

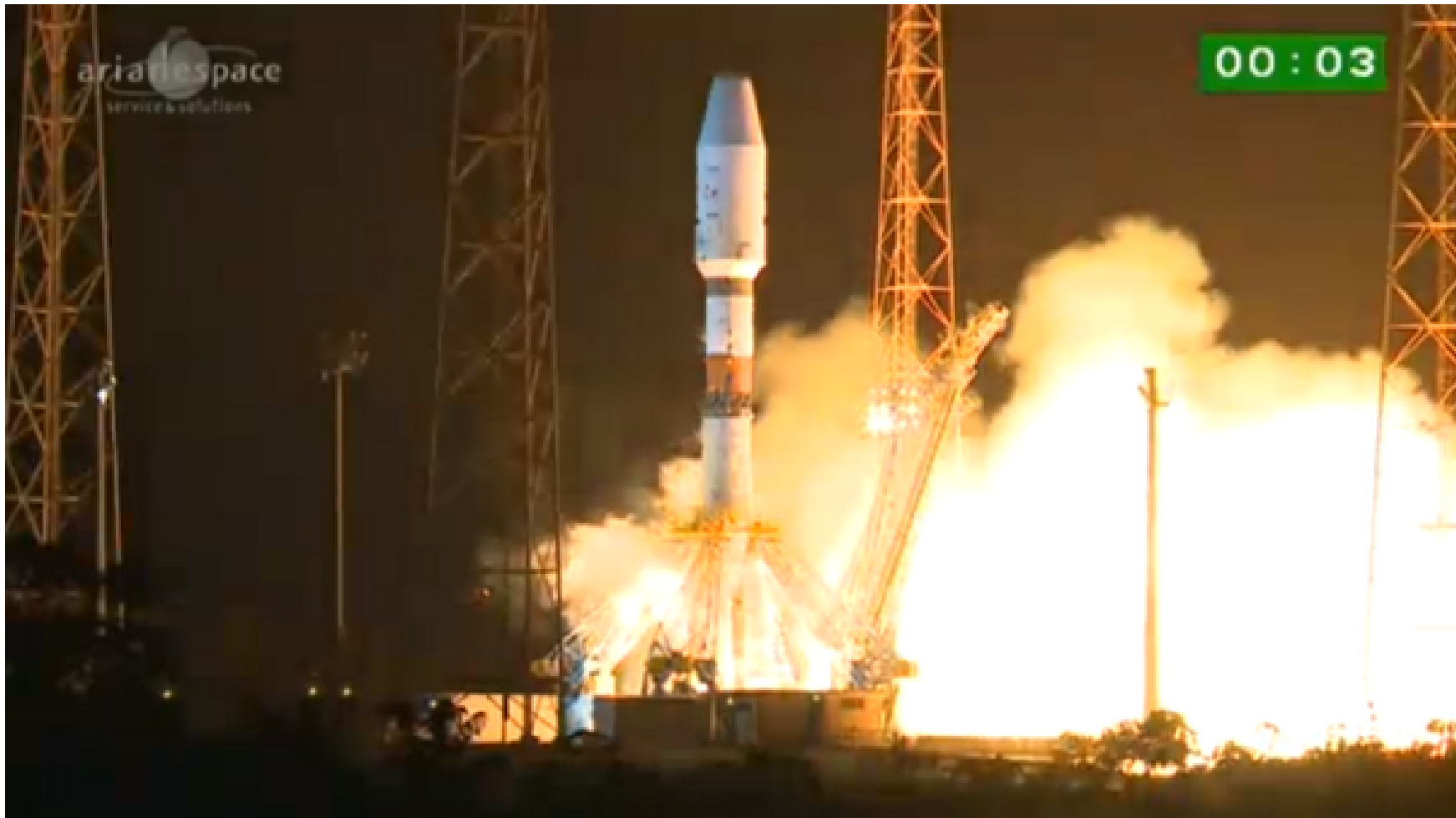
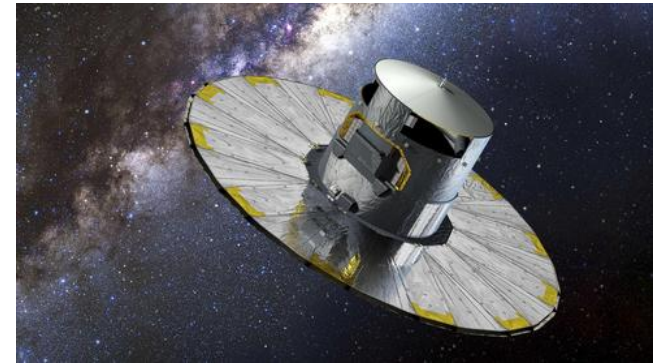
Einführung in die Astronomie und Astrophysik I

- 17.10. Einführung: Überblick & Geschichte (H.B.)
- 24.10. Sternpositionen, Koordinaten, Zeitmessung (C.F.)
- 31.10. Teleskope und Instrumentierung (H.B.)
- 07.11. Strahlung, Strahlungstransport (C.F.)
- 14.11. Planetensystem(e) & Keplergesetze (H.B.)
- 21.11. Sterne, Typen / Klassifikation, HR-Diagramm (C.F.)
- 28.11. Interstellare Materie: Chemie & Matriekreislauf (H.B.)
- 05.12. Sternentstehung, Akkretionsscheiben & Jets (H.B.)
- 12.12. Sternaufbau & -entwicklung I: Parameter, Hauptreihe (C.F.)
- 19.12. Sternaufbau & -entwicklung II: Energieerzeugung, Endstadien (C.F.)**
- - - Weihnachtspause
- 09.01. Mehrfachsysteme & Sternhaufen, Dynamik (C.F.)
- 16.01. Exoplaneten & Astrobiologie (H.B.)
- 23.01. Die Milchstraße (H.B.)
- 30.01. Zusammenfassung (C.F. & H.B.)
- 08.02. (Samstag) Prüfung: 15:00 - 17:00, INF 227**

Latest news

**Gaia Start erfolgreich:
am 19.12.2014 um 10:12 MEZ**

Gaia-Poster: astro.geo.tu-dresden.de/GaiaPosters/Deutsch/



Einführung in die Astronomie und Astrophysik I

9.3. **Wiederholung** Sternaufbau

10. Sternstruktur & Sternentwicklung - II

- 10.1. Pulsation, Stabilität
- 10.2. Energieerzeugung
- 10.3. Entwicklung: Hauptreihe
- 10.4. Entwicklung: Spätphasen
- 10.5. Kompakte Objekte

10. Sternstruktur & Sternentwicklung - II

10.1 Pulsationen, Stabilität

- > Kappa-Effekt, Periode-Leuchtkraft-Beziehung
- > Zustandsgleichung
- > Globale Stabilität

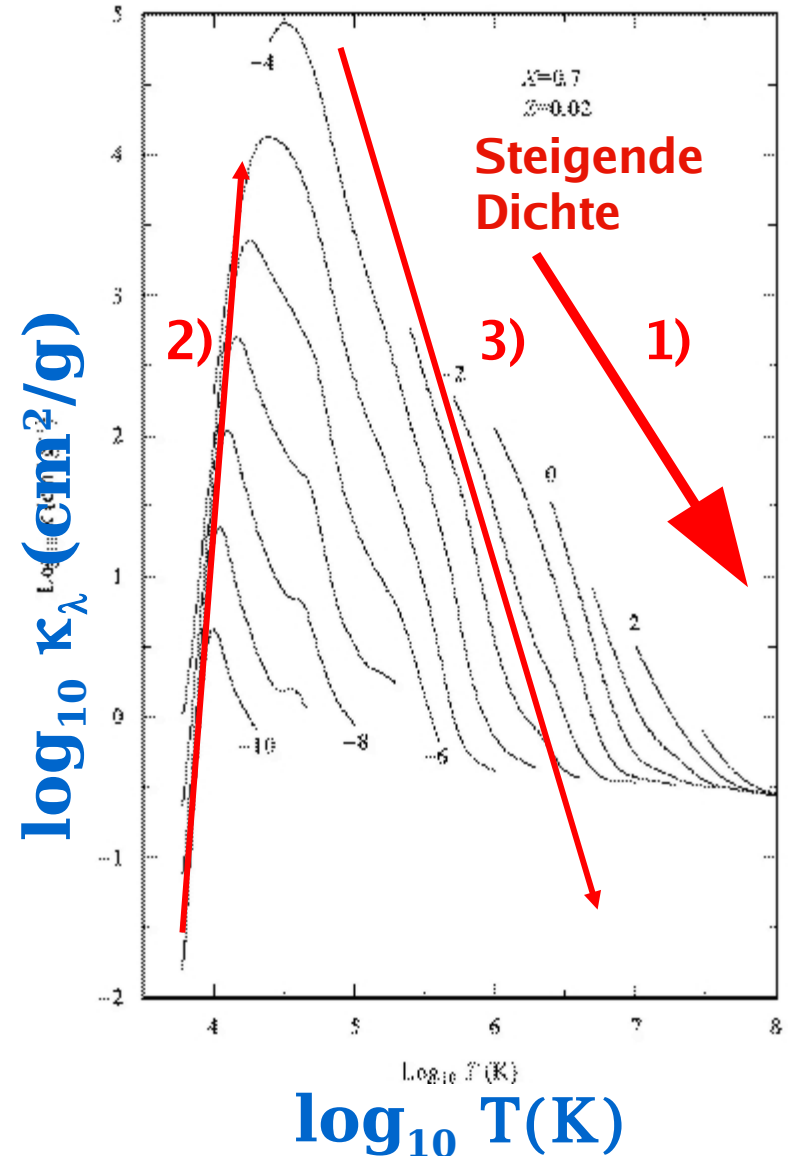
10.1 Pulsationen, Stabilität

Rosseland'sche Opazität:

berechnet für typische Massenanteile:

-> $X=0$, $Y=0.28$, $Z=0.02$ (Metalle)

- 1) Opazität steigt mit Dichte bei fester T
- 2) Bei fester ρ und kleinen T steigt Opazität stark wenn T steigt
Grund: Anzahl freier Elektronen wegen Ionisation von H und He
- 3) Potenzgesetz-Abfall nach dem Spitzenwert:
Spitzenwert: $\bar{\kappa} \propto T^{-3.5}$
-> *Kramer's law*
Grund: gebunden-freie und frei-freie Absorption der Photonen



10.1 Pulsationen, Stabilität

Opazität- “Anwendung” : Sternpulsationen

Normalerweise:

Opazität stellarer Materie fällt mit steigender Temperatur (Kompression)

-> schnelle Kühlung -> Abbremsung bei Expansion -> Dämpfung

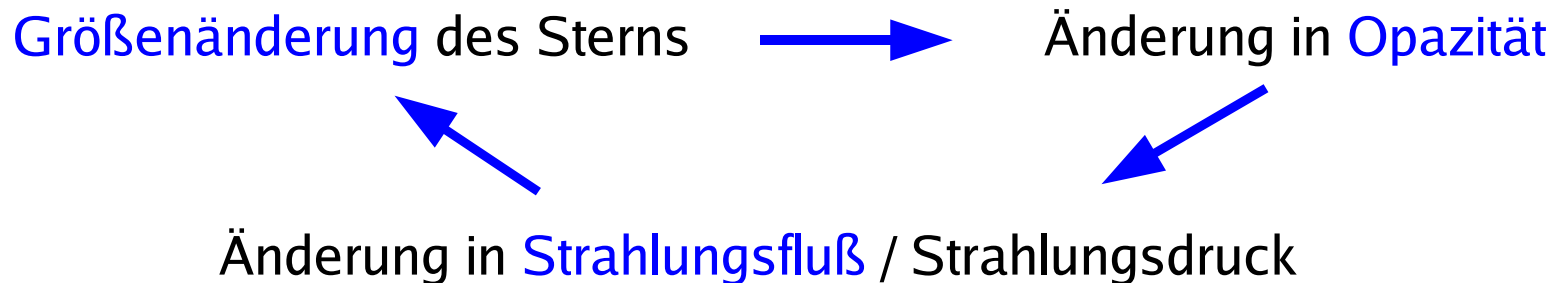
In Ionisationszonen: **κ -Effekt:**

Opazität wächst mit Temperatur -> Wärmestau

-> Temperatur und Dichte-Überschuß während Expansion

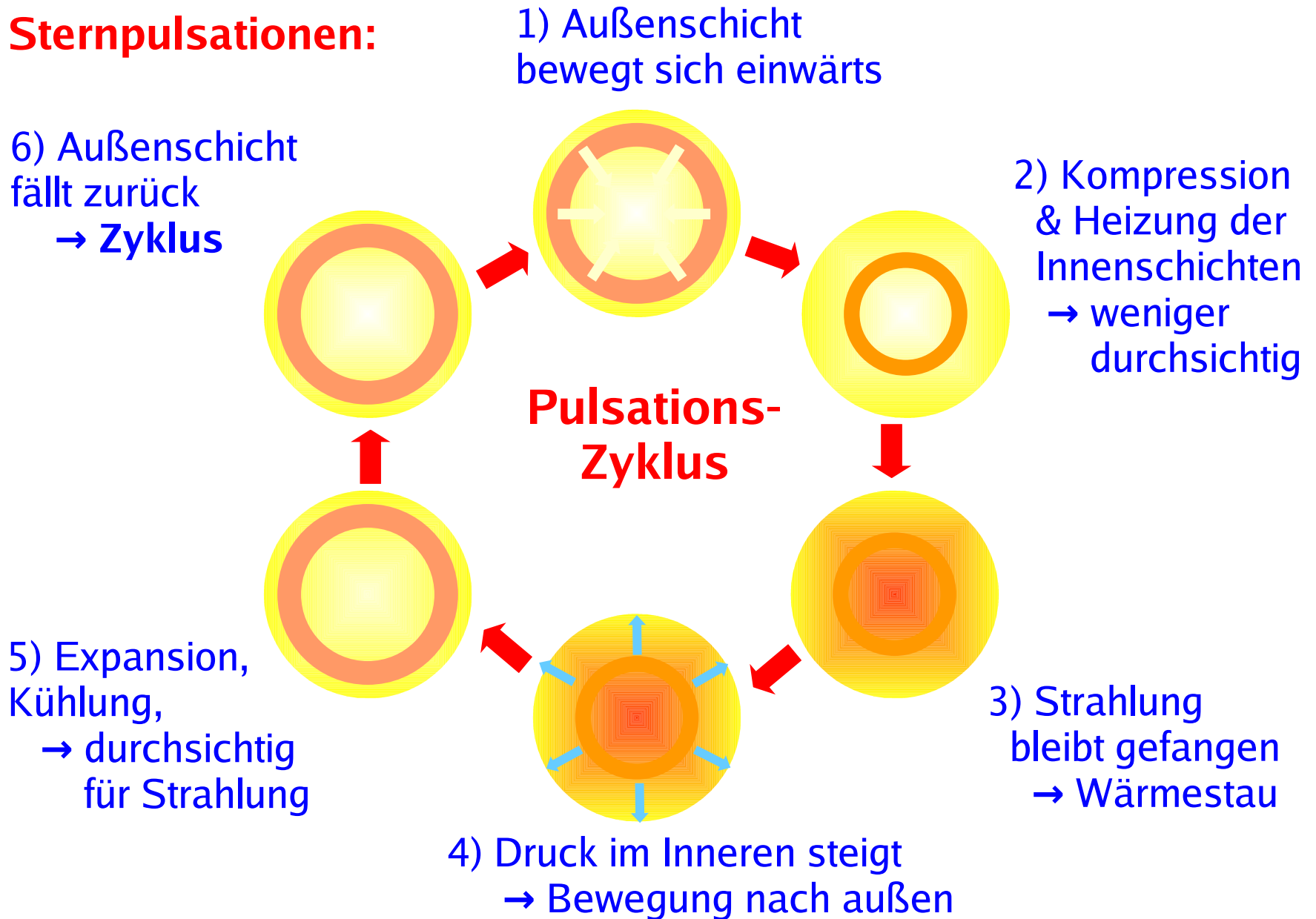
(in Cepheiden $\text{He}^+ \rightarrow \text{He}^{++}$, in Mira-Veränderlichen $\text{H} \rightarrow \text{H}^+$)

Pulsation:



10.1 Pulsationen, Stabilität

Sternpulsationen:



10.1 Pulsationen, Stabilität

Periode-Leuchtkraft-Beziehung:

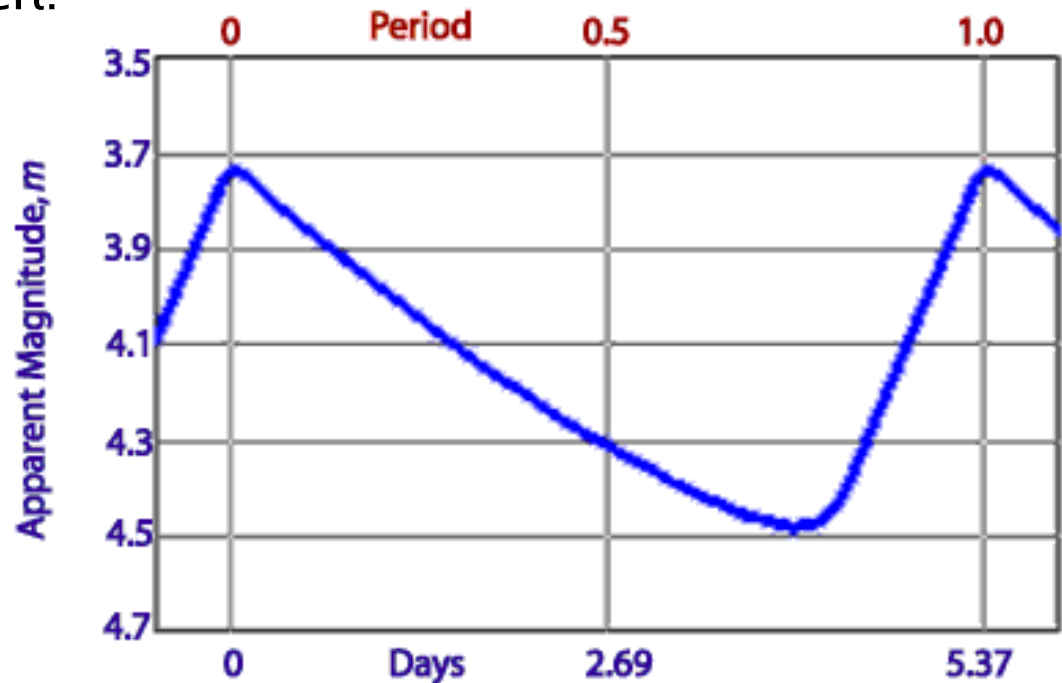
- > Pulsationsperiode abhängig von Sternmasse / Leuchtkraft
- > Zeitskala / Pulsationsperiode Π durch Freifallzeit definiert:

$$\Pi \simeq \frac{1}{2} (G \bar{\rho})^{-1/2}$$

Beispiel:

Lichtwechselperiode von
Delta Cephei

- > Helligkeit schwankt in
von 5.37 Tagen um
0.8 Größenklassen



Light Curve for δ Cephei

http://outreach.atnf.csiro.au/education/senior/astrophysics/variable_pulsating.html

10.1 Pulsationen, Stabilität

Periode-Leuchtkraft-Beziehung:

Standardkerzen in der Entfernungsmessung

-> in der Großen Magellanischen Wolke 3000 Cepheiden bekannt

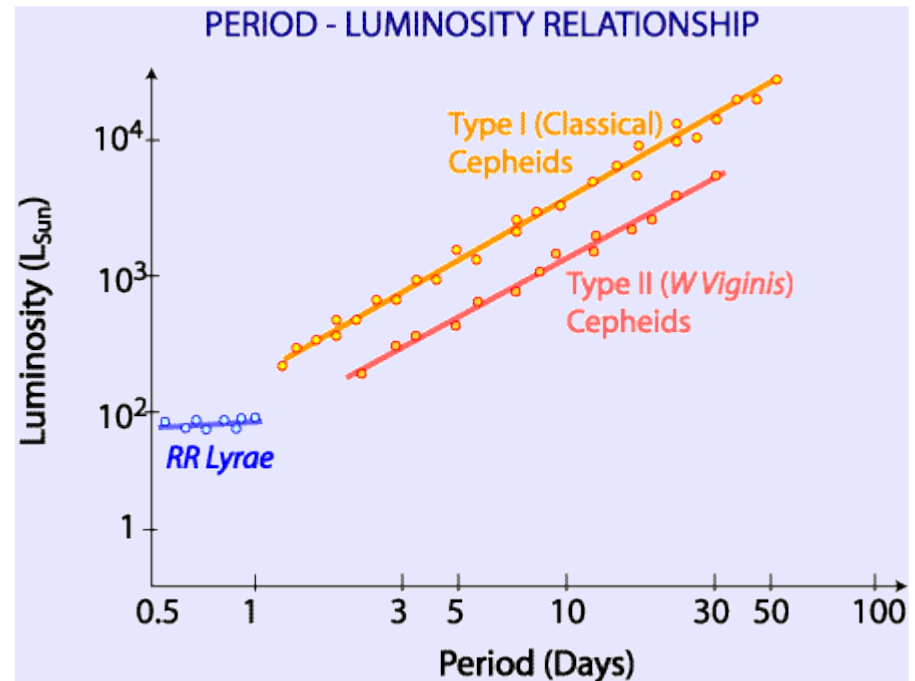
-> in M32 sind 232 Cepheiden bekannt

-> für klassische Cepheiden: $M_{[V]} = -2.80 \log P - 1.43$

Perioden-Leuchtkraft-Beziehung

für

- RR Lyrae-Sterne,
- Typ II Cepheiden und
- klassische Cepheiden



Achtung: um diese Beziehung für **Entfernungsbestimmungen** anzuwenden, muß man wissen, welcher **Sterntyp** beobachtet wird!

