

Sternaufbau und Sternentwicklung – Teil 2

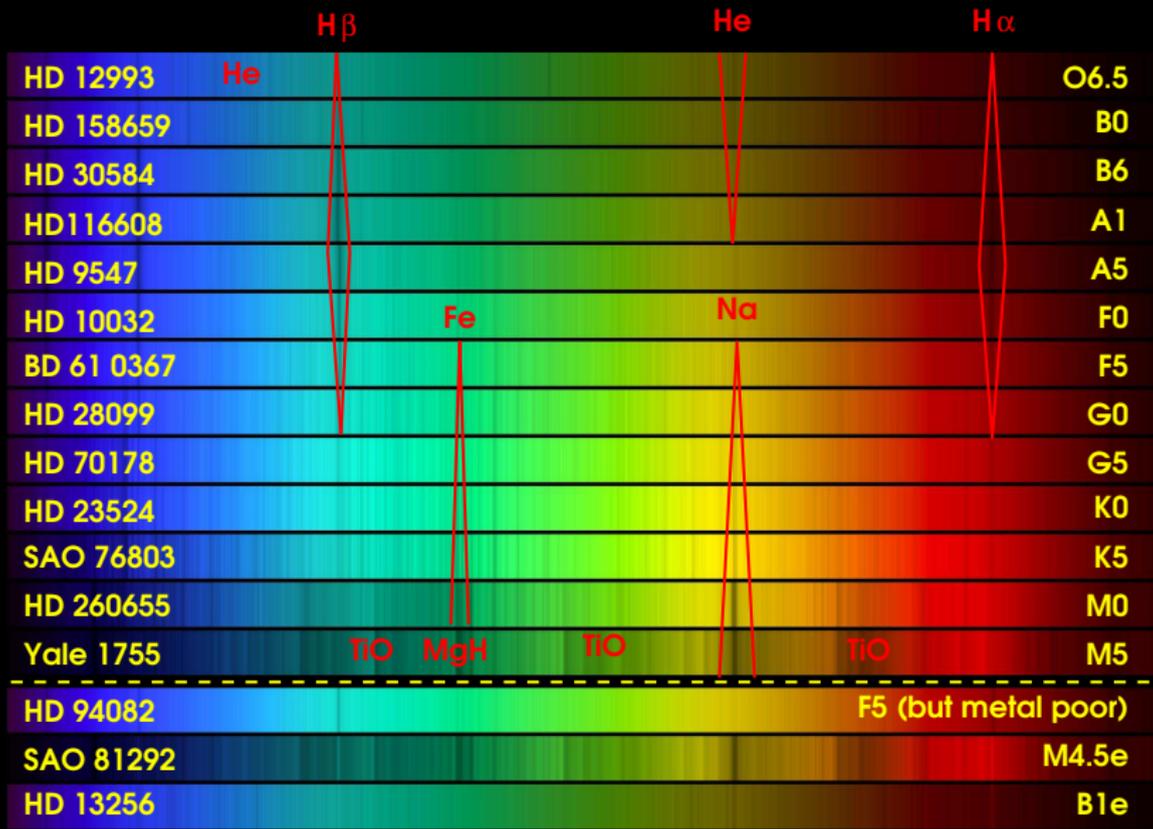
Dipl.-Phys. Johannes Hölzl
hoelzl@naa.net

Nürnberger Astronomische Arbeitsgemeinschaft e.V.

Grundkurs Astronomie
11. November 2024

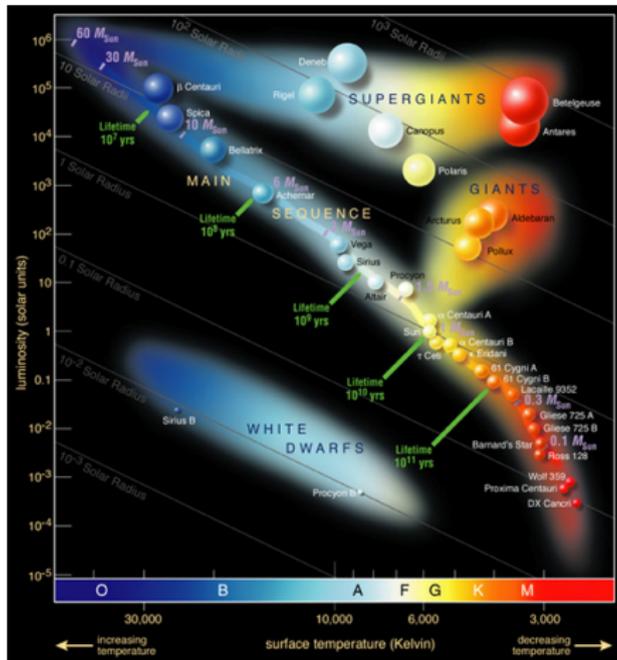


- 1 Wiederholung
- 2 Sternaufbau
 - Sonne
 - Massereiche Sterne
- 3 Entwicklung und Endstadien von Sternen
 - Entwicklung massearmer Sterne
 - Weiße Zwerge
 - Entwicklung massereicher Sterne
 - Neutronensterne
 - Schwarze Löcher



Spektralklassen [NOAO]

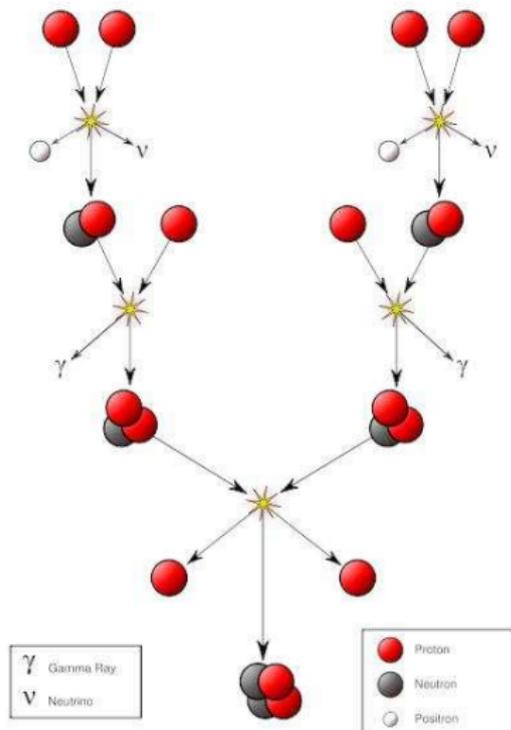
Hertzprung-Russell-Diagramm (HRD)



Hertzsprung-Russell-Diagramm [ESO]

Absolute Helligkeit oder Leuchtkraft, aufgetragen gegen Spektralklasse oder Temperatur

Proton-Proton-Zyklus

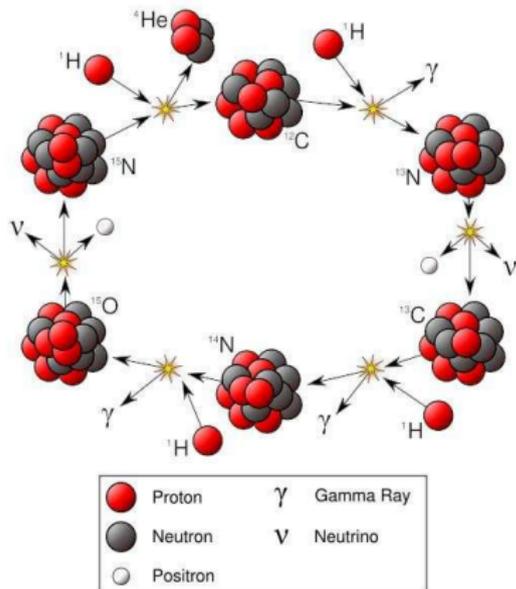


Energiequelle der Sonne: Kernfusion

Dominierender Prozess in der Sonne

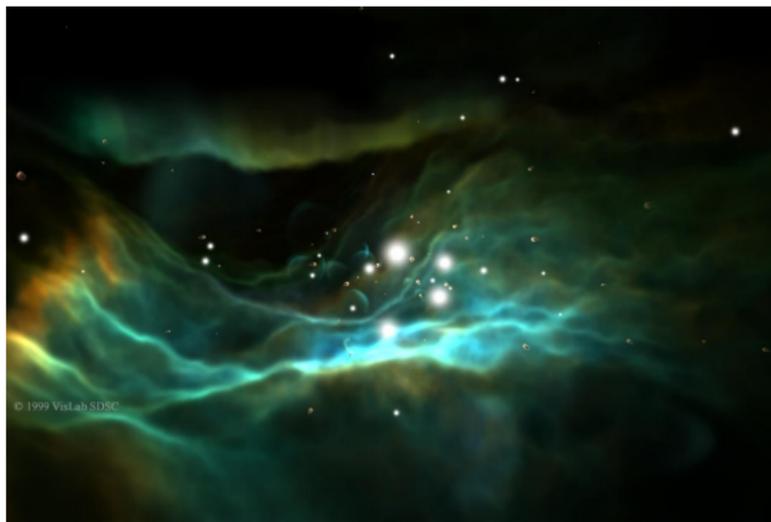
$$\epsilon_{pp} \propto T^5$$

Bethe-Weizsäcker-Zyklus



- Weitere Bezeichnung: CNO-Zyklus
- Dominierender Prozess bei massereicheren Sternen mit höheren Kerntemperaturen ($T_{\text{Kern}} \gtrsim 18 \text{ Mio K}$)

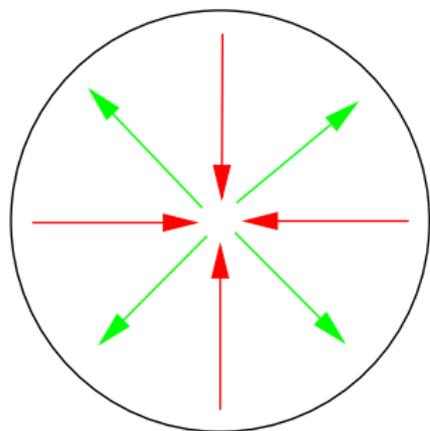
$$\epsilon_{\text{CNO}} \propto T^{17}$$



Sternentstehung im Orionnebel (Modellrechnung)
[VisLab SDSC]

- Sterne werden in Gruppen in Molekülwolken geboren
- bei Kerntemperaturen $\gtrsim 1$ Mio. K setzt die Kernfusion ein
- Nach dem Einsetzen der Kernfusion wandert der Stern auf die Hauptreihe des HRD

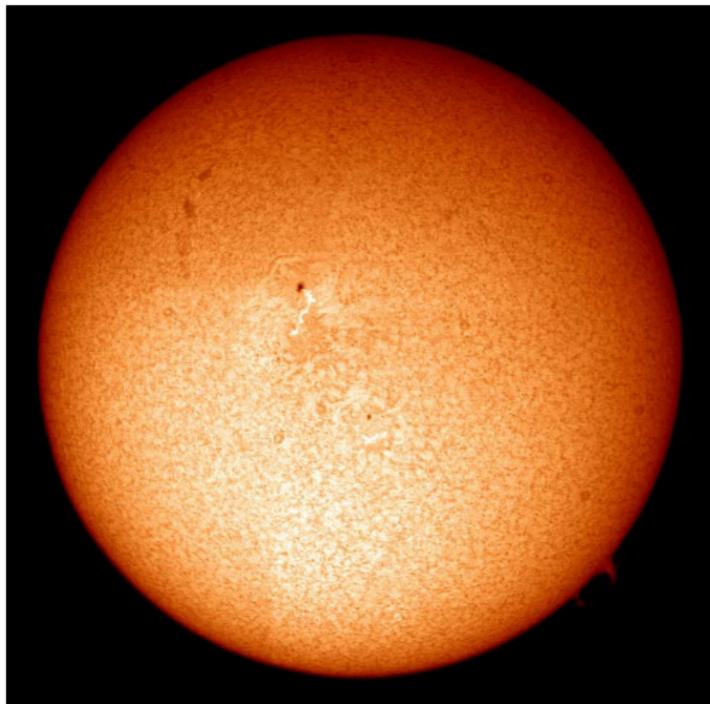
Hydrostatisches Gleichgewicht



- Gravitationskraft
← Gasdruck/Strahlungsdruck

- Gravitationskraft wirkt in Richtung des Sternmittelpunkts
⇒ ohne Gegenkraft würde der Stern kollabieren
- Gegenkraft: Druck wird durch Energieerzeugung aufrecht erhalten
⇒ Gasdruck
⇒ Strahlungsdruck
- Höherer Druck im Kern bedeutet höhere Temperatur

