

IX. Sterne: Entwicklung

IX. 1

Prinzip der Sternentwicklung:

- chemische Entwicklung:
Änderung der chem. Zusammensetzung (Profil!)
durch die Kernprozesse [nukleare Zeitskala!]
- dynamische Entwicklung:
wenn kein nukleares Gleichgewicht:
Ausgleich der Energie-Bilanz durch Kontraktion/Expansion
[Helmholtz - Kelvin - Zeitskala]

• Sternentwicklung: Resultate

• Sternentstehung

durch Kollaps einer interstellaren Wolke (τ_{FF} !)

Bedingung: gravitativ gebunden, d.h. $E_G > E_T$

→ Mindestmasse (sog. Jeans-Masse, M_{Jeans})

$$E_G = E_T$$

$$\frac{GM_{\text{Jeans}}^2}{R} = \frac{M_{\text{Jeans}}}{A m_H} \frac{3}{2} kT \quad (A \approx 1)$$

R durch ρ ausdrücken: $M \approx R^3 \rho$

$$G M_{\text{Jeans}}^{3/2} \rho^{1/2} = \frac{3/2 kT}{m_H}$$

$$M_{\text{Jeans}} = \rho^{-1/2} T^{3/2} \left(\frac{3/2 k}{G m_H} \right)^{3/2}$$

Weitere Entwicklungs-Effekte:

- Änderung des chemischen Profils durch Mischung:
 - in Konvektionszonen (Mischmechanismen: siehe vorige Seite!)
 - meridionale Strömungen, Turbulenz durch Rotation
(in der Regel vernachlässigt)
- ... bzw. Entmischung (Diffusion): bei leichten Zwergen

• Massenverlust ?

entscheidend für die Spätphasen der Entwicklung

- jedoch: $\dot{M} = \dot{M}(L, R, M, \dots)$ nicht gut bekannt,
theoretisch nur teilweise verstanden
↳ $-\frac{dM}{dt} = \text{Massenverlust-rate}$

- Massen-Austausch in engen Doppelstern-Systemen
[Ingh: Mass transfer in close binaries]

... viele, komplizierte Szenarien ...

Für typische Werte: $\rho \approx 10^{-23} \text{ g/cm}^3$, $T = 50 \text{ K}$

$$\rightarrow M_{\text{Jeans}} \approx 1000 M_{\odot} \quad (!)$$

wenn ρ ansteigt: M_{Jeans} kleiner → Fragmentation

Probleme: • Abstrahlung • Drehimpuls-Abführung

Wenn optisch dick geworden: (bei $\rho \approx 10^{-13} \text{ g cm}^{-3}$)

keine schnelle Abstrahlung mehr, T steigt

→ hydrostatisches Gleichgewicht

→ "Protostern"

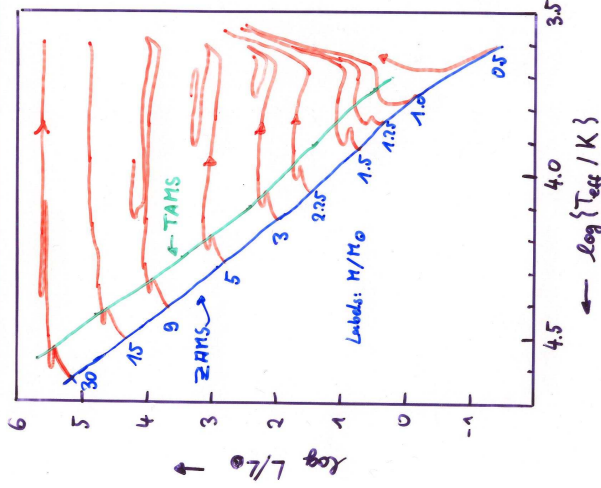
vollkonvektiv, d.h. am Hayashi-Limit

Weiter: Kontraktion zur Hauptreihe (τ_{HK})

dort: Zünden des H-Brennens

[Mindest-Masse: **0.08 $M_{\odot}$** , sonst "Braune Zwerge"]

