

Astronomie

Lernheft 8

Sternkunde I: Sternentstehung

Inhaltsverzeichnis:

8.1	Einleitung	2
8.2	Die interstellare Materie.....	2
8.3	Sternentstehung	3
8.4	Fusionsmechanismen.....	3
8.4.1	Die Proton-Proton-Reaktion	4
8.4.2	Der Bethe-Weizsäcker-Zyklus	5
8.5	Massebezogene Weiterentwicklung	6
8.6	Entwicklungsende der Sterne.....	8
8.7	Zusammenfassung	10
8.8	Hausaufgaben	10
8.9	Lösungen zu den Selbstlernaufgaben	11

8.1 Einleitung

Ein Stern durchläuft in Abhängigkeit seiner Masse unterschiedliche Entwicklungsstufen. Kleine Sterne, wie unsere Sonne führen nur einen einzigen Fusionsschritt zum Helium durch, andere massereiche Sterne bedeutend mehr. So durchlaufen massereiche Sterne ganze Fusionsketten. Sind die Fusionsvorräte verbraucht, beginnt der Stern zu degenerieren und endet je nach Masse entweder wie unsere Sonne als weißer Zwerg oder als Supernova.

Lernziele:

Nach Durcharbeitung des Lernheftes können Sie:

- die Entwicklungsstufen der Sterne benennen,
- die Fusionskette aufzeigen und die Produktion der schweren Elemente verstehen,
- die Mechanismen des Wasserstoffbrennens (Proton-Proton Reaktion und Bethe-Weizsäcker-Zyklus) und des Heliumbrennens (3- α -Prozeß) erklären,
- den Unterschied zwischen den Entwicklungen massearmer und massereicher Sterne herausarbeiten,
- Neutronensterne, Pulsare und Supernovae definieren.

8.2 Die interstellare Materie

Die Sternentstehung findet im interstellaren Medium statt. Es wird mit ISM abgekürzt und beschreibt den Raum zwischen den Sternen einer Galaxie. Die Teilchendichte im ISM ist sehr gering.

Gasförmiger Hauptbestandteil des ISM ist Wasserstoff, daneben weist es geringe Mengen Helium und anderer Elemente auf. Als Feststoffkomponente befindet sich dort in kleinen Mengen Staub.

Das interstellare Gas wird je nach Temperatur in H-I- und H-II-Regionen aufgeteilt. In der H-I-Region liegt der Wasserstoff molekular vor (H_2) und hat eine Temperatur von 50 K. Die H-II-Region enthält Wasserstoff in ionisierter Form bei Temperaturen bis zu 10.000 K. Innerhalb interstellarer Gaswolken entstehen die Sterne, nach ihrer Lebenszeit nimmt die ISM die Energie und die Teilchen wieder auf.

Die Sternbildungsprozesse aus einer interstellaren Gaswolke dauern einige Millionen Jahre.

8.3 Sternentstehung

Die Sternentstehung beginnt mit dem Kollaps einer Gaswolke. Voraussetzung ist die Verdichtung von Teilchen innerhalb der Wolke. Erreicht die so entstandene Masse einen kritischen Punkt, kompensieren sich die nach außen wirkenden Druckkräfte und die nach innen wirkenden Gravitationskräfte nicht mehr. Durch Erhöhung der Masse wird die Gravitationskraft in Richtung Zentrum größer, die Wolke kollabiert.

Die kritische Masse, die einen Kollaps auslöst, bezeichnet man als Jeans-Masse. Sir James Hopwood Jeans (1877–1946), englischer Astronom, Mathematiker und Physiker, gab diesem Geschehen seinen Namen. Mit Hilfe des Jeans-Kriteriums kann die Masse berechnet werden, bei der eine Gaswolke instabil wird und kollabiert.

