Die Sonne und andere Sterne

Das Sonnensystem und seine nächsten Verwandten für Nicht-Physiker

Markus Pössel

Haus der Astronomie

Universität Heidelberg, WS 2022/2023

Sterne vs. Planeten, Sonnensystem-Edition

Bild: NASA

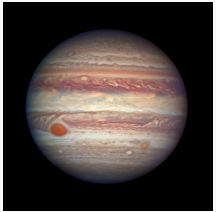


Bild: NASA, ESA, A. Simon (GSFC)

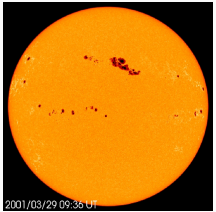


Bild: SOHO (ESA & NASA)

	Erde	Jupiter	Sonne
Radius:	1	11	109
Masse:	1	320	333000
Dichte:	1	0.24	0.26
Effektivtemperatur:	255 K	88 K	5777 K
Leuchtkraft:	10^{-10}	10^{-9}	1

Absolutwerte für die Sonne

Radius:	$R_\odot = 6.955\,10^8\,\mathrm{m}$
Masse:	$M_\odot = 1.989 \cdot 10^{30}\,\mathrm{kg}$
Leuchtkraft:	$L_\odot = 3.846 \cdot 10^{26}\,\mathrm{W}$
Effektivtemperatur:	$T_{eff} = 5778\,\mathrm{K}$
Mittlere Dichte:	$\rho_\odot = 1411.437\,\mathrm{kg/m^3}$

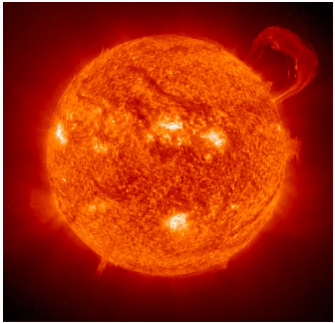


Bild: SOHO (NASA & ESA)

Sterne als Gas-/Plasmabälle

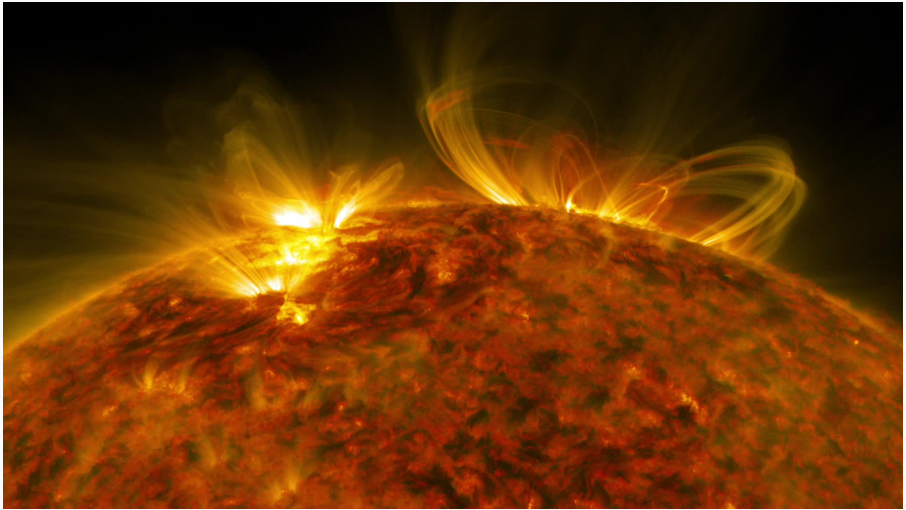
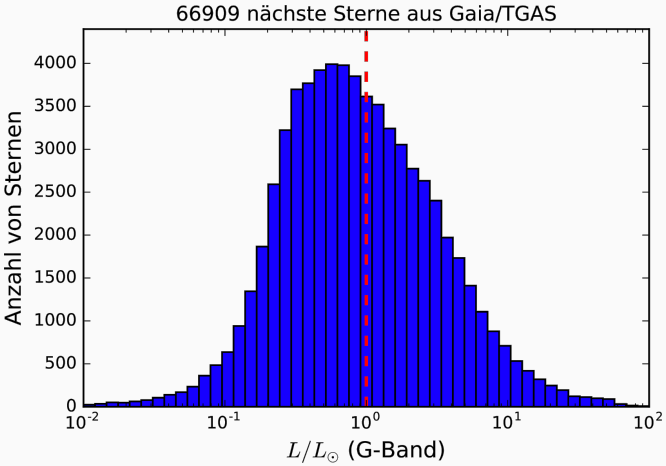


