

Sternaufbau und Sternentwicklung – Teil 2

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

Nürnberger Astronomische Arbeitsgemeinschaft e.V.

Grundkurs Astronomie
3. November 2025



Gliederung

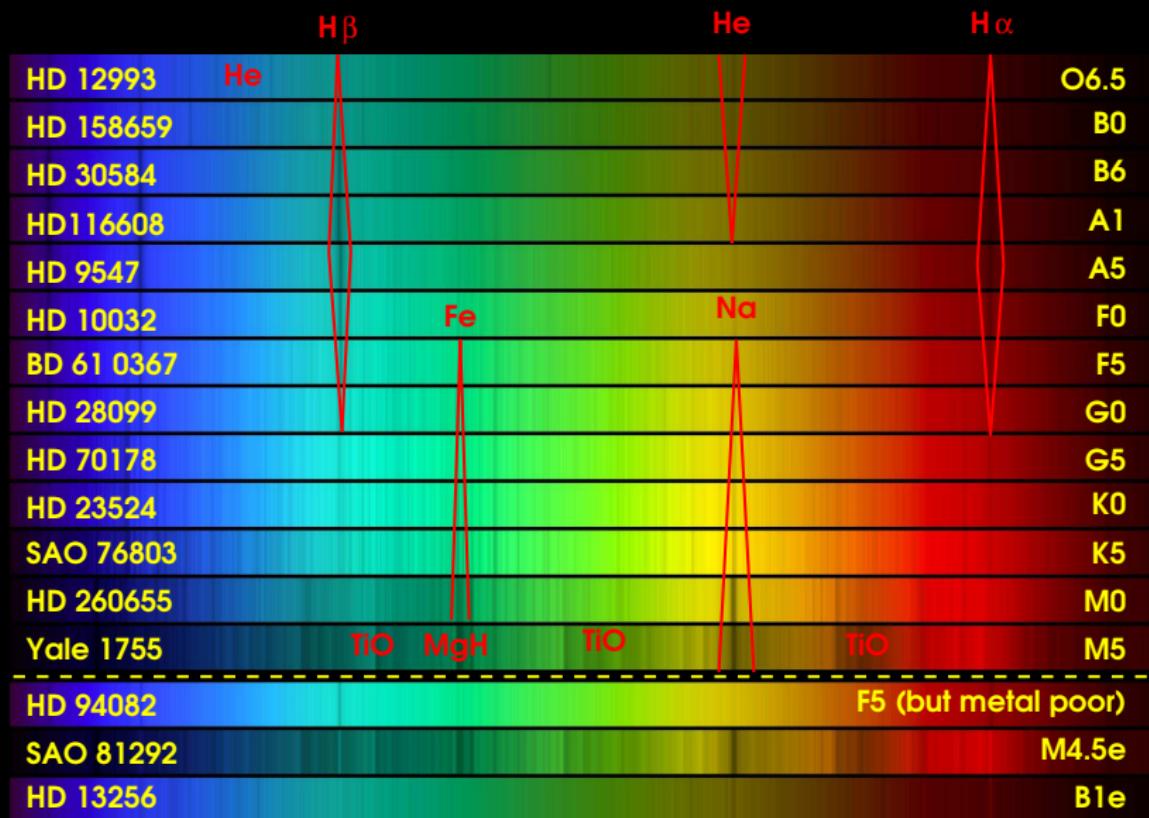
1 Wiederholung

2 Sternaufbau

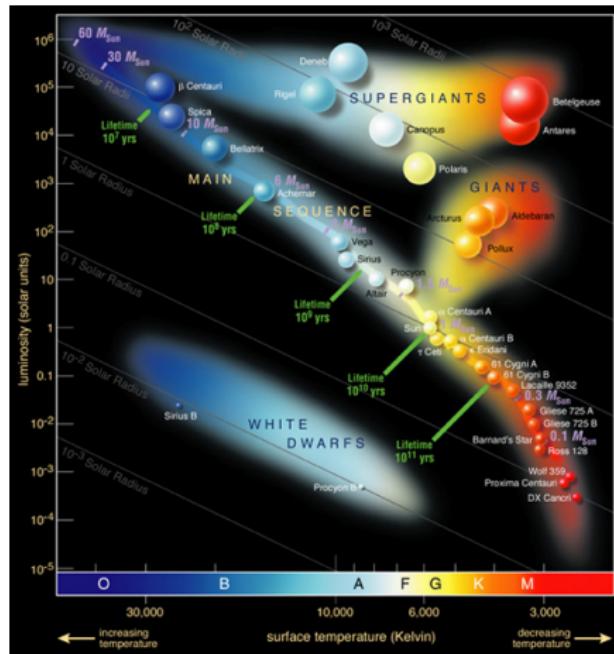
- Sonne
- Massereiche Sterne

3 Entwicklung und Endstadien von Sternen

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



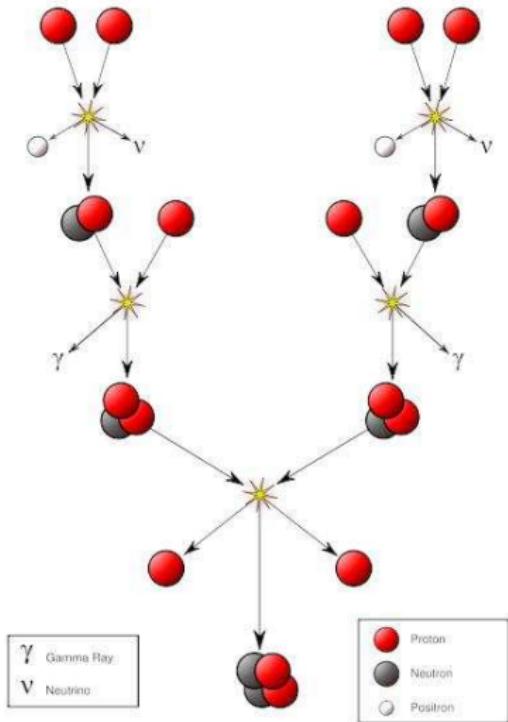
Hertzsprung-Russell-Diagramm (HRD)



Hertzsprung-Russell-Diagramm [ESO]

Absolute Helligkeit oder Leuchtkraft, aufgetragen gegen Spektralklasse oder Temperatur

Proton-Proton-Zyklus

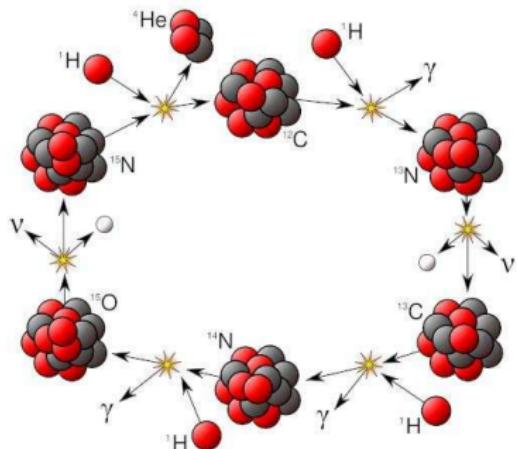


Energiequelle der Sonne: Kernfusion

Dominierender Prozess in der Sonne

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

Bethe-Weizsäcker-Zyklus

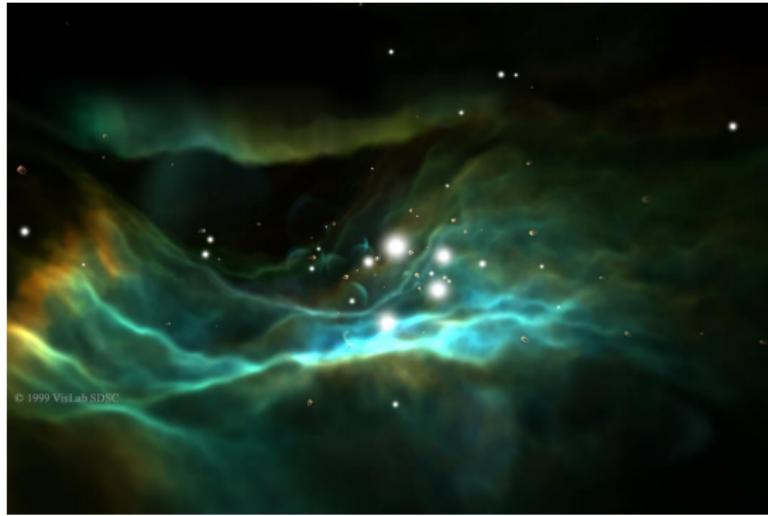


● Proton	γ	Gamma Ray
● Neutron	ν	Neutrino
○ Positron		

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

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

Sternentstehung



© 1999 VisLab SDSC

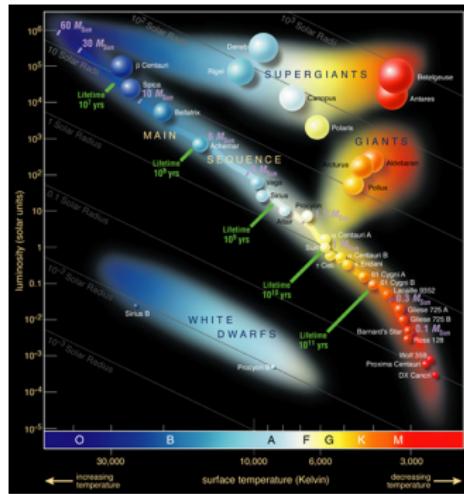
Sternentstehung im Orionnebel (Modellrechnung)
[VisLab SDSC]

- 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



Der offene Sternhaufen NGC 3603 [NASA, ESA, and the Hubble Heritage]

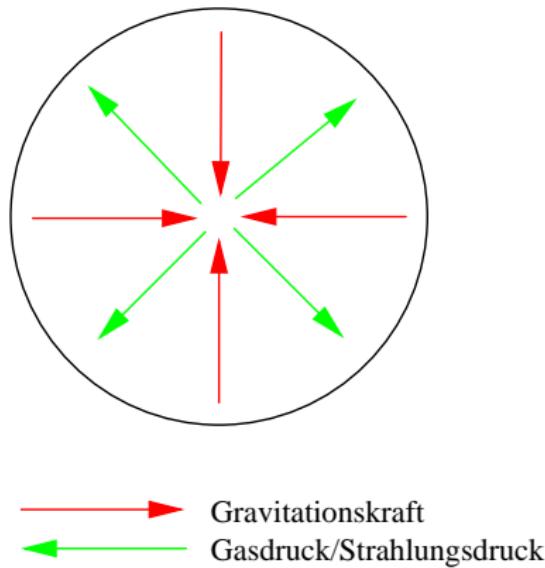
Hauptreihensterne



Hertzsprung-Russell-Diagramm [ESO]

