

A. Von der Staub- und Gaswolke zum Hauptreihenstern

Interstellare Gaswolken

Typische Dichten: Teilchen / cm³ (Erdatmosphäre am Erdboden: 3·10¹⁹ Teilchen / cm³)

Arten von Wolken:



Dunkelwolken

Gas und Staub absorbiert Licht



Reflexionsnebel

Sternlicht wird an Staub reflektiert



Emissionsnebel

Sternlicht regt Gas zum Leuchten an

Konkurrierende Kräfte auf Wolken:

Wolken ziehen sich zusammen wegen der

Wolken werden auseinander getrieben wegen des

.....
(hängt ab von Dichte und Ausdehnung)

.....
(hängt ab von Temperatur)

Bei kugelsymmetrischer Wolke überwiegt die anziehende Kraft typischerweise ab Sonnenmassen.

Beim Kontrahieren zerfällt die Wolke (u.U. durch Schockwelle einer Supernova induziert) in viele Teilwolken. Sterne entstehen also immer in Gruppen (und Doppel- oder Mehrfachsternsysteme treten sehr häufig auf).

Kontraktion einer Teilwolke → Gravitationsenergie wird frei und Dichte wird größer → Aufheizen des Kerns → bei 2000K dissoziieren H₂-Moleküle, dann werden H und He ionisiert (Plasma) → Strahlung aus Kernbereich wird in Staubhülle absorbiert und dort als Wärmestrahlung (ca. 100K, d.h. Infrarot) abgegeben → Infrarotstern ist entstanden → weitere Kontraktion, bis im Kernbereich die Fusion (ab etwa 5 Millionen K) einsetzt → Eintritt des Sterns in das Hauptreihenstadium

Bei Sternmassen < 7% der Sonnenmasse gibt es keine Fusion → Brauner Zwerg

Die Zeitdauer von der kollabierenden Teil-Wolke bis zum Hauptreihenstern hängt stark von der Masse ab:

massereiche O und B Sterne: ... einige Jahre

sonnenähnliche F und G Sterne: ... einige Jahre

massearme K und M Sterne: ... einige Jahre

B. Hauptreihenstadium

Mit dem Einsetzen des Wasserstoffbrennens ist die Kontraktion beendet und der Stern erreicht die Hauptreihe.

Kennzeichen des Hauptreihenstadiums:

- Wasserstoffbrennen im Kerninneren
- Gravitationsdruck einerseits und Gas- und Strahlungsdruck andererseits stehen im Gleichgewicht.

Je massereicher der Stern, umso höher der Druck und die Temperatur im Kern des Sterns und damit um so höher die Strahlungsleistung. Für $L^* > 10^5$ zerreißt bei einem Hauptreihenstern der Strahlungsdruck den Stern.

Die Verweildauer τ auf der Hauptreihe hängt von m ab. Für die Sonne gilt $\tau_{\odot} \approx 10 \cdot 10^9$ Jahre.

Aufgaben 1. Begründen Sie, dass für die Verweildauer τ auf der Hauptreihe gilt: $\tau \sim \frac{1}{m^2}$

2. Zeigen Sie, dass aus $L^* \leq 10^5$ für die Masse m eines Sterns $m < 50 \cdot m_{\odot}$ folgt.

3. Schätzen Sie für sehr massereiche Hauptreihensterne (B0 mit $M \approx -5$) die Masse und die Verweildauer auf der Hauptreihe ab.

C. Rote Riesen

Wasserstoff im Kern nahezu „verbraucht“, d.h. zu Helium fusioniert → Strahlungsdruck lässt nach → Stern kontrahiert → Gravitationsenergie wird frei → Temperatur steigt → ab etwa 100 Millionen K beginnt das „Heliumbrennen“ (Drei-Alpha-Prozess), d.h. He wird zu C fusioniert (s.u.) → Gas- und Strahlungsdruck nimmt zu → Stern dehnt sich erheblich aus → Oberflächentemperatur nimmt dabei ab → Leuchtkraft nimmt deutlich zu ($L \sim R^2$) → periodische Leuchtkraft- und Oberflächentemperaturänderung wegen „Gleichgewichtsstörungen“ beim Übergang vom Hauptreihen zum Riesenstadium (so genannte „Pulsationsveränderliche“ mit Perioden von 2d bis 50d)

Erklären Sie den Namen „Drei-Alpha-Prozess“ für die folgende Fusionsreaktion!



