

# Sternaufbau und Sternentwicklung – Teil 1

Dipl.-Phys. Johannes Hölzl

*hoelzl@naa.net*

Nürnberger Astronomische Arbeitsgemeinschaft e.V.

Grundkurs Astronomie

13. November 2023



## 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

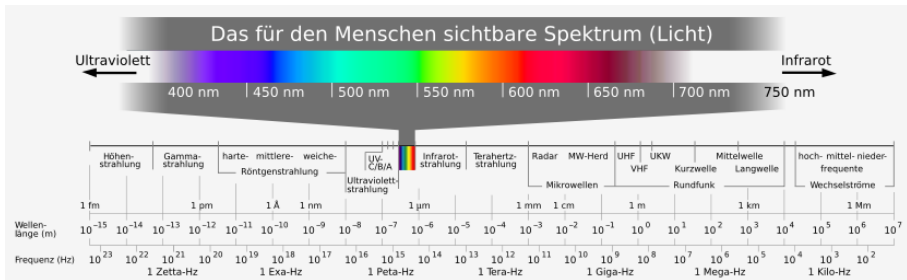


[Thomas Jäger/NAA]

- 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

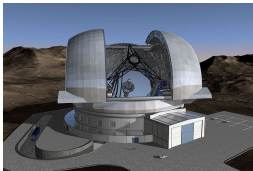
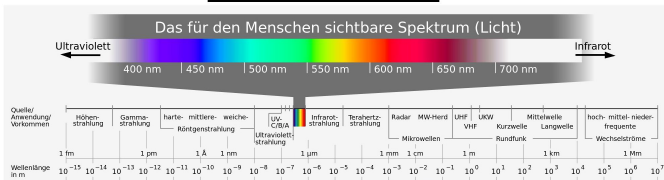
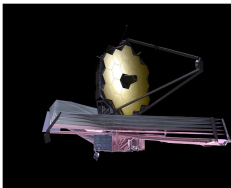
Zusammenhang Frequenz-Wellenlänge:

$$f \cdot \lambda = c$$

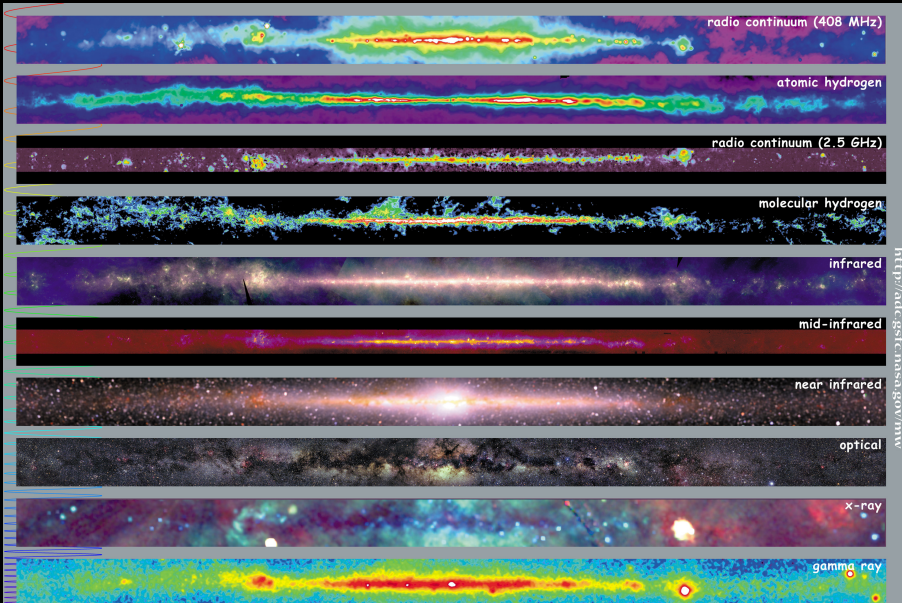
Lichtgeschwindigkeit  $c \approx 299.792 \text{ km/s}$ , Frequenz  $f$ , Wellenlänge  $\lambda$

<b>Photonenenergie</b>	hoch	niedrig
<b>Frequenz</b>	hoch	niedrig
<b>Wellenlänge</b>	kurz	lang
<b>Farbe</b>	blau	rot

# Multiwellenlängenastronomie



[ESO, NAOJ, NRAO, ESA, MPG]