Sonne: Überblick



Sonne am 10.6.2006 (H α)

[A. Sperber, R. Sperber/NAA]

- Nächster Stern
⇒ „Goldstandard“ der Sternmodelle
- Hauptreihenstern
⇒ kein besonders „exotischer“ Stern
- Leuchtkraft:
 $L_{\odot} \approx 3,8 \cdot 10^{26} \text{ W}$
- Masse: $M_{\odot} \approx 2 \cdot 10^{30} \text{ kg}$
- Radius: $R_{\odot} \approx 700.000 \text{ km}$
- Oberflächentemperatur:
5800 K

Sonne: Zusammensetzung

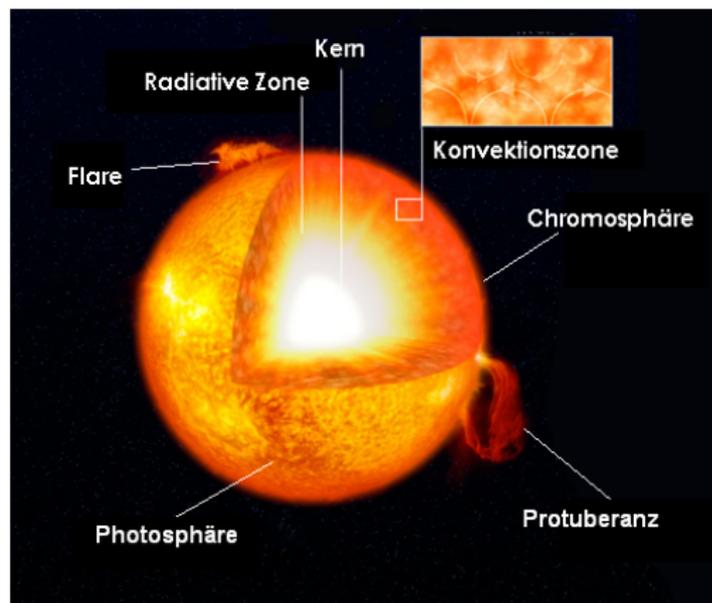
Zusammensetzung in Massenprozent:

- 75 % Wasserstoff
- 24 % Helium
- 1 % Metalle (Astrophysiker bezeichnen *alle* Elemente außer Wasserstoff und Helium als Metalle!)

Im Kern ist aufgrund der Kernfusion der Wasserstoffanteil geringer und der Heliumanteil höher

- 34 % Wasserstoff
- 64 % Helium

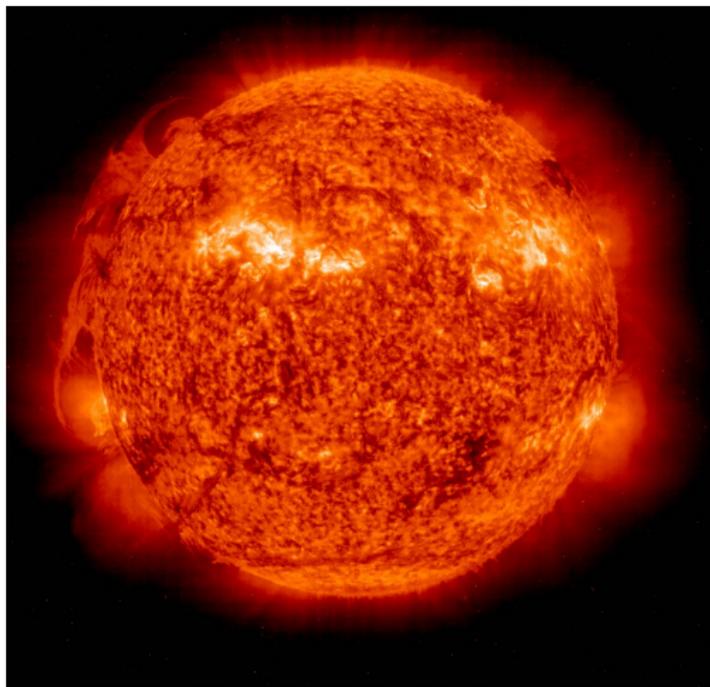
Sonne: Innere Struktur



Struktur der Sonne [Wikipedia]

- Kern: Temperaturen von ca. 16 Mio. K, Kernfusion
- kleine radiative Zone (Energietransport durch Strahlung) im Inneren
- konvektive Hülle (Energietransport durch Materialfluss)

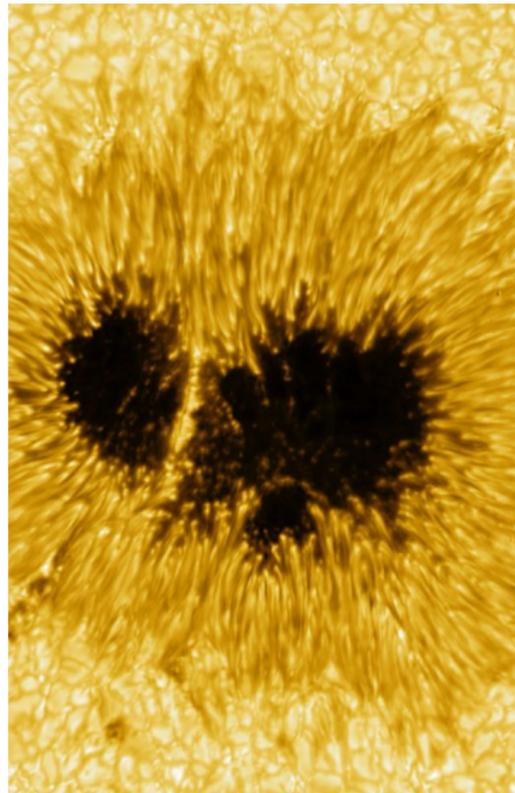
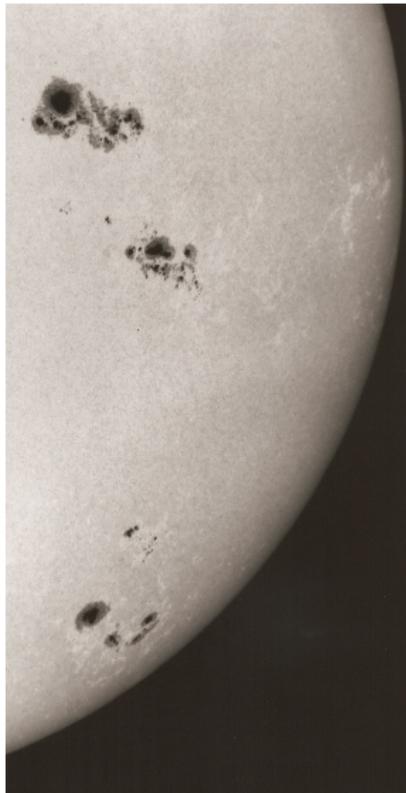
Sonne: Oberfläche und Atmosphäre



Sonne im UV [SOHO ESA/NASA]

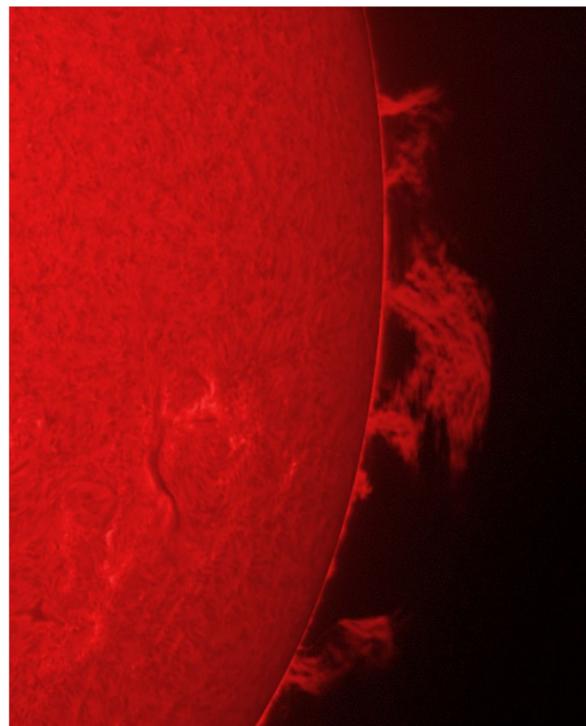
- Sonnenflecken: ca. 1000 K-2000 K kühlere Bereiche
- Protuberanzen: Materieströme, oft mehrere 100.000 km groß
- Photosphäre: sichtbare Sonnenoberfläche (Sonne hat keine echte Oberfläche)
- Korona: mehrere Mio. K heiße Atmosphäre mit sehr geringer Dichte

Sonnenflecken

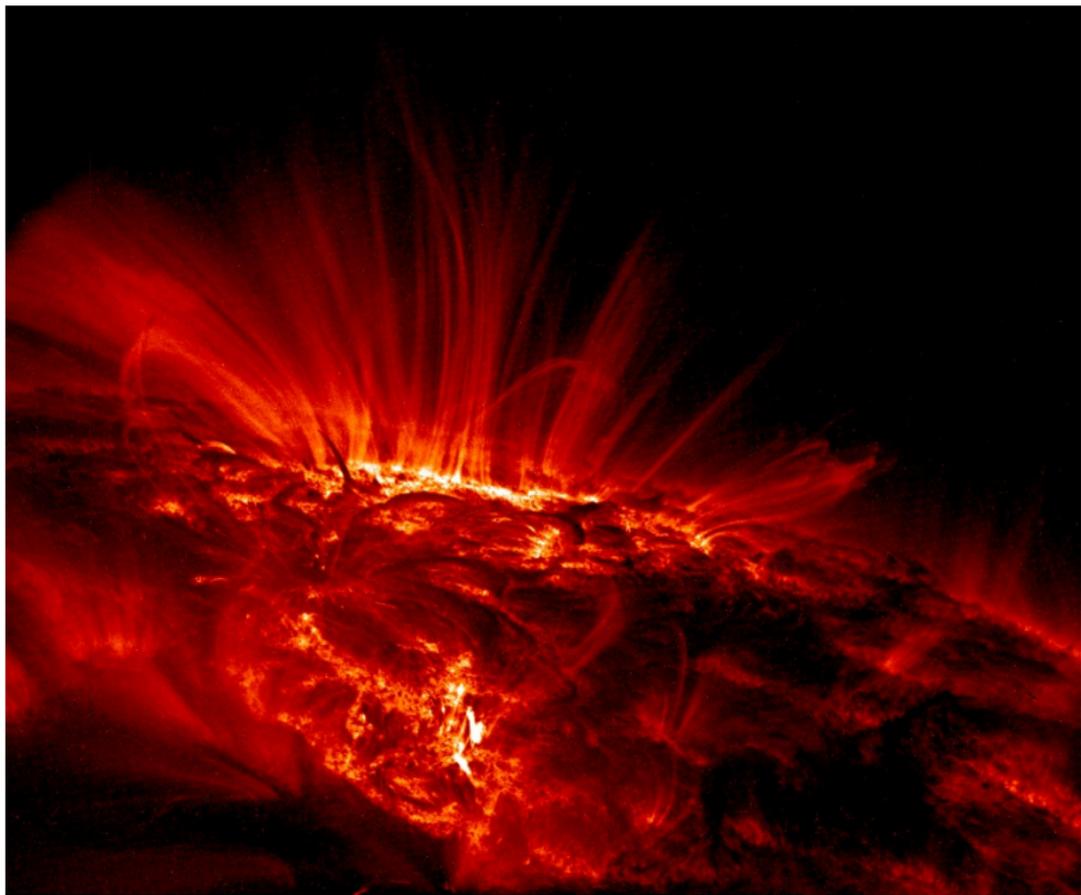


[Hans Bernhard / Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung]

