

Entwicklung massereicher Sterne

Eugenia Litzinger

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

23.11.2009

Inhaltsverzeichnis

Entstehung eines massereichen Sternes

- Definition

- Entstehungsort

- Grundgleichungen

Entwicklung eines massereichen Sternes

- Nukleare Entwicklung

- Hauptreihe

- Post-Hauptreihe

Ende eines massereichen Sternes

- Kernkollaps

- Supernova

Endstadien eines massereichen Sternes

Was ist ein Stern?

Definition:

- ▶ gebunden durch Eigengravitation \Rightarrow Sphärische Form
- ▶ erzeugt Energie durch Kernfusion \Rightarrow der Stern leuchtet
- ▶ Isolation

Zusammensetzung:

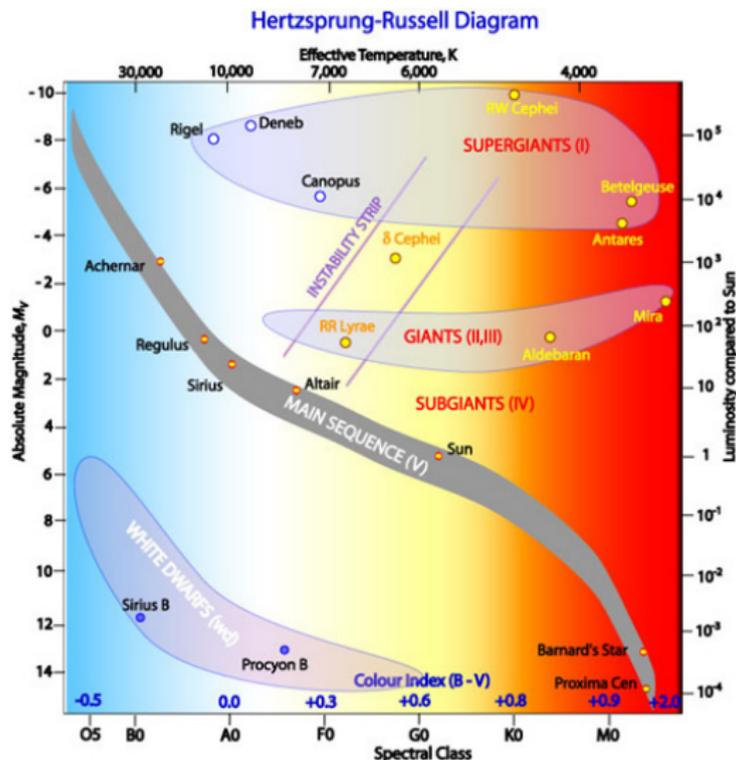
- ▶ 70% Wasserstoff (Massenanteil = X)
- ▶ 25-30% Helium (Massenanteil = Y)
- ▶ $\leq 5\%$ Metalle (C, N, O; Massenanteil = Z)
- ▶ $X + Y + Z = 1$

Was ist ein Stern?

Klassifizierung:

- ▶ Population
 - ▶ I = jung, II = alt
- ▶ Helligkeit
 - ▶ 6 Größenklassen (Magnitudo)
 - ▶ 1 = hellster, 6 = schwächster Stern
 - ▶ scheinbare (m), absolute (M_V) Helligkeit
- ▶ Spektralklassen
 - ▶ O-B-A-F-G-K-M
 - ▶ T-abhängig (O = 50000K, M = 3000K)
- ▶ Leuchtkraftklassen
 - ▶ T- und L-abhängig
 - ▶ I = Überriesen, V = Hauptsequenz (Zwerge)

Hertzsprung-Russell-Diagramm



Entwicklung massereicher Sterne

└ Entstehung eines massereichen Sternes

└ Entstehungsort

Entstehungsort



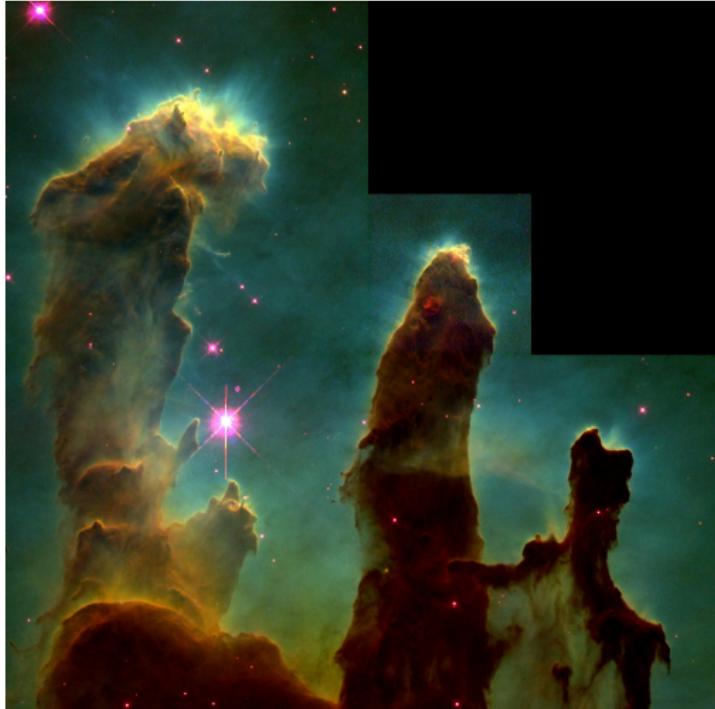
©Anglo-Australian Observatory

Entwicklung massereicher Sterne

└ Entstehung eines massereichen Sternes

└ Entstehungsort

Entstehungsort - Pillars of Creation (Hubble)



