

Sterne, Galaxien und das Universum

Teil 4: Leben nach der Hauptreihe

Peter Hauschildt
yeti@hs.uni-hamburg.de

Hamburger Sternwarte
Gojenbergsweg 112
21029 Hamburg

5. Juli 2019

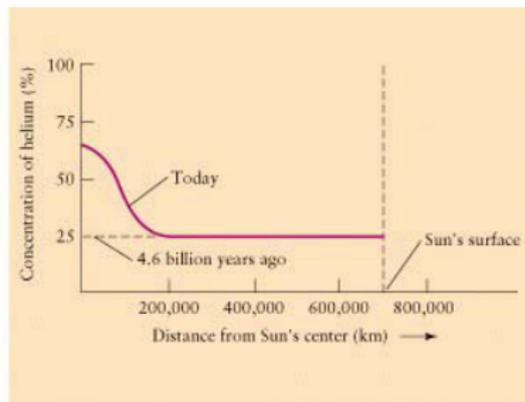
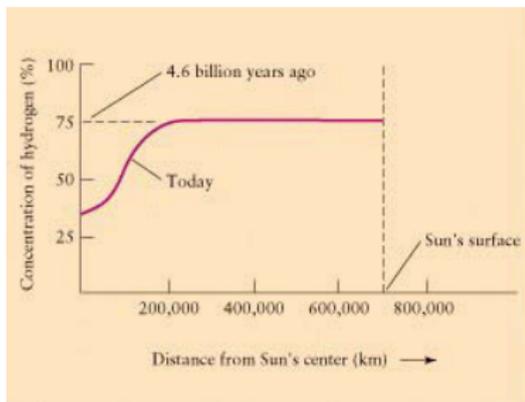
Übersicht

- ▶ auf dem Weg zum Roten Riesen
- ▶ Helium Brennen
- ▶ Entwicklung von Sternhaufen
- ▶ Sternpopulationen
- ▶ Entwicklung von Doppelsternen

Sternwind



Die Sonne

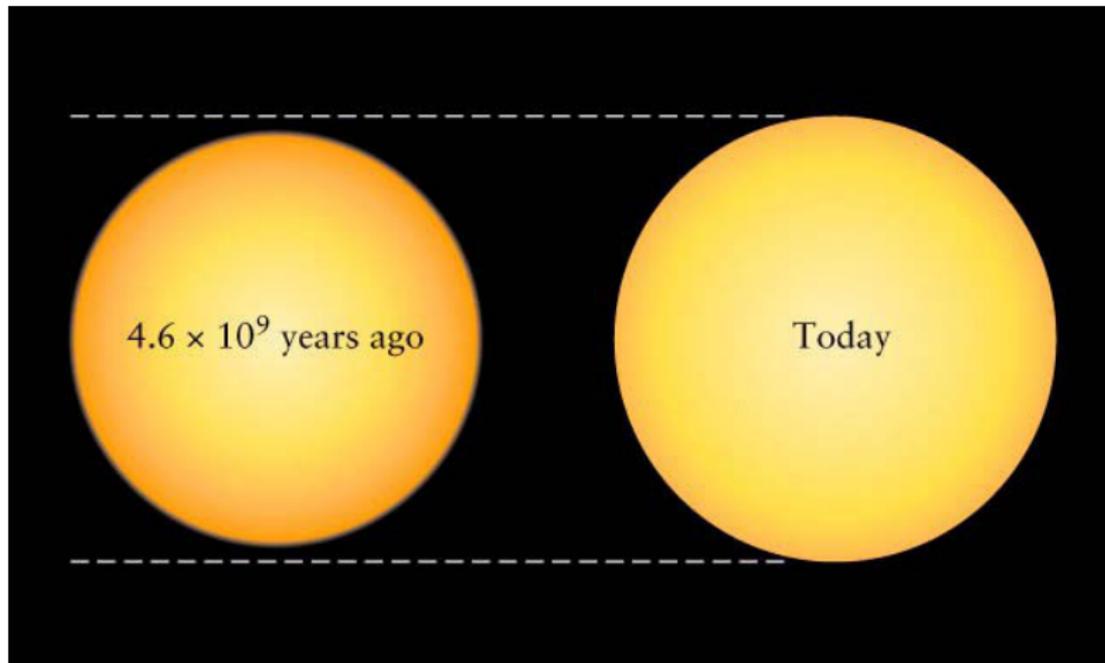


- ▶ ist schon 4.6 Gyr alt
- ▶ → H-Brennen hat Zusammensetzung verändert
- ▶ aber nur im Kern!

Sternleben

- ▶ ein Protostern wird zum Stern wenn H-Brennen zündet
- ▶ → zero-age-main-sequence
- ▶ mit der Zeit wird mehr H zu He fusioniert
- ▶ → Teilchenzahl im Kern ändert sich
- ▶ dadurch sinkt der Gasdruck im Kern
- ▶ → Kerngebiet zieht sich zusammen
- ▶ → Temperatur (und Druck!) erhöhen sich!
- ▶ → Leuchtkraft steigt deutlich an!
- ▶ dadurch dehnen sich die äußeren Schichten etwas aus:

Sonne gestern–heute



Sternleben

- ▶ erhöhtes L (40%)
- ▶ Radius ca. 6% größer, T_{eff} ca. 300 K höher
- ▶ → Temperaturen außerhalb des Kerns erhöhen sich
- ▶ → H-Brennen startet dort auch!
- ▶ → mehr 'Sprit'
- ▶ → etwas längeres Leben auf der MS!