Ist der Heliumvorrat im Kern verbraucht (und die Sternmasse groß genug) erfolgt nach weiterer Kontraktion und Temperaturzunahme im Kern das „Kohlenstoffbrennen“, d.h. nun wird C fusioniert.

In konzentrischen Hüllen um den Kern wird H und He fusioniert.

In immer kürzer werdenden Zeiträumen wird Neon, dann Sauerstoff, und schließlich Schwefel und Silizium fusioniert.

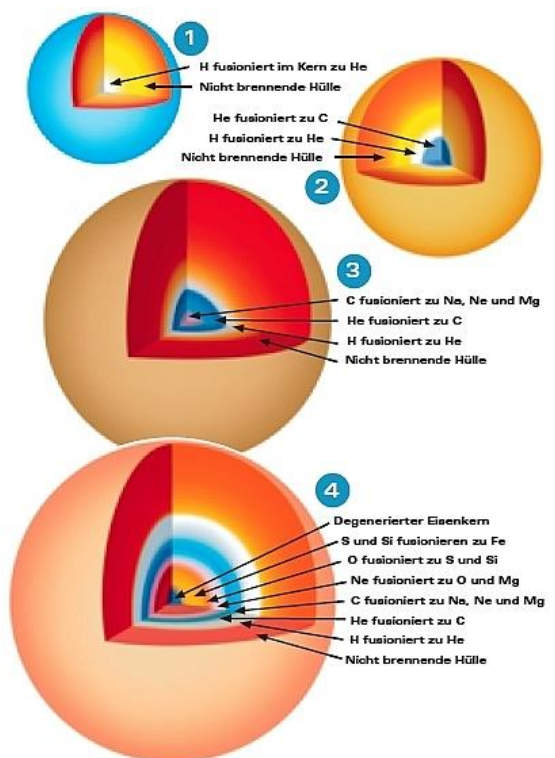
Der Fusionsprozess endet, wenn im Kern des Sterns Eisen entsteht, denn die Fusion von Eisen benötigt Energie.

Für einen Stern mit 18-facher Sonnenmasse gilt:

Brennstoff	typische Temperatur	Brenndauer
H – Brennen	40 Millionen Kelvin	10 Millionen Jahre
He – Brennen	190 Millionen Kelvin	1 Million Jahre
C – Brennen	740 Millionen Kelvin	10 000 Jahre
Ne – Brennen	1,6 Milliarden Kelvin	10 Jahre
O – Brennen	2,1 Milliarden Kelvin	5 Jahre
Si – Brennen	3,4 Milliarden Kelvin	7 Tage

Fusion schwerer

Elemente 10 Milliarden Kelvin Supernova – Explosion



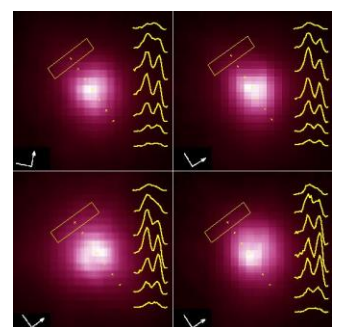
Aufgabe

Beteigeuze im Sternbild Orion ist ein Pulsationsveränderlicher und etwa 600 Lj entfernt.

Der Winkeldurchmesser des Sterns schwankt etwa zwischen 0,026'' und 0,042'' mit einer halbregelmäßigen Periode von ca. 2000 Tagen, die scheinbare Helligkeit nimmt Werte zwischen 0,3 und 0,6 an.

Die Oberflächentemperatur beträgt etwa 3500K.