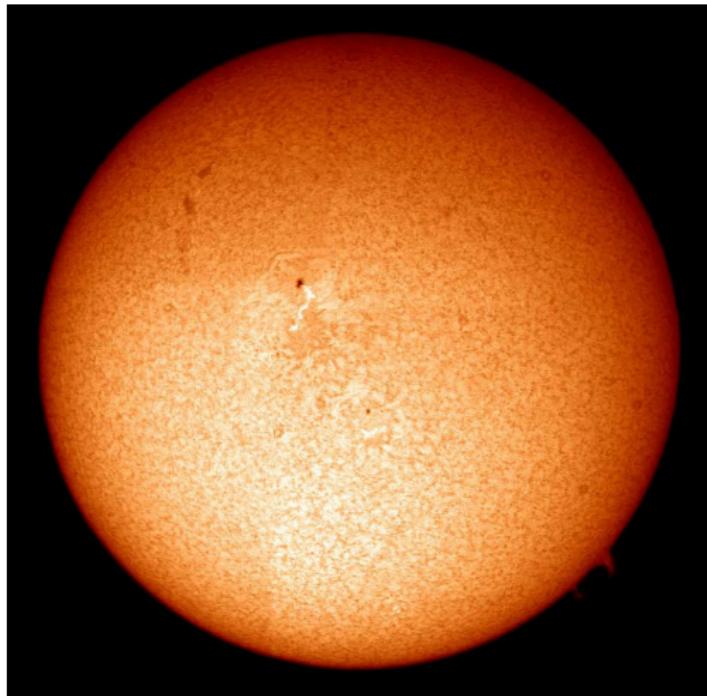
- den größten Teil seines Lebens verbringt ein Stern auf der Hauptreihe
- nahezu konstante Energieerzeugung durch Wasserstoffbrennen
- Hauptreihensterne befinden sich im hydrostatischen Gleichgewicht

Hydrostatisches Gleichgewicht



- Gravitationskraft 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 ($\text{H}\alpha$)

[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

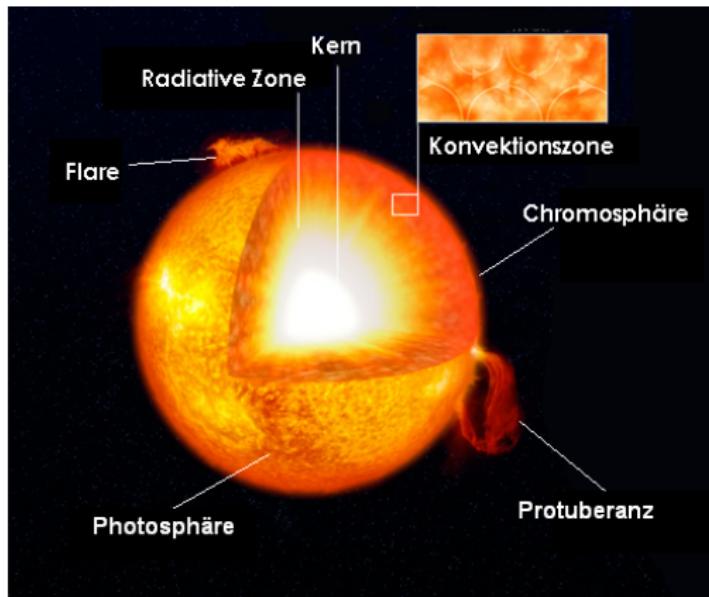
Zusammensetzung in Massenprozent:

- 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

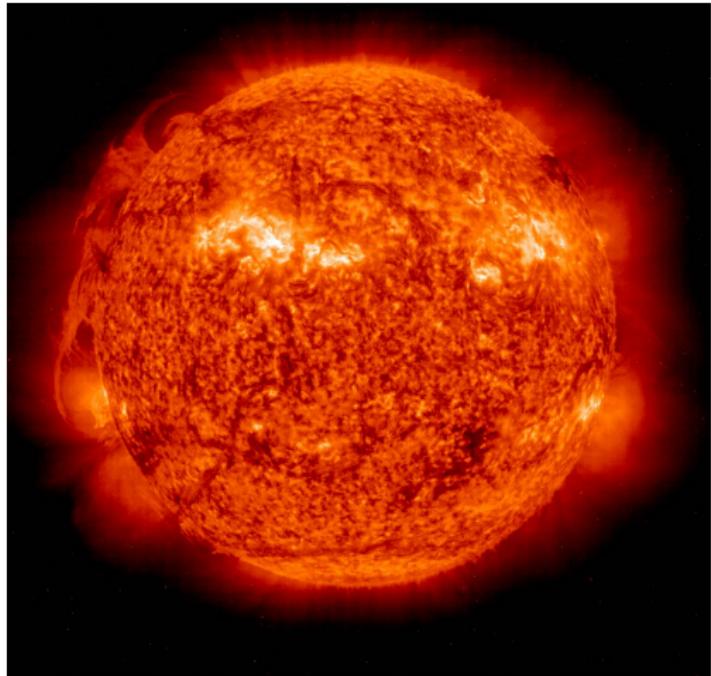
Sonne: Innere Struktur



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)

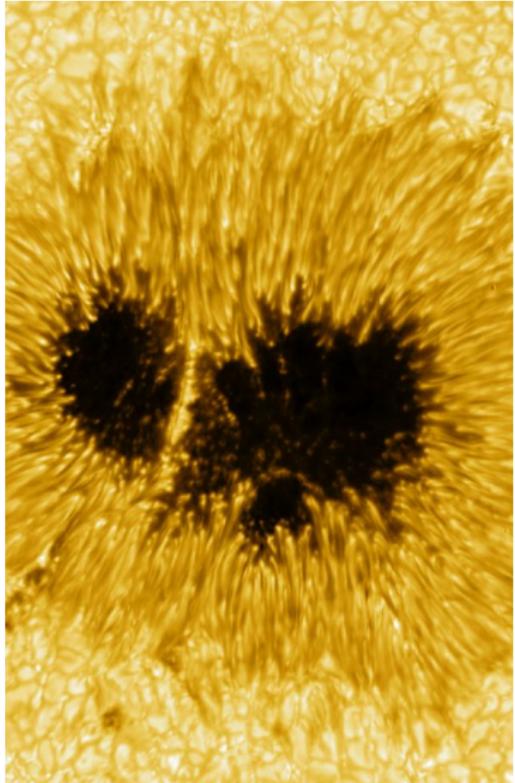
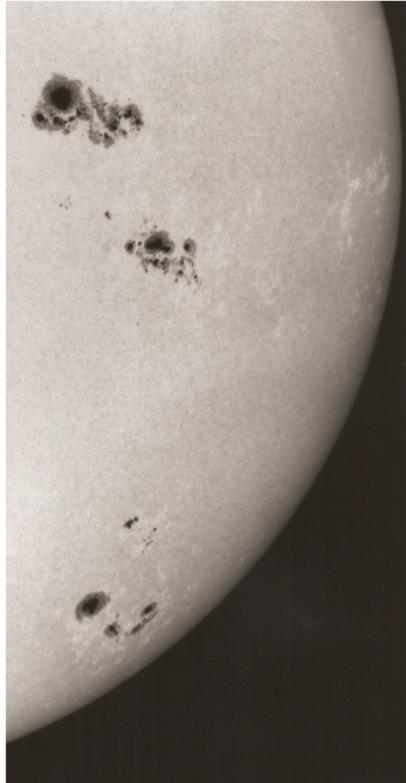
Sonne: Oberfläche und Atmosphäre



Sonne im UV [SOHO ESA/NASA]

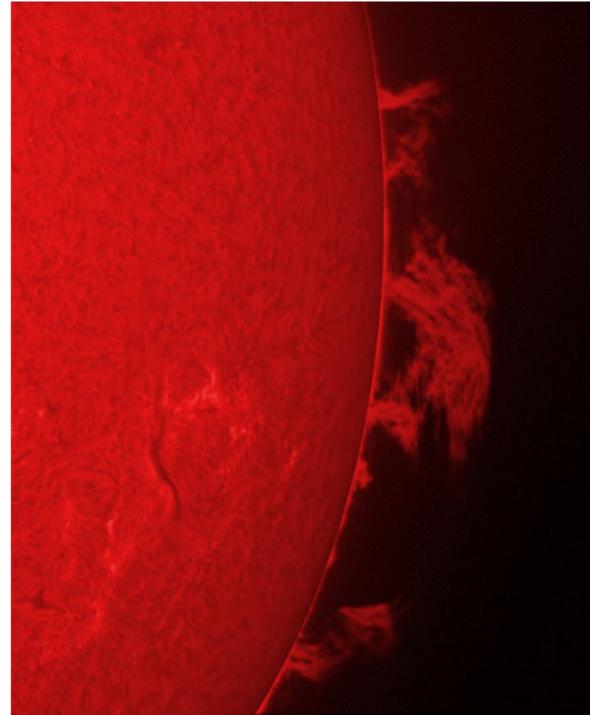
- Sonnenflecken: ca. 1000 K-2000 K kühtere Bereiche
- Protuberanzen: Materieströme, oft mehrere 100.000 km groß
- Photosphäre: sichtbare Sonnenoberfläche (Sonne hat keine echte Oberfläche)
- Korona: mehrere Mio. K heiße Atmosphäre mit sehr geringer Dichte

Sonnenflecken

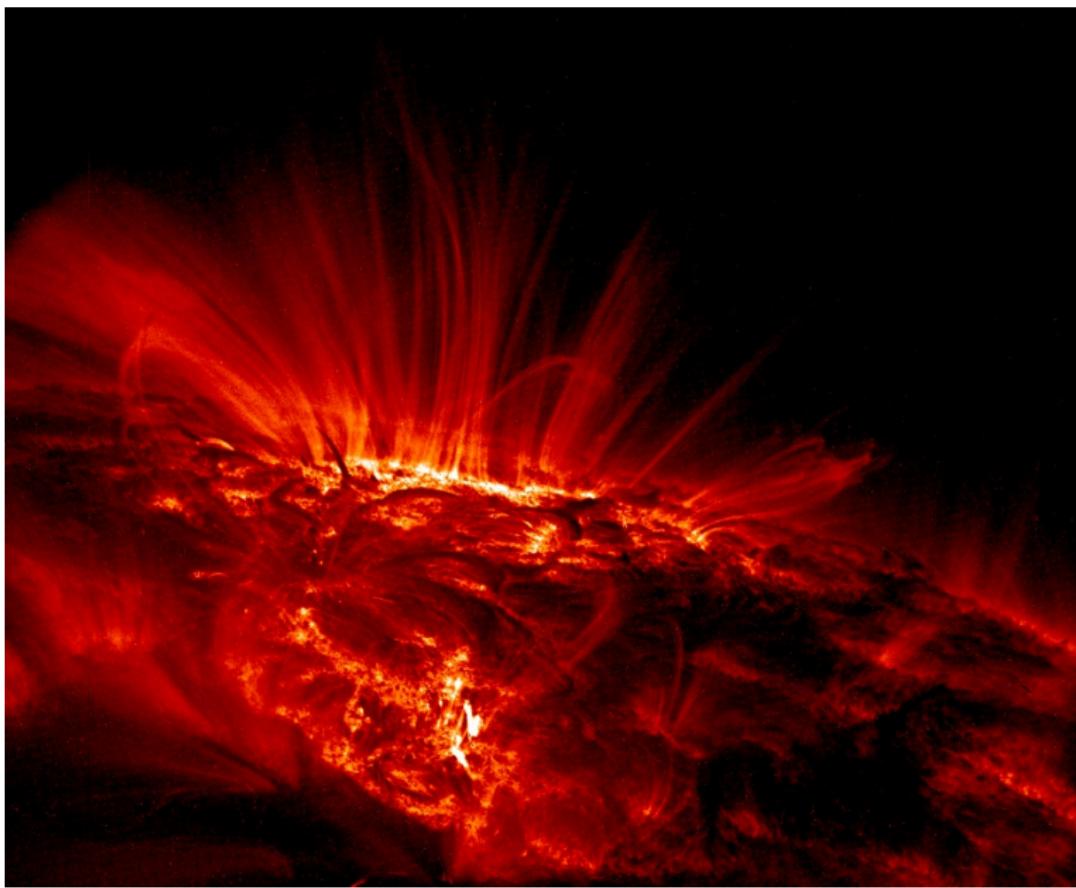


[Hans Bernhard / Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung]