Lebenszeiten

- ▶ Massereiche Sterne:
- ▶ → viel höhere Zentraltemperaturen
- ▶ → sehr viel größere Leuchtkräfte
- ▶ → kurze Lebenszeit!
- ▶ $t_{\text{MS}} \propto M^{-2.5}$

Table 21-1 Main-Sequence Lifetimes

| Mass (M_{\odot}) | Surface temperature (K) | Spectral class | Luminosity (L_{\odot}) | Main-sequence lifetime (10^6 years) |
|----------------------|-------------------------|----------------|----------------------------|--|
| 25 | 35,000 | O | 80,000 | 3 |
| 15 | 30,000 | B | 10,000 | 15 |
| 3 | 11,000 | A | 60 | 500 |
| 1.5 | 7,000 | F | 5 | 3,000 |
| 1.0 | 6,000 | G | 1 | 10,000 |
| 0.75 | 5,000 | K | 0.5 | 15,000 |
| 0.50 | 4,000 | M | 0.03 | 200,000 |

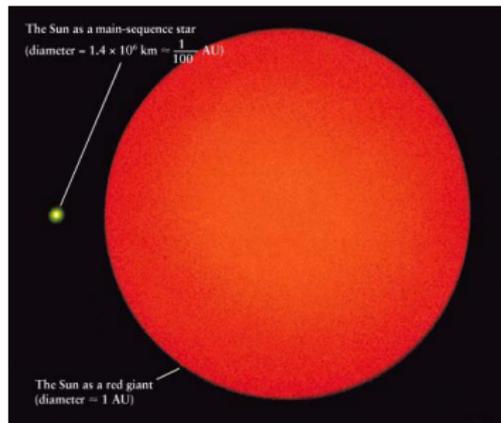
Ende des MS Lebens

- ▶ Ende der MS Zeit: *post-MS Phase*
- ▶ H im Kern verbrannt
- ▶ → Kern H-Brennen stoppt
- ▶ Temperaturen hoch genug für
- ▶ *H-Schalenbrennen* um den He-Kern
- ▶ He-Kern kühlt zunächst
- ▶ → Druck sinkt ab
- ▶ → Kern kontrahiert
- ▶ → Temperatur steigt wieder an
- ▶ → Energie fließt wieder nach außen
- ▶ → Gas in der H-Schalenquelle und drum herum wird heißer

Ende des MS Lebens

- ▶ → H-Schalenquelle wird größer und produziert mehr Energie
- ▶ He aus dem H-Schalenbrennen regnet auf den Kern
- ▶ → mehr Kernmasse und Kern kontrahiert weiter
- ▶ $1 M_{\odot}$ Stern:
 - ▶ Kern kontrahiert auf $1/3$ Größe
 - ▶ Zentraltemperatur steigt von 15 MK auf 100 MK
 - ▶ L erreicht $2000 L_{\odot}$

Sonne → Roter Riese



- ▶ während dieser Zeit dehnt sich der Stern weiter aus
- ▶ L steigt an, dadurch bläht sich der Stern gewaltig auf
- ▶ und wird in der Atmosphäre kühler
- ▶ $T_{\text{eff}} \approx 3500$ K
- ▶ → *Roter Riese*

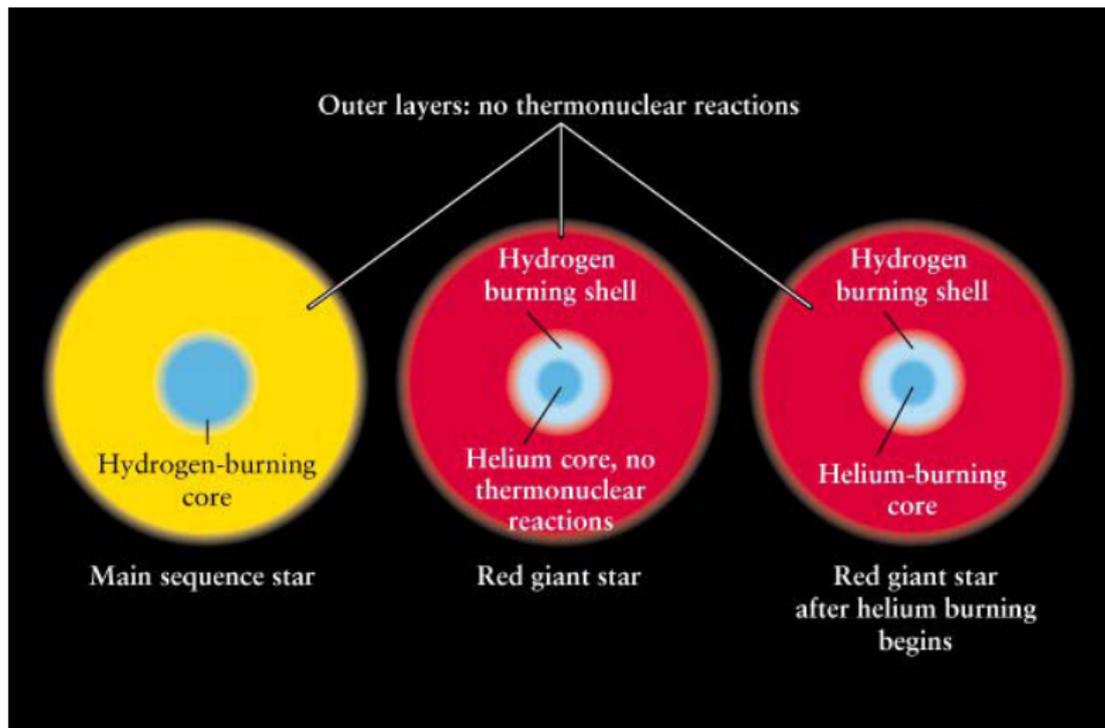
Rote Riesen

- ▶ große Ausdehnung
- ▶ → Hülle schwach gebunden
- ▶ → Roter Riese verliert Masse
- ▶ Sternwind bildet sich aus
- ▶ ca. 10 km/s
- ▶ ca. $10^{-7} M_{\odot}/\text{yr}$
- ▶ (Sonne: $10^{-14} M_{\odot}/\text{yr}$)

