Sternaufbau und Sternentwicklung – Teil 1

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

Nürnberger Astronomische Arbeitsgemeinschaft e.V.

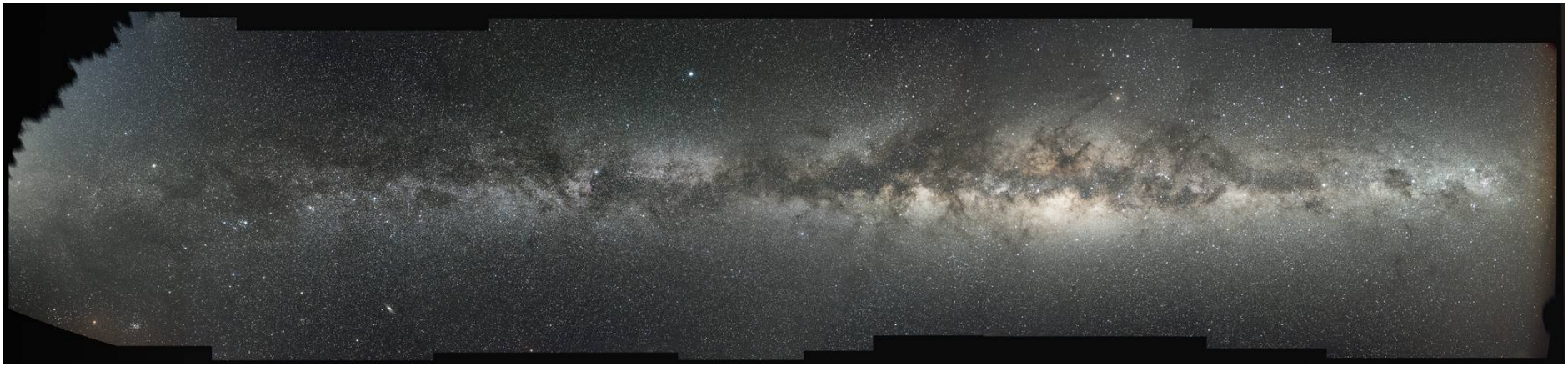
Grundkurs Astronomie
4. November 2024

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

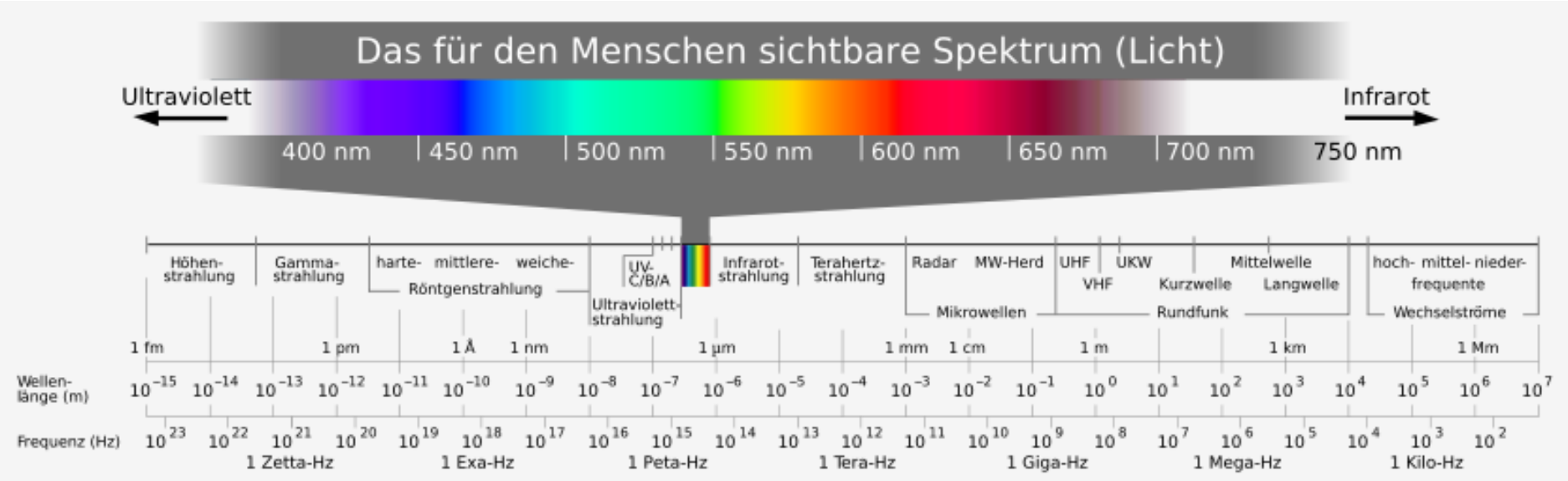


[Thomas Jäger/NAA]

- 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 $\widehat{=}$ Energie eines Photons $\widehat{=}$ 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

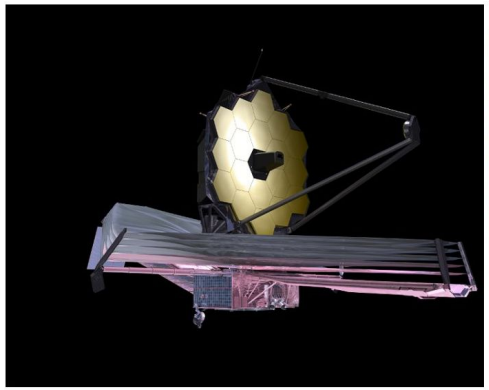
Zusammenhang Frequenz-Wellenlänge:

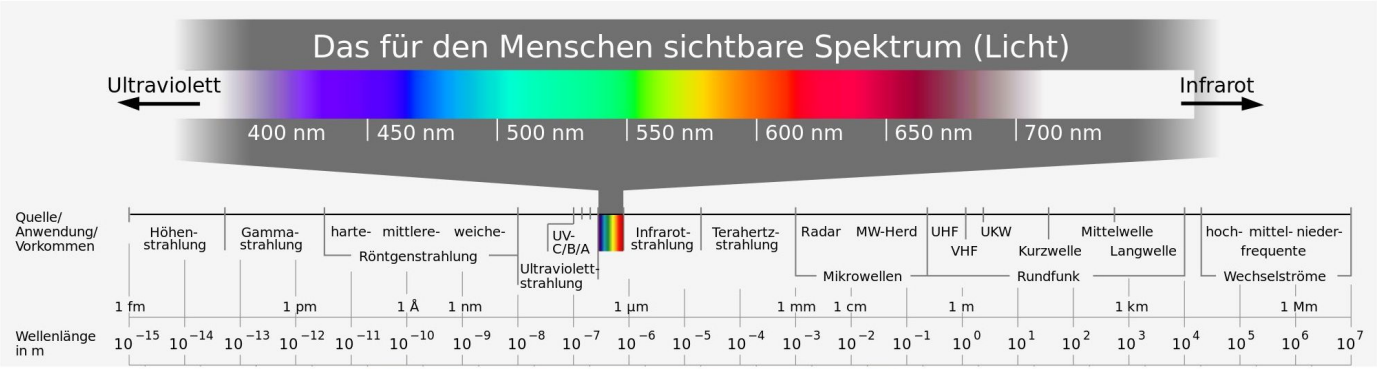
$$f \cdot \lambda = c$$

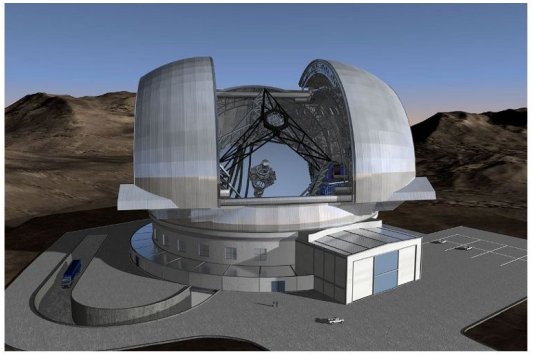
Lichtgeschwindigkeit $c \approx 299.792\,\mathrm{km/s}$, Frequenz f, Wellenlänge λ

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

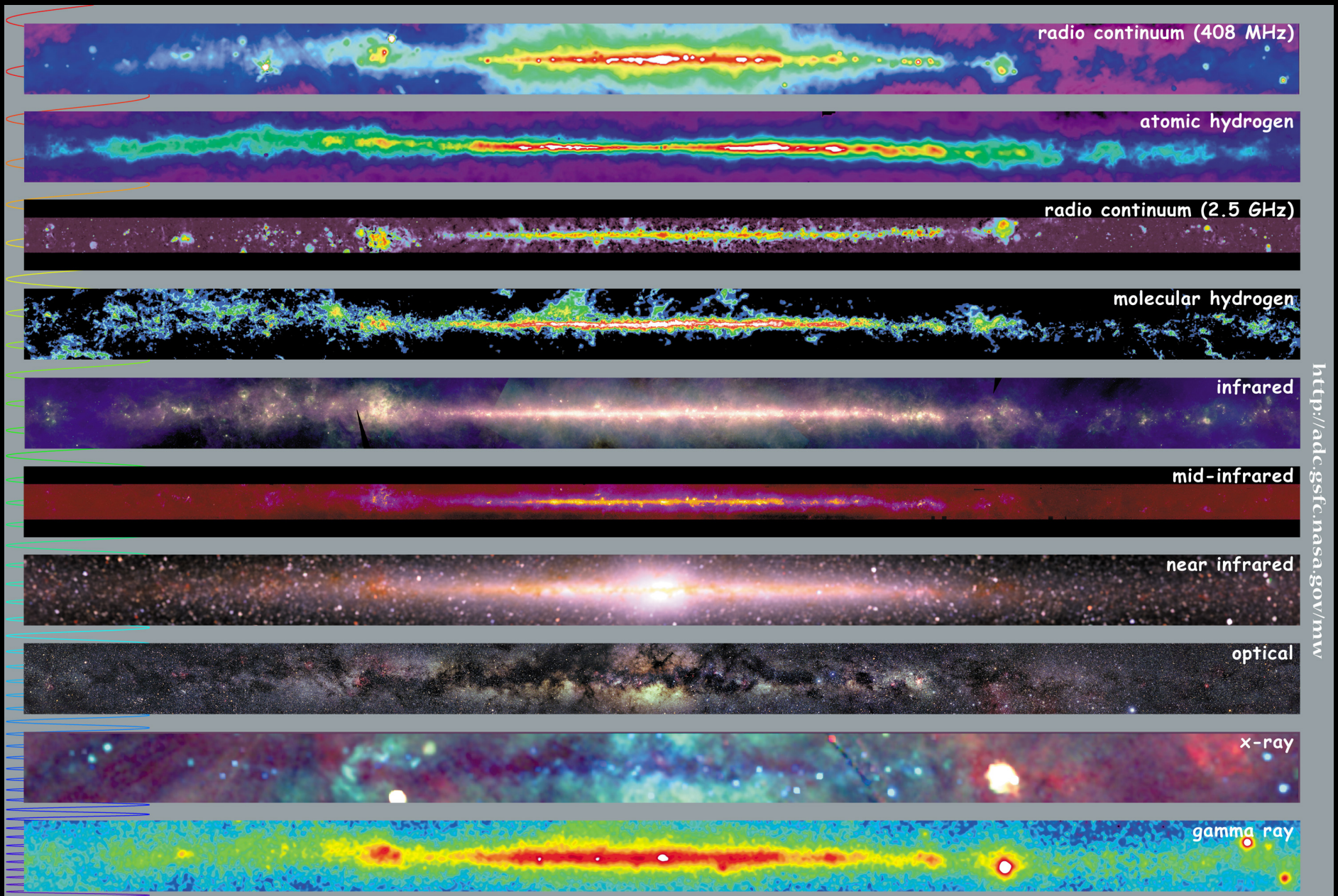
Multiwellenlängenastronomie







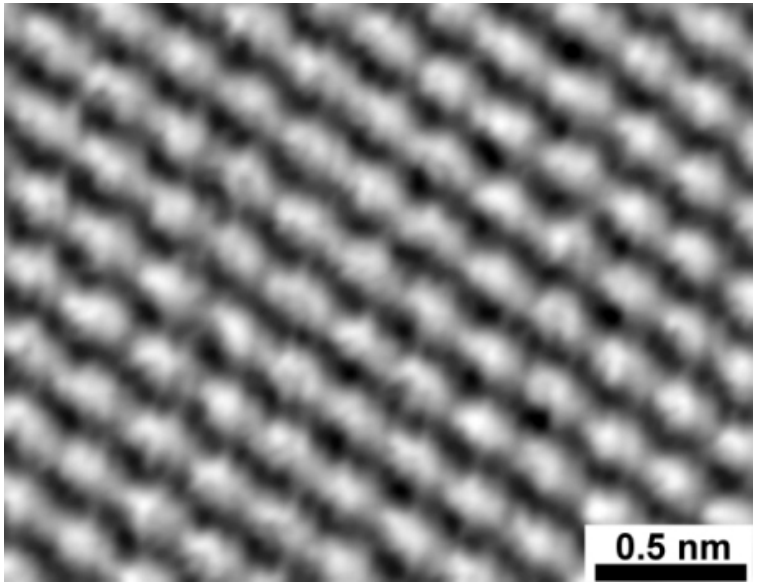
[ESO, NAOJ, NRAO, ESA, MPG]



Multiwavelength Milky Way

Aufbau der Materie

Grundbausteine der Materie: Atome



Aufbau der Atome:

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

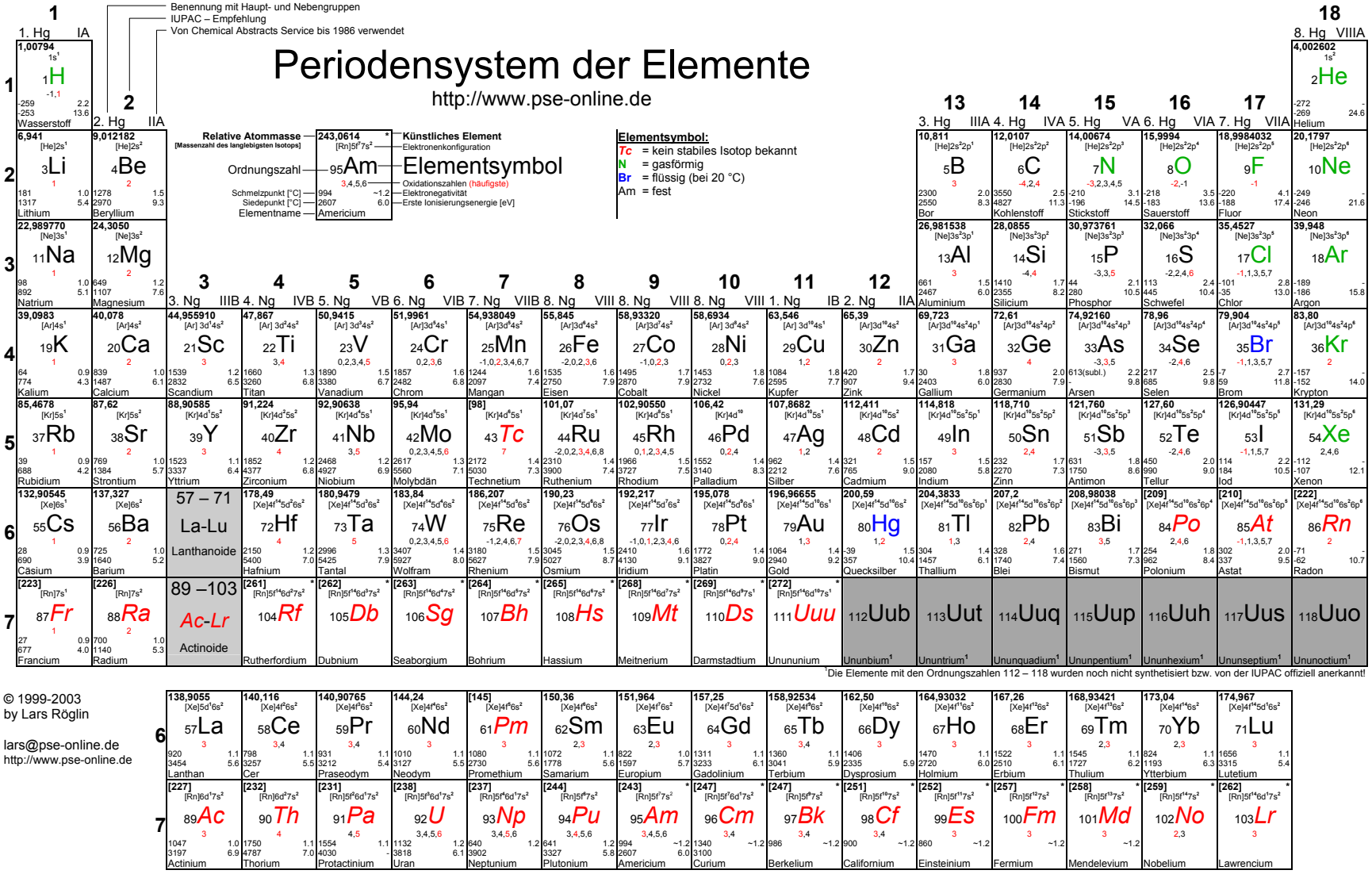
Atome

- 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:

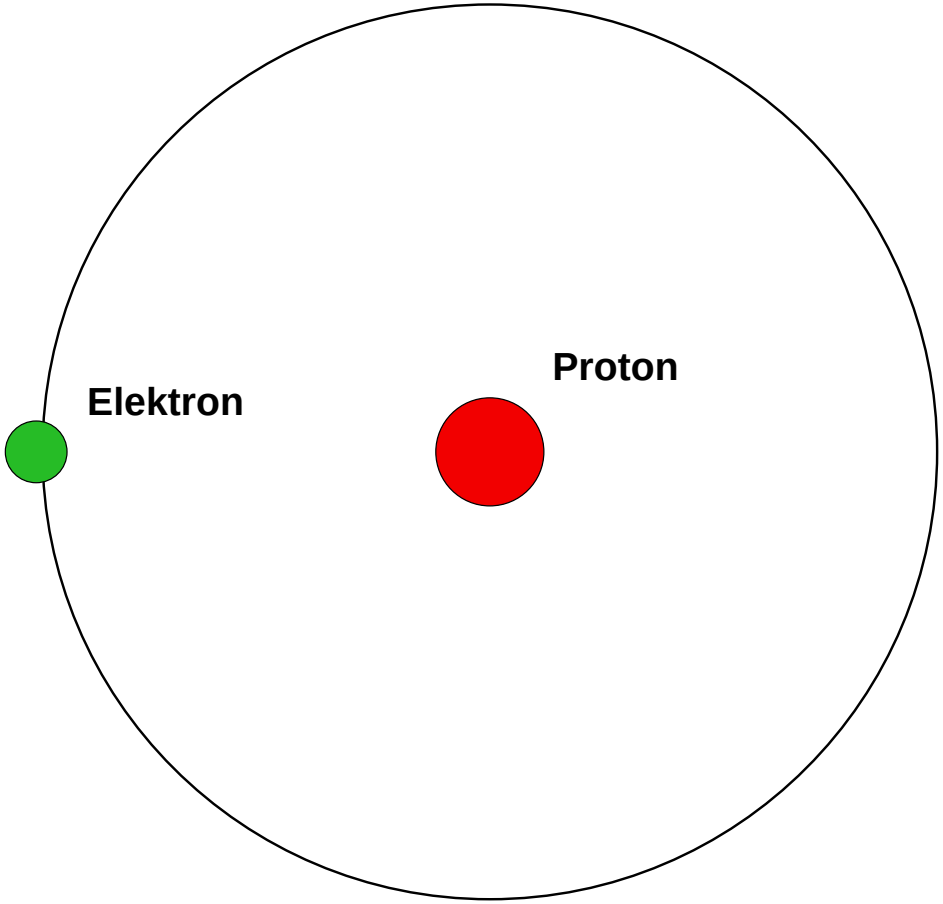
$$\Delta E = E_m - E_n$$

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

Periodensystem der Elemente

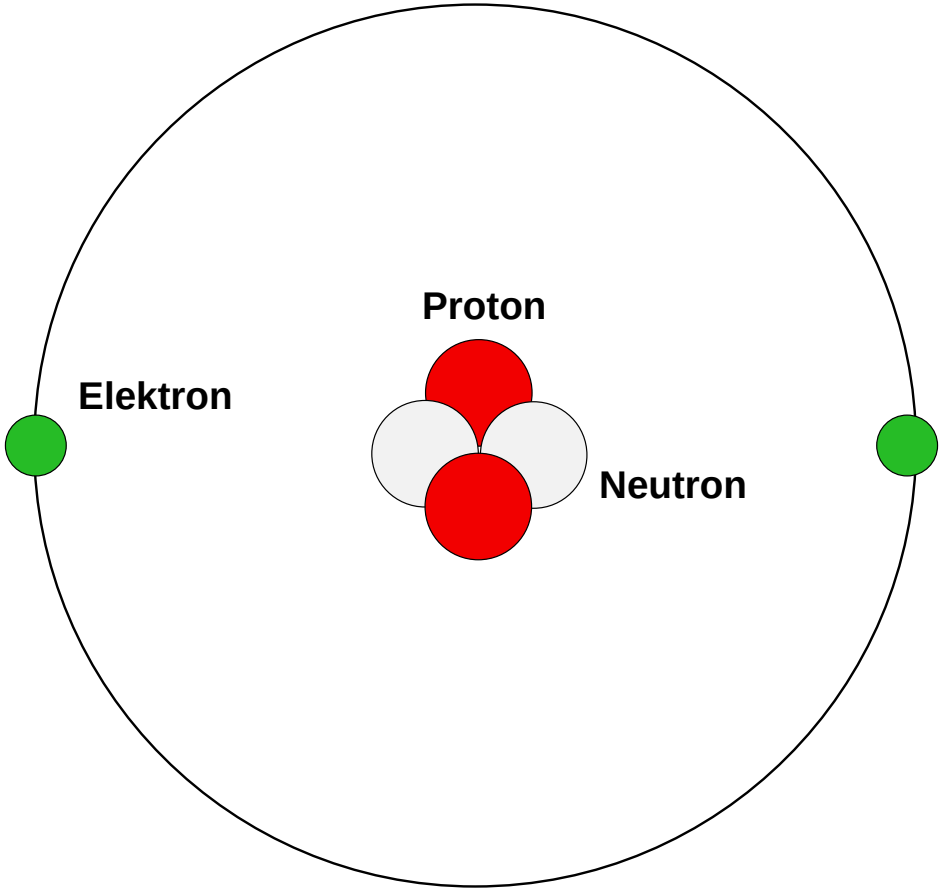


Wasserstoffatom



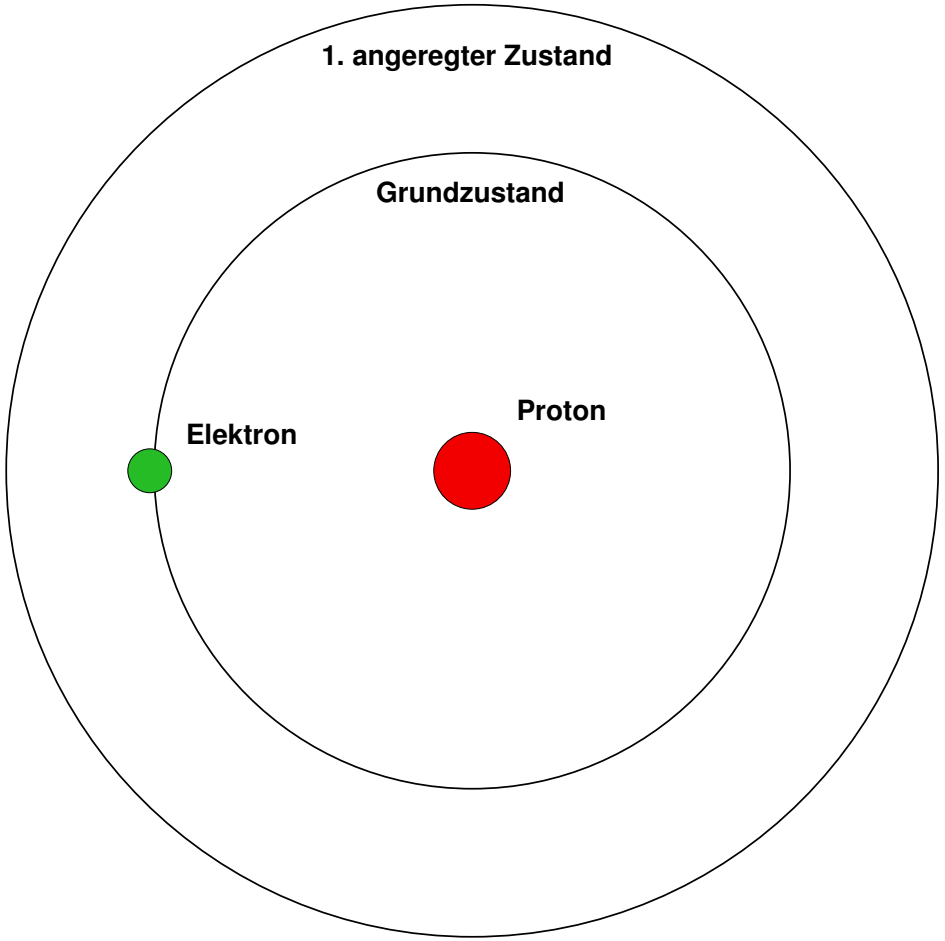
- Kürzel: H (Hydrogenium)
- Einfachstes Atom: 1 Proton, 1 Elektron
- $Z = 1$
- Häufigstes Element im Universum

Heliumatom



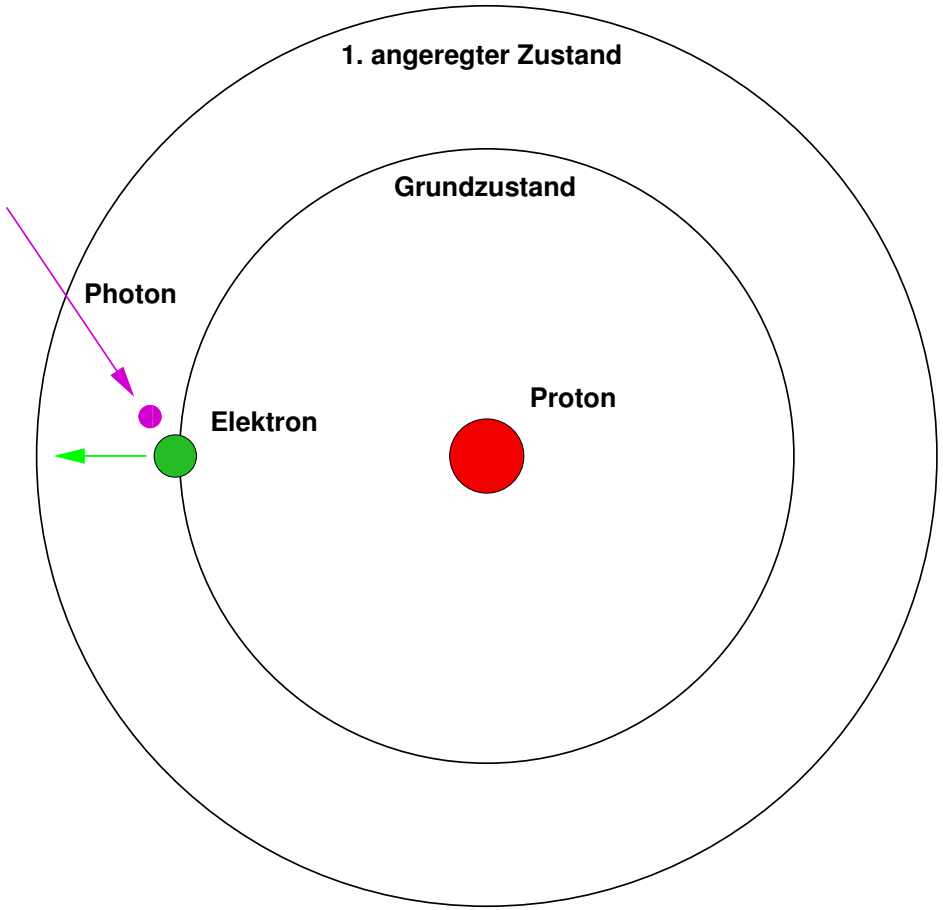
- Kürzel: He (Helium)
- Kern von $^4_2$He: 2 Protonen, 2 Neutronen
- 2 Elektronen
- $Z = 2$
- Zweithäufigstes Element im Universum

Absorption I



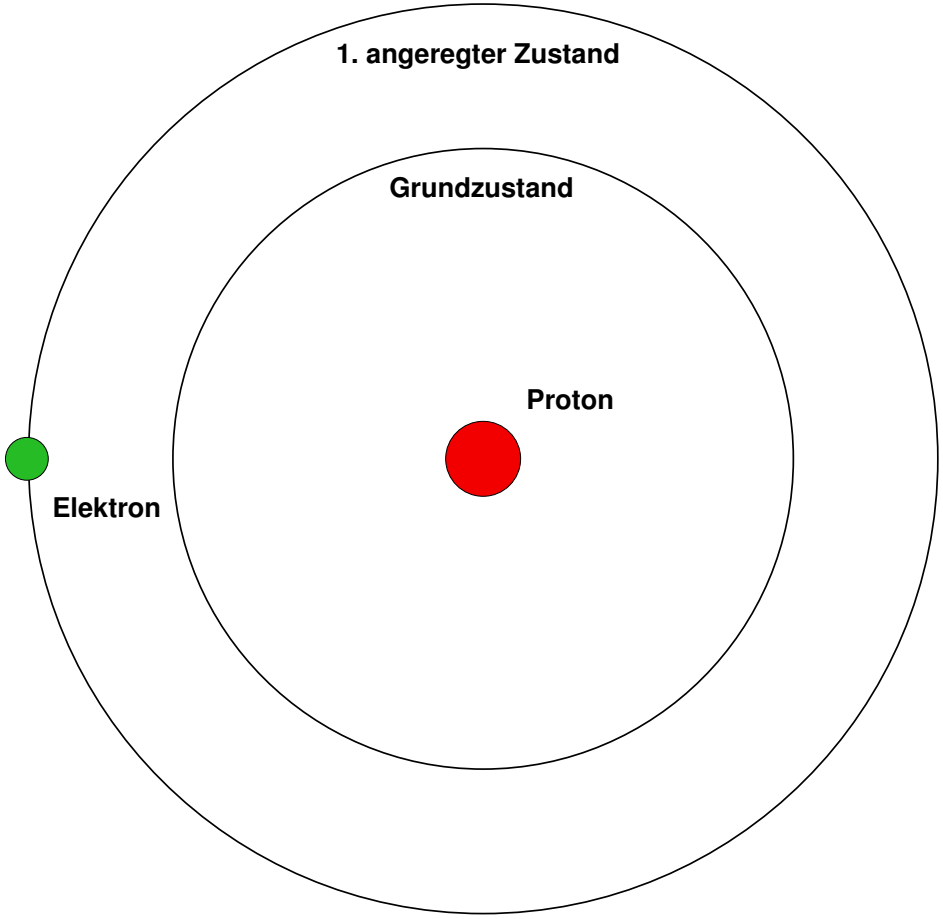
Normalerweise befinden sich die Elektronen im energetisch niedrigsten Niveau (es können sich bei Atomen mit mehrerer Elektronen aber maximal zwei Elektronen im Grundzustand befinden)

Absorption II



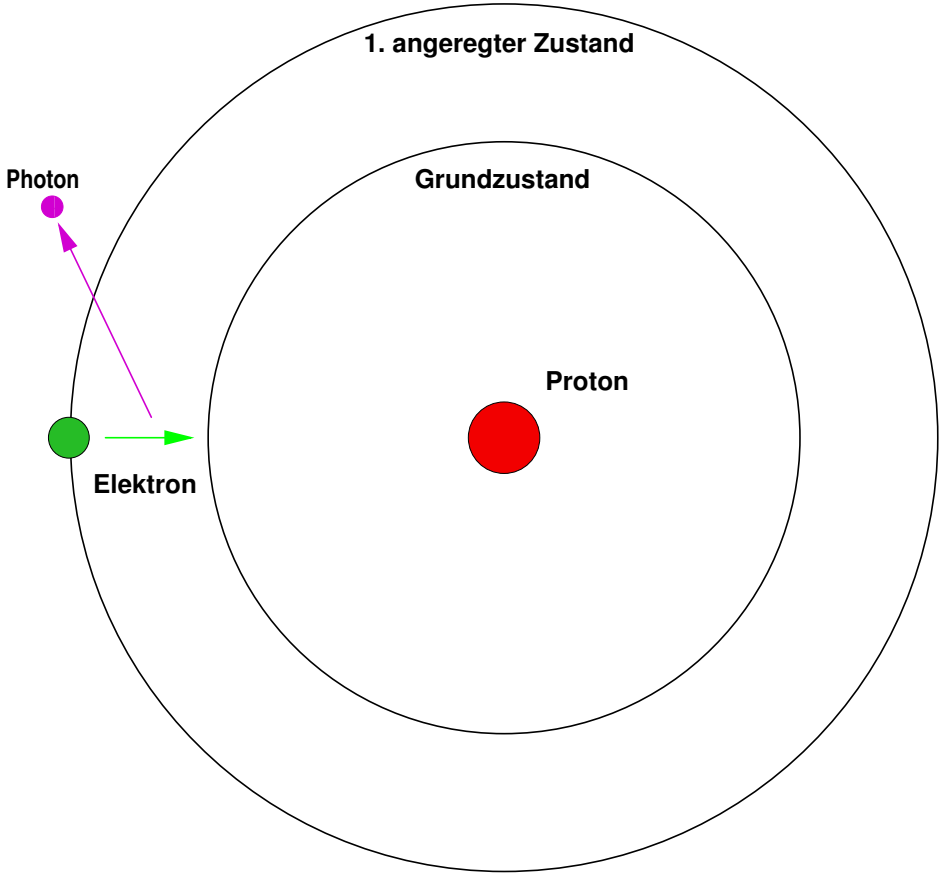
Photon mit der passenden Energie ΔE fällt ein: Photon wird absorbiert und das Elektron auf eine höhere Bahn gehoben: *angeregter Zustand*

