

Sternaufbau und Sternentwicklung – Teil 1

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

Nürnberger Astronomische Arbeitsgemeinschaft e.V.

Grundkurs Astronomie
27. Oktober 2025



1 Physikalische Grundlagen

- Elektromagnetisches Spektrum
- Aufbau der Materie
- Licht-Materie-Wechselwirkung
- Spektroskopie

2 Sternentstehung

- Kollaps von Molekülwolken
- Kernfusion
- Frühe Entwicklung
- Planetenentstehung und Exoplaneten

Wie können wir etwas über Sterne lernen?

Unsere wichtigste Untersuchungsmöglichkeit für Sterne: Licht

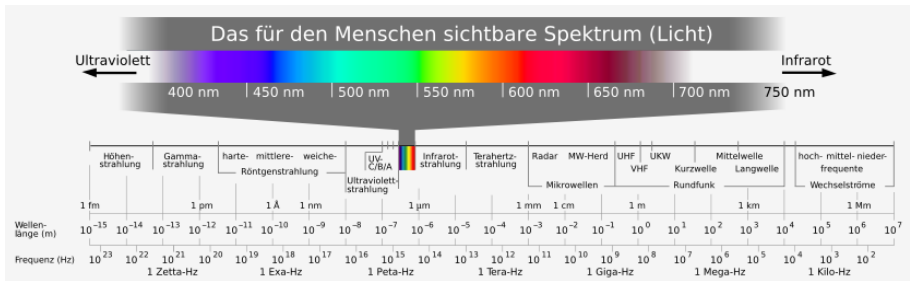


[Thomas Jäger/NAA]

- Was können wir aus dem Licht eines Sterns alles erfahren?
- Wie beeinflussen Zusammensetzung, Temperatur etc. das Licht eines Sterns?

Elektromagnetisches Spektrum I

- Farbe des Lichts $\hat{=}$ Energie eines Photons $\hat{=}$ Wellenlänge (im Vakuum)
- Astronomische Beobachtung findet nicht nur im sichtbaren Licht statt, sondern in nahezu allen Bereichen des elektromagnetischen Spektrums.



Das elektromagnetische Spektrum [Wikipedia]

Elektromagnetisches Spektrum II

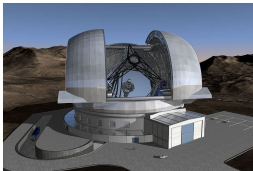
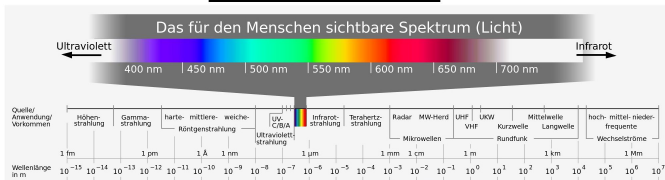
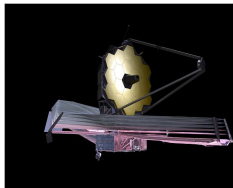
Zusammenhang Frequenz-Wellenlänge:

$$f \cdot \lambda = c$$

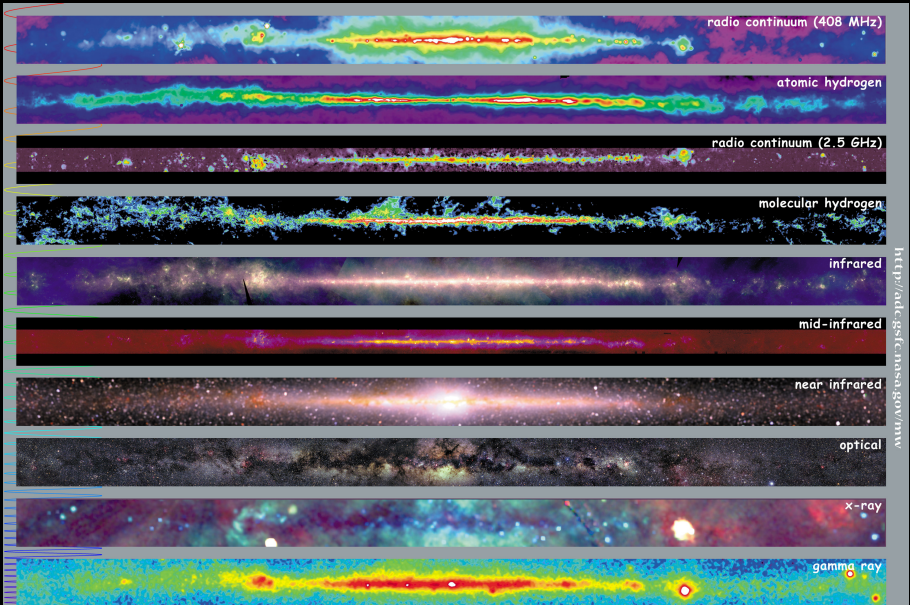
Lichtgeschwindigkeit $c \approx 299.792 \text{ km/s}$, Frequenz f , Wellenlänge λ

Photonenenergie	hoch	niedrig
Frequenz	hoch	niedrig
Wellenlänge	kurz	lang
Farbe	blau	rot

Multiwellenlängenastronomie



[ESO, NAOJ, NRAO, ESA, MPG]



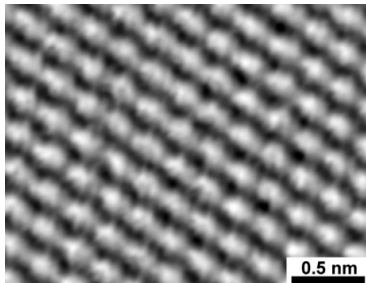
<http://adg.gsfc.nasa.gov/mw>



Multiwavelength Milky Way

Aufbau der Materie

Grundbausteine der Materie: Atome



Aufbau der Atome:

- Atomkern
 - ▶ Protonen (positiv geladen)
 - ▶ Neutronen (elektrisch neutral)
- Elektronen (negativ geladen)