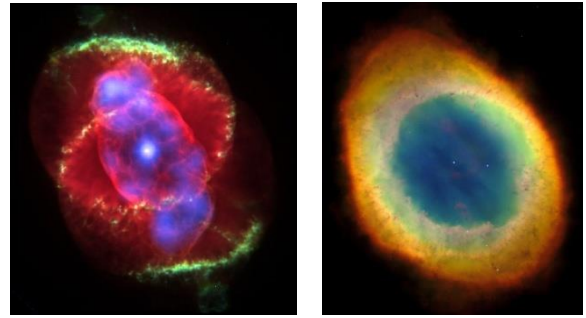
- Berechnen Sie den maximalen und den minimalen Sternradius von Beteigeuze in Vielfachen der Astronomischen Einheit.
- Welche relative maximale bzw. minimale Leuchtkraft L^* hat Beteigeuze?
- Für die Masse von Beteigeuze findet man 20 Sonnenmassen angegeben. Warum stimmt dieser Wert nicht überein mit dem Wert, der sich aus der Masse-Leuchtkraft-Beziehung ergibt?



Pulsationen im UV-Bereich aufgenommen mit Hubble

Der Endzustand eines Sterns hängt im Wesentlichen von seiner Masse ab.

Rote Riesen stoßen oft einen großen Teil der äußeren, weit vom Kern entfernten Hülle ab. Es entsteht ein so genannter **Planetarischer Nebel**. Die expandierende Gashülle wird vom zurückbleibenden heißen Weißen Zwerg zum Leuchten angeregt. Planetarische Nebel sind nur wenige tausend Jahre zu beobachten.



Weiße Zwerge

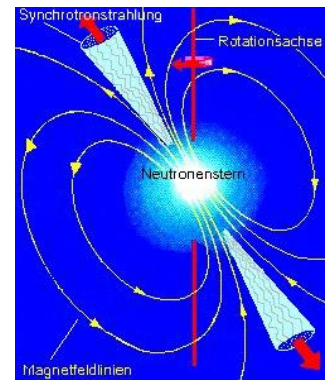
Sternmasse $< 1,4$ Sonnenmassen \rightarrow nach dem Heliumbrennen keine weitere Fusion mehr möglich \rightarrow fehlender Gasdruck \rightarrow Gravitationskollaps \rightarrow Stern wird auf die Größe der Erde komprimiert (entartetes Elektronengas liefert schließlich den Gegendruck) \rightarrow Dichte liegt nun bei bis zu einer Tonne pro cm^3 \rightarrow Kern des Roten Riesen ist zu einem Weißen Zwerg geschrumpft \rightarrow Weißer Zwerg kühlt langsam ab (in 1 bis 10 Milliarden Jahren) und ist dann nicht mehr zu beobachten.

Aufgabe: Zeigen Sie, dass Sirius B (Spektralklasse A2) mit den Daten $L^* \approx 0,002$ und $m^* \approx 1$ ein kleiner Stern sein muss. Berechnen Sie auch seine Dichte!

Neutronensterne (Pulsare)

$1,4$ Sonnenmassen $<$ Sternmasse < 2 bis 3 Sonnenmassen \rightarrow Gravitationskollaps kann durch entartetes Elektronengas nicht gestoppt werden \rightarrow Protonen und Elektronen bilden Neutronen (inverser Beta-Zerfall) \rightarrow Druck des entarteten Neutronengases stoppt den Kollaps \rightarrow Kern des Roten Riesen ist zu einem großen Atomkern (aus Neutronen) geschrumpft \rightarrow etwa 10^8 Tonnen pro cm^3 \rightarrow Radius ca. 20km \rightarrow Neutronenstern nicht direkt beobachtbar.

Beim Kollaps nimmt die Rotation des Sterns erheblich zu (Drehimpulserhaltung) \rightarrow bis zu 1000 Umdrehungen pro Sekunde \rightarrow auch Magnetfeld wird extrem stark (bis zu 10^8 Tesla) \rightarrow Stimmt Rotationsachse nicht mit Magnetfeldachse überein, so werden Elektronen auf Schraubenlinien um Magnetfeldlinien auf nahezu Lichtgeschwindigkeit beschleunigt. \rightarrow Elektronen senden dabei Synchrotronstrahlung in einem engen, rotierenden Kegel aus. \rightarrow Befindet man sich im vom Strahlungskegel überstrichenen Bereich, so empfängt man Strahlungspulse in exakt gleichen Zeitintervallen. \rightarrow Kern des Roten Riesen ist zu einem Pulsar geworden.