Emission I



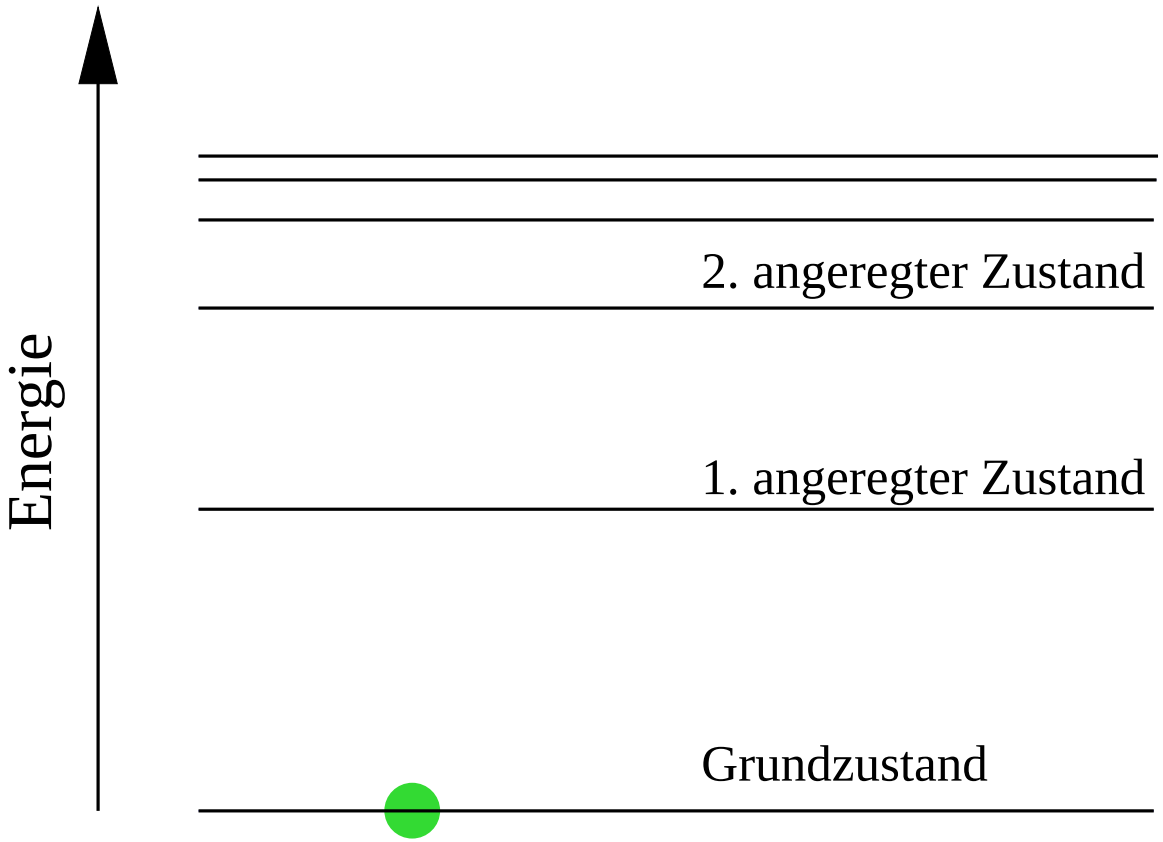
Der angeregte Zustand ist nicht stabil

Emission II



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

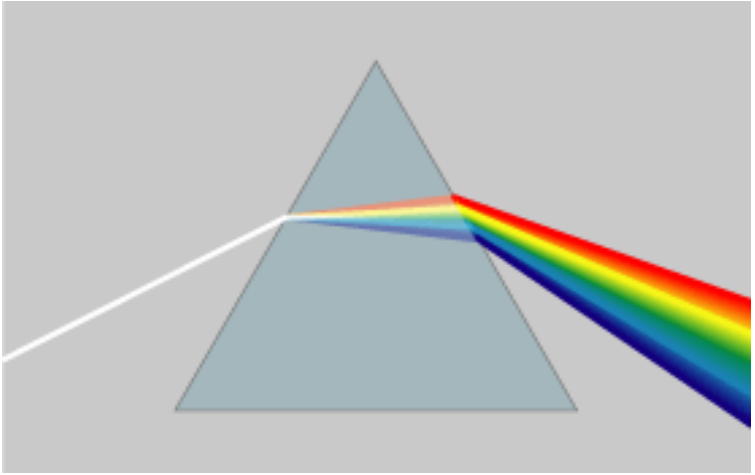
Emission III



Abstand der Energieniveaus charakteristisch für jedes Atom bzw. Molekül

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

Spektroskopie – Analyse des Lichts



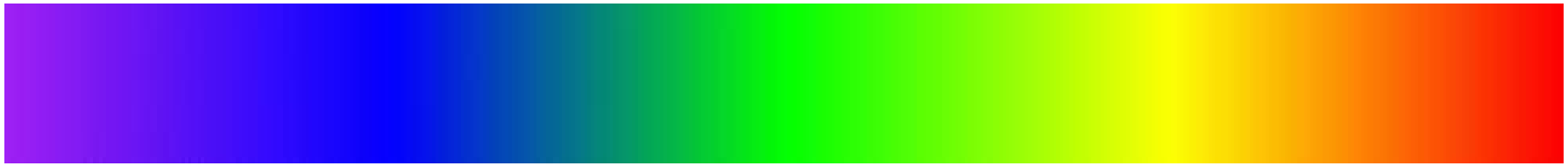
Weißlichtzerlegung mit einem Prisma [Wikipedia]

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

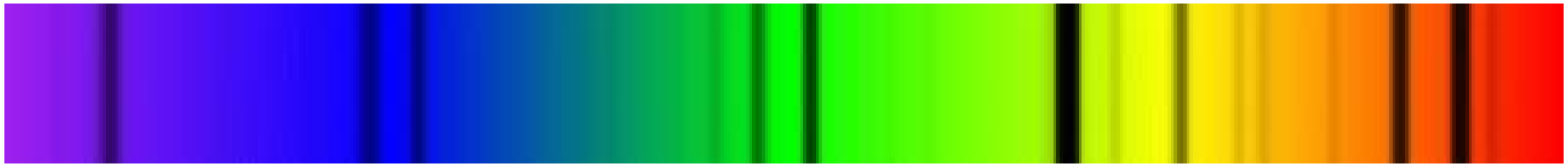
$\Rightarrow$ aus den Spektren von Himmelsobjekten lässt sich deren Zusammensetzung bestimmen

Spektren

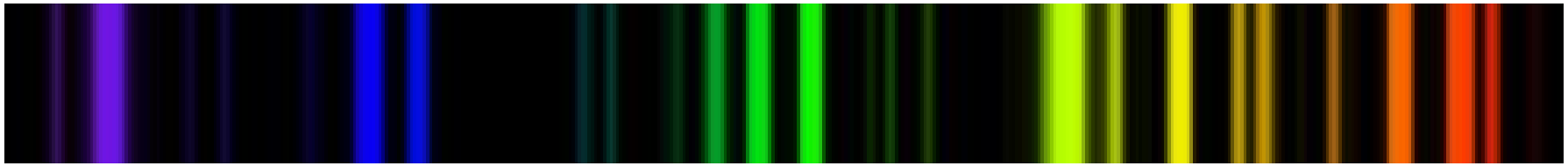
- Kontinuierliches Spektrum



- Absorptionsspektrum

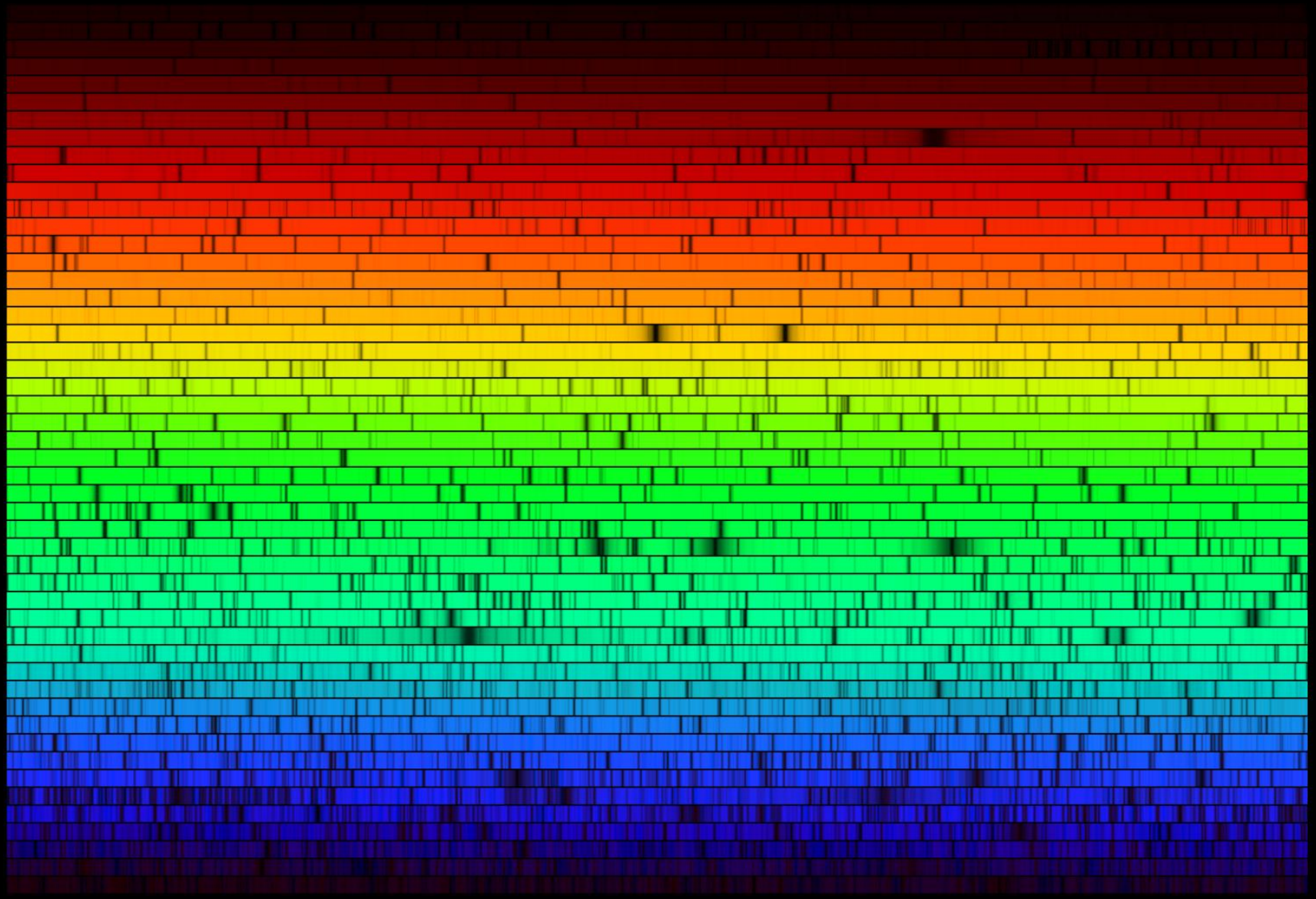


- Emissionsspektrum



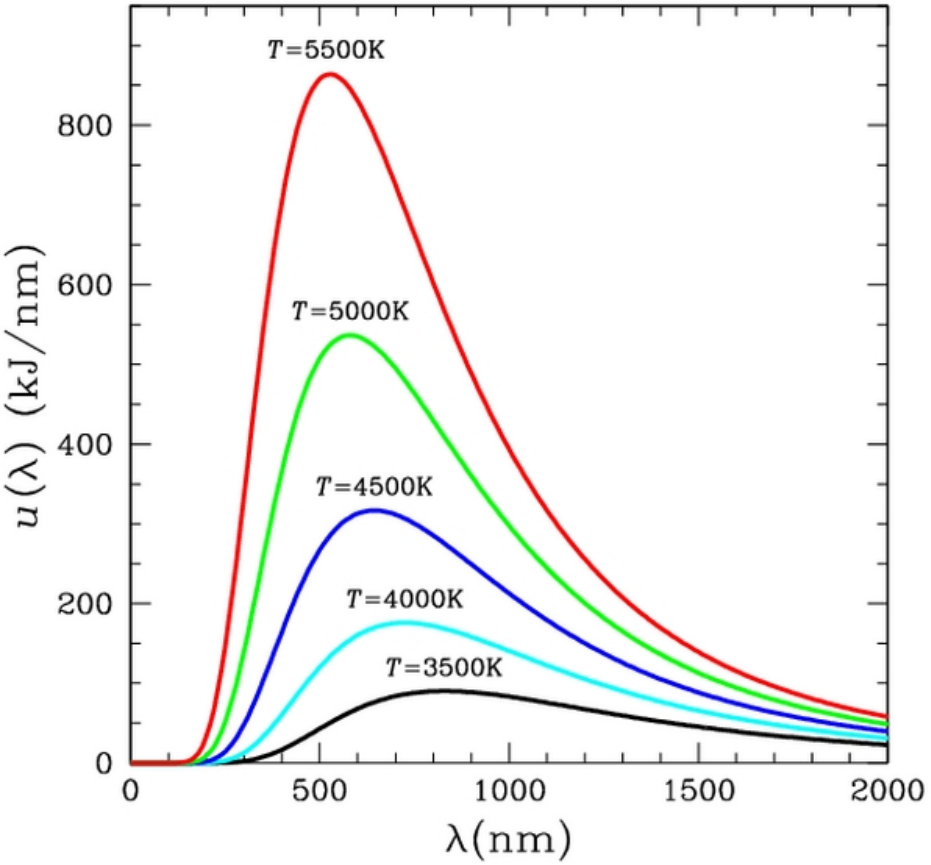
Sternspektren: Absorptionsspektren

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

NASA and The Hubble Heritage Team (STScI/AURA) • Hubble Space Telescope WFPC2 • STScI-PRC03-21

Spektralklassen I

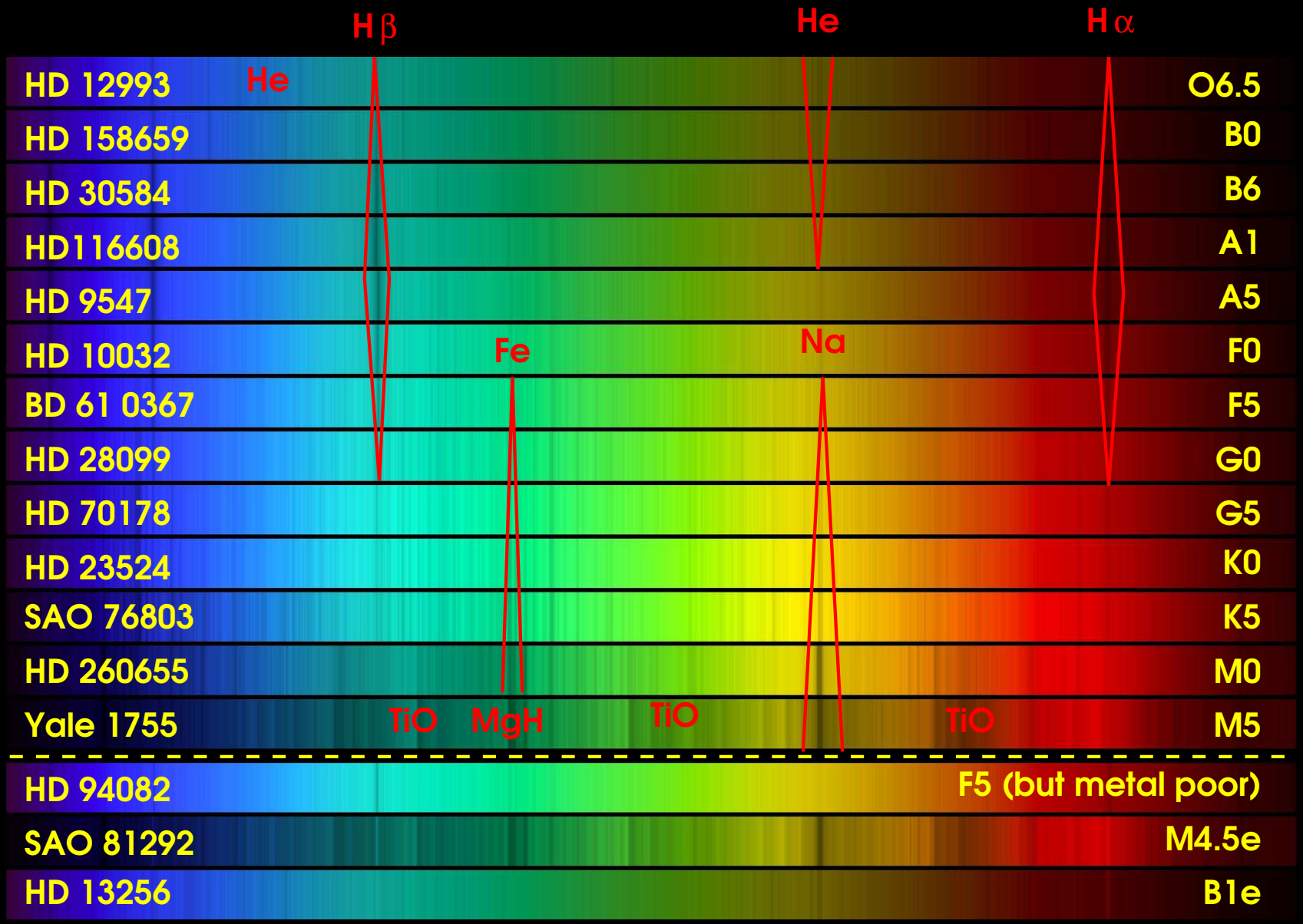
Sterne mit ähnlichen Spektren werden in Spektralklassen unterteilt