Entstehungsort

- ▶ kühle Gaswolken kleiner Dichte aus Wasserstoff
- ▶ übersteigt die Gravitationskraft den Gasdruck, kollabiert die Wolke (Jeans'sches Kriterium)

$$M > M_J = \left(\frac{5k_B T}{G \mu m_u} \right)^{\frac{3}{2}} \left(\frac{3}{4\pi \rho_0} \right)^{\frac{1}{2}}$$

- ▶ erreicht der Protostern eine Masse von $0.08 M_{\odot}$ startet die Kernfusion
- ▶ massereiche Sterne: Protostern $\geq 8 M_{\odot}$

Grundgleichungen des Sternaufbaus

- ▶ Massenerhaltung

$$\frac{dM}{dr} = 4\pi r^2 \rho(r)$$

- ▶ Hydrostatisches Gleichgewicht

$$\frac{dP}{dr} = -\rho(r) \frac{GM(r)}{r^2}$$

- ▶ Energieerhaltung

$$\frac{dL}{dr} = 4\pi r^2 \rho(r) \epsilon$$

- ▶ Energietransport

$$\frac{dT}{dr} = -\frac{3}{4ac} \frac{\kappa \rho(r)}{T^3} \frac{L(r)}{4\pi r^2}$$

$$\frac{dT}{dr} = \left(1 - \frac{1}{\gamma}\right) \frac{T}{P} \frac{dP}{dr}$$

Materialeigenschaften

- ▶ Zustandsgleichung des idealen Gases:

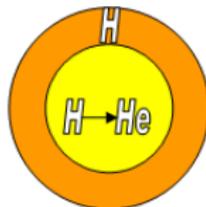
$$P = \frac{nRT}{V} = \frac{Nk_B T}{V} = \rho \frac{k_B T}{\mu m_u} = P_g$$

massereicher Stern: $P = P_g + P_r$; $P_r = \frac{1}{3}aT^4$

- ▶ Energietransport
 - ▶ Konvektion
 - ▶ Strahlung
 - ▶ Wärmeleitung
- ▶ Energieerzeugung
 - ▶ Kernreaktionen

Nukleare Entwicklung

- ▶ Wasserstoffbrennen: $4p \rightarrow {}^4_2\text{He} + E$
- ▶ zwei Zyklen:
 - ▶ $M \leq 1.5 M_{\odot}$: Proton-Proton-Kette
 - ▶ $M \geq 1.5 M_{\odot}$: CNO-Zyklus



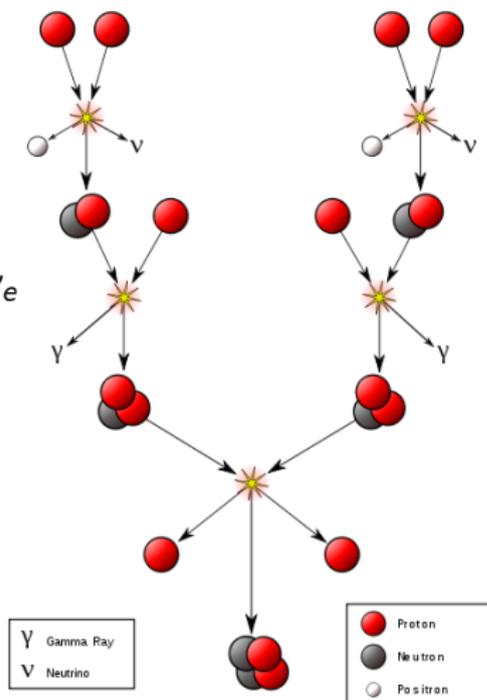
Nukleare Entwicklung: pp-Kette

- ▶ ppl für $T \leq 2 \cdot 10^7 K$

$${}^1\text{H} + {}^1\text{H} \rightarrow {}^2\text{H} + e^+ + \nu_e$$

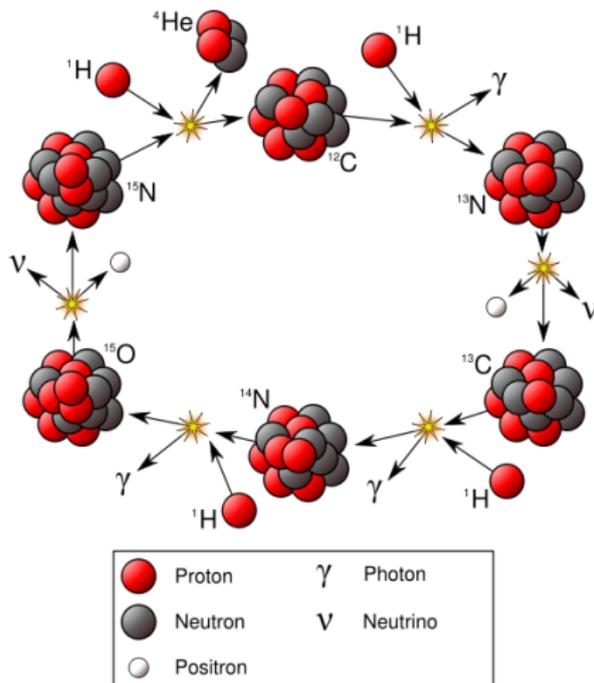
$${}^2\text{H} + {}^1\text{H} \rightarrow {}^3\text{He} + \gamma$$

$${}^3\text{He} + {}^3\text{He} \rightarrow {}^4\text{He} + 2{}^1\text{H}$$
- ▶ pplI für $T = 1.4 - 2.3 \cdot 10^7 K$
- ▶ pplII für $T \geq 2.3 \cdot 10^7 K$