Rote Riesen

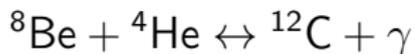
- ▶ zunächst: He-Kern, H-Schalenbrennen
- ▶ He-Kern: ca. 2 mal Erdgrösse
- ▶ He ist auch ein nuklearer Brennstoff
- ▶ dafür muss die Temperatur sehr hoch sein
- ▶ das wird erst erreicht wenn das H-Schalenbrennen mehr He auf den Kern geregnet hat
- ▶ He-Brennen startet wenn im Kern 100 MK erreicht sind:

Aufbau



Helium Brennen

- ▶ Fusion von ${}^4\text{He}$ zu ${}^{12}\text{C}$, ${}^{16}\text{O}$ etc.
- ▶ erste und wichtigste Reaktion: $3 {}^4\text{He} \rightarrow {}^{12}\text{C}$:
- ▶ *triple α Prozess*
- ▶ braucht 2 Schritte

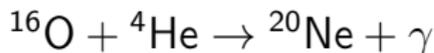
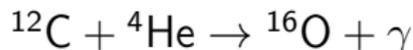


Helium Brennen

- ▶ erste Reaktion: ${}^8\text{Be}$ liegt ≈ 100 keV über Grundzustand
- ▶ \rightarrow kann wieder Zerfallen in $\approx 10^{-16}$ s
- ▶ ca. 10^5 mal länger als die Dauer eines Stoßes
- ▶ reicht um ${}^8\text{Be}$ auf einen Anteil 10^{-9} zu bringen
- ▶ genug um eine weitere Reaktion zu ermöglichen
- ▶ hohe Dichten erlauben α Einfang um ${}^{12}\text{C}$ zu produzieren
- ▶ Energie pro ${}^{12}\text{C}$: 7.275 MeV
- ▶ pro Masse sind das 1/10 der Energie des H-Brennens

Helium Brennen

- ▶ He Brennen extrem T abhängig: $T^{40...19}$
- ▶ sobald genug ^{12}C da ist
- ▶ \rightarrow weitere α Einfälle können auftreten:



- ▶ Energieproduktion pro $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$: 7.162 MeV
- ▶ $^{16}\text{O}(\alpha, \gamma)^{20}\text{Ne}$ produziert 4.73 MeV
- ▶ während des He-Brennens treten beide Reaktionen auf

Helium Brennen

- ▶ Kern He-Brennen stabilisiert den Kern
- ▶ dauert ca. 20% der Zeit des Kern H-Brennens
- ▶ Sonne: 2 Gyr
- ▶ He-Brennen beginnt verschieden für verschiedene Sternmassen
- ▶ $> 2 \dots 3 M_{\odot}$: startet graduell wenn Zündtemperatur erreicht

Helium flash

- ▶ kleinere Massen:
- ▶ Gas im Kern ist *entartet!*
- ▶ normales *ideales* Gas:
- ▶ Druck proportional zu Temperatur und Dichte
- ▶ das funktioniert wie ein Sicherheitsventil
- ▶ z.B.: Temperatur rauf durch mehr nukleares Brennen
- ▶ → Druck steigt an
- ▶ → Kern expandiert
- ▶ → Temperatur sinkt ab ...

Helium flash

- ▶ in Roten Riesen mit kleiner Masse:
- ▶ auf dem Weg zum He-Brennen werden Drücke im Kern sehr groß
- ▶ so groß das Pauli-Prinzip für Elektronen greift!
- ▶ dadurch ändert sich das Verhalten des Gases:
- ▶ Druck ist nun nicht länger Temperatur-abhängig
- ▶ → *entartetes Gas*
- ▶ in diesem Fall: *entartetes Elektronengas*
- ▶ nun wird eine Temperaturerhöhung *nicht* zu höherem Druck führen!!

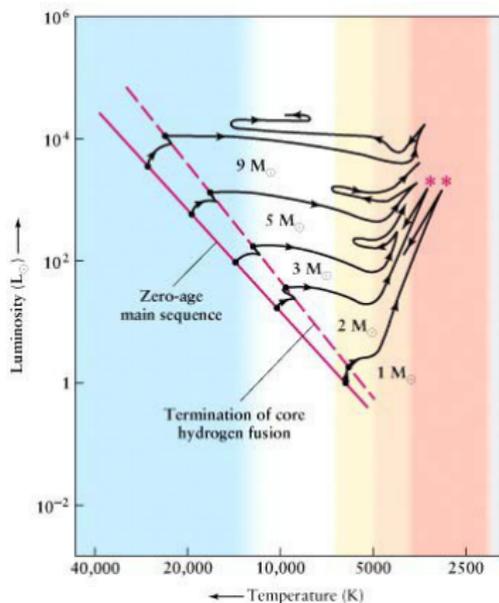
Helium flash

- ▶ irgendwann wird He-Brennen gezündet (T hoch genug)
- ▶ aber Druck erhöht sich nicht!
- ▶ T geht explosionsartig hoch da Energieerzeugung wie verrückt ansteigt
- ▶ → *He flash!*
- ▶ nach kurzer Zeit (Sekunden):
- ▶ Kernleuchtkraft erreicht $1 G L_{\odot}$!
- ▶ T so hoch das Entartung aufgehoben wird!
- ▶ → Kern expandiert → Temperatur sinkt
- ▶ → Energieerzeugung reduziert