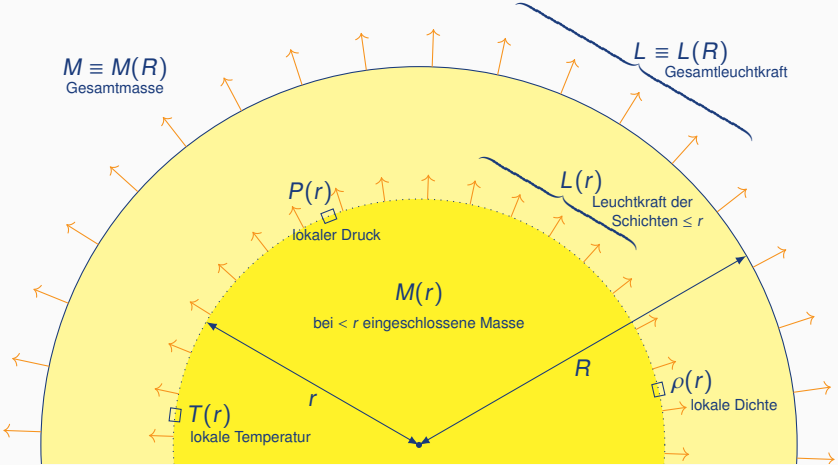
Bild: NASA/GSFC/SDO; Plasmabögen, Magnetfelder, Konvention: Flare vom 10.9.2017

Helligkeiten von Sternen



Histogramm aus Daten des Gaia-Satelliten: Abgestrahlte Leistung (im G-Band, entspricht in etwa weißem Licht) von 66909 Sternen im Vergleich zur Sonne

Kugelsymmetrisches Modell für einen Stern



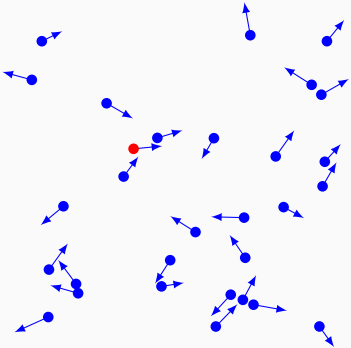
Gegendruck Möglichkeit 1: thermischer Gasdruck

Gegendruck entscheidend! Ideales Gas:

$$PV = Nk_B T$$

mit

- P Druck
- V Volumen der betreffenden Region
- N Teilchenzahl
- k_B Boltzmann-Konstante
- T Temperatur



Umschreiben in günstigere Form mit $\mu m_p N$ der Masse im Volumen V (m_p Protonenmasse, μ Durchschnitts-Massenzahl der Atome in V):

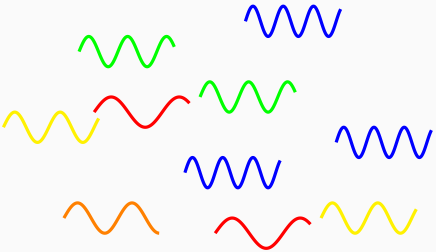
$$\mu m_p PV = \mu m_p N k_B T = V \rho k_B T \quad \Rightarrow \quad P = \frac{k_B}{\mu m_p} \cdot \rho \cdot T.$$

Gegendruck Möglichkeit 2: Strahlungsdruck

Lichtteilchen / Photonen mit Frequenz ν haben Impuls $p = E/c = h\nu/c$

Strom von Photonen erzeugt Impulsübertrag pro Zeiteinheit pro Flächeneinheit $\Rightarrow$ Strahlungsdruck:

$$P_{rad} = \frac{4\sigma_{SB}}{3c} T^4 = \frac{1}{3}\varepsilon$$



(Plausibilität: ε ist Energiedichte nach Stefan-Boltzmann, Impuls verteilt sich auf drei unabhängige Richtungen, Impulsübertrag nur senkrecht zur Begrenzungsfläche)

Vereinfachtes Modell $\rho = const.$ – Zentraldruck

Druckprofil bei $\rho = const.$ (vgl. Vorlesung 27.11.):

$$P(r) = \frac{3}{8\pi^2}\frac{GM^2}{R^4}\left(1 - \frac{r^2}{R^2}\right).$$

Zentraldruck $P(r = 0)$:

$$P(0) = \frac{3}{8\pi}\frac{GM^2}{R^4} = 10^9\,\mathrm{bar}\left(\frac{M}{M_\odot}\right)^2\left(\frac{R}{R_\odot}\right)^{-4}.$$

(Gerundet entspricht 1 bar unserem normalen Luftdruck auf der Erde auf Meereshöhe.)