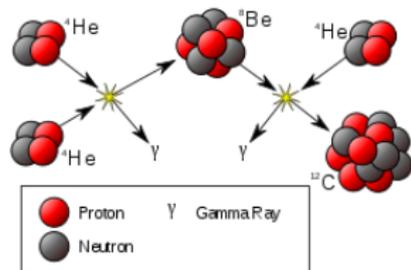
Nukleare Entwicklung: CNO-Zyklus

- ▶ vorherrschend bei massereichen Sternen
- ▶ Existenz eines Katalysators C, N, O vorausgesetzt
- ▶ CNO für $T \geq 2 \cdot 10^7 K$



Nukleare Entwicklung: Heliumbrennen

- ▶ 10 - 20% des Wasserstoff im Kern verbraucht → Kontraktion des Kerns
- ▶ Dichte und Temperatur steigen an, Atome ionisiert
- ▶ Heliumbrennen startet bei $M \geq 0.9 M_{\odot}$: 3α -Prozess

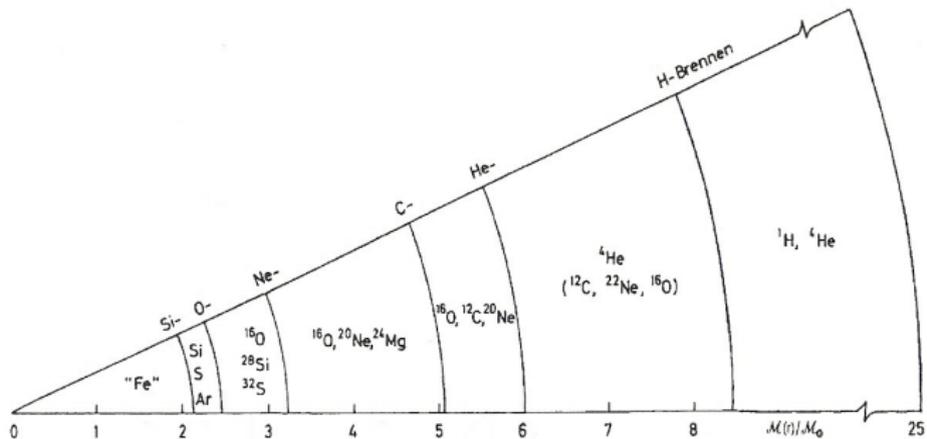


- ▶ Stern bläht sich auf → Roter (Über-)Riese/Blauer Überriese

Nukleare Entwicklung: Höhere Prozesse

- ▶ Stern mit $\geq 4 M_{\odot}$ kontrahiert nach He-Brennen → Kohlenstoffbrennen
- ▶ Neon, Natrium, Sauerstoff und Magnesium entstehen ($T \geq 7 \cdot 10^8 \text{K}$)
- ▶ Stern mit $\geq 8 M_{\odot}$ kontrahiert nach C-Brennen
- ▶ → Neonbrennen, Sauerstoffbrennen, Siliziumbrennen ($T \geq 2 \cdot 10^9 \text{K}$)
- ▶ Eisen als schwerstes Atom → danach kein Energiegewinn mehr
- ▶ höhere Fusionen laufen immer schneller ab

Nukleare Entwicklung



[Der neue Kosmos]

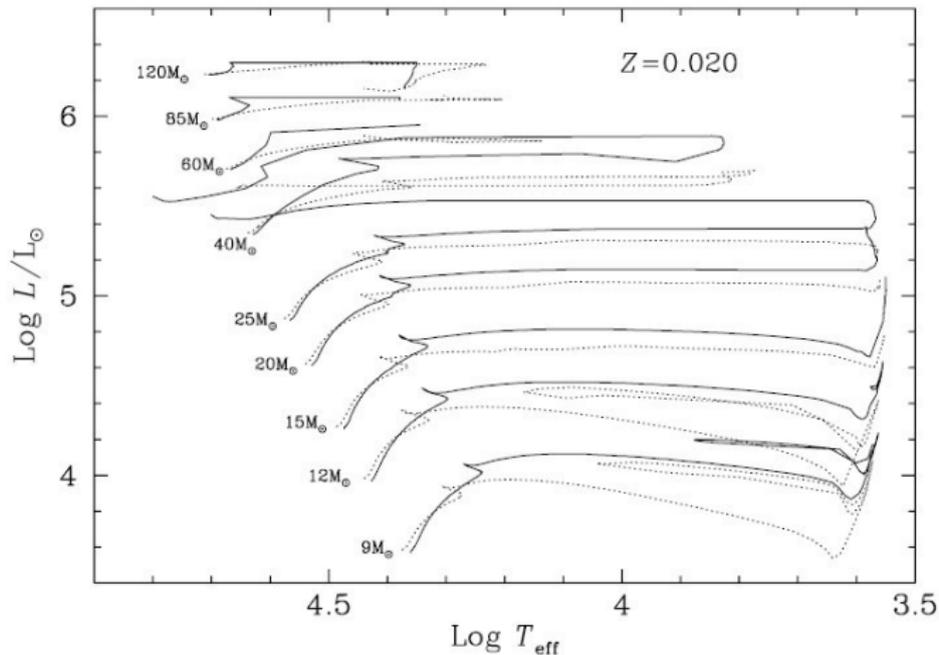
Nukleare Entwicklung: Woher schwerere Elemente?