Helium flash

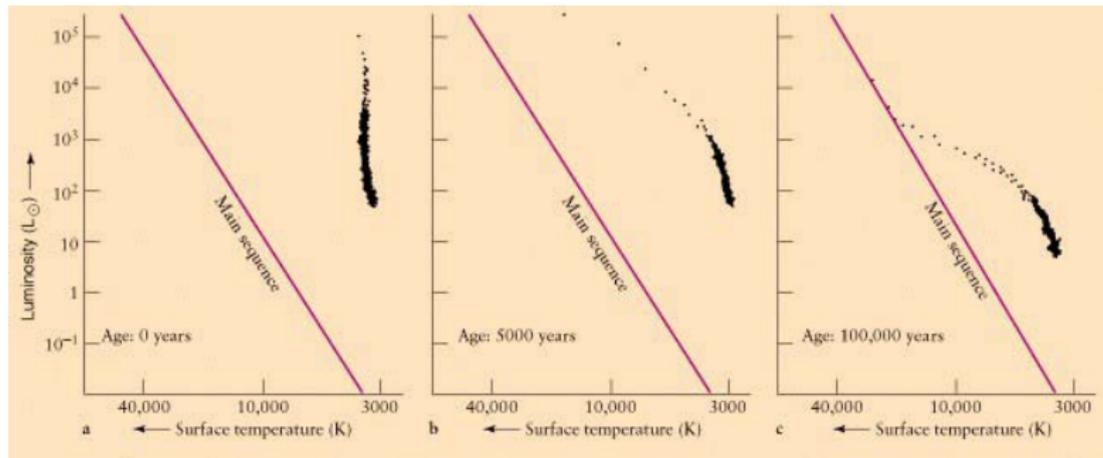
- ▶ He flash von außen nicht sichtbar:
- ▶ Hülle dämpft Effekt ab
- ▶ → Stern findet neues Gleichgewicht!
- ▶ L ist nach dem He flash *geringer* als vorher!
- ▶ H-Schalenbrennen abgekühlt (produziert weniger!)
- ▶ Hülle zieht sich etwas zusammen
- ▶ → T_{eff} wird größer

Entwicklungswege

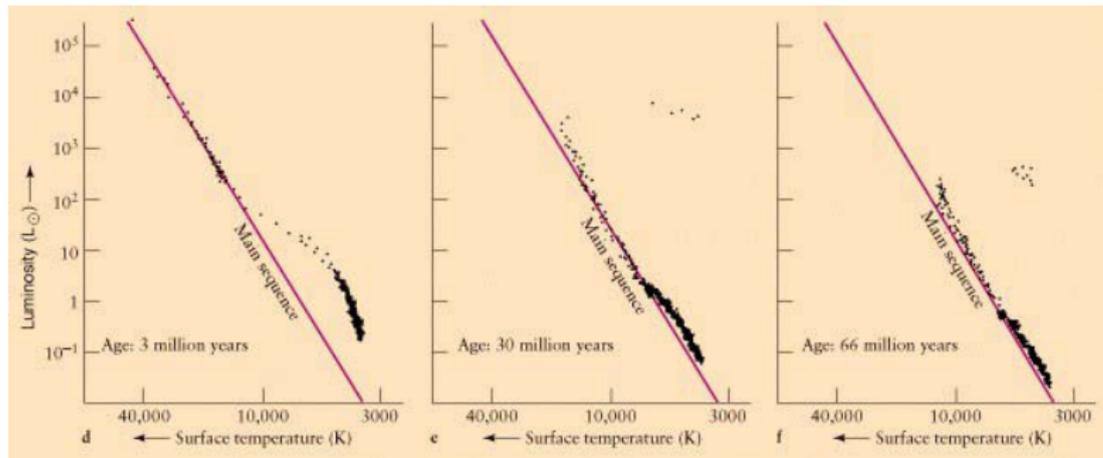


- ▶ Sternentwicklung lässt sich am Besten im HRD darstellen
- ▶ *: He flash

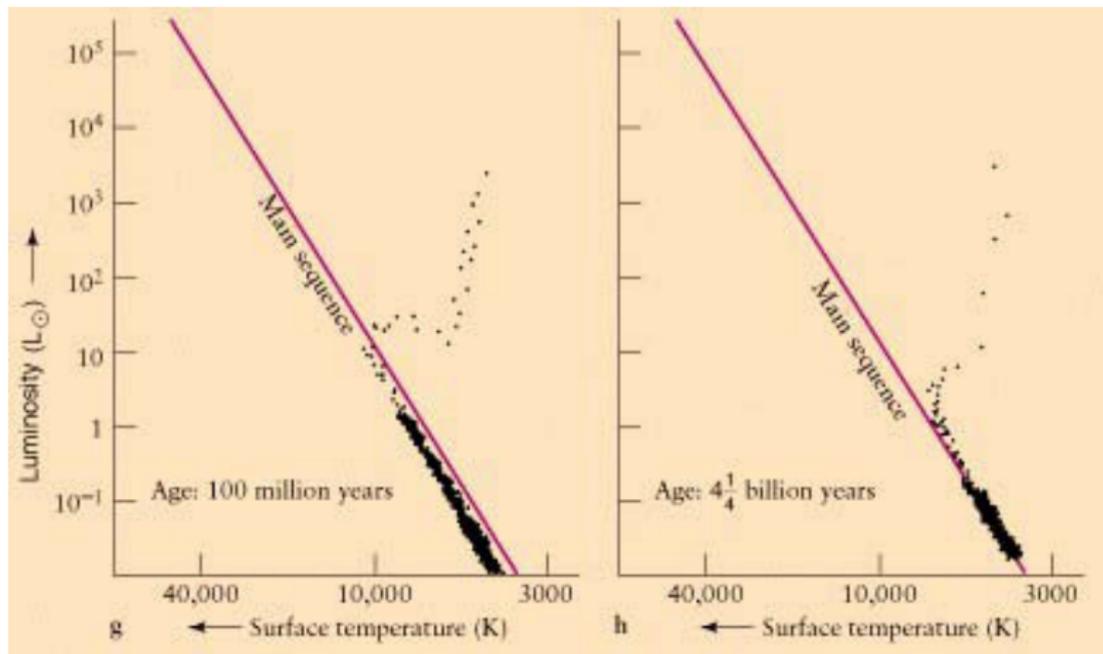
Entwicklung eines Sternhaufens



Entwicklung eines Sternhaufens



Entwicklung eines Sternhaufens



Entwicklung eines Sternhaufens

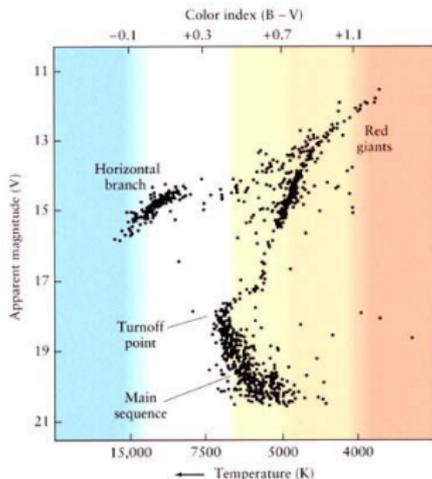
- ▶ Massereiche Sterne entwickeln sich viel schneller
- ▶ MS wird kürzer mit größerem Alter
- ▶ lässt sich beobachten, z.B. in

