

Sternaufbau und Sternentwicklung – Teil 1

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

Nürnberger Astronomische Arbeitsgemeinschaft e.V.

Grundkurs Astronomie
27. Oktober 2025



Gliederung

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

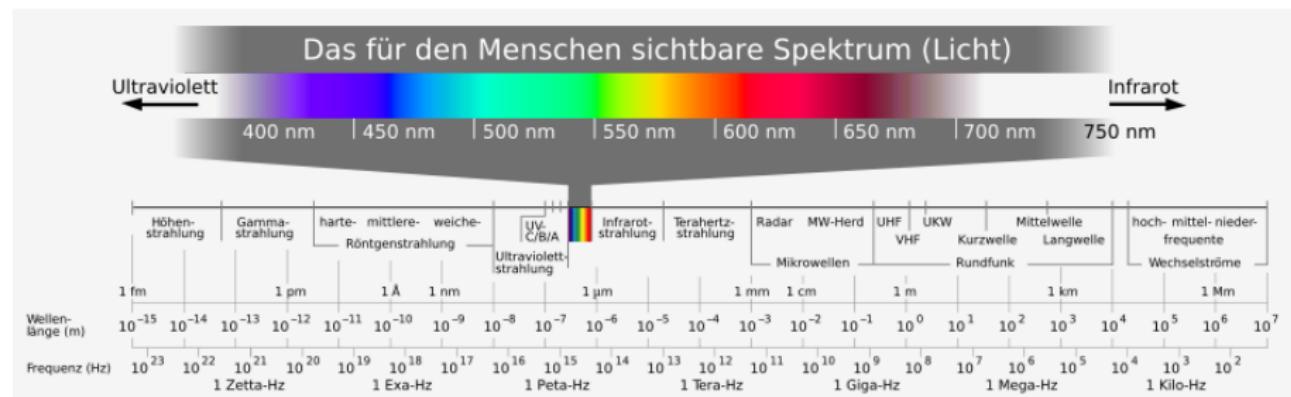


[Thomas Jäger/NAA]

- 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

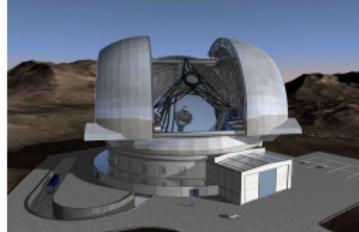
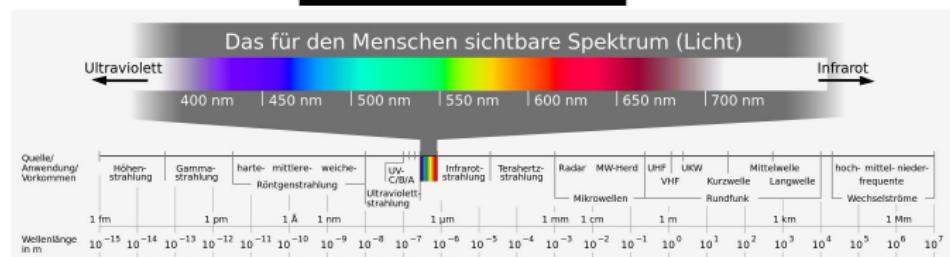
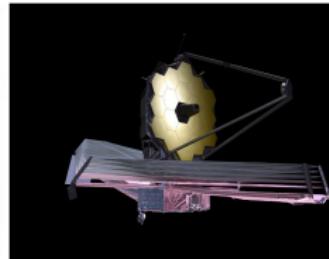
Zusammenhang Frequenz-Wellenlänge:

$$f \cdot \lambda = c$$

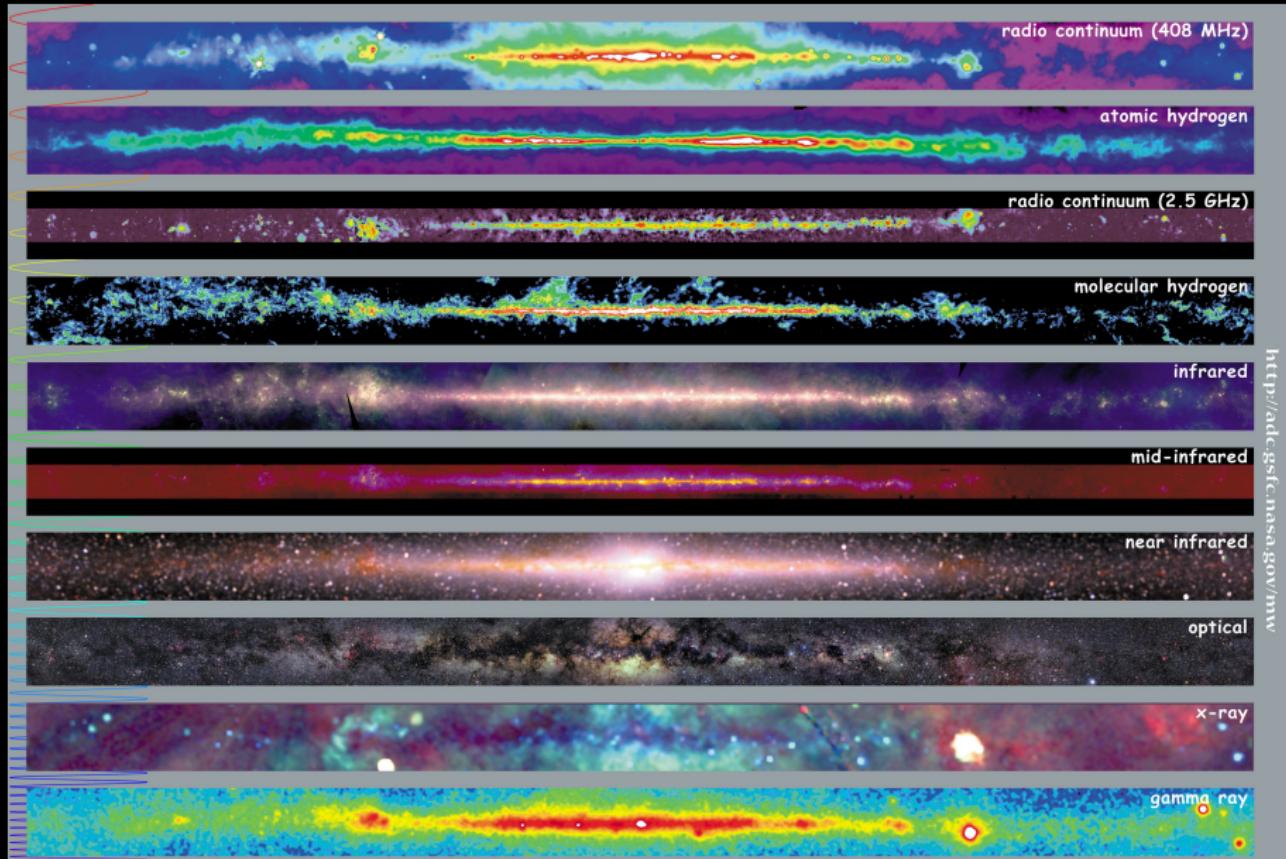
Lichtgeschwindigkeit $c \approx 299.792 \text{ km/s}$, Frequenz f, Wellenlänge λ

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

Multiwellenlängenastronomie



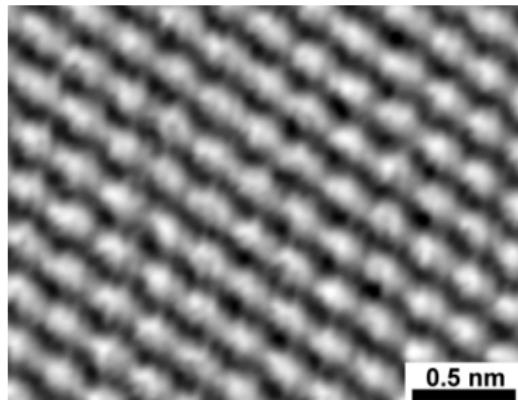
[ESO, NAOJ, NRAO, ESA, MPG]



Multiwavelength Milky Way

Aufbau der Materie

Grundbausteine der Materie: Atome



Aufbau der Atome:

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

Atome

- 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	H	IA																
1	¹ H	¹ H																
2	² Li	IIA																
2	³ Li	⁴ Be																
3	¹¹ Na	¹² Mg																
3	¹¹ Na	¹² Mg																
3	¹³ Al	¹⁴ Si	¹⁵ P	¹⁶ S	¹⁷ Cl	¹⁸ Ar												
4	¹⁹ K	²⁰ Ca	²¹ Sc	²³ V	²⁴ Cr	²⁵ Mn	²⁶ Fe	²⁷ Co	²⁸ Zn	²⁹ Ga	³¹ Ge	³³ As	³⁴ Se	³⁵ Br	³⁶ Kr			
4	¹⁹ K	²⁰ Ca	²¹ Sc	²³ V	²⁴ Cr	²⁵ Mn	²⁶ Fe	²⁷ Co	²⁸ Zn	²⁹ Ga	³¹ Ge	³³ As	³⁴ Se	³⁵ Br	³⁶ Kr			
5	³⁷ Rb	³⁸ Sr	³⁹ Y	⁴⁰ Zr	⁴¹ Nb	⁴² Mo	⁴³ Tc	⁴⁴ Ru	⁴⁵ Rh	⁴⁶ Pd	⁴⁷ Ag	⁴⁸ Cd	⁴⁹ In	⁵⁰ Sn	⁵¹ Sb	⁵² Te ⁵³ Te		
5	³⁷ Rb	³⁸ Sr	³⁹ Y	⁴⁰ Zr	⁴¹ Nb	⁴² Mo	⁴³ Tc	⁴⁴ Ru	⁴⁵ Rh	⁴⁶ Pd	⁴⁷ Ag	⁴⁸ Cd	⁴⁹ In	⁵⁰ Sn	⁵¹ Sb	⁵² Te ⁵³ Te		
6	⁵⁵ Cs	⁵⁶ Ba	⁵⁷ - ⁷¹ Lanthanide	⁷² Hf	⁷³ Ta	⁷⁴ W	⁷⁵ Re	⁷⁶ Os	⁷⁷ Ir	⁷⁸ Pt	⁷⁹ Au	⁸⁰ Hg	⁸¹ Tl	⁸² Pb	⁸³ Bi	⁸⁴ Po	⁸⁵ At	⁸⁶ Rn
6	⁵⁵ Cs	⁵⁶ Ba	⁵⁷ - ⁷¹ Lanthanide	⁷² Hf	⁷³ Ta	⁷⁴ W	⁷⁵ Re	⁷⁶ Os	⁷⁷ Ir	⁷⁸ Pt	⁷⁹ Au	⁸⁰ Hg	⁸¹ Tl	⁸² Pb	⁸³ Bi	⁸⁴ Po	⁸⁵ At	⁸⁶ Rn
7	⁸⁷ Fr	⁸⁸ Ra	⁸⁹ - ¹⁰³ Actinide	¹⁰⁴ Rf	¹⁰⁵ Db	¹⁰⁶ Sg	¹⁰⁷ Bh	¹⁰⁸ Hs	¹⁰⁹ Mt	¹¹⁰ Ds	¹¹¹ Uuu	¹¹² Uub	¹¹³ Uut	¹¹⁴ Uuq	¹¹⁵ Uup	¹¹⁶ Uuh	¹¹⁷ Uus	¹¹⁸ Uuo
7	⁸⁷ Fr	⁸⁸ Ra	⁸⁹ - ¹⁰³ Actinide	¹⁰⁴ Rf	¹⁰⁵ Db	¹⁰⁶ Sg	¹⁰⁷ Bh	¹⁰⁸ Hs	¹⁰⁹ Mt	¹¹⁰ Ds	¹¹¹ Uuu	¹¹² Uub	¹¹³ Uut	¹¹⁴ Uuq	¹¹⁵ Uup	¹¹⁶ Uuh	¹¹⁷ Uus	¹¹⁸ Uuo