Durch die Kontraktion der Gaswolke sinkt ihr Volumen und die Temperatur steigt. Dadurch, dass die Teilchen nun geringe Abstände zueinander haben, stoßen sie aneinander und beginnen zu schwingen. Diese Schwingungsenergie wird in Strahlungsenergie umgewandelt. Je stärker die Kompression fortgeschritten ist, desto dichter ist das Gas und umso schwerer kann die Wolke die Strahlungsenergie nach außen abführen. Das Resultat ist eine weitere Druck- und Temperaturerhöhung. Bei einer Temperatur von ca. 2.000 K ionisieren die Wasserstoffmoleküle zu Atomen und fusionieren dann bei Temperaturen im Millionenbereich zu Helium. Man bezeichnet den Vorgang der Fusion von Wasserstoff zu Helium als Wasserstoffbrennen. Bei der Fusion wird Energie in Form von Strahlung frei.

Diese Strahlung stabilisiert den Stern so weit, dass sich die Gravitationskraft und die nach außen gerichtete Gasdruckkraft gegeneinander ausgleichen. Der so entstandene Stern erzeugt nun Energie durch Kernfusion.

8.4 Fusionsmechanismen

Das Wasserstoffbrennen kann über die Proton-Proton-Reaktion oder über den Bethe-Weizsäcker-Zyklus stattfinden.

Die Proton-Proton-Reaktion, auch p-p-Reaktion genannt, ist der bedeutendste Mechanismus zur Energieerzeugung durch die Umwandlung von Wasserstoff zu Helium in masseärmeren Sternen. Massearm ist ein Stern bis zu einer Größe von ungefähr 1,4 Sonnenmassen. Eine Sonnenmasse M_{\odot} beträgt $1,9891 \cdot 10^{30}$ kg, das sind 333.000 Erdmassen.

Die meisten der Fixsterne befinden sich etwa in einem Intervall von 0,1 bis 10 Sonnenmassen.

Eine Kernfusion ist nur dann möglich, wenn die Sonnenmasse mindestens 0,8 beträgt. Beide Reaktionsmechanismen produzieren aus vier Wasserstoffprotonen einen Heliumkern, der eine geringere Masse besitzt als sie selbst. Ist die Masse des Ausgangsstoffs höher als die des Endstoffs, bezeichnet man dies als einen Massendefekt. Die „eingesparte“ Masse wird in Form von Energie (Strahlungsenergie) frei.

8.4.1 Die Proton-Proton-Reaktion

Bei der Proton-Proton-Reaktion reagieren zwei Protonen der Wasserstoffkerne zu einem Deuterium. Deuterium ist ein Isotop von Wasserstoff. Man bezeichnet es auch als schweren Wasserstoff (${}^2\text{H}$).

Wasserstoff (${}^1\text{H}$) enthält in seinem Atomkern nur ein einziges Proton (positiv geladenes Teilchen). Deuterium besitzt im Kern zusätzlich noch ein Neutron (nicht geladenes Teilchen).

Ein Proton wandelt sich bei der Entstehung von Deuterium zu einem Neutron um. Bei dieser Reaktion werden ein Positron und ein Neutrino abgespalten. Ein Positron e^+ ist ein positiv geladenes Elektron, Neutrinos sind sehr kleine ladungsneutrale Elementarteilchen.

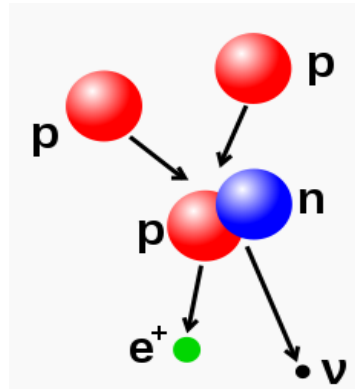


Abb. 8.1: Startreaktion der p-p-Reaktion

Das Deuterium (${}^2_1\text{H}$) reagiert anschließend mit einem weiteren Proton des Wasserstoffs zum Helium-3-Isotop (${}^3_2\text{He}$), dabei wird γ -Strahlung in Form von Photonen freigesetzt.