- Die chemischen Eigenschaften eines Atoms werden von der Anzahl der Protonen, der sogenannten *Ordnungszahl* Z , bestimmt.
- Die verschiedenen Atome bezeichnet man als Elemente
- Verbindungen mehrere Atome bezeichnet man als Moleküle
- **Bohrsches Atommodell**: Die Elektronen umkreisen den Atomkern auf diskreten Bahnen, nur bestimmte Abstände zum Atomkern sind möglich
- Jeder Bahn ist eine Energie E zugeordnet. Energiedifferenz zwischen zwei Bahnen m und n :

$$\Delta E = E_m - E_n$$

- Anzahl Elektronen = Anzahl Protonen \Rightarrow Atom ist elektrisch neutral

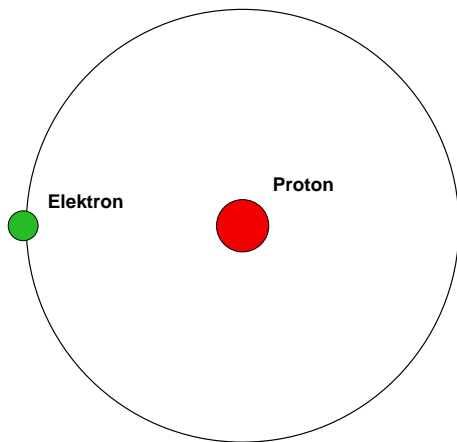
Periodensystem der Elemente

<div> <div>1</div> <div>1. Hg IA</div> <div>1.00794</div> <div>¹H</div> <div>1</div> <div>2</div> <div>2. Hg IIA</div> <div>4.002602</div> <div>⁴He</div> <div>18</div> <div>8. Hg VIIIA</div> </div>																	
<div> <div>3</div> <div>3. Hg IIIA</div> <div>10.811</div> <div>¹⁰B</div> <div>13</div> <div>4. Hg IVA</div> <div>12.017</div> <div>¹²C</div> <div>14</div> <div>5. Hg VA</div> <div>14.0084</div> <div>¹⁴N</div> <div>15</div> <div>6. Hg VIA</div> <div>15.9994</div> <div>¹⁶O</div> <div>16</div> <div>7. Hg VIIA</div> <div>18.9984</div> <div>¹⁹F</div> <div>17</div> <div>8. Hg VIIIA</div> <div>20.1797</div> <div>²⁰Ne</div> <div>18</div> </div>																	
<div> <div>19</div> <div>19K</div> <div>39.0983</div> <div>³⁹K</div> <div>20</div> <div>20Ca</div> <div>40.078</div> <div>⁴⁰Ca</div> <div>21</div> <div>21Sc</div> <div>44.955910</div> <div>⁴⁵Sc</div> <div>22</div> <div>22Ti</div> <div>47.867</div> <div>⁴⁸Ti</div> <div>23</div> <div>23V</div> <div>50.9415</div> <div>⁵¹V</div> <div>24</div> <div>24Cr</div> <div>51.9961</div> <div>⁵²Cr</div> <div>25</div> <div>25Mn</div> <div>54.938045</div> <div>⁵⁵Mn</div> <div>26</div> <div>26Fe</div> <div>55.845</div> <div>⁵⁶Fe</div> <div>27</div> <div>27Co</div> <div>58.9332</div> <div>⁵⁹Co</div> <div>28</div> <div>28Ni</div> <div>58.6934</div> <div>⁵⁹Ni</div> <div>29</div> <div>29Cu</div> <div>63.546</div> <div>⁶⁴Cu</div> <div>30</div> <div>30Zn</div> <div>65.39</div> <div>⁶⁶Zn</div> <div>31</div> <div>31Ga</div> <div>69.723</div> <div>⁷⁰Ga</div> <div>32</div> <div>32Ge</div> <div>72.61</div> <div>⁷³Ge</div> <div>33</div> <div>33As</div> <div>74.9216</div> <div>⁷⁵As</div> <div>34</div> <div>34Se</div> <div>78.96</div> <div>⁷⁹Se</div> <div>35</div> <div>35Br</div> <div>79.904</div> <div>⁸⁰Br</div> <div>36</div> <div>36Kr</div> <div>83.80</div> <div>⁸⁴Kr</div> </div>																	
<div> <div>37</div> <div>37Rb</div> <div>85.4678</div> <div>⁸⁵Rb</div> <div>38</div> <div>38Sr</div> <div>87.62</div> <div>⁸⁸Sr</div> <div>39</div> <div>39Y</div> <div>88.90585</div> <div>⁸⁹Y</div> <div>40</div> <div>40Zr</div> <div>91.224</div> <div>⁹²Zr</div> <div>41</div> <div>41Nb</div> <div>92.90638</div> <div>⁹³Nb</div> <div>42</div> <div>42Mo</div> <div>95.94</div> <div>⁹⁶Mo</div> <div>43</div> <div>43Tc</div> <div>98.9062</div> <div>⁹⁹Tc</div> <div>44</div> <div>44Ru</div> <div>101.07</div> <div>¹⁰¹Ru</div> <div>45</div> <div>45Rh</div> <div>102.90550</div> <div>¹⁰³Rh</div> <div>46</div> <div>46Pd</div> <div>106.42</div> <div>¹⁰⁷Pd</div> <div>47</div> <div>47Ag</div> <div>107.8662</div> <div>¹⁰⁸Ag</div> <div>48</div> <div>48Cd</div> <div>112.411</div> <div>¹¹³Cd</div> <div>49</div> <div>49In</div> <div>114.818</div> <div>¹¹⁵In</div> <div>50</div> <div>50Sn</div> <div>117.901</div> <div>¹¹⁸Sn</div> <div>51</div> <div>51Sb</div> <div>121.760</div> <div>¹²²Sb</div> <div>52</div> <div>52Te</div> <div>127.60</div> <div>¹²⁸Te</div> <div>53</div> <div>53I</div> <div>126.90447</div> <div>¹²⁷I</div> <div>54</div> <div>54Xe</div> <div>131.29</div> <div>¹³²Xe</div> </div>																	
<div> <div>55</div> <div>55Cs</div> <div>132.90545</div> <div>¹³³Cs</div> <div>56</div> <div>56Ba</div> <div>137.327</div> <div>¹³⁷Ba</div> <div>57-71</div> <div>La-Lu</div> <div>174.904</div> <div>¹⁷⁵La</div> <div>72</div> <div>72Hf</div> <div>178.49</div> <div>¹⁷⁹Hf</div> <div>73</div> <div>73Ta</div> <div>180.9479</div> <div>¹⁸¹Ta</div> <div>74</div> <div>74W</div> <div>183.84</div> <div>¹⁸⁴W</div> <div>75</div> <div>75Re</div> <div>186.207</div> <div>¹⁸⁷Re</div> <div>76</div> <div>76Os</div> <div>192.2237</div> <div>¹⁹³Os</div> <div>77</div> <div>77Ir</div> <div>192.222</div> <div>¹⁹³Ir</div> <div>78</div> <div>78Pt</div> <div>195.078</div> <div>¹⁹⁶Pt</div> <div>79</div> <div>79Au</div> <div>196.96655</div> <div>¹⁹⁷Au</div> <div>80</div> <div>80Hg</div> <div>200.59</div> <div>²⁰¹Hg</div> <div>81</div> <div>81Tl</div> <div>204.3833</div> <div>²⁰⁵Tl</div> <div>82</div> <div>82Pb</div> <div>207.2</div> <div>²⁰⁸Pb</div> <div>83</div> <div>83Bi</div> <div>208.98038</div> <div>²⁰⁹Bi</div> <div>84</div> <div>84Po</div> <div>209</div> <div>²¹⁰Po</div> <div>85</div> <div>85At</div> <div>210</div> <div>²¹¹At</div> <div>86</div> <div>86Rn</div> <div>222</div> <div>²²³Rn</div> </div>																	
<div> <div>87</div> <div>87Fr</div> <div>223</div> <div>²²³Fr</div> <div>88</div> <div>88Ra</div> <div>226</div> <div>²²⁶Ra</div> <div>89-103</div> <div>Ac-Lr</div> <div>227</div> <div>²²⁷Ac</div> <div>104</div> <div>104Rf</div> <div>261</div> <div>²⁶¹Rf</div> <div>105</div> <div>105Db</div> <div>262</div> <div>²⁶²Db</div> <div>106</div> <div>106Sg</div> <div>263</div> <div>²⁶³Sg</div> <div>107</div> <div>107Bh</div> <div>264</div> <div>²⁶⁴Bh</div> <div>108</div> <div>108Hs</div> <div>265</div> <div>²⁶⁵Hs</div> <div>109</div> <div>109Mt</div> <div>266</div> <div>²⁶⁶Mt</div> <div>110</div> <div>110Ds</div> <div>267</div> <div>²⁶⁷Ds</div> <div>111</div> <div>111Uub</div> <div>268</div> <div>²⁶⁸Uub</div> <div>112</div> <div>112Uub</div> <div>269</div> <div>²⁶⁹Uub</div> <div>113</div> <div>113Uut</div> <div>270</div> <div>²⁷⁰Uut</div> <div>114</div> <div>114Uuq</div> <div>271</div> <div>²⁷¹Uuq</div> <div>115</div> <div>115Uup</div> <div>272</div> <div>²⁷²Uup</div> <div>116</div> <div>116Uuh</div> <div>273</div> <div>²⁷³Uuh</div> <div>117</div> <div>117Uus</div> <div>274</div> <div>²⁷⁴Uus</div> <div>118</div> <div>118Uuo</div> <div>275</div> <div>²⁷⁵Uuo</div> </div>																	