Hauptreihen - Entwicklung



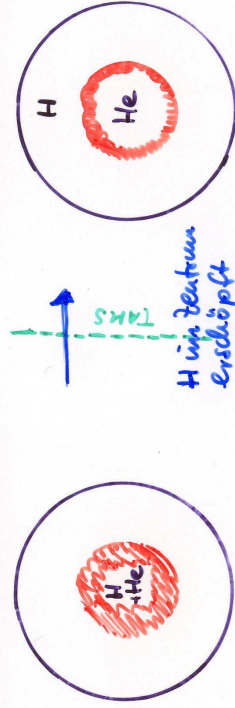
nach:
Fundamental Astronomy
p. 264

ZAMS = Zero Age
Main Sequence

TAMS = Terminal Age
Main Sequence

Dazwischen:
Hauptreihe

Hauptreihe:
zentrales Wasserstoffbrennen



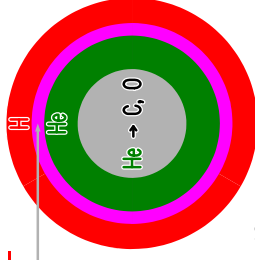
Entwicklung: He-Kern kontrahiert, Hülle expandiert
("Spiegelung am der Schalenquelle")

→ Entwicklung bei $L \approx \text{const.}$ zum Hayashi-Limit

→ Rote Riesen

Entwicklung der Sonne zum Roten Riesen

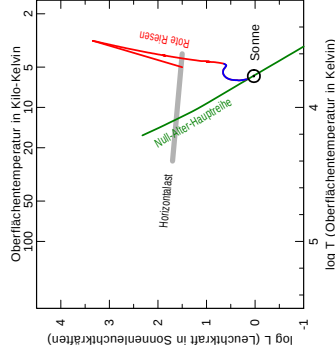
- Radius wächst auf über $1000 R_{\odot}$
→ Ende der Erde!
- Ansteigende Leuchtkraft
- niedrige Oberflächen-Temperatur ("rot")
- Wasserstoff-Schalenbrennen
- zentrales Helium-Brennen
- $4 \text{ He} + 4 \text{ He} + 4 \text{ He} \rightarrow {}^{12}\text{C}$, teilweise $4 \text{ He} + {}^{12}\text{C} \rightarrow {}^{16}\text{O}$



- Erheblicher Massenverlust durch "Sternwind" (wieviel?)

← Abb.:

Entwicklung eines Sterns von $1 M_{\odot}$ im Hertzsprung-Russell-Diagramm



Rote Riesen

- am Hayashi-Limit:
 - H-Schalenquelle kühlt sich nach außen
 - Leuchtkraft steigt
 - He-Kern wächst, T_c nimmt zu
- wenn $T_c \approx 10^8 \text{ K}$: He-Brennen zündet
 - wenn $M < 2.3 M_{\odot}$ ($1.5 M_{\odot}$?)
 - He-Kern entartet → kein "Thermostat"!
 - He zündet explosiv: "Helium-Flash"

jedoch: Explosion wird von Hülle gedämpft

→ Stern macht wilde Bewegung im HR-Diagramm

→ danach: T_c höher, Entartung aufgehoben.

Asymptotischer Riesenast

(engl. *Asymptotic Giant Branch, AGB*)

- Helium im Kern erschöpft
- Zwei-Schalen-Brennen
- Ansteigende Leuchtkraft
- Instabilität: **Thermische Pulse**

Abwechselndes Brennen der beiden Schalen

- Abwechselnde Konvektionszonen

- von außen bis ins Zwischenschalen-Gebiet
- von He-Brennschale bis Zwischenschalen

