

Sternaufbau und Sternentwicklung – Teil 2

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

Nürnberger Astronomische Arbeitsgemeinschaft e.V.

Grundkurs Astronomie
3. November 2025



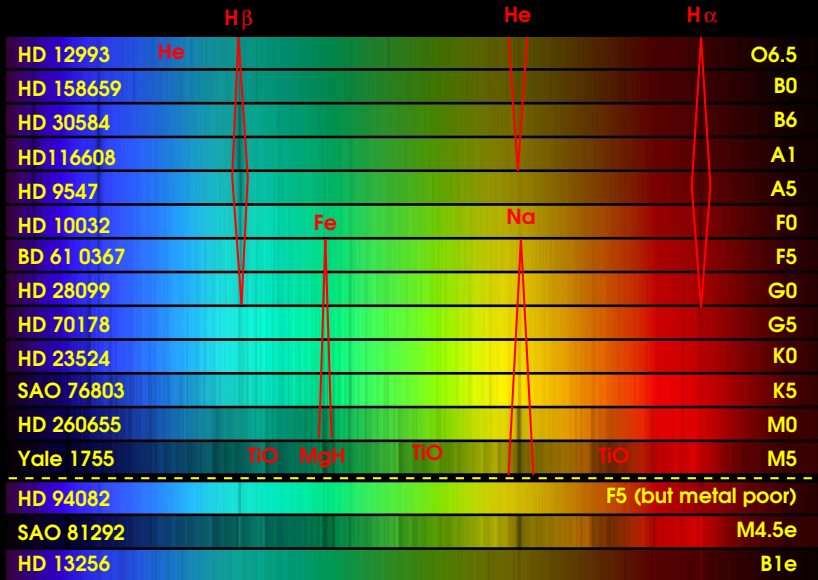
1 Wiederholung

2 Sternaufbau

- Sonne
- Massereiche Sterne

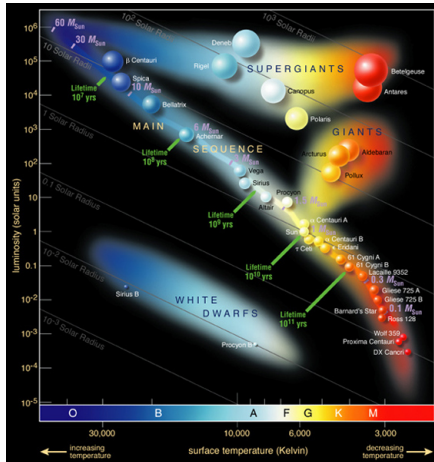
3 Entwicklung und Endstadien von Sternen

- Entwicklung massearmer Sterne
- Weiße Zwerge
- Entwicklung massereicher Sterne
- Neutronensterne
- Schwarze Löcher



Spektralklassen [NOAO]

Hertzsprung-Russell-Diagramm (HRD)



Hertzsprung-Russell-Diagramm [ESO]

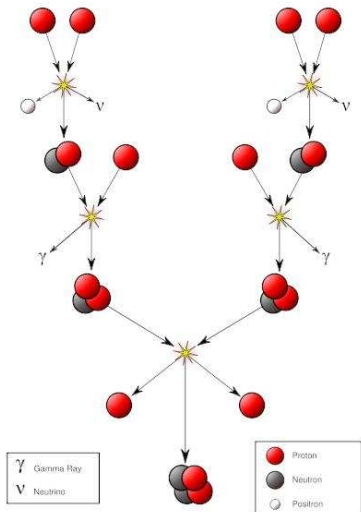
Absolute Helligkeit oder Leuchtkraft, aufgetragen gegen Spektralklasse oder Temperatur

Proton-Proton-Zyklus

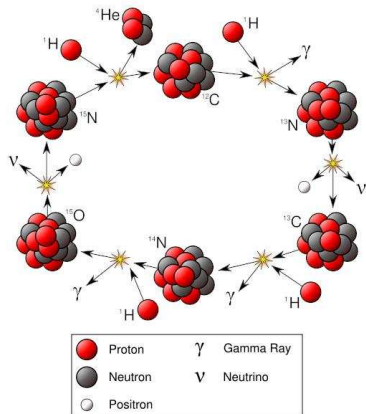
Energiequelle der Sonne: Kernfusion

Dominierender Prozess in der Sonne

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

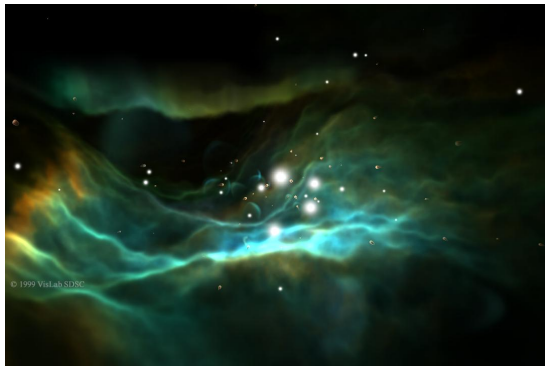


Bethe-Weizsäcker-Zyklus



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

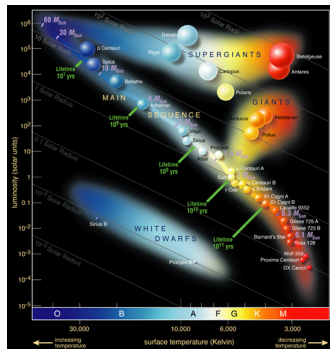
$$\epsilon_{\text{CNO}} \propto T^{17}$$



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

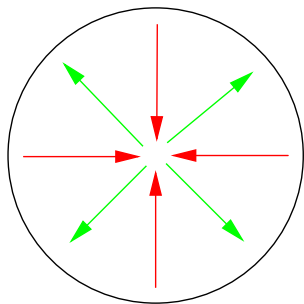
Hauptreihensterne



Hertzsprung-Russell-Diagramm [ESO]

- den größten Teil seines Lebens verbringt ein Stern auf der Hauptreihe
- nahezu konstante Energieerzeugung durch Wasserstoffbrennen
- Hauptreihensterne befinden sich im hydrostatischen Gleichgewicht

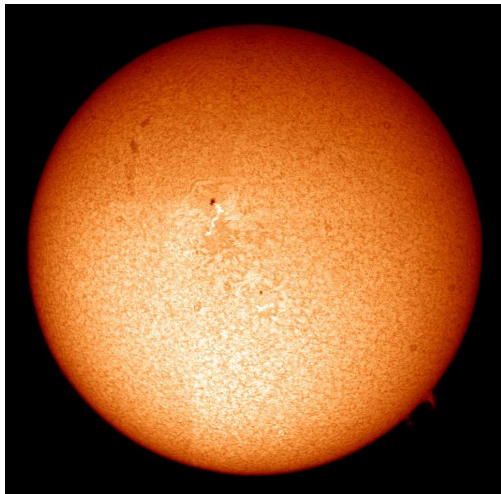
Hydrostatisches Gleichgewicht



- 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 ($H\alpha$)

[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

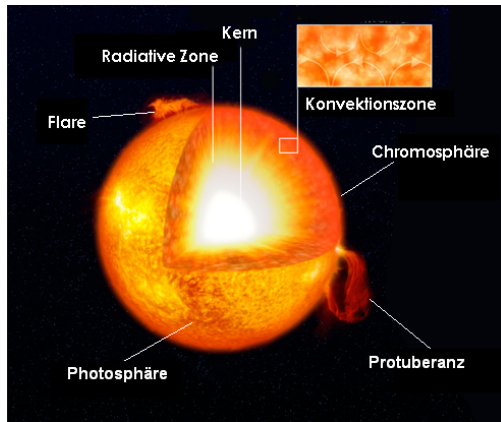
Zusammensetzung in Massenprozent:

- 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

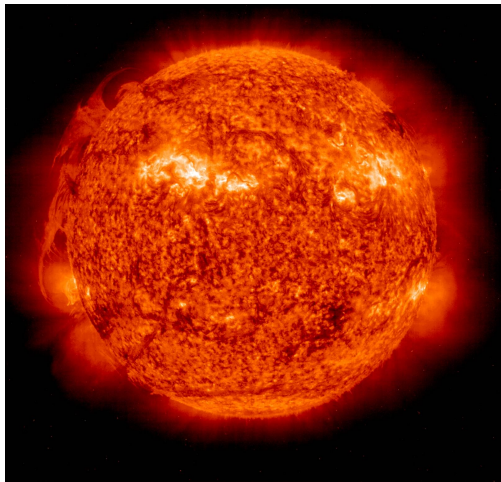
Sonne: Innere Struktur



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)

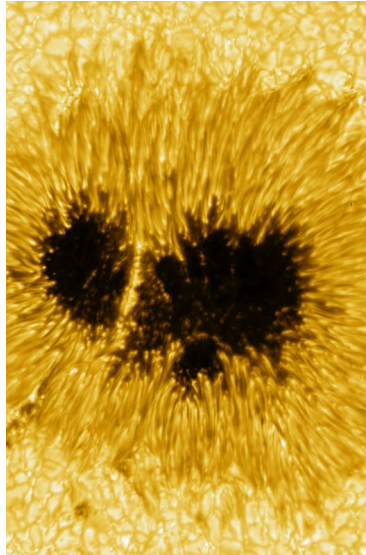
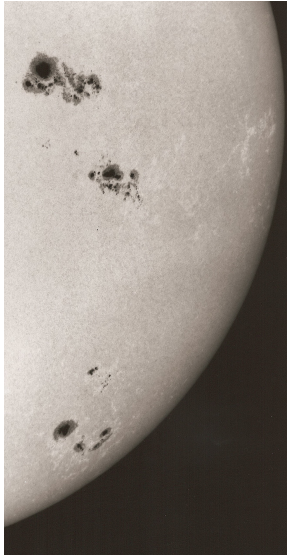
Sonne: Oberfläche und Atmosphäre



Sonne im UV [SOHO ESA/NASA]

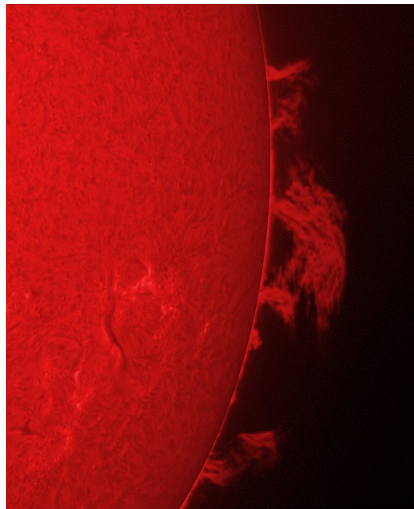
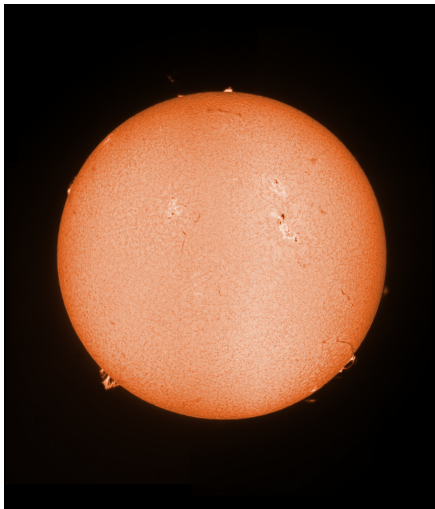
- Sonnenflecken: ca. 1000 K-2000 K kühlere Bereiche
- Protuberanzen: Materieströme, oft mehrere 100.000 km groß
- Photosphäre: sichtbare Sonnenoberfläche (Sonne hat keine echte Oberfläche)
- Korona: mehrere Mio. K heiße Atmosphäre mit sehr geringer Dichte

Sonnenflecken

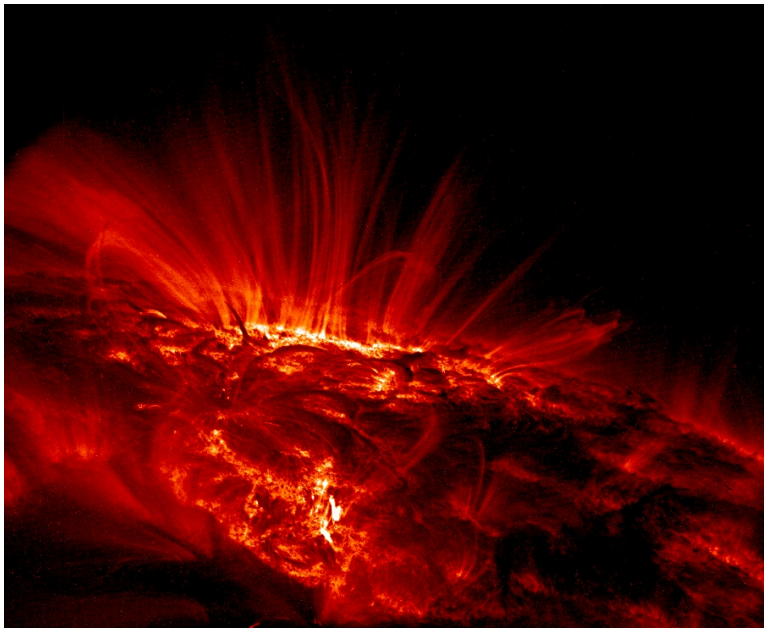


[Hans Bernhard / Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung]

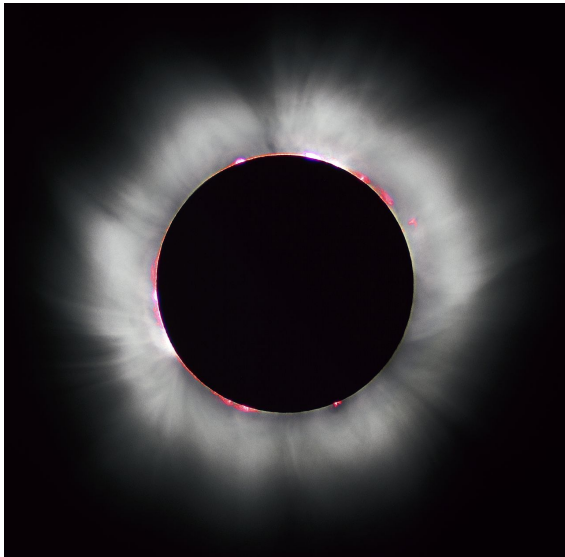
Protuberanzen



[Thomas Jäger (NAA)]

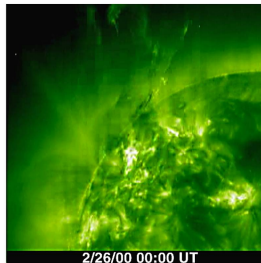
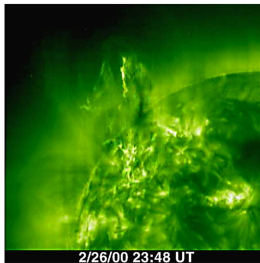
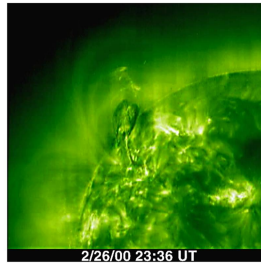
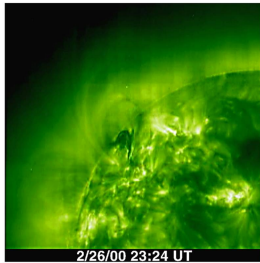


[TRACE Project, NASA]