Harvard-Klassifikation

O – Oh
B – Be
A – A
F – Fine
G – Girl/guy
K – Kiss
M – Me
C

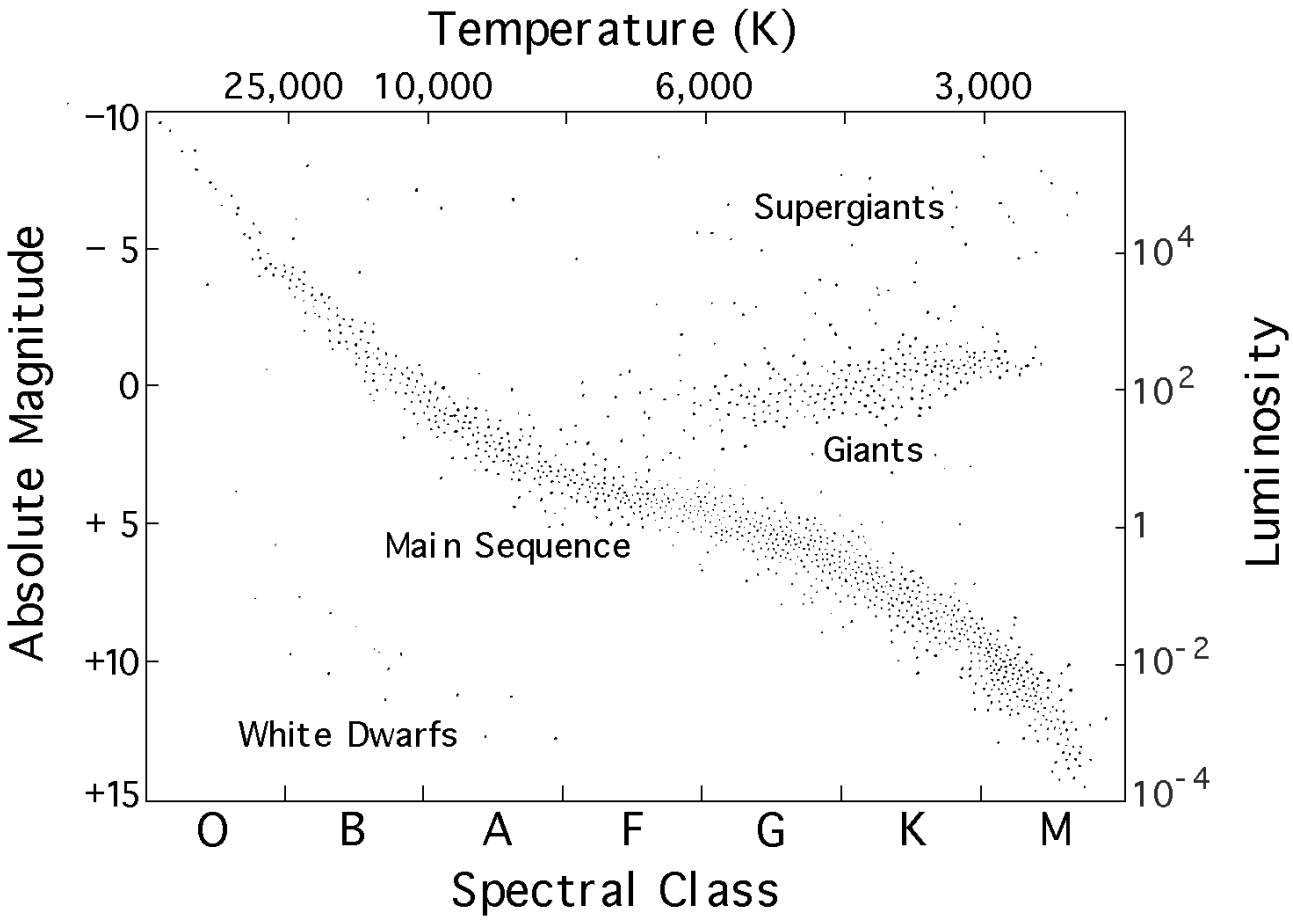
Spektralklassen II

	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



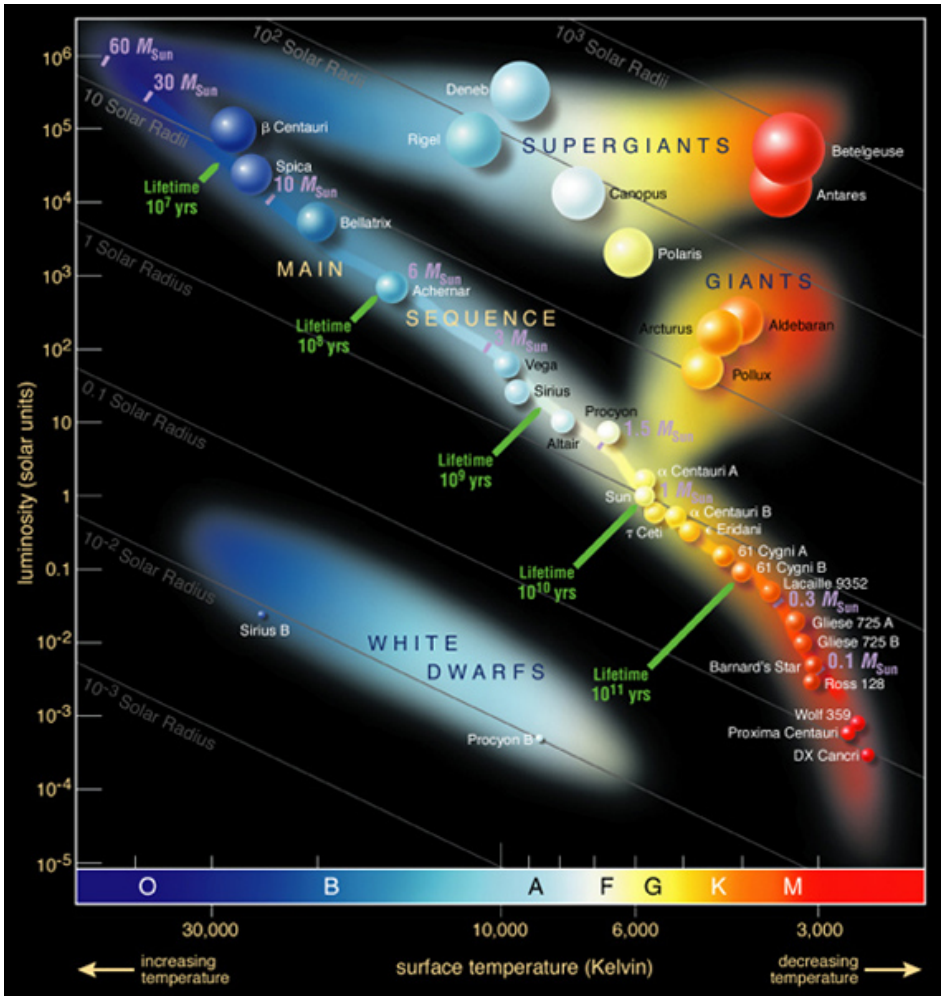
Spektralklassen [NOAO]

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

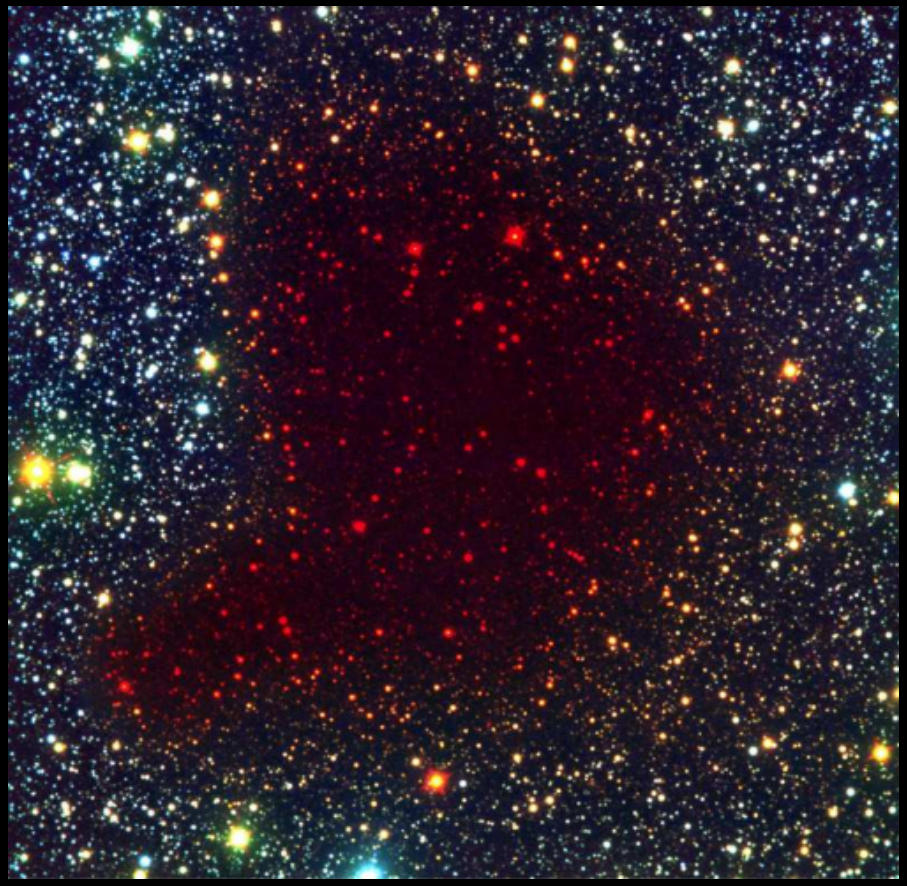
1. Physikalische Grundlagen
   - Elektromagnetisches Spektrum
   - Aufbau der Materie
   - Licht-Materie-Wechselwirkung
   - Spektroskopie
2. Sternentstehung
   - Kollaps von Molekülwolken
   - Kernfusion
   - Frühe Entwicklung
   - Planetenentstehung und Exoplaneten

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

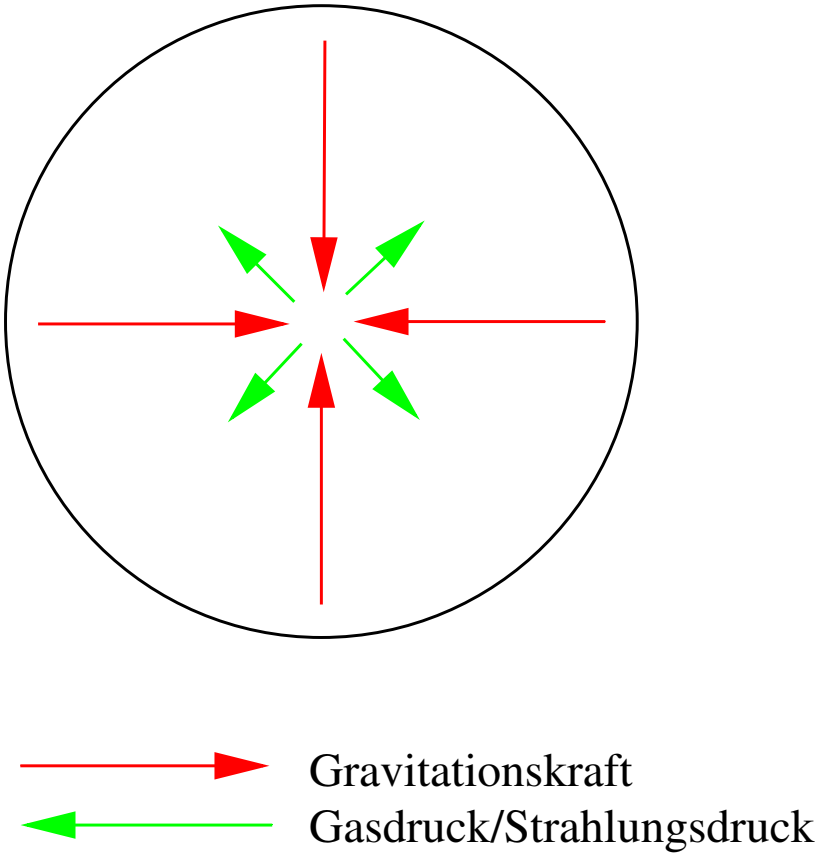
Riesenmolekülwolken

- 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), Kohlemonoxid (CO), Alkohole, andere komplexe organische Moleküle

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

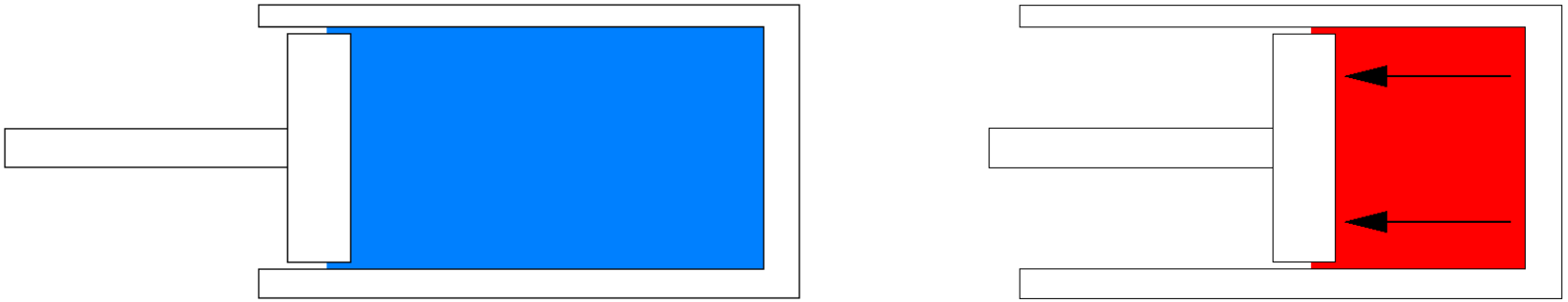
Antennengalaxien [Nasa/ESA/Hubble Heritage Team]