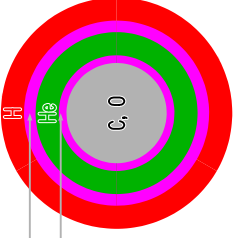
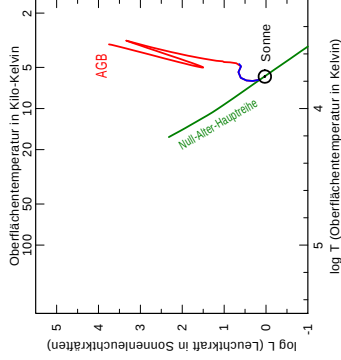
- Mischung von H in ^{12}C -reiches Gebiet

- Reaktion $^{12}\text{C} + ^1\text{H} \rightarrow ^{13}\text{N} \rightarrow ^{13}\text{C} + \text{e}^+$

- Reaktion $^{13}\text{C} + ^4\text{He} \rightarrow ^{16}\text{O} + \text{Neutron}$

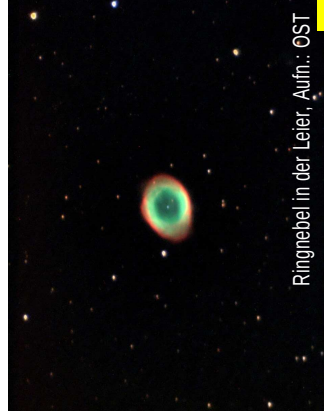
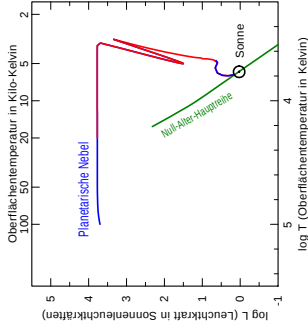
- Neutronenquelle für div. Kernreaktionen

- Erzeugung der sog. **s-Prozess-Elemente**



Zentralsterne Planetarischer Nebel

- Massenverlust durch "Sternwind" im Riesen-Stadium
- Typische Restmasse: $0.6 M_{\odot}$
- Maximale Restmasse $1.4 M_{\odot}$ (für Anfangs-Massen bis $8 M_{\odot}$)
- Wenn Wasserstoff-Hülle (fast ?) vollständig verloren
- schnelle Kontraktion (in 10 000 Jahren)
- Hohe Oberflächen-Temperatur, schneller Sternwind
- "Zusammenschieben" des früheren Winds zum *Planetarischen Nebel*
- UV-Strahlung bringt den Nebel zum Leuchten

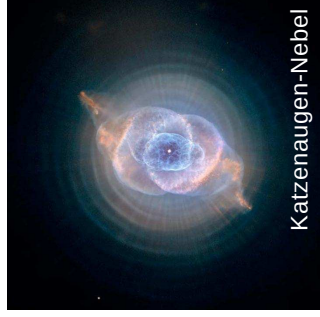


Ringnebel in der Leier, Aufn.: OST

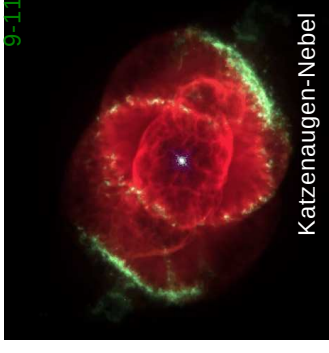
Bilder Planetarischer Nebel (HST)