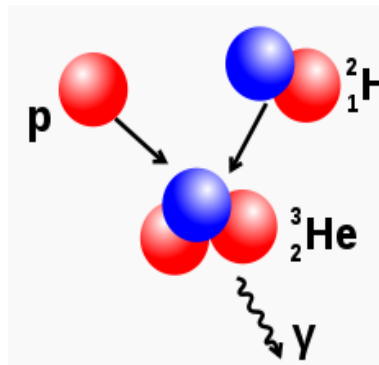


Abb. 8.2: Metareaktion der p-p-Reaktion

Abschließend reagieren zwei Helium-3-Kerne (${}^3_2\text{He}$) miteinander, wobei zwei Protonen abgegeben werden, zum Endprodukt Helium-4 (${}^4_2\text{He}$).

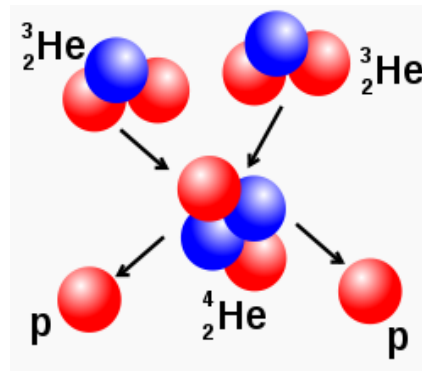


Abb. 8.3: Endreaktion der p-p-Reaktion

8.4.2 Der Bethe-Weizsäcker-Zyklus

Der Bethe-Weizsäcker-Zyklus wird auch CN-Zyklus (Kohlenstoff-Stickstoff-Zyklus) genannt. Er ist der vorherrschende Mechanismus der Umwandlung von Wasserstoff zu Helium in massereichen Sternen. In der Spätphase der Sternentwicklung entsteht in den Sternen Kohlenstoff $^{12}_6\text{C}$. Der Bethe-Weizsäcker-Zyklus läuft auf hohem Temperaturniveau ab, so dass wiederum der Wasserstoff ionisiert vorliegt. So kann ein Proton des Wasserstoffs ^1_1H mit Kohlenstoff $^{12}_6\text{C}$ zu Stickstoff $^{13}_7\text{N}$, unter Aussendung von γ -Strahlung, reagieren. Dabei werden ein Positron und ein Neutrino abgegeben. Es entsteht das Kohlenstoffisotop $^{13}_6\text{C}$; dieses reagiert wiederum mit einem Wasserstoffproton, diesmal zum Stickstoffisotop $^{14}_7\text{N}$; dabei wird γ -Strahlung abgegeben. Das Stickstoffisotop reagiert unter Abspaltung eines Positrons und eines Neutrinos zu Sauerstoff $^{15}_8\text{O}$. Der Sauerstoff reagiert zum Stickstoffisotop $^{15}_7\text{N}$, was zusammen mit einem weiteren Wasserstoffproton zum Endprodukt Helium-4-Atom ^4_2He führt.