Protuberanzen

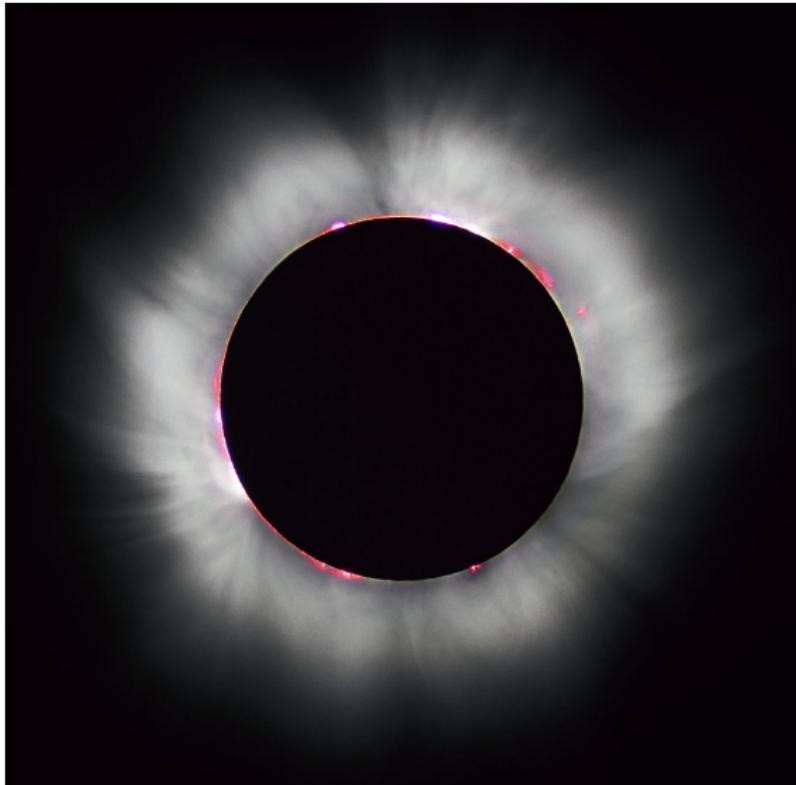


[Thomas Jäger (NAA)]



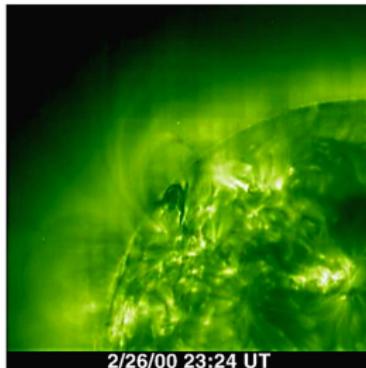
[TRACE Project, NASA]

Korona

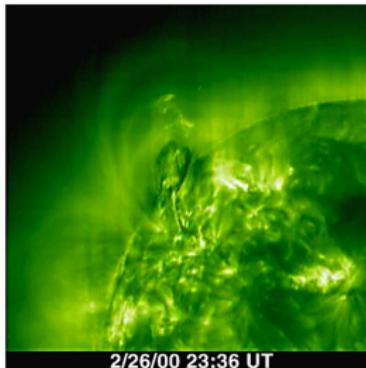


[Luc Viatour, www.lucnix.be]

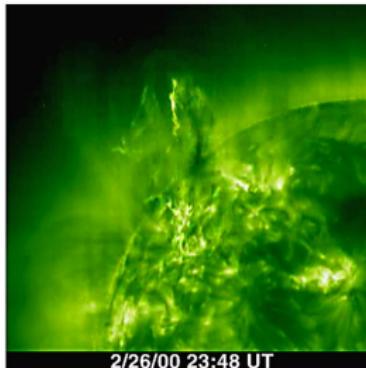
Koronaler Masseauswurf



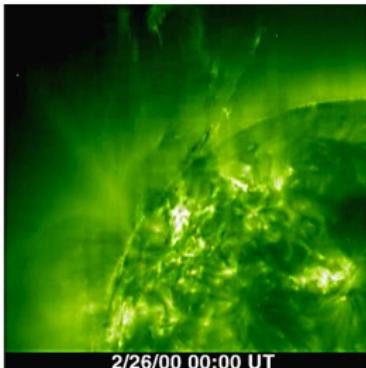
2/26/00 23:24 UT



2/26/00 23:36 UT



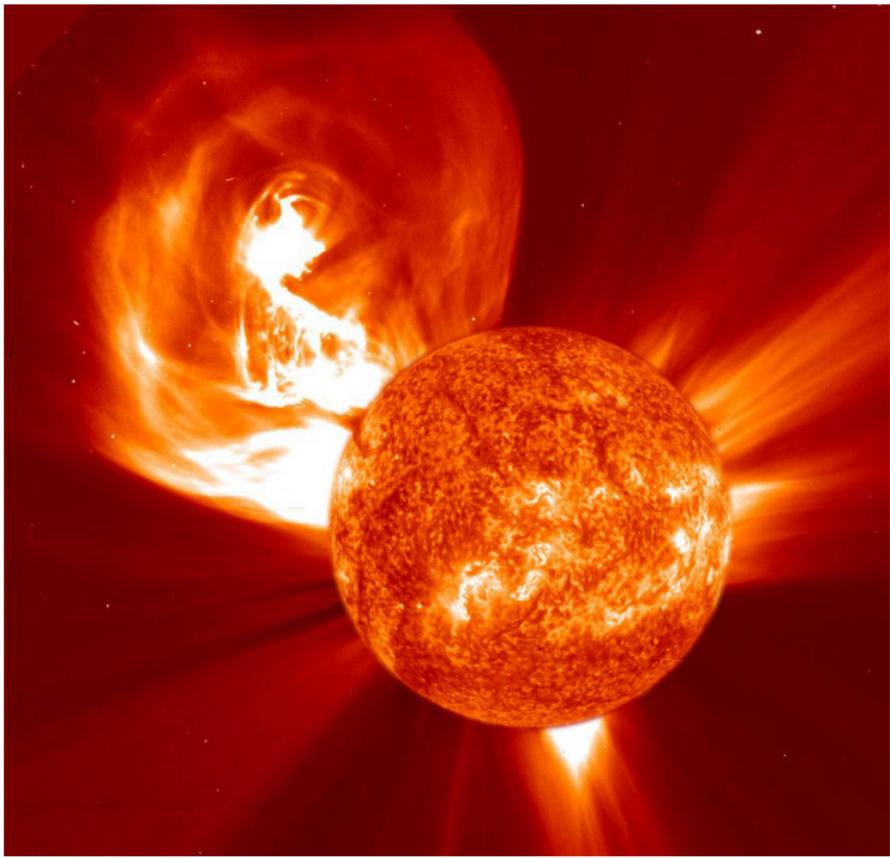
2/26/00 23:48 UT



2/26/00 00:00 UT

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]

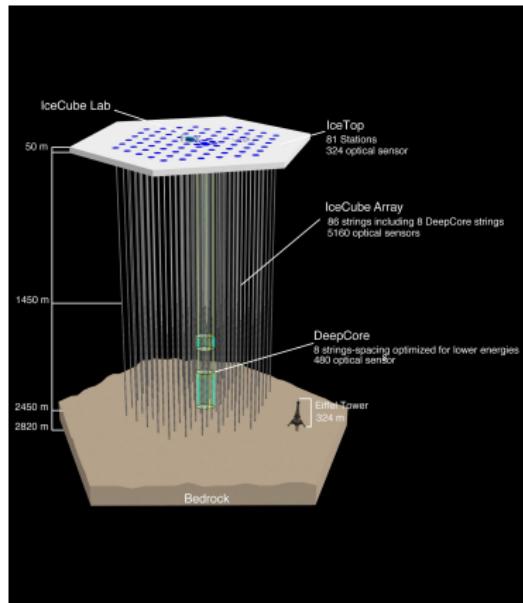
Coronaler Masseauswurf (CME)

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/>

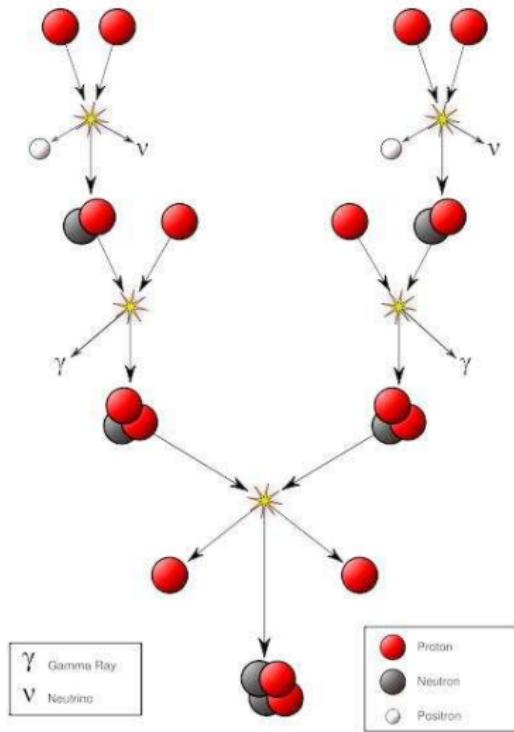
Blick ins Sonneninnere



Neutrinoobservatorium IceCube
[IceCube Collaboration]