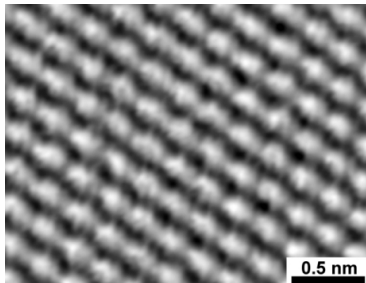
<http://ads.gsfc.nasa.gov/mw>



# Multiwavelength Milky Way



## 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

1. Hg IA 18. Hg VIIIA

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

## Periodensystem der Elemente

http://www.pse-online.de

**Relative Atommasse**  
(Mittelwert der Isotope)

**Ordnungszahl**  
Schmelzpunkt [°C]  
Elektronenkonfiguration  
Elementname

**kinäthliches Element**  
Elementkategorie  
Oxidationszahlen (Oxidanz)  
Elektronenkonfiguration (Oxidanz)

**Elementsymbol**  
N = kein stabiles Isotop bekannt  
G = gasförmig  
B = flüssig (bei 20 °C)  
A = fest

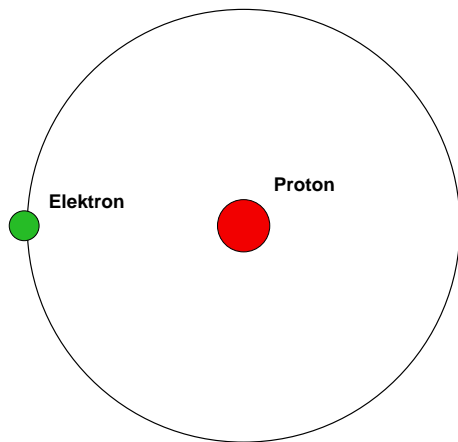
1	2											13	14	15	16	17	18			
1.00794 1H -1,1 Wasserstoff		4.002602 2He 0,4 Helium											200,99416 80Hg 2,0 Quecksilber	14,003064 6C -2,2 Kohlenstoff	12,0107 6C -2,2 Kohlenstoff	14,003064 6C -2,2 Kohlenstoff	15,994915 7N -3,2,3,4,5 Stickstoff	15,994915 8O -2,1 Sauerstoff	18,9984032 9F -1 Fluor	3,994816 2He 0,4 Helium
6.941 3Li 1,1 Lithium	9.012182 4Be 1,5 Beryllium	22,989769 11Na 0,4 Natrium	24,304094 12Mg 0,4 Magnesium											65,38 30Zn 0,3 Zink	69,723 31Ga 0,3 Gallium	72,6308 32Ge 0,3 Germanium	74,9216 33As 0,3 Arsen	78,9718 34Se 0,3 Selen	79,904 35Br 0,3 Brom	83,80 36Kr 0,3 Krypton
19.00 9K 1,1 Kalium	39.0983 20Ca 0,3 Calcium	44.955910 21Sc 1,1 Scandium	47.867 22Ti 1,1 Titan	50.9415 23V 1,1 Vanadium	51.9961 24Cr 1,1 Chrom	54.938044 25Mn 1,1 Mangan	55.845 26Fe 1,1 Eisen	58.9326 27Co 1,1 Cobalt	58.9326 28Ni 1,1 Nickel	63.546 29Cu 1,1 Kupfer	65.39 30Zn 0,3 Zink	69,723 31Ga 0,3 Gallium	72,6308 32Ge 0,3 Germanium	74,9216 33As 0,3 Arsen	78,9718 34Se 0,3 Selen	79,904 35Br 0,3 Brom	83,80 36Kr 0,3 Krypton			
39.0983 19K 1,1 Kalium	39.0983 20Ca 0,3 Calcium	44.955910 21Sc 1,1 Scandium	47.867 22Ti 1,1 Titan	50.9415 23V 1,1 Vanadium	51.9961 24Cr 1,1 Chrom	54.938044 25Mn 1,1 Mangan	55.845 26Fe 1,1 Eisen	58.9326 27Co 1,1 Cobalt	58.9326 28Ni 1,1 Nickel	63.546 29Cu 1,1 Kupfer	65.39 30Zn 0,3 Zink	69,723 31Ga 0,3 Gallium	72,6308 32Ge 0,3 Germanium	74,9216 33As 0,3 Arsen	78,9718 34Se 0,3 Selen	79,904 35Br 0,3 Brom	83,80 36Kr 0,3 Krypton			
85,4678 37Rb 0,3 Rubidium	85,4678 38Sr 0,3 Strontium	88,90585 39Y 1,1 Yttrium	91,224 40Zr 1,1 Zirkon	92,90638 41Nb 1,1 Niob	95,94 42Mo 1,1 Molybdän	98,9062 43Tc 1,1 Technetium	101,07 44Ru 1,1 Ruthenium	102,90550 45Rh 1,1 Rheinium	106,42 46Pd 1,1 Palladium	107,8682 47Ag 1,1 Silber	112,411 48Cd 1,1 Cadmium	114,818 49In 1,1 Indium	118,710 50Sn 1,1 Zinn	121,760 51Sb 1,1 Antimon	127,603 52Te 1,1 Tellur	126,90447 53I 1,1 Jod	131,29 54Xe 1,1 Xenon			
132,90545 55Cs 1,1 Cäsium	137,327 56Ba 1,1 Baryum	71-79 La-Lu Lanthanoiden	172,103 72Hf 1,1 Hafnium	183,84 73Ta 1,1 Tantal	186,207 74W 1,1 Wolfram	188,90612 75Re 1,1 Rhenium	190,23 76Os 1,1 Osmium	192,227 77Ir 1,1 Iridium	195,078 78Pt 1,1 Platin	196,96655 79Au 1,1 Gold	200,59 80Hg 1,1 Quecksilber	204,3833 81Tl 1,1 Thallium	207,2 82Pb 1,1 Blei	208,98038 83Bi 1,1 Bismut	209 84Po 2,4 Polonium	210,08823 85At 1,1 Astat	222 86Rn 1,1 Radon			
223 87Fr 1,1 Francium	226 88Ra 1,1 Radium	89-103 Ac-Lr Actinoiden	104 Rf 1,1 Rutherfordium	105 Db 1,1 Dubnium	106 Sg 1,1 Seaborgium	107 Bh 1,1 Bohrium	108 Hs 1,1 Hassium	109 Mt 1,1 Meitnerium	110 Ds 1,1 Darmstadtium	111 Uu 1,1 Ununium	112 Uub 1,1 Unbibium	113 Uut 1,1 Ununtrium	114 Uuq 1,1 Ununquadium	115 Uup 1,1 Ununpentium	116 Uuh 1,1 Ununhexium	117 Uus 1,1 Ununseptium	118 Uuo 1,1 Ununoctium			