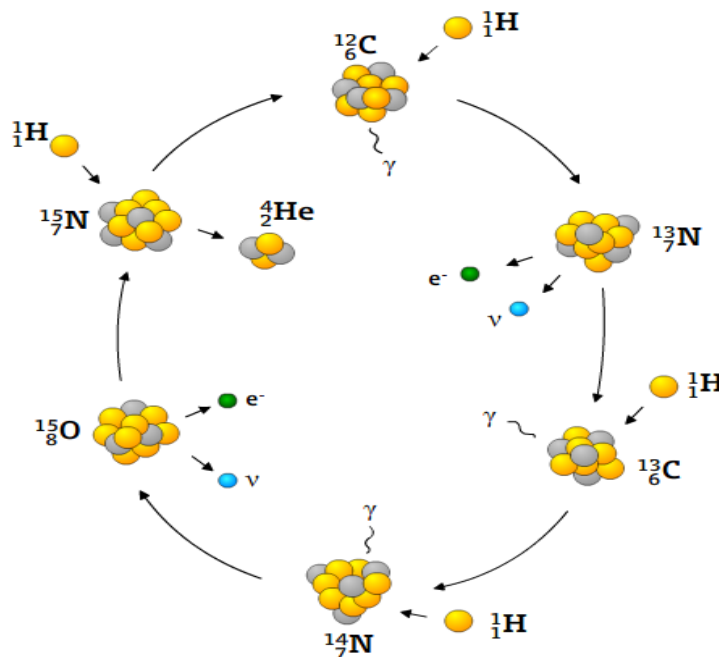


Abb.8.4: Bethe-Weizsäcker-Zyklus

(Bildquelle: www.tastyorange.net)

Der Mechanismus ist zyklisch, weil der Kohlenstoff regeneriert wird und so für die Startreaktion wieder zur Verfügung steht.

Der Bethe-Weizsäcker-Zyklus benötigt ca. $3,5 \cdot 10^8$ Jahre für einen Durchlauf.

8.5 Massebezogene Weiterentwicklung

Die weitere Entwicklung der Sterne hängt mit ihrer Masse zusammen. Die Kernfusion ist kein unendlicher Prozess, sondern dauert nur so lange, bis der elementare Vorrat erschöpft ist. Ist etwa nur noch 10 Prozent des Wasserstoffvorrates vorhanden, vermindert sich aufgrund der geringen Fusionsleistung der Strahlungsdruck.

Die nun größere nach innen gerichtete Gravitationskraft lässt den Stern wiederum kollabieren. Bei massearmen Sternen mit weniger als 0,9 Sonnenmassen ist dies die letzte Lebensphase; sie enden als Weißer Zwerg.

Weißer Zwerge sind kleine (ungefähr so groß wie die Erde), sehr dichte Sterne mit einer Masse von 0,4 bis 1 Sonnenmasse. Da ihr Energiepool aufgebraucht ist, kühlen sie allmählich, über mehrere Milliarden Jahre hinweg, ab. Anfangs haben sie eine Oberflächentemperatur von 100.000 Grad und leuchten weiß, sie bestehen überwiegend aus Kohlenstoff und Sauerstoff.

Die massereichen Sterne bis zu 8 Sonnenmassen entwickeln sich anders. Aufgrund der größeren Masse ist die nach innen wirkende Gravitationskraft beim Kollaps so stark, dass damit auch der Verdichtungsgrad zunimmt. Aufgrund dessen steigt die Temperatur derart, dass im Kern Heliumbrennen einsetzt. Beim Heliumbrennen, auch als Drei-Alpha-Prozess (3α -Prozess) oder Salpeterprozess (benannt nach Edwin Ernest Salpeter) bezeichnet, wird aus drei Heliumkernen (Alphateilchen) ein Kohlenstoffkern gebildet.

Alphateilchen sind Heliumkerne, die aus zwei Neutronen und zwei Protonen bestehen. Das Wasserstoffbrennen wird aufgrund der nun auch in der nächstäußeren Schale gestiegenen Temperatur möglich.

Die Reaktion des Heliumbrennens beginnt mit der Verbindung zweier Heliumkerne, wobei ein Berylliumkern gebildet wird. Dieser Berylliumkern reagiert mit einem weiteren Heliumkern zu einem Kohlenstoffkern unter Bildung von Strahlungsenergie γ .

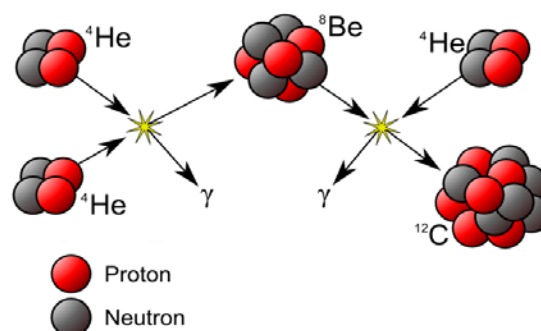


Abb. 8.5: 3α -Prozess

(Bildquelle: www.joergresag.privat.t-online.de)

Das Wasserstoffbrennen in der Außenhülle des Sterns bewirkt, dass sich die Hülle in die stellare Umgebung ausdehnt und von dem Kerngebiet abreißt. Man nennt den Stern in dieser Phase Roter Riese. Ist die Hülle abgelöst, bleibt ein Weißer Zwerg zurück. Die Hülle des Sterns ist als planetarischer Nebel zu sehen.