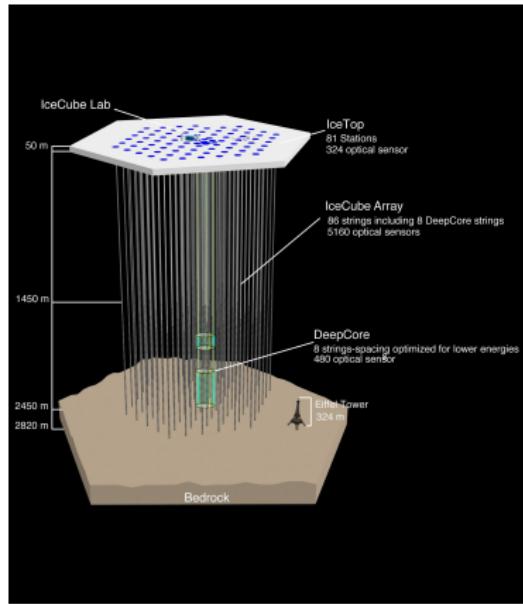
- *Helioseismologie*
Messung von Schallwellen in der Sonne
- *Neutrinos*
entstehen im Kern der Sonne bei Kernfusion und können die Sonne ungehindert verlassen, sind aber nur sehr schwer nachzuweisen
- Computersimulationen spielen wichtige Rolle, ausreichend leistungsstarke Computer aber noch nicht lange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

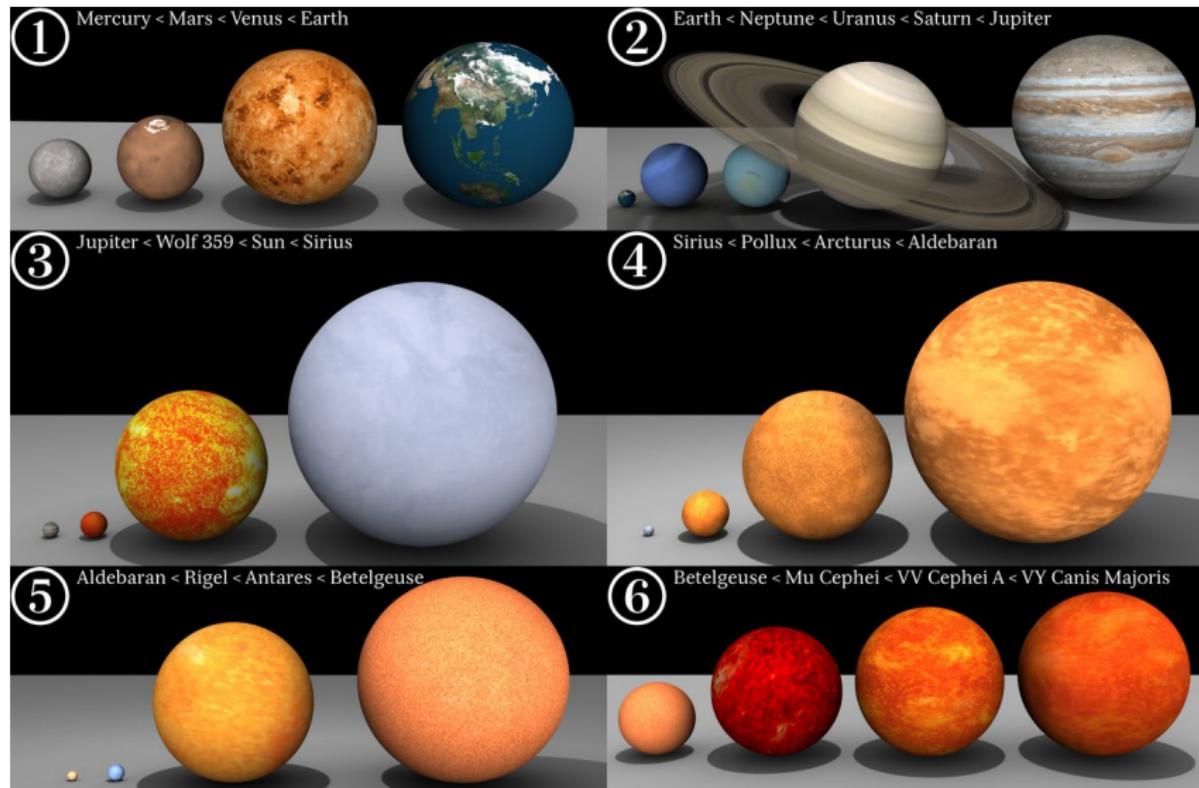
Blick ins Sonneninnere



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]

Sternentwicklung

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**

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

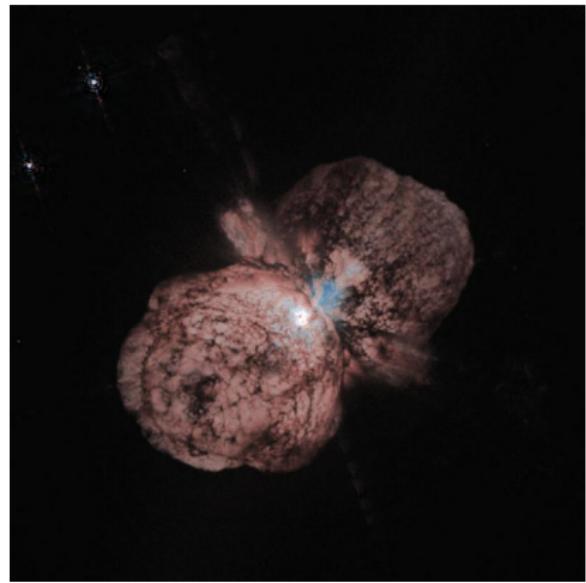
- **Neutronenstern**

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

- **Schwarzes Loch**

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

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



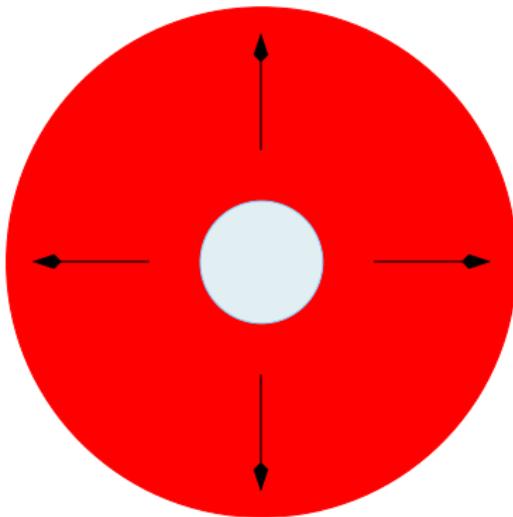
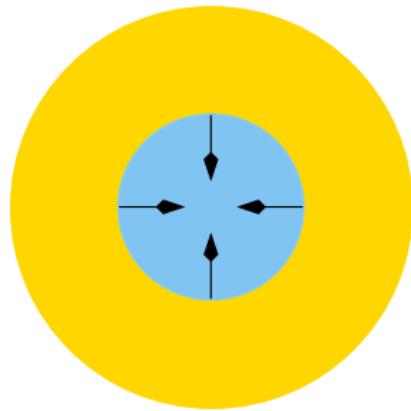
Eta Carinae [Jon Morse (University of Colorado), and NASA]

Post-Hauptreihen-Entwicklung I

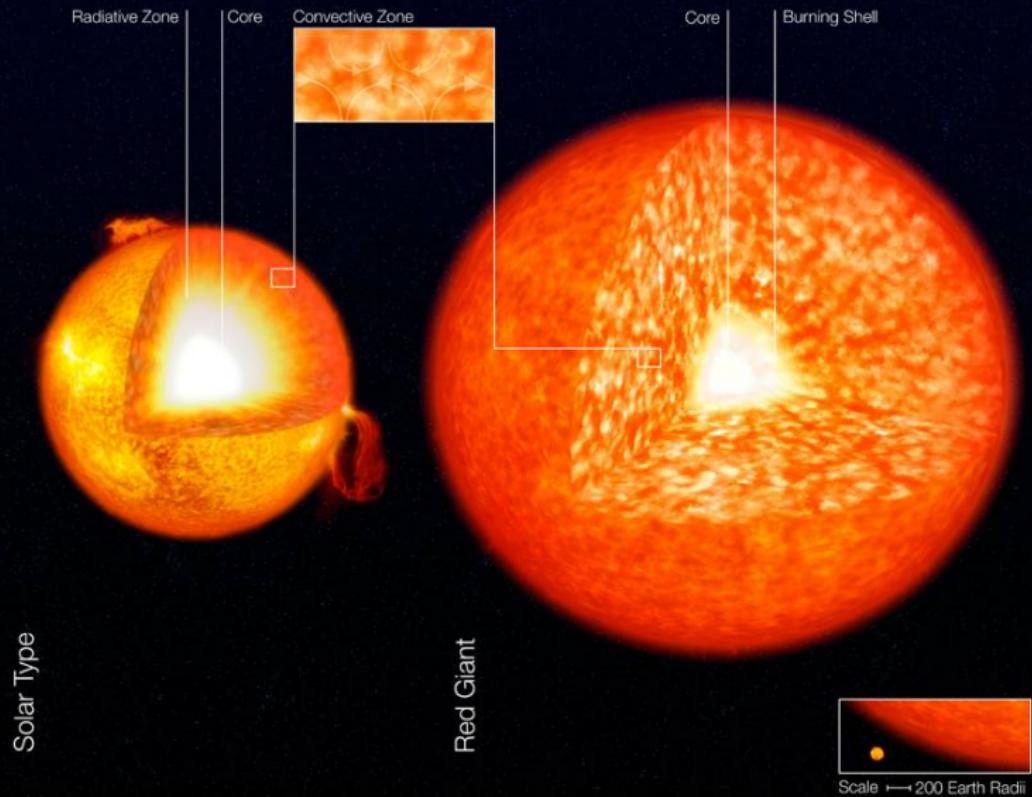
Weitere Entwicklung eines Hauptreihensterns mit $M \lesssim 8 M_{\odot}$:

- 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 Riesen (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

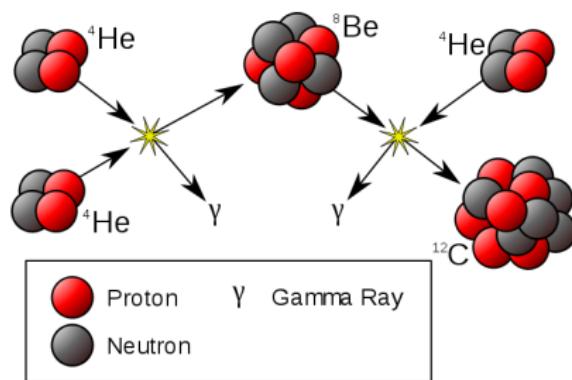
Red Giant

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 (3 α -Prozess)
- geringere Energieausbeute als beim Wasserstoffbrennen



Triple-Alpha-Prozess [Wikipedia]

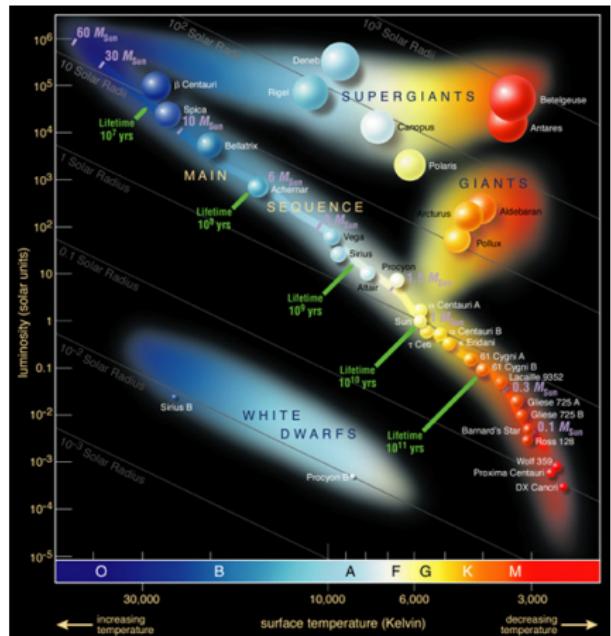
Post-Hauptreihen-Entwicklung IV

- 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!)