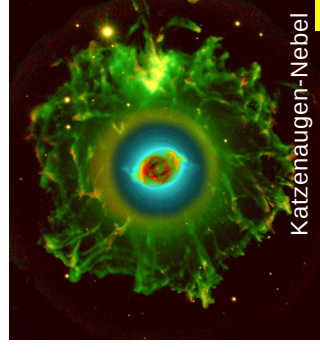
Hantel-Nebel



Katzenaugen-Nebel

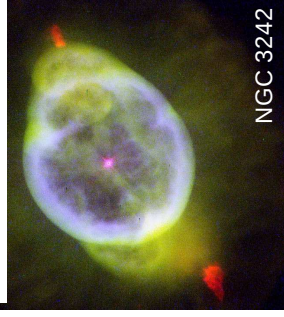


Katzenaugen-Nebel

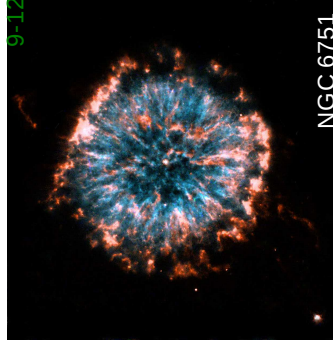


Katzenaugen-Nebel

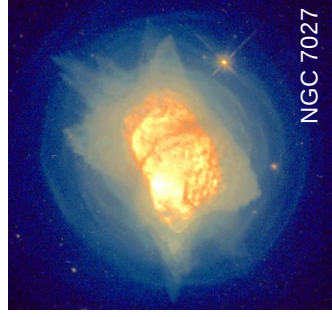
Bilder Planetarischer Nebel (HST)



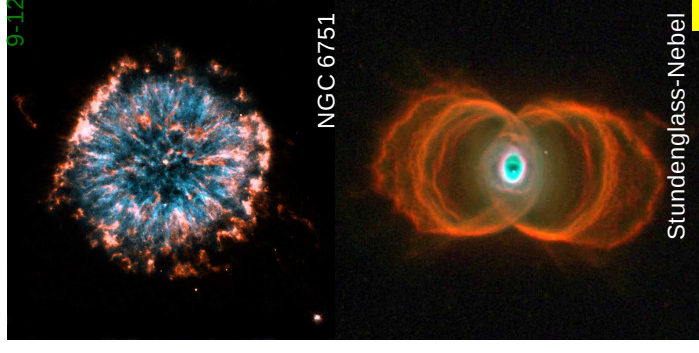
NGC 3242



NGC 6751



NGC 7027



Stundenglass-Nebel

Weiße Zwerge

Beispiel: Sirius B (α CMA B)

Doppelstern (A und B)

Abstand 8 ... 32 AU

Umlaufzeit 50 Jahre

	Sirius A	Sirius B
Typ	A1	WD
Masse	$2.1 M_{\odot}$	$1.0 M_{\odot}$
Radius	$1.7 R_{\odot}$	$0.01 R_{\odot}$
T_{eff}	10 000 K	25 000 K
Leuchtkraft	$26 L_{\odot}$	$0.0002 L_{\odot}$



Abb.: Sirius A ist 10000 mal heller als Sirius B

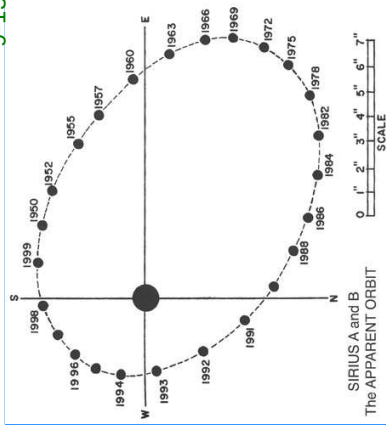
Ursache: 10000 mal kleinere Oberfläche

→ 100 mal kleinerer Durchmesser:

etwa die Größe der Erde!

- mittlere Dichte der Sonne: $\sim 1 \text{ g cm}^3$
- mittlere Dichte von Sirius B: $\sim 1 \text{ Tonne pro cm}^3$

9-13



9-15

- Verlöschen der Schalenquellen

Weiße Zwerge

inert CO-Kern, u.U. kristallisiert

$$R \approx 10^{-2} R_{\odot} \rightarrow \bar{\rho} \approx 10^5 \dots 10^7 \text{ g/cm}^3$$

Elektronen: entartet → keine Kontraktion bei Abkühlung

Atmosphäre: hohes $\log g \approx 7 \dots 8$

→ restliches H (falls vorhanden) und He diffundieren nach oben

- Abklingen von Leuchtkraft und Temperatur

erst schnell, dann immer langsamer:

die ältesten Weißen Zwerge (Alter der Galaxis!)