Sternentstehung II



- Bedingung für Kollaps: Gravitationskraft stärker als Gasdruck
  $\Rightarrow$ *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 $T \gtrsim 2000\,\mathrm{K}$ weiter aufgeheizt
- die Wasserstoffmoleküle werden dissoziiert (in ihre Atome aufgelöst) $\Rightarrow$ Kern kollabiert weiter
- Entstehung eines zweiten hydrostatischen Kerns mit $T \approx 10.000\,\mathrm{K}$
- 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 $< 1\,\text{Mio}\,\text{K} \Rightarrow$ keine Kernfusion, „Brauner Zwerg“
- $M \gtrsim 0{,}08\, M_\odot$:
  Temperatur $> 1\,\text{Mio}\,\text{K} \Rightarrow$ Kernfusion setzt ein, nachdem nahezu alles Gas auf den Stern eingefallen ist
- $M \gtrsim 3\, M_\odot$:
  Temperatur $> 1\,\text{Mio}\,\text{K} \Rightarrow$ 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

$$4 \times {}^{1}_{1}\mathrm{H} \rightarrow {}^{4}_{2}\mathrm{He}$$

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

Energieausbeute

- Einstein: Masse und Energie sind äquivalent

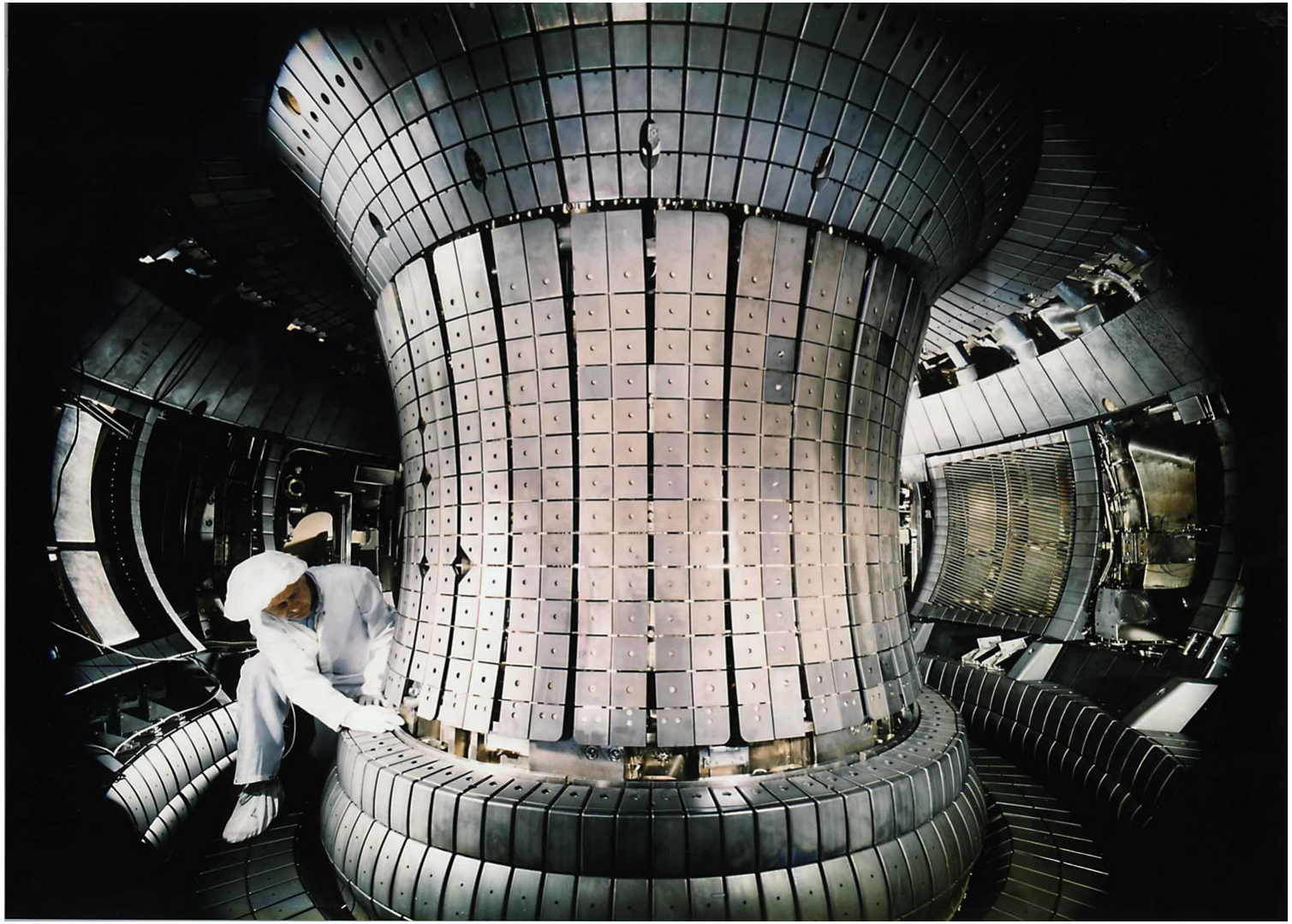
$$E = mc^2$$

  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 $\widehat{=}$ 18 Stunden KKW Isar II

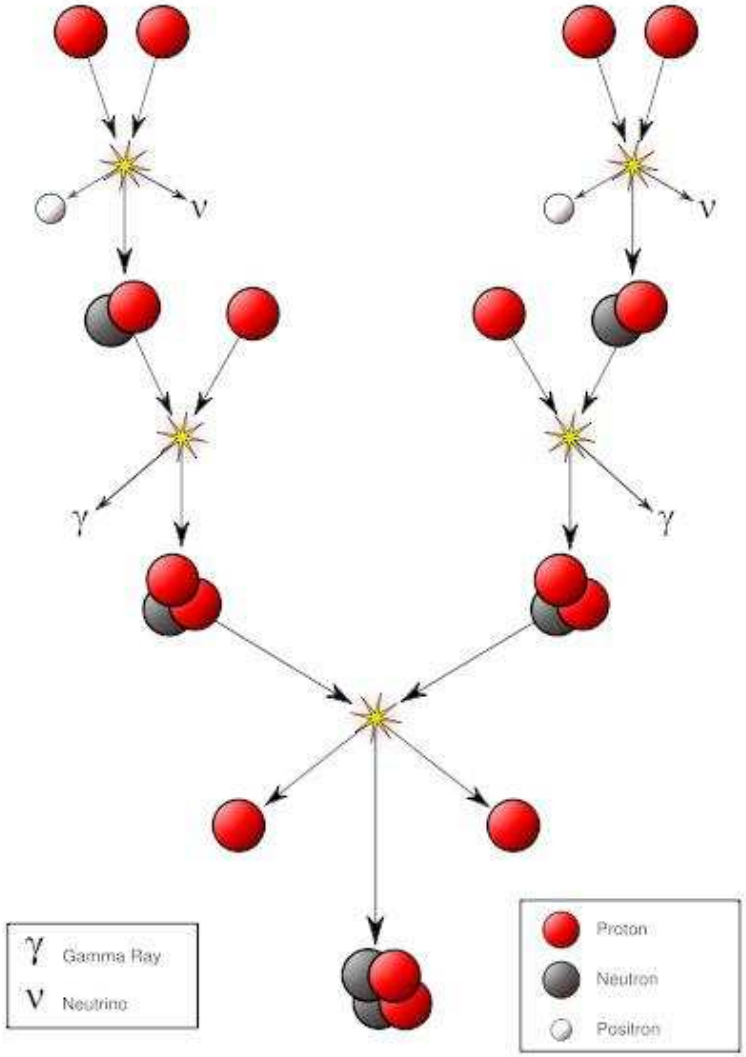
[Pro Aurum / E.ON Kernkraft GmbH]

Fusionsreaktor ASDEX Upgrade



[IPP]

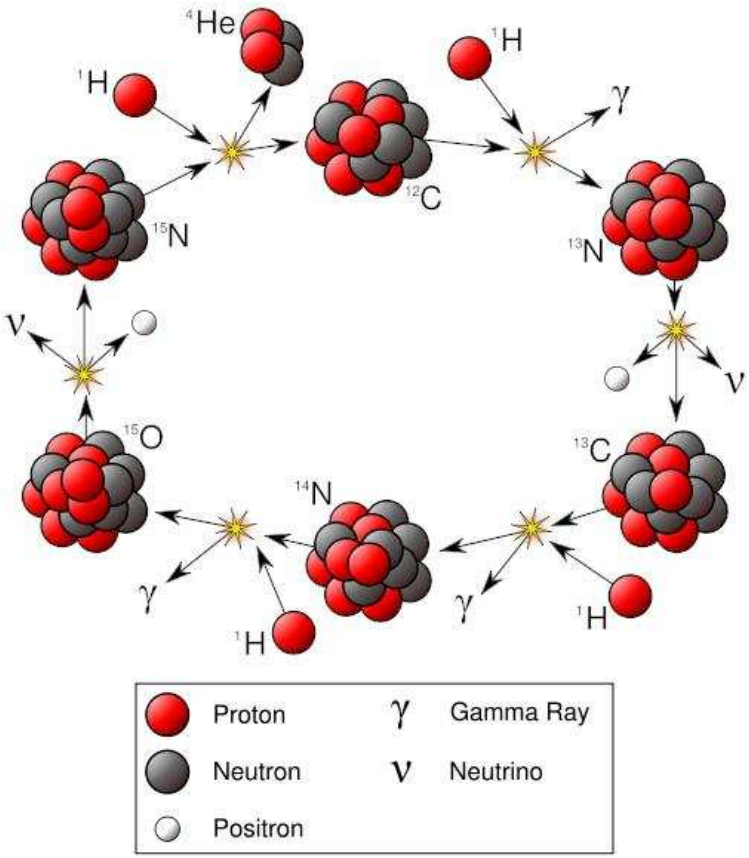
Proton-Proton-Zyklus



Dominierender Prozess in der Sonne

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

Bethe-Weizsäcker-Zyklus

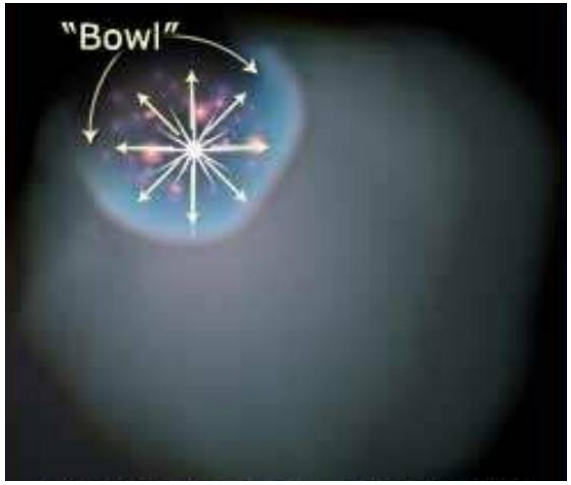


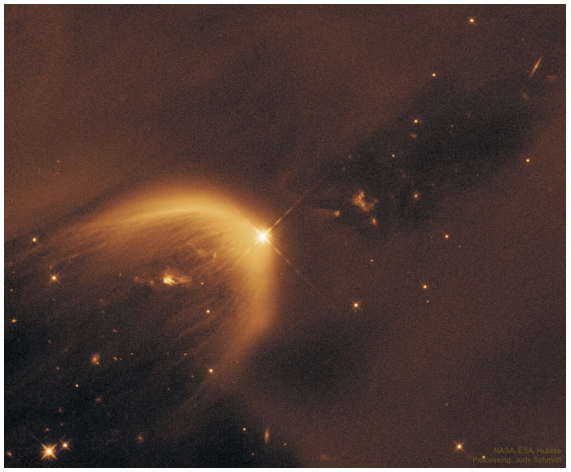
- Weitere Bezeichnung: CNO-Zyklus
- Dominierender Prozess bei Sternen mit hohen Kerntemperaturen

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

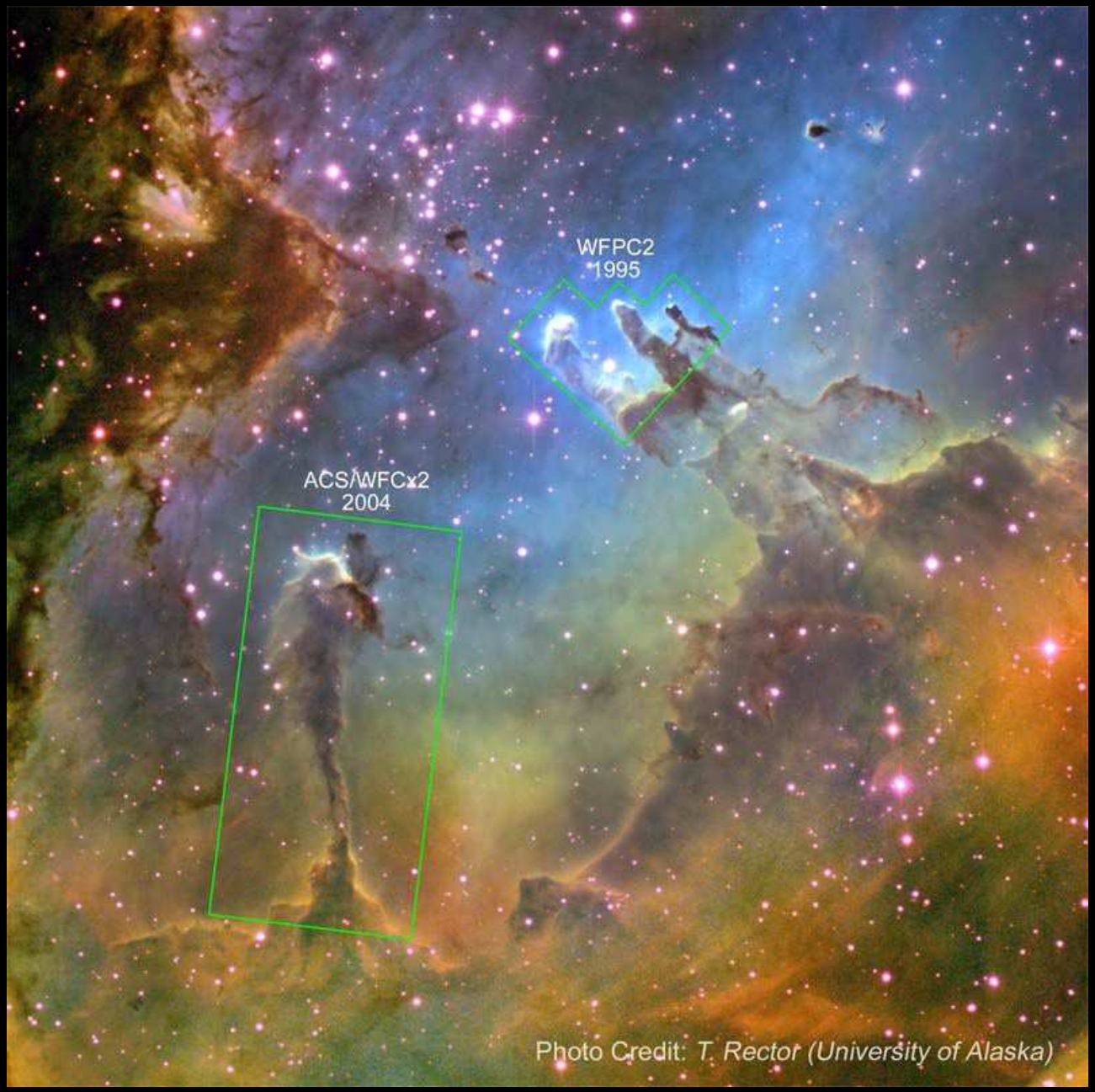
Junger Stern

- 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

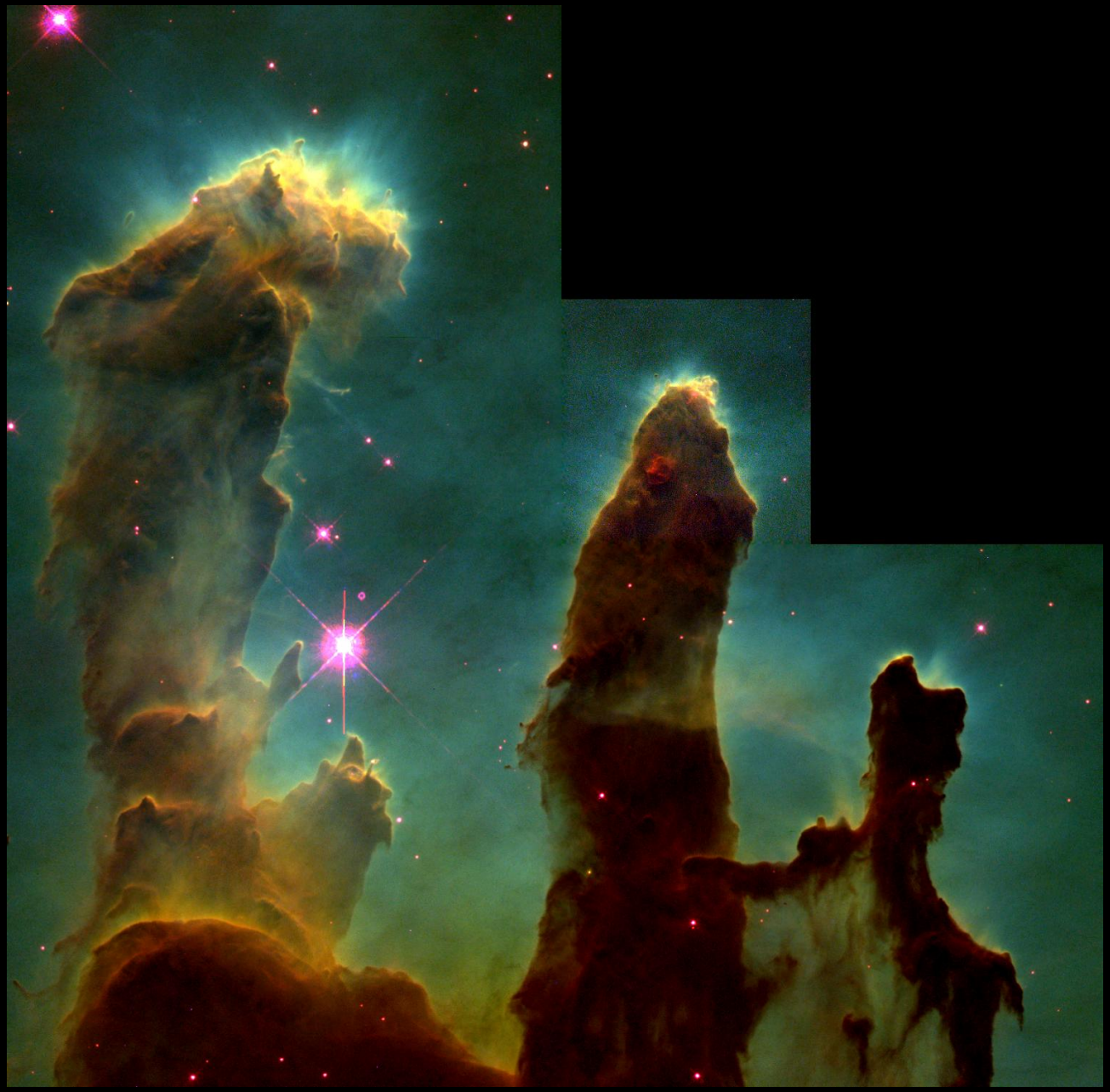




Schematische Darstellung / LDN 1471 in Perseus-Molekülwolke
[STScI / Hubble, NASA, ESA; Judy Schmidt]