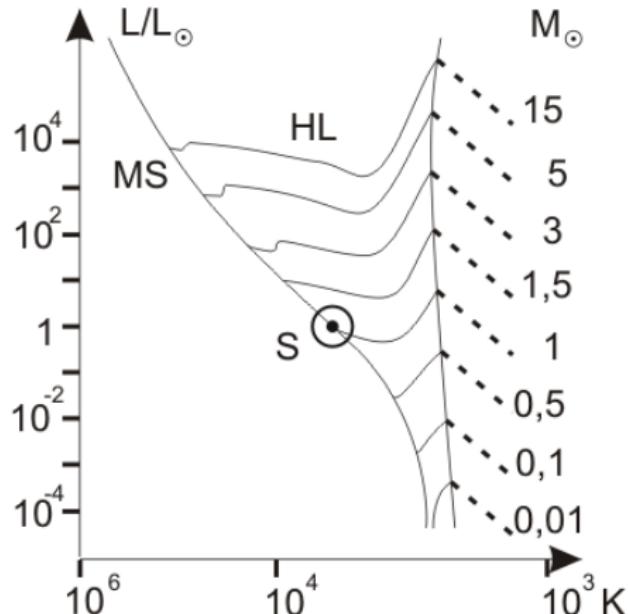


Planetaryischer Nebel NGC 6543 (Katzenaugennebel) [NASA/ESA]

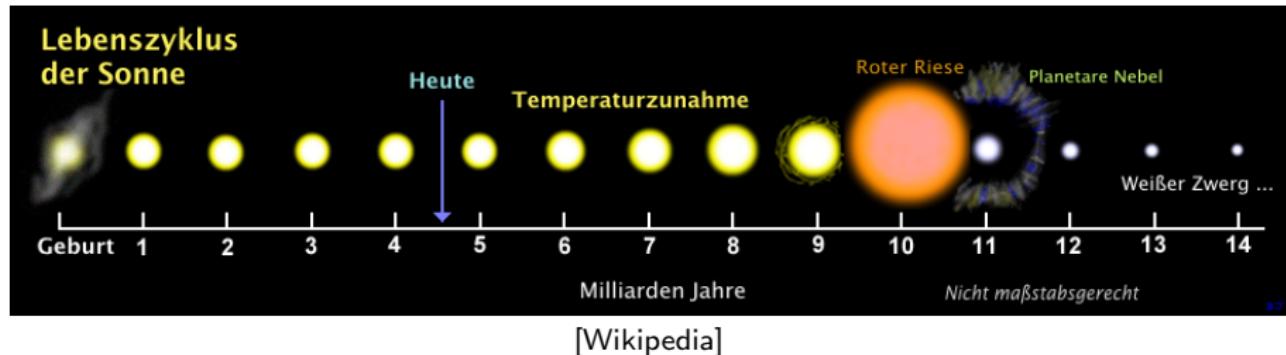
Sternentwicklung im HRD



[ESO/Wikipedia]



Entwicklung der Sonne



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



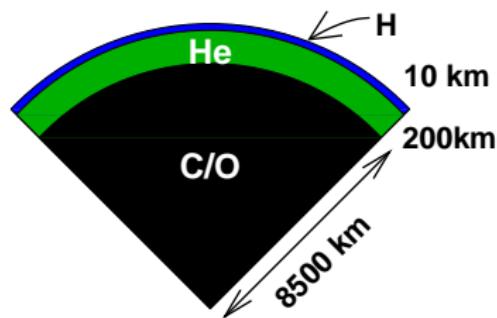
Planetarischer Nebel M27 (Hantelnebel) [ESO/VLT]



Planetarischer Nebel M57 (Ringnebel) [AURA/STScI/NASA]

Weißer Zwerg

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

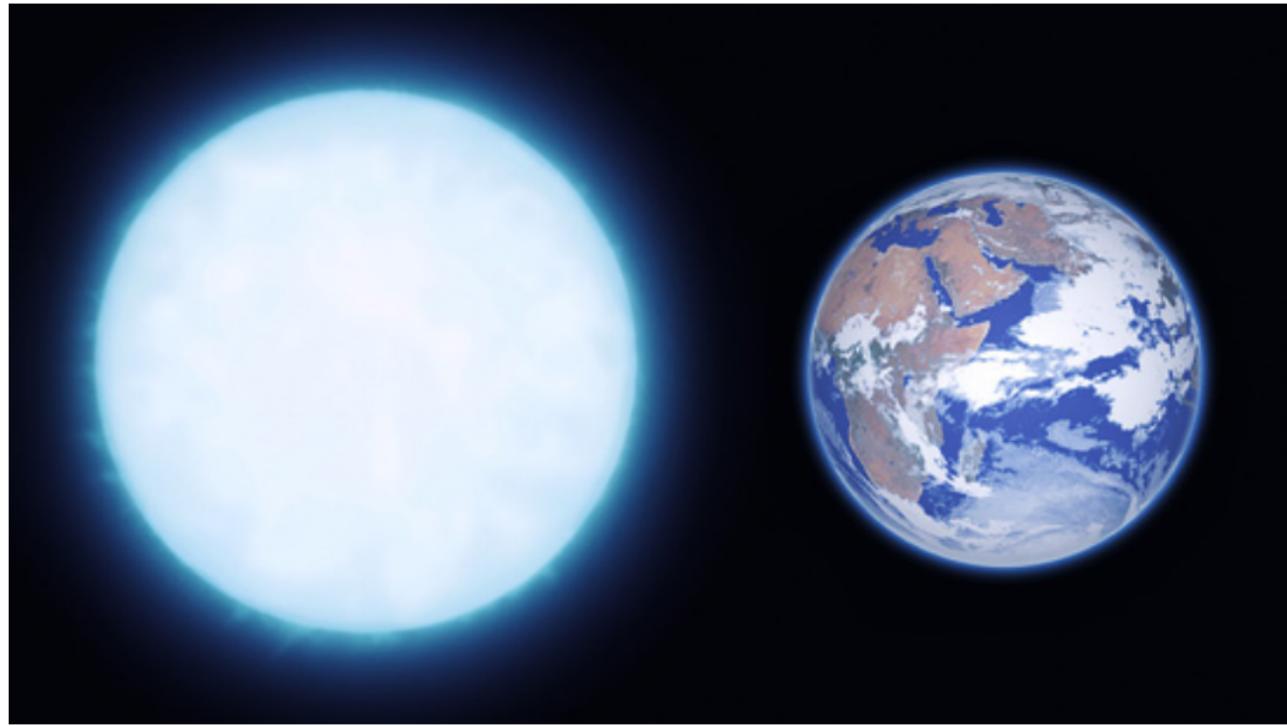


Aufbau eines Weißen Zwergs [Wilms]