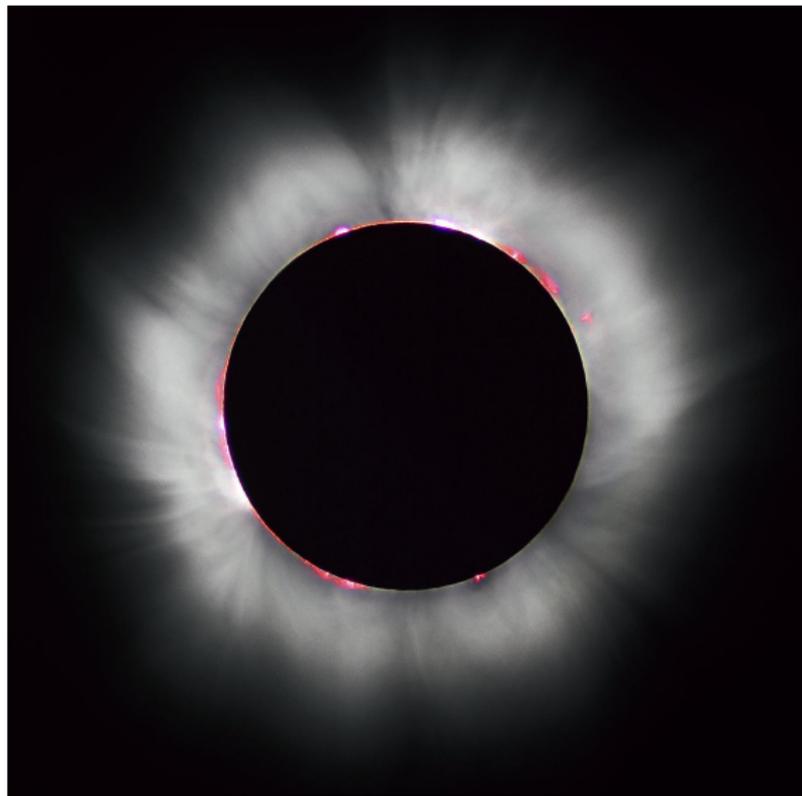
Protuberanzen



[Thomas Jäger (NAA)]

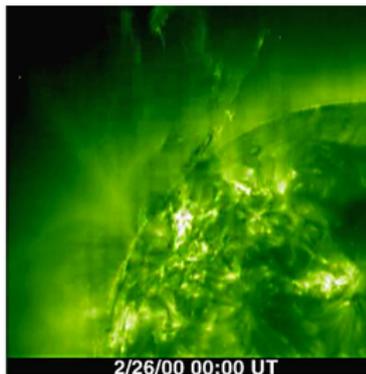
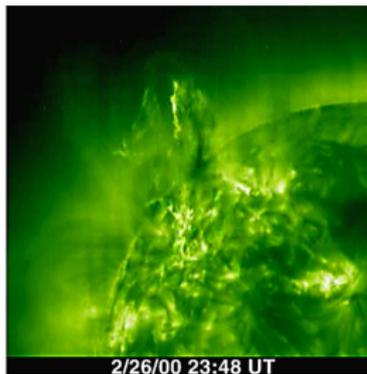
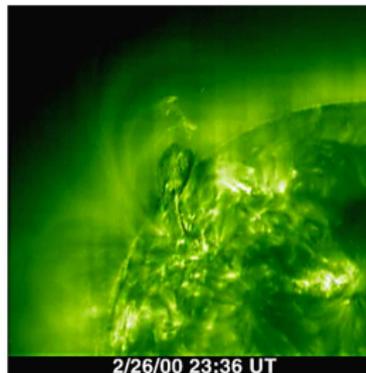
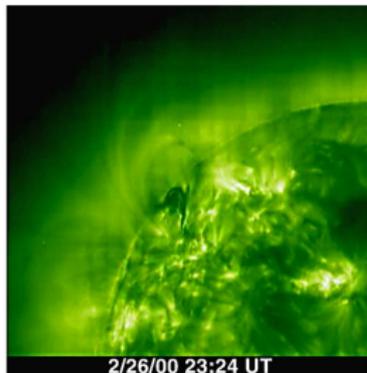


[TRACE Project, NASA]

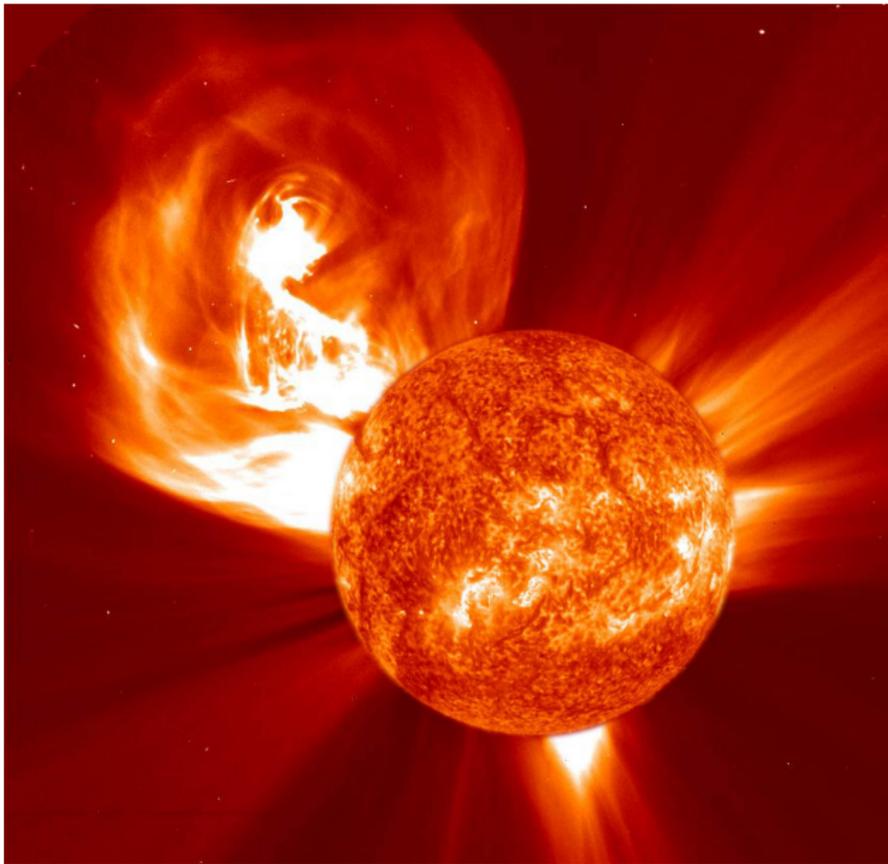


[Luc Viatour, www.lucnix.be]

Koronaler Masseauswurf

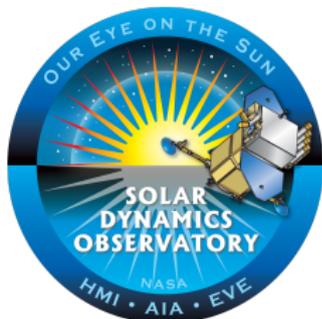


Koronaler Masseauswurf im UV [SOHO (ESA & NASA)]



Koronaler Masseauswurf im extremen UV [SOHO (ESA & NASA)]

Solar Dynamics Observatory (SDO)



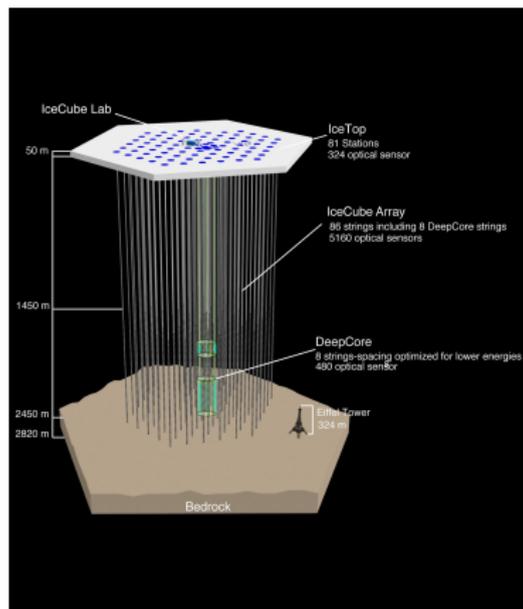
[NASA/Jim Grossmann. Jan. 21. 2010]

Coronaler Masseauswurf (CME)

https://sdo.gsfc.nasa.gov/assets/img/ultra_hd/0171304Whip_best.mp4

Zeitraffervideo über 10 Jahre

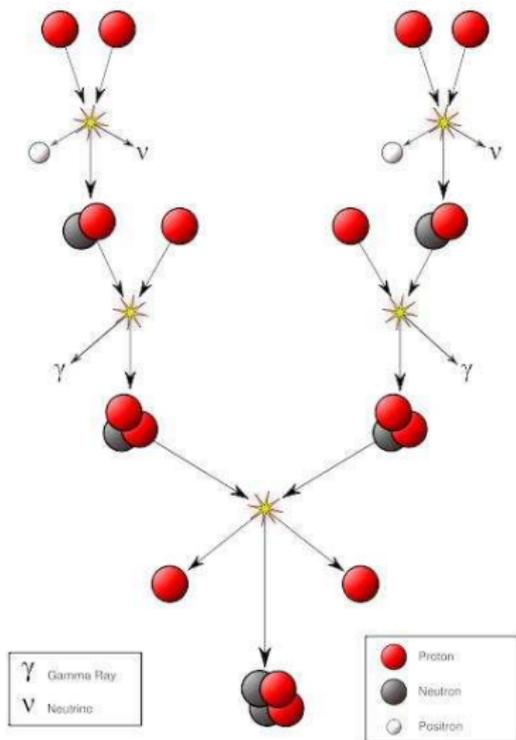
<https://www.nasa.gov/solar-system/watch-a-10-year-time-lapse-of-sun-from-nasas-sdo/>



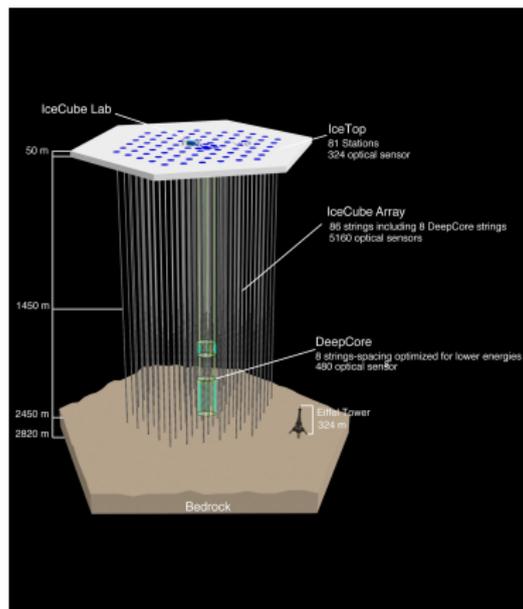
Neutrinoobservatorium IceCube
[IceCube Collaboration]

- *Helioseismologie*
Messung von Schallwellen in der Sonne
- *Neutrinos*
entstehen im Kern der Sonne bei Kernfusion und können die Sonne ungehindert verlassen, sind aber nur sehr schwer nachzuweisen
- Computersimulationen spielen wichtige Rolle, ausreichend leistungsstarke Computer aber noch nicht lange verfügbar