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

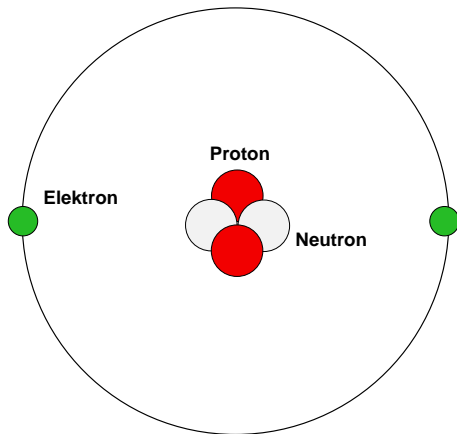
132.90505	140.116	140.90765	144.24	145	150.36	151.964	157.25	158.92534	164.93032	167.26	168.93421	173.04	174.967
¹³³ La	¹³⁸ Ce	¹⁴⁰ Pr	¹⁴⁴ Nd	¹⁴⁵ Pm	¹⁵⁰ Sm	¹⁵¹ Eu	¹⁵⁷ Gd	¹⁵⁸ Dy	¹⁶⁴ Ho	¹⁶⁷ Er	¹⁶⁸ Tm	¹⁷³ Yb	¹⁷⁴ Lu
57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70
Lanthan	Cer	Praseodym	Neodym	Promethium	Samarium	Europium	Gadolinium	Terbium	Dysprosium	Ytterbium	Thulium	Ytterbium	Lutetium
227.0331	232.0377	231.03628	237.04817	244.06422	244.06422	244.06422	244.06422	244.06422	244.06422	244.06422	244.06422	244.06422	244.06422
²²⁷ Ac	⁹⁰ Th	⁹¹ Pa	⁹² U	⁹³ Np	⁹⁴ Pu	⁹⁵ Am	⁹⁶ Cm	⁹⁷ Bk	⁹⁸ Cf	⁹⁹ Es	¹⁰⁰ Fm	¹⁰¹ Md	¹⁰² No
227.0331	232.0377	231.03628	237.04817	244.06422	244.06422	244.06422	244.06422	244.06422	244.06422	244.06422	244.06422	244.06422	244.06422
Actinium	Thorium	Protactinium	Uranium	Neptunium	Plutonium	Americium	Curium	Berkelium	Californium	Einsteinium	Fermium	Mendelevium	Nobelium
87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100

Wasserstoffatom



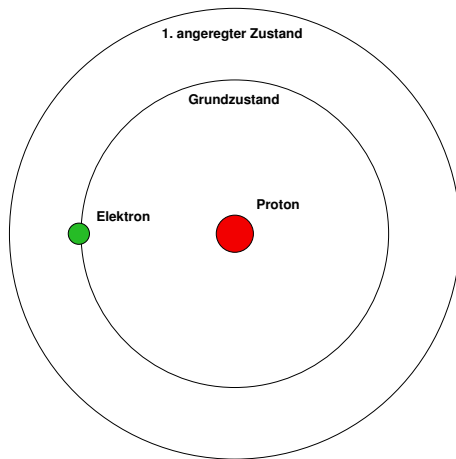
- Kürzel: H (Hydrogenium)
- Einfachstes Atom: 1 Proton, 1 Elektron
- $Z = 1$
- Häufigstes Element im Universum

Heliumatom



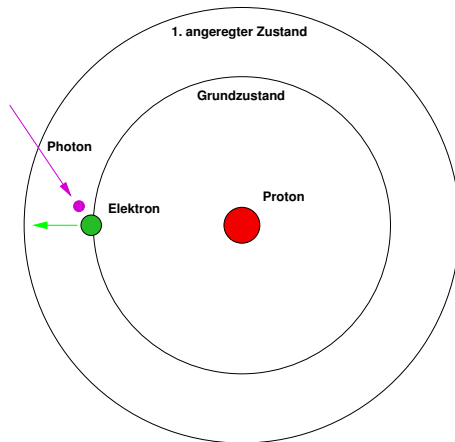
- Kürzel: He (Helium)
- Kern von ${}^4_2\text{He}$: 2 Protonen, 2 Neutronen
- 2 Elektronen
- $Z = 2$
- Zweithäufigstes Element im Universum

Absorption I



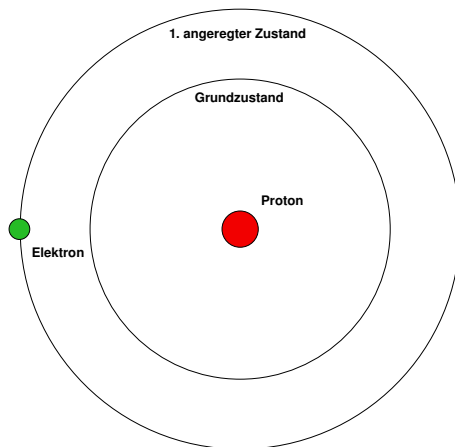
Normalerweise befinden sich die Elektronen im energetisch niedrigsten Niveau (es können sich bei Atomen mit mehrerer Elektronen aber maximal zwei Elektronen im Grundzustand befinden)