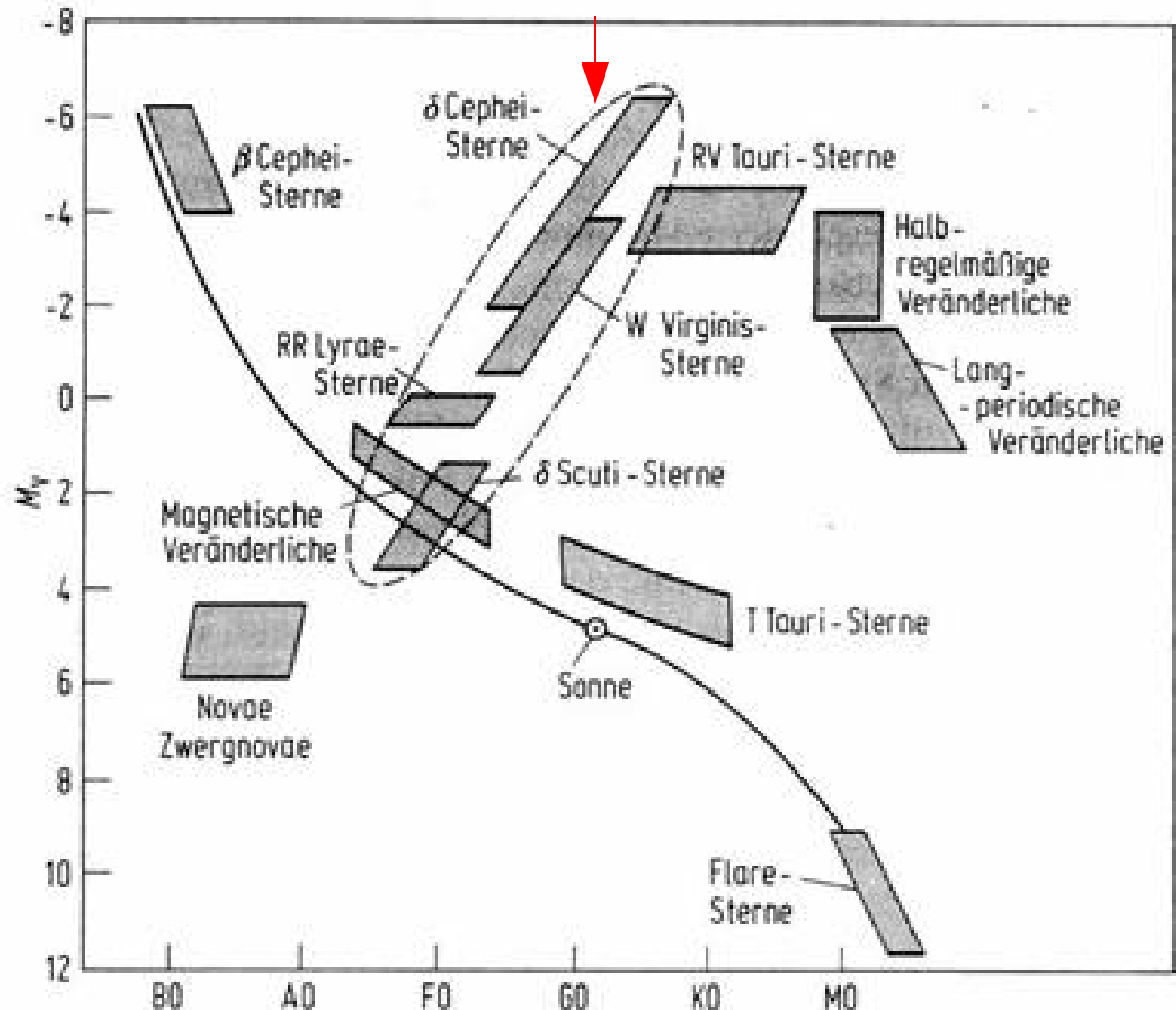
10.1 Pulsationen, Stabilität

Stabilität:

Weitere Veränderliche, die aber nicht alle eine regelmäßige Periode aufweisen

-> meistens außerhalb der Hauptreihe des Gleichgewichtszustandes

Instabilitätsstreifen



10. Sternstruktur & Sternentwicklung - II

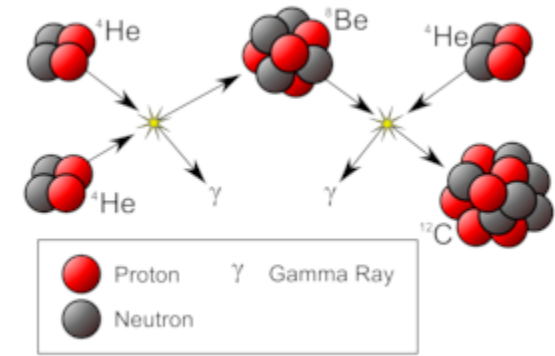
10.1 Energieerzeugung im Stern

- > Coulomb-Barriere
- > Tunnelprozeß
- > Fusionsreaktionen

10.2 Stellare Energieerzeugung

Stellare Energie-Erzeugung:

Kernfusion:



-> thermische Energie & Gravitationsenergie können die langen “Lebens”zeiten der Sterne **nicht** erklären

Kernfusion: “Brennen” von nieder- zu höherzahligen Elementen:

-> Energiegewinn aus **Bindungsenergie**:

He-Kern ist leichter als zwei H-Kerne -> $E = \Delta m c^2$

-> verschiedene Fusionsprozesse & Zeitskalen

-> Langfristige Änderung des **Rohstoff- und Energiehaushalts**

-> **“Sternentwicklung”**:

1) **quasi-stationäres Gleichgewicht** für Sterne der Hauptreihe

2) Entwicklung auf **kurzen Zeitskalen** außerhalb der Hauptreihe

-> **Eine Hauptidee der Astrophysik des 20. Jhrts**

10.2 Stellare Energieerzeugung

Kernfusion:

Zahlenwerte Sonne:

pro Sekunde verschmelzen 567 Mio Tonnen Wasserstoff zu
562.8 Mio Tonnen Helium

-> Differenz 4.2 Mio Tonnen pro Sekunde

mit $E = mc^2$ -> Energieleistung: $L = 4 \times 10^{26} \text{ W}$
= 4 Mio Mrd GW

-> **Solarkonstante:** Strahlungsleistung, die auf der Erde eintrifft::

Energie pro Fläche pro Zeit: **$E_0 = 1.4 \text{ kW /m}^2$**

im Vergleich: bei Merkur 6.6x höher, bei Neptun 1/1000 davon

10.2 Stellare Energieerzeugung

Problem der Kernfusion: Coulomb-Barriere:

Potentialbarriere $V_C(r)$ sich annähernder Atomkerne X, Y:

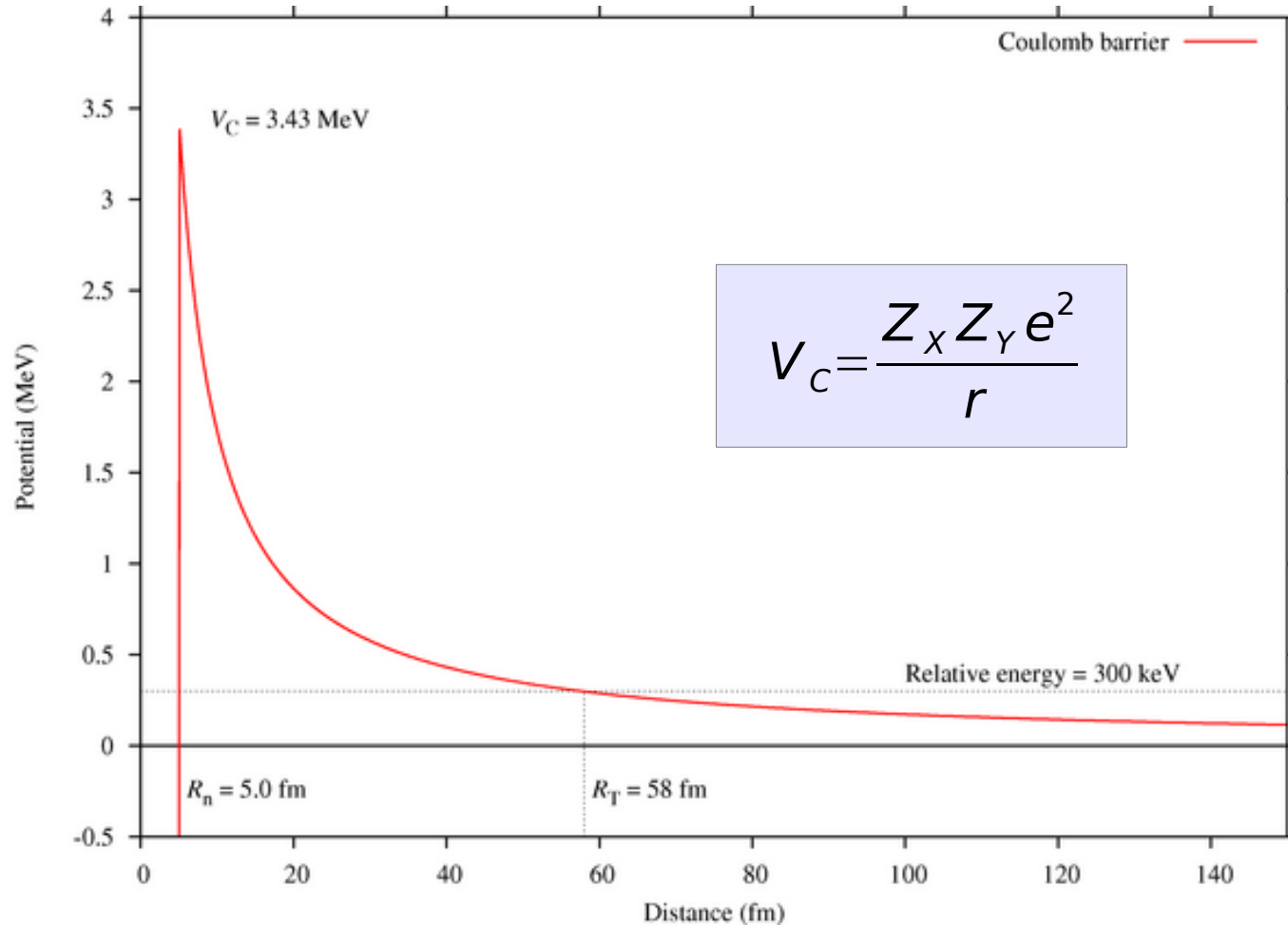
Beispiel:

$^{12}\text{C} + \alpha$ Fusion

-> findet statt bei
 2×10^8 K

$V_C(R_N) = 3.43$ MeV

bei Kernradius
 $R_N = 5$ fm



10.2 Stellare Energieerzeugung

Problem der Kernfusion: Coulomb-Barriere:

Beispiel: $^{12}\text{C} + \alpha$ Fusion -> findet statt bei 2×10^8 K

$$V_C(R_N) = 3.43 \text{ MeV bei Kernradius } R_N = 5 \text{ fm}$$

ABER: aus Boltzmann-Maxwell-Verteilung der Teilchenenergien:

$$n_v dv = n \left(\frac{m}{2\pi k_B T} \right)^{3/2} e^{-\frac{mv^2}{2k_B T}} 4\pi v^2 dv$$

- > Energie der α -Teilchen bei 2×10^8 K nur 26 keV !!
- > **Eindringtiefe:** klassischer Umkehrpunkt bei 665 fm \gg 5 fm
- > Häufigkeit von Teilchen mit $E > V_C$ ist 10^{-85} !!
- > keine Möglichkeit, klassisch das Potential zu überwinden !

10.2 Stellare Energieerzeugung

Problem der Kernfusion: Coulomb-Barriere:

Lösung: **Tunneleffekt**

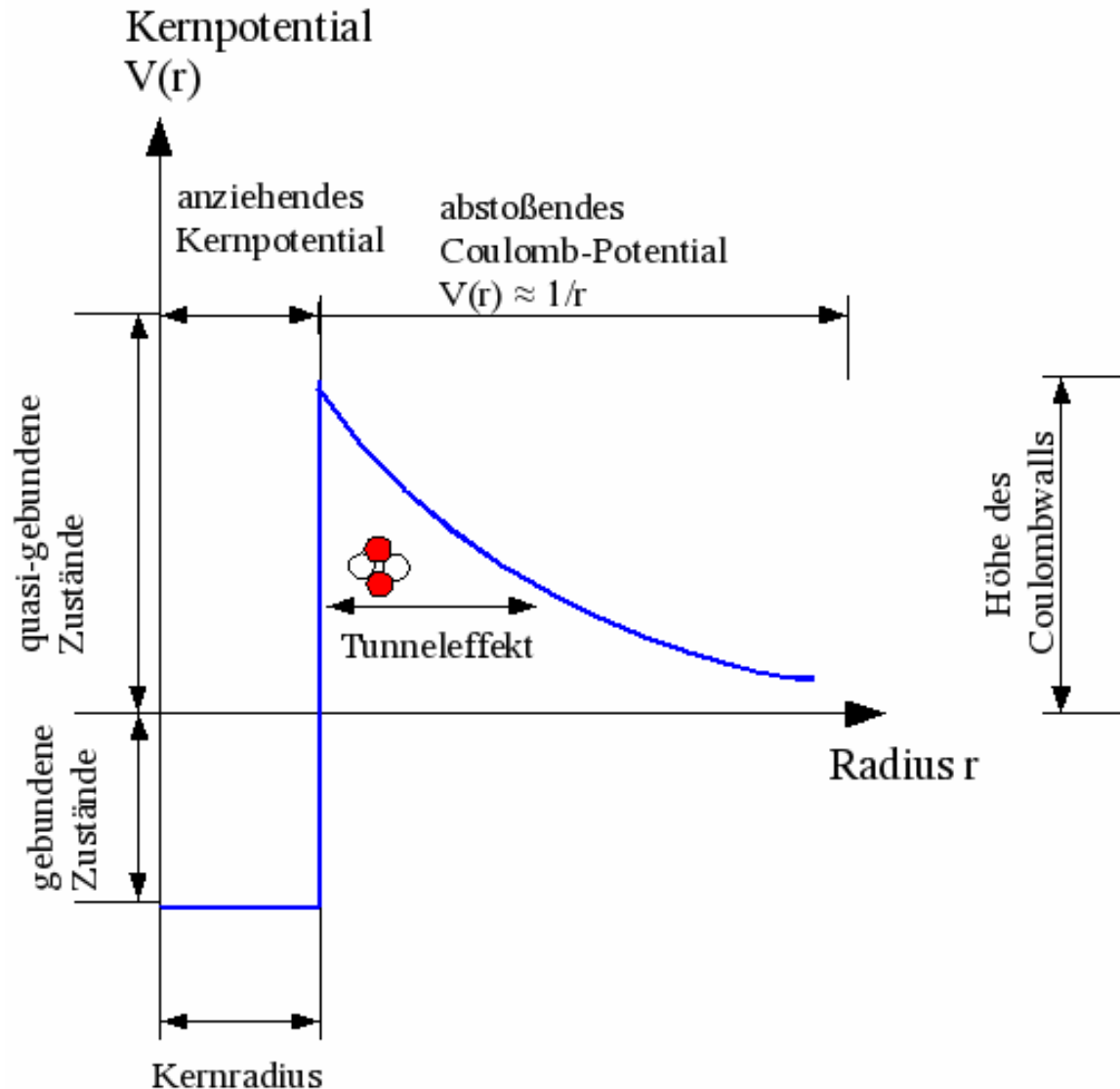
Quantenmechanik:

Unschärfe-Relation:

$$\Delta x \Delta p_x = \frac{\hbar}{2}$$

-> wenn sich zwei Kerne nähern, besteht **Wahrscheinlichkeit**, daß sie sich innerhalb der Barriere wiederfinden

-> abhängig vom **Teilchenimpuls**



10.2 Stellare Energieerzeugung

Tunneleffekt

Unschärfe-Relation:

$$\Delta x \Delta p_x = \frac{\hbar}{2}$$

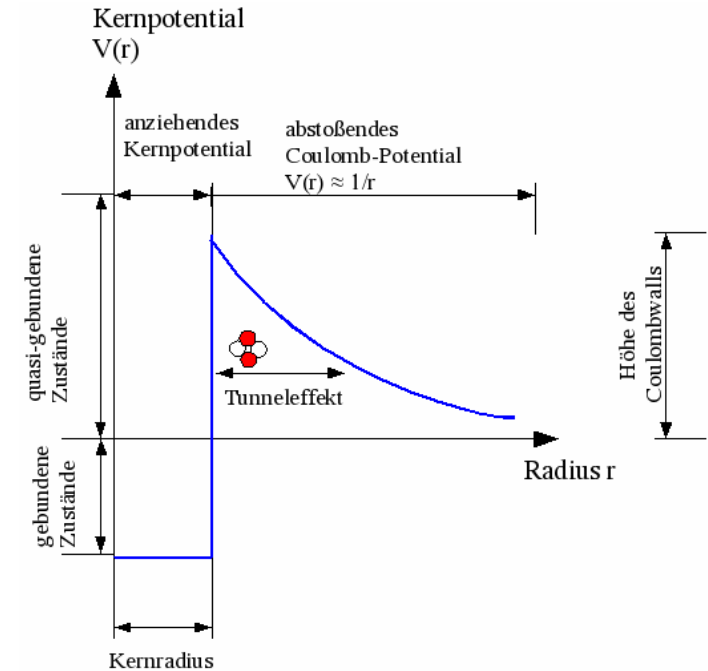
-> Wirkungsquerschnitt vergrößert sich auf die **de-Broglie-Wellenlänge** (QM-Materiewelle des Teilchens):

$$\lambda_{dB} \equiv \frac{h}{p} = \frac{h}{\mu v} = \frac{h}{\sqrt{3 \mu k_B T}}$$

-> z.B. bei $T=10^7\text{K}$: $\lambda_{dB} = \frac{6.626 \times 10^{-34}}{5.88 \times 10^{-31} \sqrt{T}} \approx 3.6 \times 10^{-5} \text{ cm} \gg 10^{-13} \text{ cm}$

-> **Tunnelwahrscheinlichkeit (Gamov):**

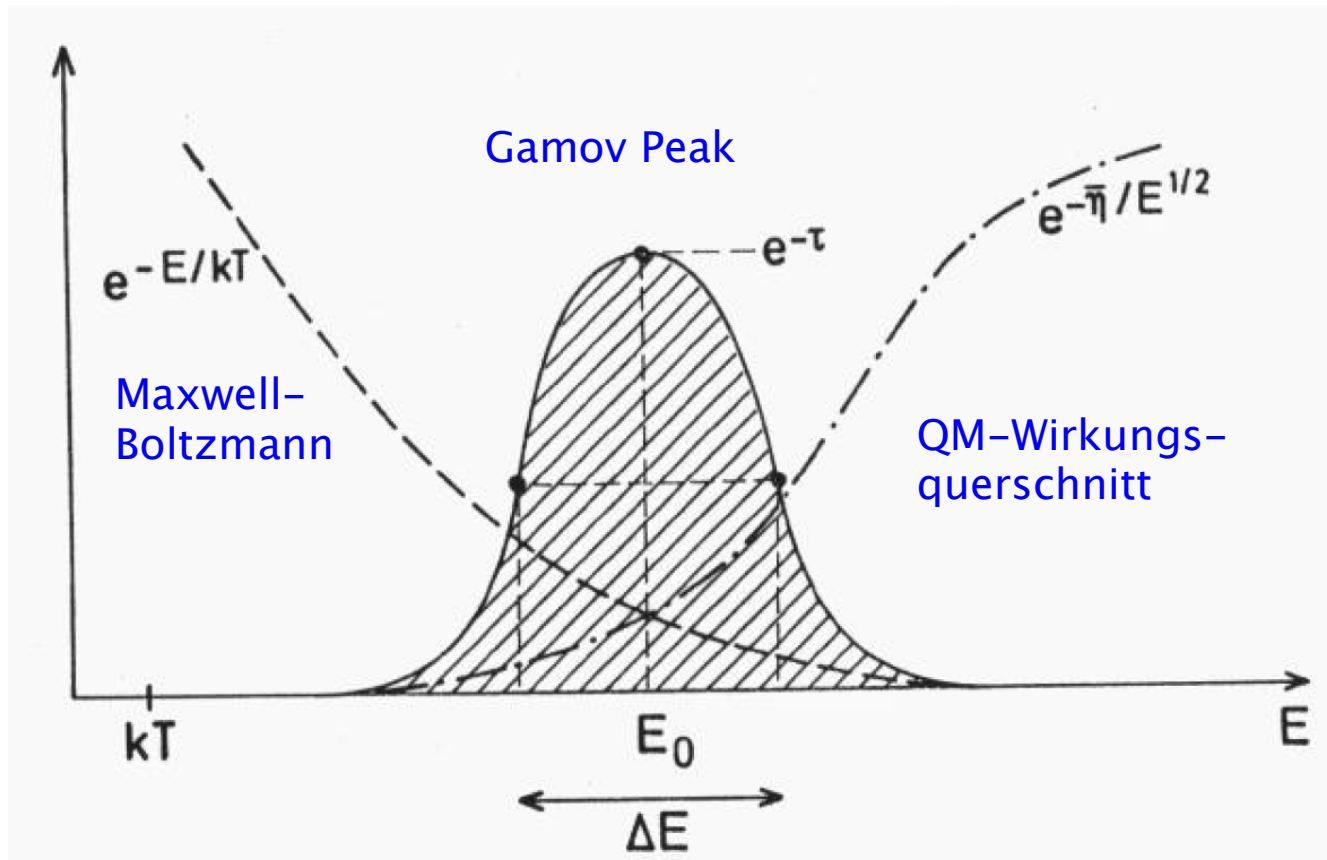
$$P(v) = e^{-2\pi\eta}, \quad \eta = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Z_X Z_Y e^2}{\hbar v}$$