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

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

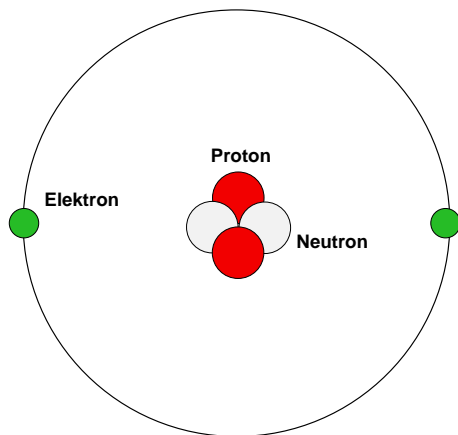
136,9055 57La 1,1 Lanthan	140,90765 58Ce 1,1 Cer	140,90765 59Pr 1,1 Praseodym	144,242 60Nd 1,1 Neodym	147,07 61Pm 1,1 Promethium	150,36 62Sm 1,1 Samarium	151,964 63Eu 1,1 Europium	157,25 64Gd 1,1 Gadolinium	162,50 65Tb 1,1 Terbium	162,50 66Dy 1,1 Dysprosium	164,93032 67Ho 1,1 Holmium	167,259 68Er 1,1 Erbium	168,93421 69Tm 1,1 Thulium	173,04 70Yb 1,1 Ytterbium	174,967 71Lu 1,1 Lutetium
227 89Ac 1,1 Actinium	227 90Th 1,1 Thorium	227 91Pa 1,1 Protactinium	227 92U 1,1 Uran	227 93Np 1,1 Neptunium	238 94Pu 1,1 Plutonium	238 95Am 1,1 Americium	238 96Cm 1,1 Curium	238 97Bk 1,1 Berkelium	238 98Cf 1,1 Californium	238 99Es 1,1 Einsteinium	238 100Fm 1,1 Fermium	238 101Md 1,1 Mendelevium	238 102No 1,1 Nobelium	238 103Lr 1,1 Lawrencium

# Wasserstoffatom



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

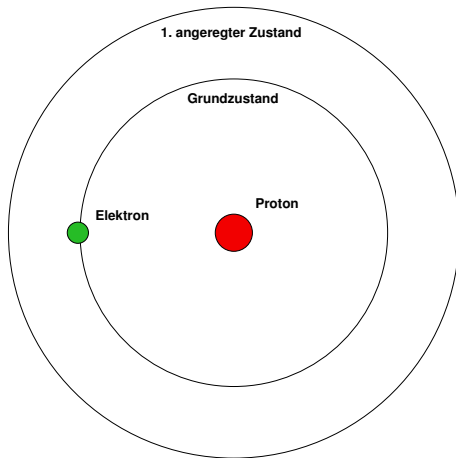
# Heliumatom



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

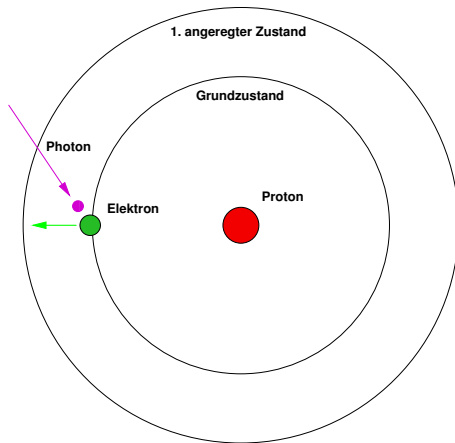


# Absorption I

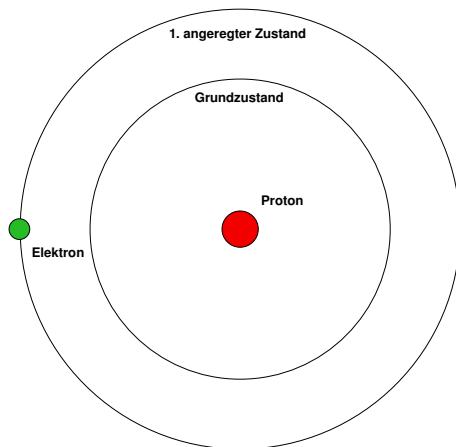


Normalerweise befinden sich die Elektronen im energetisch niedrigsten Niveau (es können sich bei Atomen mit mehrerer Elektronen aber maximal zwei Elektronen im Grundzustand befinden)

# Absorption II

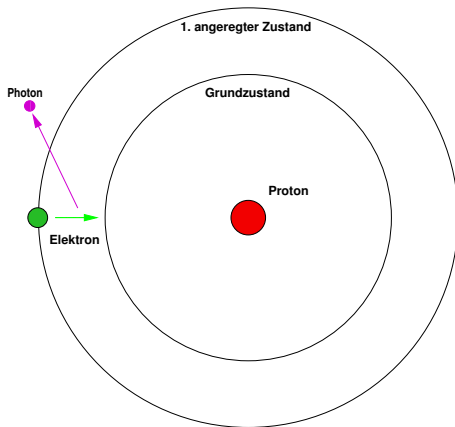


Photon mit der passenden Energie  $\Delta E$  fällt ein: Photon wird absorbiert und das Elektron auf eine höhere Bahn gehoben: *angeregter Zustand*