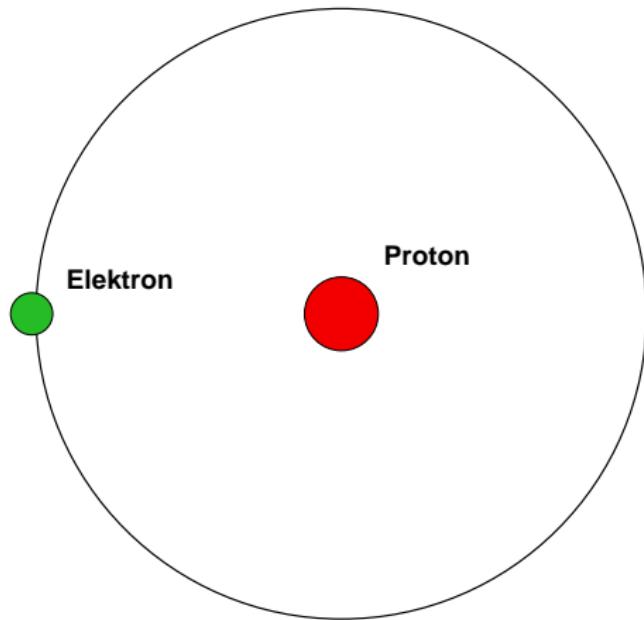
Benennung mit Haupt- und Nebengruppen
IUPAC - Empfehlung
Von Chemical Abstracts Service bis 1986 verwendet

Periodensystem der Elemente

<http://www.pse-online.de>

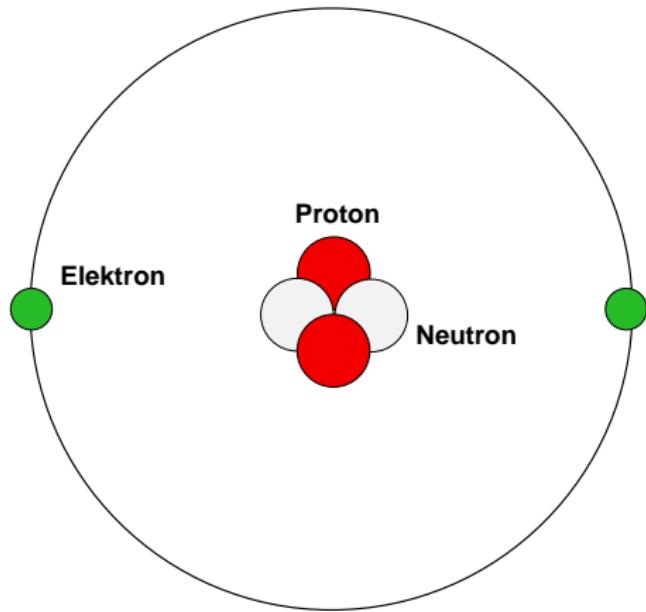
Relative Atommasse	Atomgewicht des Isotopengemisches	Künstliches Element	Elementsymbol:
26.05514	26.05514	Am	⁹⁵ Am
146.919	146.919	Am	⁹⁵ Am
147.919	147.919	Am	⁹⁵ Am
148.919	148.919	Am	⁹⁵ Am
149.919	149.919	Am	⁹⁵ Am
150.919	150.919	Am	⁹⁵ Am
151.919	151.919	Am	⁹⁵ Am
152.919	152.919	Am	⁹⁵ Am
153.919	153.919	Am	⁹⁵ Am
154.919	154.919	Am	⁹⁵ Am
155.919	155.919	Am	⁹⁵ Am
156.919	156.919	Am	⁹⁵ Am
157.919	157.919	Am	⁹⁵ Am
158.919	158.919	Am	⁹⁵ Am
159.919	159.919	Am	⁹⁵ Am
160.919	160.919	Am	⁹⁵ Am
161.919	161.919	Am	⁹⁵ Am
162.919	162.919	Am	⁹⁵ Am
163.919	163.919	Am	⁹⁵ Am
164.919	164.919	Am	⁹⁵ Am
165.919	165.919	Am	⁹⁵ Am
166.919	166.919	Am	⁹⁵ Am
167.919	167.919	Am	⁹⁵ Am
168.919	168.919	Am	⁹⁵ Am
169.919	169.919	Am	⁹⁵ Am
170.919	170.919	Am	⁹⁵ Am
171.919	171.919	Am	⁹⁵ Am
172.919	172.919	Am	⁹⁵ Am
173.919	173.919	Am	⁹⁵ Am
174.919	174.919	Am	⁹⁵ Am
175.919	175.919	Am	⁹⁵ Am
176.919	176.919	Am	⁹⁵ Am
177.919	177.919	Am	⁹⁵ Am
178.919	178.919	Am	⁹⁵ Am
179.919	179.919	Am	⁹⁵ Am
180.919	180.919	Am	⁹⁵ Am
181.919	181.919	Am	⁹⁵ Am
182.919	182.919	Am	⁹⁵ Am
183.919	183.919	Am	⁹⁵ Am
184.919	184.919	Am	⁹⁵ Am
185.919	185.919	Am	⁹⁵ Am
186.919	186.919	Am	⁹⁵ Am
187.919	187.919	Am	⁹⁵ Am
188.919	188.919	Am	⁹⁵ Am
189.919	189.919	Am	⁹⁵ Am
190.919	190.919	Am	⁹⁵ Am
191.919	191.919	Am	⁹⁵ Am
192.919	192.919	Am	⁹⁵ Am
193.919	193.919	Am	⁹⁵ Am
194.919	194.919	Am	⁹⁵ Am
195.919	195.919	Am	⁹⁵ Am
196.919	196.919	Am	⁹⁵ Am
197.919	197.919	Am	⁹⁵ Am
198.919	198.919	Am	⁹⁵ Am
199.919	199.919	Am	⁹⁵ Am
200.919	200.919	Am	⁹⁵ Am
201.919	201.919	Am	⁹⁵ Am
202.919	202.919	Am	⁹⁵ Am
203.919	203.919	Am	⁹⁵ Am
204.919	204.919	Am	⁹⁵ Am
205.919	205.919	Am	⁹⁵ Am
206.919	206.919	Am	⁹⁵ Am
207.919	207.919	Am	⁹⁵ Am
208.919	208.919	Am	⁹⁵ Am
209.919	209.919	Am	⁹⁵ Am
210.919	210.919	Am	⁹⁵ Am
211.919	211.919	Am	⁹⁵ Am
212.919	212.919	Am	⁹⁵ Am
213.919	213.919	Am	⁹⁵ Am
214.919	214.919	Am	⁹⁵ Am
215.919	215.919	Am	⁹⁵ Am
216.919	216.919	Am	⁹⁵ Am
217.919	217.919	Am	⁹⁵ Am
218.919	218.919	Am	⁹⁵ Am
219.919	219.919	Am	⁹⁵ Am
220.919	220.919	Am	⁹⁵ Am
221.919	221.919	Am	⁹⁵ Am
222.919	222.919	Am	⁹⁵ Am
223.919	223.919	Am	⁹⁵ Am
224.919	224.919	Am	⁹⁵ Am
225.919	225.919	Am	⁹⁵ Am
226.919	226.919	Am	⁹⁵ Am
227.919	227.919	Am	⁹⁵ Am
228.919	228.919	Am	⁹⁵ Am
229.919	229.919	Am	⁹⁵ Am
230.919	230.919	Am	⁹⁵ Am
231.919	231.919	Am	⁹⁵ Am
232.919	232.919	Am	⁹⁵ Am
233.919	233.919	Am	⁹⁵ Am
234.919	234.919	Am	⁹⁵ Am
235.919	235.919	Am	⁹⁵ Am
236.919	236.919	Am	⁹⁵ Am
237.919	237.919	Am	⁹⁵ Am
238.919	238.919	Am	⁹⁵ Am
239.919	239.919	Am	⁹⁵ Am
240.919	240.919	Am	⁹⁵ Am
241.919	241.919	Am	⁹⁵ Am
242.919	242.919	Am	⁹⁵ Am
243.919	243.919	Am	⁹⁵ Am
244.919	244.919	Am	⁹⁵ Am
245.919	245.919	Am	⁹⁵ Am
246.919	246.919	Am	⁹⁵ Am
247.919	247.919	Am	⁹⁵ Am
248.919	248.919	Am	⁹⁵ Am
249.919	249.919	Am	⁹⁵ Am
250.919	250.919	Am	⁹⁵ Am
251.919	251.919	Am	⁹⁵ Am
252.919	252.919	Am	⁹⁵ Am
253.919	253.919	Am	⁹⁵ Am
254.919	254.919	Am	⁹⁵ Am
255.919	255.919	Am	⁹⁵ Am
256.919	256.919	Am	⁹⁵ Am
257.919	257.919	Am	⁹⁵ Am
258.919	258.919	Am	⁹⁵ Am
259.919	259.919	Am	⁹⁵ Am
260.919	260.919	Am	⁹⁵ Am
261.919	261.919	Am	⁹⁵ Am
262.919	262.919	Am	⁹⁵ Am
263.919	263.919	Am	⁹⁵ Am
264.919	264.919	Am	⁹⁵ Am
265.919	265.919	Am	⁹⁵ Am
266.919	266.919	Am	⁹⁵ Am
267.919	267.919	Am	⁹⁵ Am
268.919	268.919	Am	⁹⁵ Am
269.919	269.919	Am	⁹⁵ Am
270.919	270.919	Am	⁹⁵ Am
271.919	271.919	Am	⁹⁵ Am
272.919	272.919	Am	⁹⁵ Am
273.919	273.919	Am	⁹⁵ Am
274.919	274.919	Am	⁹⁵ Am
275.919	275.919	Am	⁹⁵ Am
276.919	276.919	Am	⁹⁵ Am
277.919	277.919	Am	⁹⁵ Am
278.919	278.919	Am	⁹⁵ Am
279.919	279.919	Am	⁹⁵ Am
280.919	280.919	Am	⁹⁵ Am
281.919	281.919	Am	⁹⁵ Am
282.919	282.919	Am	⁹⁵ Am
283.919	283.919	Am	⁹⁵ Am
284.919	284.919	Am	⁹⁵ Am
285.919	285.919	Am	⁹⁵ Am
286.919	286.919	Am	⁹⁵ Am
287.919	287.919	Am	⁹⁵ Am
288.919	288.919	Am	⁹⁵ Am
289.919	289.919	Am	⁹⁵ Am
290.919	290.919	Am	⁹⁵ Am
291.919	291.919	Am	⁹⁵ Am
292.919	292.919	Am	⁹⁵ Am
293.919	293.919	Am	⁹⁵ Am
294.919	294.919	Am	⁹⁵ Am
295.919	295.919	Am	⁹⁵ Am
296.919	296.919	Am	⁹⁵ Am
297.919	297.919	Am	⁹⁵ Am
298.919	298.919	Am	⁹⁵ Am
299.919	299.919	Am	⁹⁵ Am
300.919	300.919	Am	⁹⁵ Am
301.919	301.919	Am	⁹⁵ Am
302.919	302.919	Am	⁹⁵ Am
303.919	303.919	Am	⁹⁵ Am
304.919	304.919	Am	⁹⁵ Am
305.919	305.919	Am	⁹⁵ Am
306.919	306.919	Am	⁹⁵ Am
307.919	307.919	Am	⁹⁵ Am
308.919	308.919	Am	⁹⁵ Am
309.919	309.919	Am	⁹⁵ Am
310.919	310.919	Am	⁹⁵ Am
311.919	311.919	Am	⁹⁵ Am
312.919	312.919	Am	⁹⁵ Am
313.919	313.919	Am	⁹⁵ Am
314.919	314.919	Am	⁹⁵ Am
315.919	315.919	Am	⁹⁵ Am
316.919	316.919	Am	⁹⁵ Am
317.919	317.919	Am	⁹⁵ Am
318.919	318.919	Am	⁹⁵ Am
319.919	319.919	Am	⁹⁵ Am
320.919	320.919	Am	⁹⁵ Am
321.919	321.919	Am	⁹⁵ Am
322.919	322.919	Am	⁹⁵ Am
323.919	323.919	Am	⁹⁵ Am
324.919	324.919	Am	⁹⁵ Am
325.919	325.919	Am	⁹⁵ Am
326.919	326.919	Am	⁹⁵ Am
327.919	327.919	Am	⁹⁵ Am
328.919	328.919	Am	⁹⁵ Am
329.919	329.919	Am	⁹⁵ Am
330.919	330.919	Am	⁹⁵ Am
331.919	331.919	Am	⁹⁵ Am
332.919	332.919	Am	⁹⁵ Am
333.919	333.919	Am	⁹⁵ Am
334.919	334.919	Am	⁹⁵ Am
3			