Zentraltemperatur vereinfachtes Modell Gasdruck

Annahme: Gegendruck wird durch thermischen Druck aufgebracht,

$$P = \frac{k_B}{\mu m_p} \cdot \rho \cdot T.$$

Dann

$$\begin{aligned} T(0) &= \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\mu m_p}{k_B} \cdot P(0) = \frac{4}{3}\pi \frac{R^3}{M} \cdot \frac{\mu m_p}{k_B} \cdot P(0) = \frac{1}{2} \frac{G \mu m_p}{k_B} \cdot \frac{M}{R} \\ &= \mu \cdot \left(\frac{M}{M_\odot}\right)\left(\frac{R_\odot}{R}\right) \cdot 10^7\,\mathrm{K}. \end{aligned}$$

Extrem heiße Temperaturen!

Zentraltemperatur vereinf. Modell Strahlungsdruck

Annahme: Gegendruck wird durch Strahlungsdruck aufgebracht,

$$P_{rad} = \frac{4\sigma_{SB}}{3c} T^4$$

Dann

$$T(0) = \left(\frac{9}{32\pi} \cdot \frac{Gc}{\sigma_{SB}}\right)^{1/4} \frac{\sqrt{M}}{R} = 2.7 \cdot 10^7\,\mathrm{K} \cdot \left(\frac{M}{M_\odot}\right)^{1/2} \left(\frac{R}{R_\odot}\right)^{-1}.$$

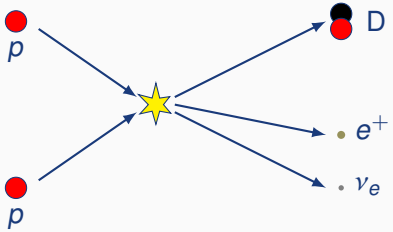
Andere Abhängigkeit von R, M, aber gleiche Größenordnung wie bei Gasdruck!

Kernfusion

Bei

- Zentraldruck um die 10^9 bar
- Zentraltemperatur um die 10^7 K

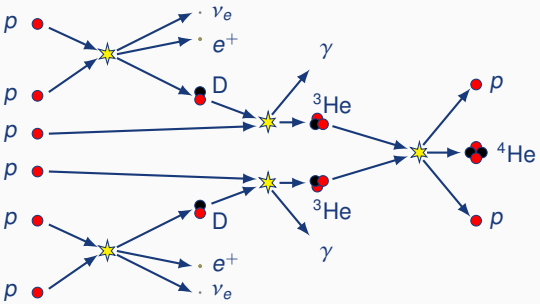
kann Kernfusion wichtig werden:



Proton ● – elektrisch positiv geladen, $q = +e$
Neutron ● – elektrisch neutral, $q = 0$

Kernfusion

Dominant in Sternen niedrigerer Masse (wie der Sonne):
Proton-Proton-Kette (hier: pp-I)



Mit zunehmender Masse wichtig: CNO-Zyklus.

Variationen/Ergänzungen: pp-II und pp-III

Kernfusion

pp-III-Kette (nur ein kleiner Teil im Sonneninneren):

^{8}B-Zerfall erzeugt $\sim$ 10 MeV-Neutrinos

Bei diesen Energien: auf der Erde nachweisbar!