Blick ins Sonneninnere



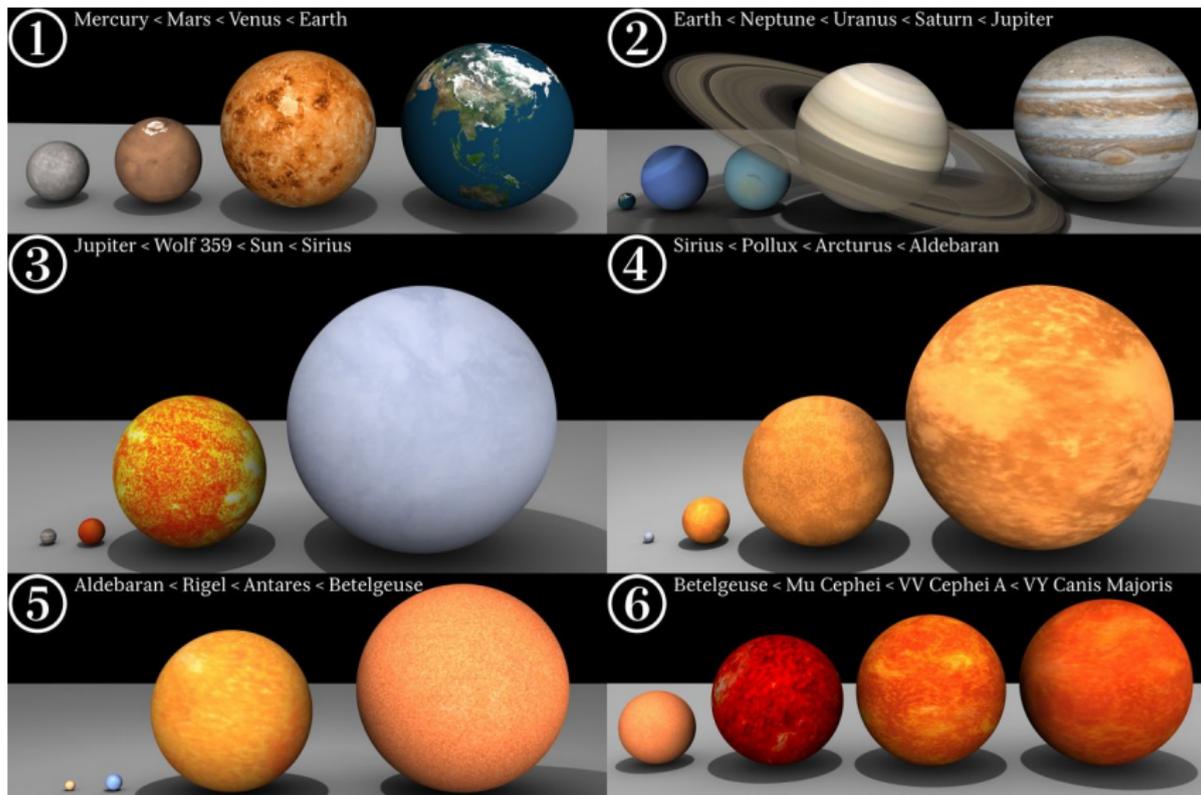
- *Helioseismologie*
Messung von Schallwellen in der Sonne
- *Neutrinos*
entstehen im Kern der Sonne bei Kernfusion und können die Sonne ungehindert verlassen, sind aber nur sehr schwer nachzuweisen
- Computersimulationen spielen wichtige Rolle, ausreichend leistungsstarke Computer aber noch nicht lange verfügbar



Neutrinoobservatorium IceCube
[IceCube Collaboration]

- *Helioseismologie*
Messung von Schallwellen in der Sonne
- *Neutrinos*
entstehen im Kern der Sonne bei Kernfusion und können die Sonne ungehindert verlassen, sind aber nur sehr schwer nachzuweisen
- Computersimulationen spielen wichtige Rolle, ausreichend leistungsstarke Computer aber noch nicht lange verfügbar

Sterne im Größenvergleich



[Dave Jarvis]

Innere Struktur massereicher Sterne ($M > 1,2 M_{\odot}$)

- Hohe Kerntemperaturen
- Bethe-Weizsäcker-Zyklus ist der dominierende Fusionsprozess
- Konvektiver Kern
- Radiative Hülle
- wesentlich mehr Energieerzeugung
⇒ höhere Leuchtkraft
⇒ Brennstoff wird schneller verbraucht



Deneb [Davide De Martin, scyfactory.org]

Entwicklung eines Sternes ist sehr stark masseabhängig.

Massereiche Sterne haben

- eine höhere Kerntemperatur
- höhere Leuchtkraft
- größeren Radius

Zeit auf der Hauptreihe = Zeit des Wasserstoffbrennens im Kern

- Stern mit $1 M_{\odot}$: 10 Milliarden Jahre
- Stern mit $5 M_{\odot}$: 94 Millionen Jahre
- Stern mit $25 M_{\odot}$: 6,4 Millionen Jahre

(Grund: Fusion findet wegen höheren Temperaturen wesentlich schneller statt)

Endstadien der Sternentwicklung

- **Weißer Zwerg**

$$M_{\text{Hauptreihe}} \lesssim 8M_{\odot}$$

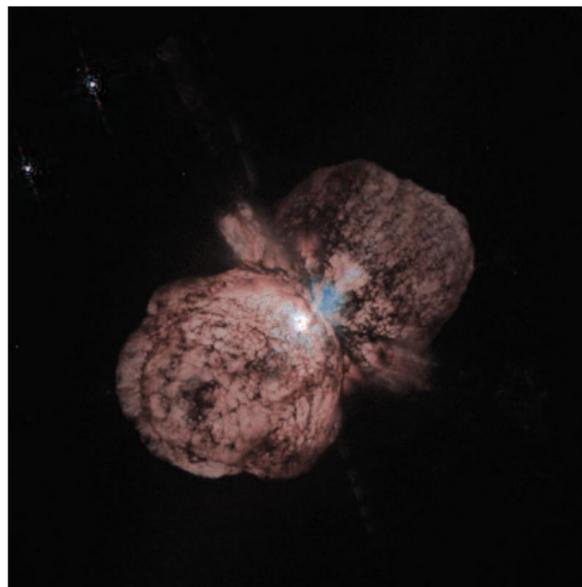
- **Neutronenstern**

$$8M_{\odot} \lesssim M_{\text{Hauptreihe}} \lesssim 20M_{\odot}$$

- **Schwarzes Loch**

$$M_{\text{Hauptreihe}} \gtrsim 20M_{\odot}$$

Ein großer Teil der Masse geht bei der Post-Hauptreihenentwicklung verloren!

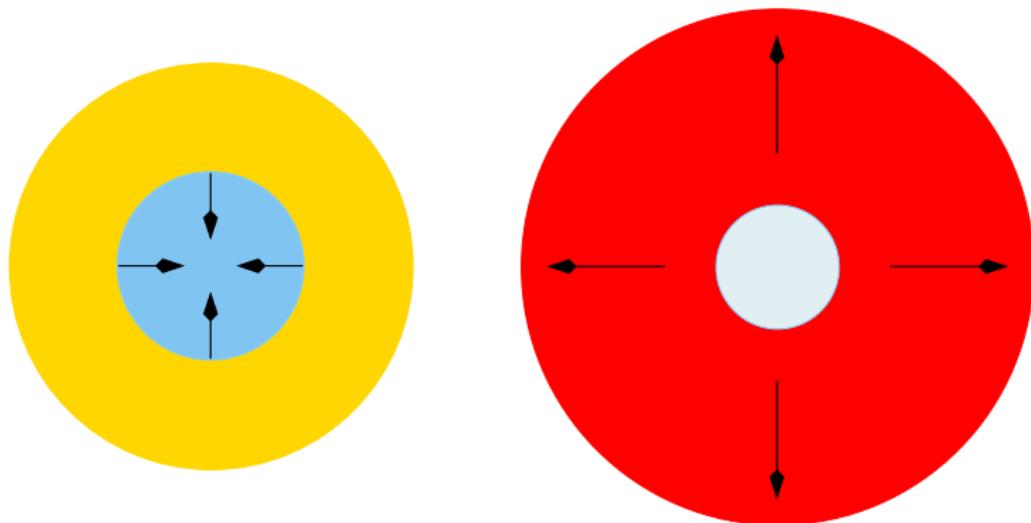


Eta Carinae [Jon Morse (University of Colorado), and NASA]

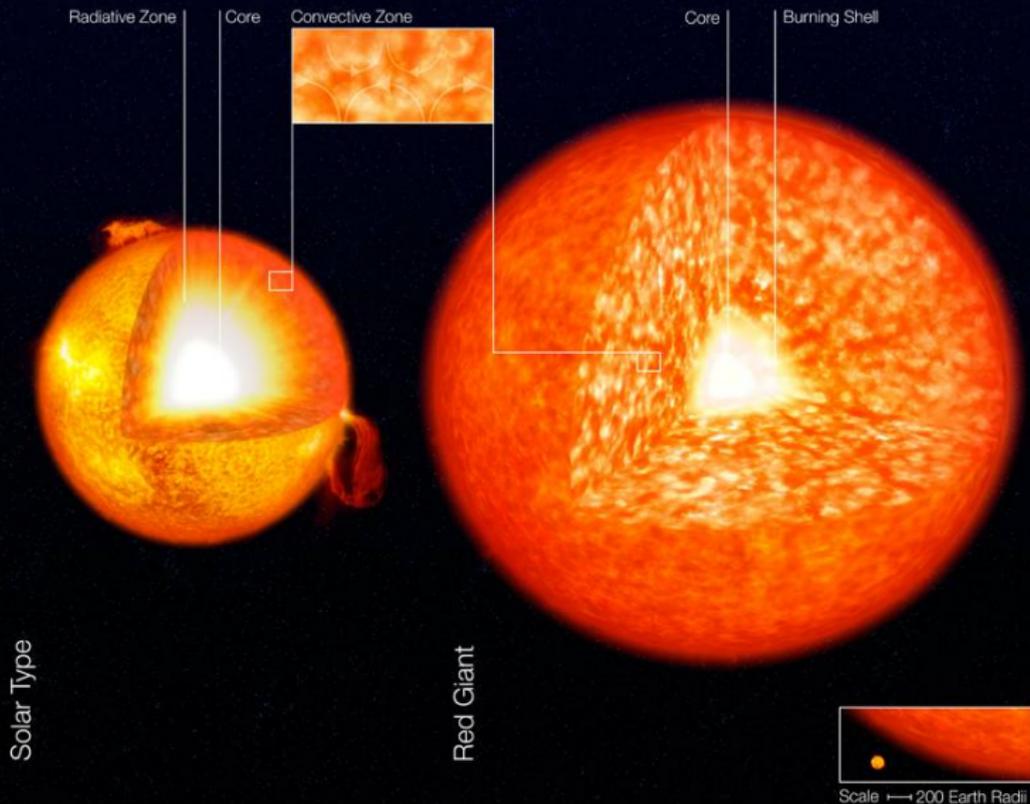
Weitere Entwicklung eines Hauptreihensterns mit $M \lesssim 8 M_{\odot}$:

- Insgesamt werden ca. 10 % des verfügbaren Wasserstoffs fusioniert
- Wenn der Wasserstoffvorrat im Kern erschöpft ist: Fusion setzt sich in einer Schale um den Kern fort
⇒ „Schalenbrennen“
- Bei Sternen mit $M \lesssim 1 M_{\odot}$: Fast der gesamte Stern wird konvektiv
- Stern dehnt sich aus, Oberflächentemperatur nimmt ab, Leuchtkraft nimmt zu
⇒ **Roter Riese**

Post-Hauptreihen-Entwicklung II



Kern kontrahiert, T nimmt zu \Rightarrow Hülle dehnt sich aus, T nimmt ab



Aufbau der Sonne (links) und eines Roten Riesens (rechts) [ESO]

A comparison of star sizes

Red Dwarf

Lower limit:
0.08 solar
masses



Our Sun

1 solar mass



Blue-white
Supergiant
150 solar masses

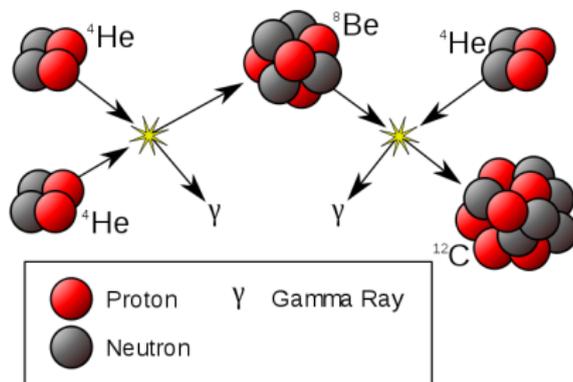
Red Giant

Very old stars that
evolve from stars of
<5 solar masses

[NASA, ESA and A. Feild (STScI)]

Post-Hauptreihen-Entwicklung III

- bei $T_{\text{Kern}} \approx 100$ Mio. K: Helium fusioniert zu schwereren Elementen (3α -Prozess)
- geringere Energieausbeute als beim Wasserstoffbrennen

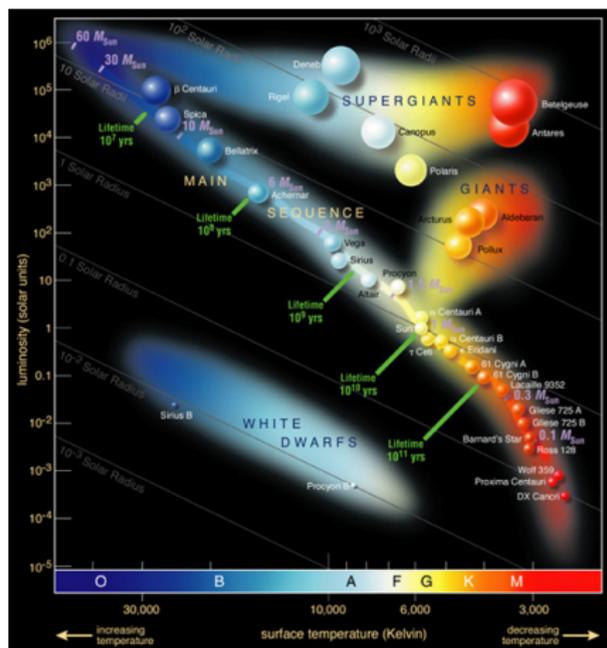


Triple-Alpha-Prozess [Wikipedia]