Wasserstoffatom



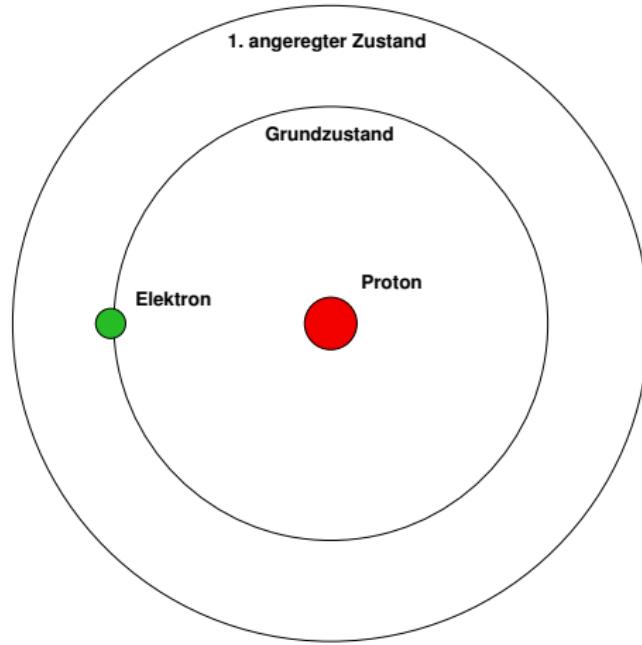
- Kürzel: H (Hydrogenum)
- Einfachstes Atom: 1 Proton, 1 Elektron
- $Z = 1$
- Häufigstes Element im Universum

Heliumatom



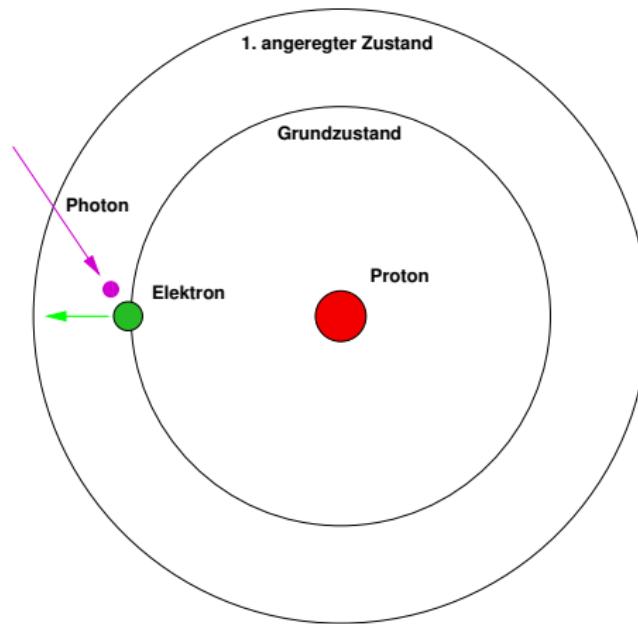
- Kürzel: He (Helium)
- Kern von ${}^4_2\text{He}$: 2 Protonen, 2 Neutronen
- 2 Elektronen
- $Z = 2$
- Zweithäufigstes Element im Universum

Absorption I



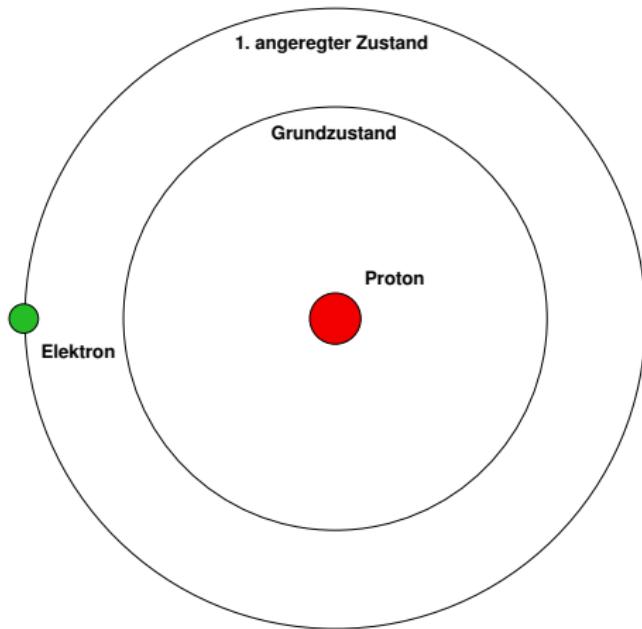
Normalerweise befinden sich die Elektronen im energetisch niedrigsten Niveau (es können sich bei Atomen mit mehreren Elektronen aber maximal zwei Elektronen im Grundzustand befinden)

Absorption II



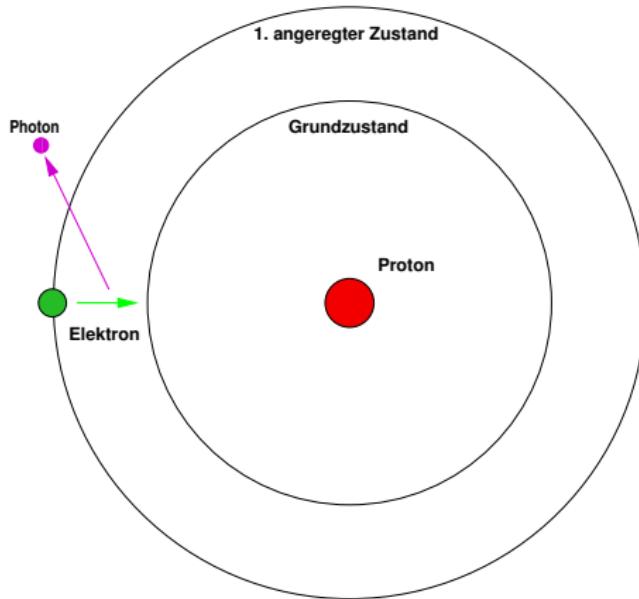
Photon mit der passenden Energie ΔE fällt ein: Photon wird absorbiert und das Elektron auf eine höhere Bahn gehoben: *angeregter Zustand*

Emission I



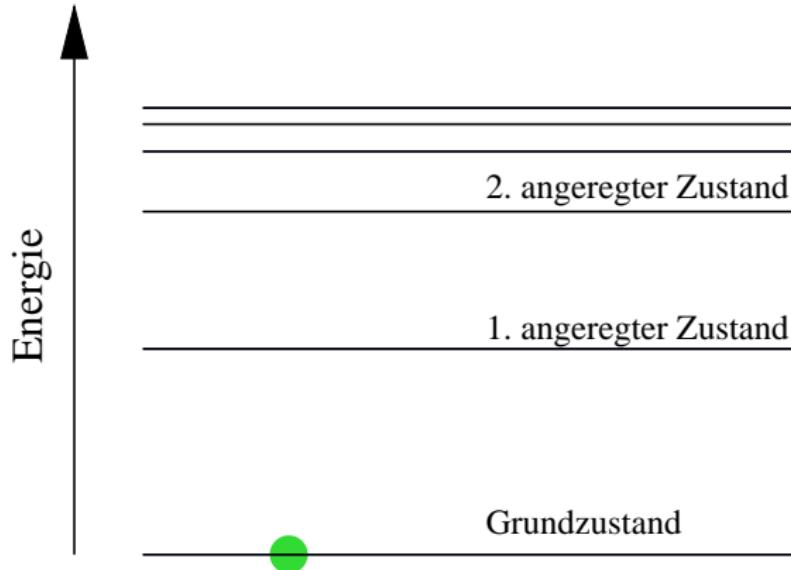
Der angeregte Zustand ist nicht stabil

Emission II



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

Emission III

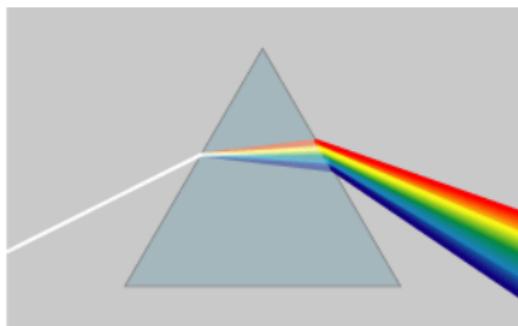


Abstand der Energieniveaus charakteristisch für jedes Atom bzw. Molekül

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



Spektroskopie – Analyse des Lichts



Weißlichtzerlegung mit einem Prisma [Wikipedia]