10.2 Stellare Energieerzeugung

Tunneleffekt

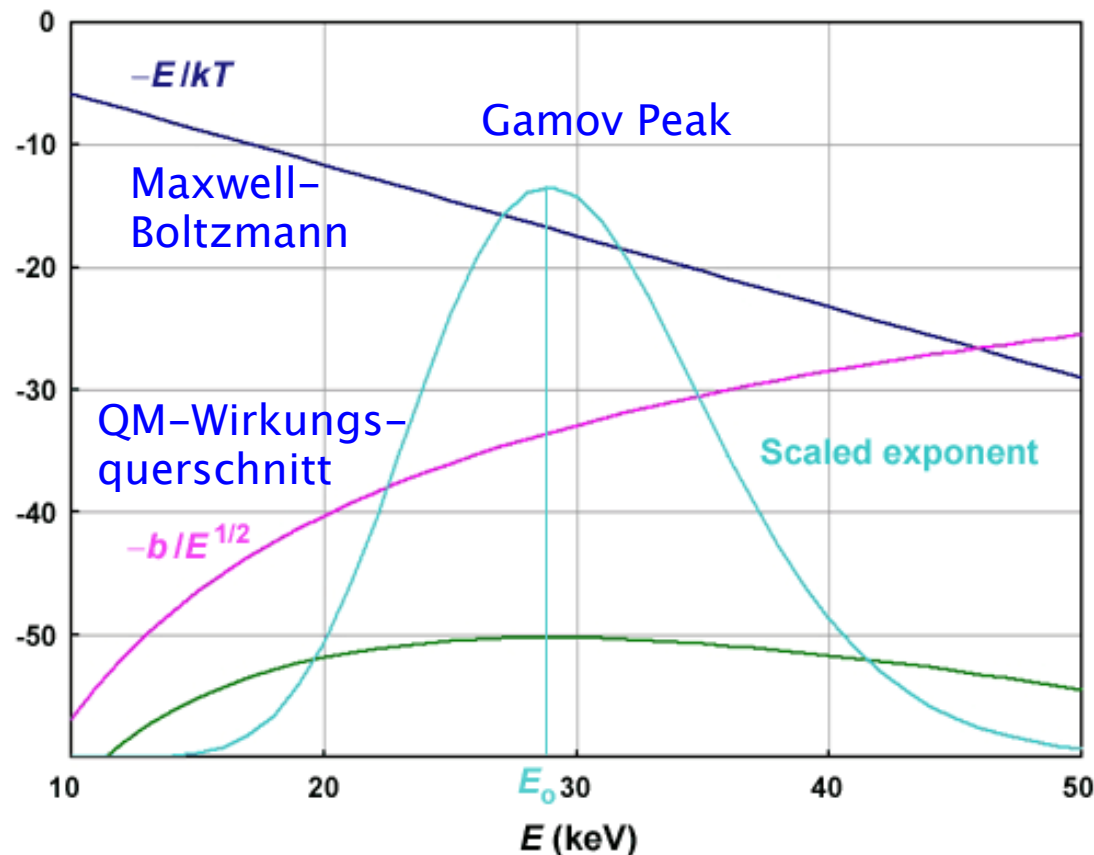
Wahrscheinlichkeit für eine Reaktion =
 Wahrscheinlichkeit für Geschwindigkeit v
 x Tunnelwahrscheinlichkeit $P(v)$



10.2 Stellare Energieerzeugung

Tunneleffekt

Wahrscheinlichkeit für Reaktion, Beispiel $^{12}\text{C} + \alpha$ Fusion



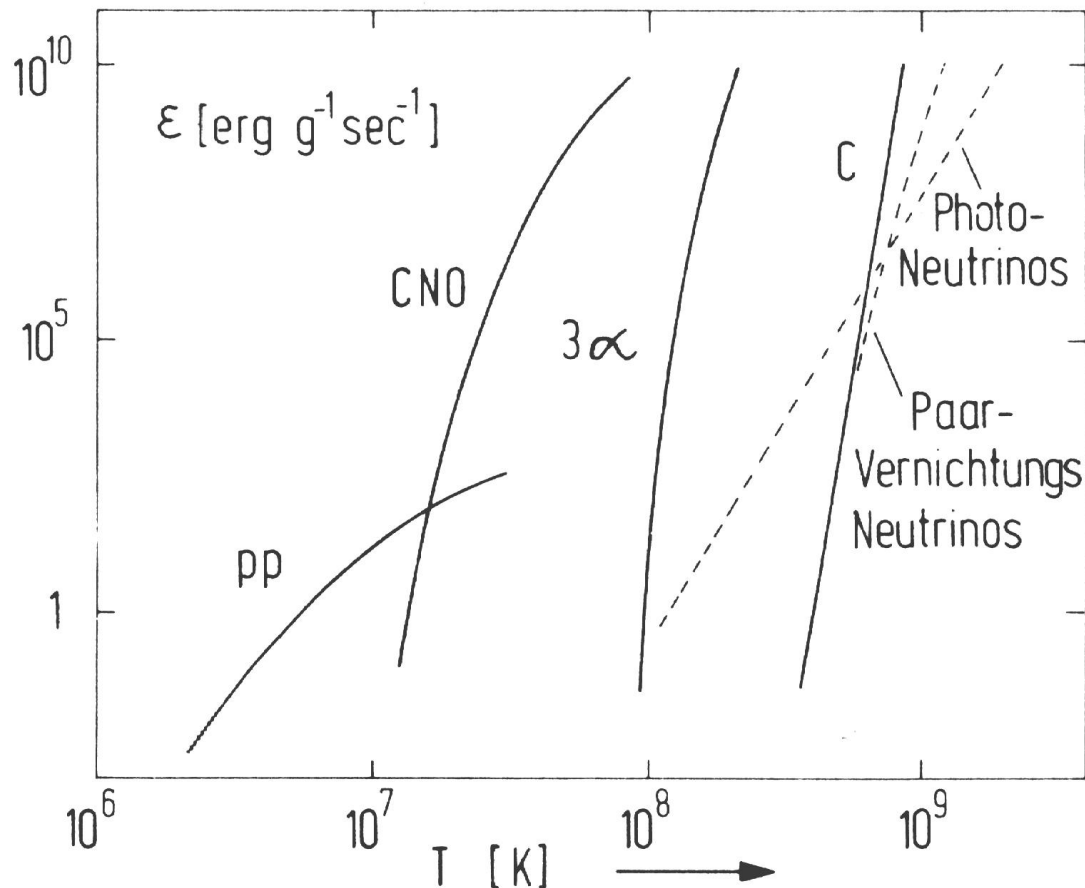
-> Gamov Peak bei 30 keV $\sim 2 \times 10^8$ K -> Fusion findet statt

10.2 Stellare Energieerzeugung

Kernfusion:

-> Gamov Peak impliziert **äußerst starke Temperaturabhängigkeit** der Energieerzeugungsraten:

-> **"Zünden"** der stellaren Kernfusion bei bestimmter Temperatur



$$\epsilon_{pp} \propto \rho T^5$$

$$\epsilon_{CNO} \propto \rho T^{17}$$

$$\epsilon_{3\alpha} \propto \rho^2 T^{30}$$

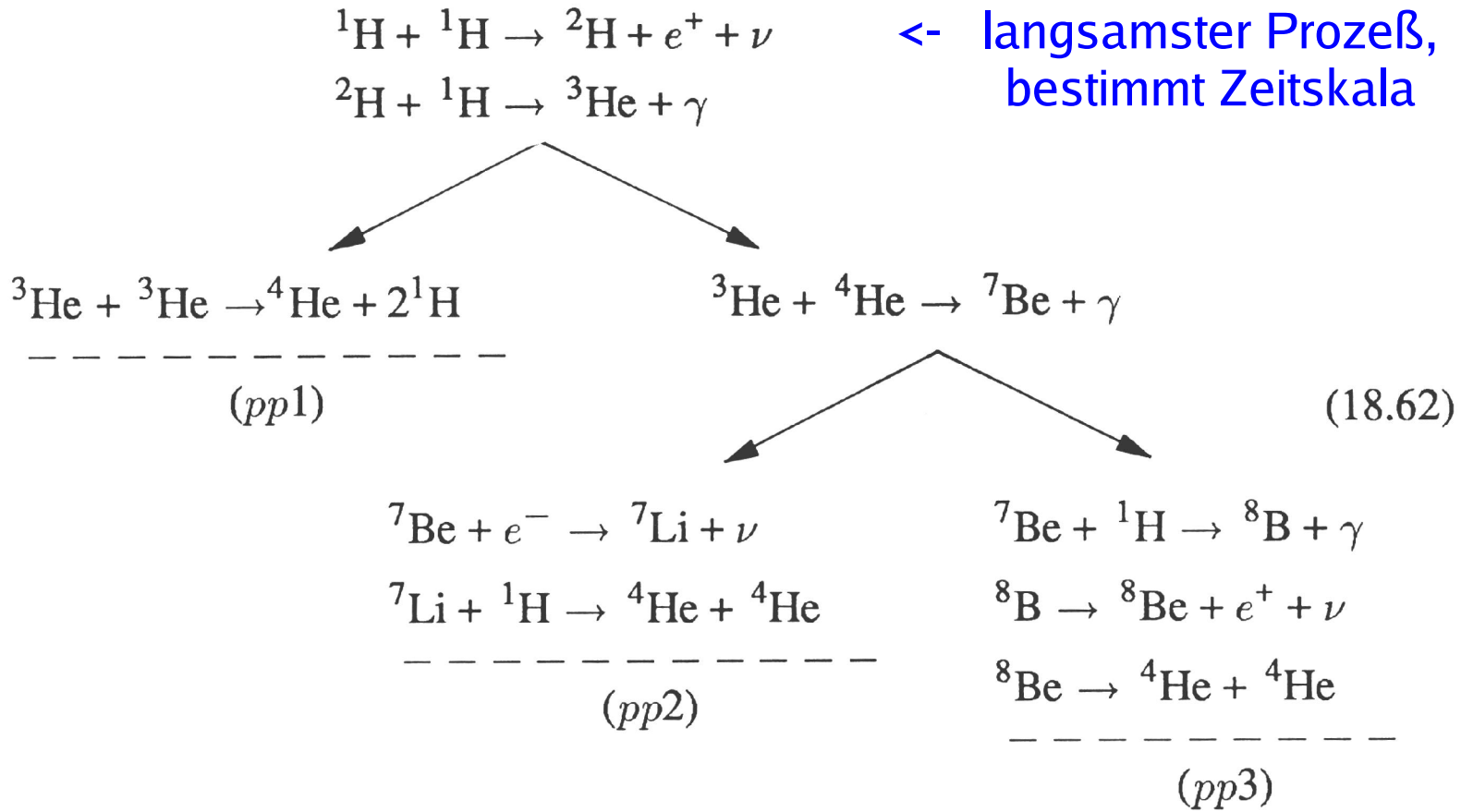
Energieerzeugungsraten für H-, He- und C-Brennen. Verlustraten durch Photo- und Paarvernichtungs-Neutrinos

(Scheffler/Elsässer, Physik der Sterne und der Sonne)

10.2 Stellare Energieerzeugung

Wasserstoff-Brennen:

-> pp-Kette (pp1, pp2, pp3), (pp=Proton-Proton)



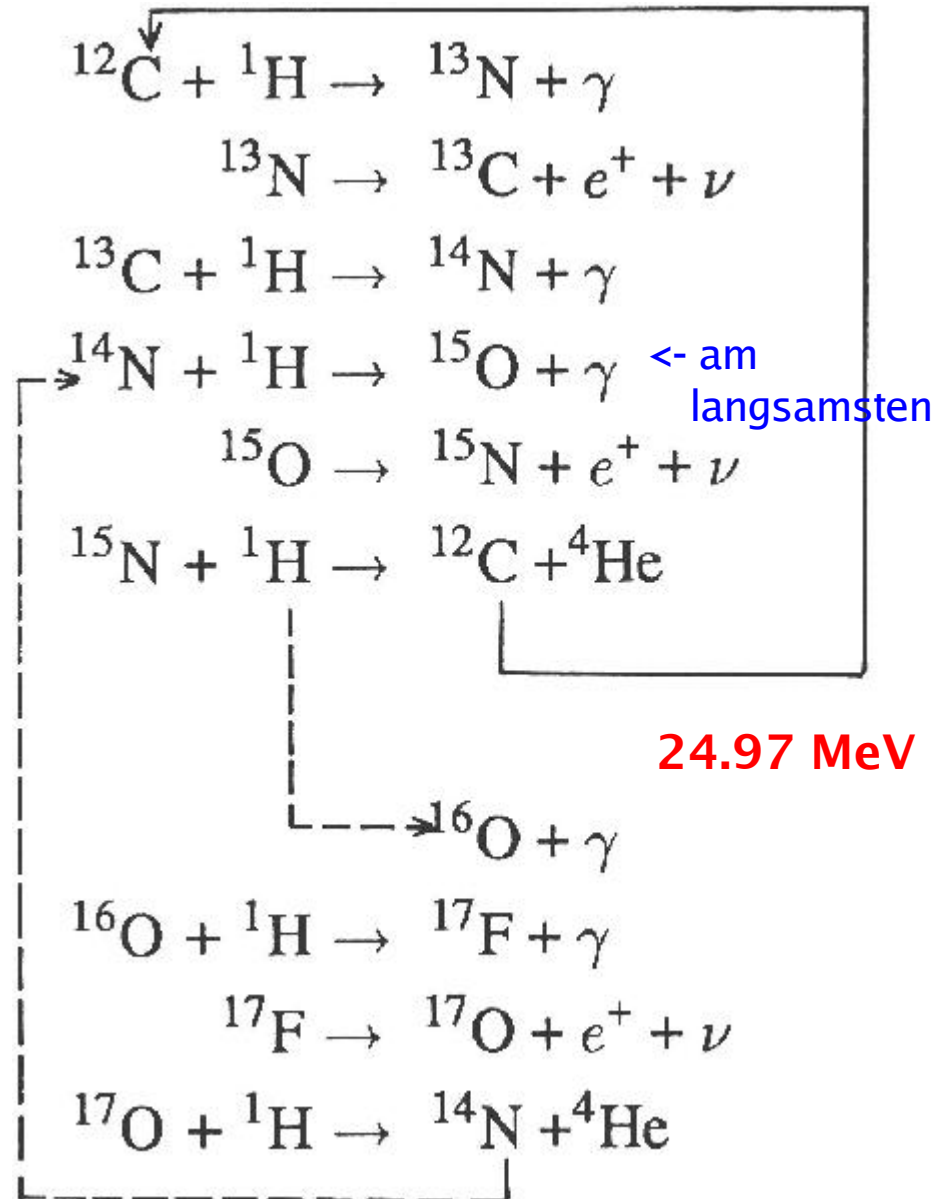
10.2 Stellare Energieerzeugung

Wasserstoff-Brennen:

Alternativprozeß:

CNO - Zyklus (Bethe-Weizsäcker-Zyklus)

-> Wasserstoff -> Helium
mit Katalysatoren C, N, O)



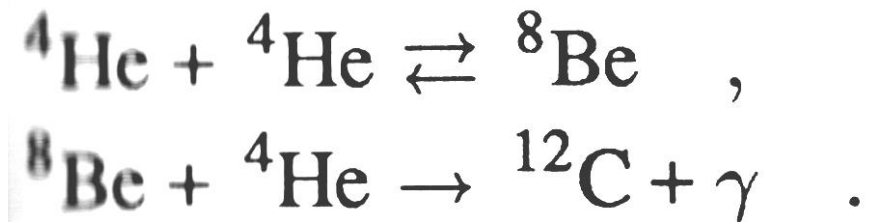
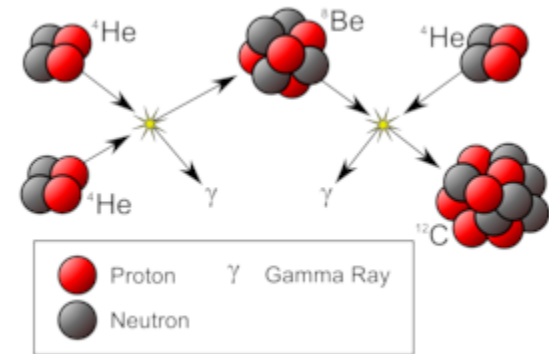
10.2 Stellare Energieerzeugung

Helium-Brennen:

1) 3 α -Prozeß

Helium -> Kohlenstoff

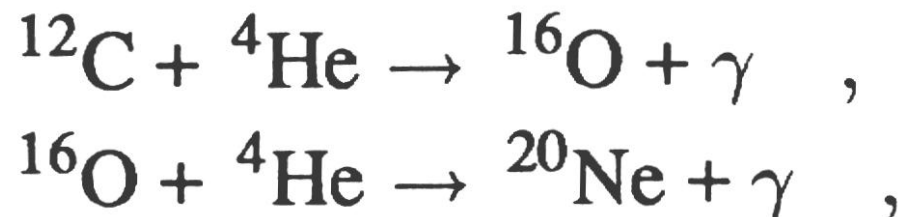
- $T > 10^8\text{K}$
- wenig Kohlenstoff vorhanden



7.28 MeV

2) Falls genügend Kohlenstoff vorhanden und T höher:

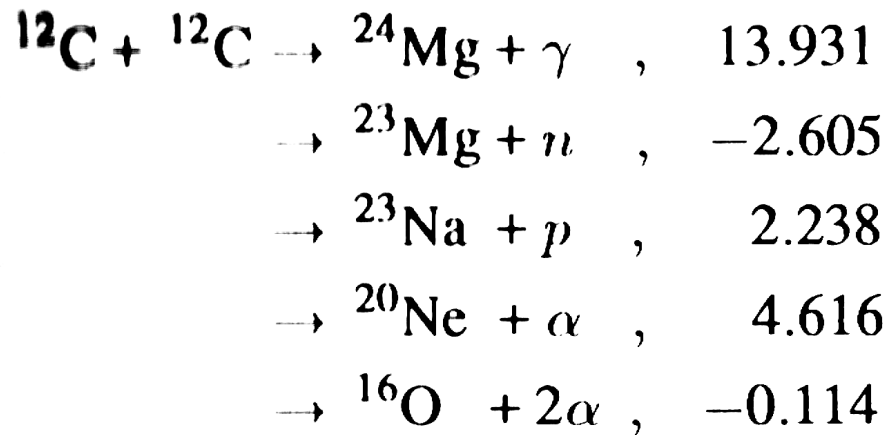
- > höhere Elemente durch weitere (α, γ) -Reaktionen
- > bis zu ^{24}Mg und ^{28}Si
- > auch ^{14}N , ^{18}F , ^{18}O , ^{22}Ne



10.2 Stellare Energieerzeugung

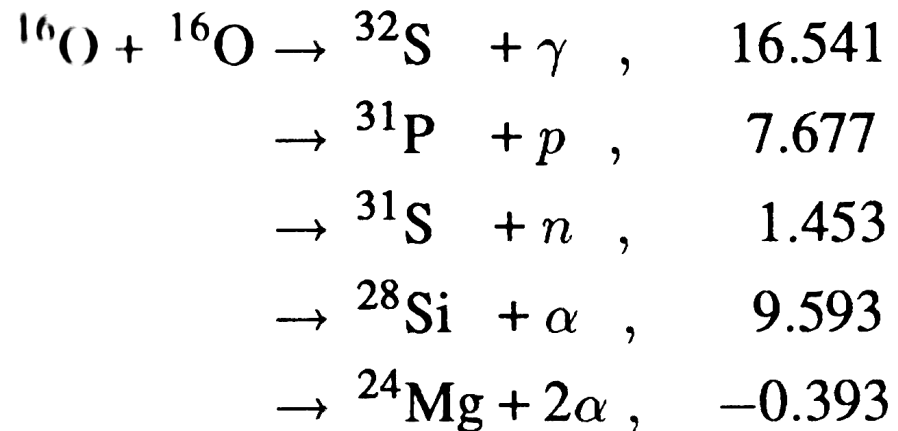
Kohlenstoff-Brennen:

$$5 \times 10^8 \text{K} < T < 10^9 \text{K}$$



Sauerstoff-Brennen:

$$T > 10^9 \text{K}$$



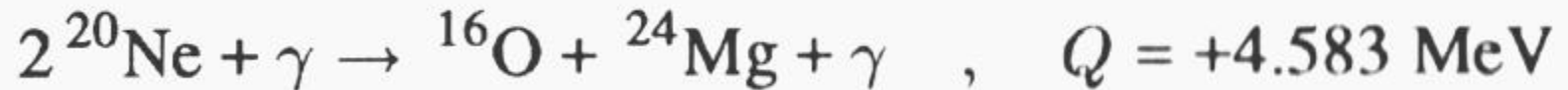
10.2 Stellare Energieerzeugung

Disintegration und weiteres Aufbauen:

$$T > 10^9 \text{K}$$

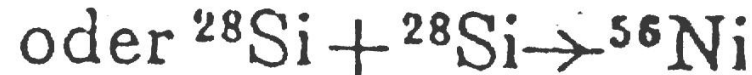
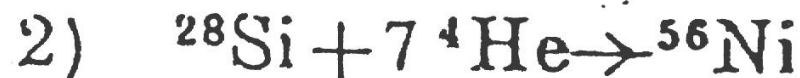


Erzeugtes α reagiert mit weiteren Neon-Kernen ...



Silizium-Brennen:

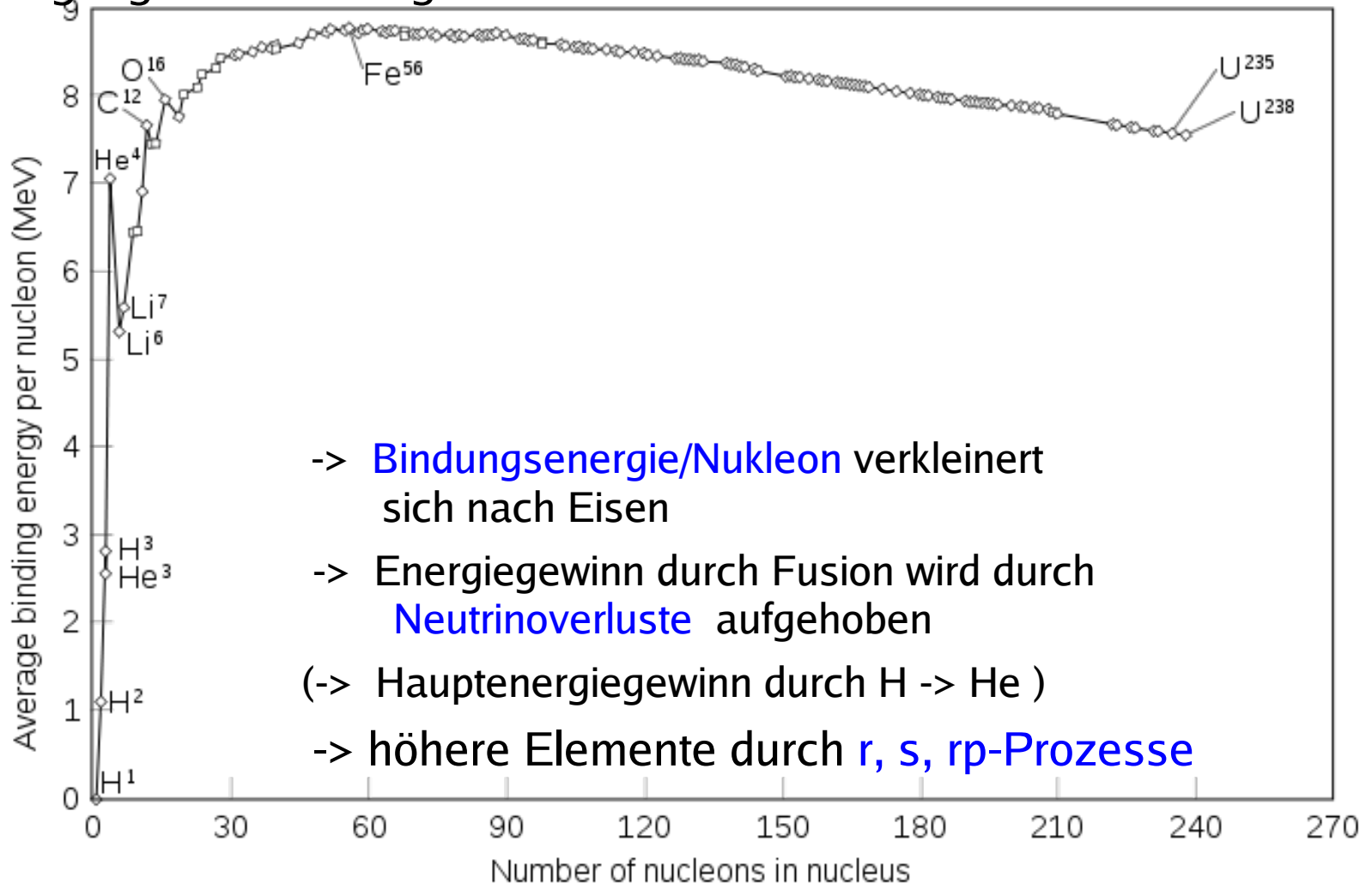
bis Eisen !!!