Absorption II



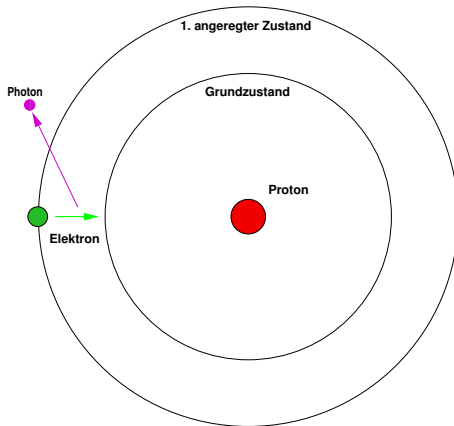
Photon mit der passenden Energie ΔE fällt ein: Photon wird absorbiert und das Elektron auf eine höhere Bahn gehoben: *angeregter Zustand*

Emission I



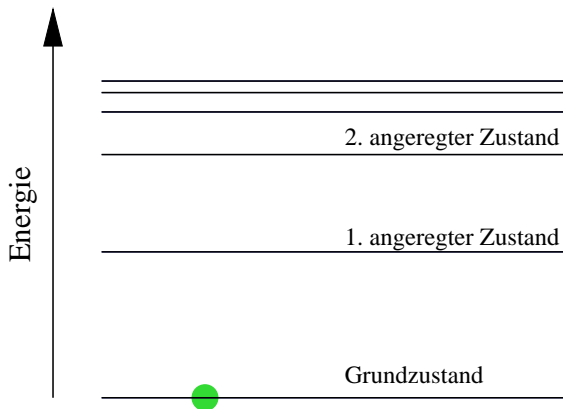
Der angeregte Zustand ist nicht stabil

Emission II



Elektron fällt nach kurzer Zeit wieder in Grundzustand \Rightarrow Emission eines Photons mit der Energie ΔE

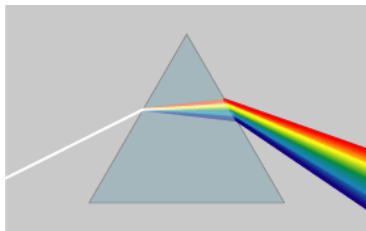
Emission III



Abstand der Energieniveaus charakteristisch für jedes Atom bzw. Molekül

Simulation: https://astro.unl.edu/naap/hydrogen/animations/hydrogen_atom.html

Spektroskopie – Analyse des Lichts



Weißlichtzerlegung mit einem Prisma [Wikipedia]

- Licht lässt sich durch Prismen oder Beugungsgitter in seine Wellenlängen („Farben“) zerlegen
- Verschiedene Elemente haben charakteristische Linien

⇒ aus den Spektren von Himmelsobjekten lässt sich deren Zusammensetzung bestimmen

Spektren

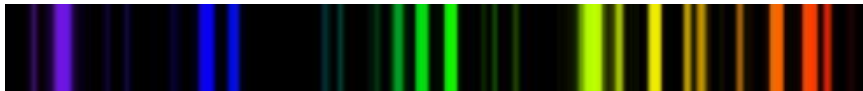
- Kontinuierliches Spektrum



- Absorptionsspektrum



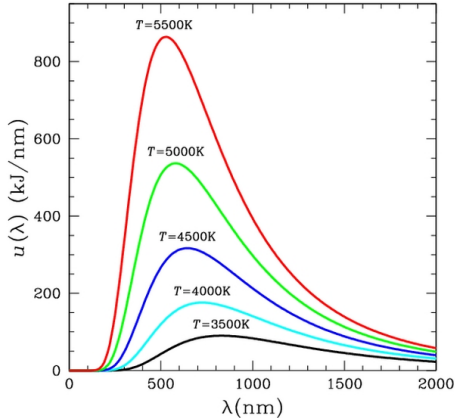
- Emissionsspektrum



Sternspektren: Absorptionsspektren

Spektren: M. Lemke/Dr. Remeis-Sternwarte Bamberg

Plancksches Strahlungsgesetz



Spektrum eines schwarzen Körpers für verschiedene Temperaturen [Wikipedia]

- Strahlung eines „schwarzen Körpers“ abhängig von Temperatur
- Höhere Temperatur \Rightarrow Maximum liegt bei kurzwelligerer = energiereicherer Strahlung
- Bei Raumtemperatur: Maximum liegt im Infraroten

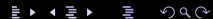
Einfache Möglichkeit zur Temperaturbestimmung: Bei welcher Wellenlänge (=Farbe) ist die Emission am stärksten?

Globular Cluster NGC 6397



Hubble
Heritage

NASA and The Hubble Heritage Team (STScI/AURA) • Hubble Space Telescope WFC2 • STScI-PRC03-21