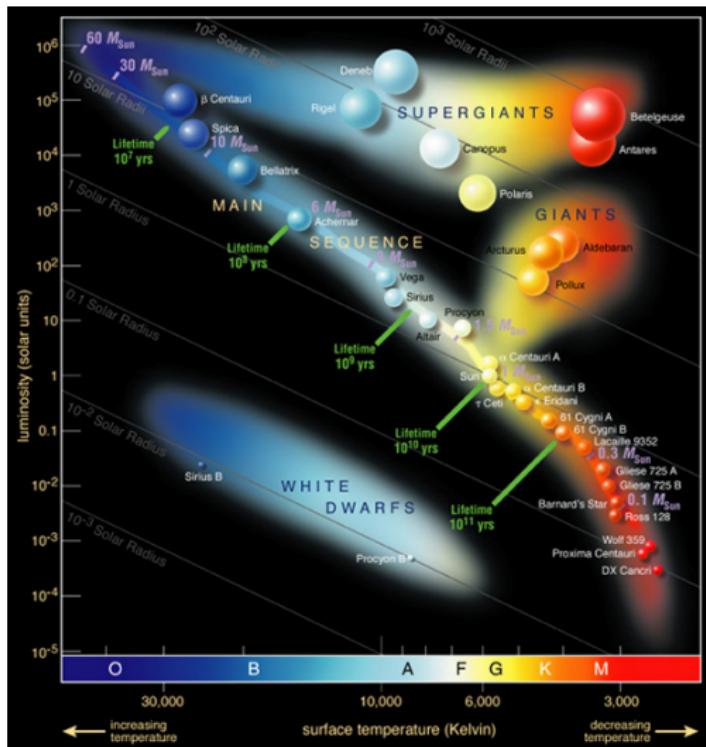
Eigenschaften

- 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

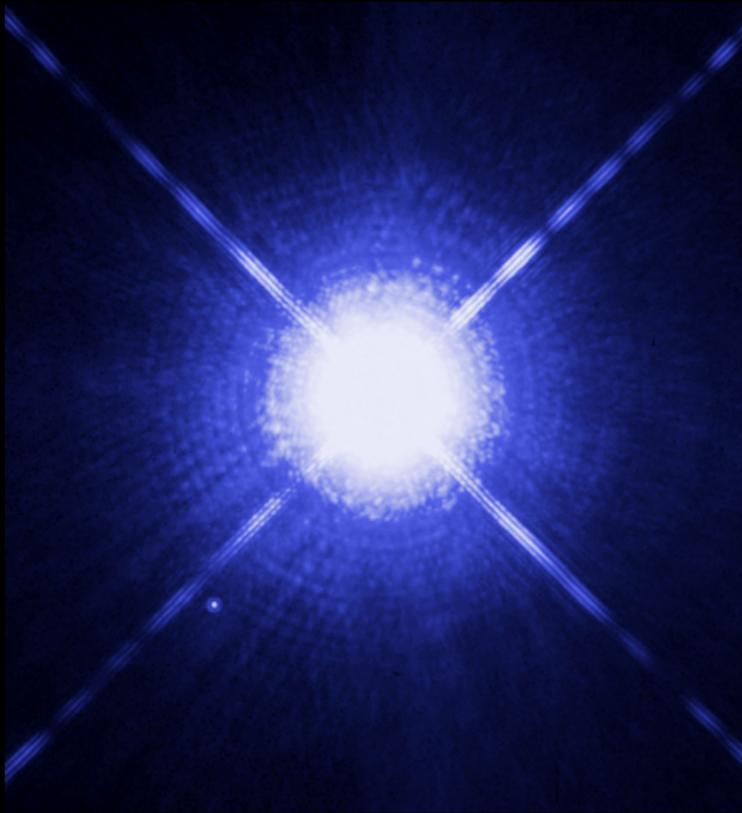
Vergleich Weißen Zwerg – Erde



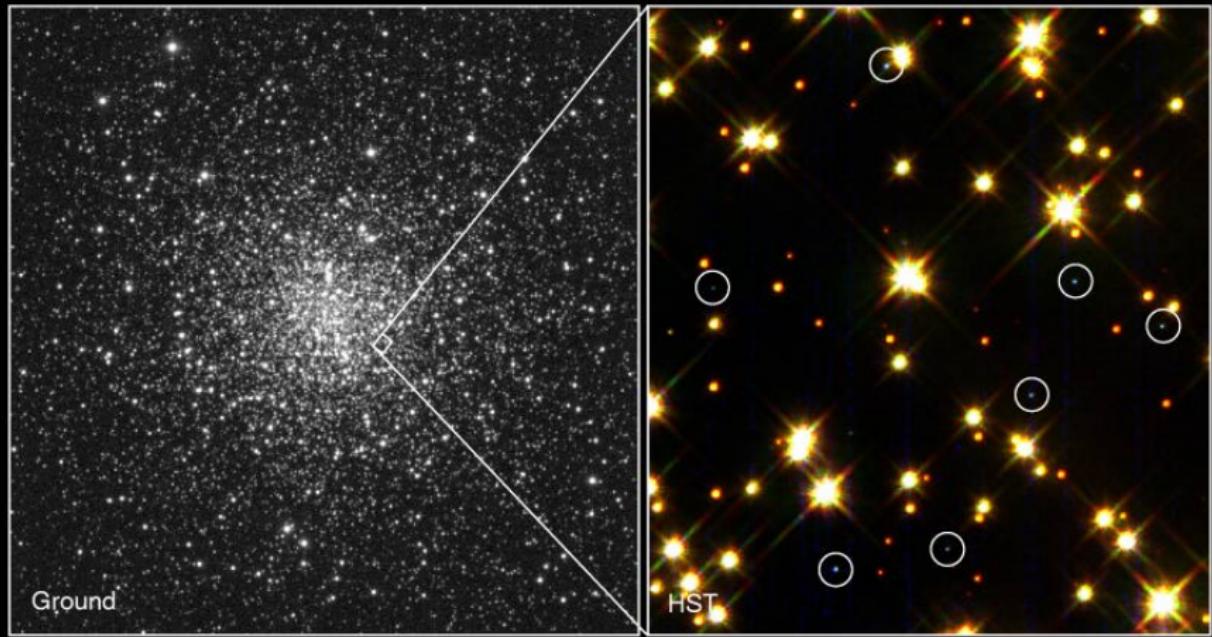
Hertzsprung-Russell-Diagramm (HRD)



Hertzsprung-Russell-Diagramm [ESO]



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



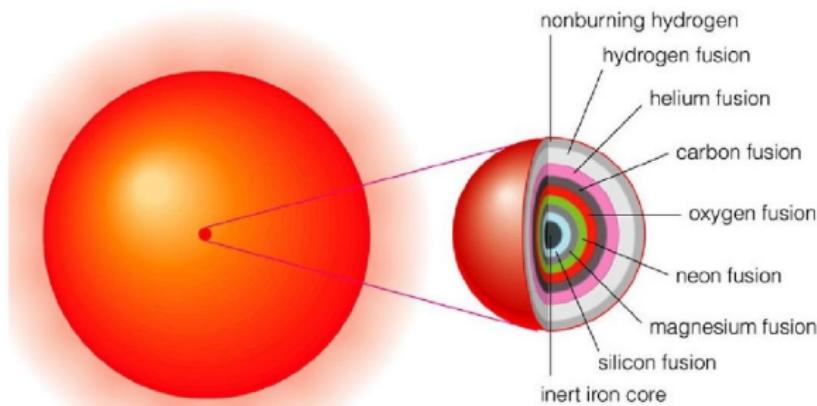
White Dwarf Stars in M4

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

HST · WFPC2

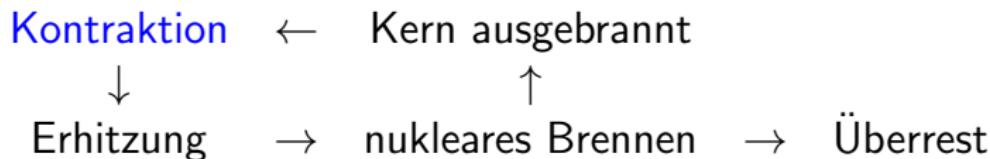
Entwicklung massereicher Sterne

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



Einsetzen höhere Fusionsprozesse

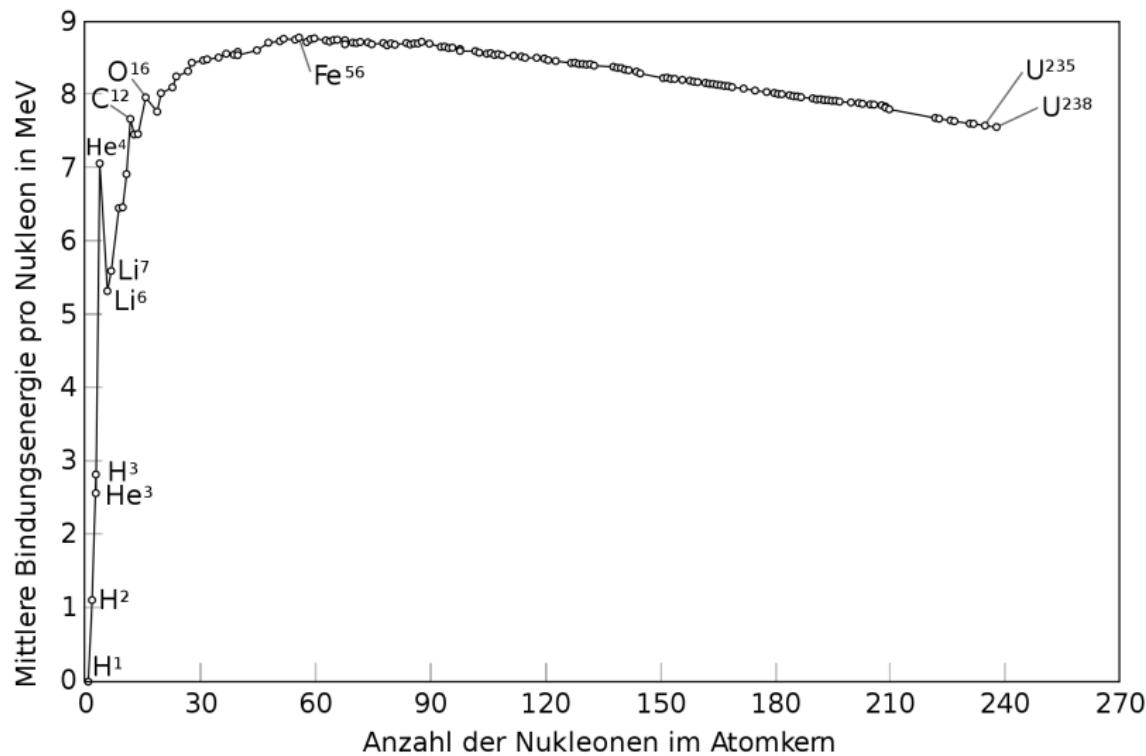
- Energiequelle im Kern fehlt: Kern zieht sich zusammen, T steigt



[nach A. Weiß: Sterne]

- Bei jedem „Umlauf“ steigt die Kerntemperatur

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):

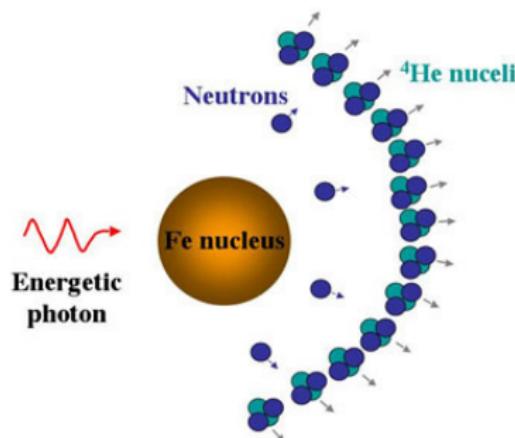


- Dieser letzte Fusionsprozess dauert nur noch wenige Stunden (!)

Danach keine Energiequelle mehr, die den Stern stabilisiert

Supernovae II

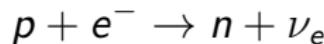
- Keine Energiequelle mehr
⇒ Kern schrumpft, T steigt
- Eisen wird durch Photodisintegration unter *Energieverlust* wieder in einzelne Protonen und Neutronen zerlegt



[Swinburne University of Technology]

Supernovae III

- Wenn Kerntemperatur ca. 8 Milliarden K: Neutronisation



- Extremer Energieverlust in kürzerster 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 $15M_{\odot}$:

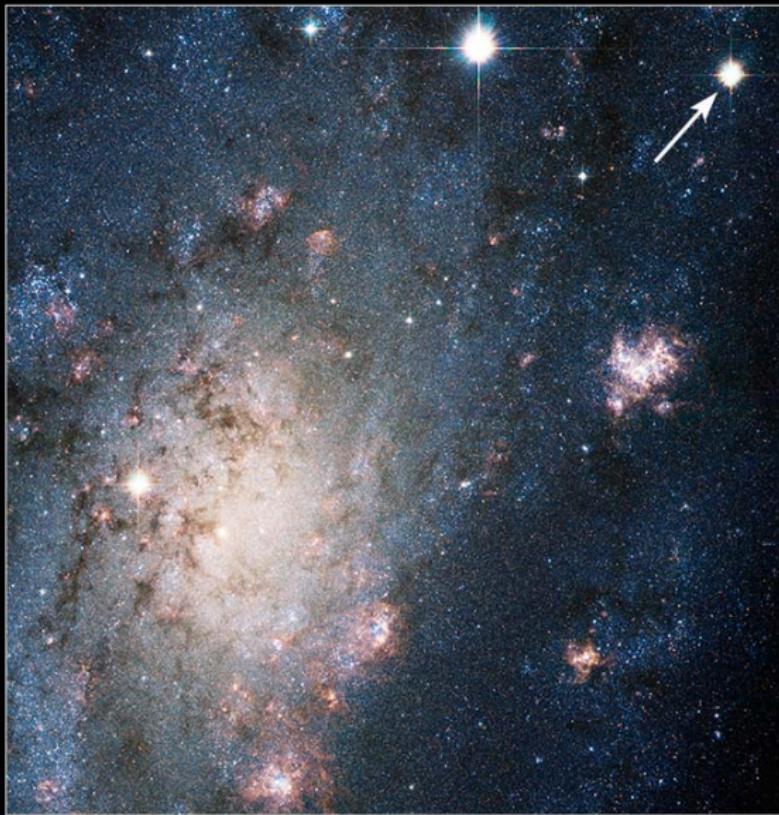
[http://www.rzg.mpg.de/services/visualization/
rzgprojects/type-ii-supernova-simulations](http://www.rzg.mpg.de/services/visualization/rzgprojects/type-ii-supernova-simulations)