10.2 Stellare Energieerzeugung

Elemente höher als Eisen:

Erzeugung kostet Energie !!!



-> Bindungsenergie/Nukleon verkleinert sich nach Eisen

-> Energiegewinn durch Fusion wird durch Neutrinoverluste aufgehoben

(-> Hauptenergiegewinn durch $H \rightarrow He$)

-> höhere Elemente durch r, s, rp -Prozesse

10. Sternstruktur & Sternentwicklung - II

10.2 Sternentwicklung - Hauptreihe

- > Sternstruktur als Resultat der Sternaufbaugleichungen
- > Berechnung der theoretischen Hauptreihe beim Start der Kernfusion, = "Alter 0 "

10.3 Sternentwicklung - Hauptreihe

Sternentwicklung: Alter-Null-Hauptreihe (ZAMS)

Struktur des Sterninneren:

-> Resultat numerischer Lösungen der Sternaufbaugleichungen

-> Im Folgenden: Rechnungen für Sterne mit $1 M_{\odot}$ und $10 M_{\odot}$

(Abbildungen aus Kippenhahn-Weigert)

-> **Chemische Häufigkeiten:** $X=0.685$, $Y=0.294$, $Z=0.021$,
anfänglich **homogen** verteilt

-> **Variable Größen:**

a) Dichte ρ

b) Masse $m = M(r)$

c) Temperatur T

d) Kernenergieerzeugungsrate ϵ

e) Leuchtkraft $l = L(r)$

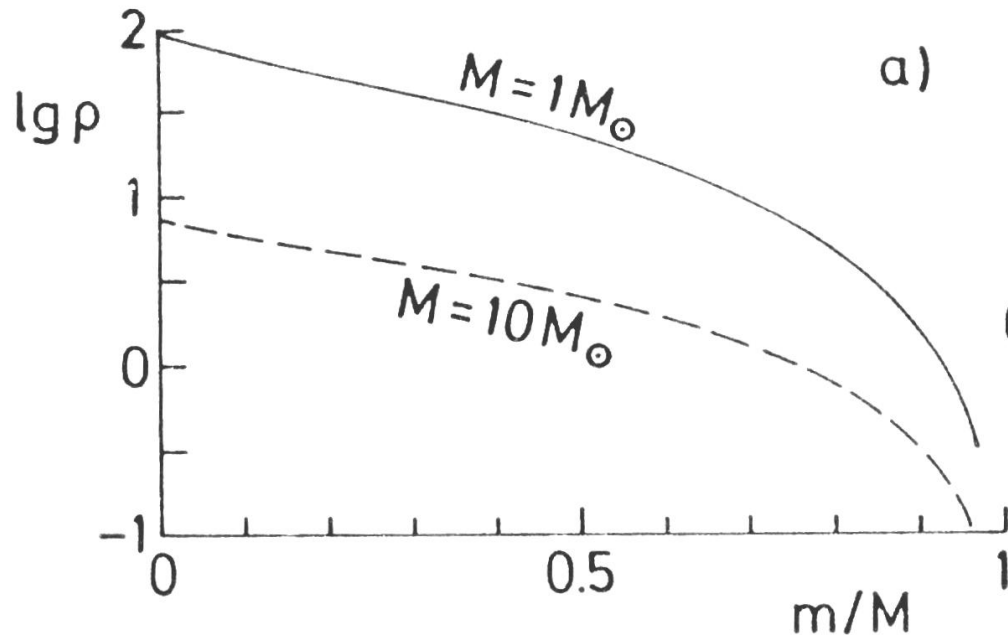
-> Werte m , l , r sind auf Gesamt- M , L , R **normalisiert**

10.3 Sternentwicklung - Hauptreihe

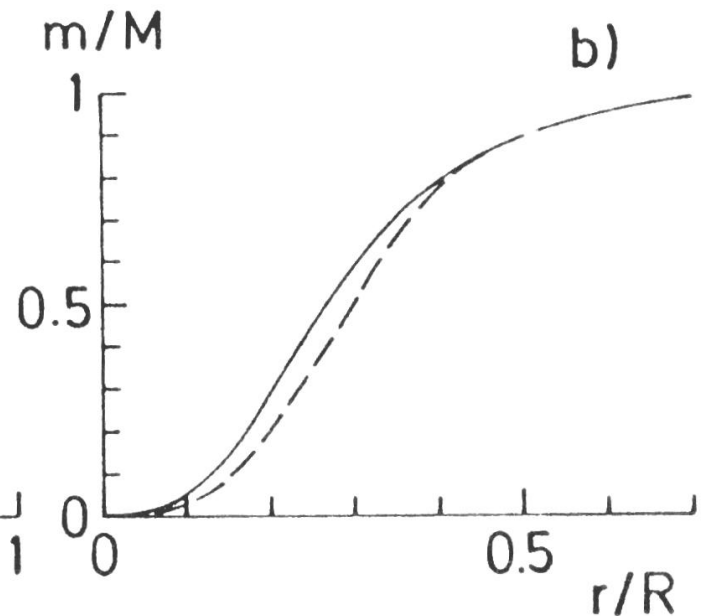
Sternentwicklung: Alter-Null-Hauptreihe (ZAMS)

Resultat numerischer Lösungen der Sternaufbaugleichungen:

Dichtestruktur:



Massenverteilung:



-> Massereiche Sterne haben kleinere Zentraldichten

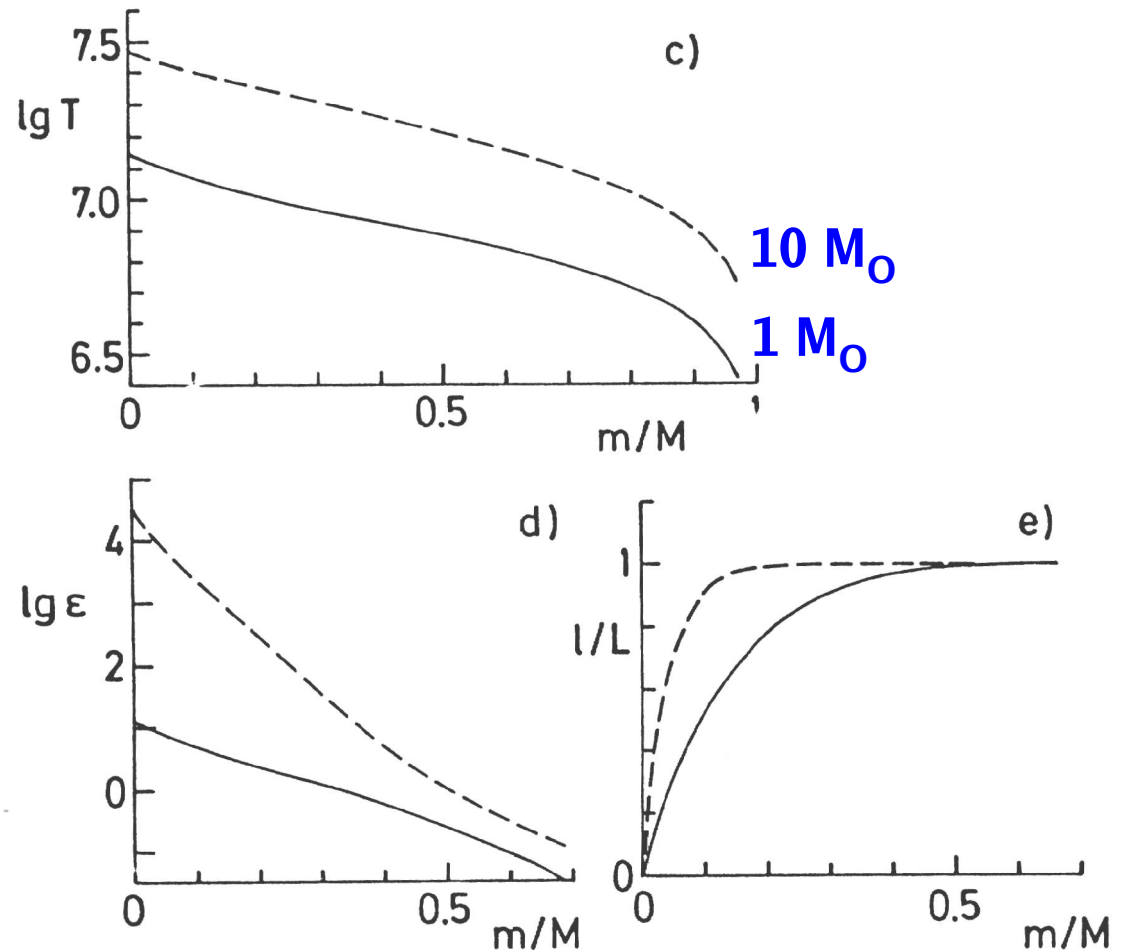
10.3 Sternentwicklung - Hauptreihe

Sternentwicklung: Alter-Null-Hauptreihe (ZAMS)

Resultat numerischer Lösungen der Sternaufbaugleichungen:

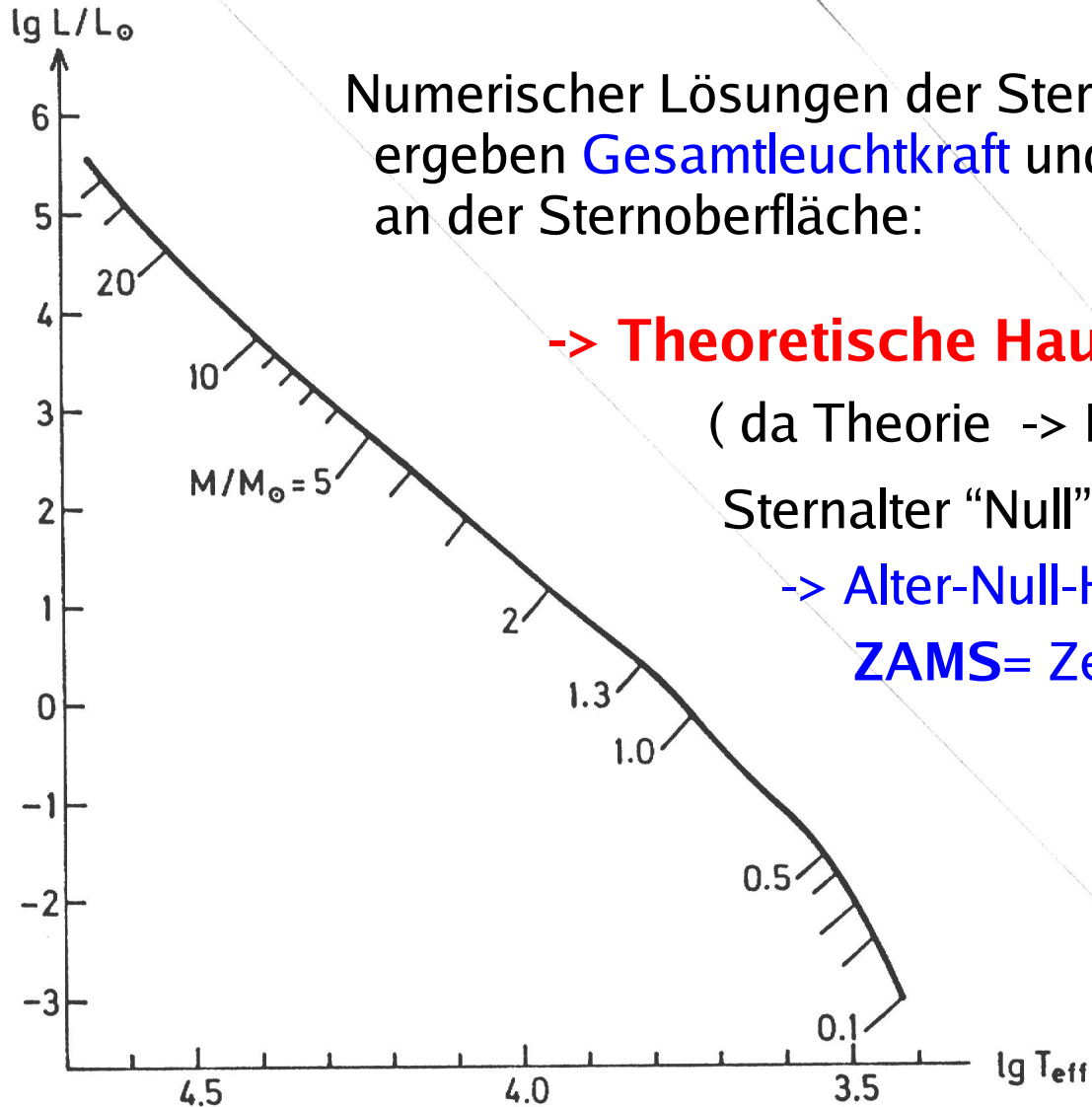
Massereiche Sterne haben:

- höhere Zentraltemperaturen
- höhere Konzentration der Energieproduktion
- höhere Konzentration der Leuchtkraft



10.3 Sternentwicklung - Hauptreihe

Sternentwicklung: Alter-Null-Hauptreihe (ZAMS)



Numerischer Lösungen der Sternaufbaugleichungen ergeben **Gesamtleuchtkraft** und **Effektivtemperatur** an der Sternoberfläche:

-> **Theoretische Hauptreihe**

(da Theorie -> Masse bekannt !)

Sternalter "Null":

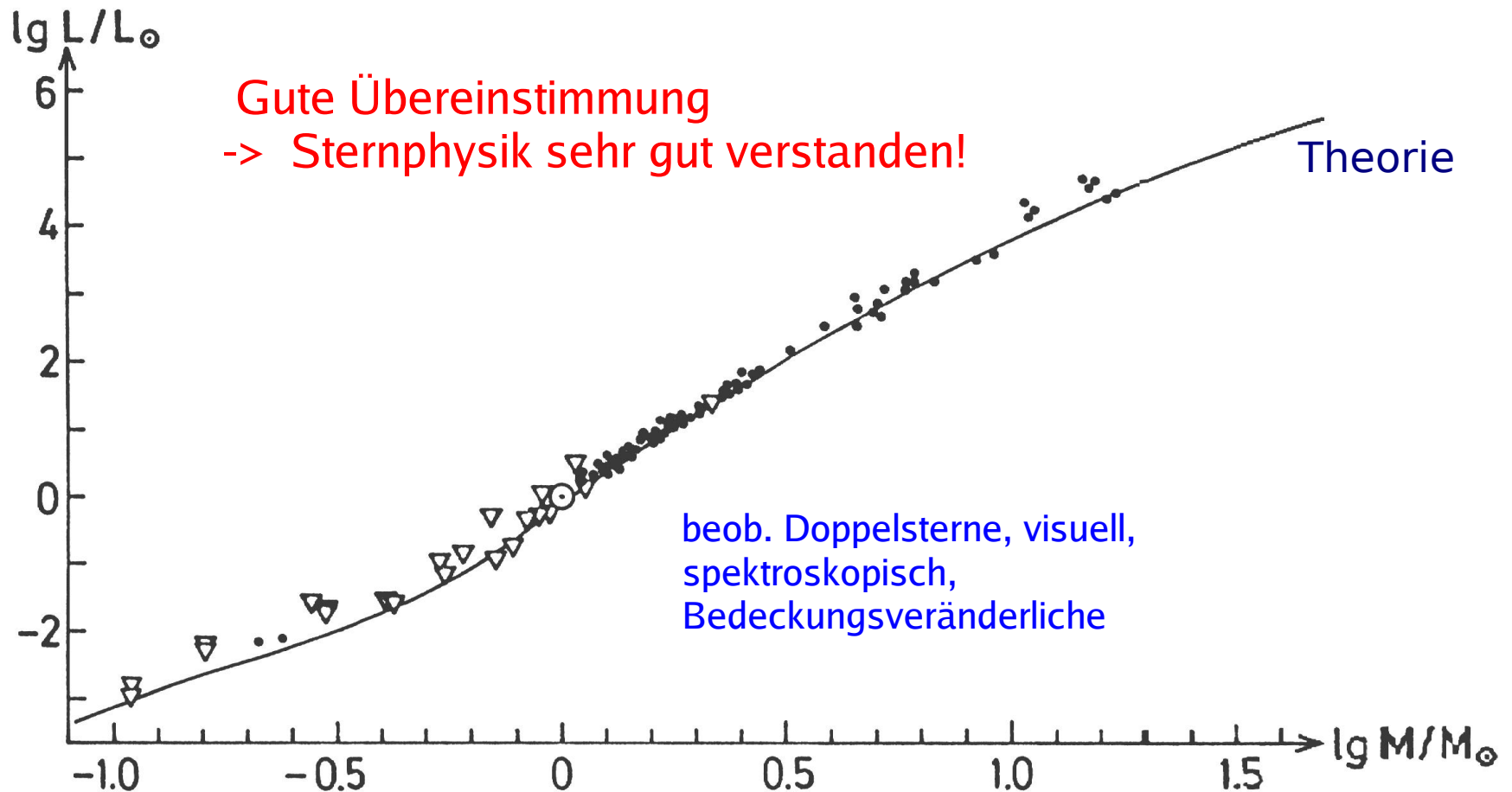
-> **Alter-Null-Hauptreihe**

ZAMS= Zero Age Main Sequence

10.3 Sternentwicklung - Hauptreihe

Sternentwicklung: Alter-Null-Hauptreihe (ZAMS)

Vergleich der theoretischen ZAMS mit empirischer
Masse-Leuchtkraft-Beziehung



10. Sternstruktur & Sternentwicklung - II

10.4 Sternentwicklung - Spätstadien

- > Entwicklung der Sterne bei nachlassendem Energievorrat
- > Entwicklung "außerhalb" der Hauptreihe

10.4 Sternentwicklung - Spätphasen

Sternentwicklung: Altersentwicklung von der ZAMS

Hauptreihensterne “leben” vom Wasserstoffbrennen

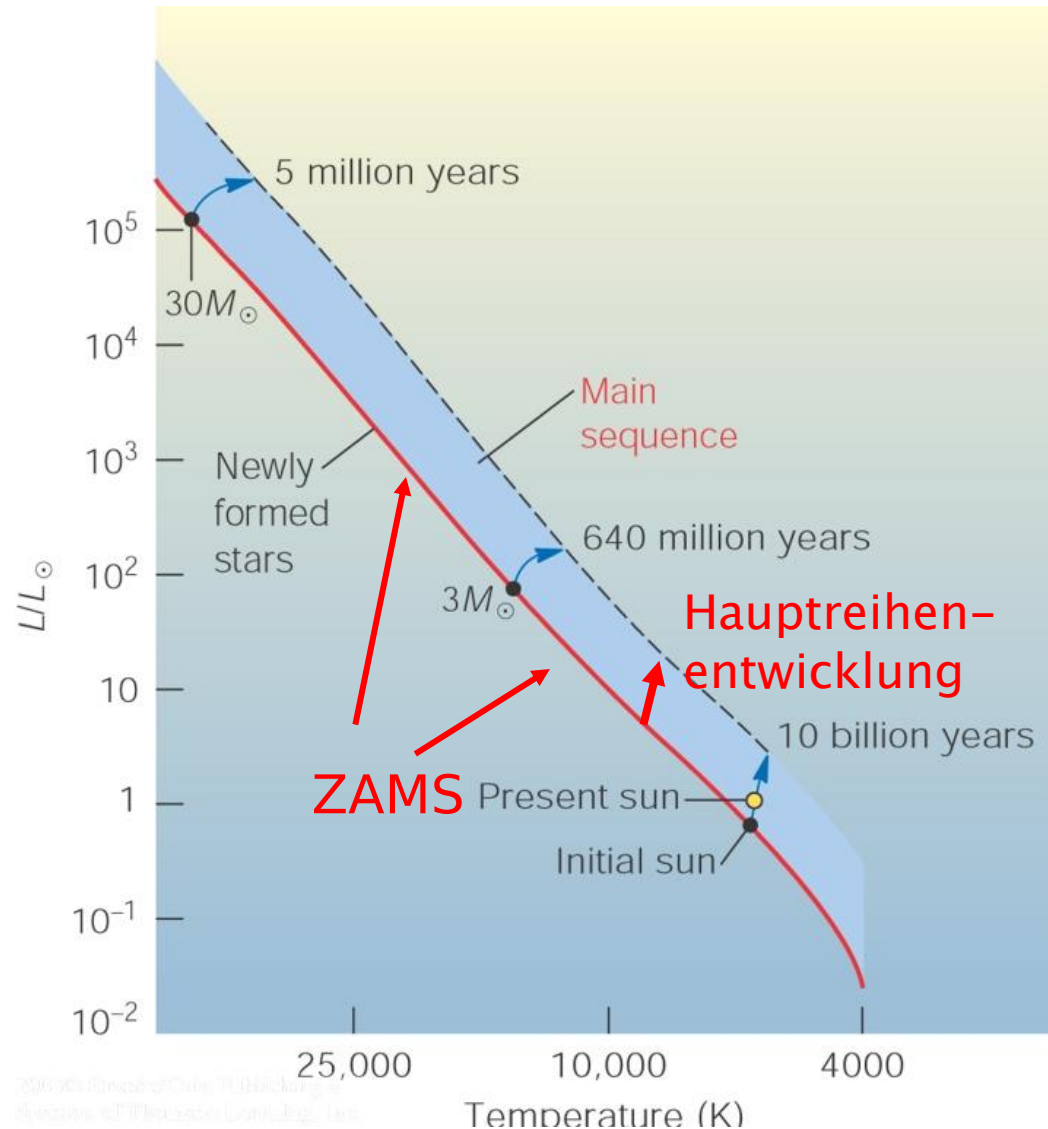
-> Vorrat begrenzt

-> begrenzte Verweildauer auf der Hauptreihe

-> “Entwicklungszeit”