Sterne mit ähnlichen Spektren werden in Spektralklassen unterteilt

Harvard-Klassifikation

O – Oh

B – Be

A – A

F – Fine

G – Girl/guy

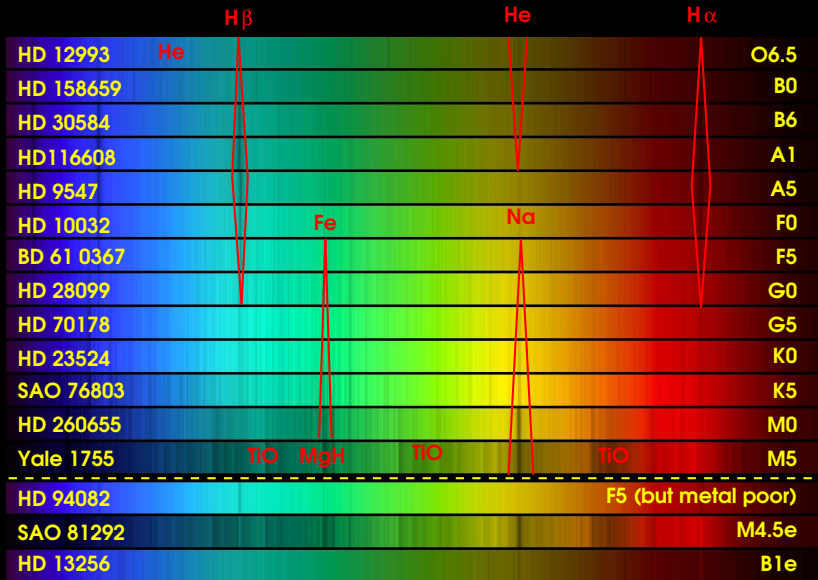
K – Kiss

M – Me

C

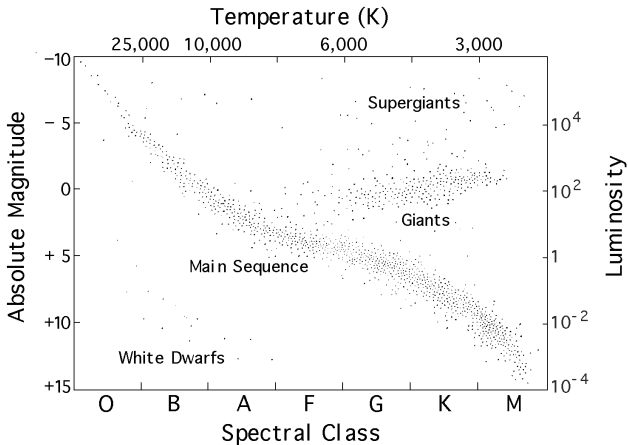
Spektralklassen II

	Temperatur [K]	Kriterien
O	50.000	hochionisierte Atome
B	25.000	He I stark
A	10.000	H maximal, ionisierte Metalle
F	7.600	ionisierte/neutrale Metalle, Ca II stark
G	6.000	neutrale Metalle, Ca II sehr stark
K	5.100	H schwach, neutrale Atomlinien
M	3.600	Neutrale Atomlinien, Moleküllinien
C	3.000	viel Kohlenstoff



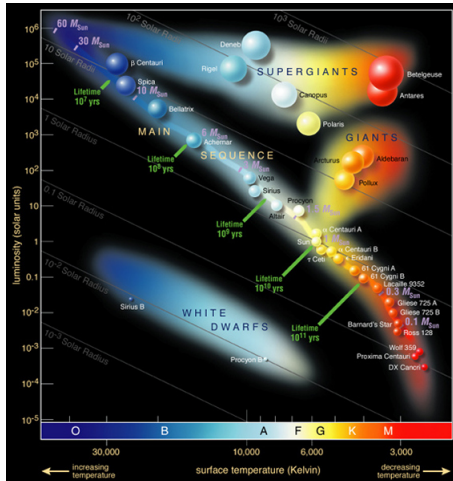
Spektralklassen [NOAO]

Hertzsprung-Russell-Diagramm (HRD) I



Hertzsprung-Russell-Diagramm [NASA/GSFC]

Hertzsprung-Russell-Diagramm (HRD) II



Hertzsprung-Russell-Diagramm [ESO]

Simulation: <http://astro.unl.edu/naap/hr/animations/hr.html>

1 Physikalische Grundlagen

- Elektromagnetisches Spektrum
- Aufbau der Materie
- Licht-Materie-Wechselwirkung
- Spektroskopie

2 Sternentstehung

- Kollaps von Molekülwolken
- Kernfusion
- Frühe Entwicklung
- Planetenentstehung und Exoplaneten

Dunkelnebel Barnard 7



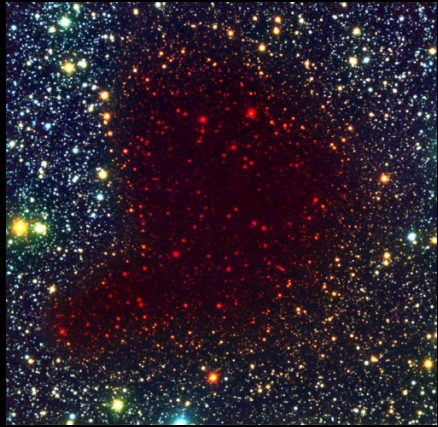
[Bernhard Liebscher (NAA)]



Molekülwolke B68



Molekülwolke B68 im Optischen [ESO;
VLT/FORS1]



Molekülwolke B68 im Infraroten [ESO;
VLT/FORS1 + NTT/SOFI]

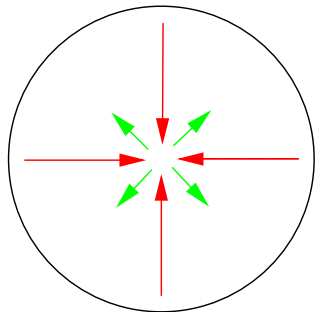
Sterne entstehen in Gruppen aus interstellaren Molekülwolken

Riesenmolekülwolken

- Ausdehnung: 20 – 600 Lichtjahre
- Dichte H_2 : $n = 100\text{--}1000 \frac{\text{Teilchen}}{\text{cm}^3}$
- Masse: $10^4\text{--}10^6 M_\odot$
- Temperatur: 10–40 K
- Zusammensetzung: Wasserstoff (H_2), Kohlemonoxid (CO), Alkohole, andere komplexe organische Moleküle

Molekülwolken kollabieren durch äußere Störungen (z.B. nahe Supernovaexplosion, Kollision zweier Wolken)

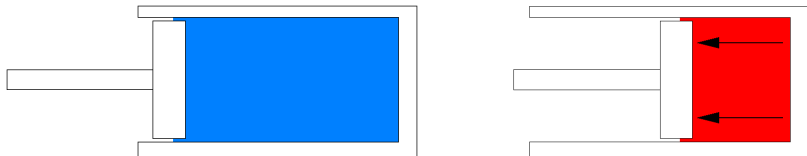
Sternentstehung II



→ Gravitationskraft
← Gasdruck/Strahlungsdruck

- Bedingung für Kollaps: Gravitationskraft stärker als Gasdruck
⇒ *Jeans-Kriterium*: Bei gegebener Masse muss die Wolke einen bestimmten Radius (Jeans-Radius) unterschreiten, um kollabieren zu können.

Sternentstehung III



- Gas wird verdichtet \Rightarrow Druck und Temperatur steigen
- Drehimpulserhaltung: Fragmentierung der Wolke
- Entstehung eines ersten hydrostatischen Kerns mit ca $0,01 M_{\odot}$
(d.h. Gravitationskraft wird durch Gasdruck kompensiert)

Sternentstehung IV

- Kern wird durch einfallende Materie bis mit $T \gtrsim 2000 \text{ K}$ weiter aufgeheizt
- die Wasserstoffmoleküle werden dissoziiert (in ihre Atome aufgelöst) \Rightarrow Kern kollabiert weiter
- Entstehung eines zweiten hydrostatischen Kerns mit $T \approx 10.000 \text{ K}$
- Hülle stürzt nahezu ungebremst auf den Kern ein
- Kinetische Energie wird in Leuchtkraft umgewandelt \Rightarrow weitere Erhitzung

Nach Erreichen von ca. 1 Mio K: **Kernfusion**

Modellrechnung zur Sternentstehung:

<http://www.astro.ex.ac.uk/people/mbate/Cluster/cluster3d.html>

Weitere Entwicklung abhängig von der Masse M der Verdichtung

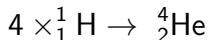
- $M \lesssim 0,08 M_{\odot}$:
Temperatur < 1 Mio K \Rightarrow keine Kernfusion, „Brauner Zwerg“
- $M \gtrsim 0,08 M_{\odot}$:
Temperatur > 1 Mio K \Rightarrow Kernfusion setzt ein, nachdem nahezu alles Gas auf den Stern eingefallen ist
- $M \gtrsim 3 M_{\odot}$:
Temperatur > 1 Mio K \Rightarrow Kernfusion setzt schon ein, während noch Materie auf den Stern einfällt, ein großer Anteil der ursprünglichen Masse wird durch den Strahlungsdruck wieder abgestoßen

Energieerzeugung in Sternen

Früher vermutete man, dass Sterne Energie erzeugen, indem sie kontrahieren und sich dabei erhitzen. Problem: Zeitskala zu kurz.

Lösung: Kernfusion

Wasserstoffkerne verschmelzen zu Heliumkernen



Der Heliumkern hat 0,7 % weniger Masse als die 4 Wasserstoffkerne

Energieausbeute

- Einstein: Masse und Energie sind äquivalent

$$E = mc^2$$

Vakuumlichtgeschwindigkeit $c \approx 300.000 \frac{\text{km}}{\text{s}}$

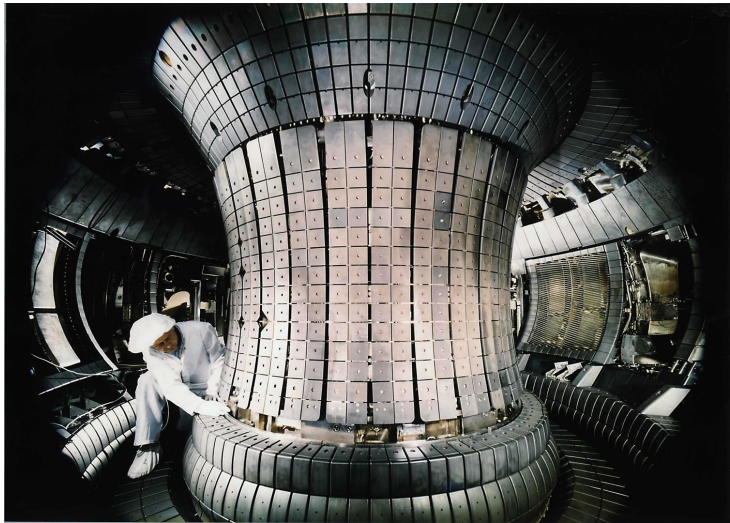
- 1 g Materie entspricht 25 GWh Energie
- Da bei der Kernfusion 0,7 % der Masse in Energie umgewandelt werden, werden bei der Fusion von 1 g Wasserstoff 175 MWh Energie freigesetzt.



Energie in 1 g Materie $\hat{=}$ 18 Stunden KKW Isar II

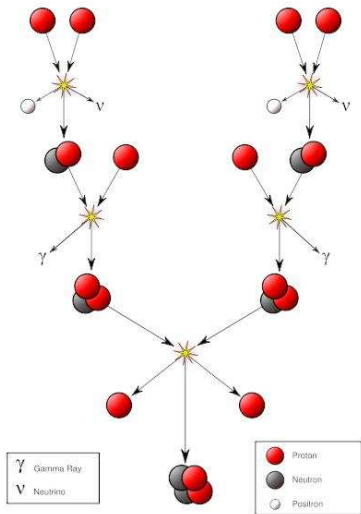
[Pro Aurum / E.ON Kernkraft GmbH]

Fusionsreaktor ASDEX Upgrade



[IPP]

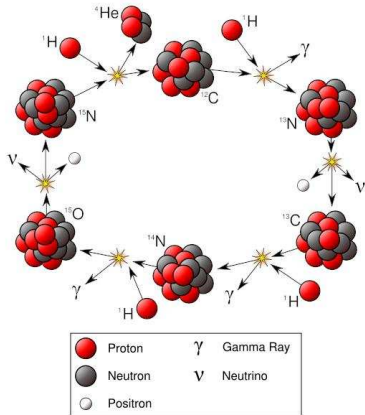
Proton-Proton-Zyklus



Dominierender Prozess in der Sonne

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

Bethe-Weizsäcker-Zyklus

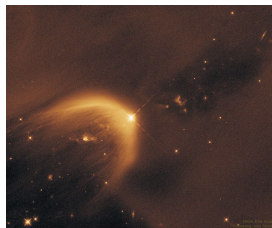
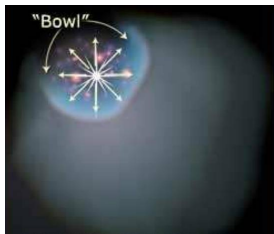


- Weitere Bezeichnung:
CNO-Zyklus
- Dominierender Prozess bei
Sternen mit hohen
Kerntemperaturen

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

Junger Stern

- Stern aufgrund der umgebenden Gaswolke zunächst unsichtbar
- Junger, heißer Stern hat intensiven Sternwind und Strahlungsdruck
- umgebende Gaswolke wird durch UV-Strahlung und Sternenwind aufgelöst
- Stern wird sichtbar



Schematische Darstellung / LDN 1471 in Perseus-Molekülwolke
[STScI / Hubble, NASA, ESA; Judy Schmidt]



HST-Aufnahme des Adlernebel M16 [NASA]



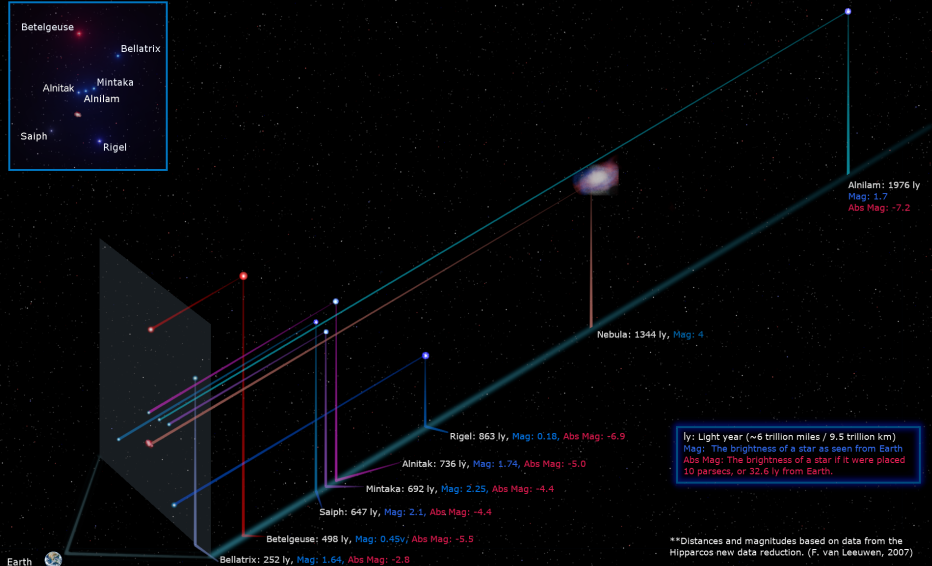
NASA, ESA, F. Paresce (INAF-IASF, Italy), and the WFC3 Science Oversight Committee