- ▶ am Ende eines Sternlebens (r-Prozess)
- ▶ Neutroneneinfang bei hoher Neutronendichte und Temperatur
- ▶ hoher Neutronenfluss → Aufbau instabiler, neutronenreicher Atomkerne
- ▶ β^- -Zerfall zu stabilen, neutronenreichen Kernen schwerer Elemente und zu instabilen, langlebigen Isotopen mit $A > 60$

Nukleare Entwicklung: Zeitskala für $25 M_{\odot}$ -Stern

- ▶ Kelvin-Helmholtz-Zeit: $\tau_{KH} = \frac{GM^2}{2RL} = 1.6 \cdot 10^3 \text{ a}$
- ▶ Nukleare Zeitskala: $\tau_{nuc} = \frac{E_{nuc}}{L} = \epsilon X \frac{M}{L}$
 - ▶ Wasserstoffbrennen $\hat{=}$ Zeit auf der Hauptreihe = $7 \cdot 10^6 \text{ a}$
 - ▶ Heliumbrennen: $5 \cdot 10^5 \text{ a}$
 - ▶ Kohlenstoffbrennen: 600 a
 - ▶ Neonbrennen: 1 a
 - ▶ Sauerstoffbrennen: 0.5 a
 - ▶ Siliziumbrennen: 1 d
- ▶ Entwicklungszeitskala: $\tau_E = 7.3 \cdot 10^9 \frac{M/M_{\odot}}{L/L_{\odot}} = 3.0 \cdot 10^6 \text{ a}$

Entwicklungsweg massereicher Sterne

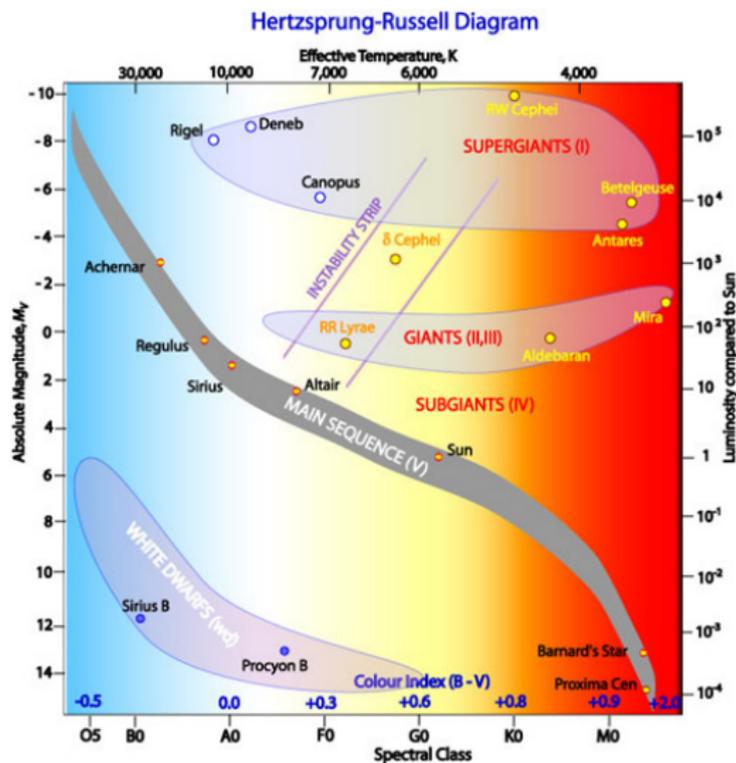


Entwicklung massereicher Sterne

└ Entwicklung eines massereichen Sternes

└ Hauptreihe

Hauptreihe



Hauptreihe

- ▶ Hauptreihe = Sterne in der Phase des Wasserstoffbrennens
- ▶ Sterne auf der Hauptreihe unterscheiden sich nur durch ihre Masse
- ▶ Masse Leuchtkraft-Beziehung: $L \propto M^{3.2..3.88}$
- ▶ längste Zeit eines Sternlebens:

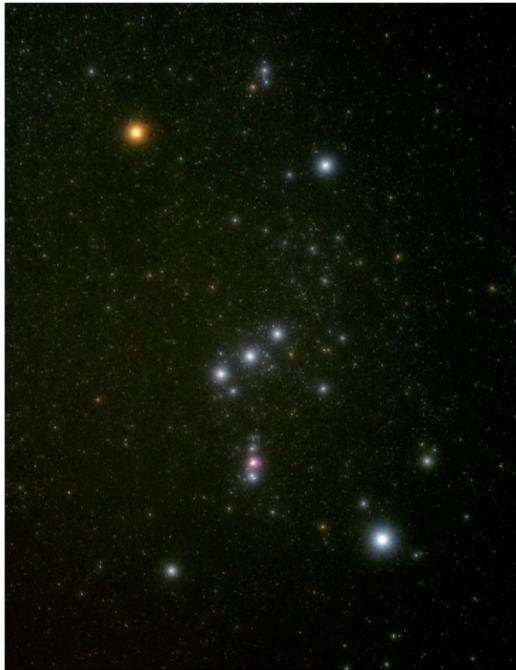
$$t_{HR} = 10^{10} \left(\frac{M_{\odot}}{M} \right)^{2.5}$$

Entwicklung massereicher Sterne

└ Entwicklung eines massereichen Sternes

└ Hauptreihe

Beispiel: Orion Trapez-Sterne



[Gauvreau]