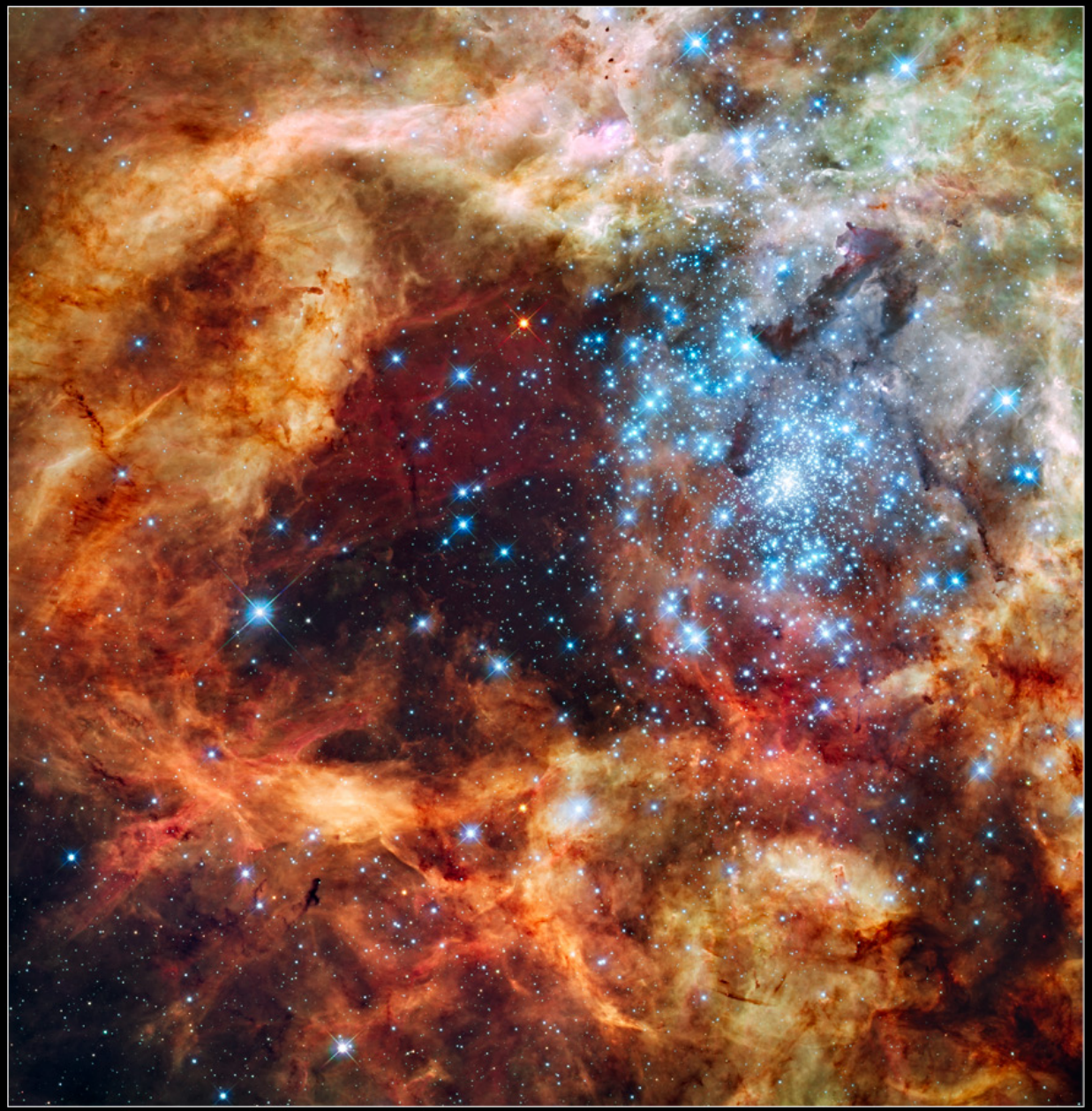
HST-Aufnahme des Adlernebels M16 [NASA]



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

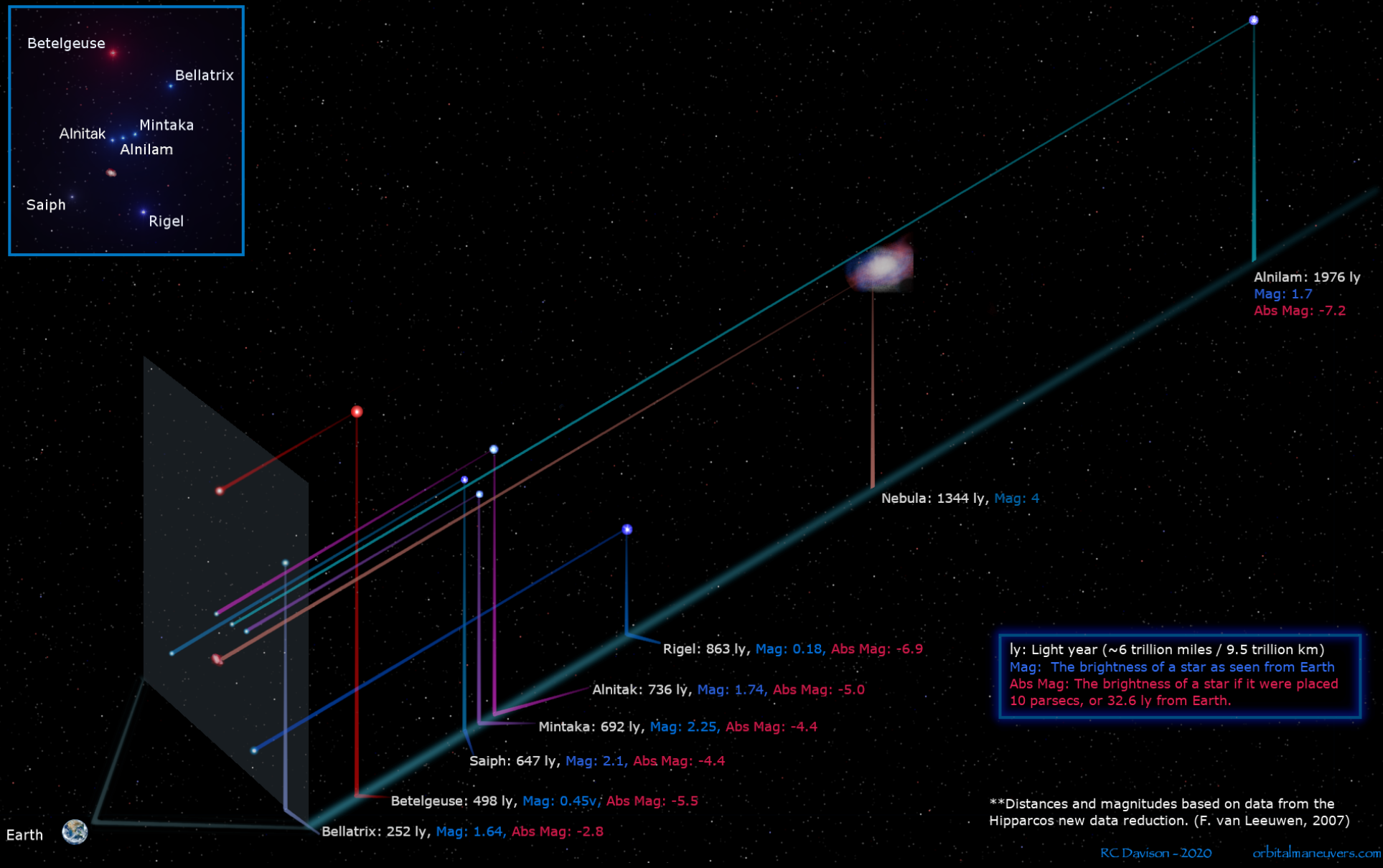
NGC 7822 [Hartmuth Kintzel (NAA)]

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): 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"
Betelgeuse
Bellatrix
Mintaka
Alnilam
Alnitak
Rigel
Saiph
Erde, München, 523m
FOV 24.9°
30.8 FPS
2009-11-17 02:12:45



Sternbild Orion [Ronald Davison]

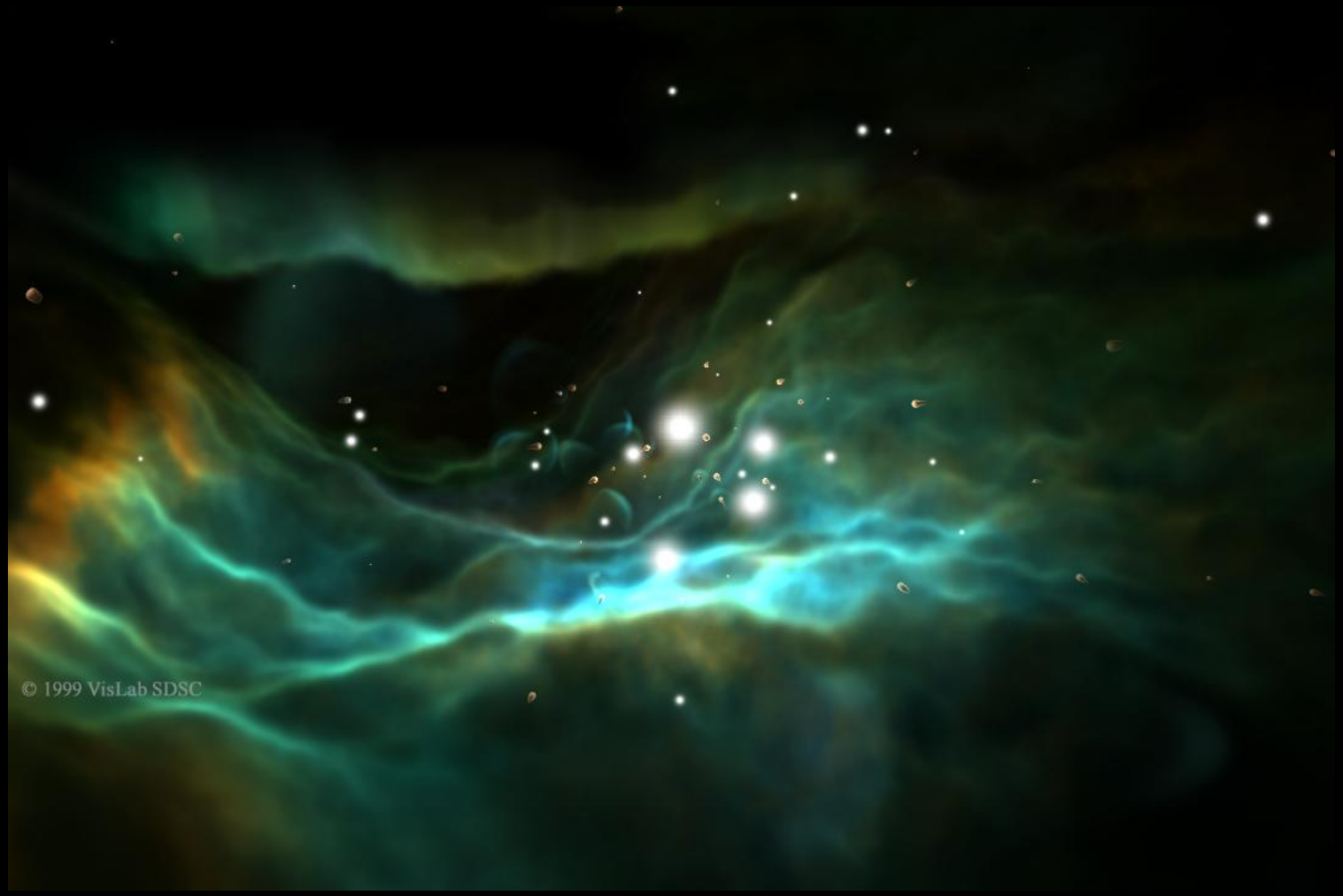
Orion-Molekülwolkenkomplex [Wikimedia/Rogelio Bernal Andreo]

HST-Aufnahme des Orionnebels M42 [NASA]

Ausschnitt des Orionnebels M42 [NASA]

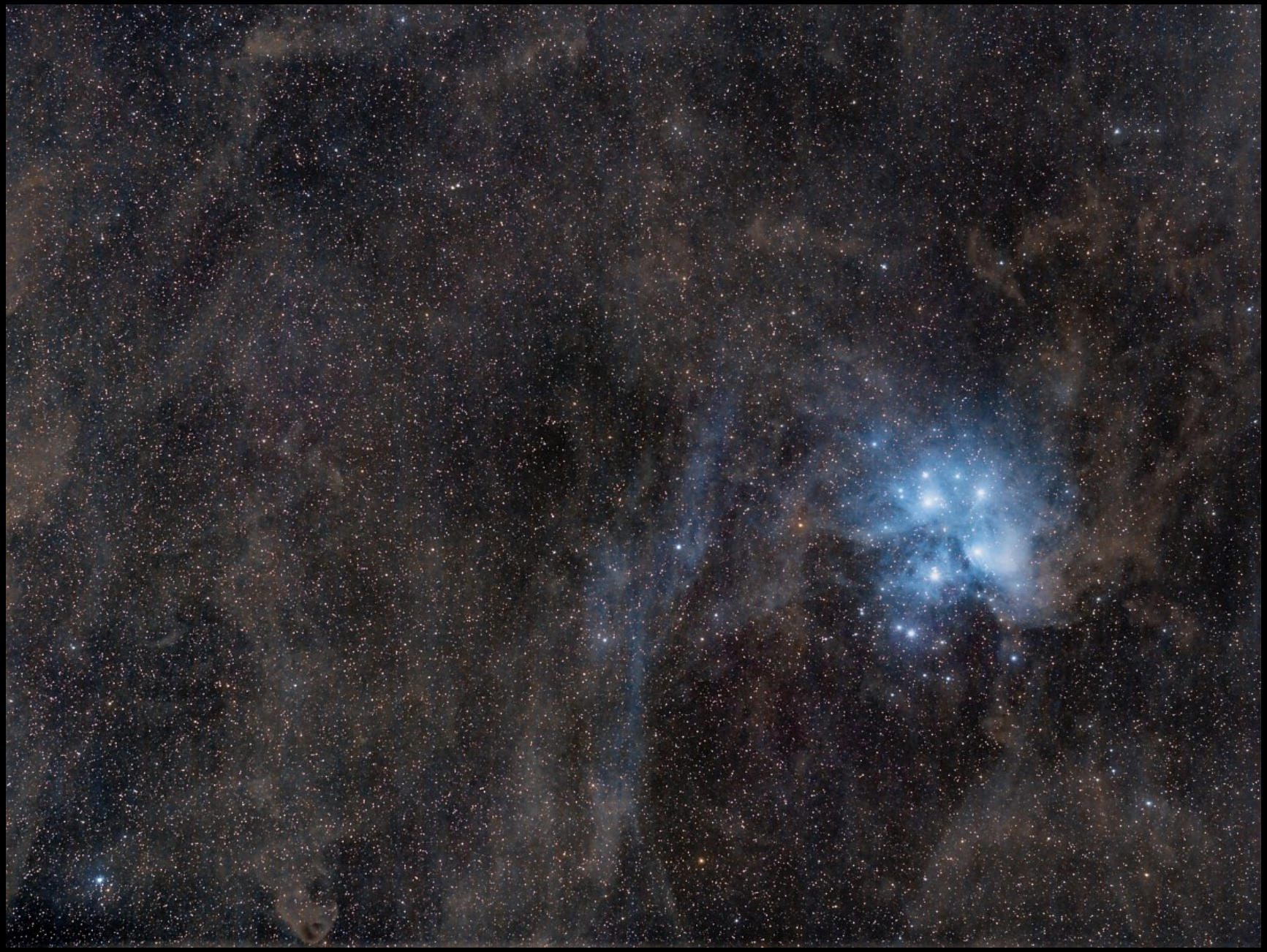
Video zum Orionnebel:

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



Sternentstehung im Orionnebel (Modellrechnung) [VisLab SDSC]

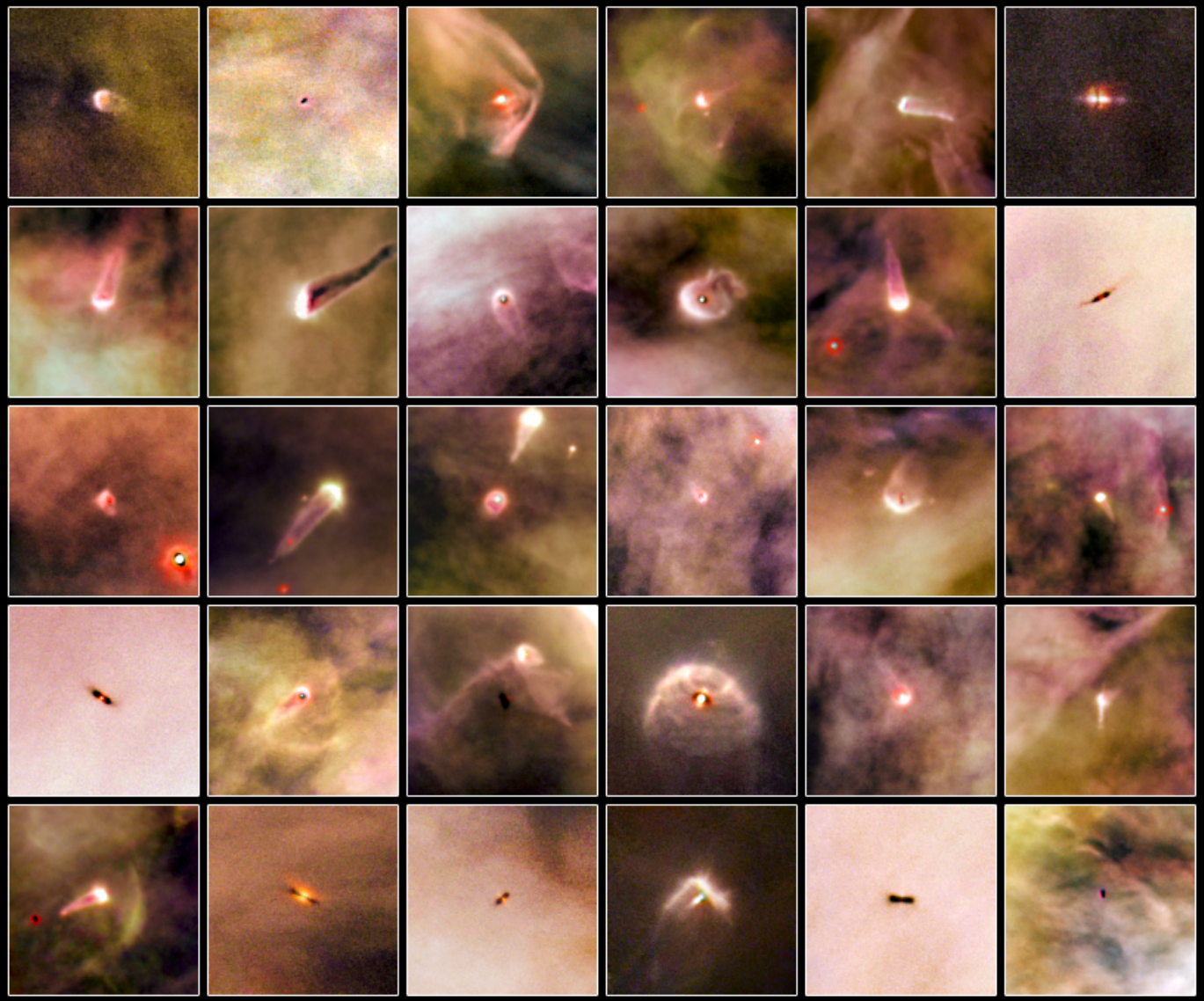
Der offene Sternhaufen M45 (Plejaden) [R. Sperber (NAA)]



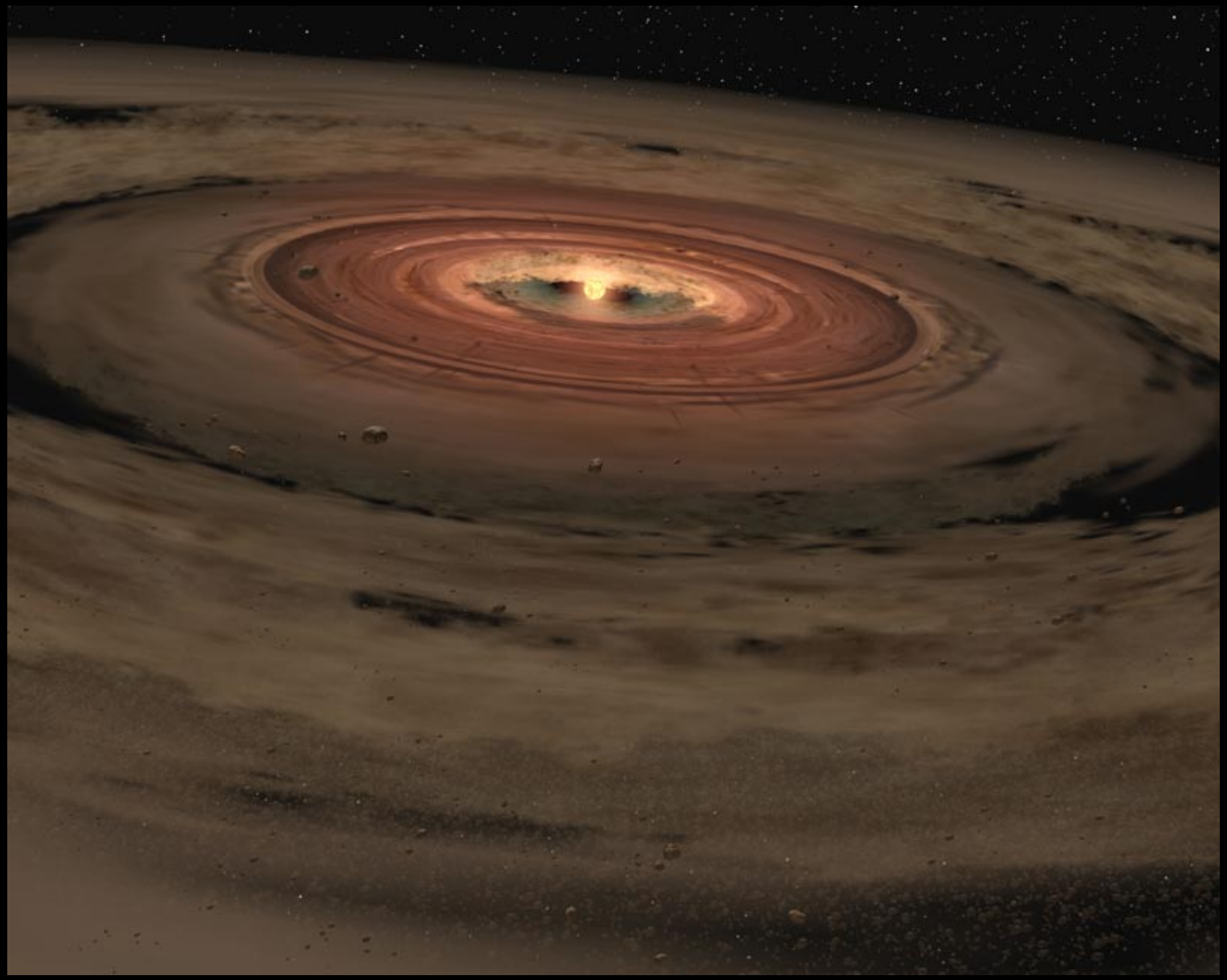
Der offene Sternhaufen M45 (Plejaden) [Hartmuth Kintzel (NAA)]

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

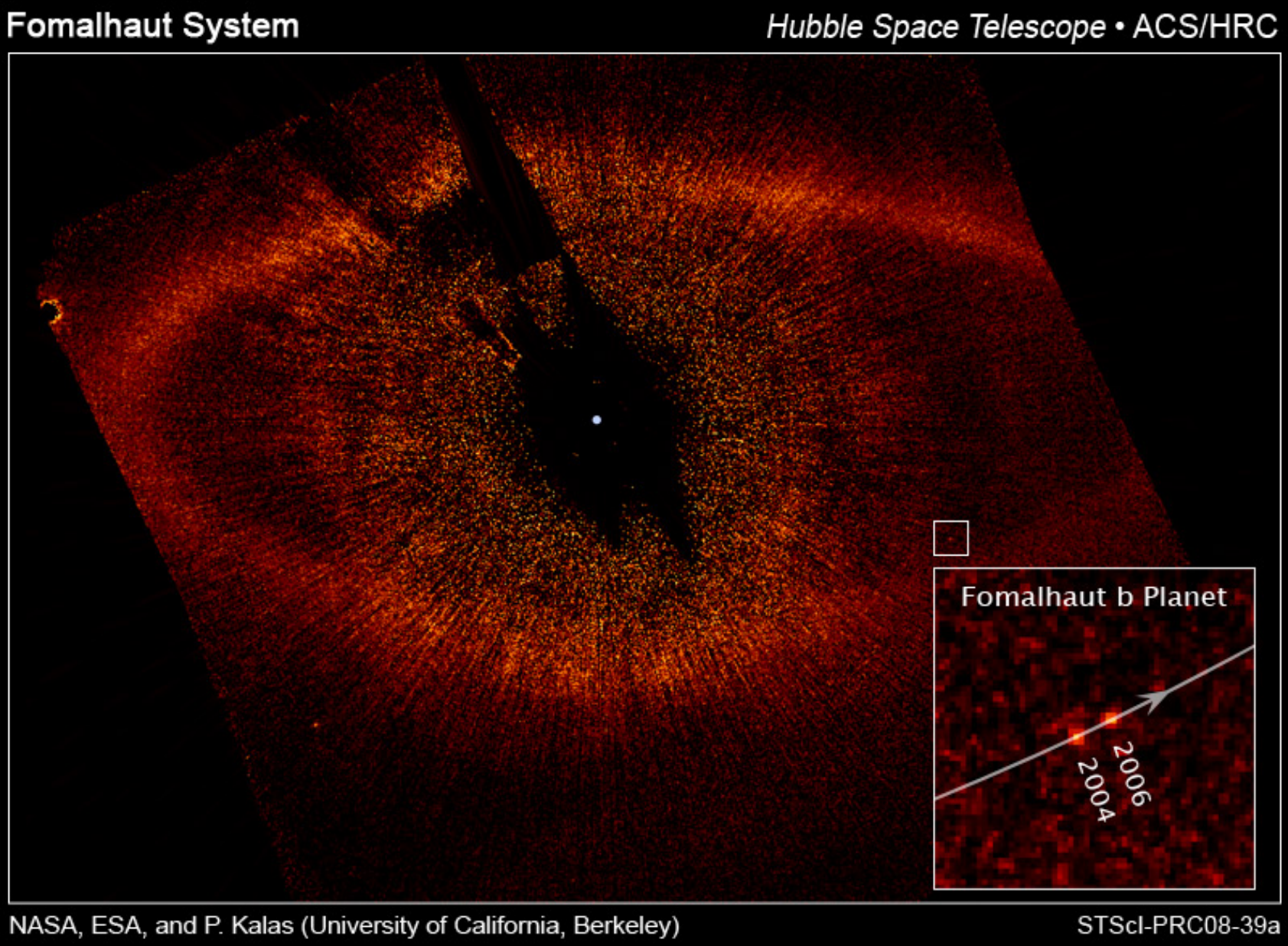
Protoplanetare Scheibe im Orionnebel [C.R. O'Dell/Rice University, and NASA]



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

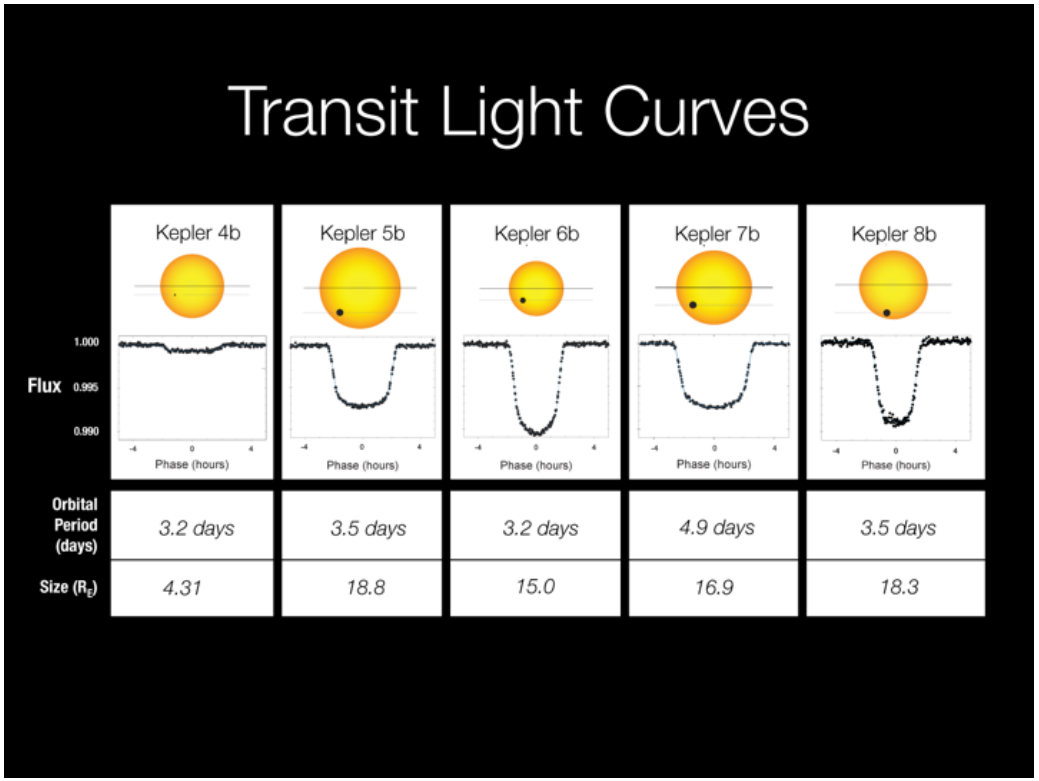


Planeten entstehen aus Staubscheiben um Sterne (Computergraphik) [NASA/JPL]



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

Extrasolare Planeten: Nachweis



[Bill Borucki, Jan 2010 AAS Presentation]

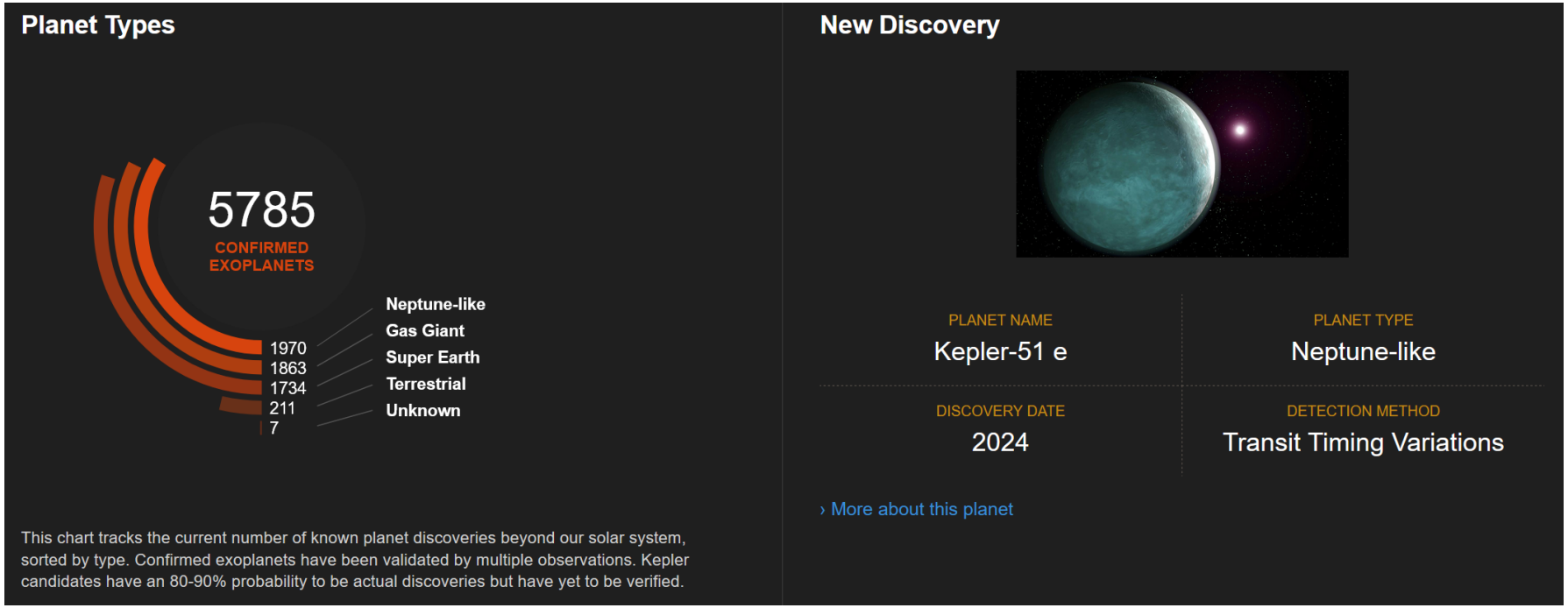
- Direkte Abbildung
- Radialgeschwindigkeits-methode
- Transitmethode
- Eigenbewegung
- Gravitationslinseneffekt
- Pulsar Timing