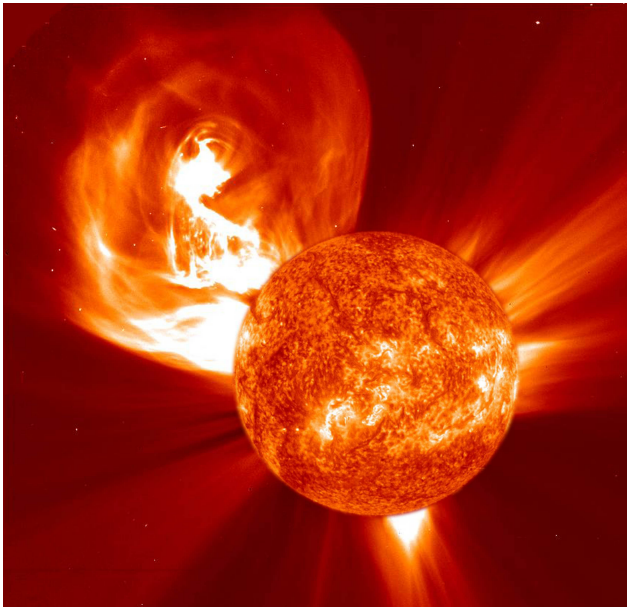


[Luc Viatour, www.lucnix.be]

Koronaler Masseauswurf

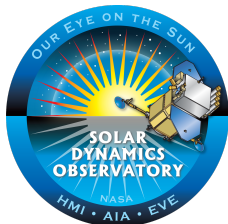


Koronaler Masseauswurf im UV [SOHO (ESA & NASA)]



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

Solar Dynamics Observatory (SDO)



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

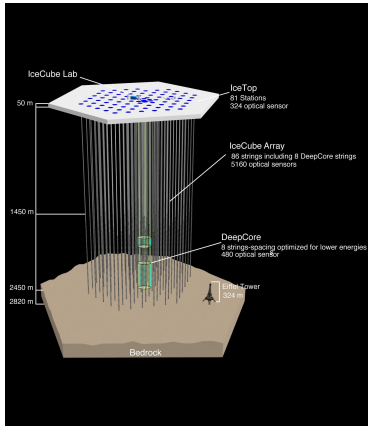
Coronaler Masseauswurf (CME)

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/>

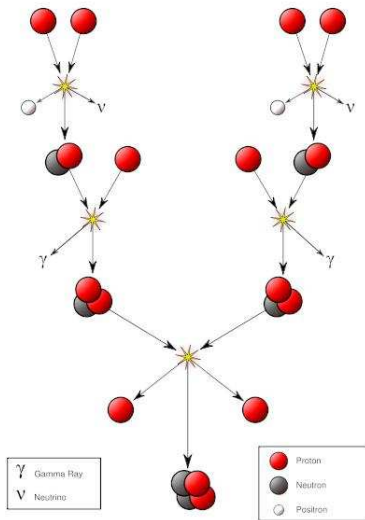
Blick ins Sonneninnere



Neutrinoobservatorium IceCube
[IceCube Collaboration]

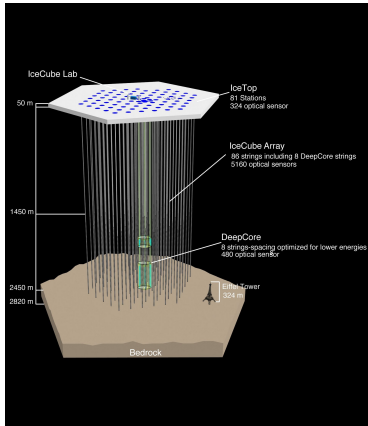
- *Helioseismologie*
Messung von Schallwellen in der Sonne
- *Neutrinos*
entstehen im Kern der Sonne bei Kernfusion und können die Sonne ungehindert verlassen, sind aber nur sehr schwer nachzuweisen
- Computersimulationen spielen wichtige Rolle, ausreichend leistungsstarke Computer aber noch nicht lange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

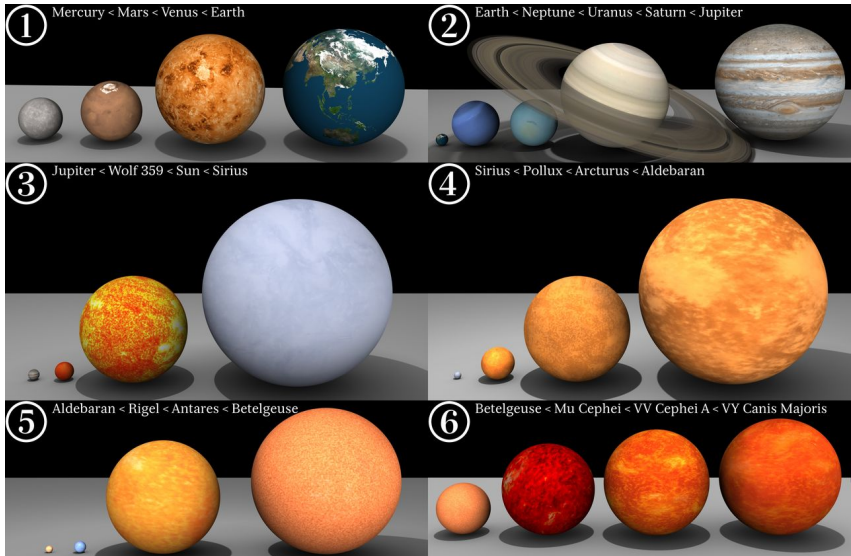
Blick ins Sonneninnere



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

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

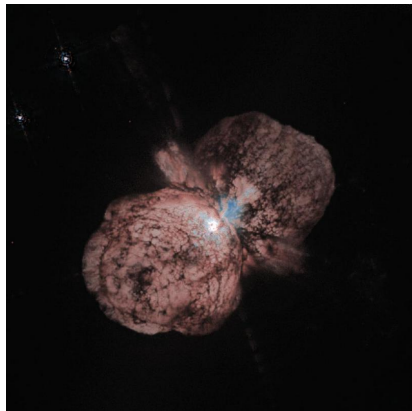
- Neutronenstern

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

- Schwarzes Loch

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

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



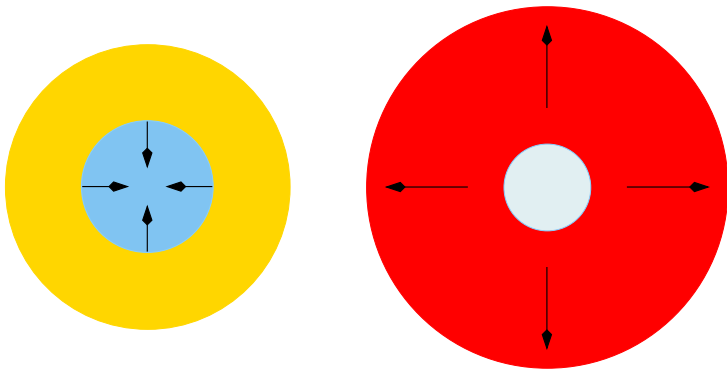
Eta Carinae [Jon Morse (University of Colorado), and NASA]

Post-Hauptreihen-Entwicklung I

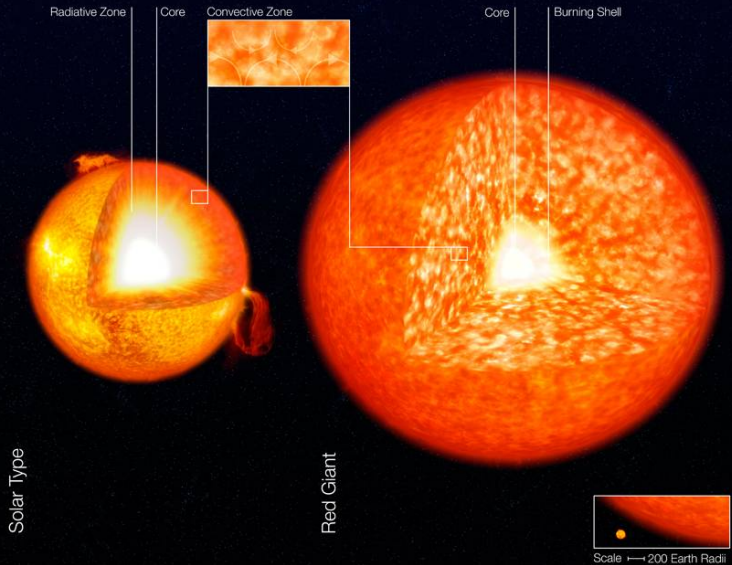
Weitere Entwicklung eines Hauptreihensterns mit $M \lesssim 8 M_{\odot}$:

- 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

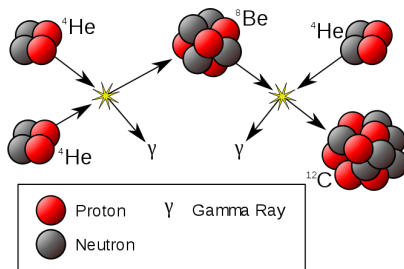
Red Giant

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

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

Post-Hauptreihen-Entwicklung III

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

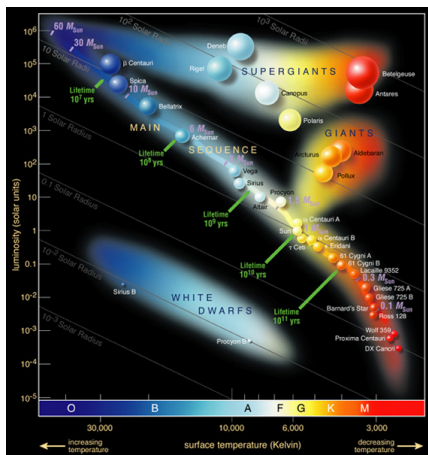


Triple-Alpha-Prozess [Wikipedia]

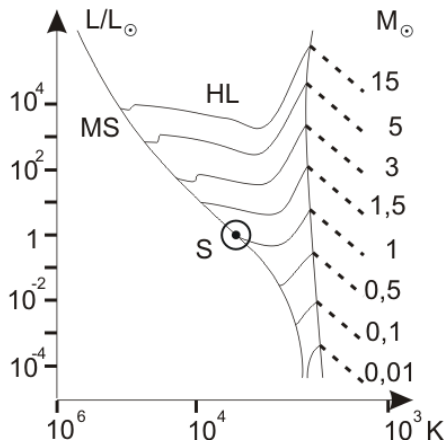
Post-Hauptreihen-Entwicklung IV

- 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!)

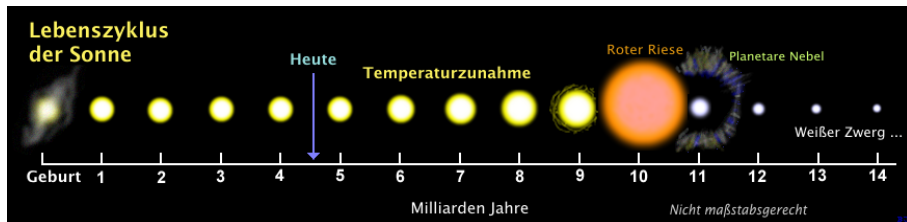
Sternentwicklung im HRD



[ESO/Wikipedia]



Entwicklung der Sonne

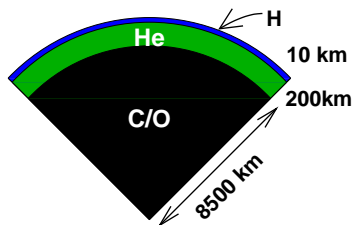


[Wikipedia]

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

Weißer Zwerg

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

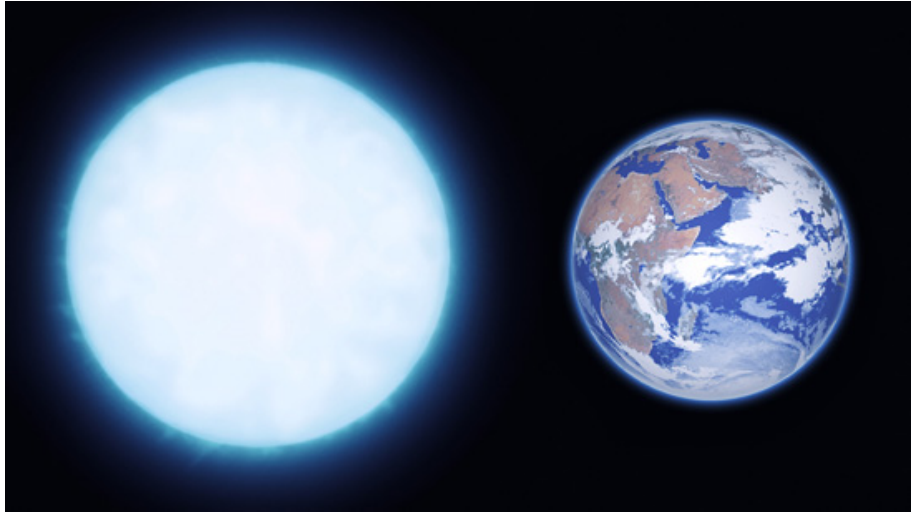


Aufbau eines Weißen Zwergs [Wilms]

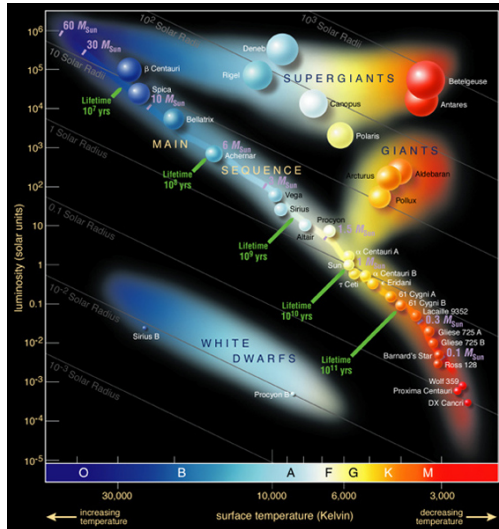
Eigenschaften

- 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

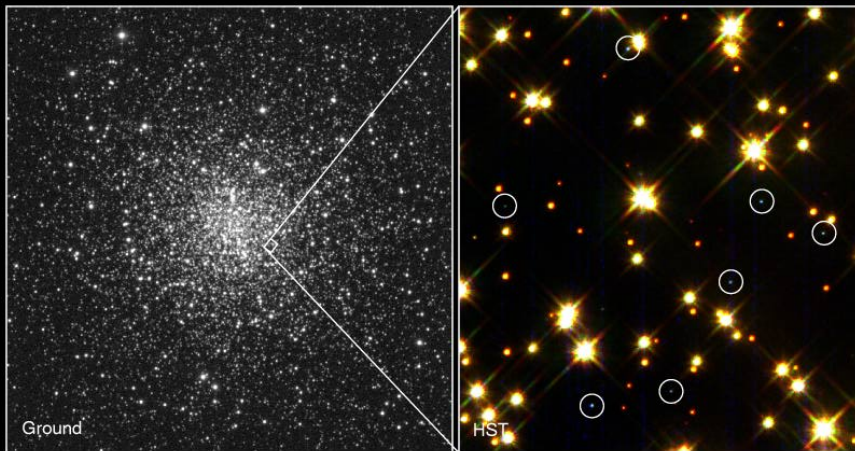
Vergleich Weißer Zwerg – Erde



Hertzsprung-Russell-Diagramm (HRD)



Hertzsprung-Russell-Diagramm [ESO]