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

Supernova 2004dj in Spiral Galaxy NGC 2403

HST • ACS

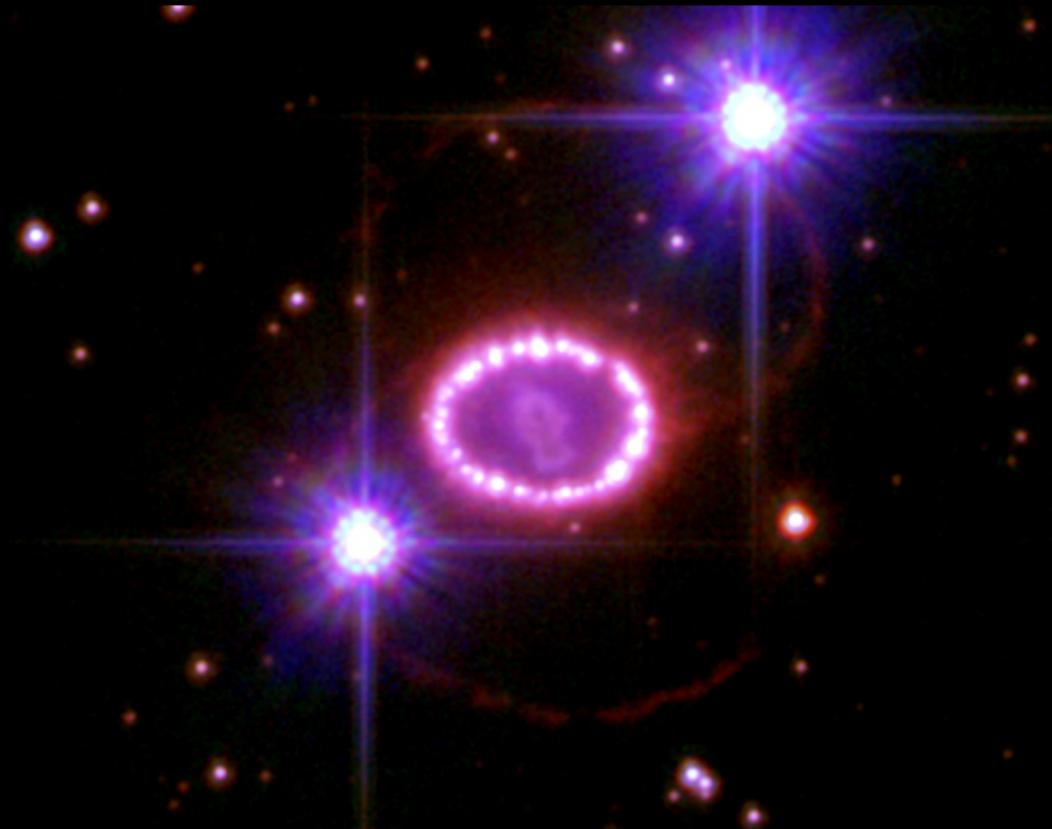


NASA, ESA and A. Filippenko (University of California, Berkeley)

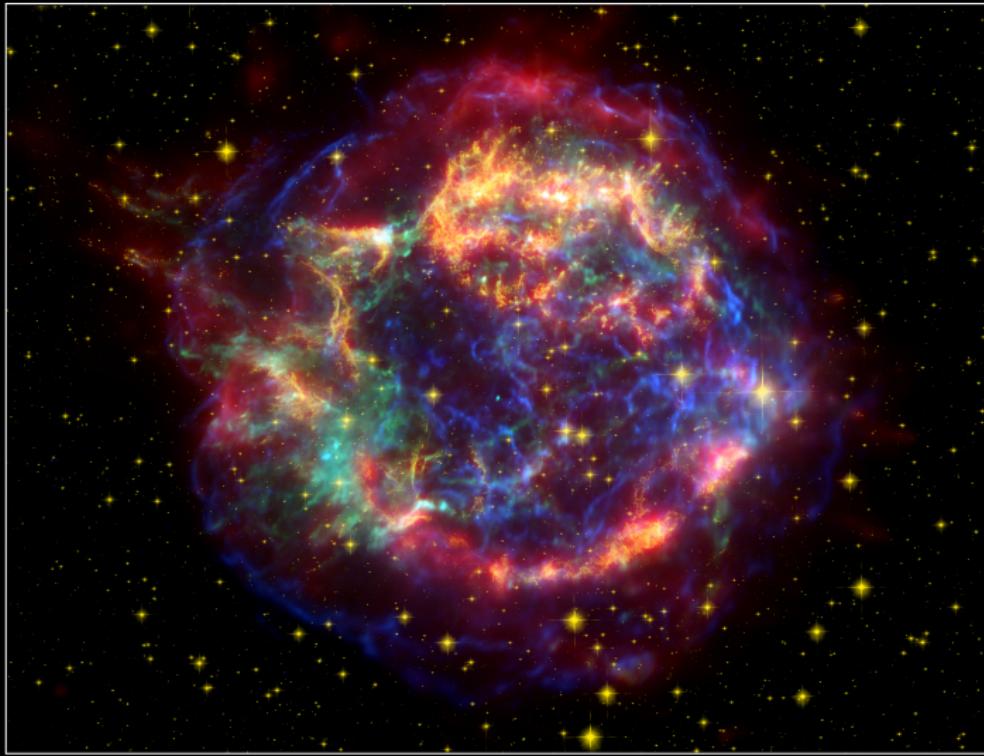
STScI-PRC04-23



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



Supernova 1987A in der großen Magellanschen Wolke (Entfernung: 157.000 Lichtjahre
[NASA/ESA])



Cassiopeia A Supernova Remnant

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

ssc2005-14c

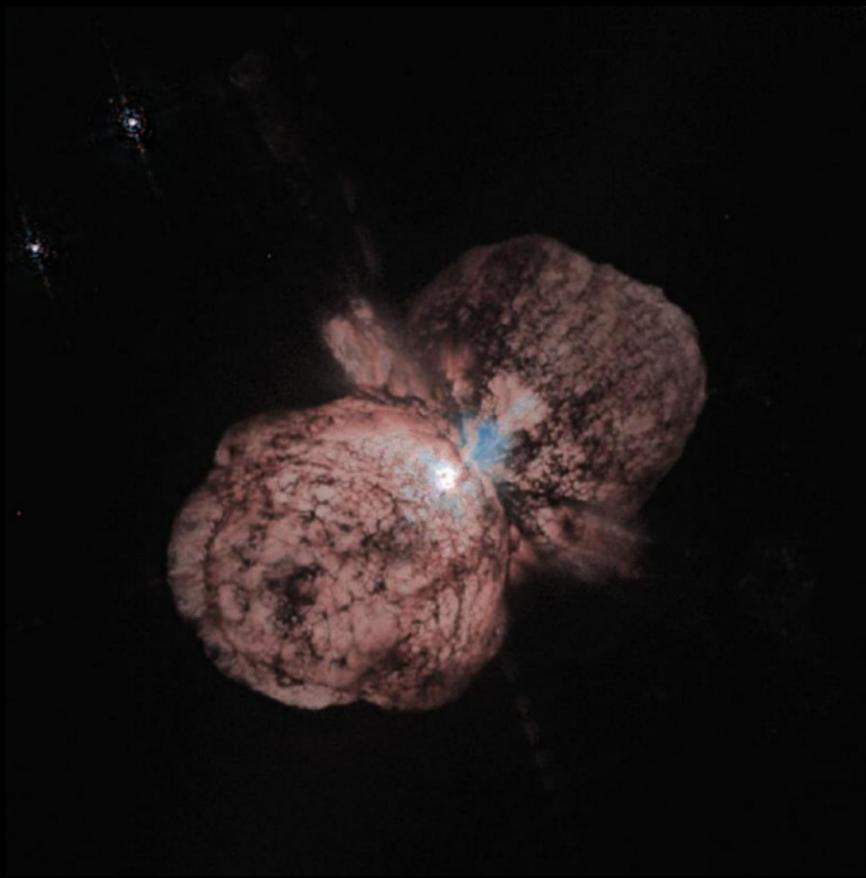
Spitzer Space Telescope • MIPS

Hubble Space Telescope • ACS

Chandra X-Ray Observatory



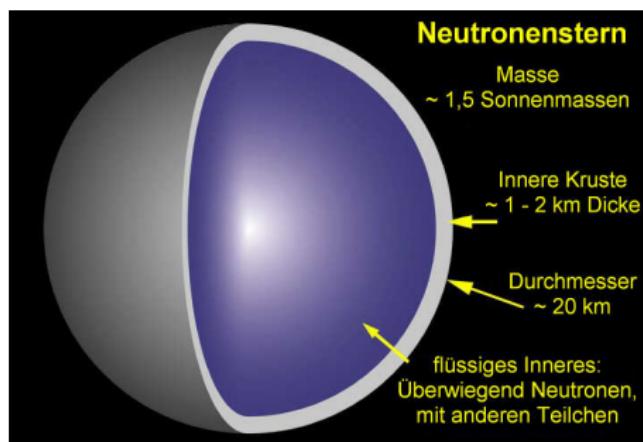
Cirrusnebel, Überrest einer SN vor ca. 15.000 Jahren [B. Liebscher]



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

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*



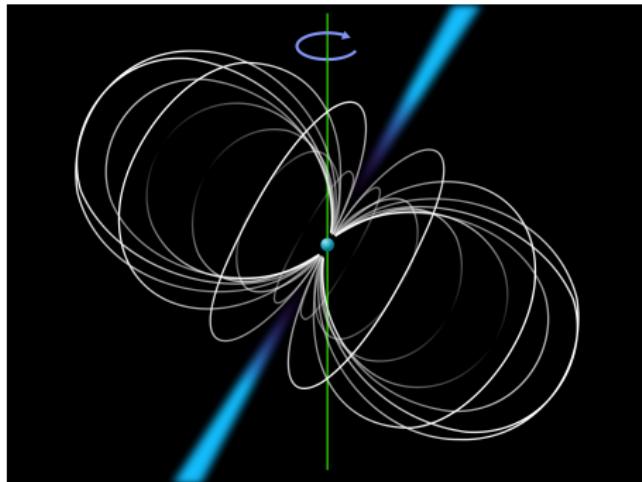
Magnetresonanztomograph mit 7 T Feldstärke
[Siemens Healthcare]