Table 12-2 Main-Sequence Stars

Spectral Type	Mass (sun = 1)	Luminosity (sun = 1)	Approximate Years on Main Sequence
O5	40	405,000	1 10^6
B0	15	13,000	11 10^6
A0	3.5	80	440 10^6
F0	1.7	6.4	3 10^9
G0	1.1	1.4	8 10^9
K0	0.8	0.46	17 10^9
M0	0.5	0.08	56 10^9



10.4 Sternentwicklung - Spätphasen

Sternentwicklung: Altersentwicklung ab der Hauptreihe

Blick in den Kernbereich:

-> ZAMS-Zusammensetzung:
70% H, 27% He

-> Nach 5 Mrd Jahren H-Brennen:
65% He, 35% H

-> Ende des Hauptreihenstadiums:

- Heißer Kern, reich an Helium

- Energieproduktion durch Schalenbrennen von H

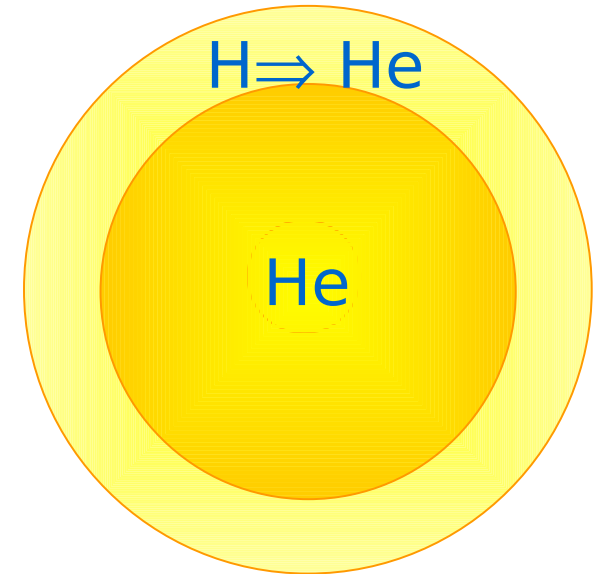
- Strahlungsdruck des heißen Kerns

-> Expansion der äußeren Hüllen (> Erdbahn)

- Kern wird weiter gravitativ komprimiert -> heißer, dichter

-> Kernmaterie "entartet": Änderung der Zustandsgleichung

-> Bei 100 Mio K -> He-Brennen im Kern



10.4 Sternentwicklung - Spätphasen

Sternentwicklung: Altersentwicklung ab der Hauptreihe

Blick in den Kernbereich:

-> Bei 100 Mio K -> **He-Brennen im Kern**

-> $M < 3M_{\odot}$: “Runaway process” -> “**Helium-Flash**”

- “Entartung” im Kern geht zurück

$M > 3M_{\odot}$: normales He-Brennen

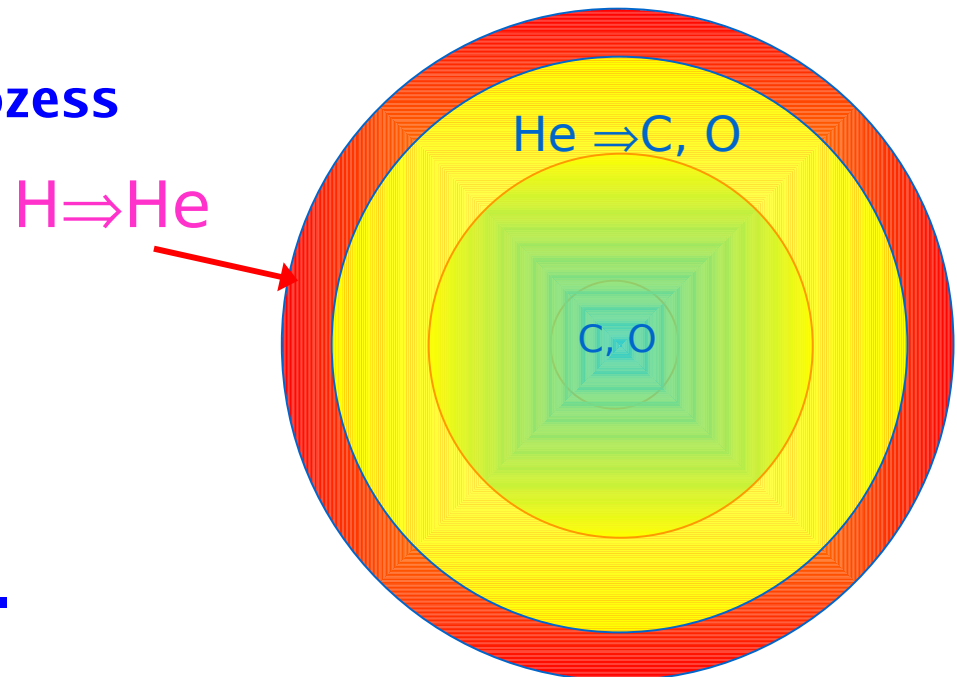
-> He-Brennen: **triple-alpha Prozess**

Initiiert “zweites Leben” des

Sterns: $\text{He} \rightarrow \text{C}, \text{O}$

$\text{H} \Rightarrow \text{He}$

Weitere Entwicklung
massenabhängig ...



10.4 Sternentwicklung - Spätphasen

Massearme Sterne ($<3 M_{\odot}$):

Zündung des He-Brennens im Kern bei “entartetem” Elektronendruck

-> Zustandsgleichung ändert sich:

Heizung führt nicht zu einer Ausdehnung des Gases im

Kern, aber erhöht Temperatur und Reaktionsraten

-> explosive Reaktion (“He-Flash” im Kern), kurzfristig $\sim 10^{11} L_{\odot}$!!

-> Leuchtkraft unsichtbar,

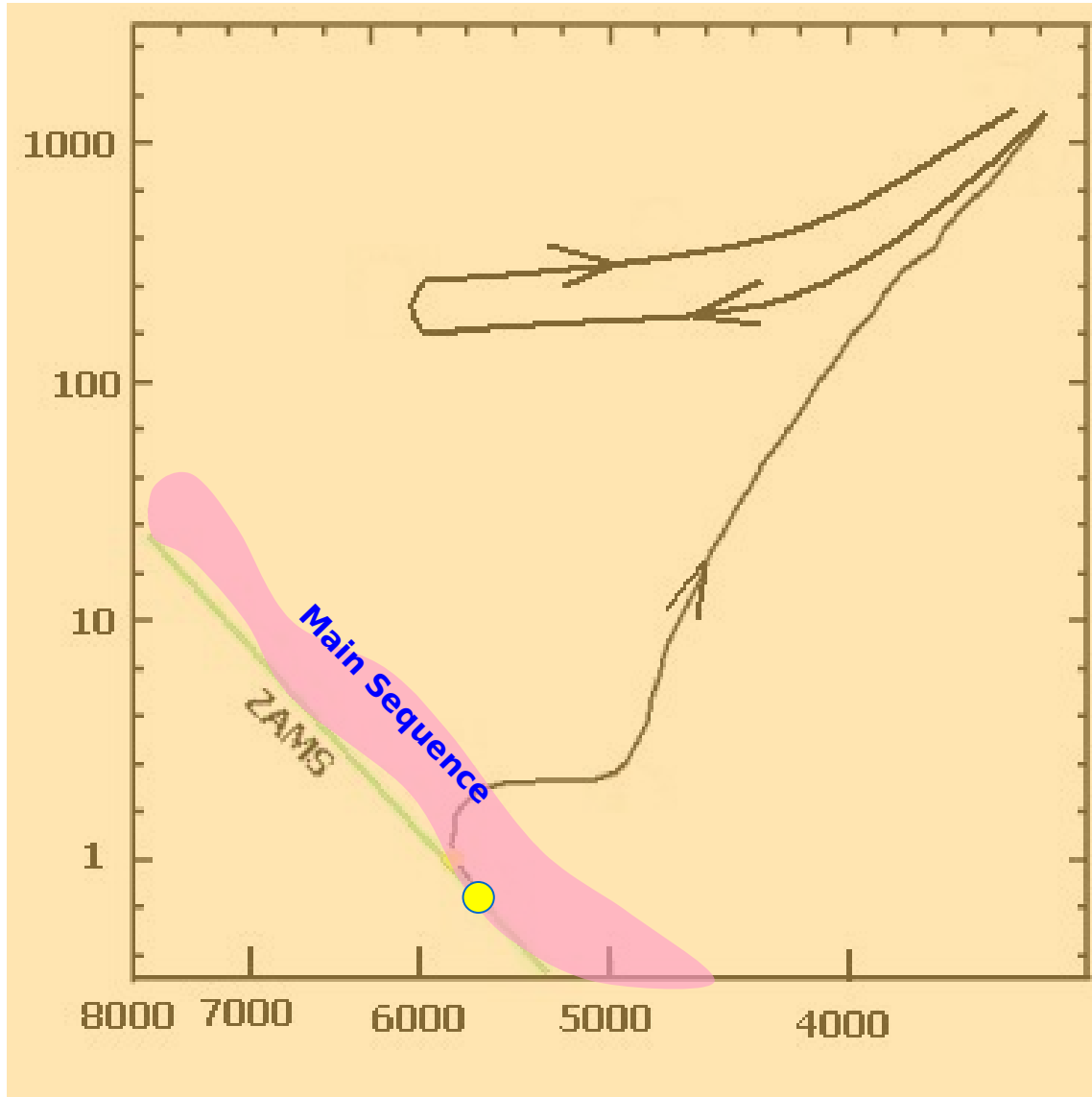
absorbiert in Expansion der Außenschichten

-> “Entartung” im Kern wird aufgehoben, danach “normales” He-Brennen

Massereiche Sterne ($>3 M_{\odot}$):

He-Brennen zündet **graduell** in einem nicht-“entarteten” Kern

10.4 Sternentwicklung - Spätphasen



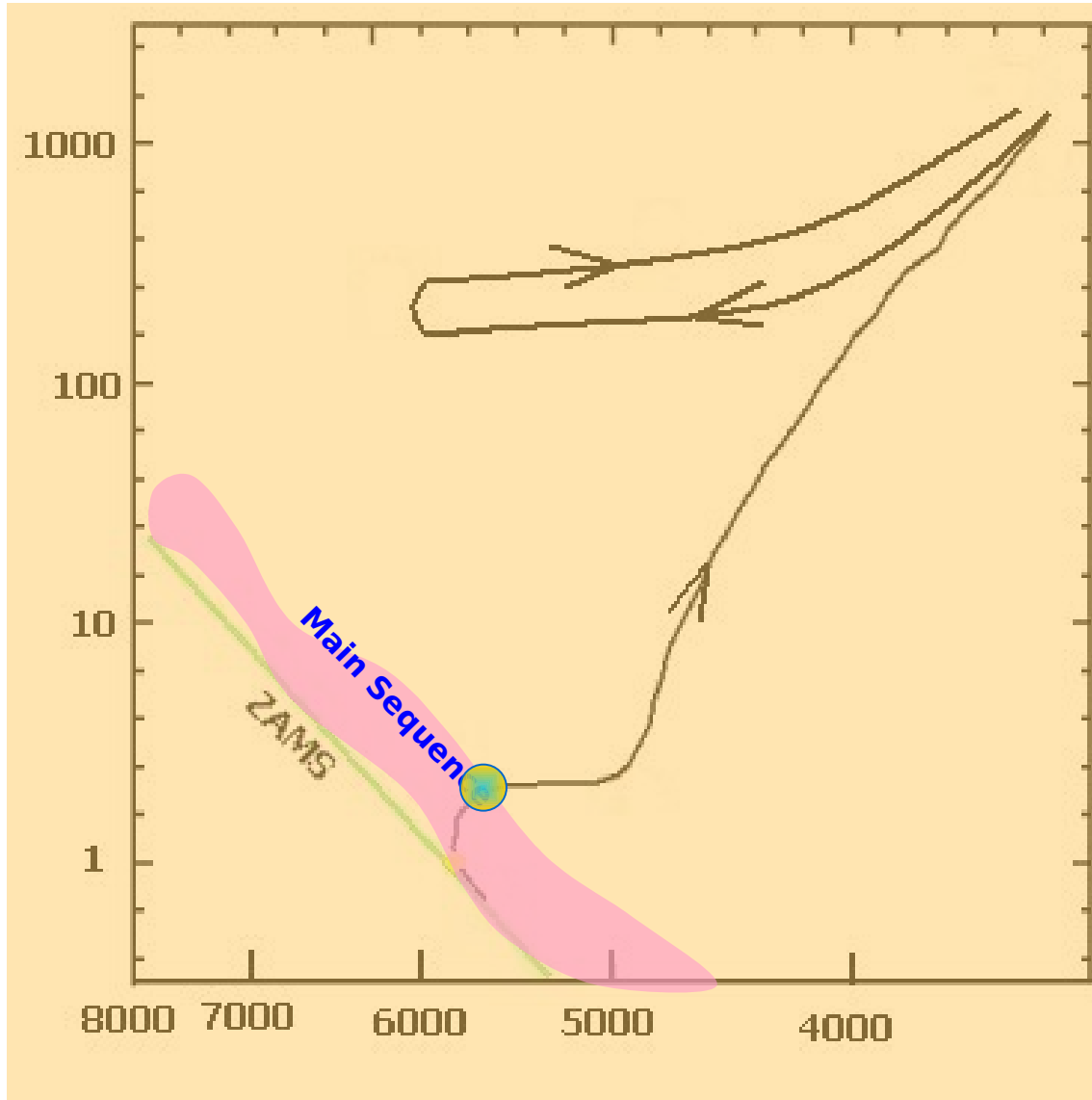
Sonne auf ZAMS

~ vor 5 Mrd
Jahren

GG-Zustand

H-Brennen

10.4 Sternentwicklung - Spätphasen

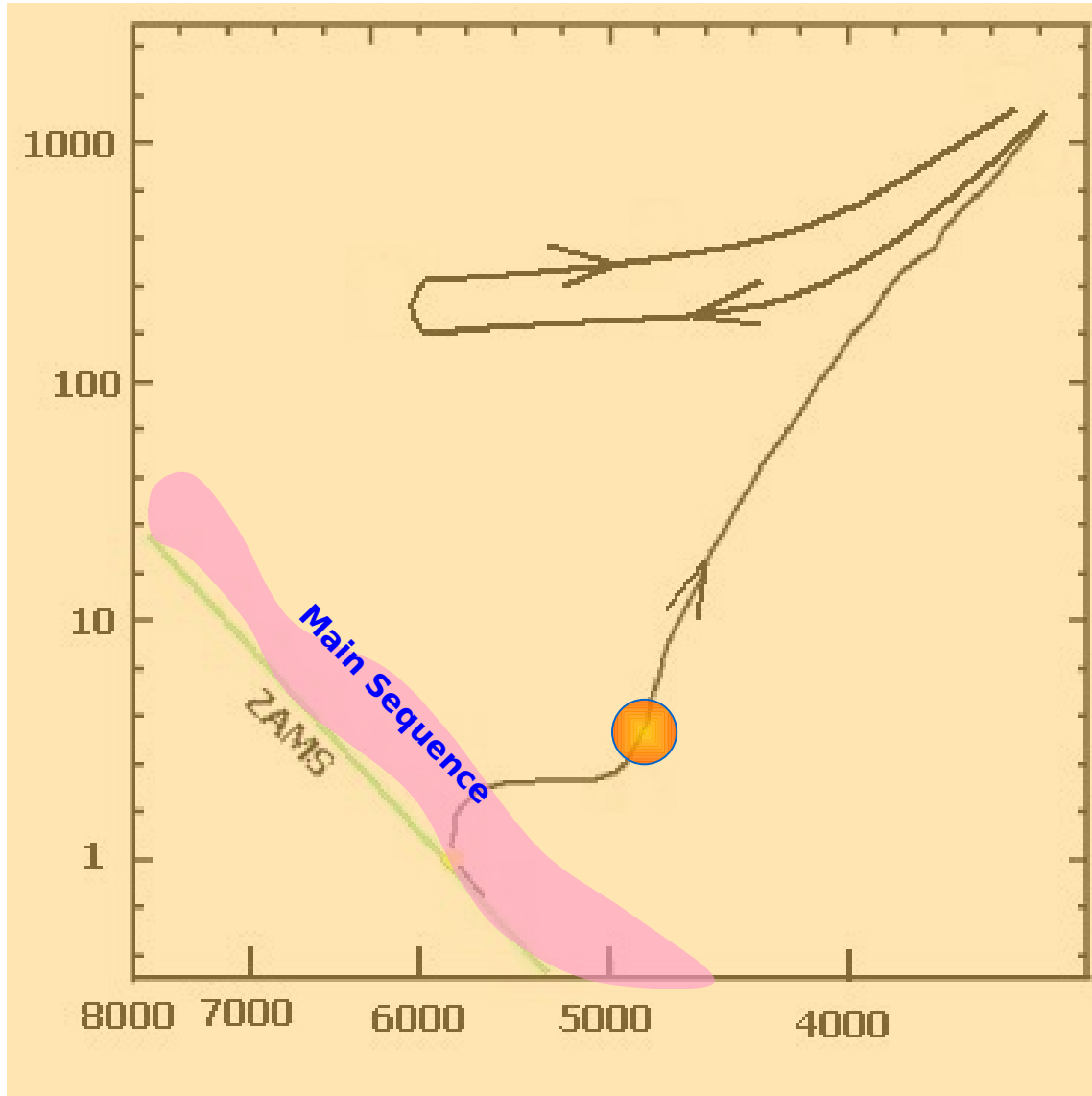


Ende des
Hauptreihenlebens
in ~ 5 Mrd Jahren

Energieproduktion
im Kern,
H-Schale

Außenschichten
fangen an zu
expandieren

10.4 Sternentwicklung - Spätphasen

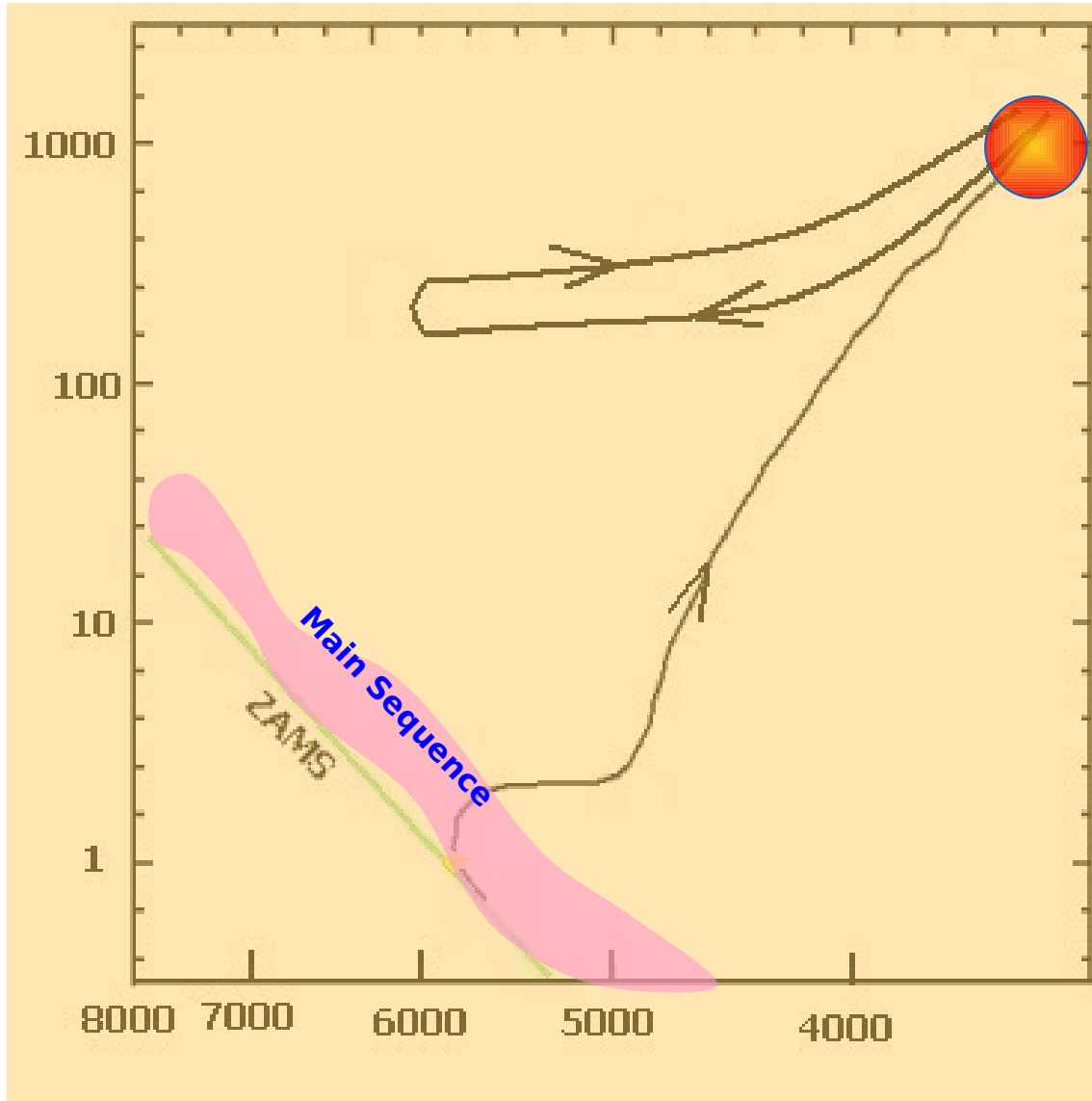


Kernbereich wird
heißer, **Entartung**

Außenschichten
expandieren

Sonne im **Roten
Riesen Stadium**

10.4 Sternentwicklung - Spätphasen

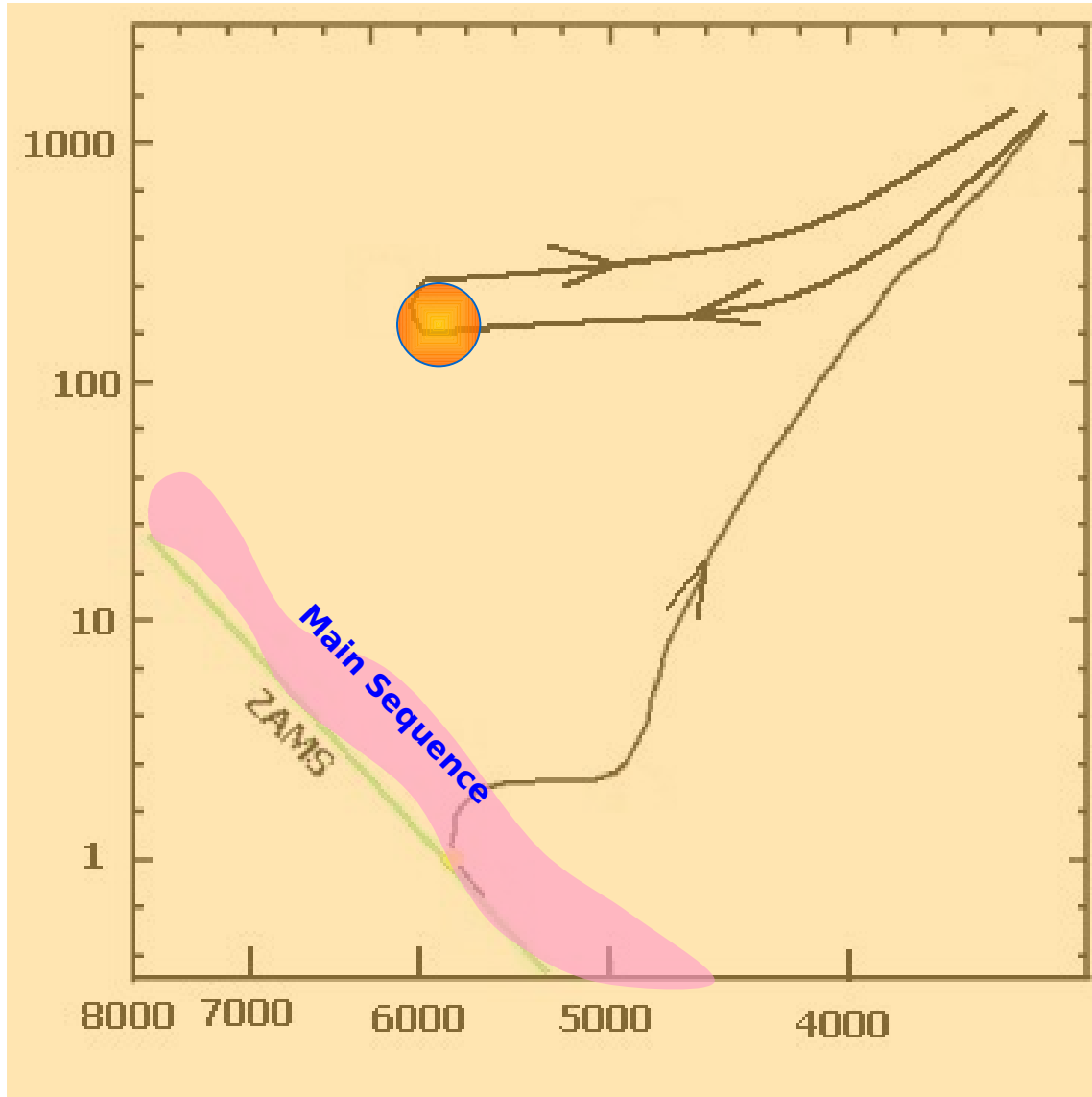


“Helium Flash”