Kugelsternhaufen



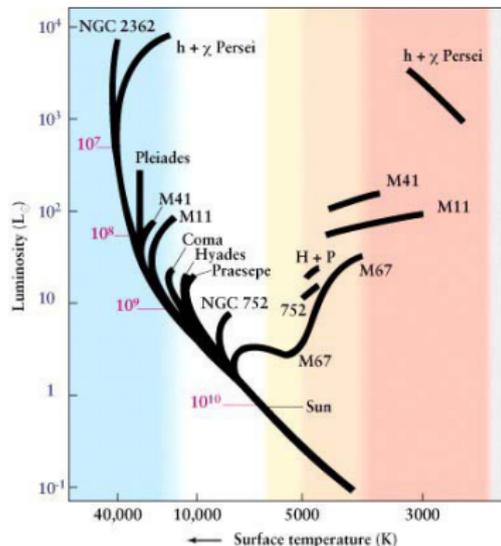
- ▶ kugelförmig, 1M Sterne
- ▶ M13:
- ▶ 7000 pc Entfernung
- ▶ 45 pc Durchmesser
- ▶ Mittlere Sterndichte →
- ▶ $100\times$ Sonnenumgebung

Kugelsternhaufen



- ▶ keine massereichen Sterne auf der MS
- ▶ → recht alt!
- ▶ Horizontalast:
- ▶ post-He flash mit He-Kernbrennen und H-Schalenbrennen

Kugelsternhaufen



- ▶ Alter des Haufens aus turnoff-Punkt!
- ▶ Kugelsternhaufen mit verschiedenen Altern
- ▶ → unterschiedliche turnoff-Punkte
- ▶ je älter desto 'tiefer'

Sternpopulationen

- ▶ Vergleich Feldsterne — Kugelsternhaufen:
- ▶ → *Sternpopulationen*
- ▶ reich/arm an schweren Elementen (*Metalle*)



Sternpopulationen

- ▶ Feldsterne →
- ▶ ca. solare Häufigkeiten der 'Metalle'
- ▶ → *Population I Sterne*
- ▶ Kugelsternhaufen →
- ▶ nur 3% der 'Metallhäufigkeiten' der Sonne
- ▶ *Metallarme Sterne*
- ▶ *Population II Sterne*

Sternpopulationen

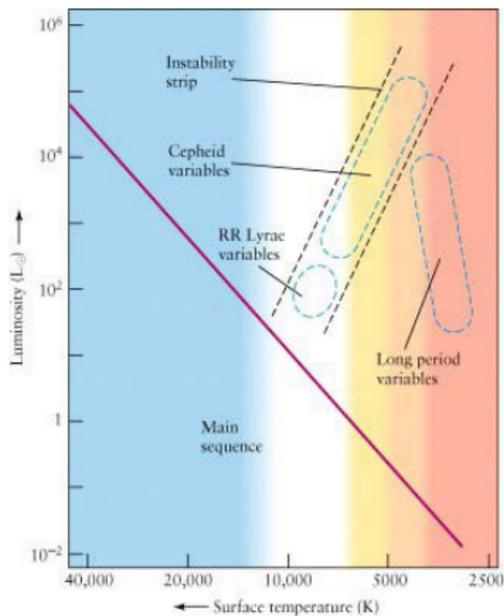
- ▶ Woher?
- ▶ Big Bang (s.u.) hat nur H+He produziert
- ▶ → alte Sterne mit weniger Metallen!
- ▶ die haben schwere Elemente produziert
- ▶ → Metallhäufigkeit junger Sterne höher!

pulsierende Sterne



- ▶ Mira:
- ▶ entdeckt 1595 (Fabricius)
- ▶ Periode: 332 d
- ▶ Helligkeitsvariation um Faktor 100!
- ▶ *lang-periodische Variable*
- ▶ kühle Riesen

pulsierende Sterne

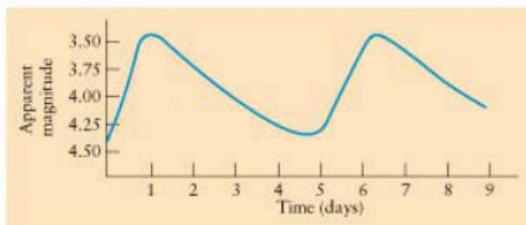


- ▶ Instabilitätsstreifen im HRD
- ▶ Sterne dort pulsieren
- ▶ werden periodisch größer und kleiner
- ▶ dabei ändert sich auch die Helligkeit!