Aber: extrem schwache Wechselwirkung
verschiedene “Flavors”: ν_e, ν_μ, ν_τ

$$\mathrm{p} + \mathrm{p} \rightarrow \mathrm{D} + \nu_e + e^+$$

$$\mathrm{D} + \mathrm{p} \rightarrow {}^3\mathrm{He} + \gamma$$

$${}^3\mathrm{He} + {}^4\mathrm{He} \rightarrow {}^7\mathrm{Be} + \gamma$$

$${}^7\mathrm{Be} + \mathrm{p} \rightarrow {}^8\mathrm{B} + \gamma$$

$${}^8\mathrm{B} \rightarrow {}^8\mathrm{Be} + \nu_e + e^+$$

$${}^8\mathrm{Be} \rightarrow {}^4\mathrm{He} + {}^4\mathrm{He}$$

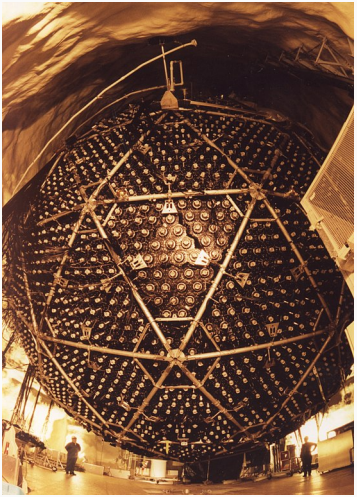
Sonne: Blick ins Innere

- Homestead-Experiment (1970+):
  $\nu_e + {}^{37}\mathrm{Cl} \rightarrow {}^{36}\mathrm{Ar} + e^-$
  Radioaktives Argon separieren,
  Zerfall messen
- Neutrinos bei den erwarteten Energien: ja, aber *Solar Neutrino Problem*, d.h. weniger als die Hälfte der erwarteten Neutrinos gemessen
- Nobelpreis 2002 für
  Raymond Davis, Masatoshi Koshiba

Bild: Homestake Mine Neutrino Experiment,
mit freundlicher Genehmigung
des Brookhaven National Laboratory

Sonne: Blick ins Innere

- Lösung: Neutrinos wechseln auf dem Weg von der Sonne zur Erde ihre Identität, $\nu_e \to \nu_\mu$
- Sudbury Neutrino Observatory: 1000 Tonnen schweres Wasser, einige Reaktionen für alle Neutrinosorten, einige nur für ν_e
- Super-Kamiokande: 50.000 Tonnen Wasser und Tscherenkow-Effekt, ν_e und ν_μ unterscheidbar
- Nobelpreis 2015:
  Arthur McDonald und Takaaki Kajita



Sudbury Neutrino Observatory: Außenansicht Detektor. Bild: Sudbury Neutrino Observatory (SNO) unter Lizenz CC BY-SA 4.0

Vier Grundgleichungen

$$\frac{\mathrm{d}P}{\mathrm{d}r} = -\frac{GM(r)\rho(P,T)}{r^2} \qquad \frac{\mathrm{d}L}{\mathrm{d}r} = \varepsilon(P,T)\cdot 4\pi r^2 \cdot \rho(P,T)$$

$$\frac{\mathrm{d}M}{\mathrm{d}r} = 4\pi r^2 \cdot \rho(P,T) \qquad \frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}r} = -\frac{3}{64\pi\sigma}\cdot\frac{\kappa(P,T)\rho(P,T)}{r^2}\cdot\frac{L(r)}{T^3}$$

Mit ε der Energie-Erzeugungsrate pro Masseneinheit
und κ der Absorptionsrate für Strahlung
(bestimmt Temperaturgefälle im Stern)

Allgemeine Lösungen: Computersimulationen!

(κ, ε auch in Abhängigkeit von r umschreibbar)

Beispiel: MESA-Code

MESA-Web Calculation Submission

To submit a *MESA-Web* calculation, simply enter your email address in the *Email Address* field at the bottom of the form below, and then click the *Submit* button.

The default parameters have been chosen to evolve a 1 $M_\odot$ model from pre main-sequence to white dwarf in less than 2 hours of wall time. To obtain more-Detailed information about each parameter, click on the name of the parameter to visit the corresponding entry on the the *MESA-Web* Input page.

After a calculation completes, you will receive an email with link to a Zip archive that contains the output from *MESA-Web* (note that the link expire after one day). For information on the contents of this archive, see the *MESA-Web* Output page.