haben noch $T_{\text{eff}} \approx 4000 \text{ K}$

9-14

- Endstadien: a) Weiße Zwerge

wenn verbliebene Masse (größtenteils: CO-Kern)

$$M_{\text{CO}} \approx 1.4 M_{\odot} \quad (\text{"Chandrasekhar-Masse"}) :$$

[Sterne bis zu Anfangsmasse $M_{\text{ZAMS}} \approx 8 M_{\odot}$ (?)
erreichen diesen Limit (Massenverlust?);
anscheinend bevorzugte Endmasse: $M \approx 0.6 M_{\odot}$]

→ Kern bleibt inert, kontrahiert leicht

→ Zwei Schalenquellen → Hülle kontrahiert ($L \approx \text{const.}$)

→ T_{eff} steigt (bis 150 000 K!?)

ab $T_{\text{eff}} \approx 30\,000 \text{ K}$: UV-Strahlung des Sterns
regt die früher abgestoßene Materie zum Leuchten an:

"Planetarischer Nebel", "Zentralstern (CEN)

9-16

Homologe Kontraktion

Zwei Modelle (1,2) - gleiche Masse -

sind homolog, wenn

$$\frac{\tau_1(M_r)}{R_1} = \frac{\tau_2(M_r)}{R_2} \quad \text{für alle } M_r \in (0, M)$$

Sei die Zustandsgleichung

$$P \propto \rho^{\gamma} T^s$$

$$\text{oder: } d(\ln P) = \gamma \cdot d(\ln \rho) + s \cdot d(\ln T)$$

$$\text{oder: } \frac{\dot{P}}{P} = \gamma \frac{\dot{\rho}}{\rho} + s \frac{\dot{T}}{T}$$

9-17

Homologie $\Rightarrow \frac{\dot{S}}{S} = -3 \frac{\dot{R}}{R}$ wg. Volumen $\propto R^3$

$\frac{\dot{P}}{\rho} = -4 \frac{\dot{R}}{R}$ wg. hydrostat. Druck = Kraft / Fläche

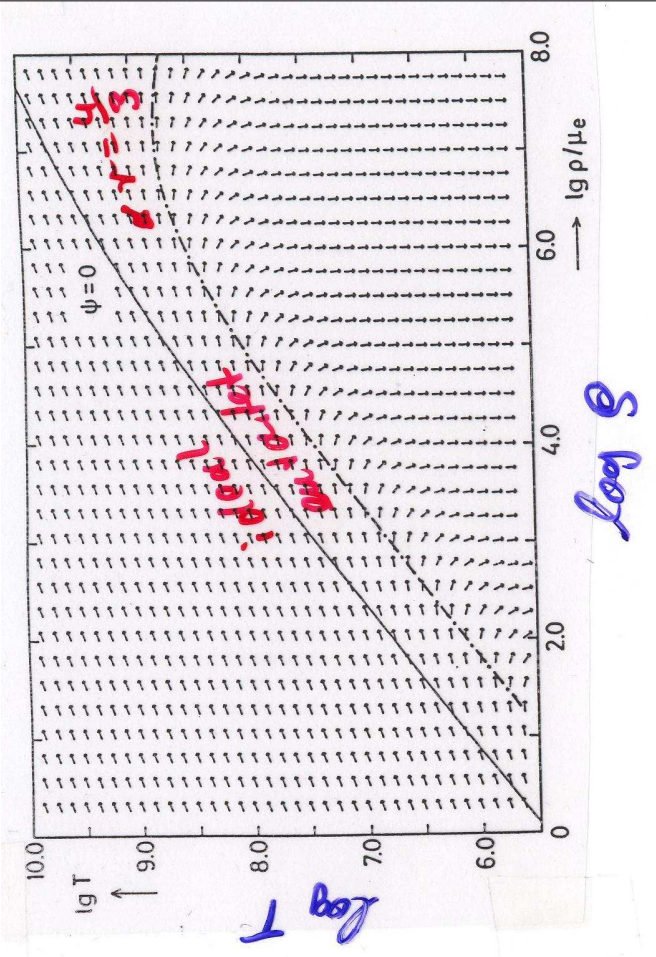
also: $\frac{\dot{P}}{\rho} = \frac{4}{3} \frac{\dot{S}}{S}$ Kraft: Gravitation $\propto R^{-2}$
Fläche $\propto R^{-2}$