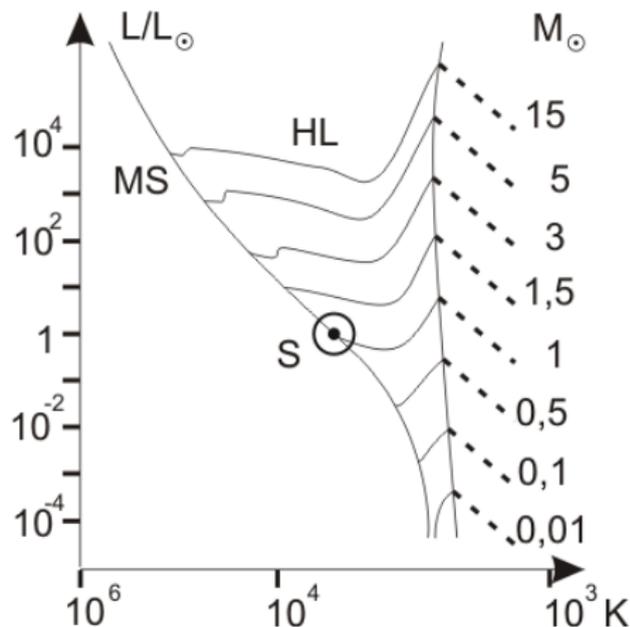
Post-Hauptreihen-Entwicklung IV

- Heliumbrennen dauert nur ca. 20 % der Zeit des Wasserstoffbrennens
- Wasserstoff-Schalenbrennen geht weiter
- Stern wird instabil und beginnt zu pulsieren, dabei stößt er über 50 % seiner Masse ab
- innerer, heißerer Bereich wird sichtbar
- UV-Strahlung des heißen Kernbereichs regt die umgebenden Hüllen zum Leuchten an
- Entstehung eines planetarischen Nebels (hat nichts mit Planeten zu tun!)

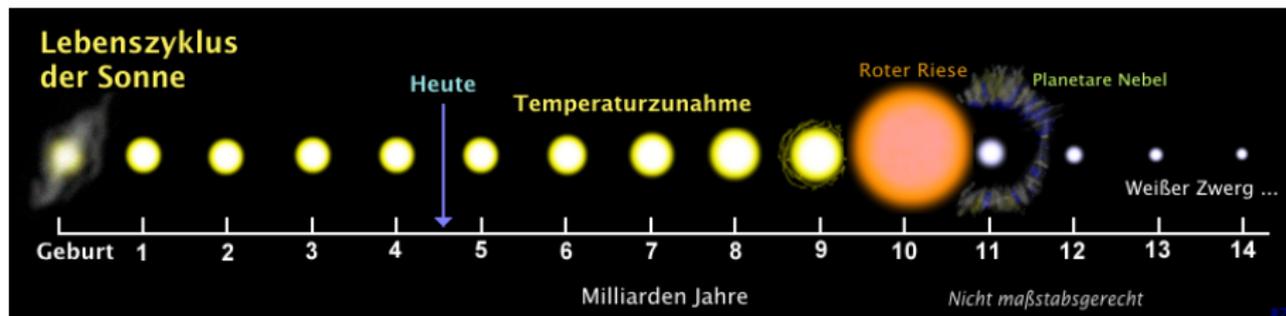
Sternentwicklung im HRD



[ESO/Wikipedia]



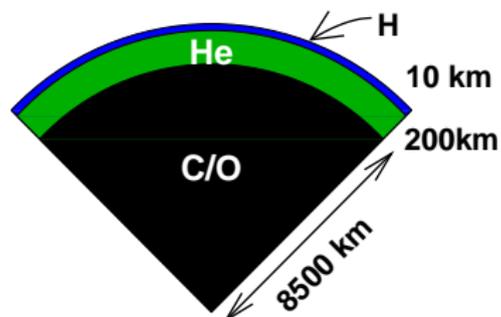
Entwicklung der Sonne



[Wikipedia]

Zeit auf der Hauptreihe: ≈ 10 Milliarden Jahre, davon heute $\approx 4,5$ Milliarden vergangen

Endprodukt von Sternen mit $M \lesssim 8 M_{\odot}$ auf der Hauptreihe

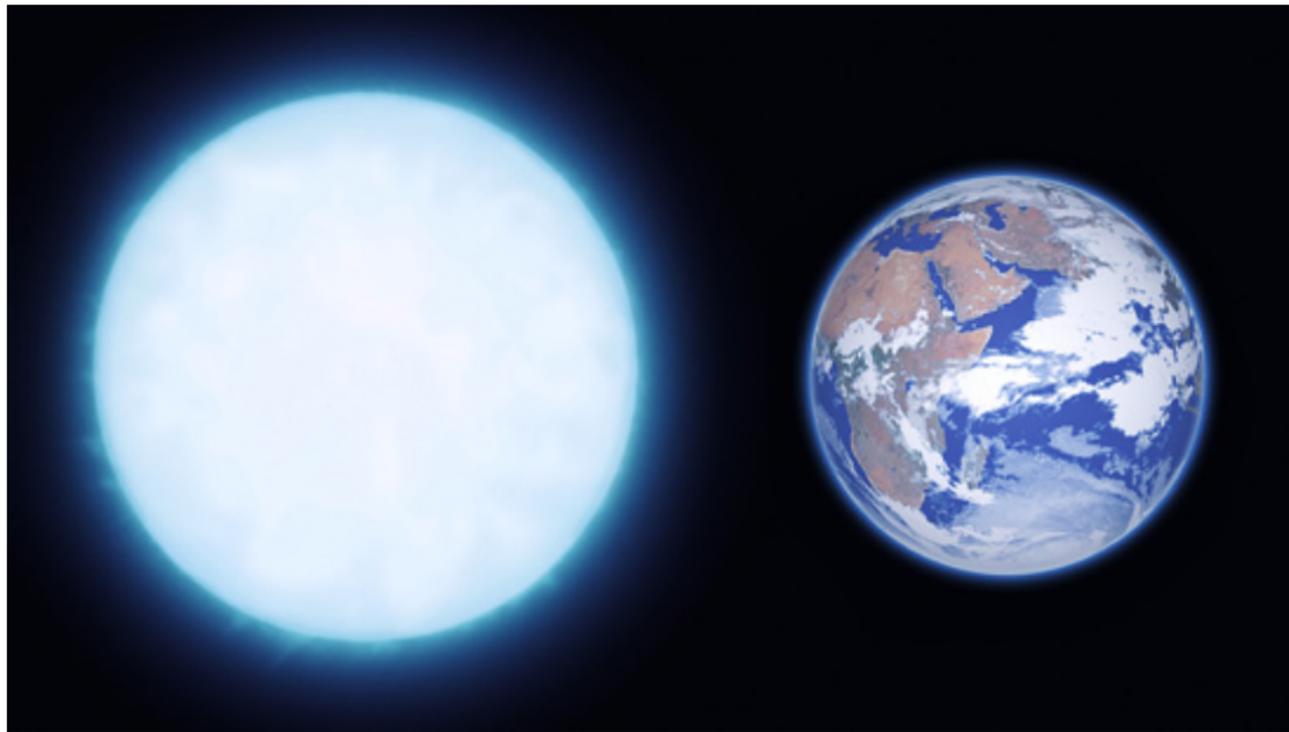


Aufbau eines Weißen Zwergs [Wilms]

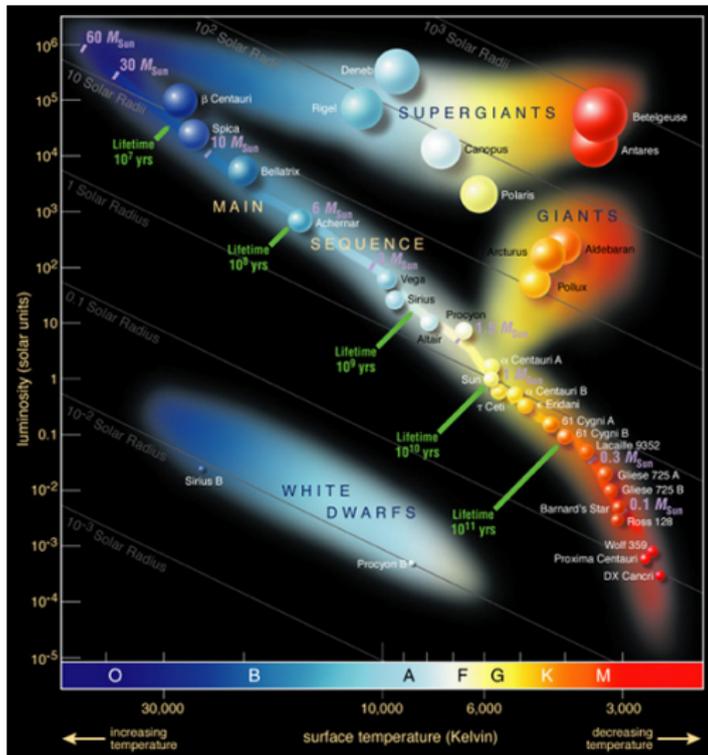
Eigenschaften

- Dichte: $\rho \approx 1000 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^3}$
- Radius $\approx 6500 \text{ km}$ (Erdradius)
- Zusammensetzung: Hauptsächlich Kohlenstoff und Sauerstoff
- Weiße Zwerge sind nur stabil bis $M < 1,4 M_{\odot}$ (Chandrasekhar-Grenze)
- Auskühlung auf Zeitskalen von Milliarden Jahren