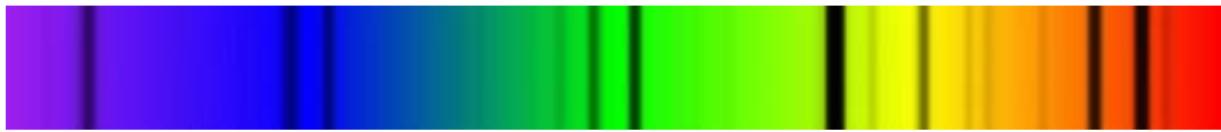
- Licht lässt sich durch Prismen oder Beugungsgitter in seine Wellenlängen („Farben“) zerlegen
- Verschiedene Elemente haben charakteristische Linien
⇒ aus den Spektren von Himmelsobjekten lässt sich deren Zusammensetzung bestimmen

Spektren

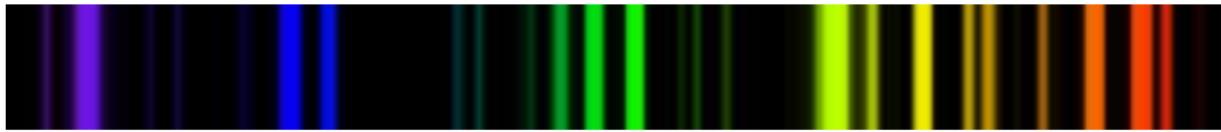
- Kontinuierliches Spektrum



- Absorptionsspektrum

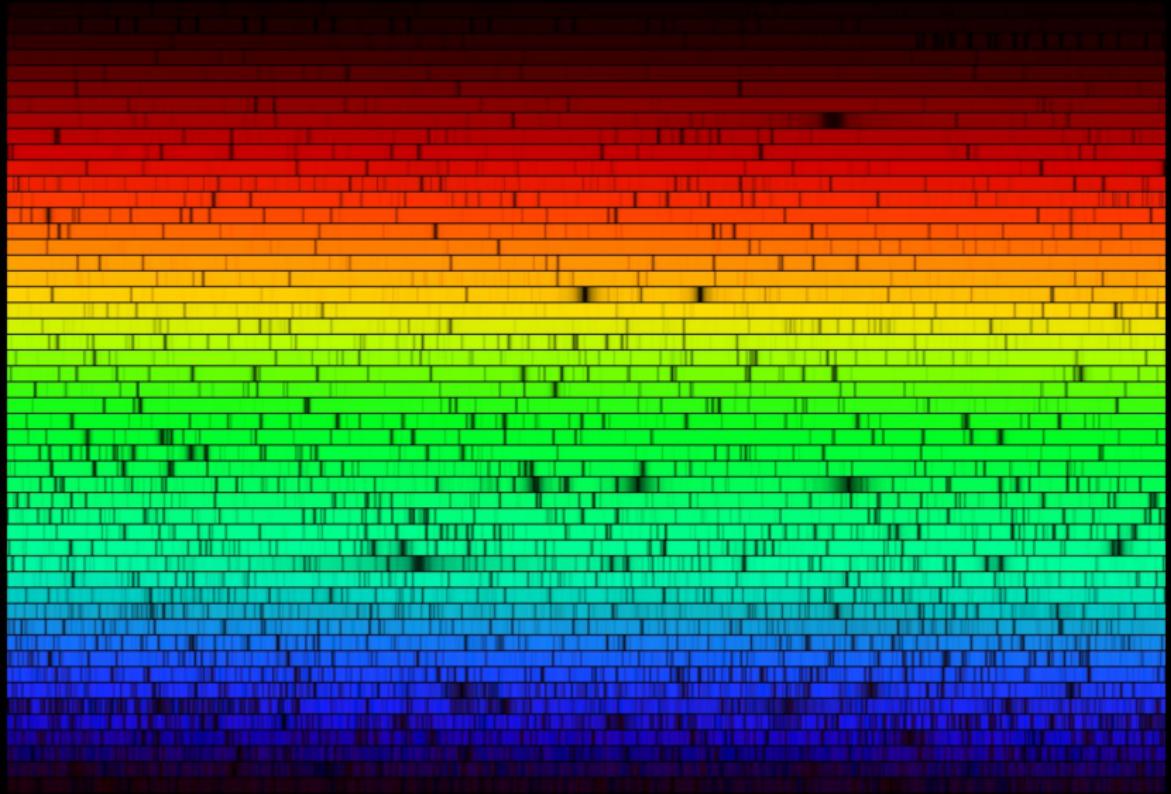


- Emissionsspektrum



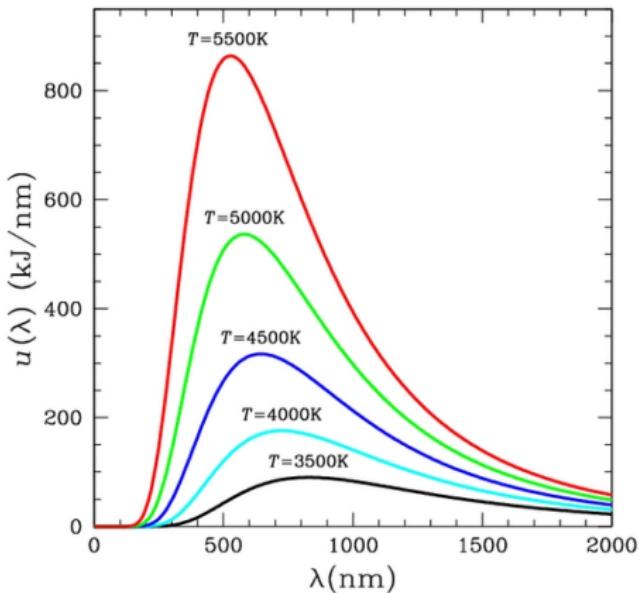
Sternspektren: Absorptionsspektren

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



Sonnenspektrum [N.A.Sharp, NOAO/NSO/Kitt Peak FTS/AURA/NSF]

Plancksches Strahlungsgesetz

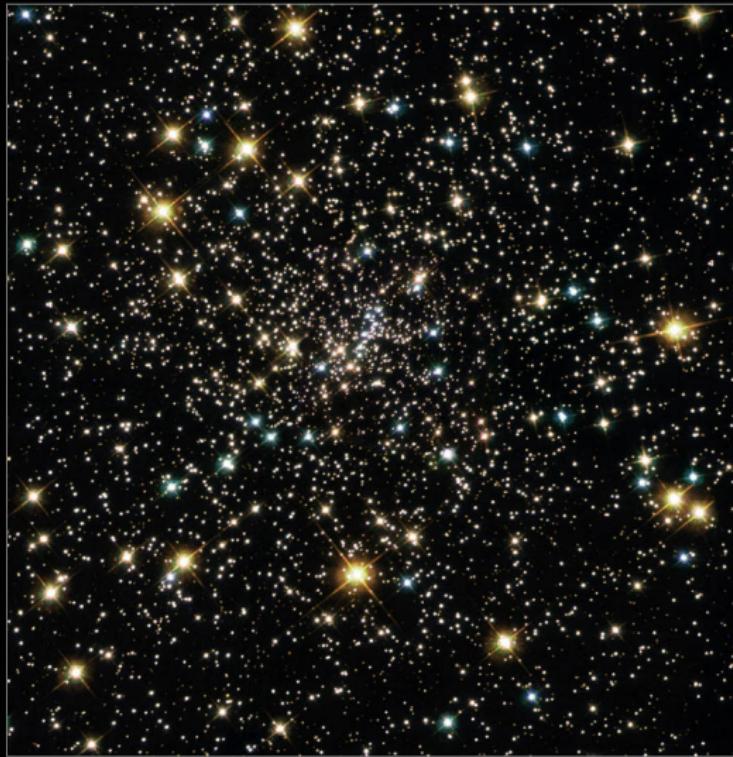


Spektrum eines schwarzen Körpers für verschiedene Temperaturen [Wikipedia]