Initial Properties

Mass: 1.0 $M_\odot$

Metallicity: 0.02

Rotation Rate ($\Omega_{ZAMS}/\Omega_{crit}$): 0.0

Nuclear Reactions

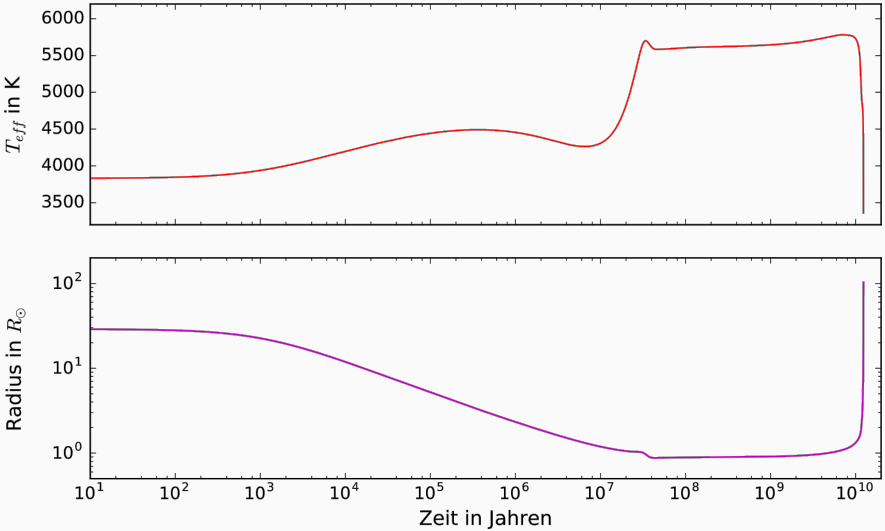
Network: basic

Custom Nuclear Reaction Rate: none

Upload Rate: Browse... No file selected.

http://user.astro.wisc.edu/~townsend/static.php?ref=mesa-web-submit

Zeitlicher Verlauf: Radius und Temperatur



Rechnung für $M = 1 \cdot M_\odot$ und gleiche chemische Zusammensetzung wie Sonne, MESA-Simulation

Roter Riesenstern: Beteigeuze

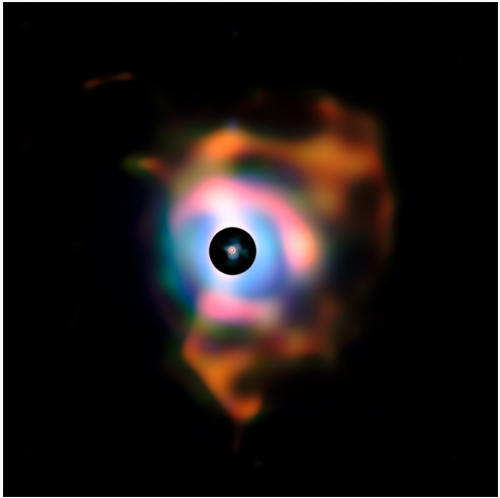


Bild: ESO/P. Kervella

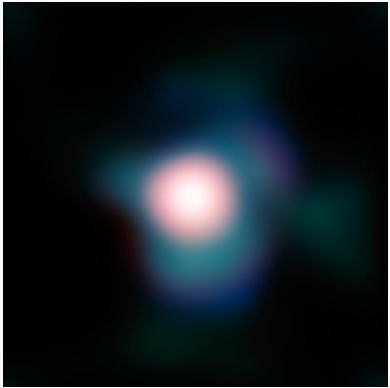


Bild: ESO/P. Kervella

$R \sim 1200\ R_\odot$

Spätstadien von Sternen

Schalenbrennen, unterschiedliche Fusionsphasen — und was passiert, nachdem der Kernbrennstoff verbraucht ist?

