

# Q12 \* Astrophysik \* Sternentwicklung

## 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.

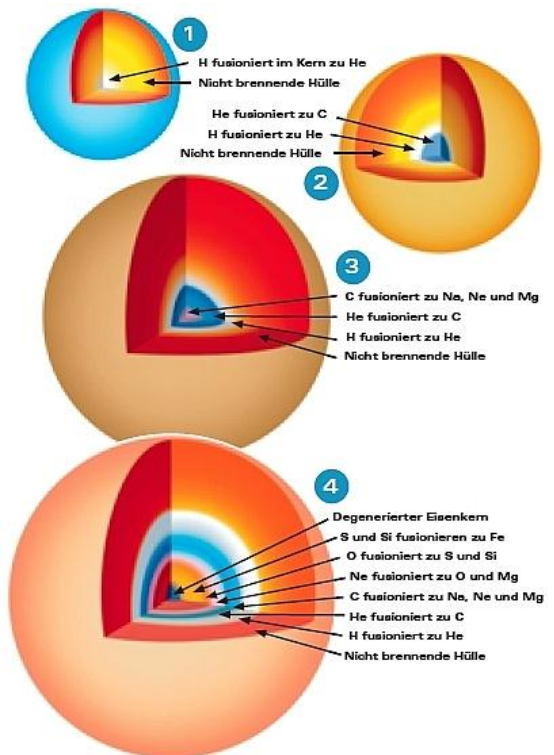
In immer kürzer werdenden Zeiträumen wird Neon, dann Sauerstoff, und schließlich Schwefel und Silizium fusioniert.

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



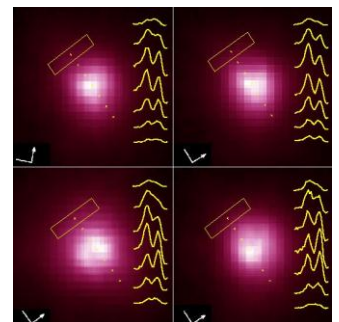
## Aufgabe

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?

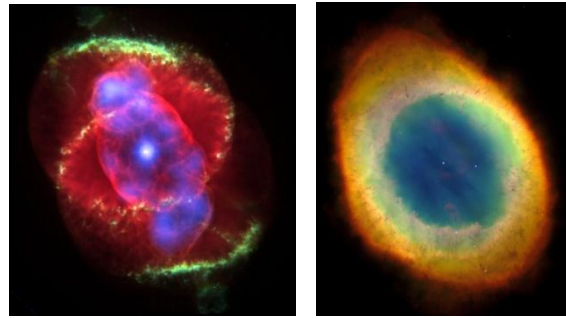


Pulsationen im UV-Bereich aufgenommen mit Hubble

## D. Endzustände von Sternen

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  $\text{cm}^3$   $\rightarrow$  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!

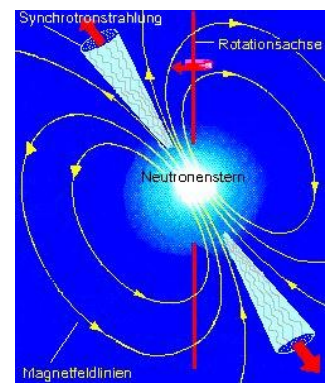
### Neutronensterne (Pulsare)

$1,4$  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  $\text{cm}^3$   $\rightarrow$  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.

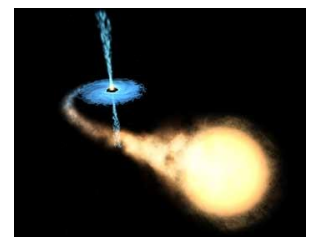


Aufgabe:

- 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.  $10^8 \text{ t/cm}^3$  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!