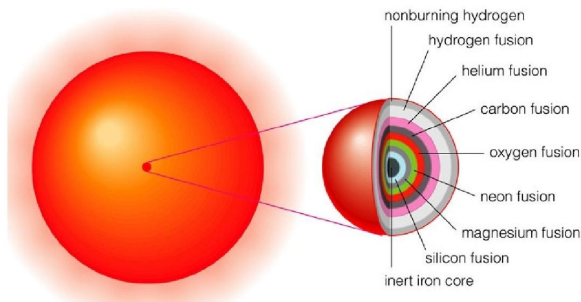
White Dwarf Stars in M4

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

HST · WFPC2

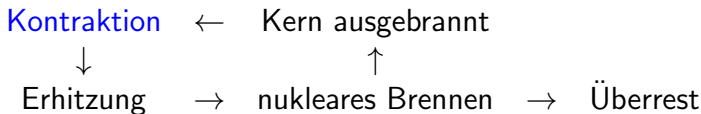
Entwicklung massereicher Sterne

- 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

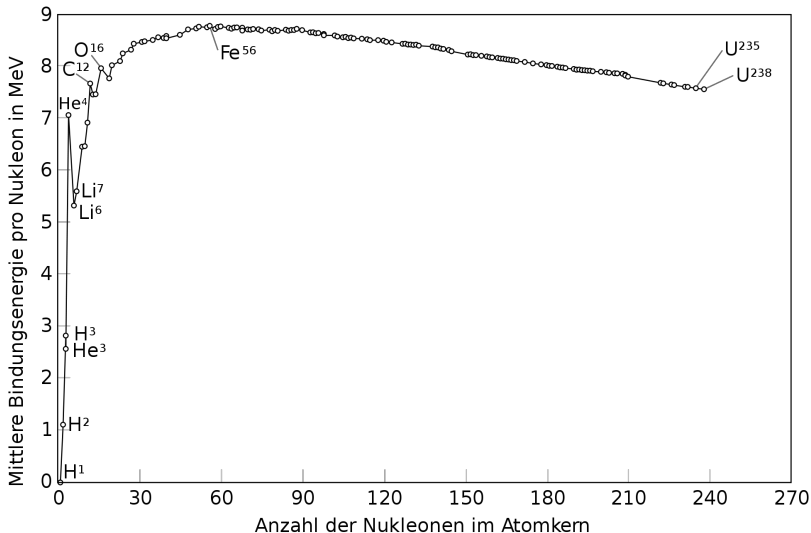
Periodensystem der Elemente

<div> <div>1</div> <div>1. Hg IA</div> <div>1.00794</div> <div>¹H</div> <div>-1,1</div> <div>1</div> <div>Wasserstoff</div> </div> <div> <div>2</div> <div>2. Hg IIA</div> <div>9.01218</div> <div>⁴He</div> <div>0,0</div> <div>2</div> <div>Helium</div> </div>																	
<div> <div>3</div> <div>3. Hg IIIA</div> <div>22.98976</div> <div>¹¹Li</div> <div>0,0</div> <div>3</div> <div>Lithium</div> </div> <div> <div>4</div> <div>4. Hg IVA</div> <div>9.01218</div> <div>⁹Be</div> <div>0,0</div> <div>4</div> <div>Beryllium</div> </div>																	
<div> <div>5</div> <div>5. Hg VA</div> <div>22.98976</div> <div>¹¹Na</div> <div>0,0</div> <div>5</div> <div>Natrium</div> </div> <div> <div>6</div> <div>6. Hg VIA</div> <div>22.98976</div> <div>¹²Mg</div> <div>0,0</div> <div>6</div> <div>Magnesium</div> </div>																	
<div> <div>7</div> <div>7. Hg VIIA</div> <div>39.0983</div> <div>¹⁹K</div> <div>0,0</div> <div>7</div> <div>Kalium</div> </div> <div> <div>8</div> <div>8. Hg VIIIA</div> <div>39.0983</div> <div>²⁰Ca</div> <div>0,0</div> <div>8</div> <div>Kalzium</div> </div>																	
<div> <div>9</div> <div>9. Hg</div> <div>85.4678</div> <div>³⁷Rb</div> <div>0,0</div> <div>9</div> <div>Rubidium</div> </div> <div> <div>10</div> <div>10. Hg</div> <div>85.4678</div> <div>³⁸Sr</div> <div>0,0</div> <div>10</div> <div>Strontium</div> </div>																	
<div> <div>11</div> <div>11. Hg</div> <div>132.90545</div> <div>⁵⁵Cs</div> <div>0,0</div> <div>11</div> <div>Cäsium</div> </div> <div> <div>12</div> <div>12. Hg</div> <div>132.90545</div> <div>⁵⁶Ba</div> <div>0,0</div> <div>12</div> <div>Baryum</div> </div>																	
<div> <div>13</div> <div>13. Hg</div> <div>223.01978</div> <div>⁸⁷Fr</div> <div>0,0</div> <div>13</div> <div>Francium</div> </div> <div> <div>14</div> <div>14. Hg</div> <div>223.01978</div> <div>⁸⁸Ra</div> <div>0,0</div> <div>14</div> <div>Radium</div> </div>																	
<div> <div>15</div> <div>15. Hg</div> <div>223.01978</div> <div>⁸⁹Ac</div> <div>0,0</div> <div>15</div> <div>Actinoid</div> </div> <div> <div>16</div> <div>16. Hg</div> <div>223.01978</div> <div>¹⁰⁴Rf</div> <div>0,0</div> <div>16</div> <div>Rutherfordium</div> </div>																	
<div> <div>17</div> <div>17. Hg</div> <div>223.01978</div> <div>¹⁰⁵Db</div> <div>0,0</div> <div>17</div> <div>Dubnium</div> </div> <div> <div>18</div> <div>18. Hg</div> <div>223.01978</div> <div>¹⁰⁶Sg</div> <div>0,0</div> <div>18</div> <div>Seaborgium</div> </div>																	
<div> <div>19</div> <div>19. Hg</div> <div>223.01978</div> <div>¹⁰⁷Bh</div> <div>0,0</div> <div>19</div> <div>Bohrium</div> </div> <div> <div>20</div> <div>20. Hg</div> <div>223.01978</div> <div>¹⁰⁸Hs</div> <div>0,0</div> <div>20</div> <div>Hassium</div> </div>																	
<div> <div>21</div> <div>21. Hg</div> <div>223.01978</div> <div>¹⁰⁹Mt</div> <div>0,0</div> <div>21</div> <div>Mendelevium</div> </div> <div> <div>22</div> <div>22. Hg</div> <div>223.01978</div> <div>¹¹⁰Ds</div> <div>0,0</div> <div>22</div> <div>Darmstadtium</div> </div>																	
<div> <div>23</div> <div>23. Hg</div> <div>223.01978</div> <div>¹¹¹Uu</div> <div>0,0</div> <div>23</div> <div>Ununium</div> </div> <div> <div>24</div> <div>24. Hg</div> <div>223.01978</div> <div>¹¹²Uub</div> <div>0,0</div> <div>24</div> <div>Unbibium</div> </div>																	
<div> <div>25</div> <div>25. Hg</div> <div>223.01978</div> <div>¹¹³Uut</div> <div>0,0</div> <div>25</div> <div>Untrium</div> </div> <div> <div>26</div> <div>26. Hg</div> <div>223.01978</div> <div>¹¹⁴Uuq</div> <div>0,0</div> <div>26</div> <div>Unquadium</div> </div>																	
<div> <div>27</div> <div>27. Hg</div> <div>223.01978</div> <div>¹¹⁵Uup</div> <div>0,0</div> <div>27</div> <div>Unpentium</div> </div> <div> <div>28</div> <div>28. Hg</div> <div>223.01978</div> <div>¹¹⁶Uuh</div> <div>0,0</div> <div>28</div> <div>Unsextium</div> </div>																	
<div> <div>29</div> <div>29. Hg</div> <div>223.01978</div> <div>¹¹⁷Uus</div> <div>0,0</div> <div>29</div> <div>Unseptium</div> </div> <div> <div>30</div> <div>30. Hg</div> <div>223.01978</div> <div>¹¹⁸Uuo</div> <div>0,0</div> <div>30</div> <div>Unoktium</div> </div>																	