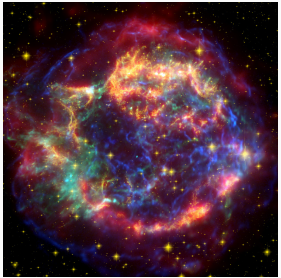
massearme Sterne, $M < 8\ M_\odot$

vergleichsweise allmähliches Ende
→ Weißer Zwerg

Bild: ESO

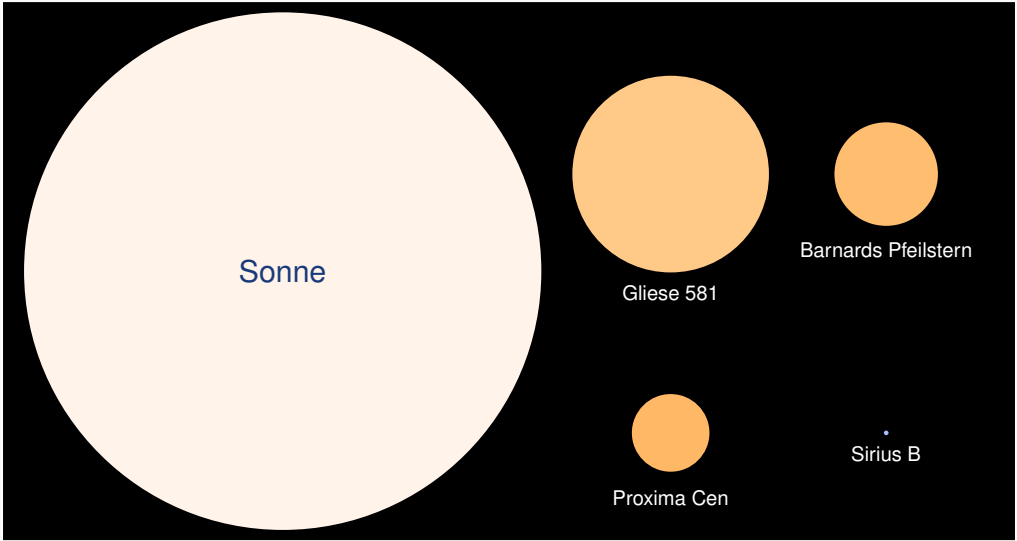
massereiche Sterne, $M > 8\ M_\odot$

gewaltsames Ende Supernova
→ Neutronenstern

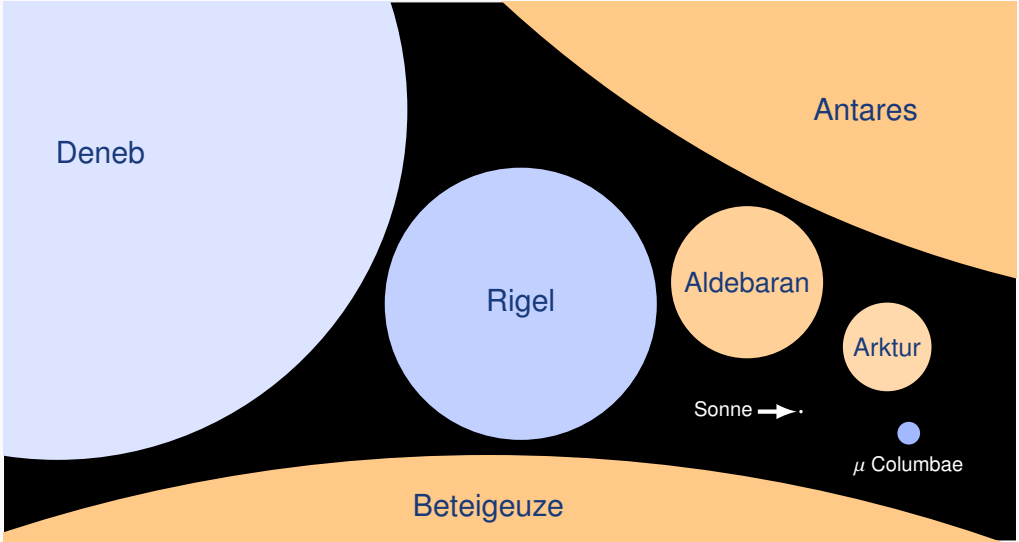


NASA/JPL-Caltech/STScI/CXC/SAO

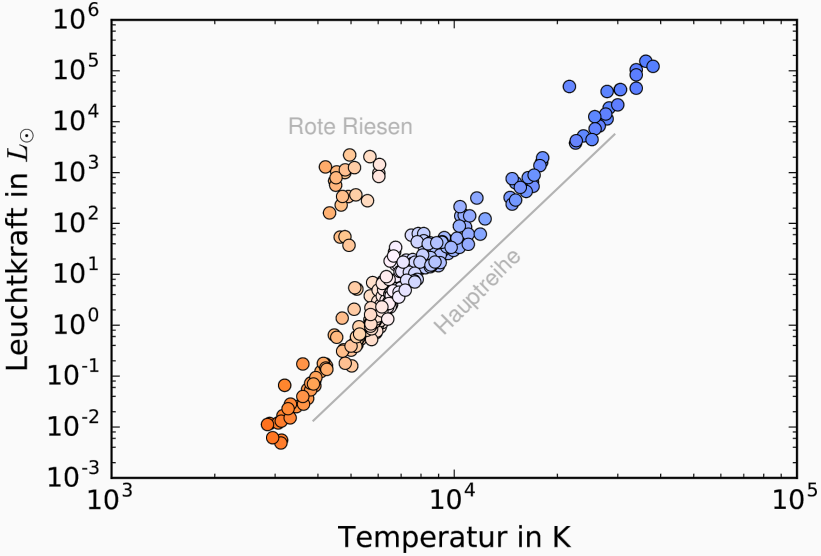
Sternarten: Vergleich Sonne und andere Zwergsterne