Hat ein Roter Riese mehr als 8 Sonnenmassen und ist der Heliumvorrat im Inneren erschöpft, setzt dort Kohlenstoffbrennen ein.

Dies kann bei einer Temperatur von 0,6 bis 1 Milliarden K einsetzen. Die Reaktion entwickelt sich aus der Verbindung zweier C-Kerne zu einem Magnesiumkern, der zu Natrium und Wasserstoff oder zu Neon und Helium zerfällt. Des Weiteren kann der Kohlenstoff mit Helium zu Sauerstoff reagieren. In der sich nach außen anschließenden Schale des Sterns ist die Temperatur nun hoch genug, um das Heliumbrennen zu erzeugen; in der nach außen darauffolgenden Schale setzt Wasserstoffbrennen ein.

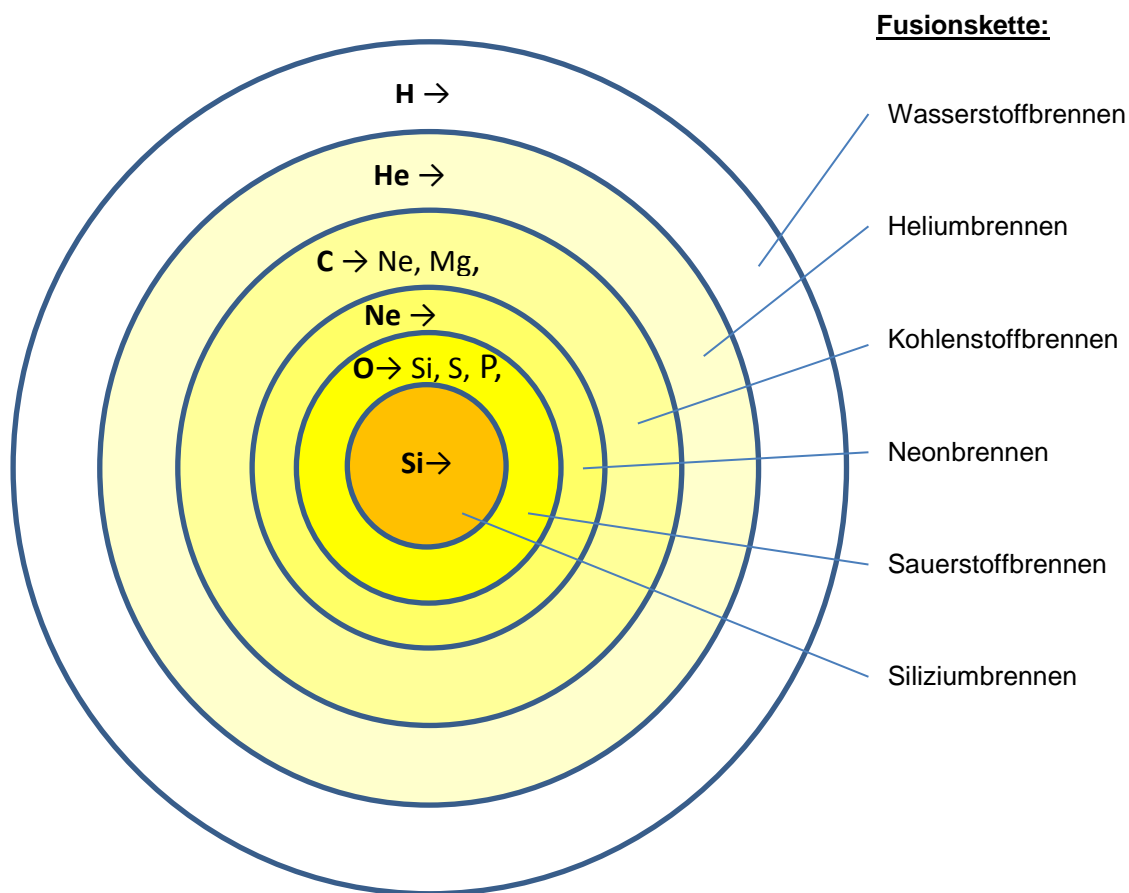


Abb. 8.6: Schalenbrennen

Die Fusionsprozesse bewirken das Entstehen immer schwererer Elemente. Auf das Kohlenstoffbrennen folgt als nächste Fusionsreaktion das Neonbrennen, bei dem Magnesium und Sauerstoff entstehen. Der Sauerstoff reagiert beim Sauerstoffbrennen zu Silizium, Schwefel, Phosphor und Magnesium. Das Silizium fusioniert letztendlich unter 2 Milliarden Kelvin zu Eisen. Die Fusionskette endet hier.

Element	Symbol	Atommasse
Wasserstoff	H	1
Helium	He	4
Kohlenstoff	C	12
Sauerstoff	O	16
Neon	Ne	20
Natrium	Na	23
Magnesium	Mg	24
Silizium	Si	28
Phosphor	P	31
Schwefel	S	32
Eisen	Fe	56

Tab. 8.1: *Atommassen der Elemente*

Die Atommasse ist eine Verhältniszahl. Als Bezugsgröße wurde die Atommasse des Kohlenstoffisotops ^{12}C gewählt. Die relative Atommasse eines Atoms ist gleich der Masse eines Mols dieses Atoms, dividiert durch $\frac{1}{12}$ der Masse eines Mols ^{12}C .



Selbstlernaufgabe 8.1