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

132.90505 paper	140.116 paper	140.90768 paper	144.242 paper	[145] paper	150.36 paper	151.964 paper	157.25 paper	158.92534 paper	162.50 paper	164.93032 paper	167.26 paper	168.93421 paper	173.045 paper	174.967 paper
⁵³ Ia	⁵⁴ Ce	⁵⁹ Pr	⁶⁰ Nd	⁶¹ Pm	⁶² Sm	⁶³ Eu	⁶⁴ Gd	⁶⁵ Tb	⁶⁶ Dy	⁶⁷ Ho	⁶⁸ Er	⁶⁹ Tm	⁷⁰ Yb	⁷¹ Lu
127.3078 Iodine	140.90768 Cerium	140.90768 Praseodym	144.242 Neodymium	145 Promethium	150.36 Samarium	151.964 Europium	157.25 Gadolinium	158.92534 Terbium	162.50 Dysprosium	164.93032 Holmium	167.26 Erbium	168.93421 Thulium	173.045 Ytterbium	174.967 Lutetium
53	54	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
132.90505	140.116	140.90768	144.242	[145]	150.36	151.964	157.25	158.92534	162.50	164.93032	167.26	168.93421	173.045	174.967
⁵³ Ia	⁵⁴ Ce	⁵⁹ Pr	⁶⁰ Nd	⁶¹ Pm	⁶² Sm	⁶³ Eu	⁶⁴ Gd	⁶⁵ Tb	⁶⁶ Dy	⁶⁷ Ho	⁶⁸ Er	⁶⁹ Tm	⁷⁰ Yb	⁷¹ Lu
127.3078	140.90768	140.90768	144.242	145	150.36	151.964	157.25	158.92534	162.50	164.93032	167.26	168.93421	173.045	174.967
Iodine	Cerium	Praseodym	Neodymium	Promethium	Samarium	Europium	Gadolinium	Terbium	Dysprosium	Holmium	Erbium	Thulium	Ytterbium	Lutetium
53	54	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
132.90505	140.116	140.90768	144.242	[145]	150.36	151.964	157.25	158.92534	162.50	164.93032	167.26	168.93421	173.045	174.967
⁵³ Ia	⁵⁴ Ce	⁵⁹ Pr	⁶⁰ Nd	⁶¹ Pm	⁶² Sm	⁶³ Eu	⁶⁴ Gd	⁶⁵ Tb	⁶⁶ Dy	⁶⁷ Ho	⁶⁸ Er	⁶⁹ Tm	⁷⁰ Yb	⁷¹ Lu
127.3078	140.90768	140.90768	144.242	145	150.36	151.964	157.25	158.92534	162.50	164.93032	167.26	168.93421	173.045	174.967
Iodine	Cerium	Praseodym	Neodymium	Promethium	Samarium	Europium	Gadolinium	Terbium	Dysprosium	Holmium	Erbium	Thulium	Ytterbium	Lutetium
53	54	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
132.90505	140.116	140.90768	144.242	[145]	150.36	151.964	157.25	158.92534	162.50	164.93032	167.26	168.93421	173.045	174.967
⁵³ Ia	⁵⁴ Ce	⁵⁹ Pr	⁶⁰ Nd	⁶¹ Pm	⁶² Sm	⁶³ Eu	⁶⁴ Gd	⁶⁵ Tb	⁶⁶ Dy	⁶⁷ Ho	⁶⁸ Er	⁶⁹ Tm	⁷⁰ Yb	⁷¹ Lu
127.3078	140.90768	140.90768	144.242	145	150.36	151.964	157.25	158.92534	162.50	164.93032	167.26	168.93421	173.045	174.967
Iodine	Cerium	Praseodym	Neodymium	Promethium	Samarium	Europium	Gadolinium	Terbium	Dysprosium	Holmium	Erbium	Thulium	Ytterbium	Lutetium
53	54	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
132.90505	140.116	140.90768	144.242	[145]	150.36	151.964	157.25	158.92534	162.50	164.93032	167.26	168.93421	173.045	174.967
⁵³ Ia	⁵⁴ Ce	⁵⁹ Pr	⁶⁰ Nd	⁶¹ Pm	⁶² Sm	⁶³ Eu	⁶⁴ Gd	⁶⁵ Tb	⁶⁶ Dy	⁶⁷ Ho	⁶⁸ Er	⁶⁹ Tm	⁷⁰ Yb	⁷¹ Lu
127.3078	140.90768	140.90768	144.242	145	150.36	151.964	157.25	158.92534	162.50	164.93032	167.26	168.93421	173.045	174.967
Iodine	Cerium	Praseodym	Neodymium	Promethium	Samarium	Europium	Gadolinium	Terbium	Dysprosium	Holmium	Erbium	Thulium	Ytterbium	Lutetium
53	54	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
132.90505	140.116	140.90768	144.242	[145]	150.36	151.964	157.25	158.92534	162.50	164.93032	167.26	168.93421	173.045	174.967
⁵³ Ia	⁵⁴ Ce	⁵⁹ Pr	⁶⁰ Nd	⁶¹ Pm	⁶² Sm	⁶³ Eu	⁶⁴ Gd	⁶⁵ Tb	⁶⁶ Dy	⁶⁷ Ho	⁶⁸ Er	⁶⁹ Tm	⁷⁰ Yb	⁷¹ Lu
127.3078	140.90768	140.90768	144.242	145	150.36	151.964	157.25	158.92534	162.50	164.93032	167.26	168.93421	173.045	174.967
Iodine	Cerium	Praseodym	Neodymium	Promethium	Samarium	Europium	Gadolinium	Terbium	Dysprosium	Holmium	Erbium	Thulium	Ytterbium	Lutetium
53	54	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
132.90505	140.116	140.90768	144.242	[145]	150.36	151.964	157.25	158.92534	162.50	164.93032	167.26	168.93421	173.045	174.967
⁵³ Ia	⁵⁴ Ce	⁵⁹ Pr	⁶⁰ Nd	⁶¹ Pm	⁶² Sm	⁶³ Eu	⁶⁴ Gd	⁶⁵ Tb	⁶⁶ Dy	⁶⁷ Ho	⁶⁸ Er	⁶⁹ Tm	⁷⁰ Yb	⁷¹ Lu
127.3078	140.90768	140.90768	144.242	145	150.36	151.964	157.25	158.92534	162.50	164.93032	167.26	168.93421	173.045	174.967
Iodine	Cerium	Praseodym	Neodymium	Promethium	Samarium	Europium	Gadolinium	Terbium	Dysprosium	Holmium	Erbium	Thulium	Ytterbium	Lutetium
53	54	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
132.90505	140.116	140.90768	144.242	[145]	150.36	151.964	157.25	158.92534	162.50	164.93032	167.26	168.93421	173.045	174.967
⁵³ Ia	⁵⁴ Ce	⁵⁹ Pr	⁶⁰ Nd	⁶¹ Pm	⁶² Sm	⁶³ Eu	⁶⁴ Gd	⁶⁵ Tb	⁶⁶ Dy	⁶⁷ Ho	⁶⁸ Er	⁶⁹ Tm	⁷⁰ Yb	⁷¹ Lu
127.3078	140.90768	140.90768	144.242	145	150.36	151.964	157.25	158.92534	162.50	164.93032	167.26	168.93421	173.045	174.967
Iodine	Cerium	Praseodym	Neodymium	Promethium	Samarium	Europium	Gadolinium	Terbium	Dysprosium	Holmium	Erbium	Thulium	Ytterbium	Lutetium
53	54	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
132.90505	140.116	140.90768	144.242	[145]	150.36	151.964	157.25	158.92534	162.50	164.93032	167.26	168.93421	173.045	174.967
⁵³ Ia	⁵⁴ Ce	⁵⁹ Pr	⁶⁰ Nd	⁶¹ Pm	⁶² Sm	⁶³ Eu	⁶⁴ Gd	⁶⁵ Tb	⁶⁶ Dy	⁶⁷ Ho	⁶⁸ Er	⁶⁹ Tm	⁷⁰ Yb	⁷¹ Lu
127.3078	140.90768	140.90768	144.242	145	150.36	151.964	157.25	158.92534	162.50	164.93032	167.26	168.93421	173.045	174.967
Iodine	Cerium	Praseodym	Neodymium	Promethium	Samarium	Europium	Gadolinium	Terbium	Dysprosium	Holmium	Erbium	Thulium	Ytterbium	Lutetium
53	54	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
132.90505	140.116	140.90768	144.242	[145]	150.36	151.964	157.25	158.92534	162.50	164.93032	167.26	168.93421	173.045	174.967
⁵³ Ia	⁵⁴ Ce	⁵⁹ Pr	⁶⁰ Nd	⁶¹ Pm	⁶² Sm	⁶³ Eu	⁶⁴ Gd	⁶⁵ Tb	⁶⁶ Dy	⁶⁷ Ho	⁶⁸ Er	⁶⁹ Tm	⁷⁰ Yb	⁷¹ Lu
127.3078	140.90768	140.90768	144.242	145	150.36	151.964	157.25	158.92534	162.50	164.93032	167.26	168.93421	173.045	174.967
Iodine	Cerium	Praseodym	Neodymium	Promethium	Samarium	Europium	Gadolinium	Terbium	Dysprosium	Holmium	Erbium	Thulium	Ytterbium	Lutetium
53	54	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
132.90505	140.116	140.90768	144.242	[145]	150.36	151.964	157.25	158.92534	162.50	164.93032	167.26	168.93421	173.045	174.967
⁵³ Ia	⁵⁴ Ce	⁵⁹ Pr	⁶⁰ Nd	⁶¹ Pm	⁶² Sm	⁶³ Eu	⁶⁴ Gd	⁶⁵ Tb	⁶⁶ Dy	⁶⁷ Ho	⁶⁸ Er	⁶⁹ Tm	⁷⁰ Yb	⁷¹ Lu
127.3078	140.90768	140.90768	144.242	145	150.36	151.964	157.25	158.92534	162.50	164.93032	167.26	168.93421	173.045	174.967
Iodine	Cerium	Praseodym	Neodymium	Promethium	Samarium	Europium	Gadolinium	Terbium	Dysprosium	Holmium	Erbium	Thulium	Ytterbium	Lutetium
53	54	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
132.90505	140.116	140.90768	144.242	[145]	150.36	151.964	157.25	158.92534	162.50	164.93032	167.26	168.93421	173.045	174.967
⁵³ Ia	⁵⁴ Ce	⁵⁹ Pr	⁶⁰ Nd	⁶¹ Pm	⁶² Sm	⁶³ Eu	⁶⁴ Gd	⁶⁵ Tb	⁶⁶ Dy	⁶⁷ Ho	⁶⁸ Er	⁶⁹ Tm	⁷⁰ Yb	⁷¹ Lu
127.3078	140.90768	140.90768	144.242	145	150.36	151.964	157.25	158.92534	162.50	164.93032	167.26	168.93421	173.045	174.967
Iodine	Cerium	Praseodym	Neodymium	Promethium	Samarium	Europium	Gadolinium	Terbium	Dysprosium	Holmium	Erbium	Thulium	Ytterbium	Lutetium
53	54	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
132.90505	140.116	140.90768	144.242	[145]	150.36	151.964	157.25	158.92534	162.50	164.93032	167.26	168.93421	173.045	174.967
⁵³ Ia	⁵⁴ Ce	⁵⁹ Pr	⁶⁰ Nd	⁶¹ Pm	⁶² Sm	⁶³ Eu	⁶⁴ Gd	⁶⁵ Tb	⁶⁶ Dy	⁶⁷ Ho	⁶⁸ Er	⁶⁹ Tm	⁷⁰ Yb	⁷¹ Lu
127.3078	140.90768	140.90768	144.242	145	150.36	151.964	157.25	158.92534	162.50	164.93032	167.26	168.93421	173.045	174.967
Iodine	Cerium	Praseodym	Neodymium	Promethium	Samarium	Europium	Gadolinium	Terbium	Dysprosium	Holmium	Erbium	Thulium	Ytterbium	Lutetium
53	54	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
132.90505	140.116	140.90768	144.242	[145]	150.36	151.964	157.25	158.92534	162.50	164.93032	167.26	168.93421	173.045	174.967
⁵³ Ia	⁵⁴ Ce	⁵⁹ Pr	⁶⁰ Nd	⁶¹ Pm	⁶² Sm	⁶³ Eu	⁶⁴ Gd	⁶⁵ Tb	⁶⁶ Dy	⁶⁷ Ho	⁶⁸ Er	⁶⁹ Tm	⁷⁰ Yb	⁷¹ Lu
127.3078	140.90768	140.90768	144.242	145	150.36	151.964	157.25	158.92534	162.50	164.93032	167.26	168.93421	173.045	174.967
Iodine	Cerium	Praseodym	Neodymium	Promethium	Samarium	Europium	Gadolinium	Terbium	Dysprosium	Holmium	Erbium	Thulium	Ytterbium	Lutetium
53	54	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
132.90505	140.116	140.90768	144.242	[145]	150.36	151.964	157.25	158.92534	162.50	164.93032	167.26	168.93421	173.045	174.967
⁵³ Ia	⁵⁴ Ce	⁵⁹ Pr	⁶⁰ Nd	⁶¹ Pm	⁶² Sm	⁶³ Eu	⁶⁴ Gd	⁶⁵ Tb	⁶⁶ Dy	⁶⁷ Ho	⁶⁸ Er	⁶⁹ Tm	⁷⁰ Yb	⁷¹ Lu
127.3078	140.90768	140.90768	144.242	145	150.36	151.964	157.25	158.92534	162.50	164.93032	167.26	168.93421	173.045	174.967
Iodine	Cerium	Praseodym	Neodymium	Promethium	Samarium	Europium	Gadolinium	Terbium	Dysprosium	Holmium	Erbium	Thulium	Ytterbium	Lutetium
53	54	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
132.90505	140.116	140.90768	144.242	[145]	150.36	151.964	157.25	158.92534	162.50	164.93032	167.26	168.93421	173.045	174.967
⁵³ Ia	⁵⁴ Ce	⁵⁹ Pr	⁶⁰ Nd	⁶¹ Pm	⁶² Sm	⁶³ Eu	⁶⁴ Gd	⁶⁵ Tb	⁶⁶ Dy	⁶⁷ Ho	⁶⁸ Er	⁶		