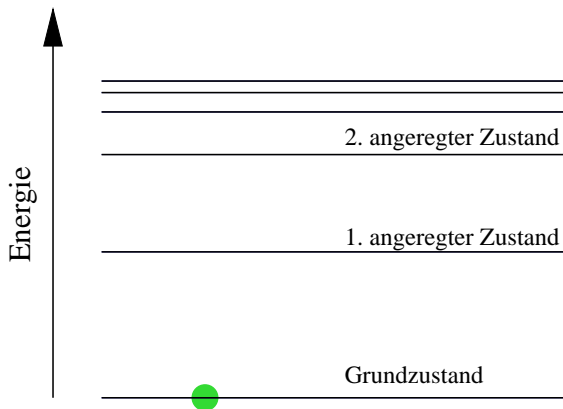
Der angeregte Zustand ist nicht stabil

# Emission II



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

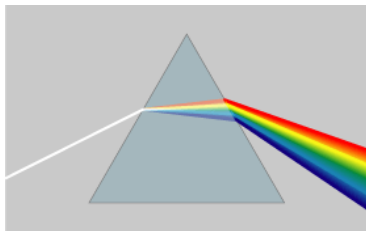
# Emission III



Abstand der Energieniveaus charakteristisch für jedes Atom bzw. Molekül

Simulation: [https://astro.unl.edu/naap/hydrogen/animations/hydrogen\\_atom.html](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

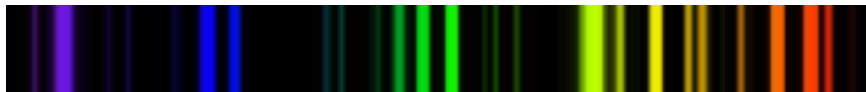
- Kontinuierliches Spektrum



- Absorptionsspektrum



- Emissionsspektrum



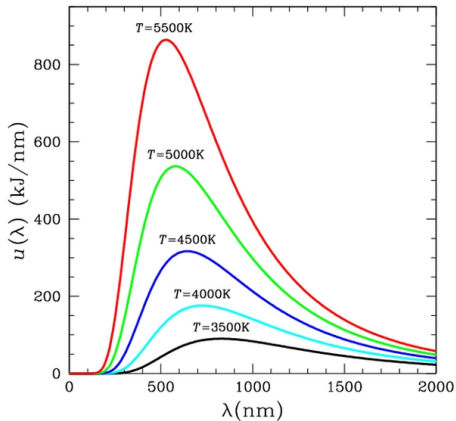
Sternspektren: Absorptionsspektren

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 = energiereichere Strahlung
- Bei Raumtemperatur: Maximum liegt im Infraroten

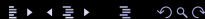
Einfache Möglichkeit zur Temperaturbestimmung: Bei welcher Wellenlänge (=Farbe) ist die Emission am stärksten?

# 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

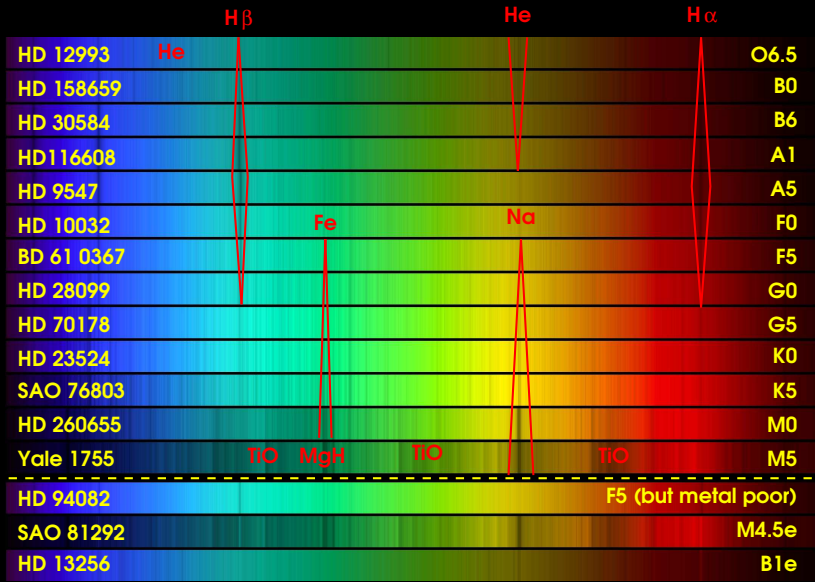
K – Kiss

M – Me

C

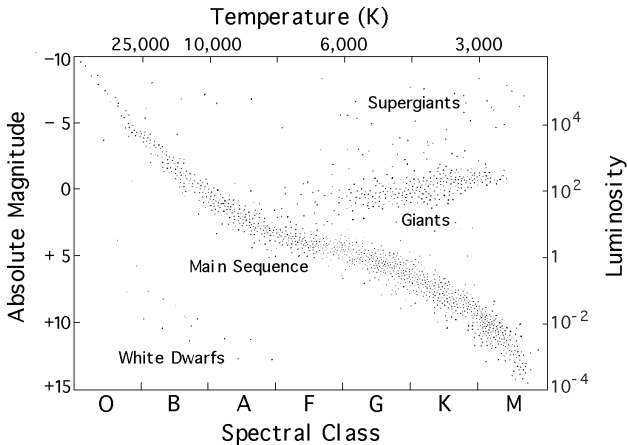
# Spektralklassen II

	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



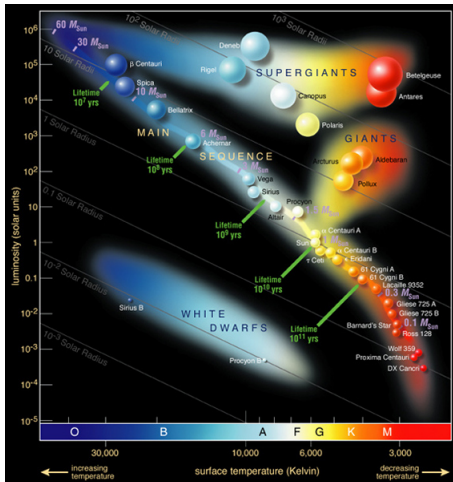
Spektralklassen [NOAO]