Einsetzen in Zustandsgleichung:

$$\left(\frac{4}{3} - \tau \right) \frac{\dot{S}}{S} = s \frac{\dot{T}}{T}$$

oder $\boxed{\left(\frac{4}{3} - \tau \right) d(\log S) = s \cdot d(\log T)}$

9-19



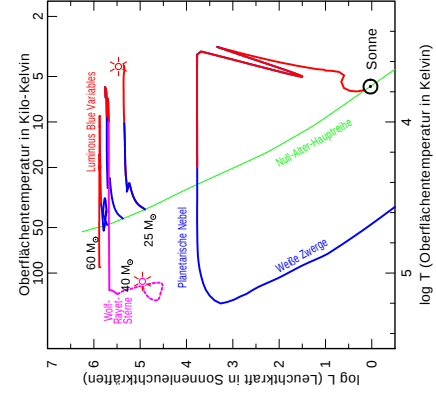
9-18

- Fall 1: Ideales Gas $\tau = 1$ $s = 1$
 $\Rightarrow \frac{d(\log T)}{d(\log S)} = \frac{1}{3}$
- Fall 2: Entartung (nicht-relativistisch)
 $\tau = 1$ $\psi \rightarrow \infty \rightarrow \tau = \frac{5}{3}$
 $s \propto \frac{1}{\psi}$
 $\Rightarrow$ bei $\tau = \frac{4}{3}$ $\frac{d(\log T)}{d(\log S)} = 0$ waagerechte Linien elemente!
bei $\frac{4}{3} < \tau < \frac{5}{3} \Rightarrow \frac{d(\log T)}{d(\log S)} < 0$ Kompression kühlt!
bei $\psi \rightarrow \infty$: $s \rightarrow 0 \Rightarrow d(\log S) = 0$ senkrechte Linien elemente (4 Rest-Durchdr. Ionen)

9-20

Das dramatische Schicksal der massereichen Sterne

- Hohe Leuchtkraft, kurze Lebensdauer
- Sternwinde entfernen Großteil der Masse (Wolf-Rayet-Sterne)
- z.T. episodischer Massenauswurf (sog. Luminous Blue Variables)
- Ausgeworfenes Material bildet Nebel



Falls Restmasse über $1.4 M_{\odot}$:
Gravitationskollaps
→ Supernova oder γ -Ray Burst

9-21

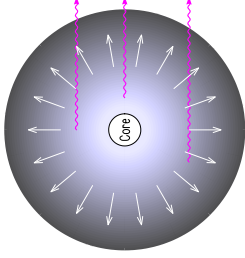
Sternwinde

kontinuierliches, radiales Abströmen von Materie

Hohe Geschwindigkeiten: bis zu 3000 km/s ($\sim 0.01 c$)

Hohe Massenverlustraten $\dot{M}$ [in Sonnenmassen pro Jahr = $M_{\odot}/\text{yr}$]

Typ	$\dot{M}$ [$M_{\odot}/\text{yr}$]	Mechanismus
Sonne	10^{-14}	Korona
O, B	$10^{-7} \dots 10^{-5}$	Strahlungsdruck auf Spektrallinien
Wolf-Rayet	$10^{-5} \dots 10^{-4}$	Strahlungsdruck (?)
Rote Überriesen	10^{-4}	Strahlungsdruck auf Staub



Entscheidende Bedeutung für :