Erstellen Sie die Kräftebilanz für die Stabilität eines Sterns.



Selbstlernaufgabe 8.2

Beschreiben Sie, weshalb der Bethe-Weizsäcker-Zyklus als CN-Zyklus oder CNO-Zyklus bezeichnet wird.

Welche Startreaktion und welches Endprodukt liegen dem Zyklus zugrunde?



Selbstlernaufgabe 8.3

Nennen Sie die Gründe, warum das Heliumbrennen als 3- α -Prozess bezeichnet wird.

8.6 Entwicklungsende der Sterne

Die Fusionskette gilt als beendet, nachdem das schwere Element Eisen entstanden ist. Die Temperatur im Kern ist nun so hoch, dass die Atomkerne des Eisens zerfallen. Der Stern kollabiert erneut mit einer gewaltigen Gravitationskraft, bei der eine so hohe Dichte entsteht, dass die Elektronen sich mit den Protonen verbinden. Aus diesen Protonen werden unter Ausstoß von Neutrinos Neutronen.

Neutrinos sind massearme neutrale Teilchen, die bei Umwandlungsprozessen oder Zerfallsprozessen entstehen.

Je höher die Neutronenanzahl wird, desto instabiler ist der Stern, so dass abschließend ein Kollaps dazu führt, dass die auf den Kern zufallende Masse an Teilchen explosionsartig am Kern reflektiert und unter enormer Lichtemission zurück ins All geschleudert wird. Diese explosionsartige Reaktion am Ende des Sternlebens bezeichnet man als Supernova.

Grundsätzlich unterscheidet man zwei Arten von Supernovae. Die Typ-I-Supernova entsteht als mögliches Ende eines Weißen Zwerges unter der Voraussetzung, dass er einen Doppelsternbegleiter hat. Materie vom Begleiter überträgt sich dabei auf den Weißen Zwerg und führt zu einer Supernovaexplosion. Die Typ-II-Supernova bringt ausschließlich Neutronensterne und schwarze Löcher hervor.