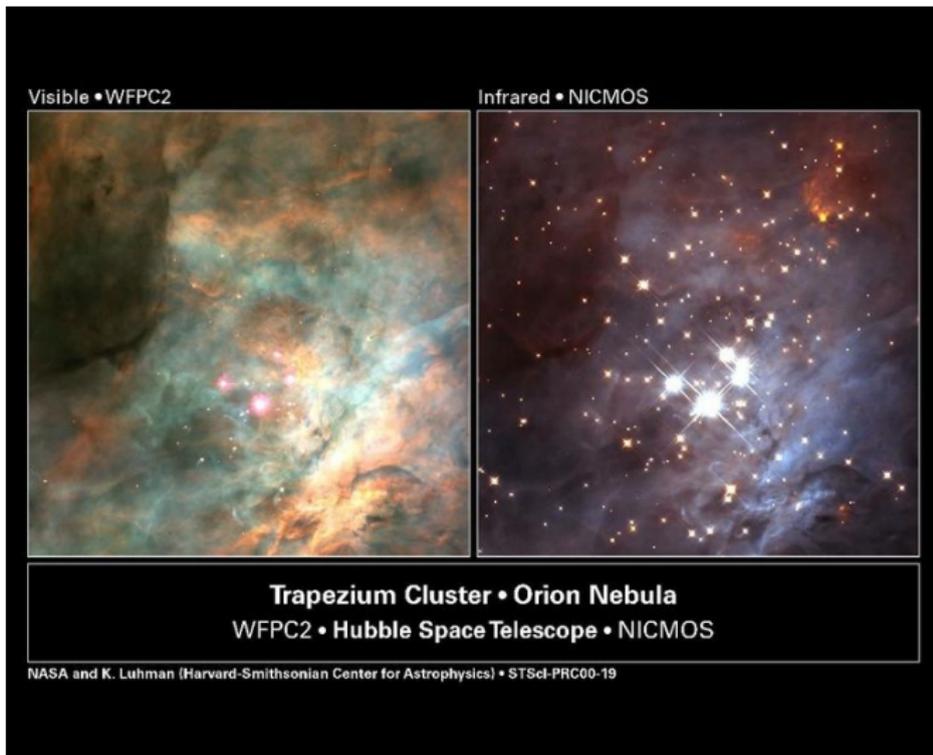
[Hubble]

Entwicklung massereicher Sterne

└ Entwicklung eines massereichen Sternes

└ Hauptreihe

Beispiel: Orion Trapez-Sterne



Beispiel: Orion Trapez-Sterne

- ▶ Lage: Orionnebel, nördliches Sternbild Orion
- ▶ Entfernung: 1500 Lj
- ▶ θ^1 Orionis als optischer Mehrfachstern
- ▶ Teil eines offenen Sternhaufens
- ▶ sehr junge Sterne (z.T. noch nicht auf der Hauptreihe)
- ▶ Trapez-Sterne regen den Orionnebel durch Ionisation zum Leuchten an
- ▶ typische Form des Nebels durch Sternwinde der Trapez-Sterne
- ▶ Massen zwischen 15 und 40 M_{\odot}

Beispiel: Orion Trapez-Sterne

- ▶ θ^1 Orionis A, B, C und D (bis K)
- ▶ θ^1 Orionis C
 - ▶ Spektralklasse: O6
 - ▶ Veränderlicher
 - ▶ Helligkeit: $m = +5.1^m$; $M_V = -3.2^m$
 - ▶ $M = 44 M_{\odot}$, $T = 45.5 \cdot 10^3 \text{K}$, $L = 2.1 \cdot 10^5 L_{\odot}$
 - ▶ Sternwind mit $v = 1000 \frac{\text{km}}{\text{s}}$

Post-Hauptreihe

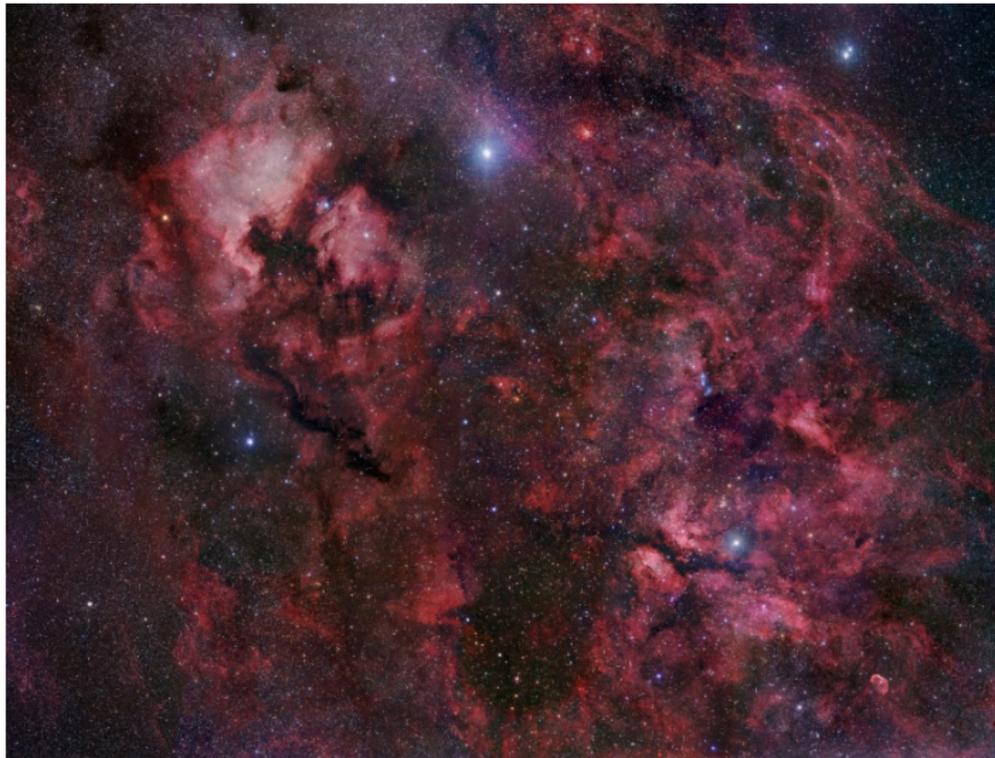
- ▶ massereiche Sterne nur sehr kurz auf der Hauptreihe
- ▶ Grund:
 - ▶ verbrauchen Wasserstoff sehr schnell
 - ▶ höhere Fusionen möglich
 - ▶ Verlagerung in äußere Schalen
 - ▶ Radius nimmt zu, Temperatur sinkt
 - ⇒ Stern wandert im HRD nach rechts (Roter Überriese/Blauer Überriese)
 - ⇒ Post-Hauptreihenphase