- 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

Spektralklassen I

Sterne mit ähnlichen Spektren werden in Spektralklassen unterteilt

Harvard-Klassifikation

O – Oh

B – Be

A – A

F – Fine

G – Girl/guy

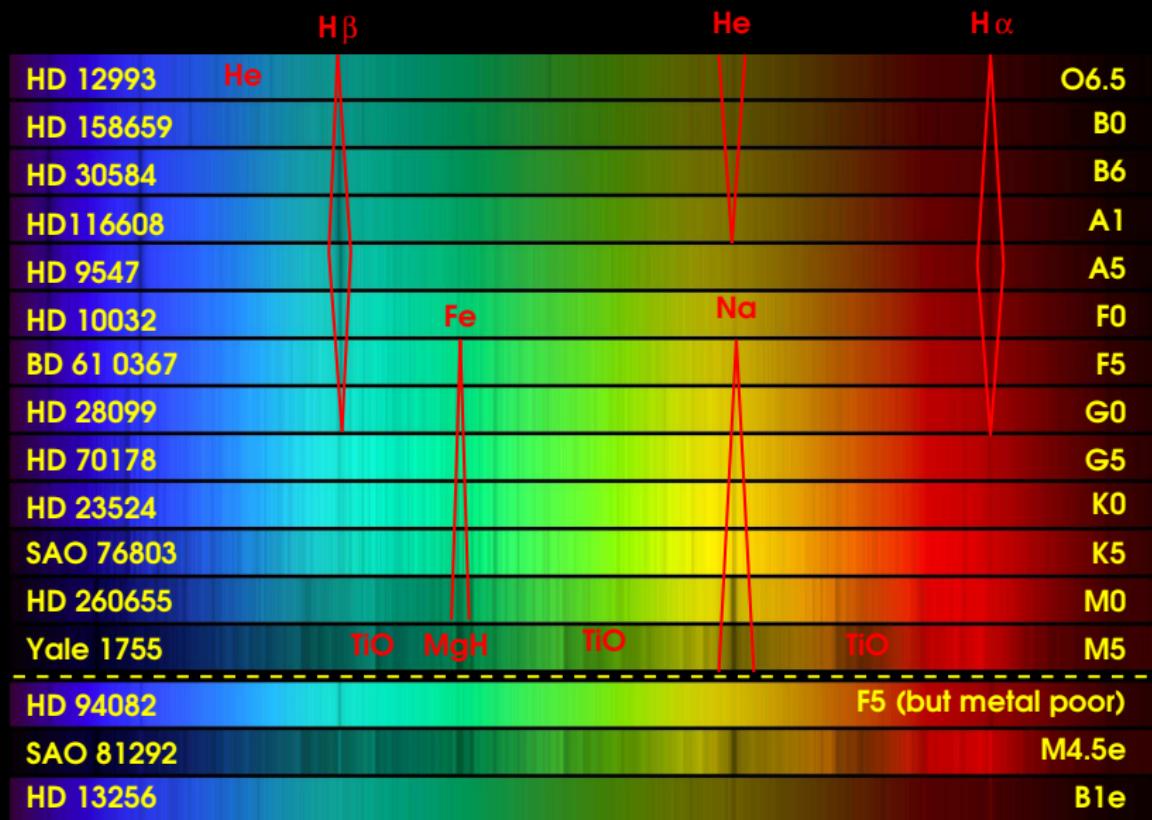
K – Kiss

M – Me

C

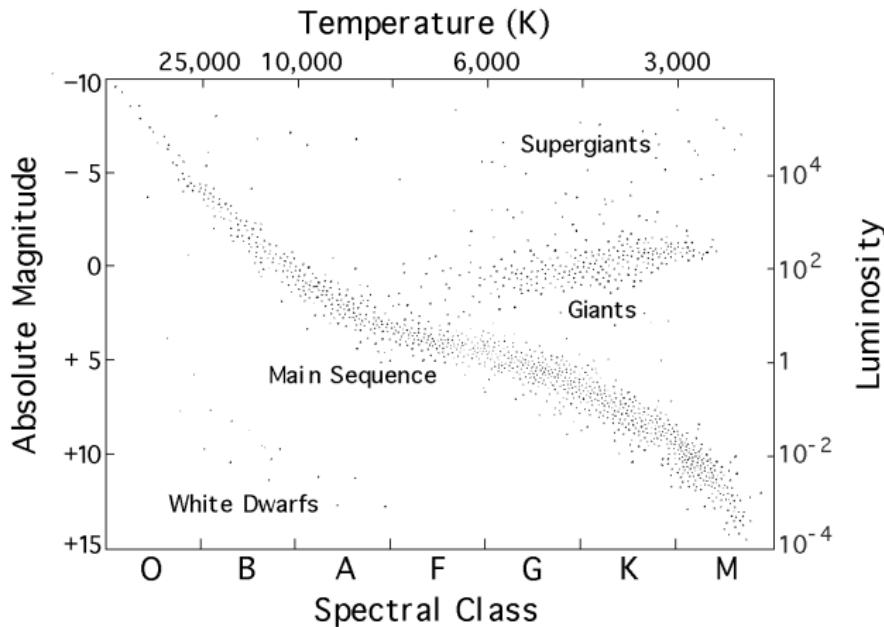
Spektralklassen II

	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



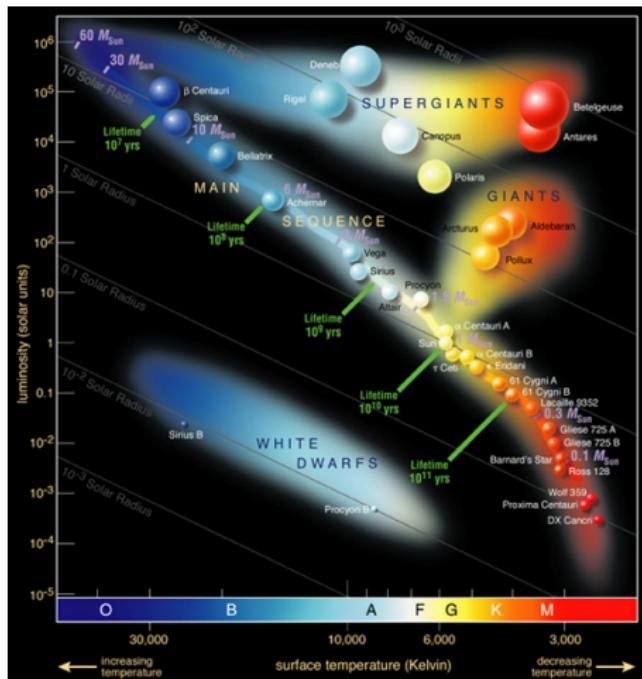
Spektralklassen [NOAO]

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>

Gliederung

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



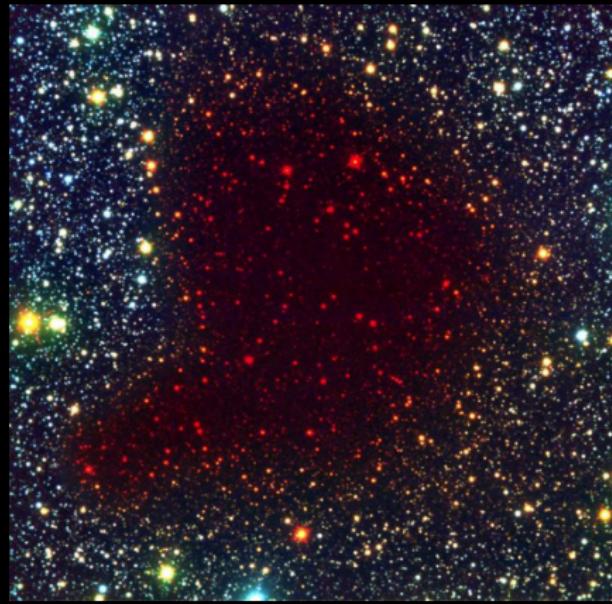
[Bernhard Liebscher (NAA)]



Molekülwolke B68



Molekülwolke B68 im Optischen [ESO;
VLT/FORS1]



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

Sternentstehung I

Sterne entstehen in Gruppen aus interstellaren Molekülwolken

Riesenmolekülwolken

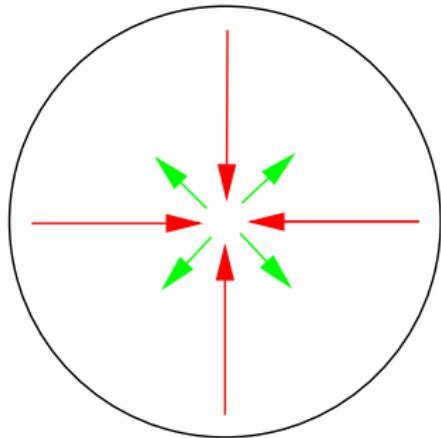
- Ausdehnung: 20 – 600 Lichtjahre
- Dichte H_2 : $n = 100\text{--}1000 \frac{\text{Teilchen}}{\text{cm}^3}$
- Masse: $10^4\text{--}10^6 M_\odot$
- Temperatur: 10–40 K
- Zusammensetzung: Wasserstoff (H_2), Kohlenmonoxid (CO), Alkohole, andere komplexe organische Moleküle

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



Antennengalaxien [Nasa/ESA/Hubble Heritage Team]

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 $T \gtrsim 2000$ K weiter aufgeheizt
- die Wasserstoffmoleküle werden dissoziiert (in ihre Atome aufgelöst) \Rightarrow Kern kollabiert weiter
- Entstehung eines zweiten hydrostatischen Kerns mit $T \approx 10.000$ 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>

Sternentstehung V

Weitere Entwicklung abhängig von der Masse M der Verdichtung

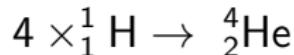
- $M \lesssim 0,08 M_{\odot}$:
Temperatur < 1 Mio K \Rightarrow keine Kernfusion, „Brauner Zwerg“
- $M \gtrsim 0,08 M_{\odot}$:
Temperatur > 1 Mio K \Rightarrow Kernfusion setzt ein, nachdem nahezu alles Gas auf den Stern eingefallen ist
- $M \gtrsim 3 M_{\odot}$:
Temperatur > 1 Mio K \Rightarrow Kernfusion 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 $c \approx 300.000 \frac{\text{km}}{\text{s}}$

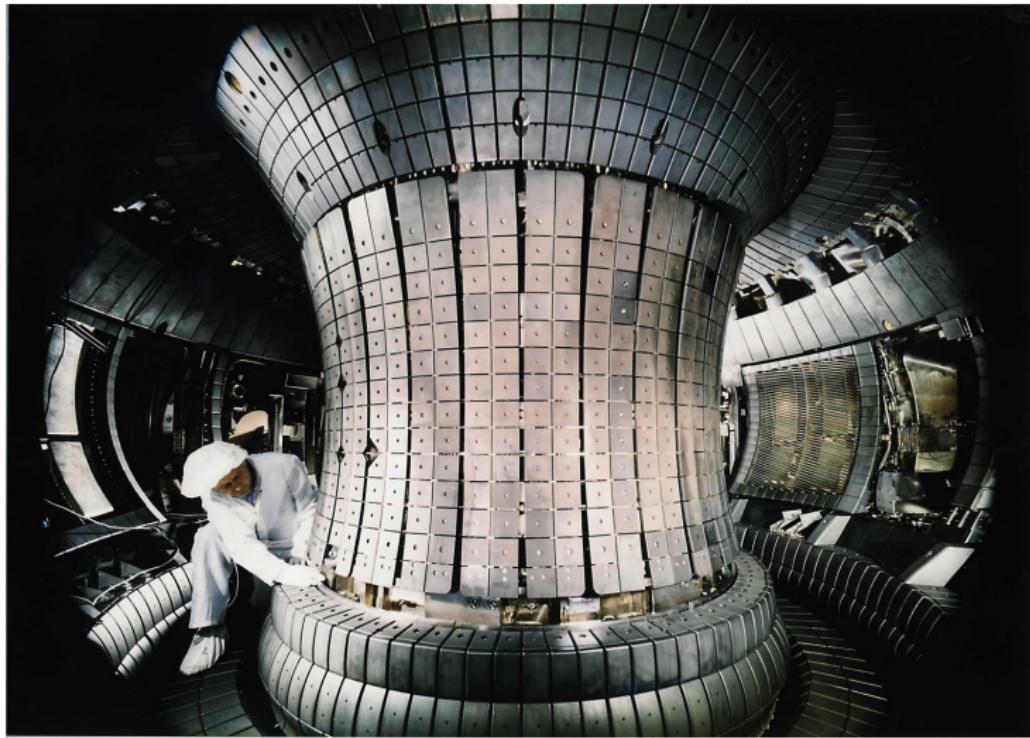
- 1 g Materie entspricht 25 GWh Energie
- Da bei der Kernfusion 0,7 % der Masse in Energie umgewandelt werden, werden bei der Fusion von 1 g Wasserstoff 175 MWh Energie freigesetzt.