Kern nicht länger entartet

Helium Brennen

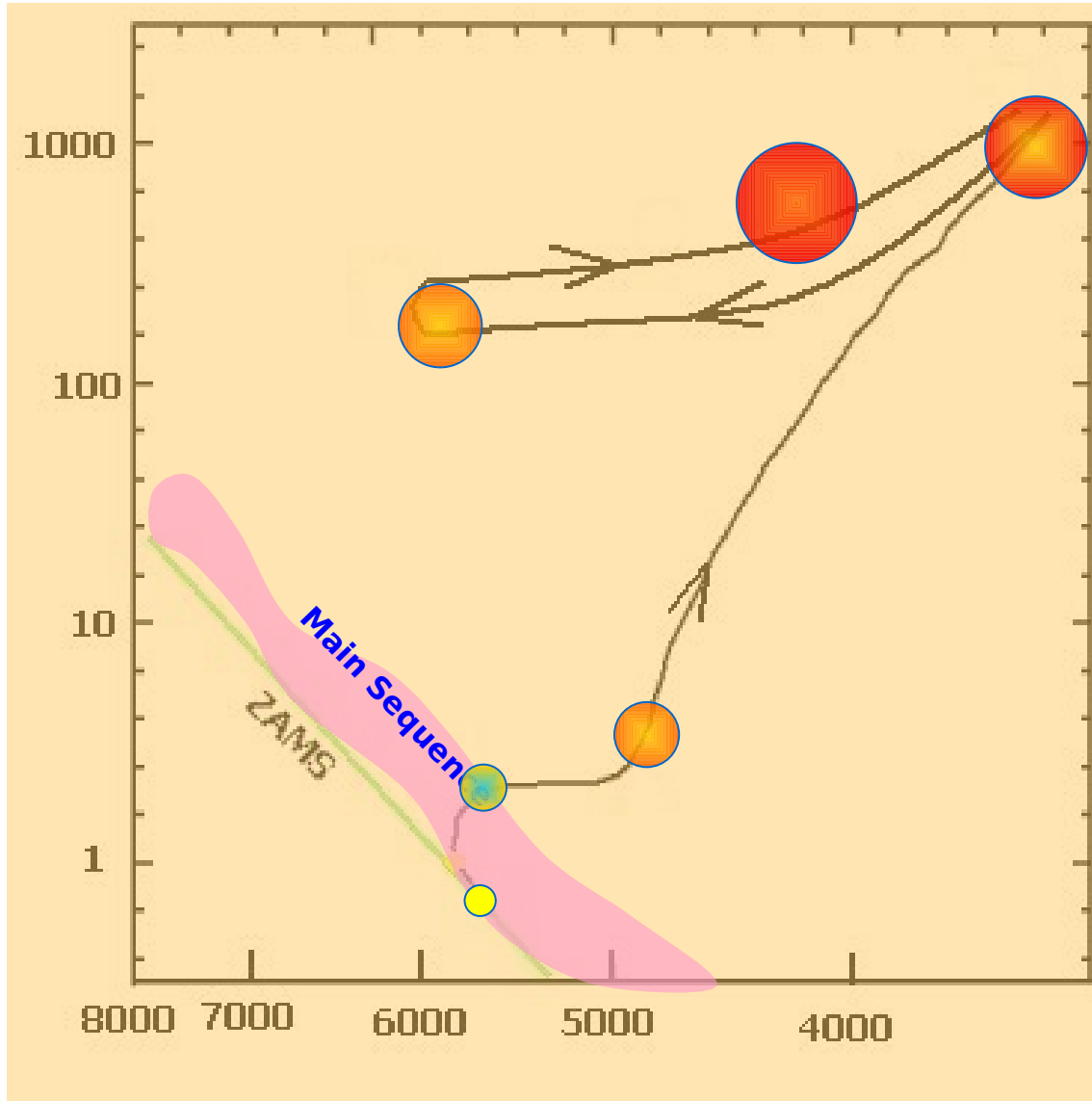
10.4 Sternentwicklung - Spätphasen



Konstantes Helium-Brennen

C, O-Kern wächst

10.4 Sternentwicklung - Spätphasen



Helium ist verbraucht

-> Kern entartet wieder

-> Weißer Zwerg

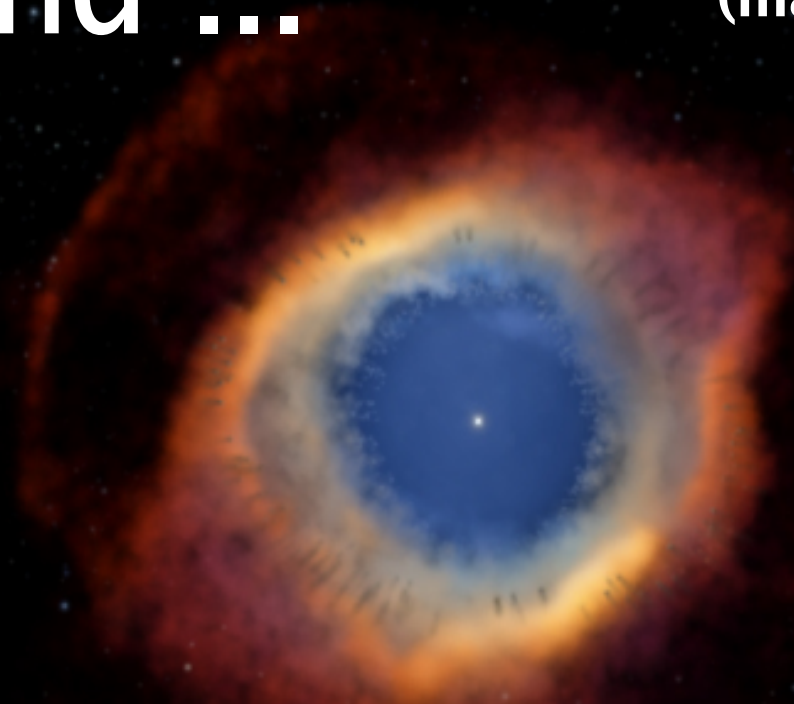
Ende der stellaren Entwicklung für massearme Sterne

(Für massereiche Sterne sind weitere Fusionsprozesse möglich)

10.4 Sternentwicklung - Spätphasen

The end ...

(massearme Sterne)



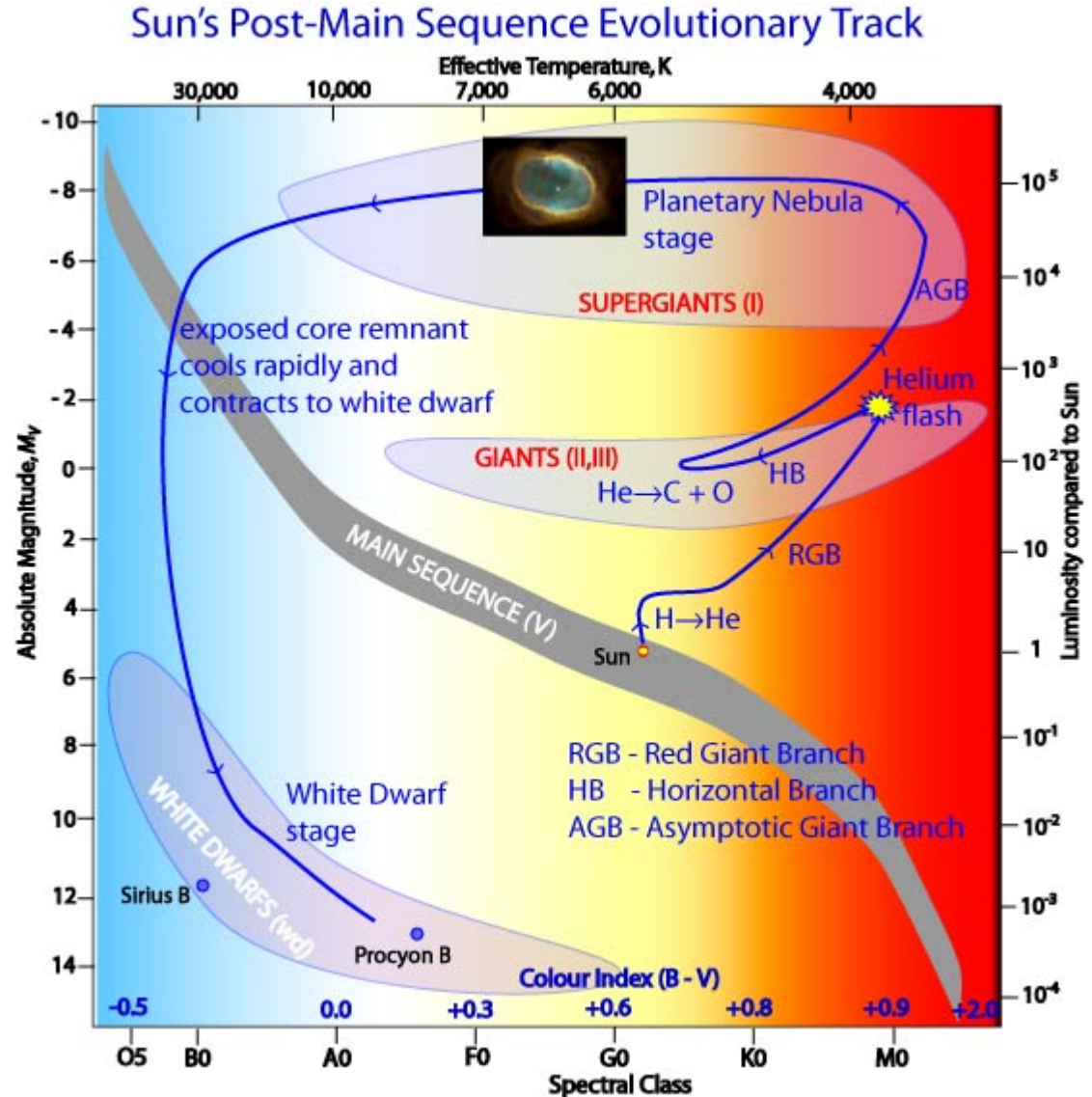
- > Sternwinde, Blitze des HeliumSchalen-Brennens und thermische Energie blasen äußere Schalen weg
- > Starke Massenverlust
- > Sternhülle wird zum **Planetarischen Nebel**
- > Heißer Kern ionisiert das Material, regt es zum Leuchten an
- > Kern entwickelt sich zum **Weißer Zwerg**

10.4 Sternentwicklung - Spätphasen

Entwicklung eines
Sterns von $1 M_{\odot}$
im HRD

Achtung:

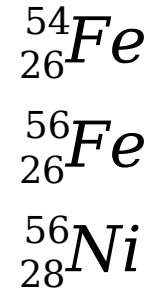
hier sind
keine Zeitskalen
zu sehen!!



10.4 Sternentwicklung - Spätphasen

Entwicklung massereicher Sterne $> 8 M_{\odot}$

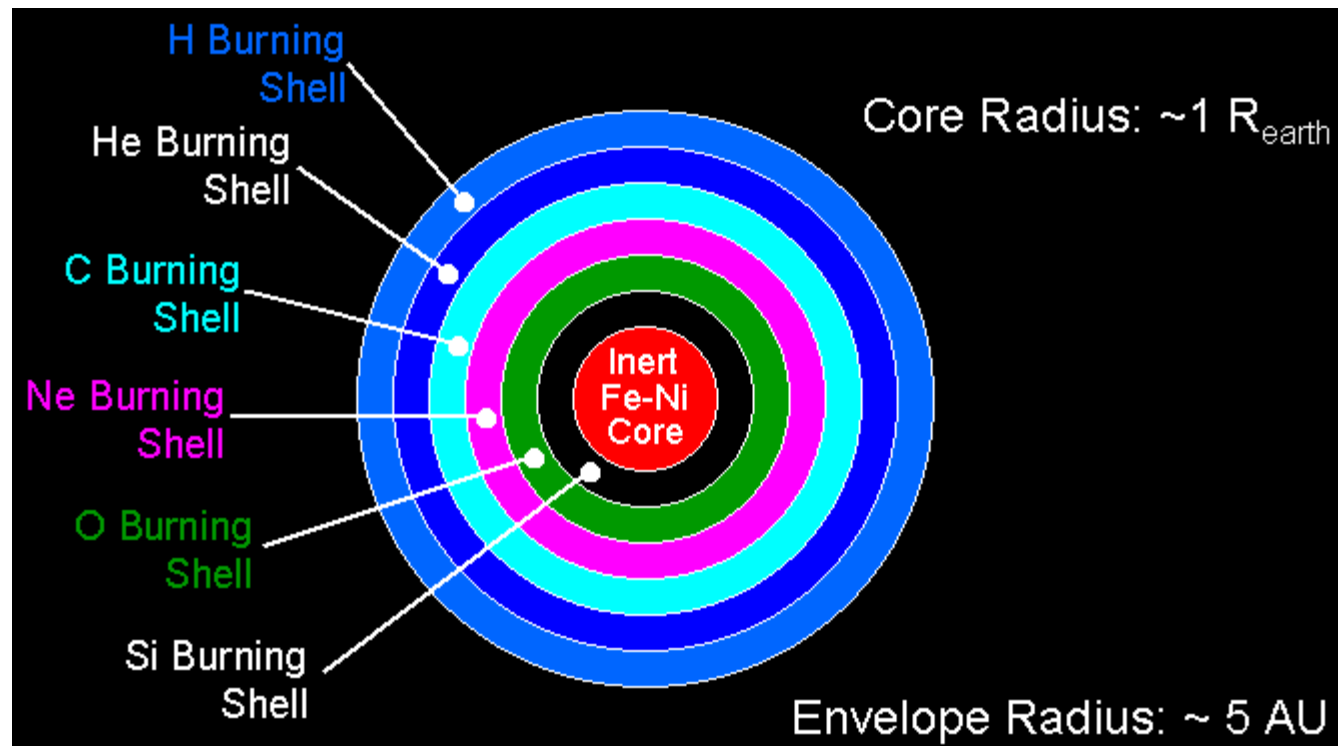
- > Zwiebelschalenstruktur bis zum Si-Brennen
- > Eisenkern von 1.3-2.5 M_{\odot}
- > Si-Brennen produziert verschiedene Elemente nahe des Eisen (Stabilitätsmaximum) ----->



Am Ende:

Kollaps des Zentralbereichs:

- > freier Fall: 0.1s
- > Supernova-Explosion, Typ II

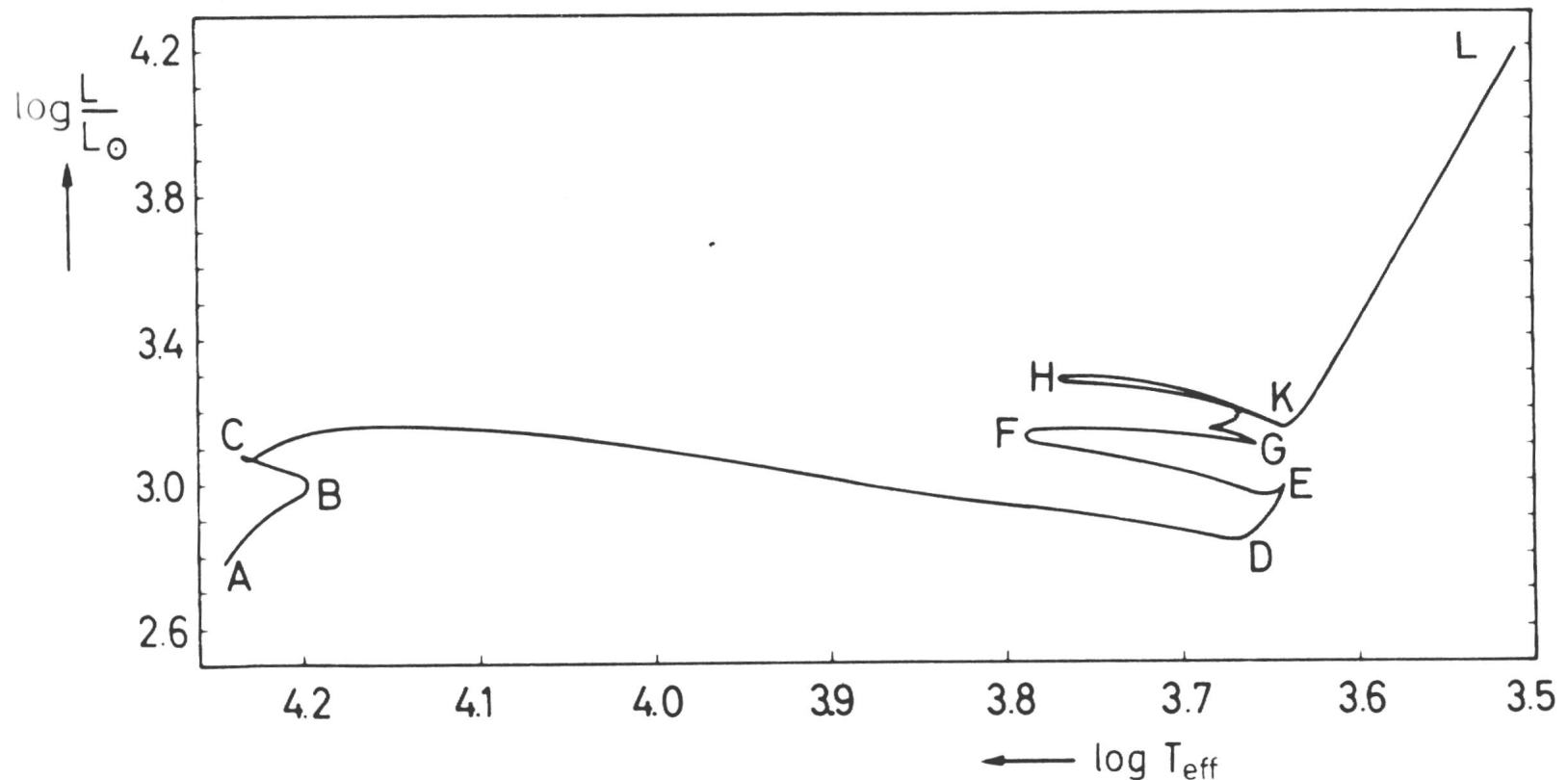


10.4 Sternentwicklung - Spätphasen

Entwicklung eines Sterns von $5 M_{\odot}$ im HRD

Phasen: A-B: Kern H-Brennen, C-D-E: Schalen H-Brennen, E: Kernbrennen He, E-H: weiterhin Schalen H-Brennen, E-G: Kernbrennen He, G-H: Schalen He-Brennen -> Bildung C-Kern