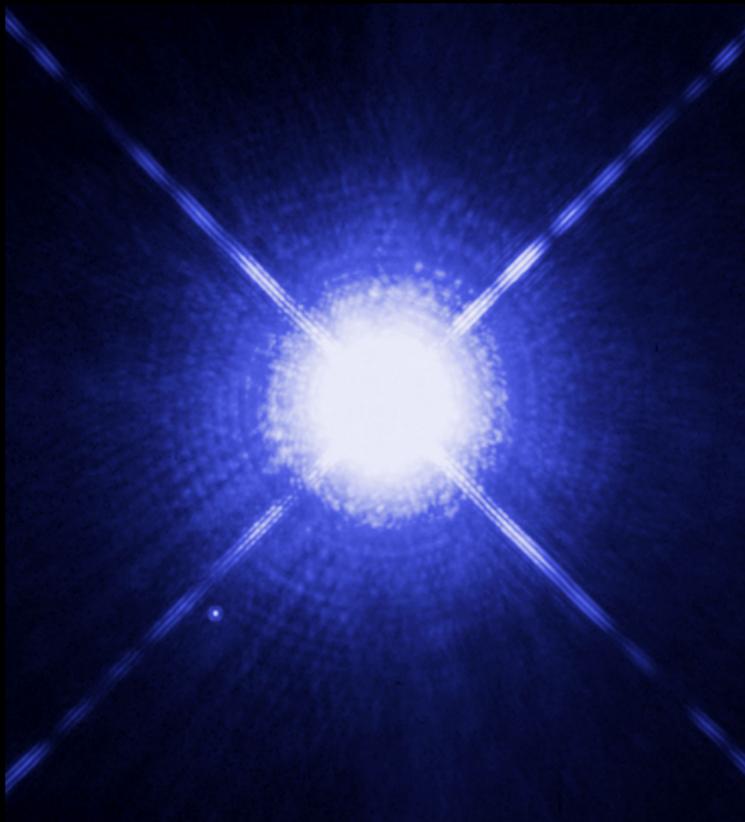
Vergleich Weißer Zwerg – Erde



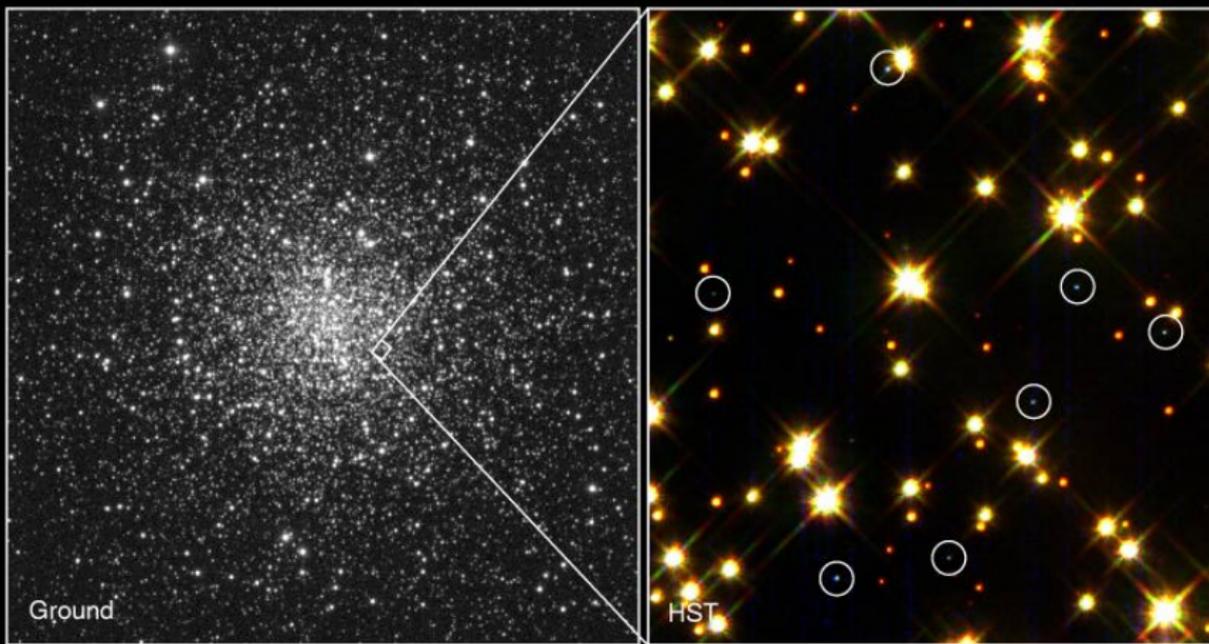
Hertzprung-Russell-Diagramm (HRD)



Hertzsprung-Russell-Diagramm [ESO]



Sirius A (heller Stern) und Weißer Zwerg Sirius B (links unten) [NASA/ESA]



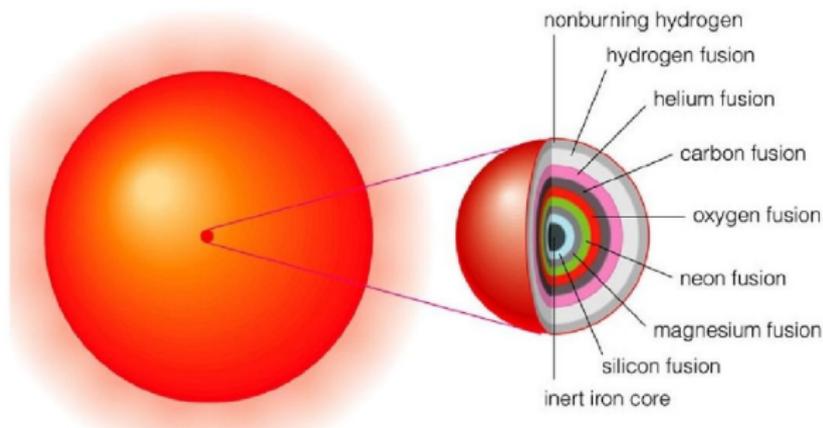
White Dwarf Stars in M4

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

HST · WFPC2

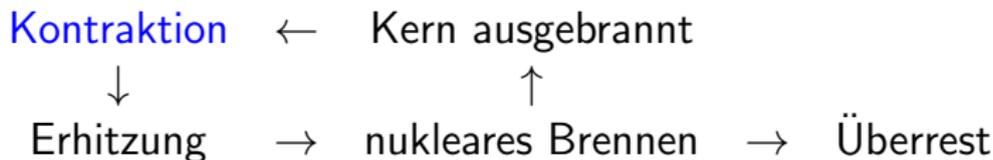
Entwicklung massereicher Sterne

- Heliumbrennen setzt früher ein
- auch höhere Fusionsprozesse laufen ab, liefern aber wesentlich weniger Energie
- mehrere Fusionsprozesse gleichzeitig in verschiedenen Schalen



Einsetzen höhere Fusionsprozesse

- Energiequelle im Kern fehlt: Kern zieht sich zusammen, T steigt



[nach A. Weiß: Sterne]

- Bei jedem „Umlauf“ steigt die Kerntemperatur

Periodensystem der Elemente

1. Hg IA 18. Hg VIIIA

Berechnung mit Haupt- und Nebengruppen
IUPAC - Empfehlung
Von Chemical Abstracts Service bis 1986 verwendet

Periodensystem der Elemente

<http://www.pse-online.de>

Relative Atommasse (Mittelwert der Isotope)
Ordnungszahl
Schmelzpunkt [°C]
Kochpunkt [°C]
Elementname

Klassifizierung
chemisches Element
Elektronenkonfiguration
Elektronen
Protonen
Neutronen
Isotop
Stabilität
Radioaktivität
Halbwertszeit
Entdeckungsjahr
Entdecker

Elementsymbol
N = gasförmig
Br = flüssig (bei 20 °C)
Am = fest

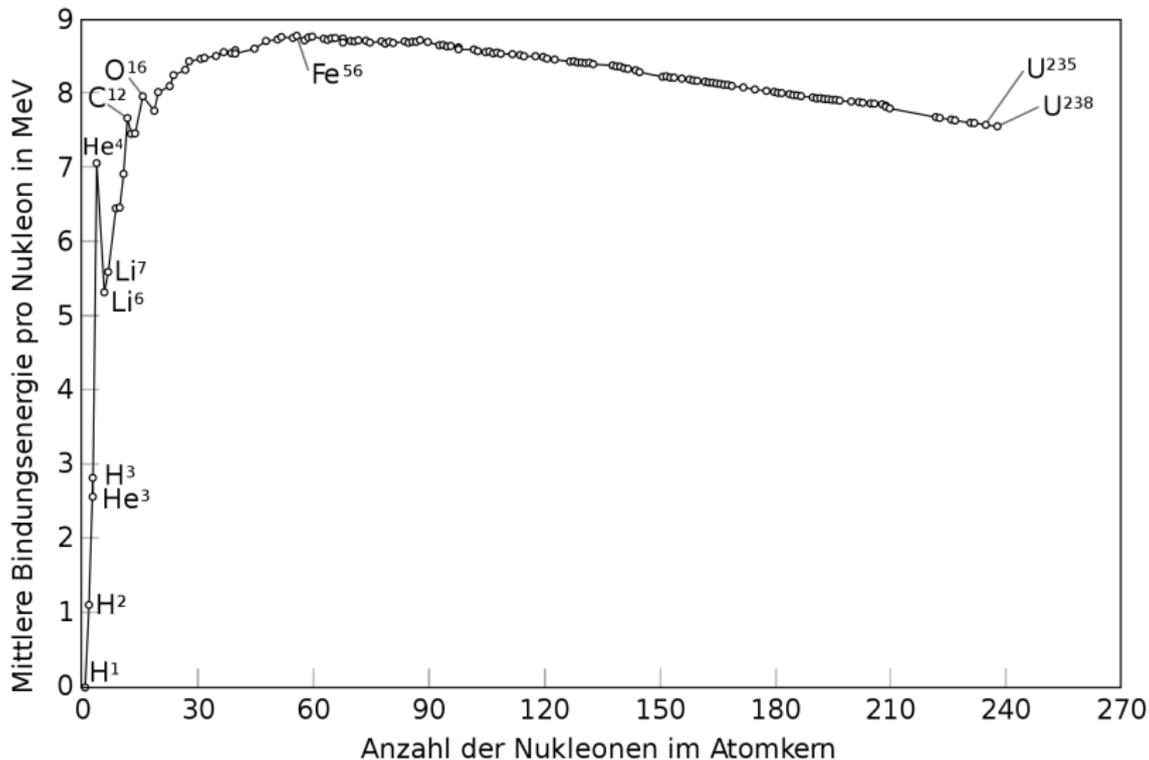
1	2											13	14	15	16	17	18																		
1 1.00794 1 H Wasserstoff	2 4.002602 2 He											3 3.0160293 3 Li	4 6.941 4 Be	5 9.0121831 5 B	6 12.0107 6 C	7 14.003074 7 N	8 15.999 8 O	9 18.9984032 9 F	10 20.1797 10 Ne																
3 22.98976928 3 Na	4 24.304 4 Mg	5 38.962431 5 K	6 44.955910 6 Ca	7 47.867 7 Sc	8 50.9415 8 Ti	9 51.9961 9 V	10 54.938044 10 Cr	11 55.845 11 Mn	12 58.933200 12 Fe	13 58.933200 13 Co	14 58.933200 14 Ni	15 63.546 15 Cu	16 65.39 16 Zn	17 69.723 17 Ga	18 72.64 18 Ge	19 74.9216 19 As	20 78.9718 20 Se	21 79.904 21 Br	22 83.80 22 Kr																
19 19K	20 20Ca	21 21Sc	22 22Ti	23 23V	24 24Cr	25 25Mn	26 26Fe	27 27Co	28 28Ni	29 29Cu	30 30Zn	31 31Ga	32 32Ge	33 33As	34 34Se	35 35Br	36 36Kr	37 37Rb	38 38Sr	39 39Y	40 40Zr	41 41Nb	42 42Mo	43 43Tc	44 44Ru	45 45Rh	46 46Pd	47 47Ag	48 48Cd	49 49In	50 50Sn	51 51Sb	52 52Te	53 53I	54 54Xe
55 55Cs	56 56Ba	57-71 La-Lu	72 72Hf	73 73Ta	74 74W	75 75Re	76 76Os	77 77Ir	78 78Pt	79 79Au	80 80Hg	81 81Tl	82 82Pb	83 83Bi	84 84Po	85 85At	86 86Rn	87 87Fr	88 88Ra	89-103 Ac-Lr	104 104Rf	105 105Db	106 106Sg	107 107Bh	108 108Hs	109 109Mt	110 110Ds	111 111Uuu	112 112Uub	113 113Uut	114 114Uuq	115 115Uup	116 116Uuh	117 117Uus	118 118Uuo

Die Elemente mit den Ordnungszahlen 112-118 wurden noch nicht synthetisiert bzw. von der IUPAC offiziell anerkannt

© 1999-2003
by Lars Röglin
lars@pse-online.de
http://www.pse-online.de

59 59La	60 60Ce	61 61Pr	62 62Nd	63 63Pm	64 64Sm	65 65Eu	66 66Gd	67 67Tb	68 68Dy	69 69Ho	70 70Er	71 71Tm	72 72Yb	73 73Lu
74 74Be	75 75Li	76 76Be	77 77B	78 78C	79 79N	80 80O	81 81F	82 82Ne	83 83Na	84 84Mg	85 85Al	86 86Si	87 87P	88 88S
89 89Ac	90 90Th	91 91Pa	92 92U	93 93Np	94 94Pu	95 95Am	96 96Cm	97 97Bk	98 98Cf	99 99Es	100 100Fm	101 101Md	102 102No	103 103Lr

Bindungsenergie von Atomkernen



[wikipedia]

Supernovae I

- Entstehung eines Eisenkerns, da Fusion nur bis zum Eisen Energiegewinn bringt
- letzter Fusionsprozess, der unter Energiegewinn stattfinden kann ($T_{\text{Kern}} \approx 3$ Milliarden K):

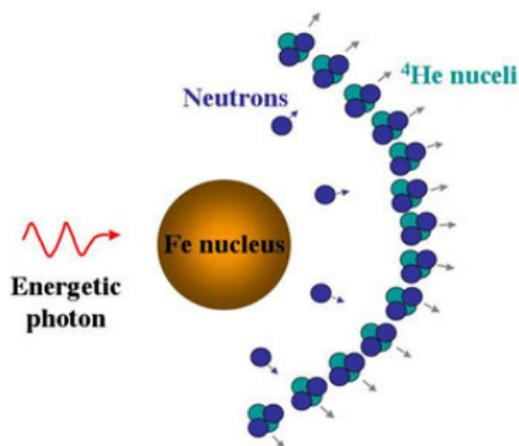


- Dieser letzte Fusionsprozess dauert nur noch wenige Stunden (!)