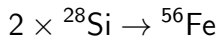
Bindungsenergie von Atomkernen



[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):

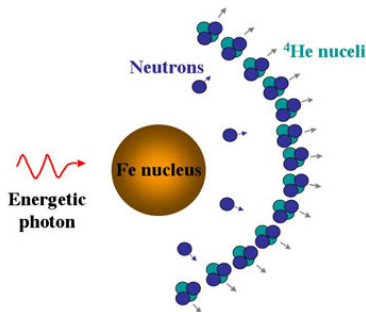


- Dieser letzte Fusionsprozess dauert nur noch wenige Stunden (!)

Danach keine Energiequelle mehr, die den Stern stabilisiert

Supernovae II

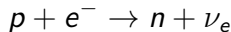
- Keine Energiequelle mehr
⇒ Kern schrumpft, T steigt
- Eisen wird durch Photodisintegration unter *Energieverlust* wieder in einzelne Protonen und Neutronen zerlegt



[Swinburne University of Technology]

Supernovae III

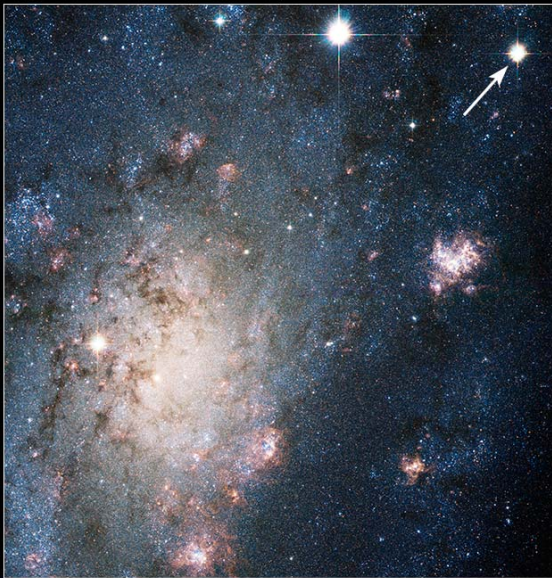
- Wenn Kerntemperatur ca. 8 Milliarden K: Neutronisation



- 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)



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

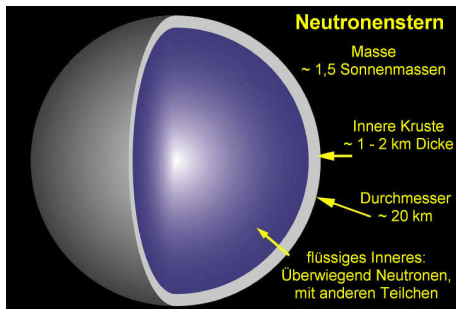
STScI-PRC04-23



Supernova 1994D in NGC 4526 (Entfernung: 108 Millionen Lichtjahre [NASA/ESA])

Neutronensterne

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



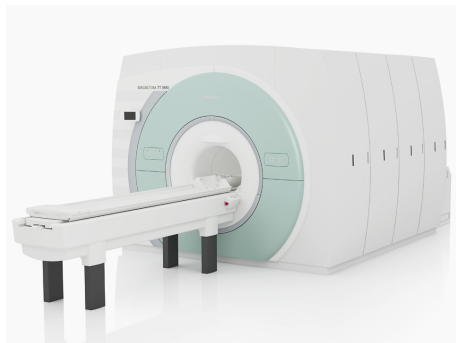
Aufbau eines Neutronensterns [NASA and F.M. Walter (NASA/Marshall Space Flight Center.)]