# Hertzprung-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

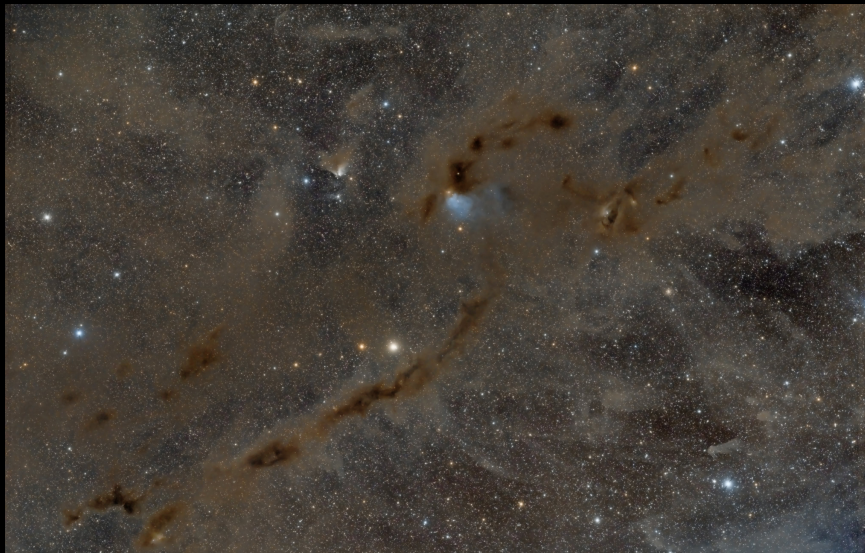
- Elektromagnetisches Spektrum
- Aufbau der Materie
- Licht-Materie-Wechselwirkung
- Spektroskopie

## 2 Sternentstehung

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



# Dunkelnebel Barnard 7



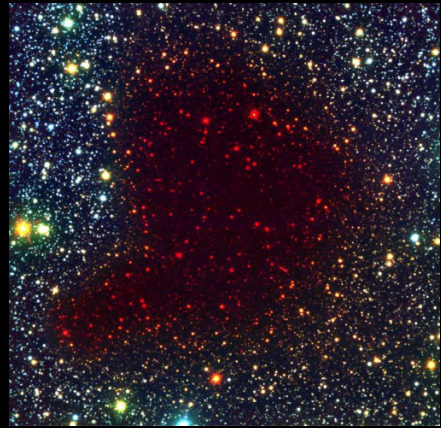
[Bernhard Liebscher (NAA)]



# 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

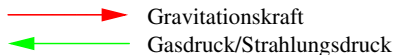
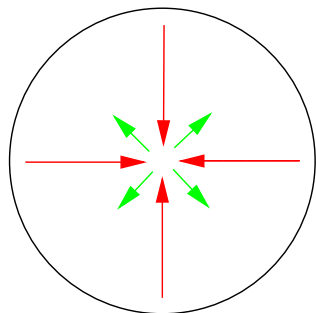
## Riesenmolekülwolken

- 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



- 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

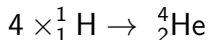
- $M \lesssim 0,08 M_{\odot}$ :  
Temperatur  $< 1$  Mio K  $\Rightarrow$  keine Kernfusion, „Brauner Zwerg“
- $M \gtrsim 0,08 M_{\odot}$ :  
Temperatur  $> 1$  Mio K  $\Rightarrow$  Kernfusion setzt ein, nachdem nahezu alles Gas auf den Stern eingefallen ist
- $M \gtrsim 3 M_{\odot}$ :  
Temperatur  $> 1$  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.

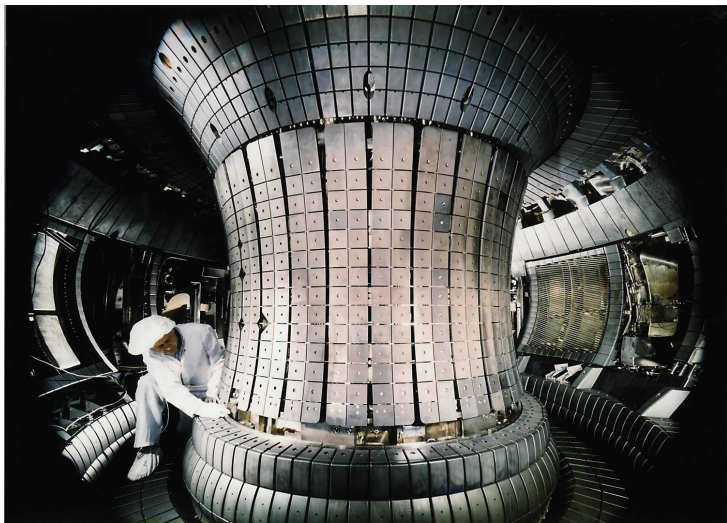


Energie in 1 g Materie  $\hat{=}$  18 Stunden KKW Isar II

[Pro Aurum / E.ON Kernkraft GmbH]

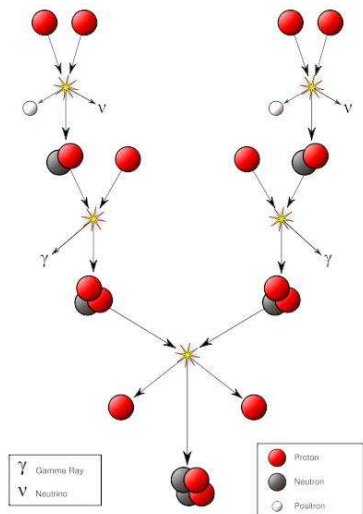


# Fusionsreaktor ASDEX Upgrade



[IPP]