Danach keine Energiequelle mehr, die den Stern stabilisiert

Supernovae II

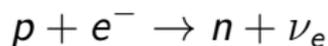
- Keine Energiequelle mehr
⇒ Kern schrumpft, T steigt
- Eisen wird durch Photodisintegration unter *Energieverlust* wieder in einzelne Protonen und Neutronen zerlegt



[Swinburne University of Technology]

Supernovae III

- Wenn Kerntemperatur ca. 8 Milliarden K: Neutronisation



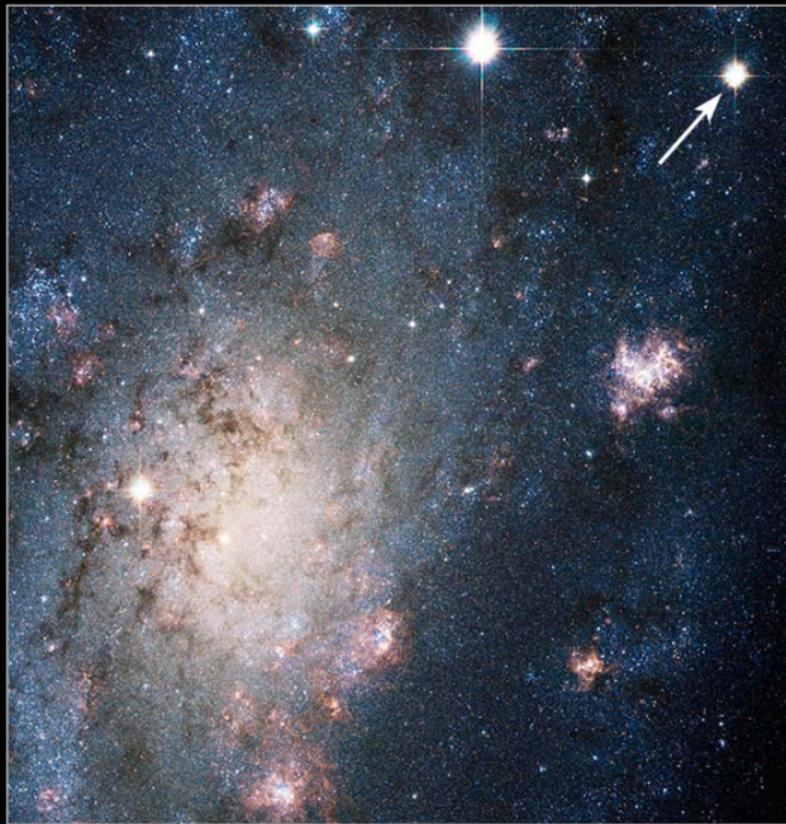
- Extremer Energieverlust in kürzester Zeit
⇒ Kernkollaps-Supernova
- Leuchtkraft: ca. $10^{20} L_{\odot}$
Davon nur 1% als elektromagnetische Strahlung, Rest Neutrinos
- Alle schwereren Elemente als Eisen entstehen in Supernovaexplosionen (Blei, Uran...)

Modellrechnung zur Kernkollaps-Supernova eines Sterns mit $15M_{\odot}$:

[http://www.rzg.mpg.de/services/visualization/
rzgprojects/type-ii-supernova-simulations](http://www.rzg.mpg.de/services/visualization/rzgprojects/type-ii-supernova-simulations)

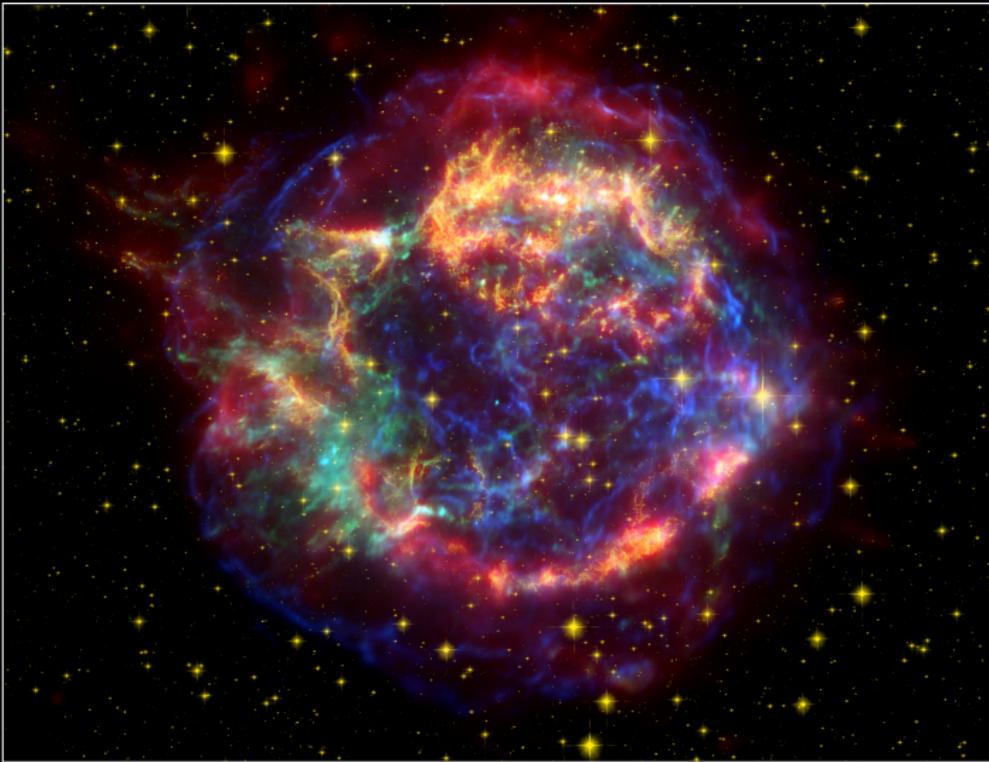


Supernova in M51 (Whirlpool-Galaxie) [Nelkenbrecher/NAA]



NASA, ESA and A. Filippenko (University of California, Berkeley)

STScI-PRC04-23



Cassiopeia A Supernova Remnant

NASA / JPL-Caltech / O. Krause (Steward Observatory)

ssc2005-14c

Spitzer Space Telescope • MIPS

Hubble Space Telescope • ACS

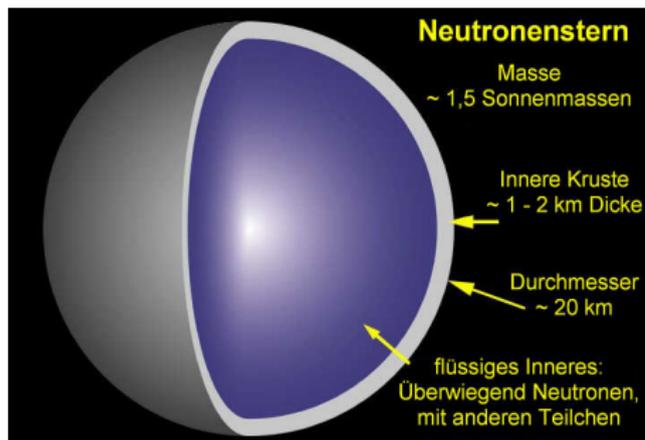
Chandra X-Ray Observatory



Cirrusnebel, Überrest einer SN vor ca. 15.000 Jahren [B. Liebscher]

Neutronensterne

Verbleibende Kernmasse $\lesssim 3 - 4 M_{\odot}$: *Neutronenstern*



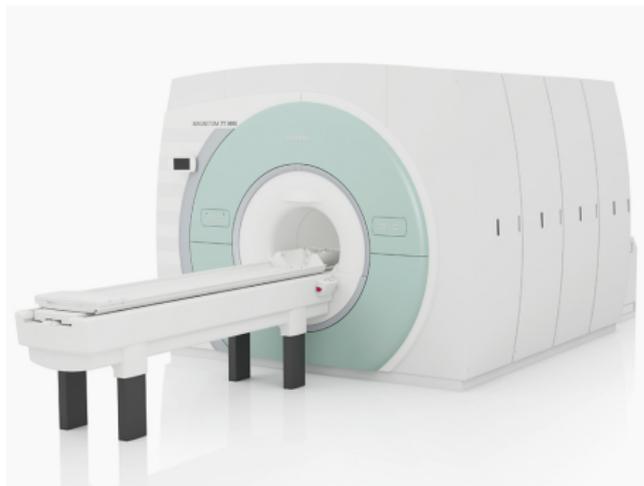
Aufbau eines Neutronensterns [NASA and F.M. Walter (NASA/Marshall Space Flight Center.)]

Eigenschaften

- besteht hauptsächlich aus Neutronen
- Radius: 10 – 15 km (Nürnberg)
- Dichte: ca. $10^{11} \frac{\text{kg}}{\text{cm}^3}$
- starkes Magnetfeld: ca. 10^8 T
- schnelle Rotation

Neutronensterne

Verbleibende Kernmasse $\lesssim 3 - 4 M_{\odot}$: *Neutronenstern*



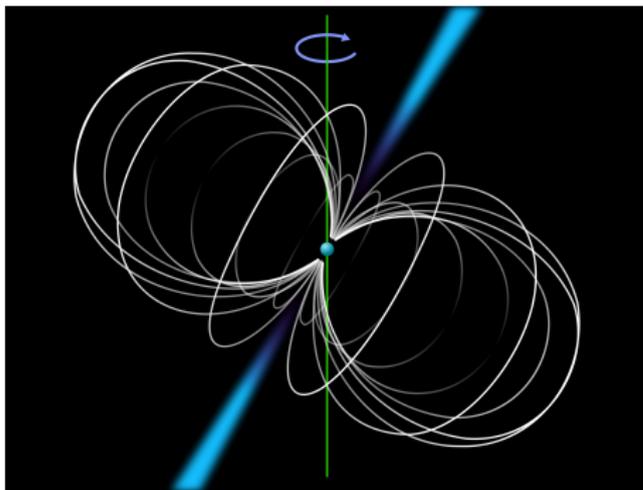
Magnetresonanztomograph mit 7 T Feldstärke
[Siemens Healthcare]

Eigenschaften

- besteht hauptsächlich aus Neutronen
- Radius: 10 – 15 km (Nürnberg)
- Dichte: ca. $10^{11} \frac{\text{kg}}{\text{cm}^3}$
- starkes Magnetfeld: ca. 10^8 T
- schnelle Rotation

Neutronensterne

Verbleibende Kernmasse $\lesssim 3 - 4 M_{\odot}$: *Neutronenstern*

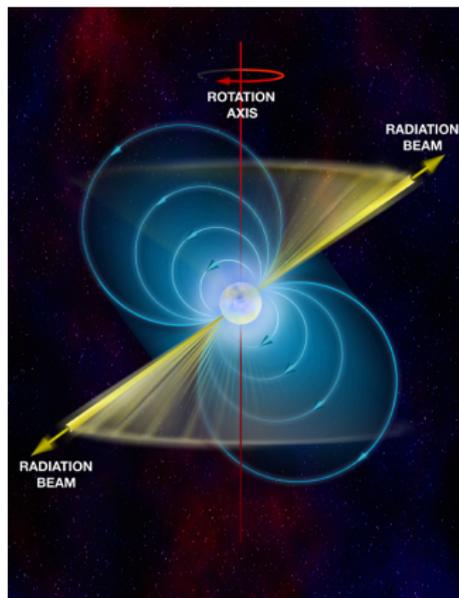


[Wikipedia]