Entwicklung massereicher Sterne

└ Entwicklung eines massereichen Sternes

└ Post-Hauptreihe

Beispiel: Deneb



[R. Gendler]

Deneb: Daten

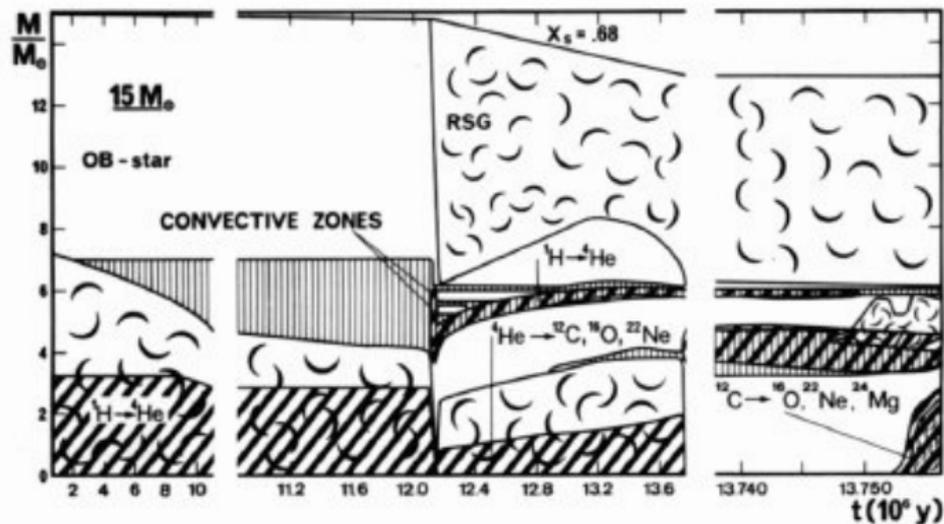
- ▶ nördliches Sternbild Cygnus (Schwan)
- ▶ Entfernung: ca. 2620 Lj
- ▶ heißer Überriese, Typ A2, $T = 8525\text{K}$
- ▶ $M \approx 20 M_{\odot}$, $L \approx 2 \cdot 10^5 L_{\odot}$, $R \approx 203 R_{\odot}$
- ▶ veränderlicher Stern
- ▶ Helligkeit: $m = +1.25^m$; $M_V = -8.38^m$

Entwicklung massereicher Sterne

└ Entwicklung eines massereichen Sternes

└ Post-Hauptreihe

Innere Entwicklung für $15M_{\odot}$



[Maeder & Meinet, 1989]

Deneb: Entwicklung

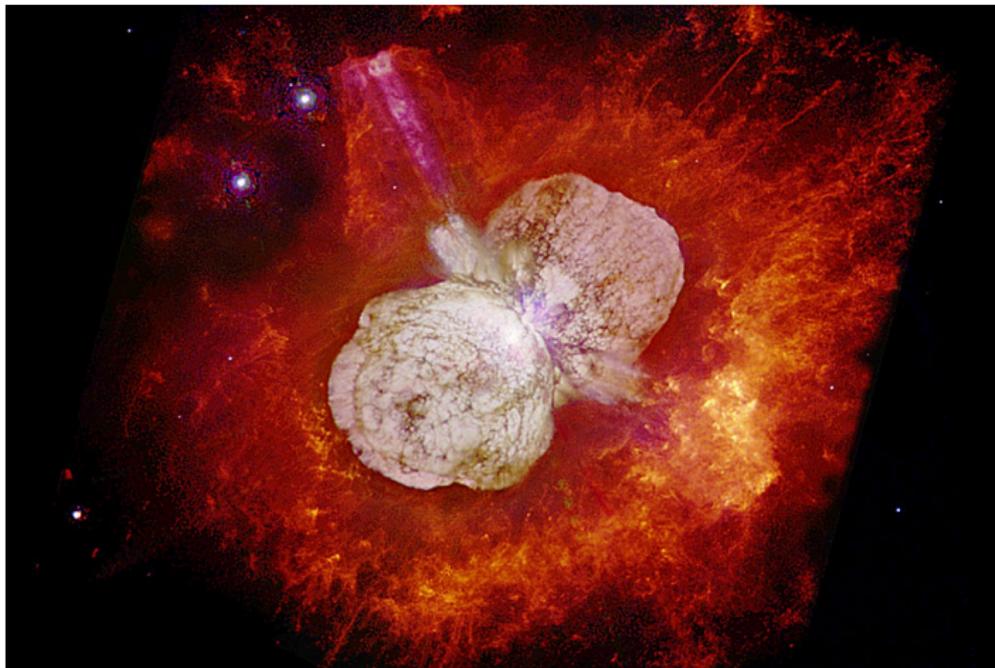
- ▶ „Geburt“ vor $10 \cdot 10^6$ Jahren als O-Stern mit $23 M_{\odot}$
- ▶ Wasserstoffbrennen vor etwa 40.000 Jahren als B-Stern beendet
- ▶ Massenverlust von $3.1 \cdot 10^{-7} \frac{M_{\odot}}{a}$
- ▶ Ende als Supernova