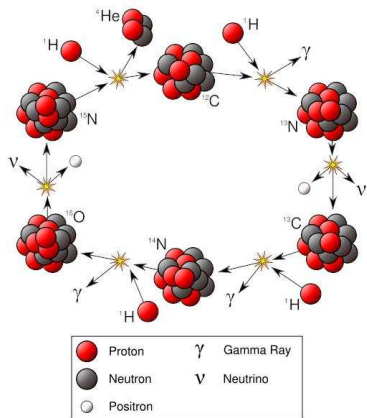
# Proton-Proton-Zyklus



Dominierender Prozess in der Sonne

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

# Bethe-Weizsäcker-Zyklus

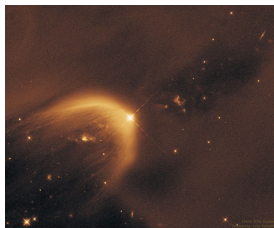
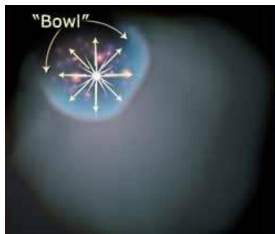


- Weitere Bezeichnung: CNO-Zyklus
- Dominierender Prozess bei Sternen mit hohen Kerntemperaturen

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

# 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]









NGC 7822 [Hartmuth Kintzel (NAA)]



## 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 Datum): 5h35m53s/-5°26'39"  
Stundenwinkel/DE: 0h8m6s/-5°26'39"  
Az./Alt: +182°31'12"/+36°23'09"  
Größe: +1° 6'00"



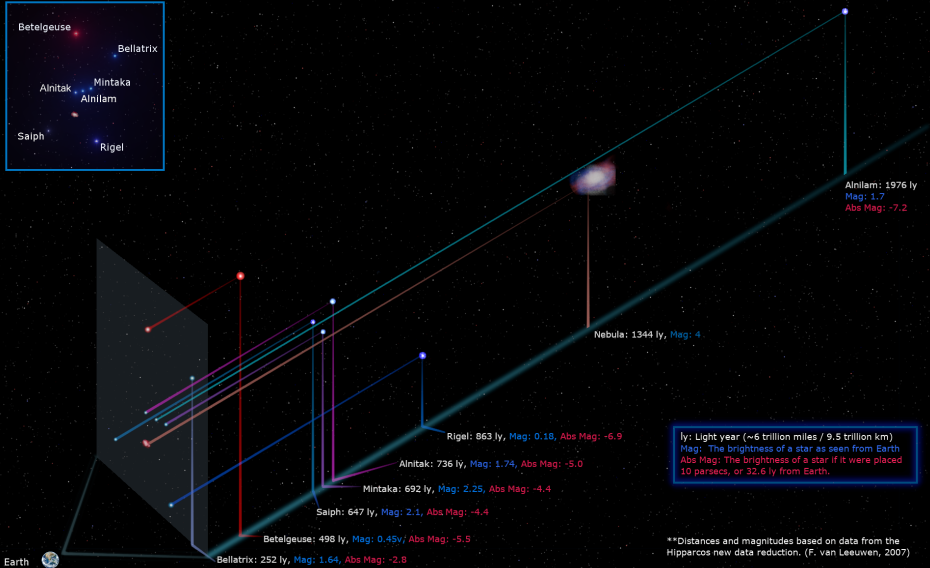
Erde, München, 523m

FOV 24.9°

30.8 FPS

2009-11-17 02:12:45





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 [orbitalmechanics.com](http://orbitalmechanics.com)

# Sternbild Orion [Ronald Davison]







HST-Aufnahme des Orionnebels M42 [NASA]

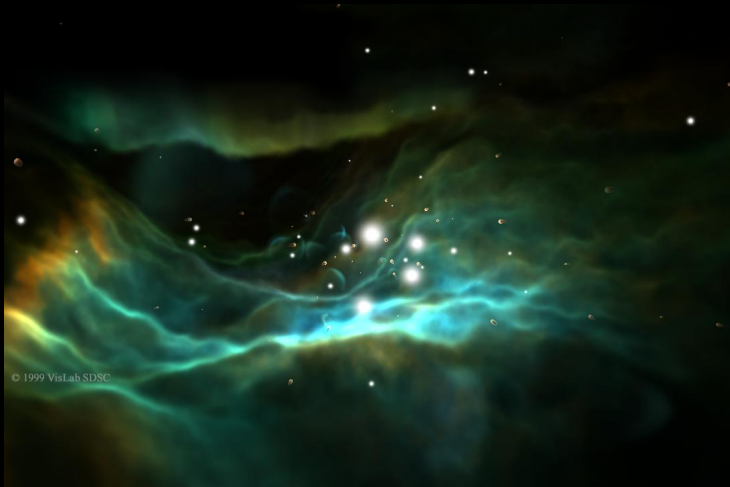






Video zum Orionnebel:

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



Sternentstehung im Orionnebel (Modellrechnung) [VisLab SDSC]