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

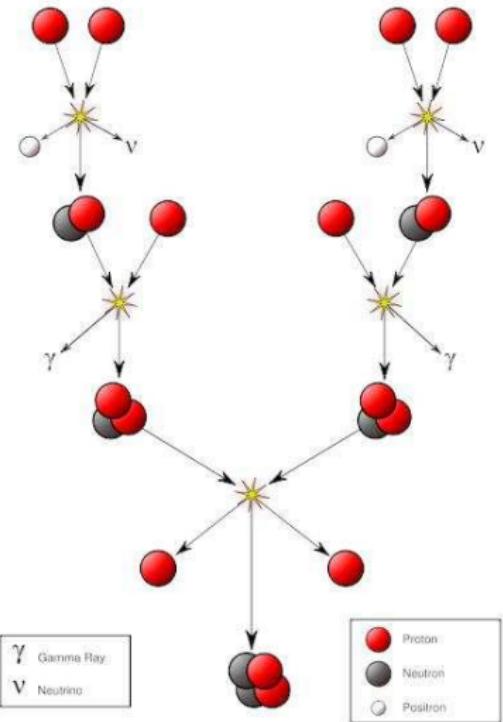
[Pro Aurum / E.ON Kernkraft GmbH]

Fusionsreaktor ASDEX Upgrade



[IPP]

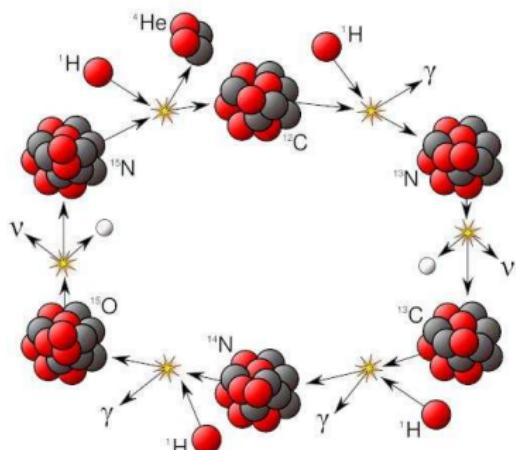
Proton-Proton-Zyklus



Dominierender Prozess in der Sonne

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

Bethe-Weizsäcker-Zyklus



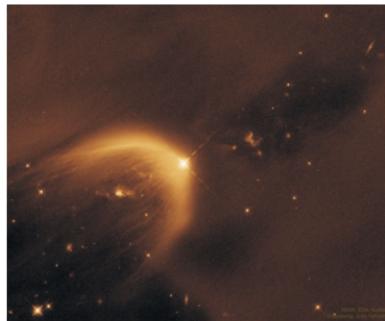
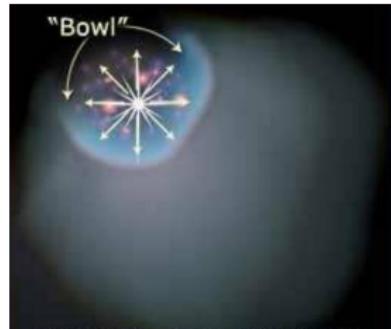
- Weitere Bezeichnung:
CNO-Zyklus
- Dominierender Prozess bei Sternen mit hohen Kerntemperaturen

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

	Proton	γ	Gamma Ray
	Neutron	ν	Neutrino
	Positron		

Junger Stern

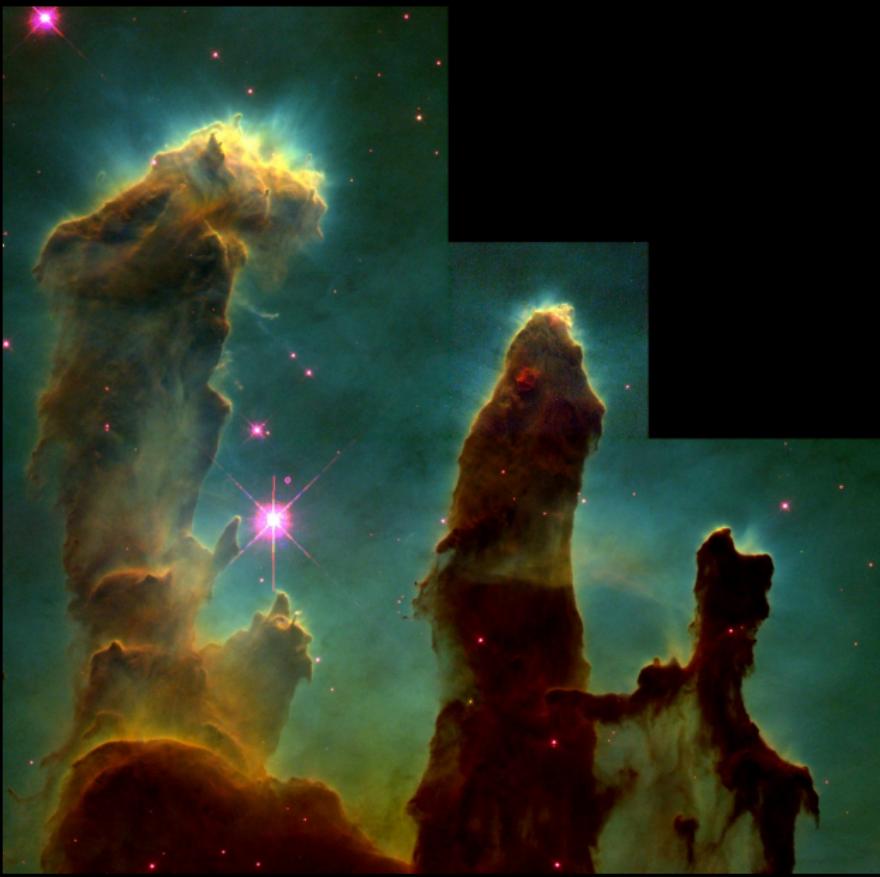
- Stern aufgrund der umgebenden Gaswolke zunächst unsichtbar
- Junger, heißer Stern hat intensiven Sternwind und Strahlungsdruck
- umgebende Gaswolke wird durch UV-Strahlung und Sternenwind aufgelöst
- Stern wird sichtbar



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



HST-Aufnahme des Adlernebels M16 [NASA]



„Pillars of creation“ in M16, in den Spitzen der Gassäulen befinden sich junge Sterne [NASA]



NGC 7822 [Hartmuth Kintzel (NAA)]

Star-Forming Region 30 Doradus

HST • WFC3/UVIS



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): 05h35m24.0s/-5° 27'00.0"

RA/DE (des Datums): 05h35m03s/-5° 26'39"

Stundenwinkel/DE: 0h38m09s/-5° 26'39"

Az/Alt: +102°31'12"/+36°23'09"

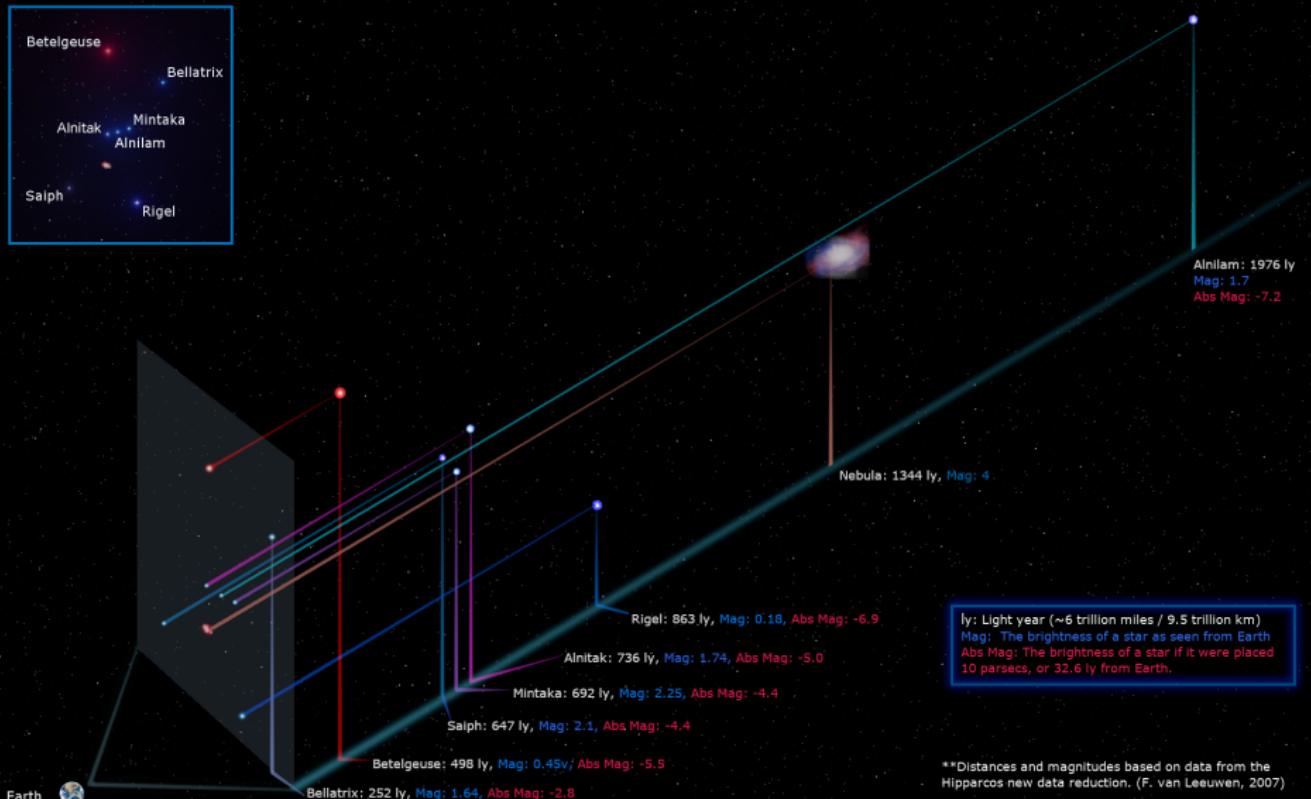
Größe: +3° 6'00"



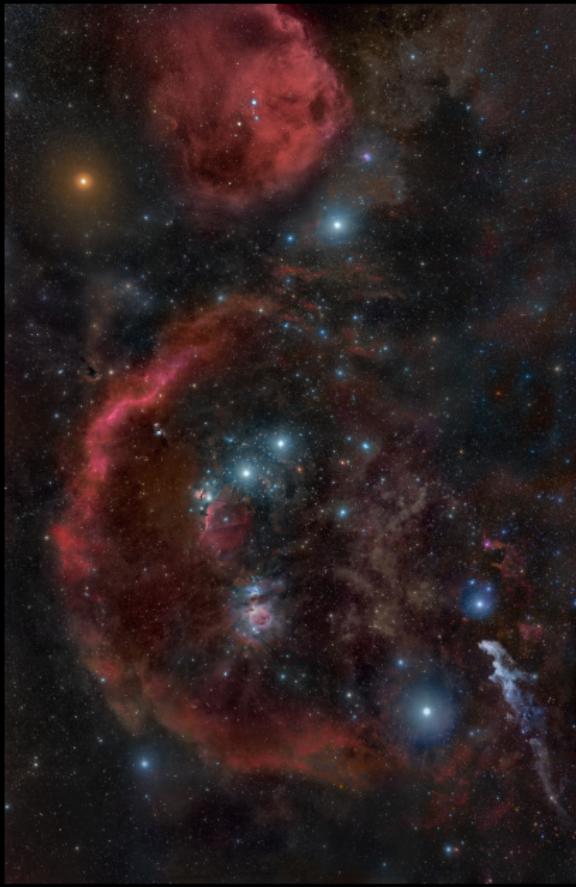
Erde, München, 523m

FOV 24.9° 30.8 FPS

2009-11-17 02:12:45



Sternbild Orion [Ronald Davison]