STScI-PRC09-32a

Great Nebula in Orion (M 42 - NGC 1976)

Typ: Nebel
Helligkeit: 4.00
RA/DE (J2000): 5h35m24.0s/-5° 27'00.0"
RA/DE (des Datums): 5h35m53s/-5°26'39"
Stundenwinkel/DE: 0h8m9s/-5°26'39"
Az/Alt: +182°31'12"/+36°23'09"
Größe: +1° 6'00"





ly: Light year (~6 trillion miles / 9.5 trillion km)
 Mag: The brightness of a star as seen from Earth
 Abs Mag: The brightness of a star if it were placed 10 parsecs, or 32.6 ly from Earth.

**Distances and magnitudes based on data from the Hipparcos new data reduction. (F. van Leeuwen, 2007)

RC.Davison - 2020

orbitalmaneuvers.com

Sternbild Orion [Ronald Davison]





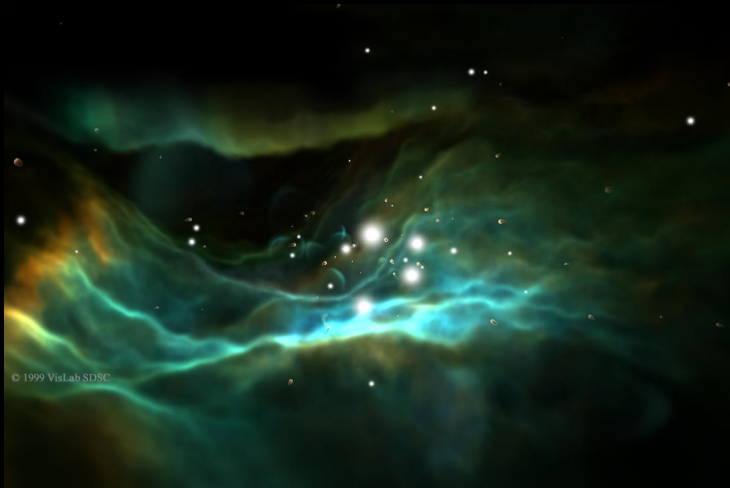
Orion-Molekülwolkenkomplex [Wikimedia/Rogelio Bernal Andreo]



Ausschnitt des Orionnebels M42 [NASA]

Video zum Orionnebel:

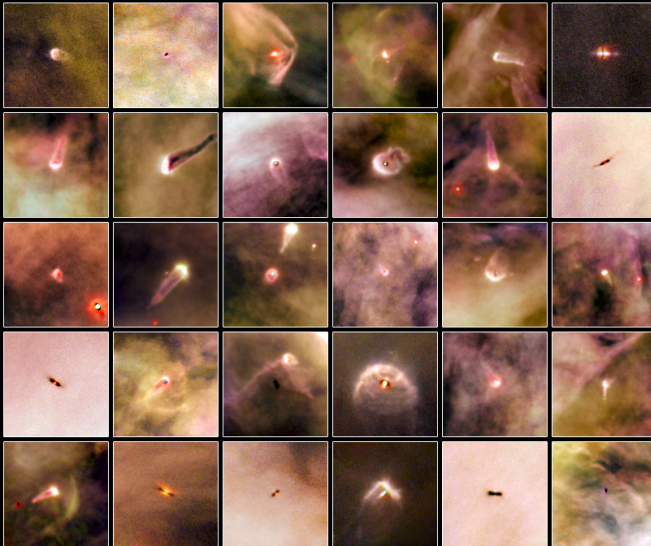
<https://www.youtube.com/watch?v=cg2r5fzS7aE>



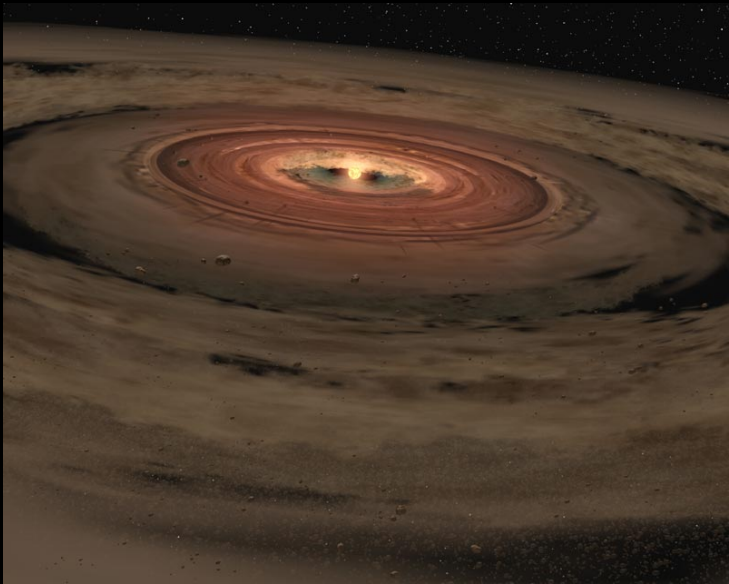
Sternentstehung im Orionnebel (Modellrechnung) [VisLab SDSC]



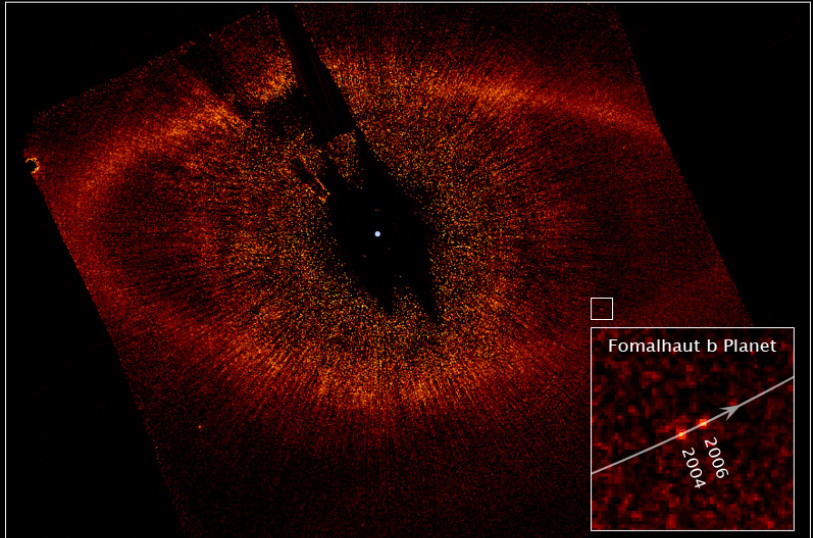
Protoplanetare Scheibe im Orionnebel [C.R. O'Dell/Rice University, and NASA]