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*



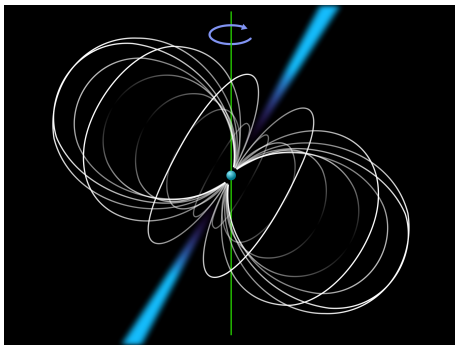
Magnetresonanztomograph mit 7 T Feldstärke
[Siemens Healthcare]

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*

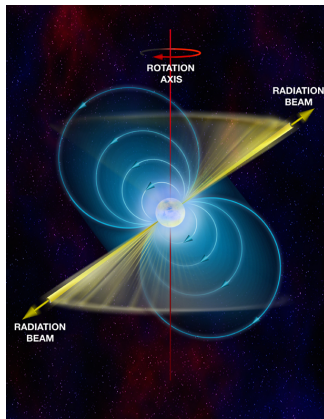


[Wikipedia]

Eigenschaften

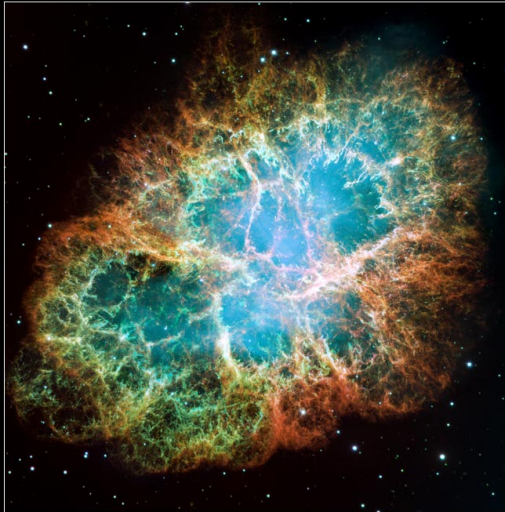
- besteht hauptsächlich aus Neutronen
- Radius: 10 – 15 km (Nürnberg)
- Dichte: ca. $10^{11} \frac{\text{kg}}{\text{cm}^3}$
- starkes Magnetfeld: ca. 10^8 T
- schnelle Rotation

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)

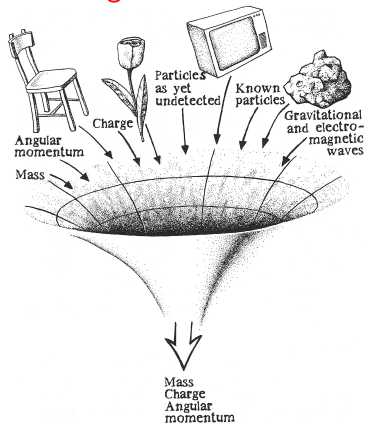
STScI-PRC05-37

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

Schwarze Löcher

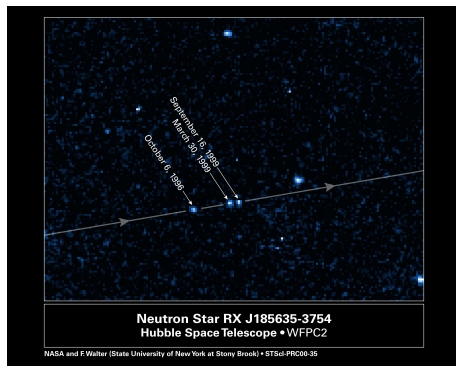
Neutronensterne sind nur für $M \lesssim 3 - 4 M_{\odot}$ stabil. Danach:

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



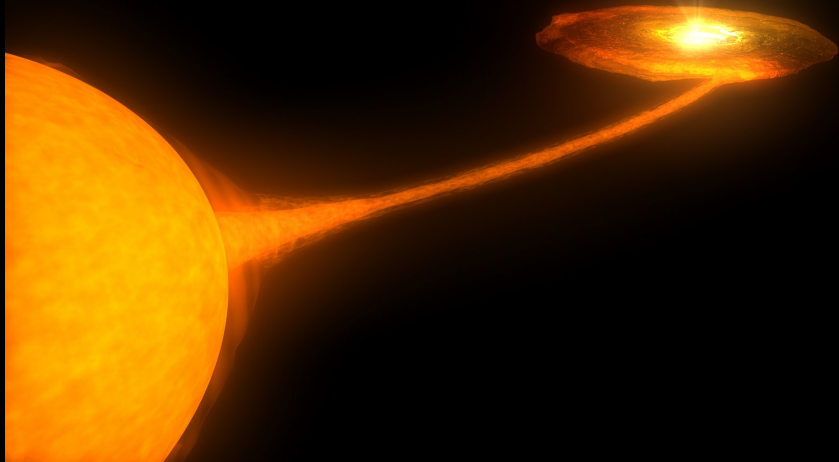
Eigenschaften

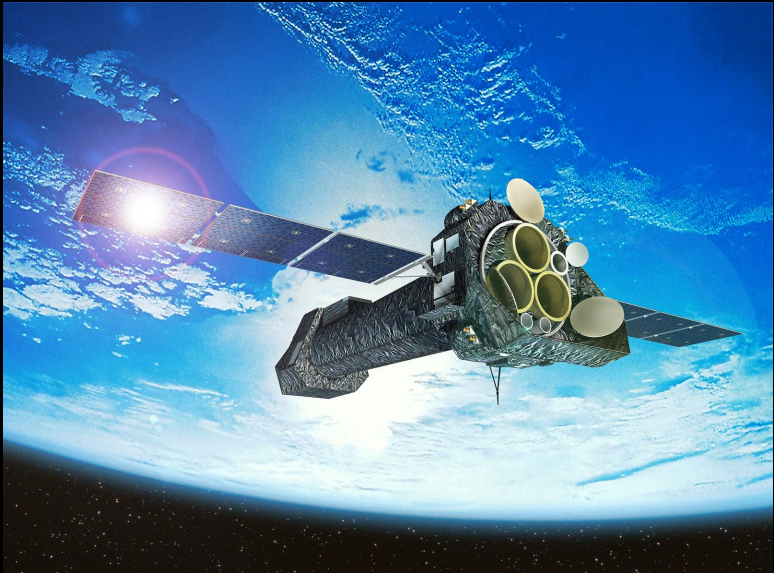
- Den Radius, auf den man ein Objekt komprimieren muss, damit es zum Schwarzen Loch wird, nennt man Schwarzschildradius (Sonne: ≈ 3 km, Erde: ≈ 9 mm)
- Ereignishorizont: Abstand vom schwarzen Loch, ab dem auch Licht nicht mehr entweichen kann



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**







Röntgenobservatorium XMM-Newton [ESA/D. Ducros]

- 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