Orion-Molekülwolkenkomplex [Wikimedia/Rogelio Bernal Andreo]



HST-Aufnahme des Orionnebels M42 [NASA]

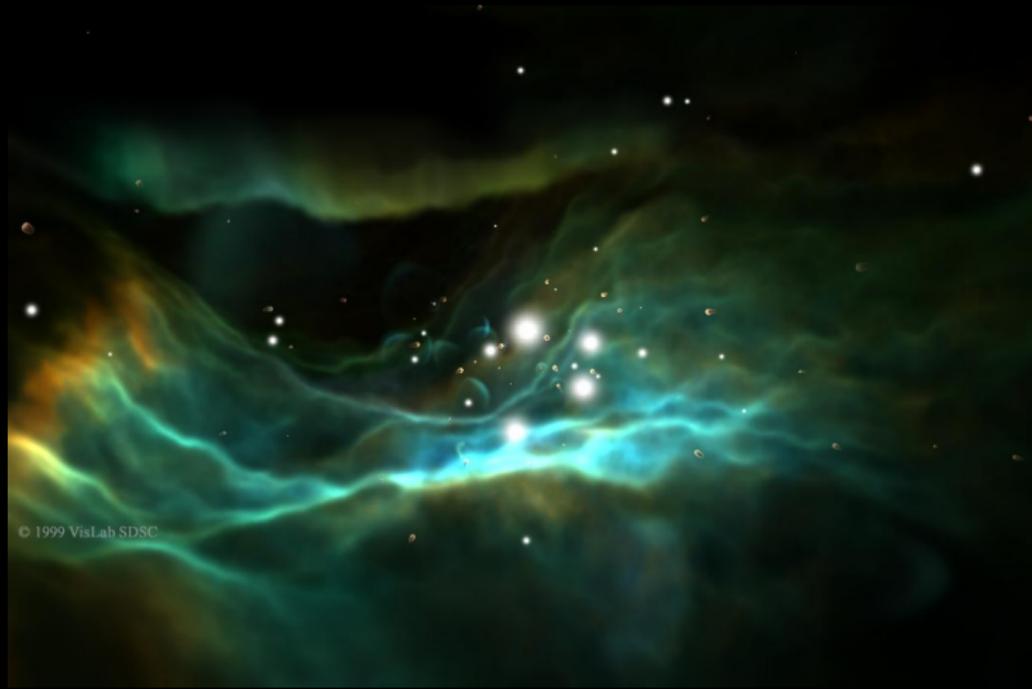




Ausschnitt des Orionnebels M42 [NASA]

Video zum Orionnebel:

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



© 1999 VisLab SDSC

Sternentstehung im Orionnebel (Modellrechnung) [VisLab SDSC]



Der offene Sternhaufen M45 (Plejaden) [R. Sperber (NAA)]



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



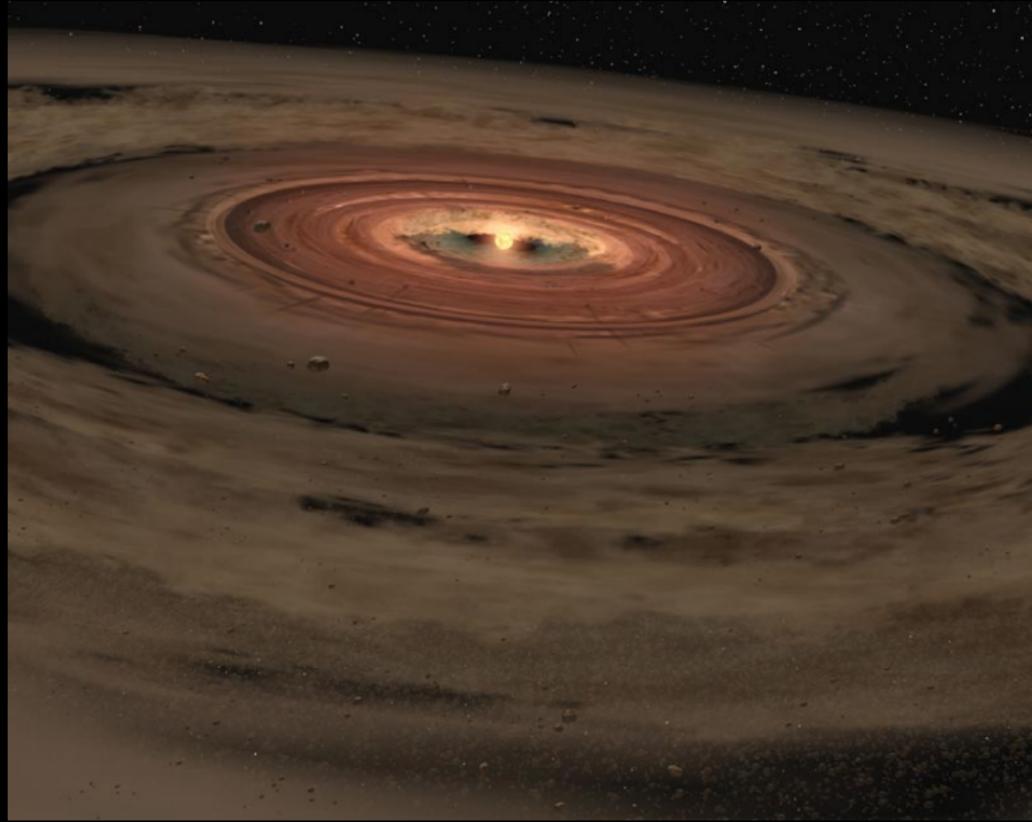
Der offene Sternhaufen NGC 3603 [NASA, ESA, and the Hubble Heritage]



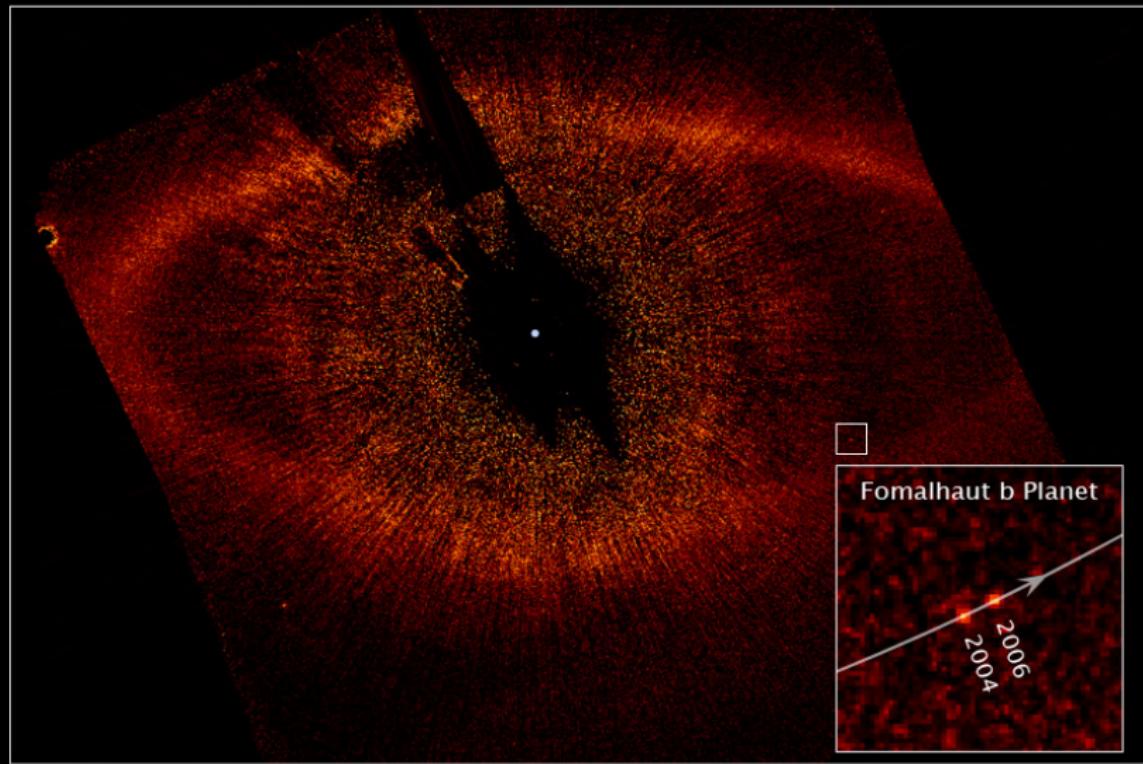
Protoplanetare Scheibe im Orionnebel [C.R. O'Dell/Rice University, and NASA]



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



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

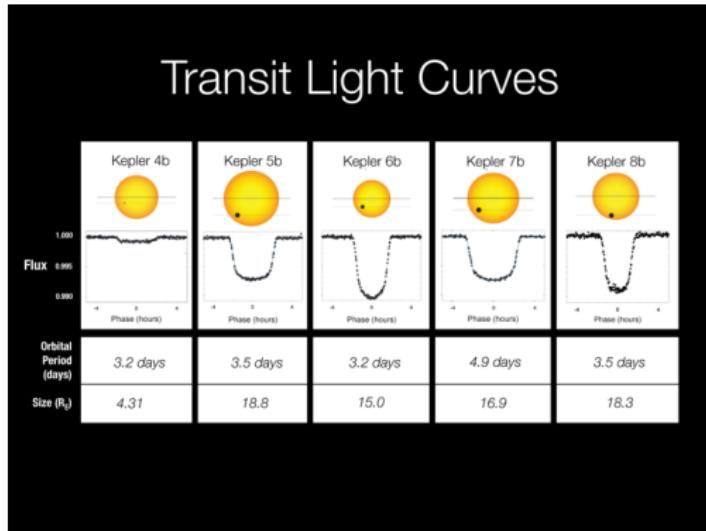


NASA, ESA, and P. Kalas (University of California, Berkeley)

STScI-PRC08-39a

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

Extrasolare Planeten: Nachweis



[Bill Borucki, Jan 2010 AAS Presentation]