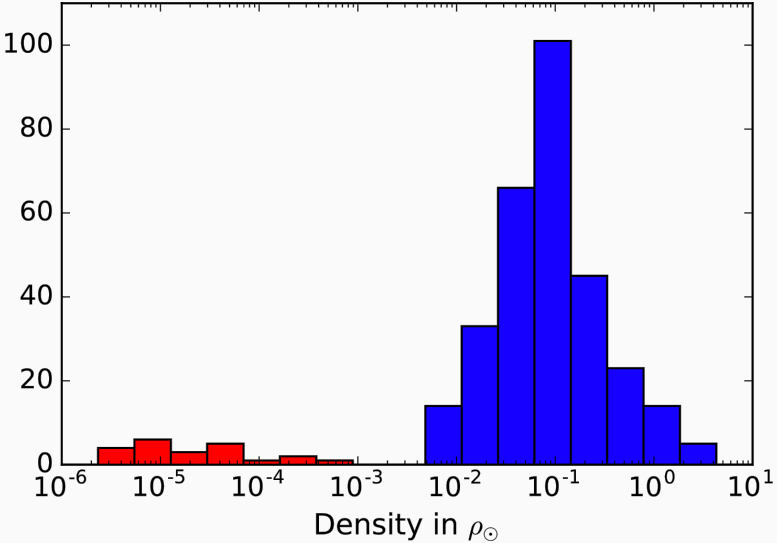
Sternarten: Vergleich Sonne und Riesensterne



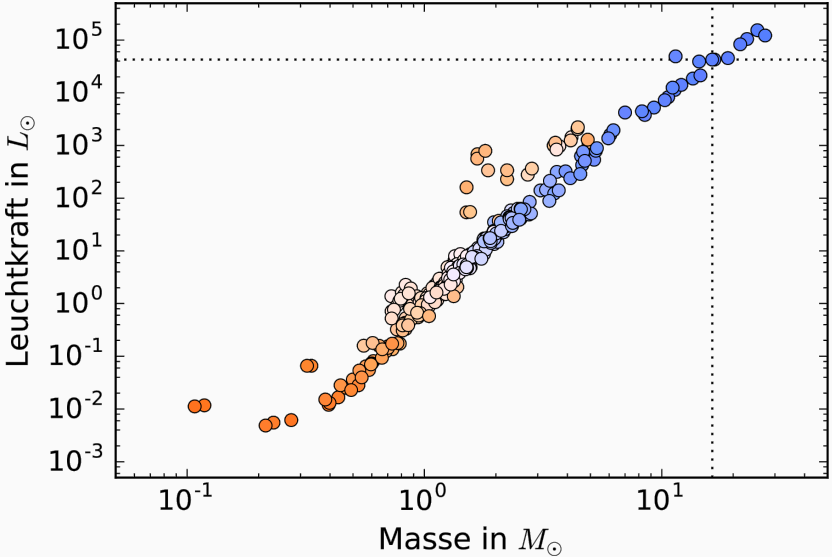
Systematik von Sternen: Hertzsprung-Russell-Diagramm



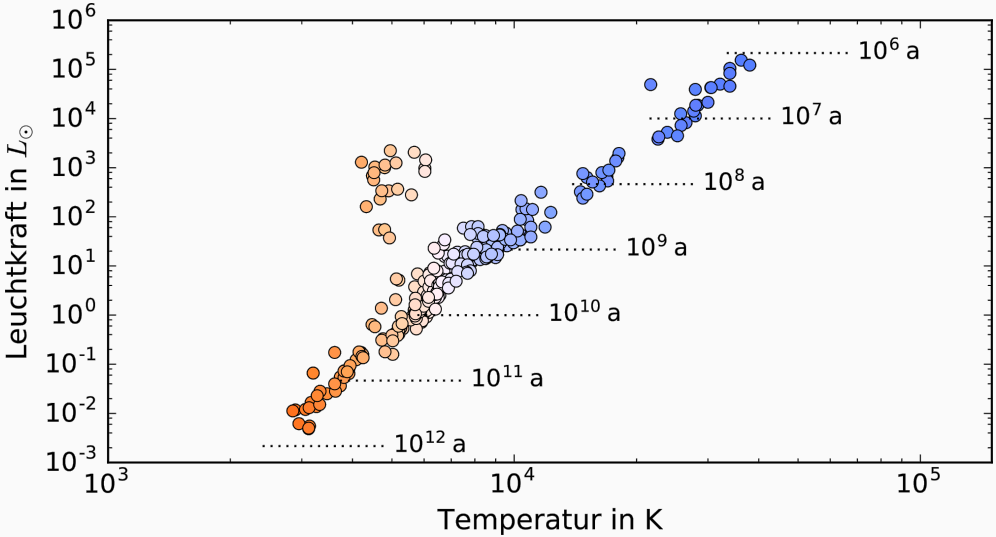
Separiertes Histogramm Dichte: Rote Riesen vs. Hauptreihe