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*

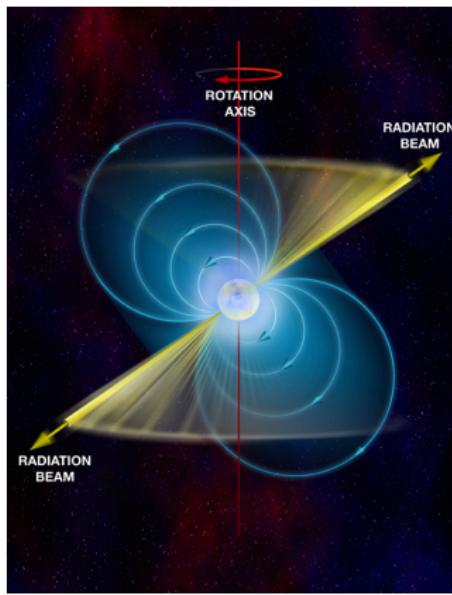


[Wikipedia]

Eigenschaften

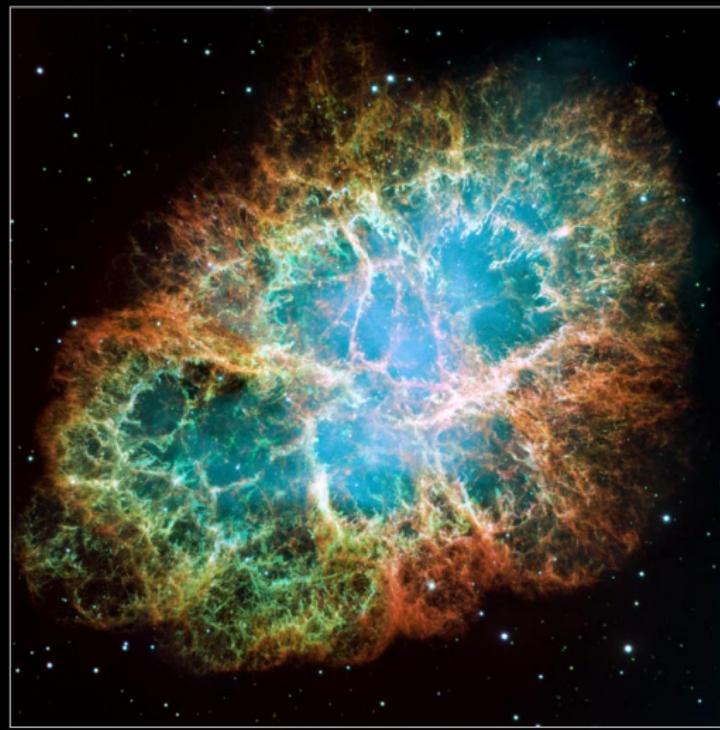
- besteht hauptsächlich aus Neutronen
- Radius: 10 – 15 km (Nürnberg)
- Dichte: ca. $10^{11} \frac{\text{kg}}{\text{cm}^3}$
- starkes Magnetfeld: ca. 10^8 T
- schnelle Rotation

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



Pulsar im Krebsnebel M1 [NASA]

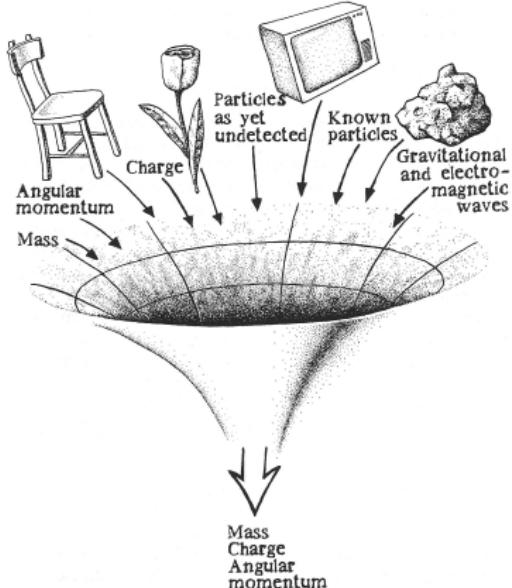


Vela-Suernovaüberrest und Pulsar [Harel Boren; NASA/CXC/PSU/G.Pavlov et al.]

Schwarze Löcher

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

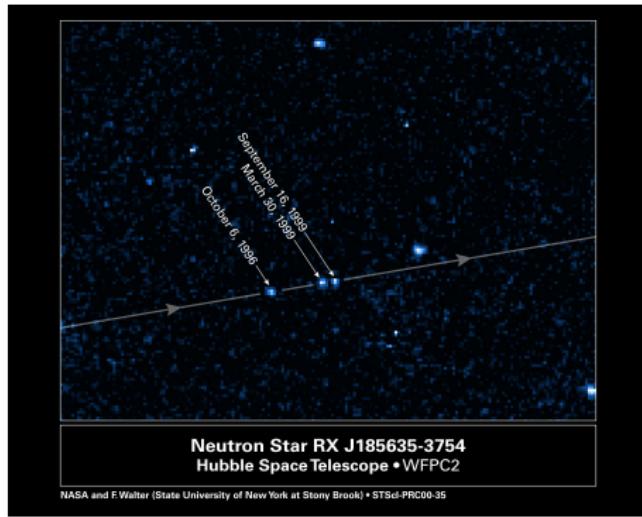
Keine Möglichkeit, der Gravitation entgegenzuwirken \Rightarrow Schwarzes Loch



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

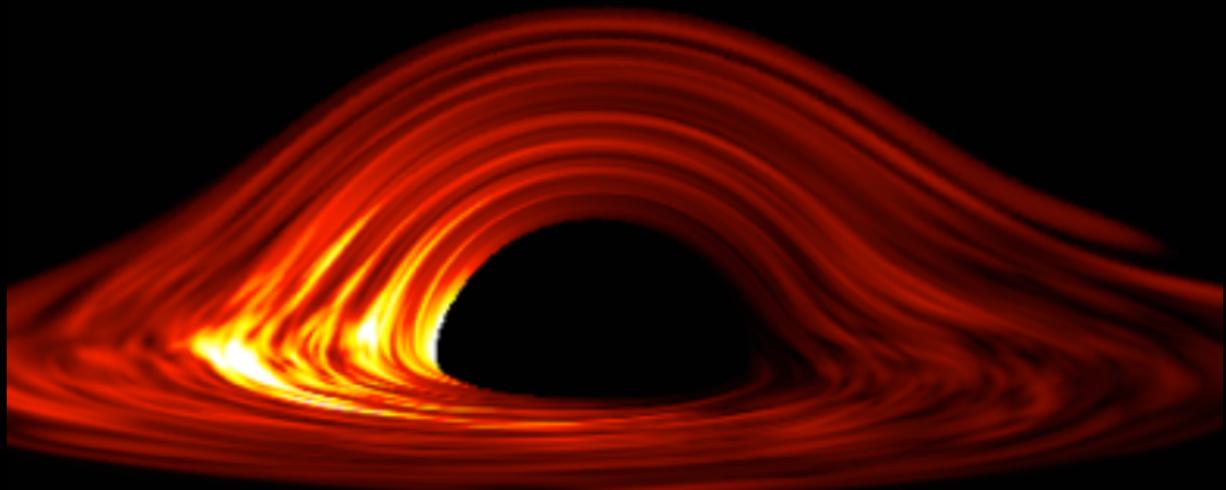
Beobachtung



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**



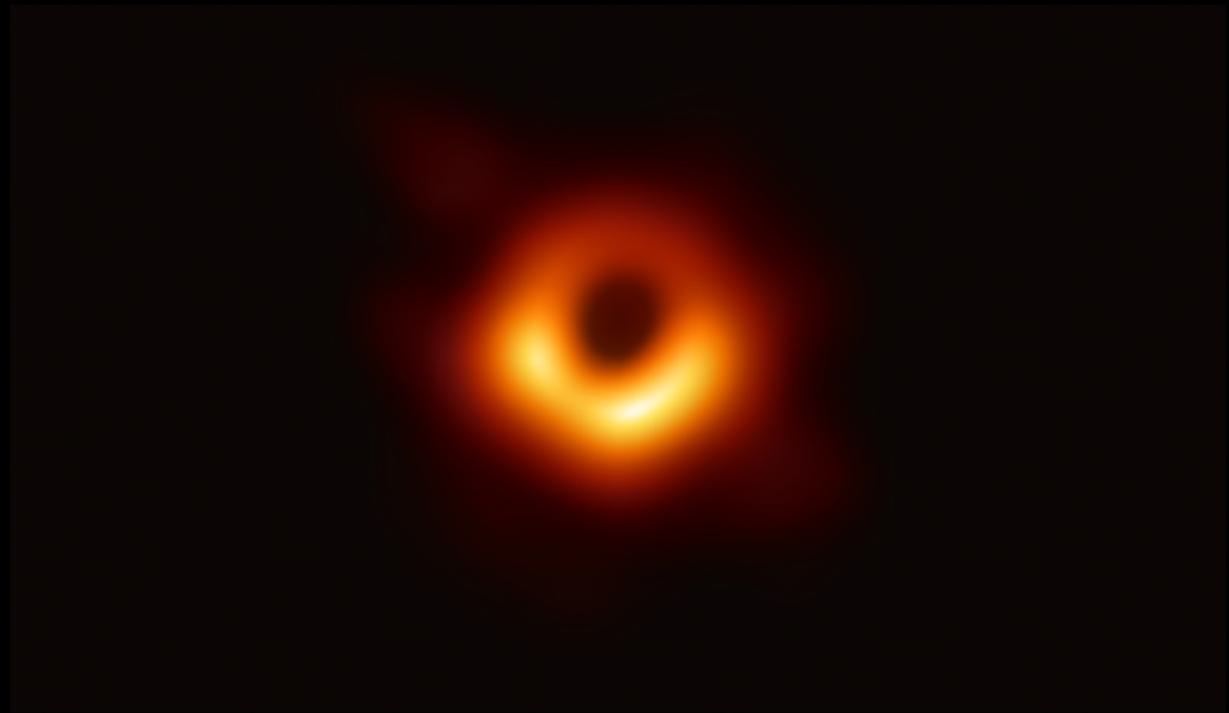


Relativistische Effekte in Akkretionsscheibe

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



Röntgenobservatorium XMM-Newton [ESA/D. Ducros]



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.]

Literatur

- 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