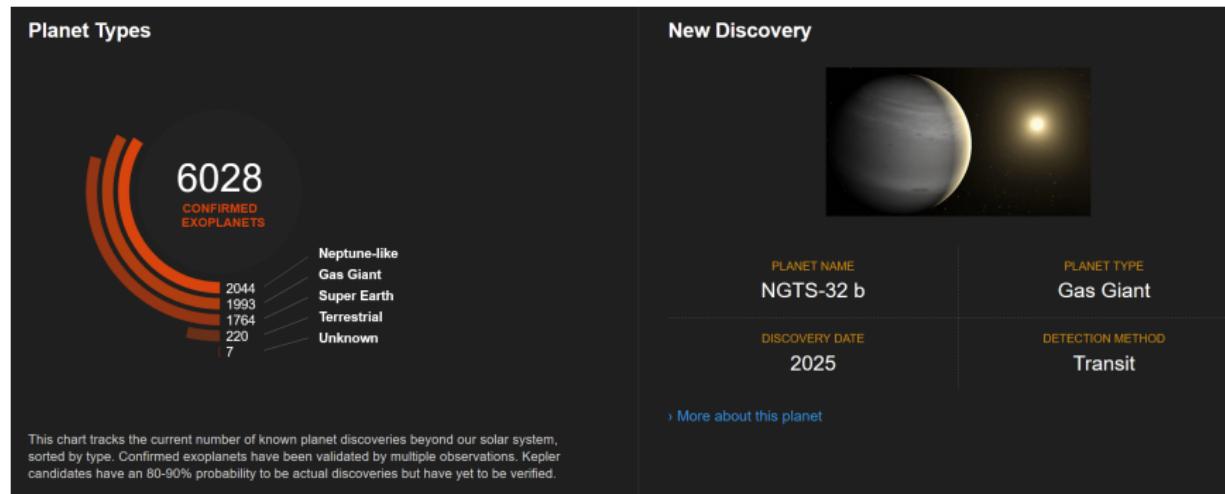
- Direkte Abbildung
- Radialgeschwindigkeitsmethode
- Transitmethode
- Eigenbewegung
- Gravitationslinseneffekt
- Pulsar Timing

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

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

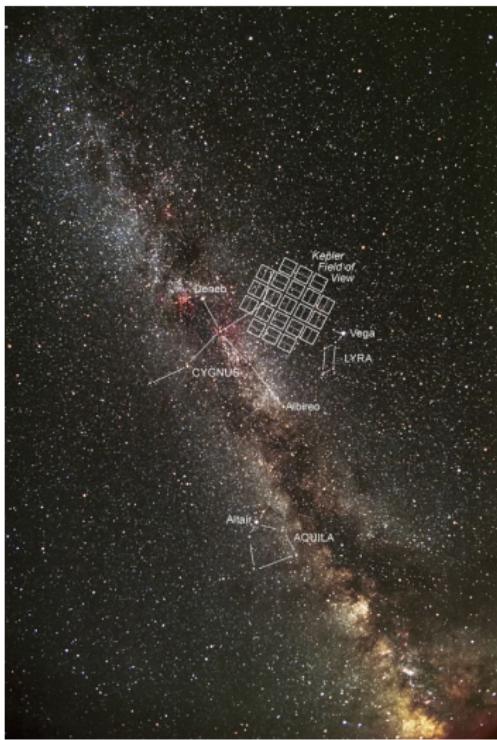
Extrasolare Planeten

6028 Exoplaneten (Stand 26. Oktober 2025)



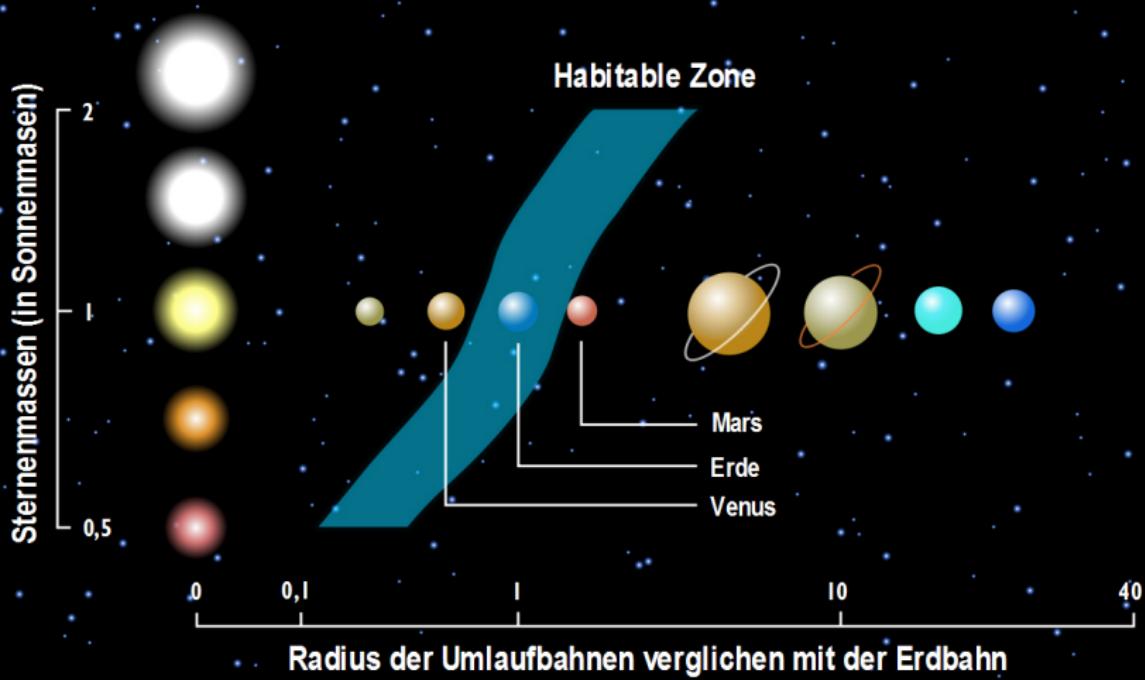
[<https://exoplanets.nasa.gov/discovery/discoveries-dashboard/>]

Weltraumteleskop Kepler



[Carter Roberts, NASA]

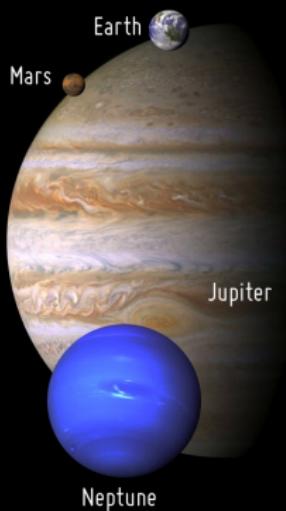
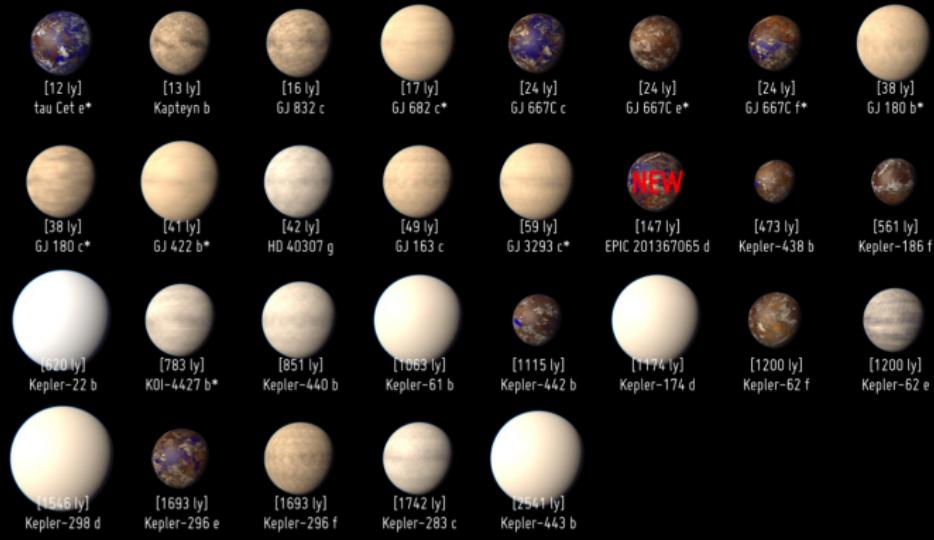
Habitable Zone



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

Potentially Habitable Exoplanets

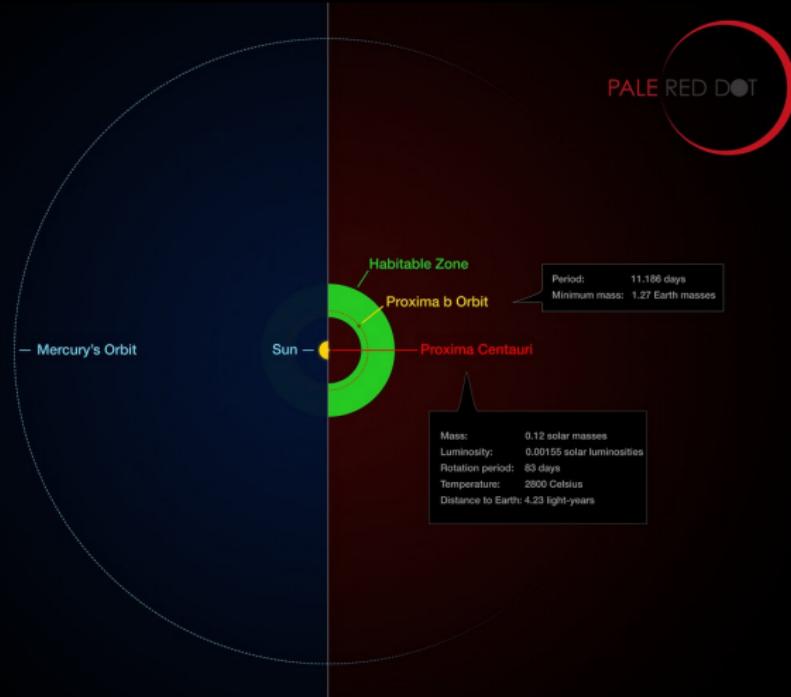
Ranked by Distance from Earth (light years)



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

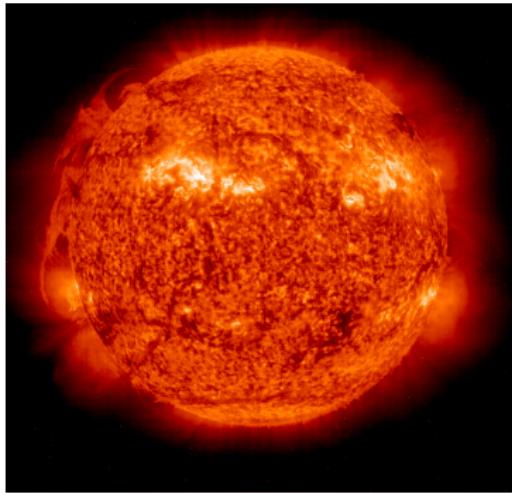
CREDIT: PHL @ UPR Arecibo (phl.upr.edu) January 16, 2015

Proxima Centauri



[ESO/M. Kornmesser/G. Coleman]

Nächste Woche:



Sternaufbau, Sternentwicklung, Endstadien