Entwicklung massereicher Sterne

└ Entwicklung eines massereichen Sternes

└ Post-Hauptreihe

Beispiel: η Carinae und der Homunculus Nebel



[N. Smith, J. A. Morse (U. Colorado) et al., NASA]

η Carinae: Daten

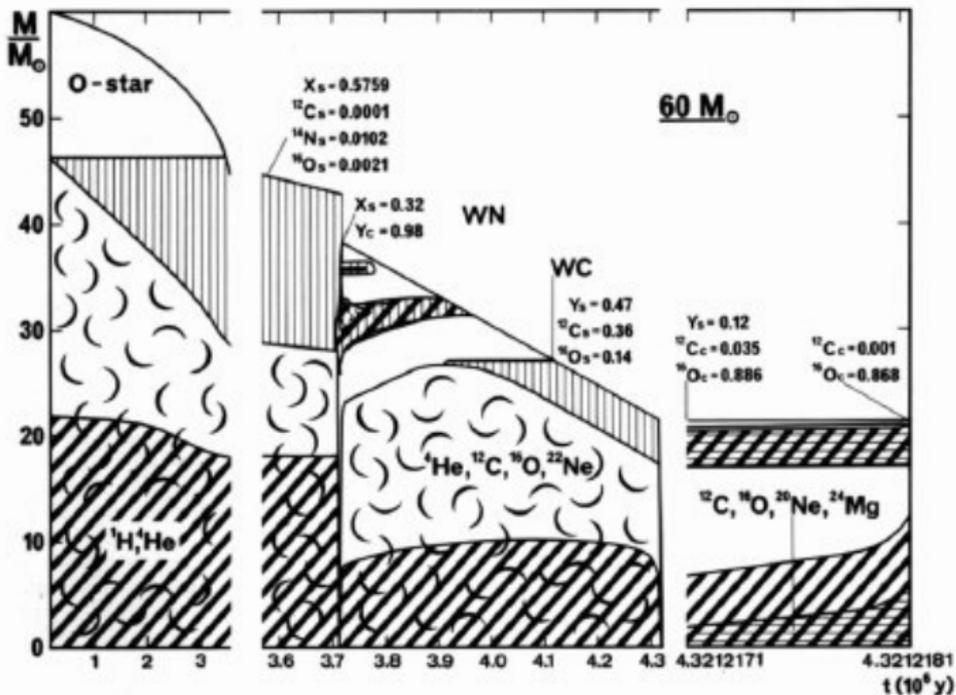
- ▶ Südliches Sternbild Carina (Kiel des Schiffes)
- ▶ Entfernung: 10 kLj
- ▶ instabiler blauer Riesenstern, Typ B0, $T = (36 - 40) \cdot 10^3$ K
- ▶ veränderlicher Stern: Luminous Blue Variables
- ▶ $M = 100 - 120 M_{\odot}$, $L = 5 \cdot 10^6 L_{\odot}$, $R = 80 - 180 R_{\odot}$
- ▶ Helligkeit: $m = -0.8^m - +7.9^m$
- ▶ evtl. Doppelsternsystem

Entwicklung massereicher Sterne

└ Entwicklung eines massereichen Sternes

└ Post-Hauptreihe

Innere Entwicklung für $60M_{\odot}$



η Carinae: Entwicklung

- ▶ Alter: ca. $1 \cdot 10^6$ a
- ▶ 1837-56: „Große Eruption“ $\Rightarrow m = -1^m$
- ▶ Homunculus Nebel
 - ▶ hoher Druck auf der „Oberfläche“
 - ▶ schnelle Rotation, $v = 650 \frac{km}{s}$
 \Rightarrow Abstoßen der äußeren Hüllen
- ▶ Massenverlust von $10^{-3} \frac{M_{\odot}}{a}$, während der „Großen Eruption“ sogar $1-3 M_{\odot}$
- ▶ Ende als Supernova oder Hypernova in etwa 10^5 Jahren oder früher

Kernkollaps

- ▶ Kernbrennstoff vollständig verbraucht
- ▶ Bildung eines Eisenkerns mit entartetem Elektronengas bis Chandrasekhar-Grenze ($1.44 M_{\odot}$)
- ▶ hohe Kerntemperatur \Rightarrow Photodesintegration
 - ▶ Photonen besitzen genug Energie, um schwere Kerne zu zerstören
 - ▶ $^{56}\text{Fe} + \gamma \rightarrow 13^4\text{He} + 4n$
 $^4\text{He} + \gamma \rightarrow 2p^+ + 2n$
- ▶ Elektroneneinfang durch schwere Kerne und Protonen
 $p^+ + e^- \rightarrow n + \nu_e$
- ▶ enormer Energieverlust durch Neutrinos
Bsp. $M = 20 M_{\odot}$: $L_{\gamma} = 4.4 \cdot 10^{31}\text{W}$, $L_{\nu} = 3.1 \cdot 10^{38}\text{W}$