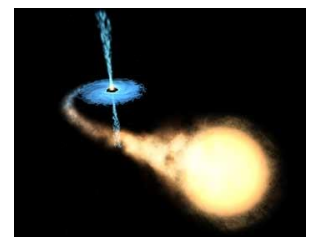
Da die Energie der Strahlung aus der Rotation stammt, nimmt die Rotationsdauer pro Tag etwa einige Nanosekunden ab.

Aufgabe:

- Welche Dichte hat ein Proton mit der Masse $1,7 \cdot 10^{-27}$ kg und dem Radius $1,4 \cdot 10^{-15}$ m ?
- Welchen Radius hätte die Sonne, wenn man sie auf die Dichte eines Neutronensterns mit ca. 10^8 t/cm^3 komprimieren könnte?
- Eine rotierende Kugel der Masse M soll pro Sekunde 100 Umdrehungen ausführen. Welche Dichte muss die Kugel mindestens aufweisen, damit sie durch die Gravitationskraft zusammengehalten werden kann?

Stellare Schwarze Löcher (Kollapsare)

Reststernmassen > 2 bis 3 Sonnenmassen \rightarrow Kollaps kann auch nicht durch Druck des entarteten Neutronengases gestoppt werden. \rightarrow Physikalische Aussage über das, was aus dem Stern entsteht, ist nicht möglich. \rightarrow Selbst Licht kann aus dem Schwarzen Loch nicht entweichen \rightarrow Schwarze Löcher sind nur indirekt beobachtbar. Im Doppelsternsystem Cygnus X-1 ist eine Komponente ein Schwarzes Loch.



Aufgabe: Der Schwarzschildradius $R_s = \frac{2 \cdot G \cdot M}{c^2}$ gibt an, innerhalb welchen Abstands ein Photon eine Masse

M nicht mehr verlassen kann. Bestimmen Sie für die Masse unserer Sonne den Schwarzschildradius!

Q12 * Astrophysik * Sternentwicklung

A. Von der Staub- und Gaswolke zum Hauptreihenstern

Interstellare Gaswolken

Typische Dichten: $10 - 10^4$ Teilchen / cm^3 (Erdatmosphäre am Erdboden: $3 \cdot 10^{19}$ Teilchen / cm^3)

Arten von Wolken:



Dunkelwolken

Gas und Staub absorbiert Licht



Reflexionsnebel

Sternlicht wird an Staub reflektiert



Emissionsnebel

Sternlicht regt Gas zum Leuchten an

Konkurrierende Kräfte auf Wolken:

Wolken ziehen sich zusammen wegen der

Wolken werden auseinander getrieben wegen des

..... **Gravitationskraft**

(hängt ab von Dichte und Ausdehnung)

..... **Gas- und Strahlungsdruck**

(hängt ab von Temperatur)

Bei kugelsymmetrischer Wolke überwiegt die anziehende Kraft typischerweise ab ... **1000** ... Sonnenmassen.

Beim Kontrahieren zerfällt die Wolke (u.U. durch Schockwelle einer Supernova induziert) in viele Teilwolken. Sterne entstehen also immer in Gruppen (und Doppel- oder Mehrfachsternsysteme treten sehr häufig auf).

Kontraktion einer Teilwolke → Gravitationsenergie wird frei und Dichte wird größer → Aufheizen des Kerns → bei 2000K dissoziieren H_2 -Moleküle, dann werden H und He ionisiert (Plasma) → Strahlung aus Kernbereich wird in Staubhülle absorbiert und dort als Wärmestrahlung (ca. 100K, d.h. Infrarot) abgegeben → Infrarotstern ist entstanden → weitere Kontraktion, bis im Kernbereich die Fusion (ab etwa 5 Millionen K) einsetzt → Eintritt des Sterns in das Hauptreihenstadium

Bei Sternmassen $< 7\%$ der Sonnenmasse gibt es keine Fusion → Brauner Zwerg

Die Zeitdauer von der kollabierenden Teil-Wolke bis zum Hauptreihenstern hängt stark von der Masse ab:

massereiche O und B Sterne: ... einige **10^4** Jahre

sonnenähnliche F und G Sterne: ... einige **10^7** Jahre

massearme K und M Sterne: ... einige **10^8** Jahre