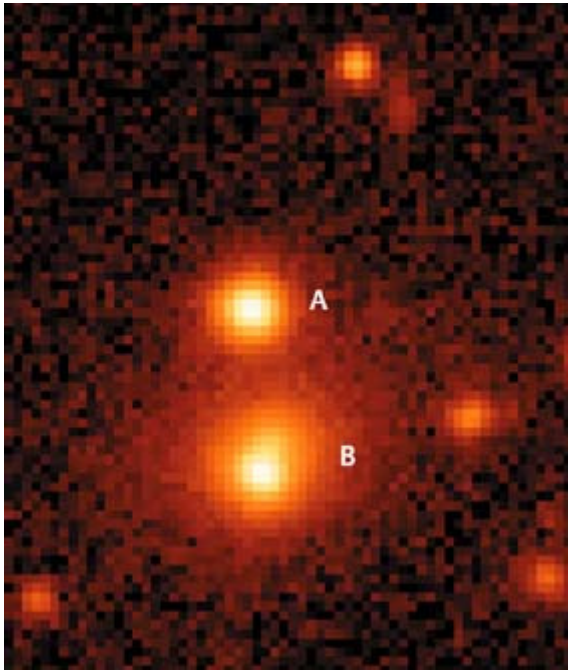


Abbildung 7

## 16. Quellen

- ASTRONOMIE – Ein Führer durch die unendlichen Weiten des Weltalls
- Astronomie - Gymnasiale Oberstufe - Grundstudium
- Elementarteilchen (S.112-113)
- Encarta Enzyklopädie
- Geburt und Tod der Sterne
- Brockhaus –abc- Astronomie
- NOVA ACTA LEOPOLDINA
- BSV Grundkurs Astronomie
- ASTRONOMIE – Naturwissenschaftliche Reihe
- Probleme der modernen Kosmogonie
- Astronomie leicht verständlich – Die Kosmos-Himmelskunde
- Mitschriften von Fernsehveranstaltungen und Notizen aus früheren Recherchen
- <http://www.raumfahrer.net/astronomie/sterne/klassifizierung.shtml>
- [http://510009990197-0002.bei.t-online.de/images/titlepics\\_astronomy/starlifecycle.gif](http://510009990197-0002.bei.t-online.de/images/titlepics_astronomy/starlifecycle.gif)
- [http://images.google.de/imgres?imgurl=www.fakko.de/school/sonne/bilder/kernfusion.gif&imgrefurl=http://www.fakko.de/school/sonne/aufbau\\_c.htm&h=350&w=654&sz=9&tbnid=fDzDPsvm7O8J:&tbnh=72&tbnw=134&prev=/images%3Fq%3DKernfusion%26start%3D20%26hl%3Dde%26lr%3D%26ie%3DUTF-8%26sa%3DN](http://images.google.de/imgres?imgurl=www.fakko.de/school/sonne/bilder/kernfusion.gif&imgrefurl=http://www.fakko.de/school/sonne/aufbau_c.htm&h=350&w=654&sz=9&tbnid=fDzDPsvm7O8J:&tbnh=72&tbnw=134&prev=/images%3Fq%3DKernfusion%26start%3D20%26hl%3Dde%26lr%3D%26ie%3DUTF-8%26sa%3DN)
- <http://www.dasprovisorium.de> (ausgewählte Diskussionen)
- <http://www.ari.uni-heidelberg.de/interessantes/vorlesungen/WS00/einf/html/chap3/Chap32.html>
- <http://www.cybertaro.de/astrofoto/regist15.html>