Neutronensterne entstehen überwiegend bei massereichen Vorläufersternen von ca. 1,4 bis 3 Sonnenmassen. Noch massereichere Vorläufer enden als schwarze Löcher, die massearmen enden meist ohne Supernova als Weiße Zwerge.

Pulsare (Abk. PSR) sind rotierende Neutronensterne. Sie setzen als Radioquelle ihre Strahlung in Pulsperioden ab. Die Pulsperioden sind meistens konstant und liegen je nach Pulsar zwischen 1,5 ms und 8 s.

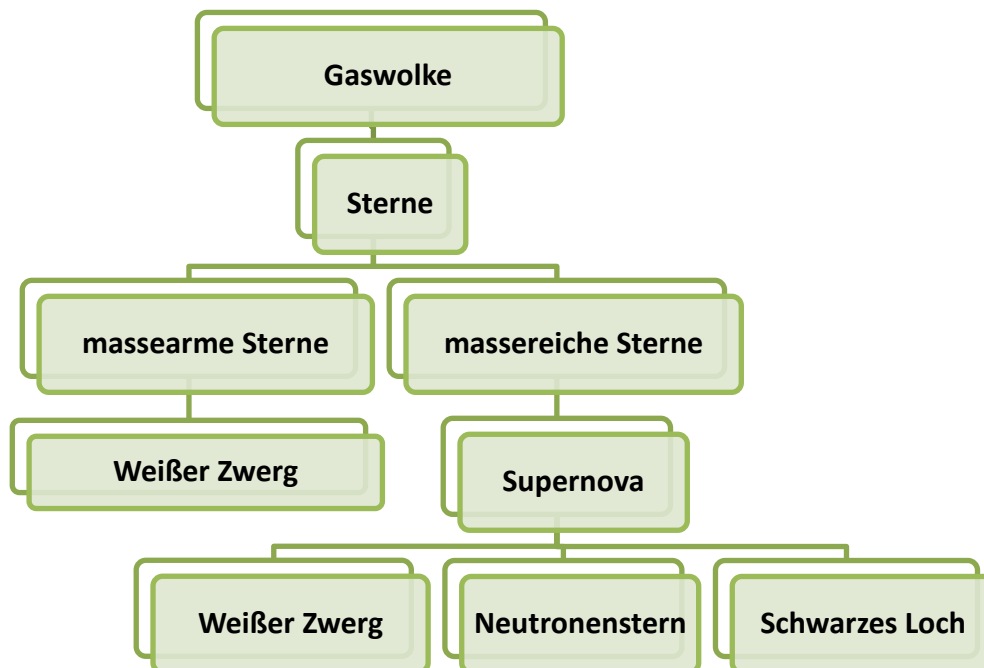


Abb. 8.7: Übersicht über die Sternentwicklung

Selbstlernaufgabe 8.4

Beschreiben Sie die Entstehungsweise eines Neutronensterns.



Selbstlernaufgabe 8.5

Welches Element bringt das Siliziumbrennen hervor?



Selbstlernaufgabe 8.6

Endet ein Roter Riese immer als Weißer Zwerg?





8.7 Zusammenfassung

Die Sternentwicklung beginnt im ISM. Dort kommt es zur Teilchenkompression in einer Gaswolke.

Man unterscheidet massearme Sterne und massereiche Sterne. Ihre Weiterentwicklung und ihre Degeneration sind unterschiedlich. Erst ab 0,8 Sonnenmassen ist eine Kernfusionsreaktion möglich.

Der erste Fusionsprozess ist das Wasserstoffbrennen, das über den p-p-Zyklus oder den Bethe-Weizsäcker-Zyklus Heliumkerne produziert. Bei massearmen Sternen, wie unserer Sonne, ist dies die einzige Fusionsstufe. Diese Sterne erlöschen als Weiße Zwerge.

Die massereichen Sterne durchlaufen eine Fusionskette bis hin zum schweren Element Eisen. Diese Sterne enden mit einer Supernova als Neutronensterne, Weißer Zwerg oder Schwarzes Loch.