Masse-Leuchtkraft-Relation $L \sim M^{3.5}$

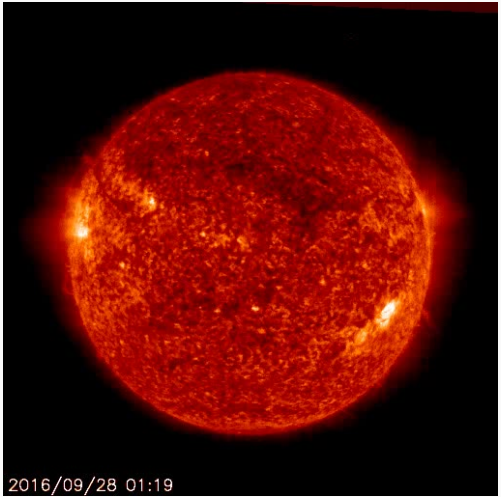


Verweildauer auf der Hauptreihe $\tau \sim M/L \sim M/M^{3.5} = M^{-2.5}$



Auswirkungen von Sternen auf ihre Umgebung

- (Gravitations-)Gezeitenkräfte: Gebundene Rotation, Ringe
- Elektromagnetische Strahlung
- Teilchenwinde



Bilder: SOHO (NASA & ESA)

Strahlung: Habitable Zone

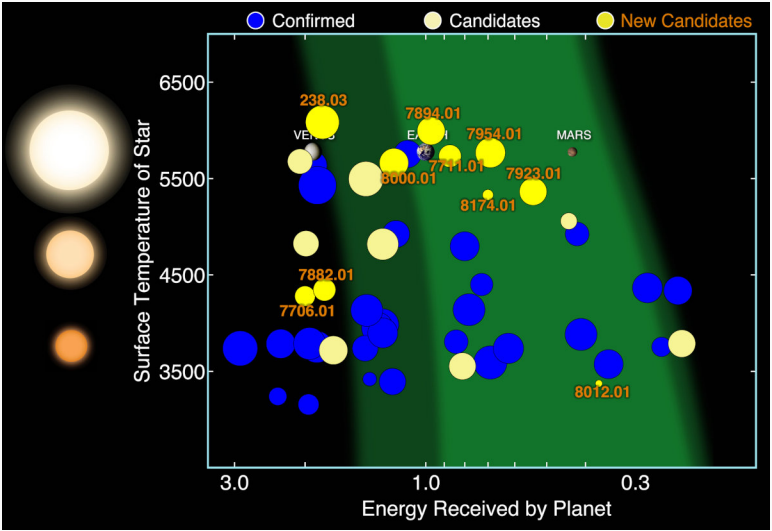
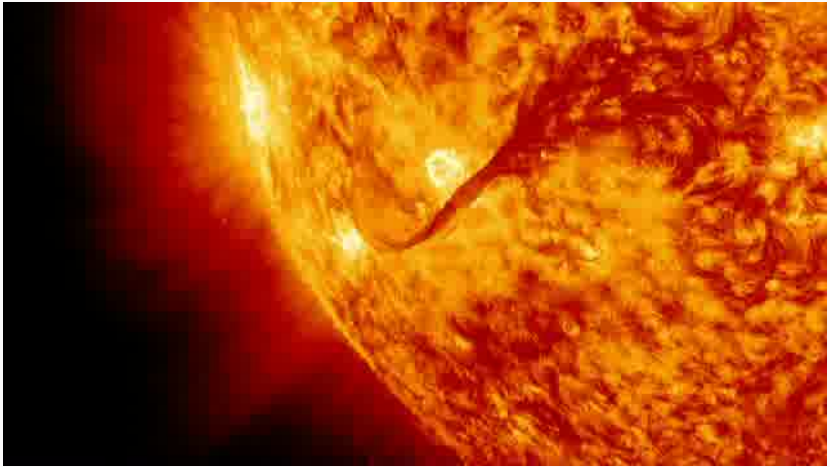


Bild: NASA/Ames Research Center/Wendy Stenzel

Sonnenaktivität/Sternaktivität



Bilder: SOHO (ESA & NASA)

Sonnenwind, Teilchenwinde allgemein: Protonen, ^{4}He, Spuren anderer $\Rightarrow$ Atmosphärenheizung!

Ausblick

- Erdähnliche Planeten (12. Dezember, MP)
- Gasriesen und Eisriesen (19. Dezember, HK)
- Winterpause
- Satelliten und Ringe (9. Januar, MP)