Eigenschaften

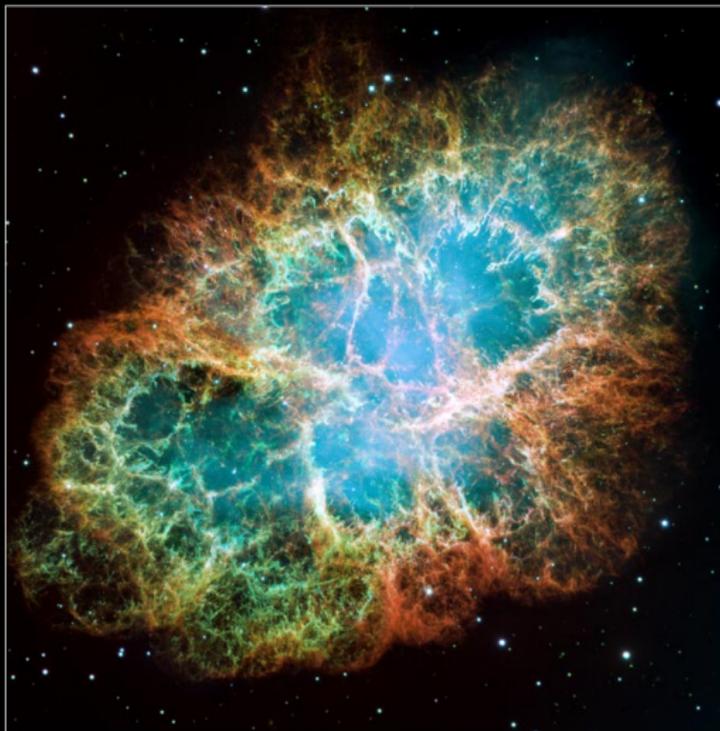
- besteht hauptsächlich aus Neutronen
- Radius: 10 – 15 km (Nürnberg)
- Dichte: ca. $10^{11} \frac{\text{kg}}{\text{cm}^3}$
- starkes Magnetfeld: ca. 10^8 T
- schnelle Rotation

Pulsare



[Bill Saxton, NRAO/AUI/NSF]

Radiopulsare: <http://www.jb.man.ac.uk/~pulsar/Education/Sounds/sounds.html>



NASA, ESA, and J. Hester (Arizona State University)

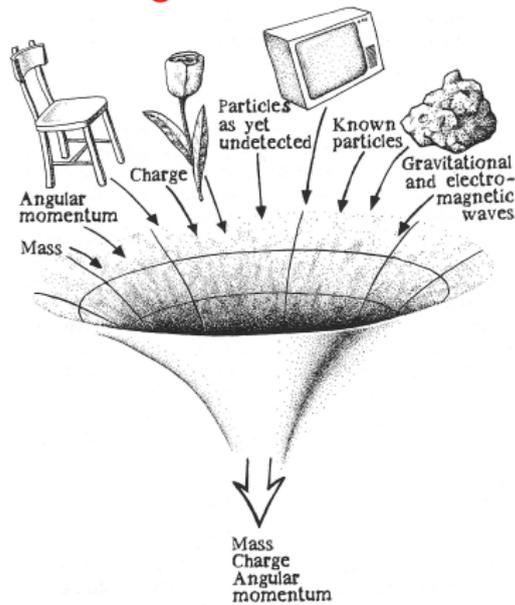
STScI-PRC05-37

Supernovaüberrest M1 (Krebsnebel), die Supernova wurde im Jahr 1054 von chinesischen
Astronomen beobachtet

Schwarze Löcher

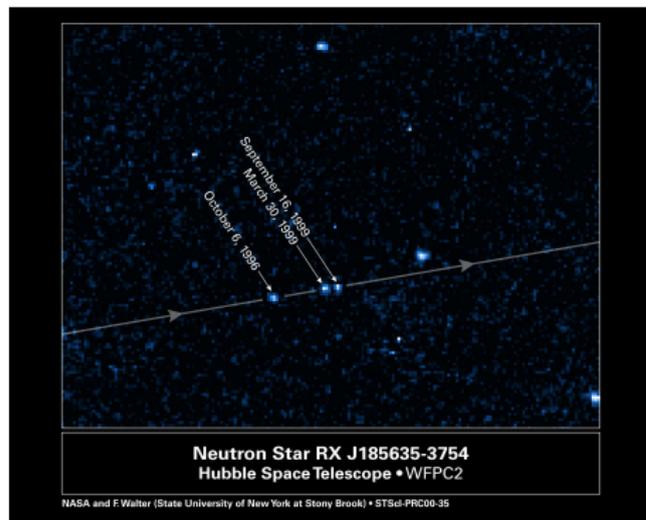
Neutronensterne sind nur für $M \lesssim 3 - 4 M_{\odot}$ stabil. Danach:

Keine Möglichkeit, der Gravitation entgegenzuwirken \Rightarrow *Schwarzes Loch*



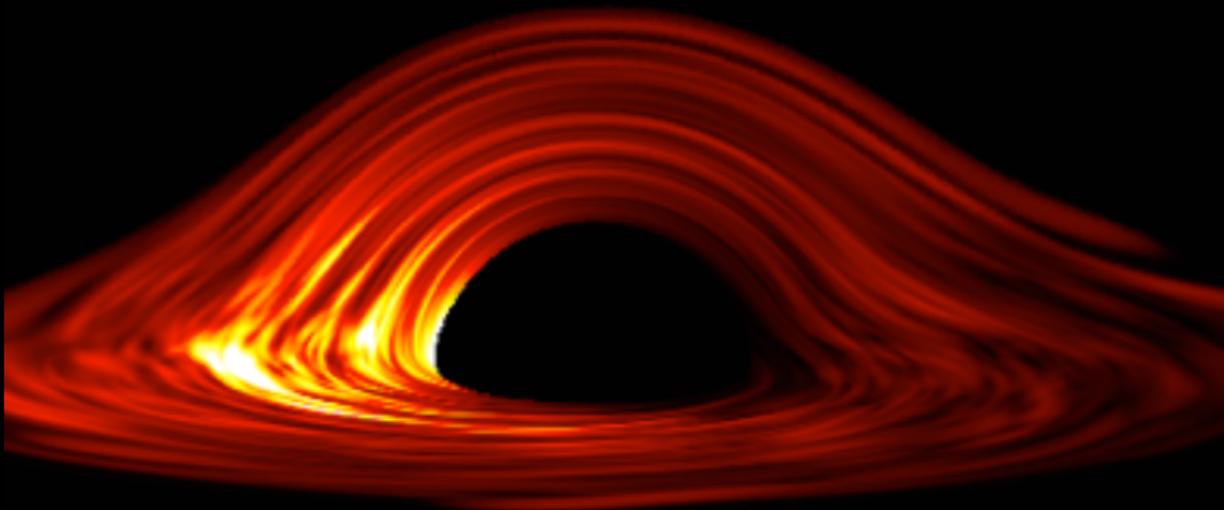
Eigenschaften

- Den Radius, auf den man ein Objekt komprimieren muss, damit es zum Schwarzen Loch wird, nennt man Schwarzschildradius (Sonne: ≈ 3 km, Erde: ≈ 9 mm)
- Ereignishorizont: Abstand vom schwarzen Loch, ab dem auch Licht nicht mehr entweichen kann



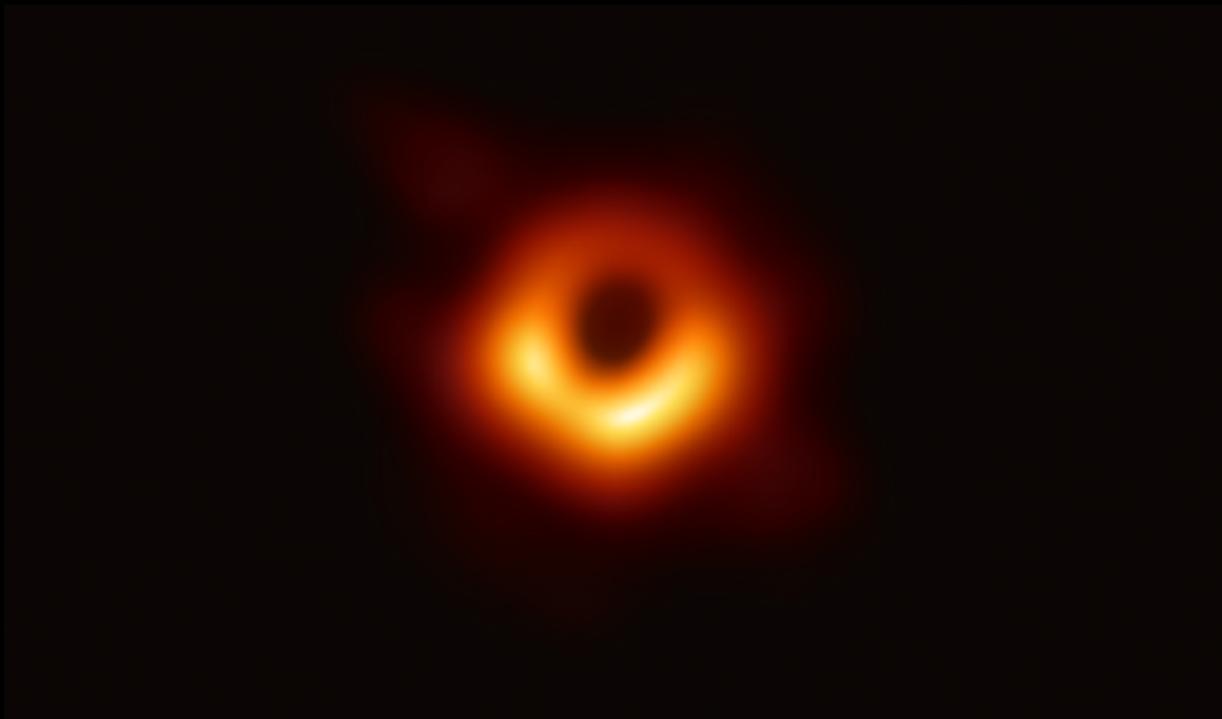
Neutronenstern RX J185635-3754 [NASA and F.M. Walter (State University of New York at Stony Brook)]

- Bei Neutronensternen ist direkte Beobachtung nur schwer, bei schwarzen Löchern nicht möglich
- Beobachtung über Akkretion: Gas stürzt auf den NS/ das SL und erhitzt sich stark ($T \approx 10$ Millionen K)
⇒ **Röntgenstrahlung**



Relativistische Effekte in Akkretionsscheibe

[C. Reynolds, <http://www.astro.umd.edu/~chris/Site/Welcome.html>]



Schwarzes Loch im Zentrum von M87 (6,5 Milliarden Sonnenmassen)

[Event Horizon Telescope Collaboration]



Bereich um das galaktische Zentrum im Röntgenlicht; zu erkennen sind hunderte Weiße Zwerge, Neutronensterne und schwarze Löcher. Aufgenommen mit Chandra

[NASA/UMass/D.Wang et al.]

- Ralph Klessen: Sternentstehung: Vom Urknall bis zur Geburt der Sonne (Astrophysik Aktuell), Spektrum akad. Verlag, Heidelberg (2007)
Leicht verständliches Büchlein zur Einführung, in der NAA-Bibliothek vorhanden
- Achim Weiß: Sterne: Was ihr Licht über die Materie im Kosmos verrät (Astrophysik Aktuell), Spektrum akad. Verlag, Heidelberg (2008)
Leicht verständliches Büchlein zur Einführung, in der NAA-Bibliothek vorhanden
- Hans-Thomas Janka: Supernovae und kosmische Gammablitze: Ursachen und Folgen von Sternexplosionen (Astrophysik Aktuell), Spektrum akad. Verlag, Heidelberg (2011)
Leicht verständliches Büchlein zur Einführung, in der NAA-Bibliothek vorhanden
- Rudolph Kippenhahn: 100 Milliarden Sonnen - Geburt, Leben und Tod der Sterne, Büchergilde Gutenberg Frankfurt (1981)
Ausführliches Buch über Sternentwicklung, populärwissenschaftliches Standardwerk, in der NAA-Bibliothek vorhanden
- Albrecht Unsöld, Bodo Baschek: Der neue Kosmos: Einführung in die Astronomie und Astrophysik, Springer, Berlin (2002)
Höherer Anspruch, mathematische und physikalische Grundkenntnisse werden vorausgesetzt, bewegt sich auf dem Niveau einer Astronomie-Grundvorlesung, in der NAA-Bibliothek vorhanden
- www.hubblesite.org
- www.eso.org

 [Wilms J.](#)
Vorlesung „Introduction to Astronomy I/II“ 2006/2007

 [Heber U.](#)
Vorlesung „Sternaufbau und Sternentwicklung“ 2007/2008

 [Albrecht Unsöld, Bodo Baschek](#)
Der neue Kosmos: Einführung in die Astronomie und Astrophysik, Springer, Berlin (2002)

 [Rudolph Kippenhahn, Alfred Weigert](#)
Stellar Structure and Evolution, Springer, 3. Auflage 1994