Protoplanetare Scheiben im Orionnebel [NASA/ESA and L. Ricci (ESO)]



Planeten entstehen aus Staubscheiben um Sterne (Computergraphik) [NASA/JPL]



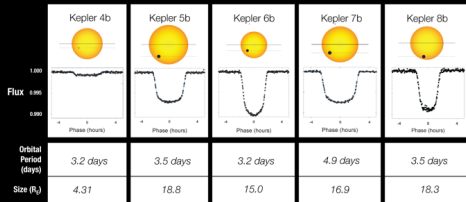
NASA, ESA, and P. Kalas (University of California, Berkeley)

STScI-PRC08-39a

Staubscheibe und Planet um Fomalhaut, Entfernung: 25 Lichtjahre [NASA/ESA]

Extrasolare Planeten: Nachweis

Transit Light Curves



[Bill Borucki, Jan 2010 AAS Presentation]

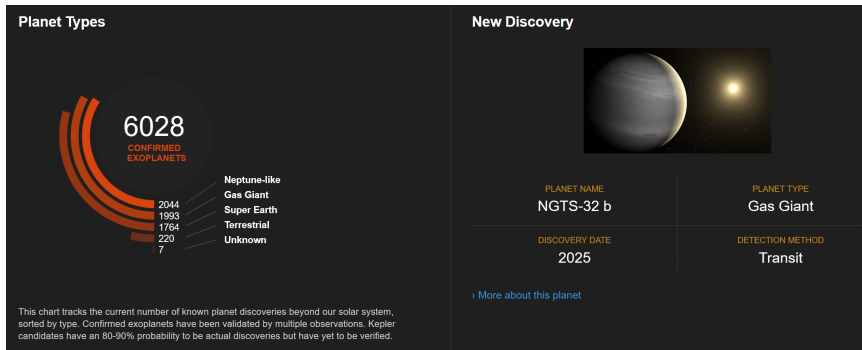
- Direkte Abbildung
- Radialgeschwindigkeitsmethode
- Transitmethode
- Eigenbewegung
- Gravitationslinseneffekt
- Pulsar Timing

<http://astro.unl.edu/naap/esp/animations/radialVelocitySimulator.html>

<http://astro.unl.edu/naap/esp/animations/transitSimulator.html>

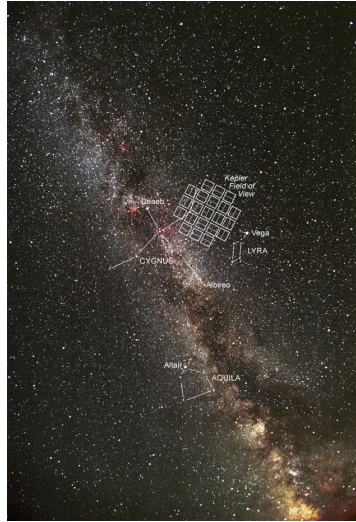
Extrasolare Planeten

6028 Exoplaneten (Stand 26. Oktober 2025)



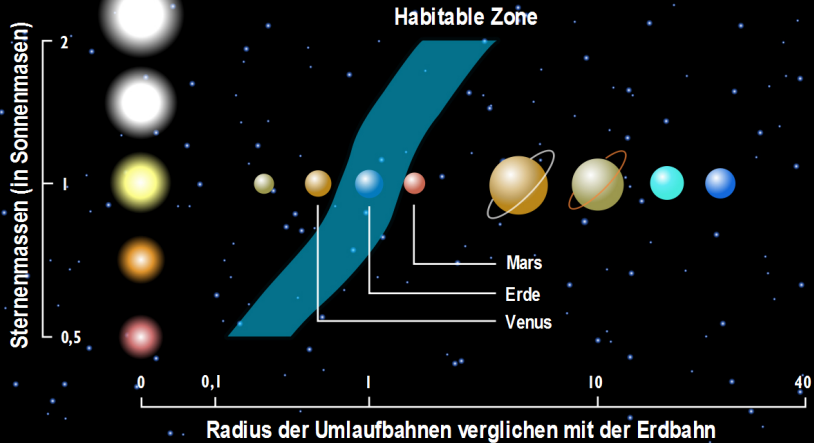
[<https://exoplanets.nasa.gov/discovery/discoveries-dashboard/>]

Weltraumteleskop Kepler



[Carter Roberts, NASA]

Habitable Zone



Simulation: <http://astro.unl.edu/naap/habitablezones/animations/stellarHabitableZone.html>

Potentially Habitable Exoplanets

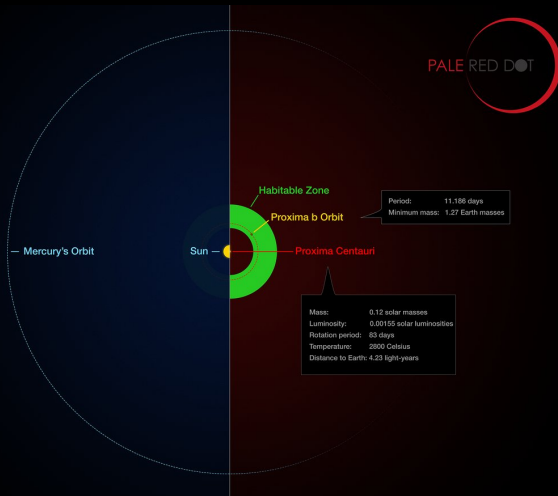
Ranked by Distance from Earth (light years)



Artistic representations. Earth, Mars, Jupiter, and Neptune for scale. Distance is between brackets. Planet candidates indicated with asterisks.

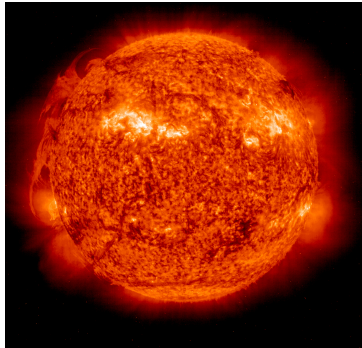
CREDIT: PHL @ UPR Arcicibo (phl.upr.edu) January 16, 2015

Proxima Centauri



[ESO/M. Kornmesser/G. Coleman]

Nächste Woche:



Sternaufbau, Sternentwicklung, Endstadien