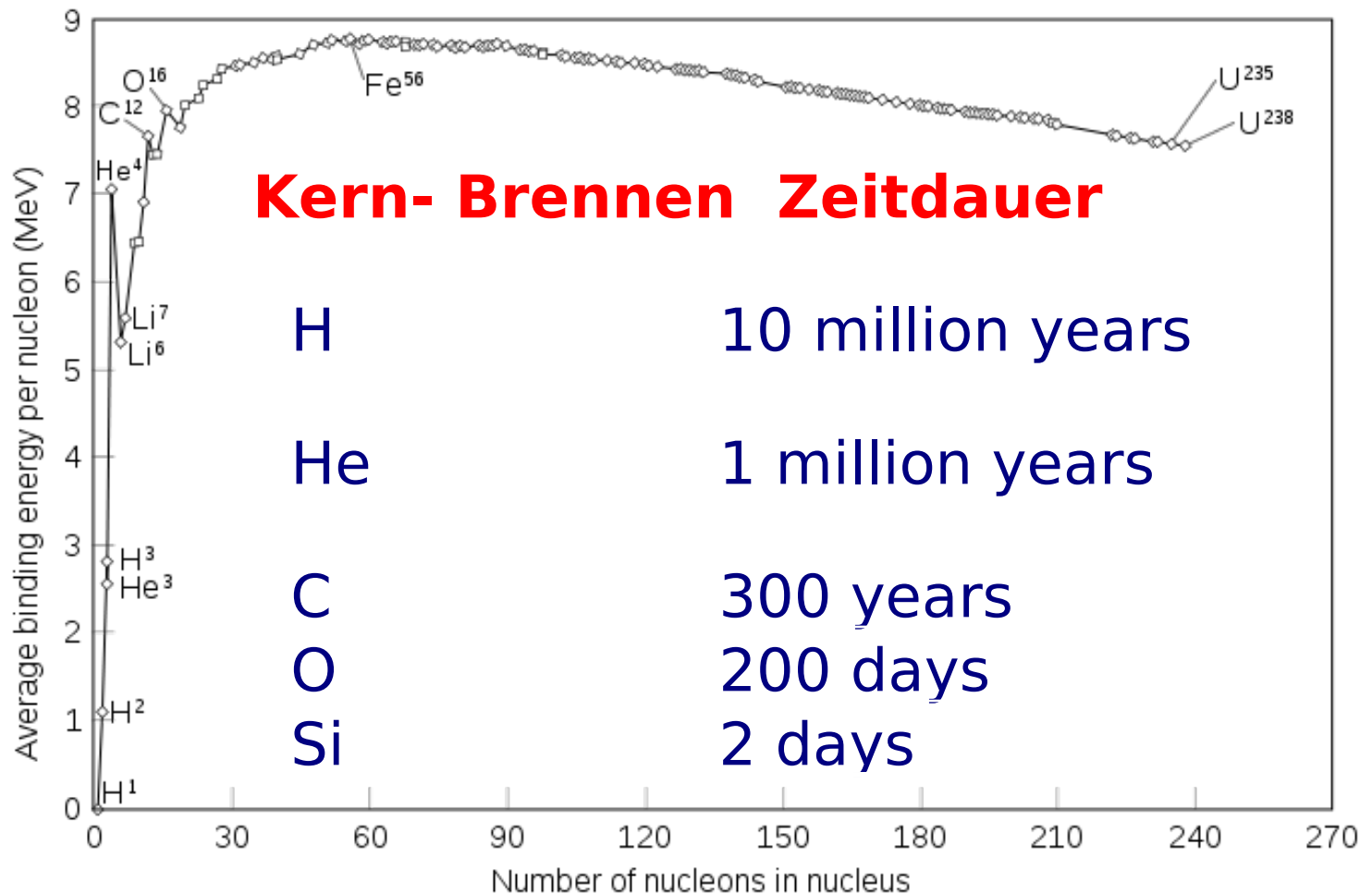
Phasen E-F-G-H überspannen den instabilen Cepheiden-Streifen



10.4 Sternentwicklung - Spätphasen

Entwicklung massereicher Sterne $> 8 M_{\odot}$

- > **Zeitskalen:** Werden Elemente näher zum Eisen hin erzeugt, so wird relativer Energiegewinn (pro Reaktionsteilnehmer) geringer
- > **Zeitskalen** für die Brennphasen werden immer kleiner.



10.4 Sternentwicklung - Spätphasen

The end ...

(massereiche Sterne)

- > Starke Massenverluste
- > Kollaps des Kerns
- > Stern wird zerissen: **Supernova-Explosion**
- > Durch Kollaps und Explosion starke Neutronenflüsse
Aufbau schwerer Kerne > Eisen: **s, r -Prozesse**
- > Je nach Masse entwickelt sich Kern zum
Neutronenstern oder Schwarzen Loch

Krebsnebel

10. Sternstruktur & Sternentwicklung - II

10.5 Kompakte Objekte

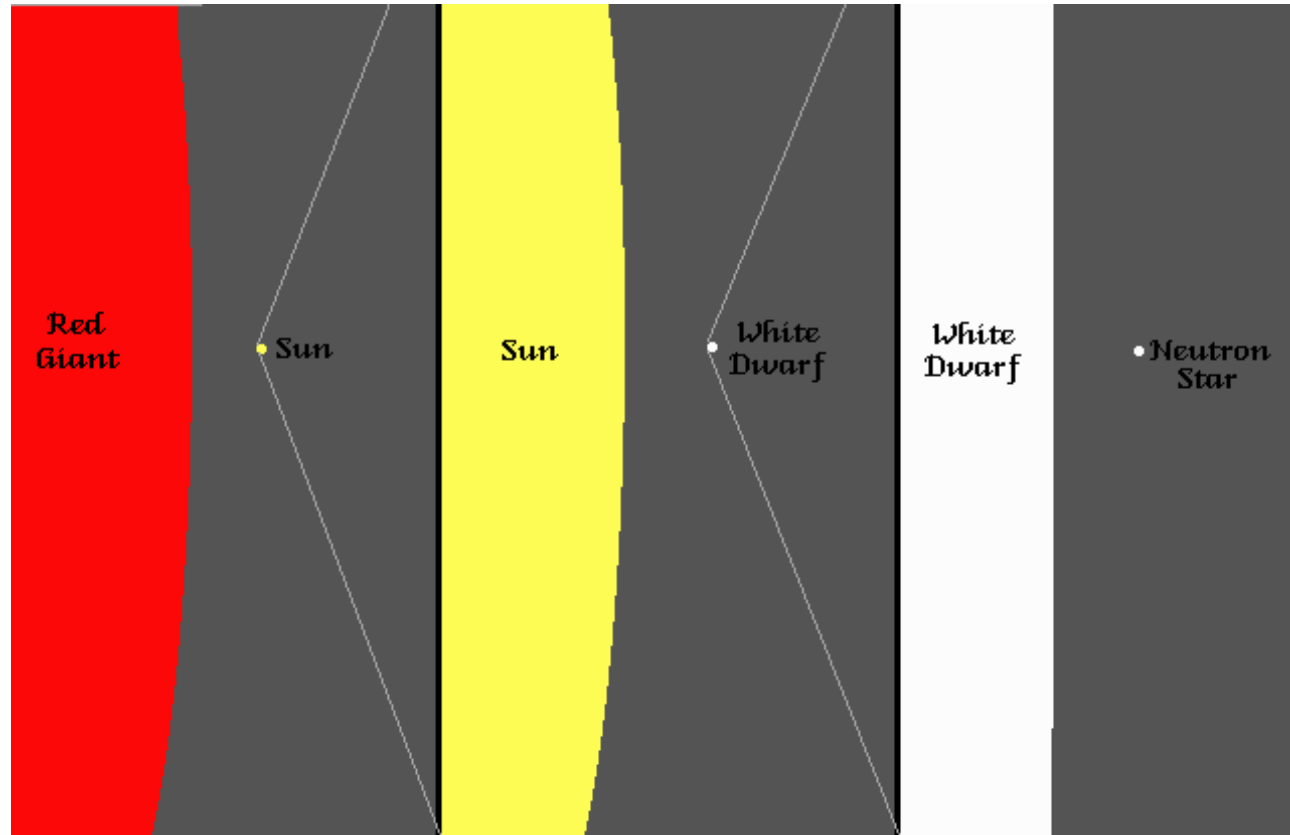
Endstadien der Sternentwicklung:

- > Weiße Zwerge
- > Neutronensterne
- > Schwarze Löcher

10.5 Kompakte Objekte

Stellare kompakte Objekte:

"kompakt" =
"klein" und "dicht"

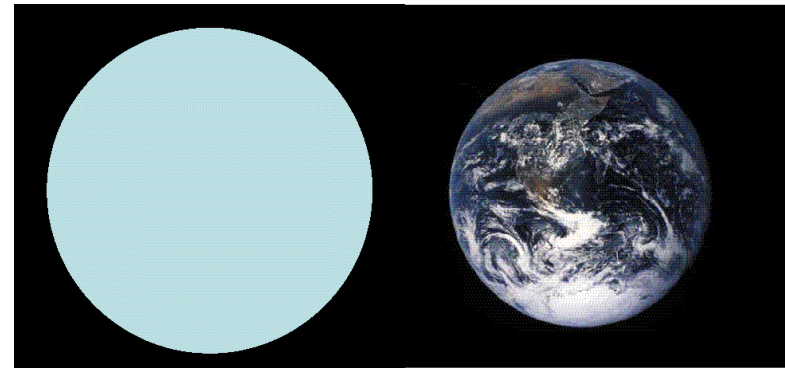


	Masse	Radius	mittl. Dichte
Sonne	1 M_{\odot}	700000 km	$\sim 1 \text{ g/cm}^3$
Sonnenkern			$\sim 150 \text{ g/cm}^3$
Weißer Zwerg	$< 1.4 M_{\odot}$	Erdradius	$\sim 10^6 \text{ g/cm}^3$
Neutronenstern	$\sim 1-3 M_{\odot}$	10 km	$< 10^{15} \text{ g/cm}^3$
Schwarzes Loch	$> 3 M_{\odot}$	$3 (M/M_{\odot}) \text{ km}$	$\sim M/R^3$

10.5 Kompakte Objekte

Weißer Zwerge: 14300 bekannt

Eigenschaften:



-> Erdgröße, $M < 1.44 M_{\odot}$ (Chandrasekhar-Grenzmasse)

-> **Dichte:** $1.5 \times 10^6 \text{ g/cm}^3$ (= 100000 x Gold; Blei: 11 g/cm^3)

-> Oberflächenbeschleunigung: $g = GM/R^2 = 3 \times 10^6 \text{ m/s}^2$ ($\sim 300000g_E$)

-> Entweichgeschwindigkeit: $v_e = (2GM/R)^{1/2} = 0.02 c$

-> **innerer Aufbau, Natur der Sternmaterie ??**

-> zur Zeit der Entdeckung völlig unverstanden ...

-> bestimmt durch Zustandsgleichung für "entartetes"
(degenerate) Elektronengas

Einschub: Entartung:

Materie in extremem Zustand (z.B. extreme Dichte)

-> **QM Effekte wichtig: Pauli-Prinzip**

-> Verhalten anders als für “normales” ideales Gas

Fermionen:

-> Teilchen mit **halbzahligem Spin** ($\frac{1}{2} h/2\pi$, $\frac{3}{2} h/2\pi$, ...):

Leptonen (z.B. Elektron), Baryonen (Protonen, Neutronen)

-> **Pauli-Prinzip:** Zwei Fermionen können nicht gleichzeitig am gleichen Ort einen identischen Quantenzustand annehmen

-> Besetzungs-Statistik der Energiezustände folgt **Fermi-Dirac-Statistik**

-> wenn **Zustände besetzt** sind, “wehren” sich die Teilchen, diese einzugehen -> **Druck**

Elektronengas -> Stellare Kerne, Weiße Zwerge, Kerne von Gasplaneten

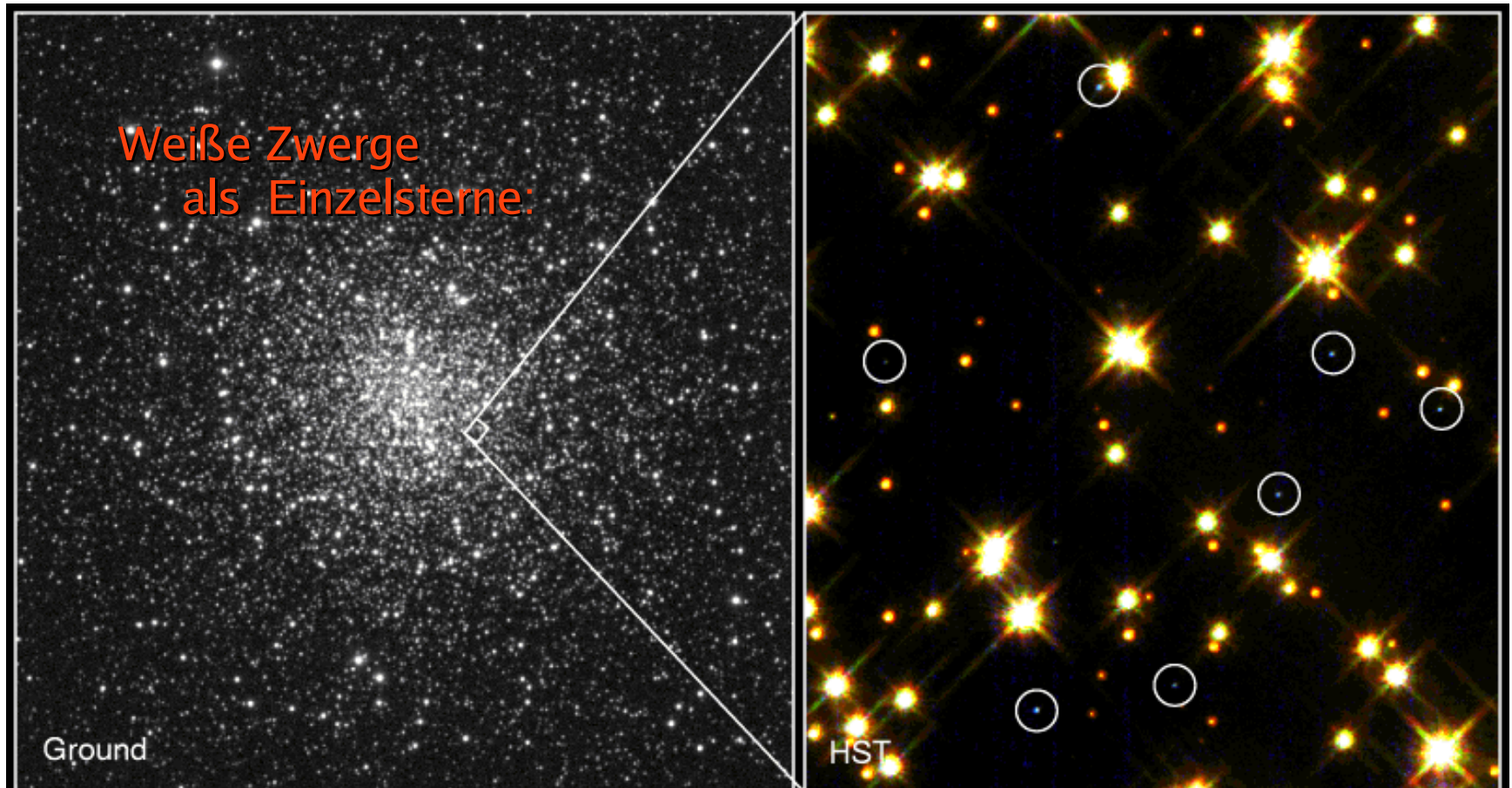
Nukleonengas -> Neutronensterne

10.5 Kompakte Objekte

Weißer Zwerge:

Einzelsterne

Binärsterne: Kataklysmische Systeme / Novae



White Dwarf Stars in M4

PRC95-32 · ST ScI OPO · August 28, 1995 · H. Bond (ST ScI), NASA

HST · WFPC2

10.5 Kompakte Objekte

Weißer Zwerge:

1) Einzelsterne:

- > 6% aller Sterne in Sonnennachbarschaft sind WZ (130 innerhalb 20pc)
- > **Spektrum:** heiße (junge?) / kühle (alte?) WZ

Spektraltypen: DA, DC, ...

DA: 75%, 5600K - 8000K nur Balmerlinien, kein HeI, keine Metalle

DC: 16%, < 12000K, nur Kontinuum, keine Linien

DB: <25000K, HeI Linien, kein H, keine Metalle

(DB-Lücke: keine He-reiche WZ mit $25000 < T < 45000$; Grund unklar)

DO: 45000 - 100000K, HeII Linien

DZ: nur Metalllinien (CaII, Fe, O), kein H, kein He

DQ: Kohlenstoff-Linien

auch Untertypen, **gemischte Typen** (DAB, DBAZ)

- > Kern-Temperatur: 5 - 20 Mio K (für 8,000 - 16,000 K OberflächenTemp.)
- > zT. sehr **starke Magnetfelder**, ~100 MG

2) Binärsysteme: z.B. **kataklysmische Variable** (siehe 9.1.2014)

10.5 Kompakte Objekte

Weißer Zwerge: Kühlung -> Strahlung

Aufbau weißer Zwerge:

1. Sterninneres: Fermi-Gas aus Elektronen:
hohe Leitfähigkeit: gleichförmige Temperatur

2. Dünne Atmosphäre:

nicht-entartet, ideales Gas:

-> im (lokalen) thermisches GG

-> diffusiver Strahlungstransport $L(r)$

-> Grenze zum entarteten Sterninneren: T_{deg}, ρ_{deg}

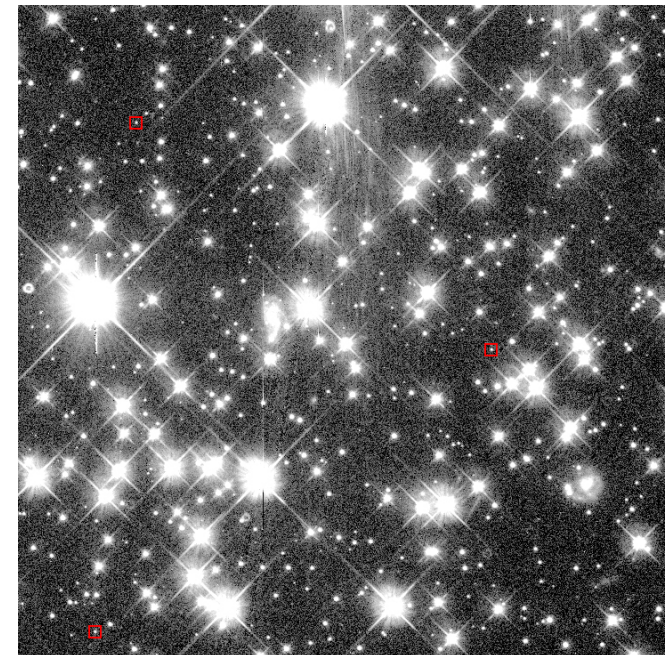
idealer Gasdruck = Entartungsdruck -> $\rho_{deg} = 2.4 \times 10^{-8} \mu_e T_{deg}^{3/2} \text{ g cm}^{-3}$

-> Innentemperatur T_{deg} des weißen Zwergs aus L, M, Z, X bestimmbar:

Aus hydrostatischem GG folgt:

$$L \simeq 10^{-2} - 10^{-3} L_o \rightarrow T_{deg} \simeq 10^6 - 10^7 \text{ K}, \rho_{deg} \leq 10^3 \text{ g cm}^{-3} \ll \rho_c$$

-> Höhe H der Atmosphäre: $H \equiv R - r_{deg} \simeq 50 \text{ km} \simeq 0.01 R$



White Dwarf Stars in Globular Cluster NGC 6397
ESO PR Photo 45a/99 (14 December 1999) (HST + WFPC2) European Southern Observatory



10.5 Kompakte Objekte

Neutronensterne:

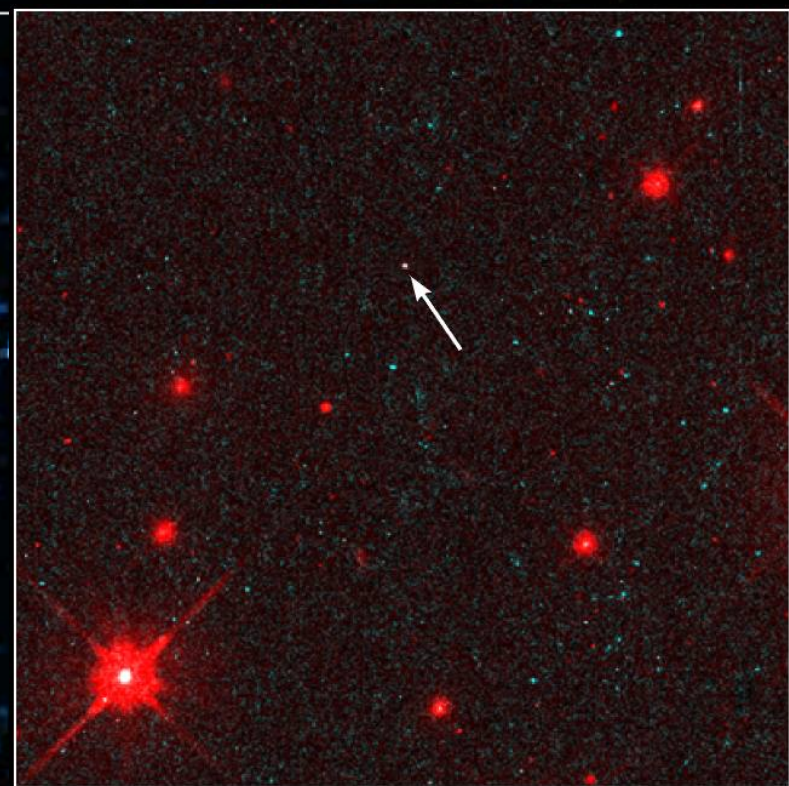
- durch Kollaps von Kernen massereicher Sterne, $M > 1.44 M_{\odot}$
- obere Grenzmasse: $M < 3.6 M_{\odot}$ (??), Zustandsgleichung ??
 - > Radius ~ 10 km, max. Dichten $\rho_c = 5 \times 10^{15}$ g/cm³ (?)
 - > Oberflächengravitation $\sim 10^{11}g$
 - > Entweichgeschwindigkeit $\sim 0.5 c$
 - > Temperatur $\sim 10^6$ K
 - > Magnetfeld $< 10^{12}$ G
 - > Rotation: Periode bis > 1 ms

Aktivität:

- > Einzelsterne:
 - nicht aktiv
 - Radio- / optische Pulse -> "Pulsare"
 - magnetische Dipolstrahlung, **Abbremsung**: $\frac{dP}{dt} \sim 10^{-15} \frac{S}{s}$
- > Binärsysteme:
 - Akkretion(Scheibe), **Röntgenpulse**, LMXBs, HMXBs
 - **Gravitationswellen** (enge Systeme)

10.5 Kompakte Objekte

September 16, 1999
March 30, 1999
October 6, 1996



Isolated Neutron Star RX J185635-3754 HST • WFPC2

PRC97-32 • ST ScI OPO • September 25, 1997
F. Walter (State University of New York at Stony Brook) and NASA

Isolierter Neutronenstern:

- nicht aktiv
- 10 km Radius
- 700000 K Temperatur
- 25.6 mag Helligkeit
- 390000 km/h Geschw.