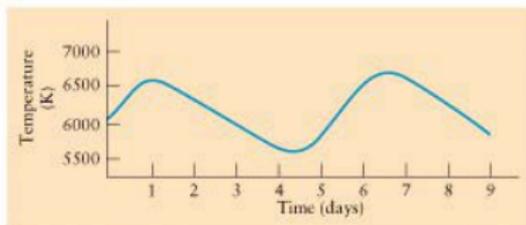
Cepheiden

- ▶ wichtigster Typ dieser Klassen:
- ▶ Cepheiden
- ▶ Grund der Oszillationen: He Ionisationszone
- ▶ → Hülle/Atmosphäre instabil
- ▶ sehr streng periodische Änderungen!
- ▶ sind auch sehr stark mit mittlerer Leuchtkraft korreliert!
- ▶ → *Periode-Leuchtkraft Beziehung*

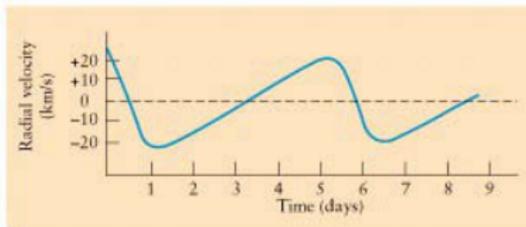
Cepheids



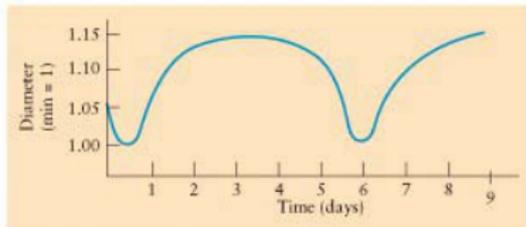
a



b



c

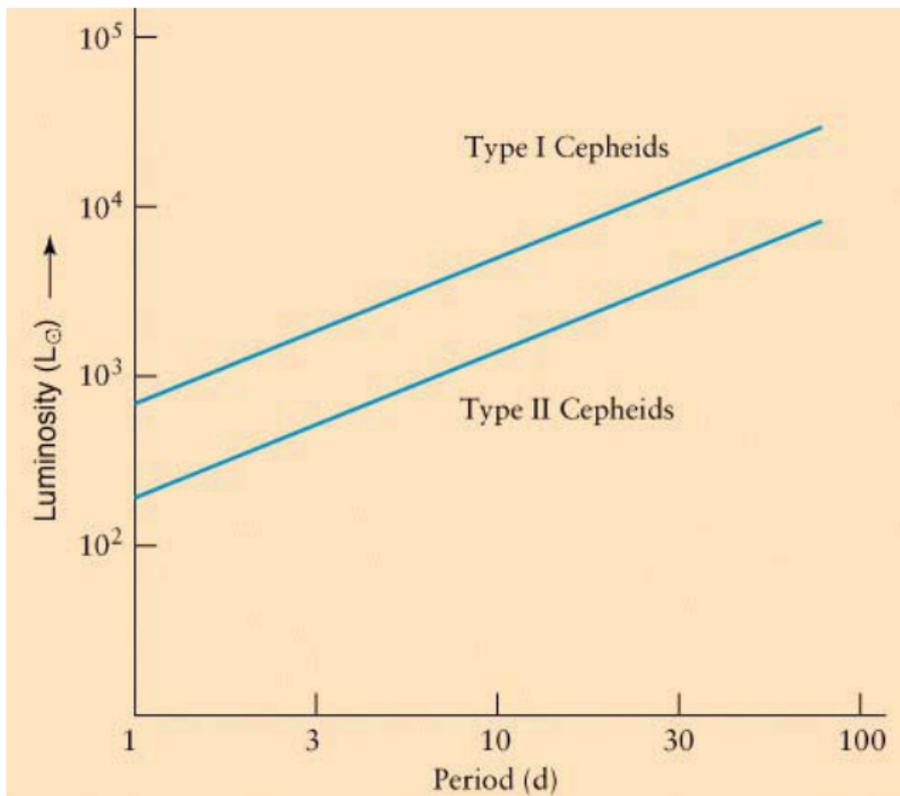


d

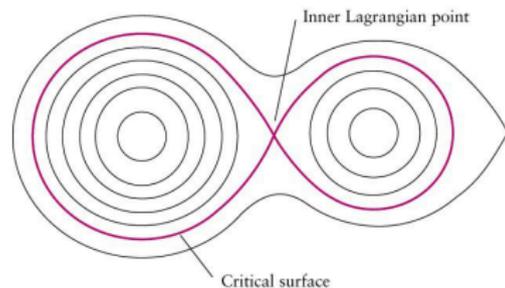
Cepheiden

- ▶ → *Periode-Leuchtkraft Beziehung*
- ▶ sehr hell
- ▶ → sehr wichtige Entfernungsmesser!
- ▶ 2 Untertypen:
 - ▶ Population I Sterne
 - ▶ Population II Sterne
- ▶ unterschiedliche P-L Beziehung!
- ▶ weiterer Typ: RR Lyr Sterne
- ▶ alles Pop II, kleinere Masse