Kernkollaps

- ▶ Entartungsdruck der Elektronen fällt weg
- ▶ Kollaps des Kern
- ▶ Anstieg des Druckes im Kern bis $8 \cdot 10^{17} \text{ kg m}^{-3}$
- ▶ InkompRESSibilität (Neutronenstern)
- ▶ nachfallendes Material wird durch Kern gestoppt
→ Stoßfront → hohe T, v → Schockwelle
- ▶ Neutrinoenergie heizt Material auf
- ▶ Schockwelle dringt nach außen
- ▶ Explosion des Sterns: SN Typ II (Ib/Ic)

Supernova

- ▶ SN I: Spektrum ohne Wasserstoff
- ▶ Doppelsterne: SN Ia
- ▶ $> 30 M_{\odot}$: Supernova Typ Ib/c
- ▶ Typ Ib/c Vorgängerstern: Wolf-Rayet-Stern
- ▶ Sn II: Spektrum mit Wasserstoff
- ▶ $8 - 30 M_{\odot}$: Supernova Typ II

- Entwicklung massereicher Sterne
 - └ Ende eines massereichen Sternes
 - └ Supernova

Beispiel: Supernova 1987A



- Entwicklung massereicher Sterne
 - └ Ende eines massereichen Sternes
 - └ Supernova

Beispiel: Supernova 1987A



© Anglo-Australian Observatory

Beispiel: Supernova 1987A

- ▶ entdeckt am 24. Februar 1987 in der großen Magellanschen Wolke ($r = 50\text{kpc}$)
- ▶ SN II, max. Helligkeit nach drei Monaten: $m = 2.9^m$,
 $M_V = -15.5^m$
- ▶ Besonderheit: Vorgängerstern konnte zum ersten Mal identifiziert werden: Sanduleak -69° 202
 - ▶ Blauer Riesenstern
 - ▶ Typ B3, $m = 12^m$, $M_V = -6.6^m$
 - ▶ $M = 20 M_{\odot}$
- ▶ Neutrinoenergie: $10^{45} - 10^{46}\text{J}$
- ▶ erster Nachweis nicht-solarer Neutrinos (Kamiokande: 12, IMB: 8, Baksan: 5)

Hypernova

- ▶ Supernova eines extrem massereichen Sternes
- ▶ Gamma-Ray Bursts: stark gerichtete Jets
 - ▶ 2 Typen: lange = Kernkollaps (sicher),
kurze = Neutronensternverschmelzung?
 - ▶ schnelle Rotation des Sterns $v \approx$ Zerreißgeschwindigkeit
- ▶ Restkern $M > 3 M_{\odot}$
⇒ schwarzes Loch

Neutronenstern, Pulsar und schwarzes Loch

▶ Neutronenstern

- ▶ entsteht bei einer Supernova vom Typ II
- ▶ Drehimpulserhaltung \Rightarrow Periode \approx ms
- ▶ Masse = 2 - 3 M_{\odot} , R = 14 km
- ▶ Elektronen mit $v \approx c \Rightarrow$ Synchrotronstrahlung
- ▶ an den Magnetpolen entsteht ein Strahlungskegel

\Rightarrow Pulsar

▶ Schwarzes Loch

- ▶ Fluchtgeschwindigkeit $>$ Lichtgeschwindigkeit

Pulsar im Krebsnebel (Hubble)



Zusammenfassung

- ▶ massereiche Sterne leben sehr ausschweifend
 - ⇒ kurzes Leben: wenige Mio. Jahre
 - ⇒ entfernen sich nicht weit von ihrem Entstehungsort
 - ⇒ explosives Ende: Supernova, Hypernova
 - ⇒ beeindruckende Endstadien: Neutronenstern, Pulsar, schwarzes Loch

Quellen

Carroll, B., Ostlie, D., San Francisco, 2007, *An Introduction to Modern Astrophysics*

Heber, U., Erlangen 2009, *Sternaufbau und Sternentwicklung*

Massey, P., „Massive Stars in the Local Group: Implications for Stellar Evolution and Star Formation“, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 41, 15, 2003

Meynet, G., and Mader, A., "Grids of evolutionary models from 0.85 to 120 M_{\odot} : observational tests and the mass limits“, *Astronomy and Astrophysics*, 210, 155-173
Upshape, 1989

Meynet, G., and Mader, A., „Stellar Evolution with Rotation X. Wolf-Rayet Star Population at Solar Metallicity“, *Astronomy and Astrophysics*, 404, 975, 2003

Wilms, J., Erlangen 2006, *Einführung in die Astronomie*

Wilms, J., Erlangen 2009, *Galaxien und Kosmologie*

Prialnik, D., Cambridge 2008, *An Introduction to the Theory of Stellar Structure and Evolution*

Unsöld, A., Baschek, B., Heidelberg 1991, *Der neue Kosmos*

Schiller, F., Przybilla, N., Bamberg 2007, "Quantitative spectroscopy of Deneb", *Astronomy and Astrophysics*, 479, 849-858, 2008

<http://de.wikipedia.org/>

<http://antwrp.gsfc.nasa.gov/apod/archivepix.html>

<http://www.aao.gov.au/images/>

<http://www.wissenstexte.de/sterne.htm>

<http://astronomy.swin.edu.au/cms/astro/cosmos/H/Hertzsprung-Russell+Diagram>