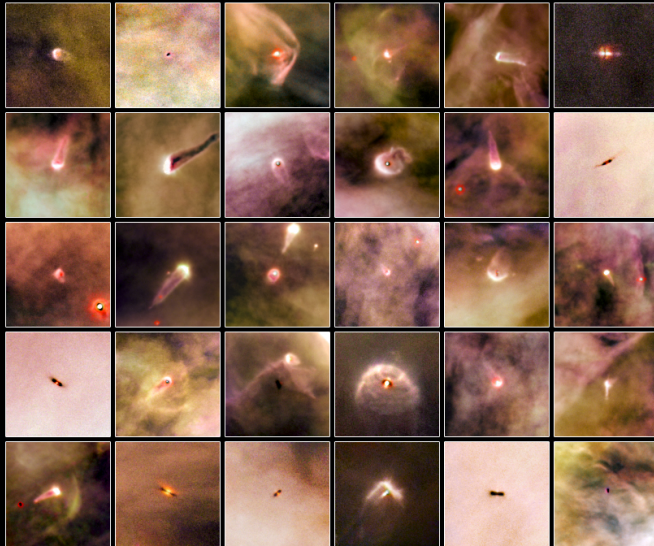
Der offene Sternhaufen M45 (Plejaden) [Hartmuth Kintzel (NAA)]





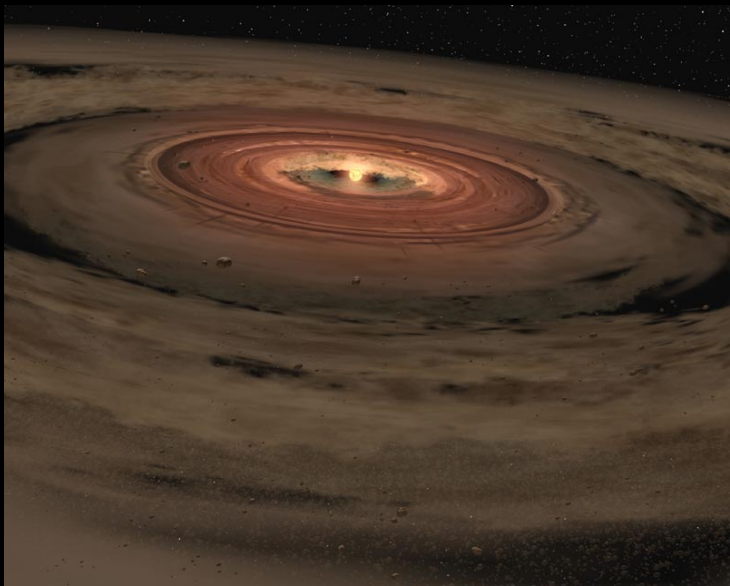


Protoplanetare Scheibe im Orionnebel [C.R. O'Dell/Rice University, and NASA]



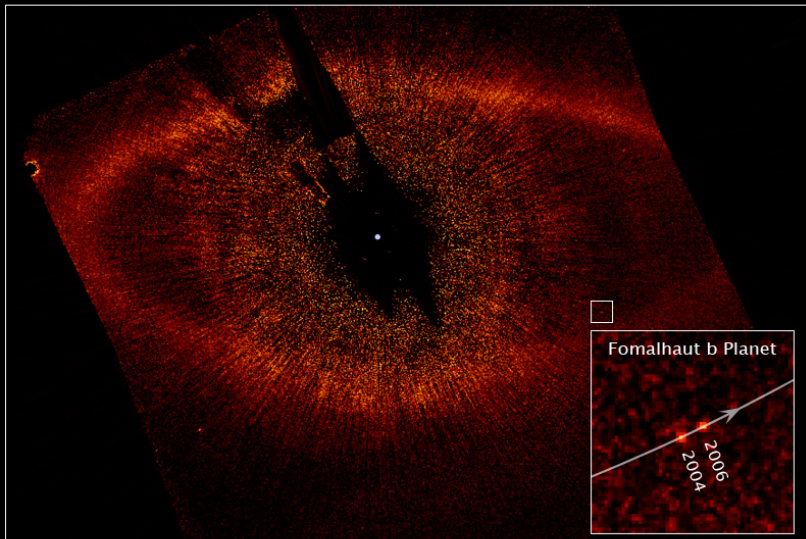
Protoplanetare Scheiben im Orionnebel [NASA/ESA and L. Ricci (ESO)]





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



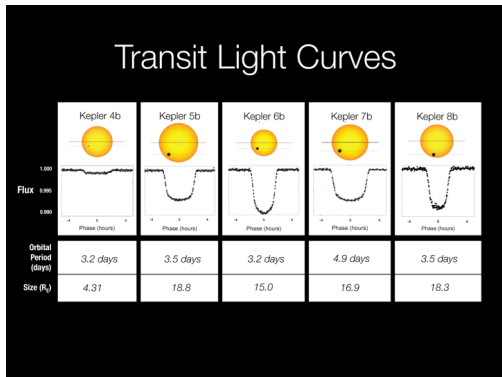


NASA, ESA, and P. Kalas (University of California, Berkeley)

STScI-PRC08-39a

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

# Extrasolare Planeten: Nachweis



[Bill Borucki, Jan 2010 AAS Presentation ]

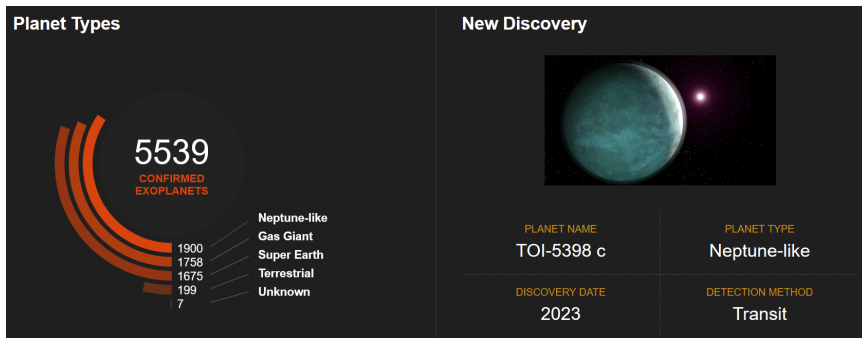
- Direkte Abbildung
- Radialgeschwindigkeitsmethode
- Transitmethode
- Eigenbewegung
- Gravitationslinseneffekt
- Pulsar Timing