Cepheids

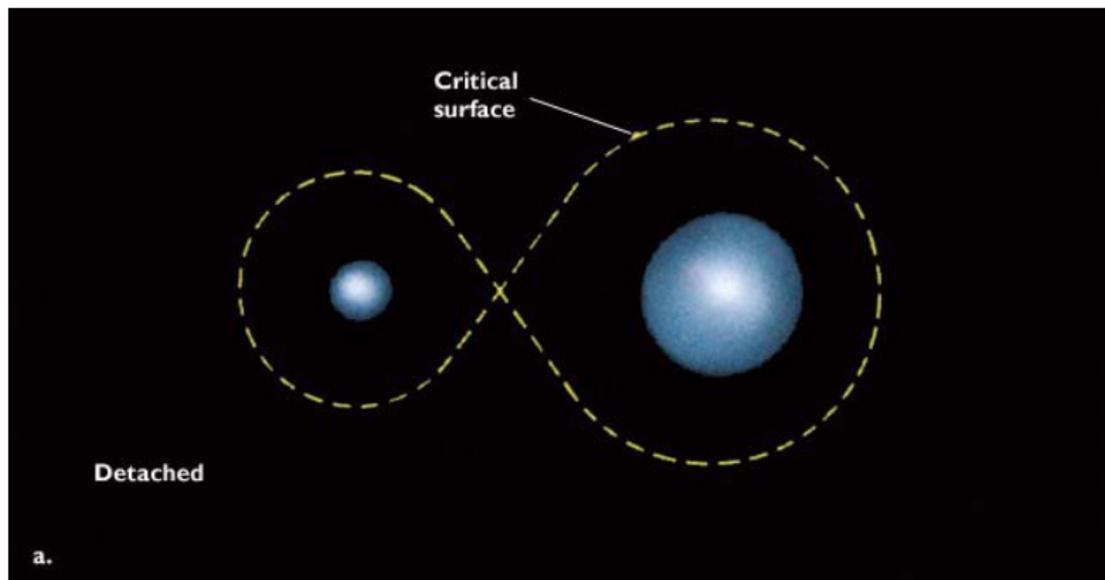


Doppelsterne

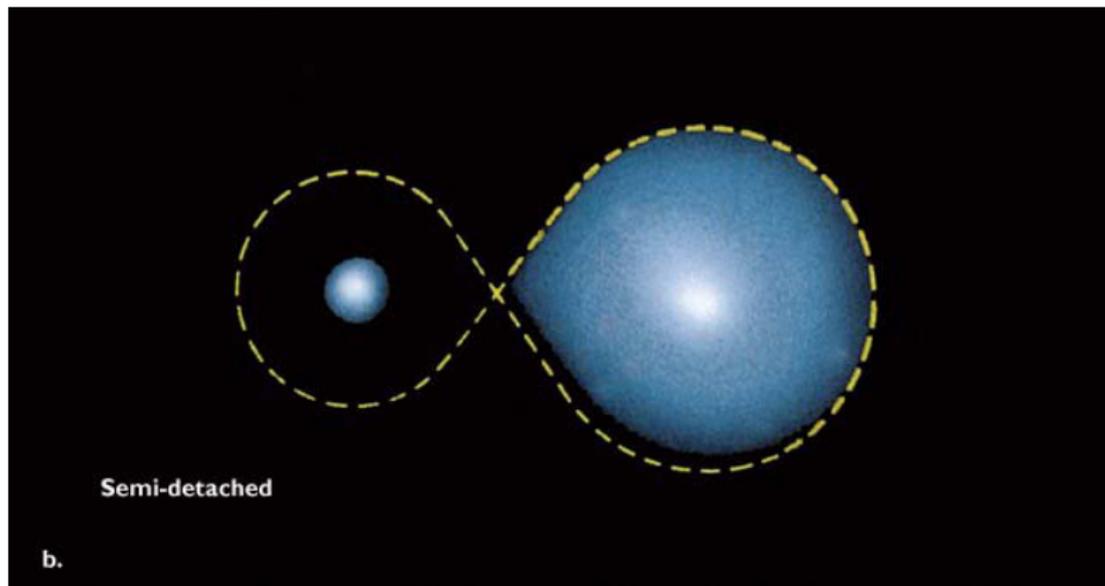


- ▶ in Doppelsternen kann u.U. Materie strömen
- ▶ *Roche-lobe*
- ▶ das ändert die Massen der Partner
- ▶ → Entwicklung der Sterne ist anders
- ▶ verschiedene Möglichkeiten:

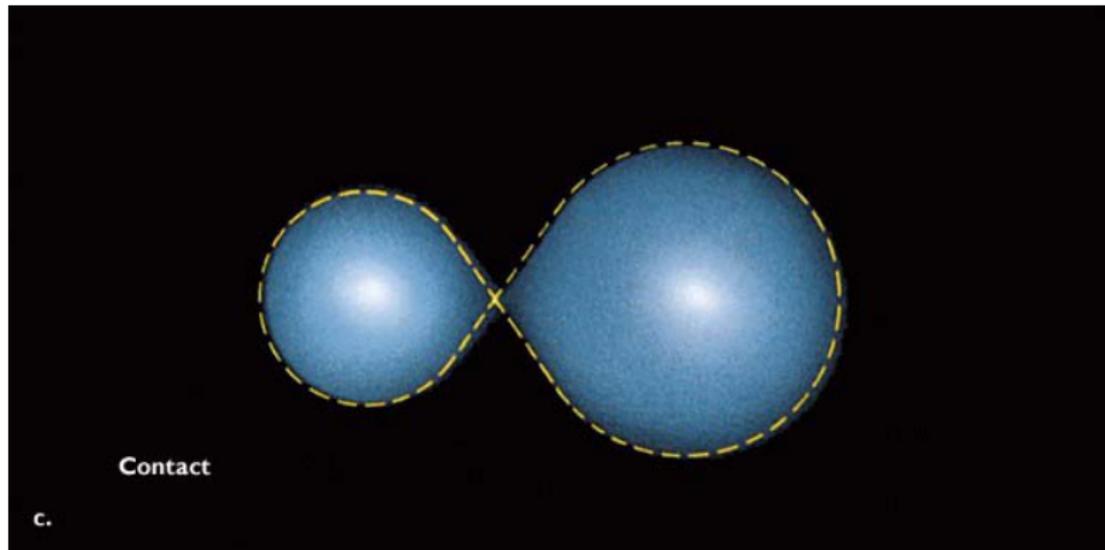
Doppelsterne



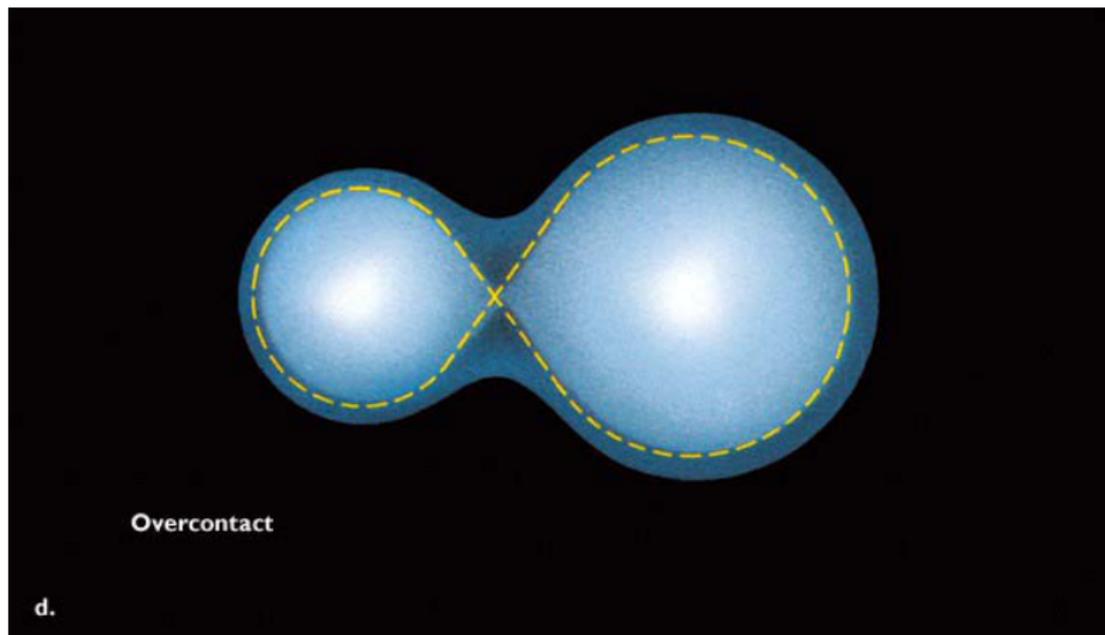
Doppelsterne



Doppelsterne



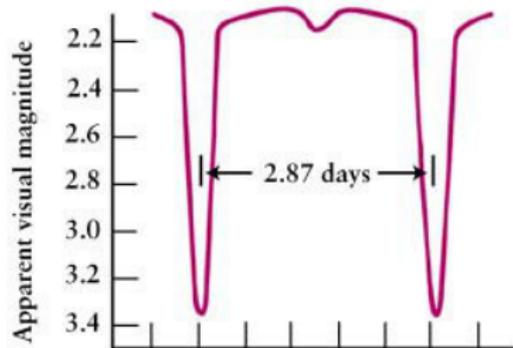
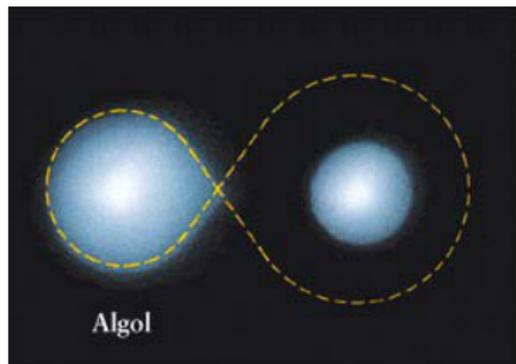
Doppelsterne



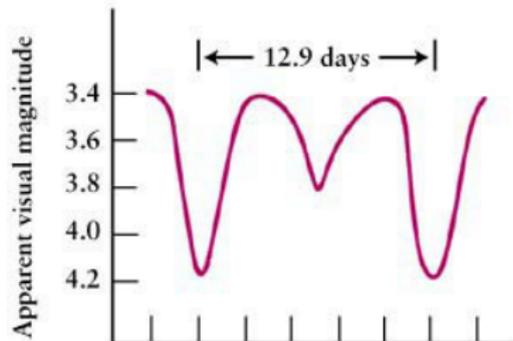
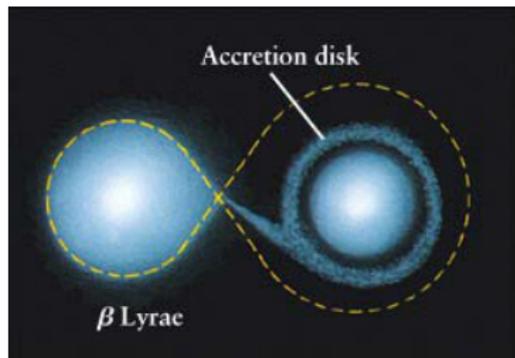
Bedeckungsveränderliche

- ▶ 'richtige' Orientierung der Bahnebene
- ▶ → Sterne können sich bedecken
- ▶ das erlaubt viele Infos über sie:

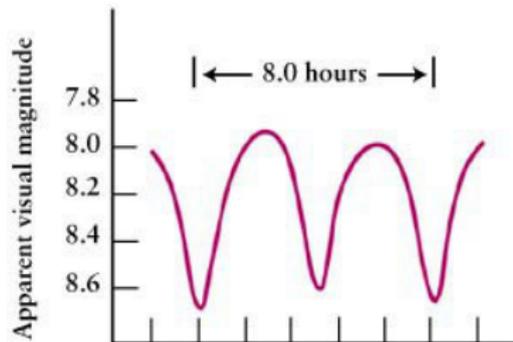
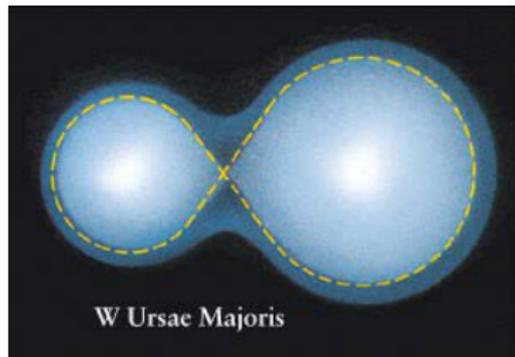
Bedeckungsveränderliche



Bedeckungsveränderliche



Bedeckungsveränderliche



Algol

- ▶ semi-detached
- ▶ Roter Riese plus massiver MS Stern
- ▶ MS Stern hat größere Masse der beiden!
- ▶ Idee:
- ▶ heutiger Roter Riese war im Original massiver
- ▶ hat Masse auf den Begleiter abgegeben
- ▶ dadurch hat sich Verhältnis geändert!