8.8 Hausaufgaben

1. Beschreiben Sie, was Sie unter einem „schweren Element“ verstehen.
2. Finden Sie die falschen Aussagen
 - a) Die p-p-Reaktion endet mit dem Element Helium.
 - b) Rote Riesen beenden ihr Dasein stets als Weißer Zwerg.
 - c) Pulsare sind rotierende Neutronensterne.
 - d) Unsere Sonne gehört zu den massereichen Sternen.
 - e) Die Sternentwicklung beginnt durch eine Teilchenkompression.
 - f) Das Endprodukt des Heliumbrennens ist Sauerstoff.
 - g) Beim Sauerstoffbrennen entsteht u. a. Silizium.
 - h) Die Fusionskette endet beim Element Eisen.
3. Welche besondere Rolle kommt dem Kohlenstoff im CN-Zyklus zu?
4. Nennen Sie die drei Endstufen der Sternentwicklung massereicher Sterne.
5. Umreißen Sie die Bedeutung des Begriffs „Schalenbrennen“?
6. Welche Wahl ist zutreffend?
 - a) Eine Supernova entsteht nur bei massereichen Sternen.
 - b) Bei der Entstehung eines Neutronensterns entstehen Neutrinos.
 - c) Der 3- α -Prozess wird auch Salpeterprozess genannt, weil ein Zwischenprodukt HNO_3 (Salpetersäure) ist.
 - d) Eine Kernfusion kann bei allen Sternen einsetzen.

- Wahl I: Alle Aussagen sind richtig.
Wahl II: Alle Aussagen sind falsch.
Wahl III: Aussagen a) und b) sind richtig.
Wahl IV: Aussagen a) und c) sind richtig.

8.9 Lösungen zu den Selbstlernaufgaben



Lösung zur Selbstlernaufgabe 8.1

$$\vec{F}_G = \vec{F}_S$$

Sind der nach innen wirkende Gravitationsdruck und der nach außen wirkende Strahlungsdruck gleich groß, ist der Stern stabil. Sinkt durch verminderte Fusionsprozesse der Strahlungsdruck, so resultiert eine größere Gravitationskraft.

Lösung zur Selbstlernaufgabe 8.2

Innerhalb des Bethe-Weizsäcker-Zyklus entsteht bei 10^6 Kelvin im Kern aus vier Wasserstoffkernen ein Heliumkern. Diese Reaktion läuft über die Zwischenprodukte Kohlenstoff, Stickstoff und Sauerstoff. Der Kohlenstoff wird regeneriert und steht dem Zyklus erneut zur Verfügung. Der CNO-Zyklus läuft überwiegend in massereichen Sternen ab.

Lösung zur Selbstlernaufgabe 8.3

Die drei Heliumkerne, die beim Heliumbrennen zu einem Kohlenstoffkern fusionieren, bezeichnet man auch als Alphateilchen. Diese Reaktion läuft bei 10^8 Kelvin ab und bildet als Zwischenprodukt Berylliumkerne.

Lösung zur Selbstlernaufgabe 8.4

Neutronensterne entstehen bei mehr als 8 Sonnenmassen am Ende der Sternentwicklung von massereichen Sternen aus einer Supernovaexplosion. Im Kern steigen die Dichte und die Temperatur so stark an, dass freie Elektronen in den Atomkern eindringen können. Dort reagieren sie mit Protonen und wandeln diese zu Neutronen um. Bei dieser Reaktion werden Neutrinos frei.

Lösung zur Selbstlernaufgabe 8.5

Siliziumbrennen ist die letzte Fusionsstufe und bringt das Element Eisen hervor.

Lösung zur Selbstlernaufgabe 8.6

Nein. Ein Roter Riese kann mit weniger als 8 Sonnenmassen als Weißer Zwerg enden, mit mehr als 8 Sonnenmassen setzen dort weitere Fusionsstufen ein.