- Sternentwicklung
- Endmasse $\ll$ Anfangsmasse!
- Kosmischen Materiekreislauf

13

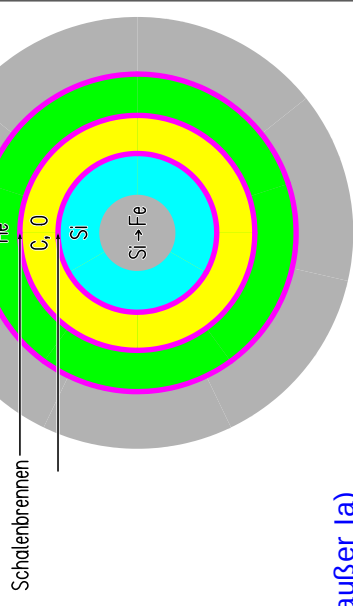
9-23

Endstadium massereicher Sterne (über $8 M_{\odot}$)

- C/O-Kern kann weitere Brennprozesse zünden

• C, O $\rightarrow$ Na, Ne, S, Si $\rightarrow$ ^{56}Fe

- zwiebelschalentartiger Aufbau



- Fe (Eisen) kann keine Fusionsenergie liefern
- Fe-Kern über $1.4 M_{\odot} \rightarrow$ Gravitationskollaps $\rightarrow$ Neutronenstern
- Nachstürzende Materie prallt ab $\rightarrow$ Explosion

- **Supernova (alle Typen außer Ia)**

- Sehr hoher Fluß von Neutronen

- Neutroneneinfang $\rightarrow$ r-Prozeß-Elemente

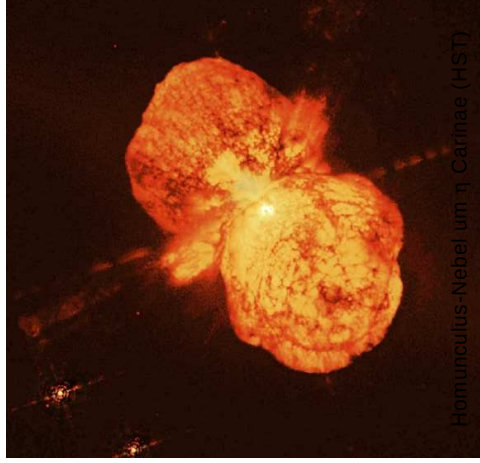
- Einziger bekannter Mechanismus zur Bildung schwerer Elemente

13

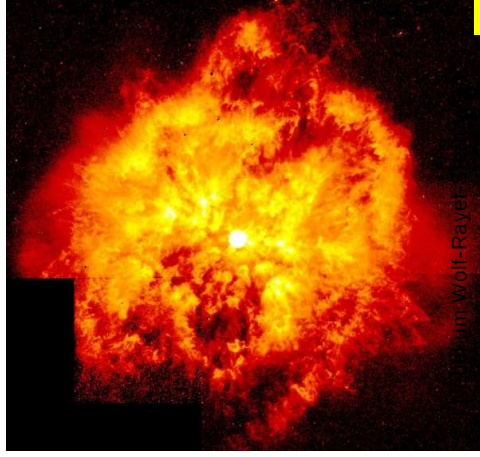
9-22

Das dramatische Schicksal massereicher ($> 8 M_{\odot}$) Sterne

- Hohe Leuchtkraft, kurze Lebensdauer (~ 1 Million Jahre)
- Sternwinde entfernen Großteil der Masse
- Ausgeworfenes Material bildet Nebel



Homunculus-Nebel um η Carinae (HST)



Ring um Wolf-Rayet

9-24

Supernova 1987A

- am 25. Februar 1987 - die erste „nahe“ Supernova seit Jahrhunderten
- in der Großen Magellanschen Wolke (160 000 Lichtjahre)
- 13 Neutrinos registriert $\rightarrow$ Modell bestätigt



25.02.1987 vorher

Rechts: zehn Jahre später (HST)
Einsatz: Innerer Ring 2004
Ringe: früherer Sternwind, vom Blitz der Explosion zum Leuchten angeregt

13