Neutron Star RX J185635-3754

HST • WFPC2

NASA and F. Walter (State University of New York at Stony Brook) • STScI-PRC00-35

10.5 Kompakte Objekte

Neutronensterne:

Entdeckung der Pulsare:

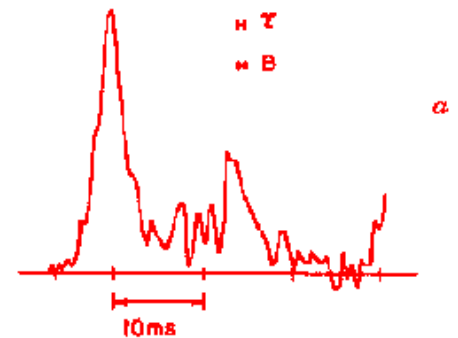
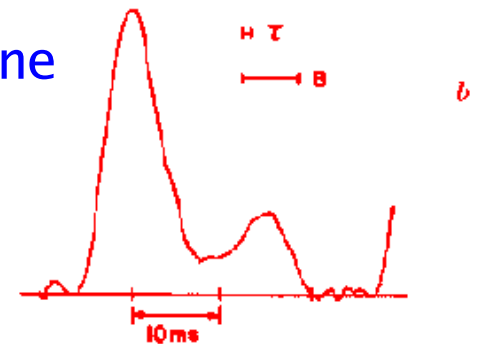
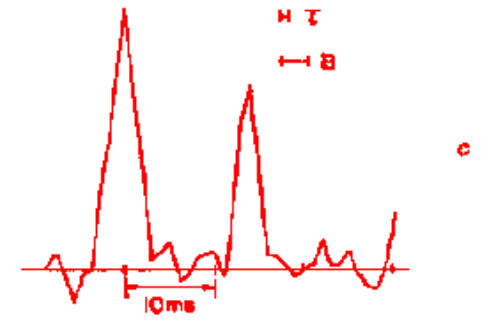
-> Comella et al 1969: Crab-Radiopulse: 33 ms

-> Cocke et al 1969: optische Pulse von Crab

-> T. Gold (1969): Pulsare = rotierende Neutronensterne



Crab-Nebel beobachtet mit dem VLT



Crab-Radiopulse (Arecibo),
Comella et al.: Mittlere Pulsform:
von 18000, 21000, 53000 Pulsen

10.5 Kompakte Objekte

Emissionsmechanismus der Pulsare:

hochenergetische Teilchen, in starkem

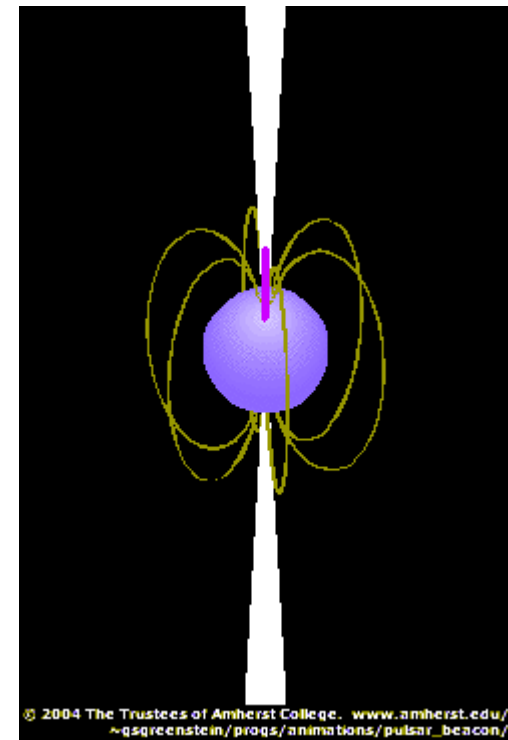
Magnetfeld beschleunigt: Details noch unverstanden

Emissionsmodell:

Emission in gebündeltem Strahl fester Orientierung

zum Neutronenstern Strahlöffnung $< 10^\circ$,

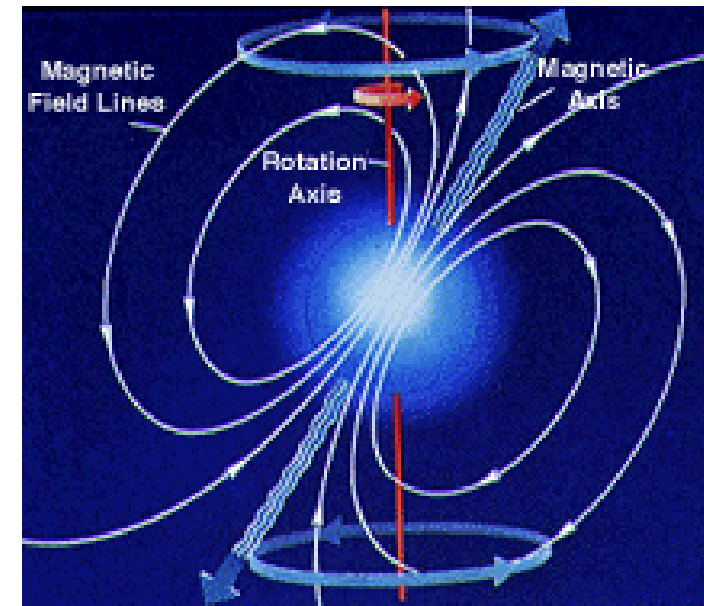
konstant über viele Frequenzen & Perioden



Zwei konkurrierende Hauptmodelle:

a) "polar cap"-Modell: Strahlungskegel entlang dipolarer Magnetosphäre

b) "light cylinder"-Modell: Strahlungskegel tangential zum Licht-Zylinder $R_L \equiv c/\Omega$ und senkrecht zur Rotationsachse



10.5 Kompakte Objekte

siehe Anhang

Aufbau der Neutronensterne:

Für Massen $>$ Chandrasekhar-Grenzmasse:

- > Kollaps zum Neutronenstern -> nukleare Reaktion: $p + e^- \rightarrow n + \nu$
- > Neutronen sind Fermionen -> **Entartungsdruck ...**

-> **Hydrostatische Gleichungen mit ART:**

TOV-(Tolman, Oppenheimer, Volkoff)- Gleichungen
+ Zustandsgleichung:

- > **Maximalmassen der Neutronensterne** für verschiedene Zustands-Gleichungen, Beispiele:

Materiezustand im Zentrum des Neutronenstern sehr unsicher!

-> "Quark-Sterne" (s quark)?

-> supra-leitend !!

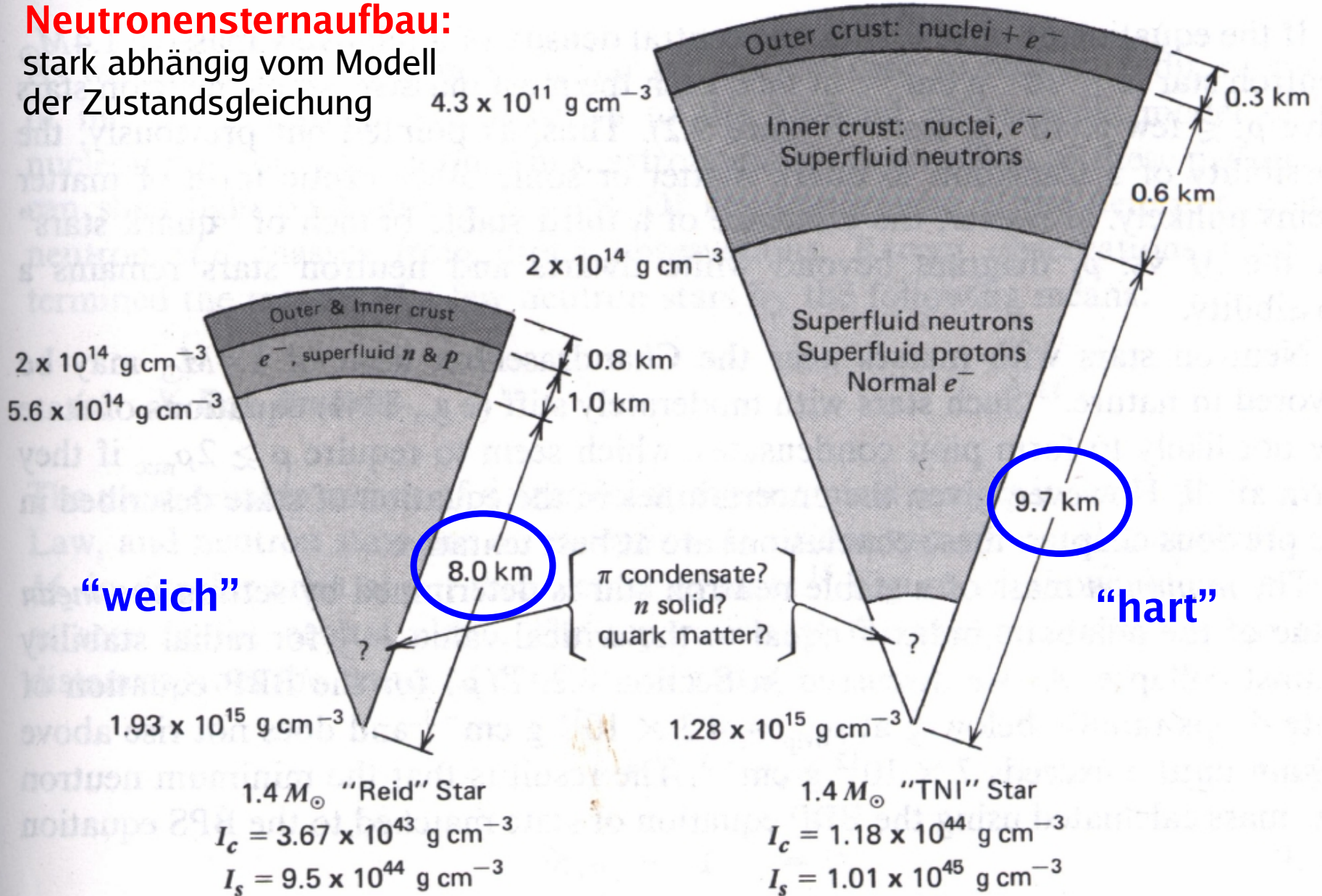
-> super-fluid !!

Zustands-Gl.	M_{\max} / M_{\odot}
Reid + Pion	1.5
Reid	1.6
Bethe-Johns	1.9
Tensor-WW	2
rel. mean field	2.7

10.5 Kompakte Objekte

Neutronensternaufbau:

stark abhängig vom Modell
der Zustandsgleichung



10.5 Kompakte Objekte

Schwarze Löcher

Wenn **Grenzmasse** des Neutronensterns überschritten wird:

-> **fortwährender Kollaps:**

-> starke Gravitation verhindert Lichtemission: **Horizont**

Schwarzes Loch = *“Region der Raumzeit, die nicht mit dem umgebenden Universum kommunizieren kann”*

-> "Grenze" des SL: "Oberfläche", **Ereignishorizont** (event horizon)

Ohne Rotation: Horizont = **Schwarzschildradius**

$$R_s = \frac{2GM}{c^2} = 3 \text{ km} \left(\frac{M}{M_o} \right)$$

-> Was passiert mit Masse im SL? -> unbekannt!

-> **Kollaps** kann nicht aufgehalten werden

-> **Massedichten** $> 10^{17} \text{ g/cm}^3$ für Sonnenmasse

-> zentrale **Singularität**, **kausal** vom Außenraum **entkoppelt** (??)

-> **Quantengravitation?** Verhindert sie Singularität ??

10.5 Kompakte Objekte

Schwarze Löcher

Beschreibung Schwarzer Löcher:

-> **Einsteingleichungen:**

allgemeinste Lösungen analytisch bekannt, "einfach":

-> **Schwarzschildmetrik** (ohne Rotation), **Kerr-Metrik** (mit Rotation)

-> SL hat nur **3 Parameter = "no hair"-Theorem:**

Masse M, Drehimpuls J, Ladung Q,

andere Informationen/Anfangszustand werden bei Entstehung abgestrahlt (EM-Wellen, Gravitationswellen)

-> statischer Beobachter (an festem Ort) definiert **Eigenzeit:**

$$d\tau^2 = -ds^2 = \left(1 - \frac{2M}{r}\right) dt^2$$

-> nur möglich außerhalb des Horizonts

-> **Zeitdilatation** $t \rightarrow \tau$, Rotverschiebung im Gravitationsfeld

Einführung in die Astronomie und Astrophysik I

- 17.10. Einführung: Überblick & Geschichte (H.B.)
- 24.10. Sternpositionen, Koordinaten, Zeitmessung (C.F.)
- 31.10. Teleskope und Instrumentierung (H.B.)
- 07.11. Strahlung, Strahlungstransport (C.F.)
- 14.11. Planetensystem(e) & Keplergesetze (H.B.)
- 21.11. Sterne, Typen / Klassifikation, HR-Diagramm (C.F.)
- 28.11. Interstellare Materie: Chemie & Matriekreislauf (H.B.)
- 05.12. Sternentstehung, Akkretionsscheiben & Jets (H.B.)
- 12.12. Sternaufbau & -entwicklung: Sternparameter, Hauptreihe (C.F.)
- 19.12. Sternentwicklung: Energieerzeugung, Endstadien (C.F.)
- - - Weihnachtspause
- 09.01. Mehrfachsysteme, Sternhaufen (C.F.)**
- 16.01. Exoplaneten & Astrobiologie (H.B.)
- 23.01. Die Milchstraße (H.B.)
- 30.01. Zusammenfassung (C.F. & H.B.)
- 08.02. (Samstag) Prüfung: 15:00 - 17:00, INF 227**

10. Sternstruktur & Sternentwicklung - II

Appendix

10.5 Kompakte Objekte

Weißer Zwerg: Restkern des Sterns ($M < 1.44 M_{\odot}$); Erdgröße; C-O dominiert; gestützt durch Elektronen-Entartungsdruck; dichte, nicht entartete Atmosphäre; heiß; geringe Leuchtkraft; strahlt durch Auskühlung; keine weiteren Kernreaktionen

Neutronenstern: Masse über Chandrasekhar-Grenzmasse ($M > 1.44 M_{\odot}$); Radius 10-15 km; besteht aus $\sim 10^{57}$ Neutronen \sim riesiger Atomkern (3x dichter); wenige Protonen vorhanden; starke Magnetfelder (Pulsare)

Schwarzes Loch: wenn Masse innerhalb des Schwarzschild-Radius $R_S = 2GM/c^2$ komprimiert ist, Fluchtgeschwindigkeit $> c$; keine Kommunikation Innen-/Außenbereich; "no-hair"-Theorem

10.5 Kompakte Objekte

Einschub: **Entartung:**

Ideale Zustandsgleichung entarteter Elektronen:

Grenzfälle: $x \gg 1$, $x \ll 1$, $x = \frac{P_F}{m_e c}$

-> Entwicklung von $\Phi(x)$

-> Darstellung von $P(\rho)$ als Polytrope $P = K \rho_0^\Gamma$

(1) **Nichtrelativistische** Elektronen:

$$\rho_0 \ll 10^6 \text{ g/cm}^3, \quad x \ll 1, \quad \Phi(x) = x^5/15\pi^2$$

$$\rightarrow \Gamma = 5/3, \quad K = 1.0036 \times 10^{13} \mu_e^{-5/3} \text{ cgs}$$

(2) **Extrem relativistische** Elektronen:

$$\rho_0 \gg 10^6 \text{ g/cm}^3, \quad x \gg 1, \quad \Phi(x) = x^4/12\pi^2$$

$$\rightarrow \Gamma = 4/3, \quad K = 1.2435 \times 10^{15} \mu_e^{-4/3} \text{ cgs}$$

Einschub: **Entartung:**

Ideale Zustandsgleichung entarteter Neutronen:

-> Skalierung mit Masse m_i

-> statistisches Gewicht g_i

z.B. für **Neutronen** (Neutronenstern...) -> Grenzfälle: $x \gg 1$, $x \ll 1$

(1) Nichtrelativistische **Neutronen:**

$$\rho_0 \ll 6 \times 10^{15} \text{ g/cm}^3, \quad x \ll 1$$

$$\rightarrow \Gamma = 5/3, \quad K = 5.3802 \times 10^9 \text{ cgs}$$

(2) Extrem relativistische **Neutronen:**

$$\rho_0 \gg 6 \times 10^{15} \text{ g/cm}^3, \quad x \gg 1$$

$$\rightarrow \Gamma = 4/3, \quad K = 1.2293 \times 10^{15} \text{ cgs}$$

10.5 Kompakte Objekte

Weißer Zwerge:

Sirius:

1838: F.W. Bessel findet Sirius-Begleiter

1862: A. Clark (Linsenhersteller) bestimmt Sirius B – Leuchtkraft:

-> 10000 x schwächer als Sirius A:

-> Sirius A, Sp A1V: $T \sim 9910 \text{ K}$,
 $M = 2.3 M_{\odot}$, $L = 23.5 L_{\odot}$

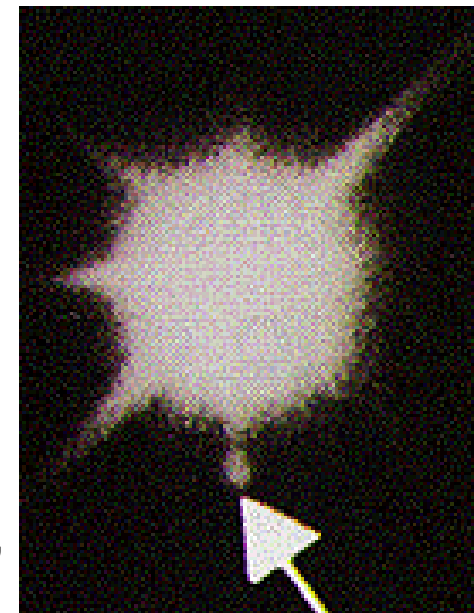
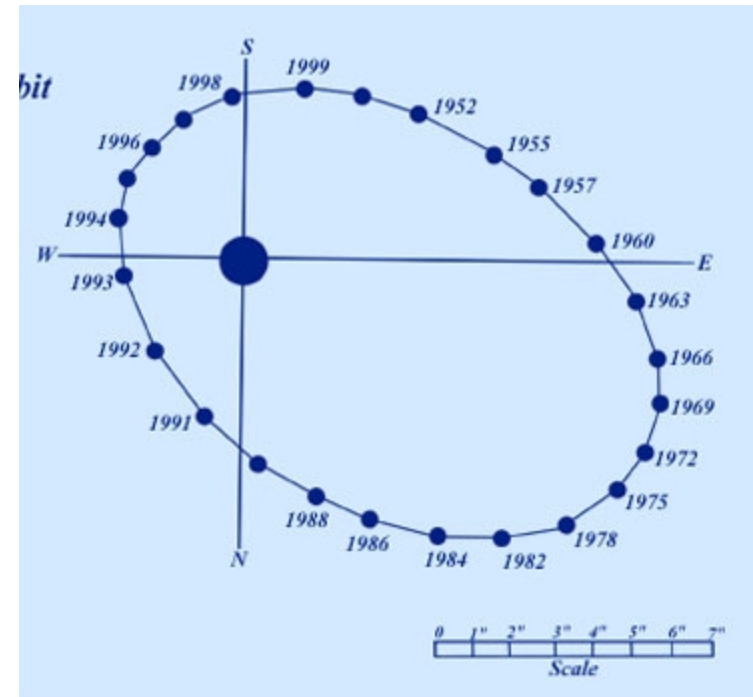
-> Sirius B, Sp DA2: $T \sim 27000 \text{ K}$,
 $M = 1.0 M_{\odot}$, $L = 0.03 L_{\odot}$

=> mit $L = 4 \pi R^2 \sigma_{\text{SB}} T^4$

Radius von Sirius B: $R = 0.008 R_{\odot}$

-> Erdgröße, Periode 50 a

Sirius A & B, A. Clark (Lick Observatory),
Separation 11", 8-te Magnitude



10.5 Kompakte Objekte

Neutronensternaufbau: stark abhängig vom Modell der Zustandsgleichung:

-> Innere Schichtung:

- 1) **Oberflächenschicht**, Zustandsgleichung durch Temperatur und **Magnetfelder** beeinflusst $\rho < 10^6 \frac{g}{cm^3}$
- 2) **Äußere Kruste**, feste Schicht, **Coulomb-Gitter** schwerer Kerne, rel. Elektronengas $10^6 \frac{g}{cm^3} < \rho < 4.3 \times 10^{11} \frac{g}{cm^3}$
- 3) **Innere Kruste**, Gitter **neutronenreicher Kerne**, superfluides **Neutronengas**, Elektronengas $4.3 \times 10^{11} \frac{g}{cm^3} < \rho < 2 \times 10^{14} \frac{g}{cm^3}$
- 4) **Neutronenflüssigkeit**, **superfluide Neutronen**, z.T. superfluide Protonen, Elektronen $2 \times 10^{14} \frac{g}{cm^3} < \rho < \rho_{kern}$
- 5) **Kernregion**, noch unverstanden, **vielleicht nicht existent** in manchen Sternen, vielleicht Pionen-Kondensationen, vielleicht festes Neutronengitter, vielleicht **Quarkmaterie** $\rho > \rho_{kern}$

10.5 Kompakte Objekte

Beispiele von Zustandsgleichungen :

- 1) ideales Neutronengas (Oppenheimer & Volkoff 1939):
nur Neutronen, nicht-wechselwirkend, Dichten

$$0 < \rho < \infty$$

- 2) Elektronen, Kerne, Neutronen im GG (Baym et al.1971):
Massengleichung für Kerne, Dichten

$$4.3 \times 10^{11} < \rho < 5 \times 10^{14} \text{ g/cm}^3$$

- 3) Neutronen, Reid-Wechselwirkung (Reid 1971), Dichten

$$\rho > 7 \times 10^{14} \text{ g/cm}^3$$

- 4) Bethe-Johnson (1974): modifizierte Reid-WW:

Teilchen:

$$n, p, \Lambda, \Sigma^{\pm,0}, \Delta^{\pm,0}$$

Dichten:

$$1.7 \times 10^{14} < \rho < 3.2 \times 10^{16} \text{ g/cm}^3$$

- 5) Pion-Kondensation:

$$n \rightarrow p + \pi^{-}, \quad \mu_n - \mu_p = \mu_e > m_{\pi} = 139.6 \text{ MeV}$$