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

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

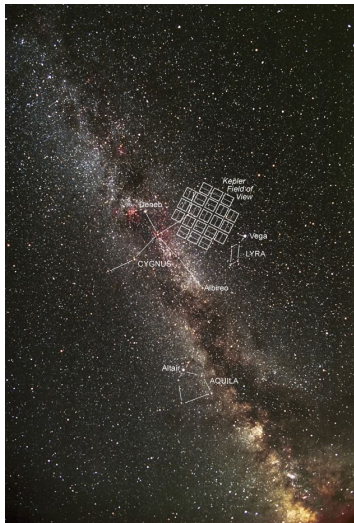
# Extrasolare Planeten

5539 Exoplaneten und 10 009 Kandidaten in 4261 Sonnensystemen  
(Stand 12. November 2023)



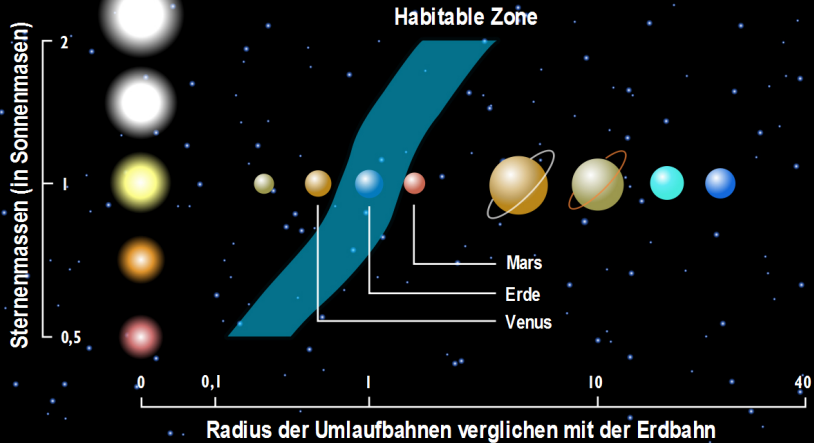
[<https://exoplanets.nasa.gov/discovery/discoveries-dashboard/>]

# Weltraumteleskop Kepler



[Carter Roberts, NASA]

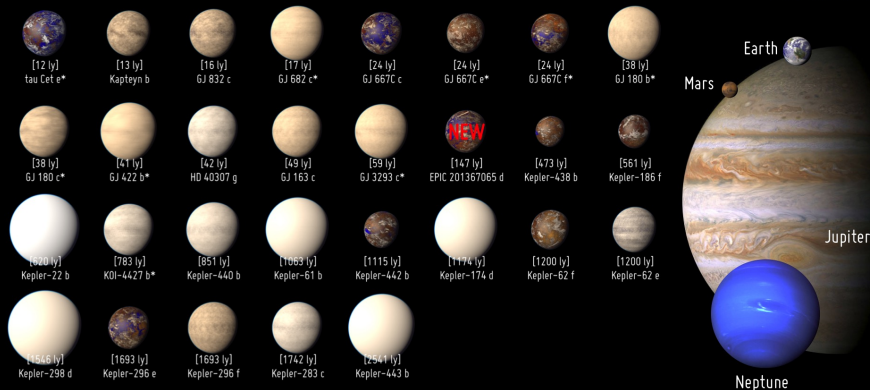
# Habitable Zone



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

# Potentially Habitable Exoplanets

Ranked by Distance from Earth (light years)

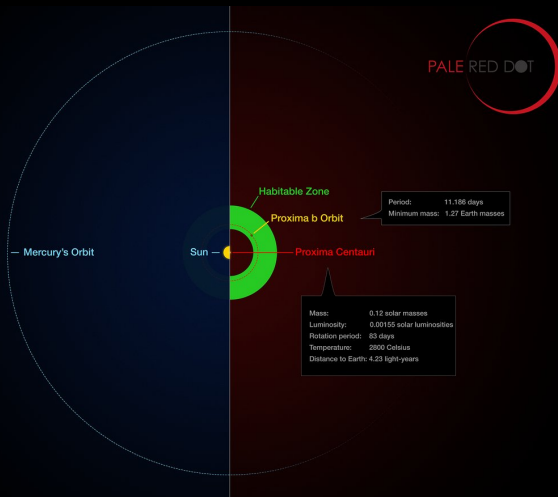


Artistic representations. Earth, Mars, Jupiter, and Neptune for scale. Distance is between brackets. Planet candidates indicated with asterisks.

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

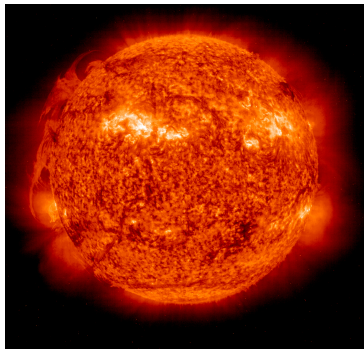


# Proxima Centauri



[ESO/M. Kornmesser/G. Coleman]

# Nächste Woche:



## Sternaufbau, Sternentwicklung, Endstadien