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

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

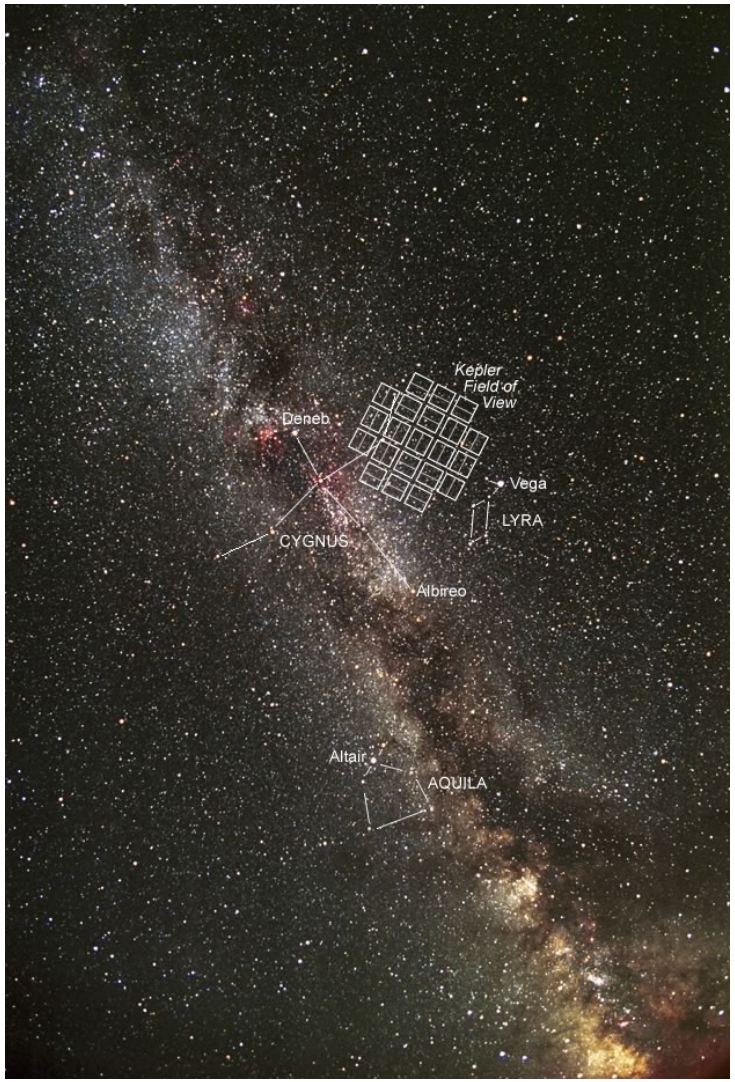
Extrasolare Planeten

5785 Exoplaneten (Stand 3. November 2024)



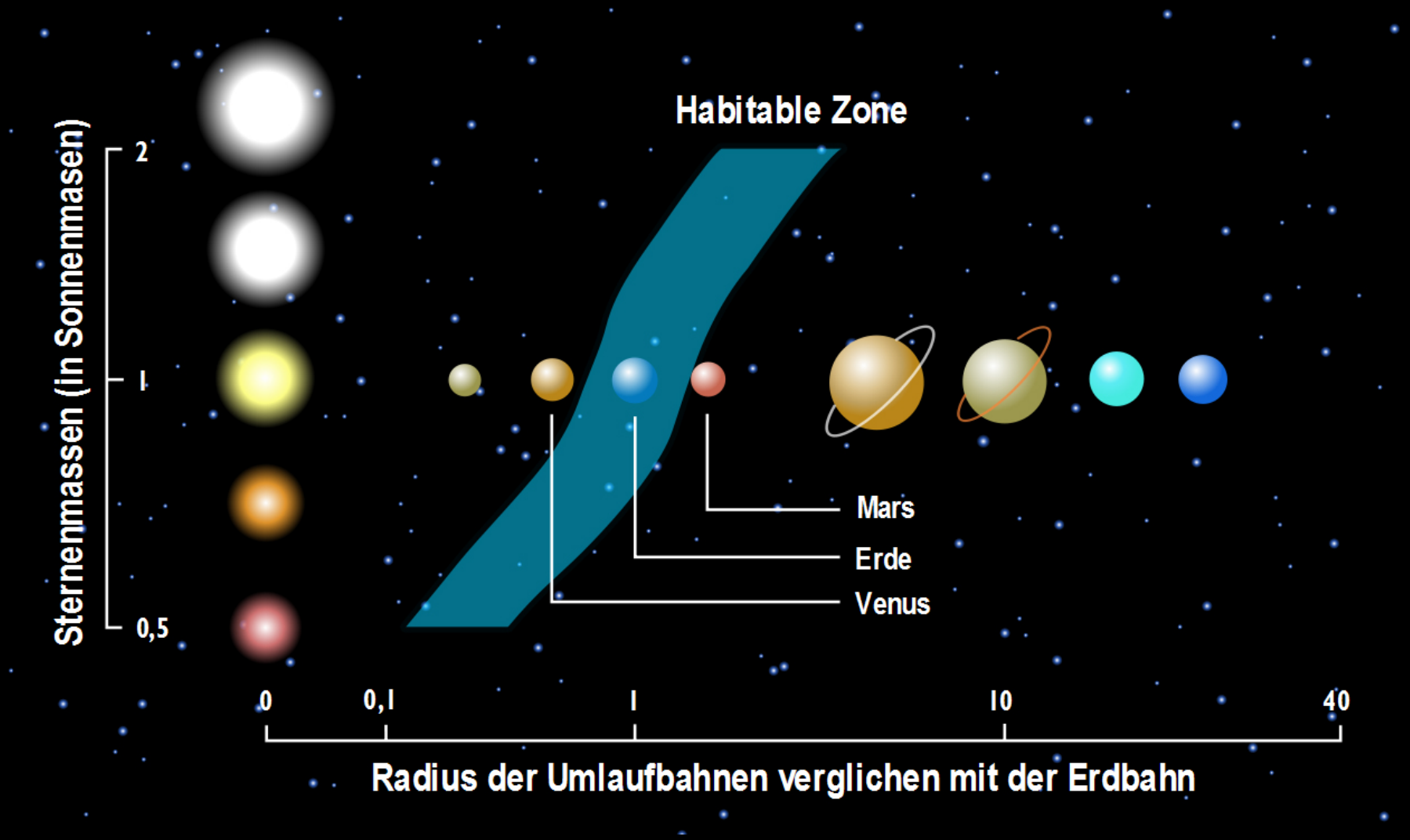
[https://exoplanets.nasa.gov/discovery/discoveries-dashboard/]

Weltraumteleskop Kepler



[Carter Roberts, NASA]

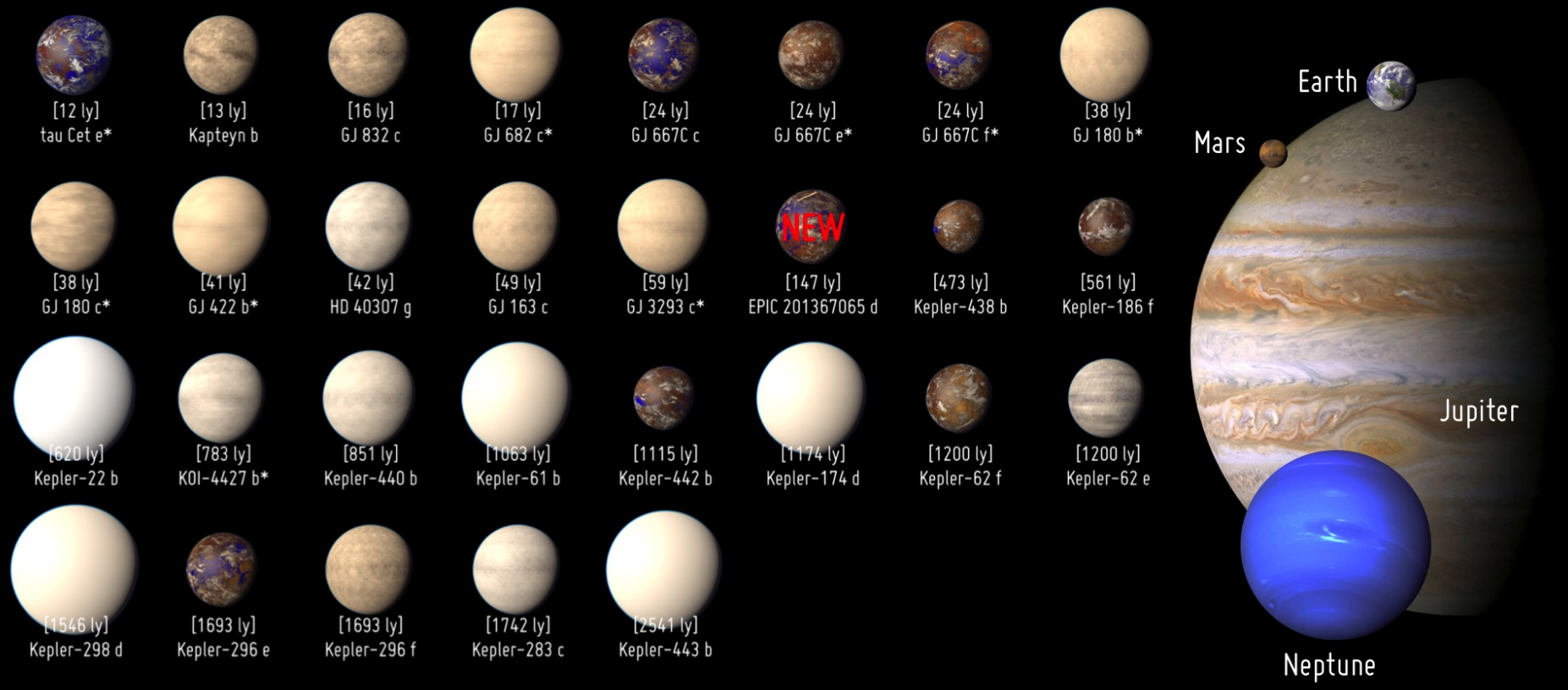
Habitable Zone



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

Potentially Habitable Exoplanets

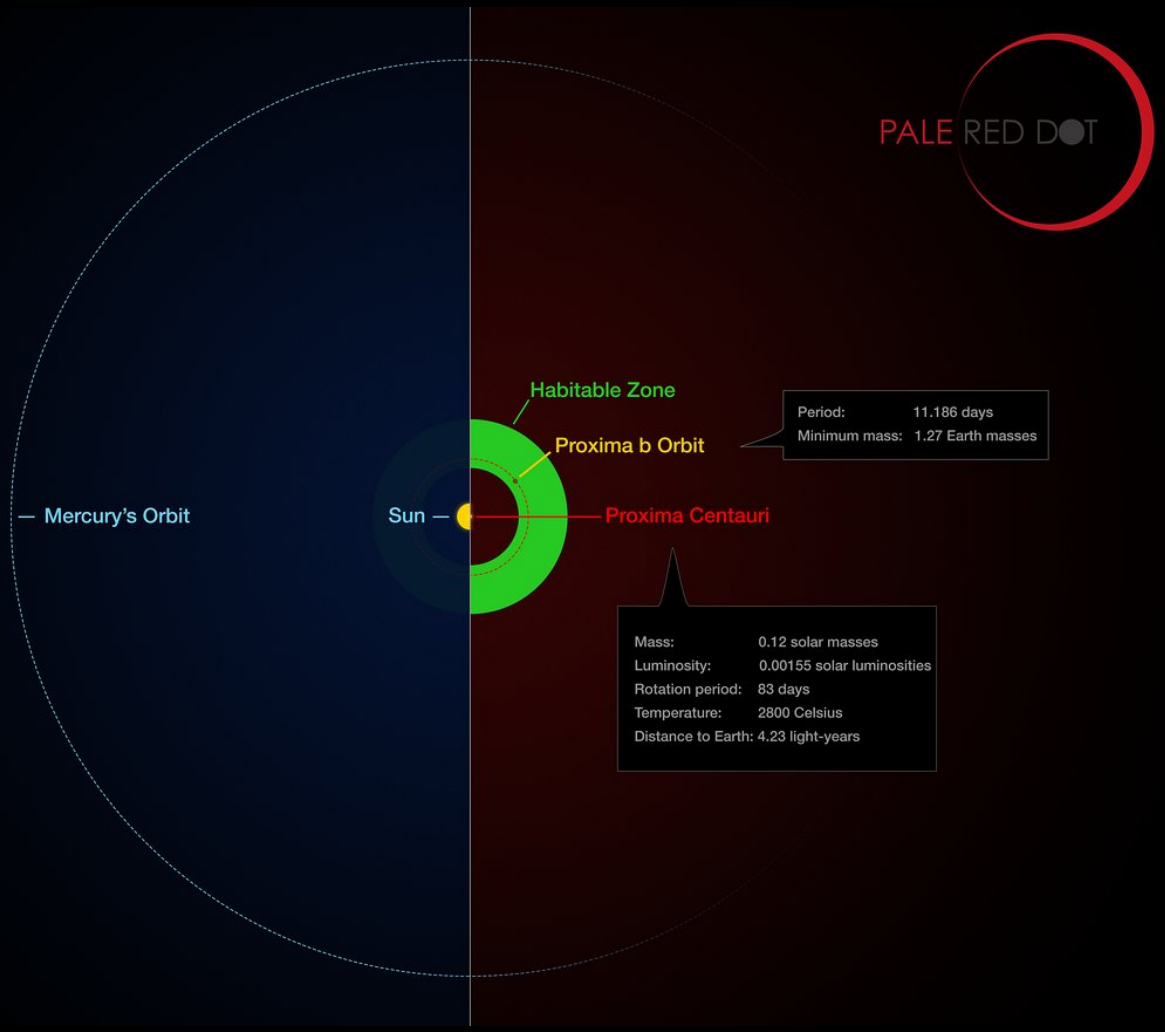
Ranked by Distance from Earth (light years)



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

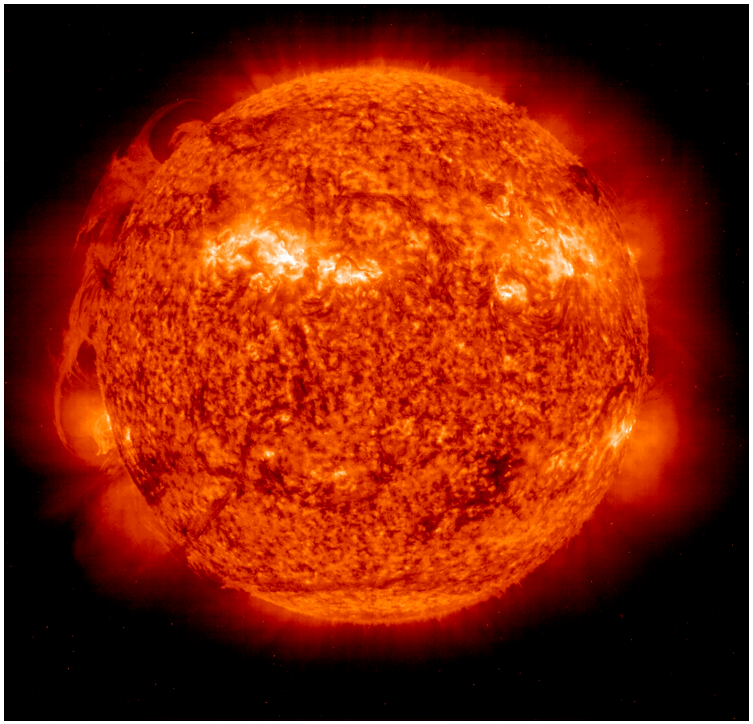
CREDIT: PHL @ UPR Arecibo (phl.upr.edu) January 16, 2015

Proxima Centauri



[ESO/M. Kornmesser/G. Coleman]

Nächste Woche:



Sternaufbau, Sternentwicklung, Endstadien