

The most incomprehensible thing about the universe is that it is comprehensible. (Albert Einstein)



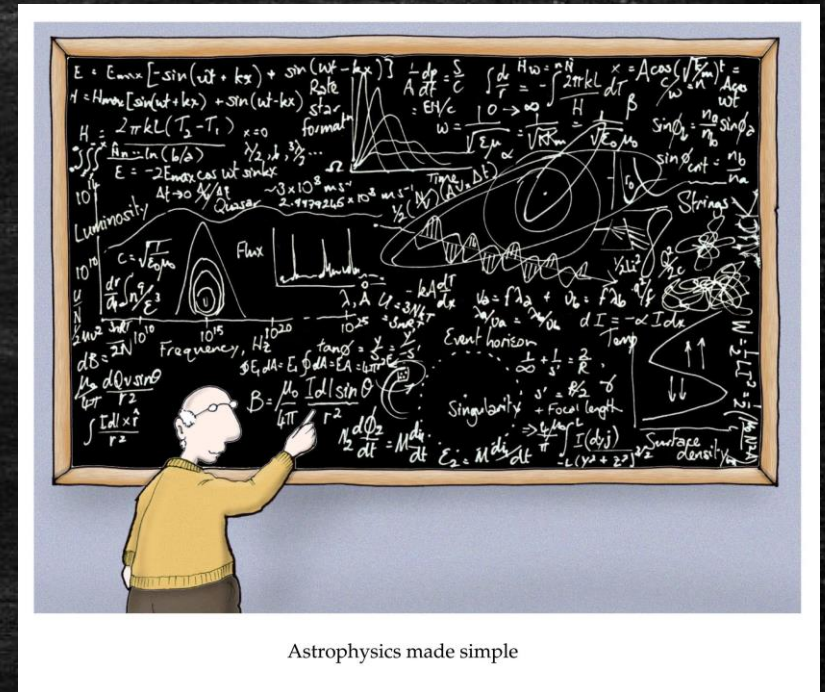
Astrophysik für Einsteiger

Österreichischer Astronomischer Verein

Christian Maurer, 25. 3. 2022

Agenda

- Vom Urknall bis in die Gegenwart
- Entstehung, Aufbau, Evolution und Zustandsgrößen von Sternen
- Astrospektroskopie
- Hertzsprung-Russell-Diagramm
- Galaxien
- Zukunft des Universums



(Quelle: <https://www.pinterest.com/pin/476466835547498666/>)

Womit beschäftigt sich Astrophysik?

- Teilgebiet der Astronomie und Kosmologie
- Anwendung der Gesetze der Physik und Chemie zur Erklärung von Himmelskörpern und des Universums
- Definition der Kepler'schen Gesetze wird als Beginn der Verbindung von Astronomie und Physik erachtet
- Weitere Meilensteine:
 - 1838: Entfernungsmessung von 61 Cygni mittels trigonometrischer Bestimmung der Sternparallaxe durch Friedrich Wilhelm Bessel
 - 1859: Sternfotometrie und Spektralanalyse durch Gottfried Robert Kirchhoff und Robert Wilhelm Bunsen und Deutung der Fraunhofer'schen Spektrallinien

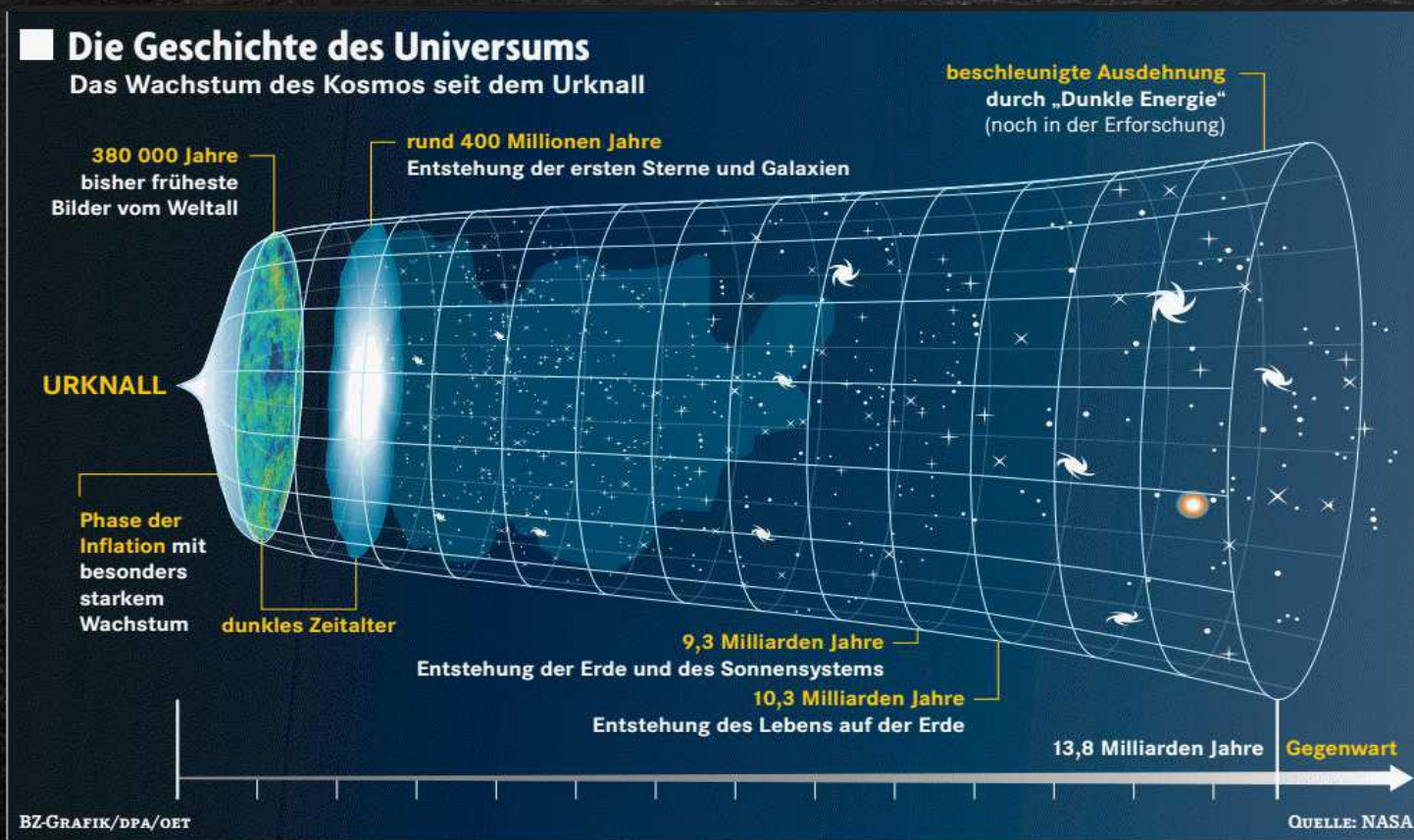
Quelle: <https://de.wikipedia.org/wiki/Astrophysik>

Teilgebiete der Astrophysik

- Physikalische Kosmologie
- Entstehung und Evolution von Sternen / Sonnenphysik
- Astroteilchenphysik
- Kosmochemie und Nukleosynthese
- Entstehung und Entwicklung von Galaxien
- Schwarze Löcher und Neutronensterne
- Entstehung und Evolution von Planetensystemen
- Methoden der Beobachtung (Spektralanalyse, Fotometrie usw.) und deren Weiterentwicklung

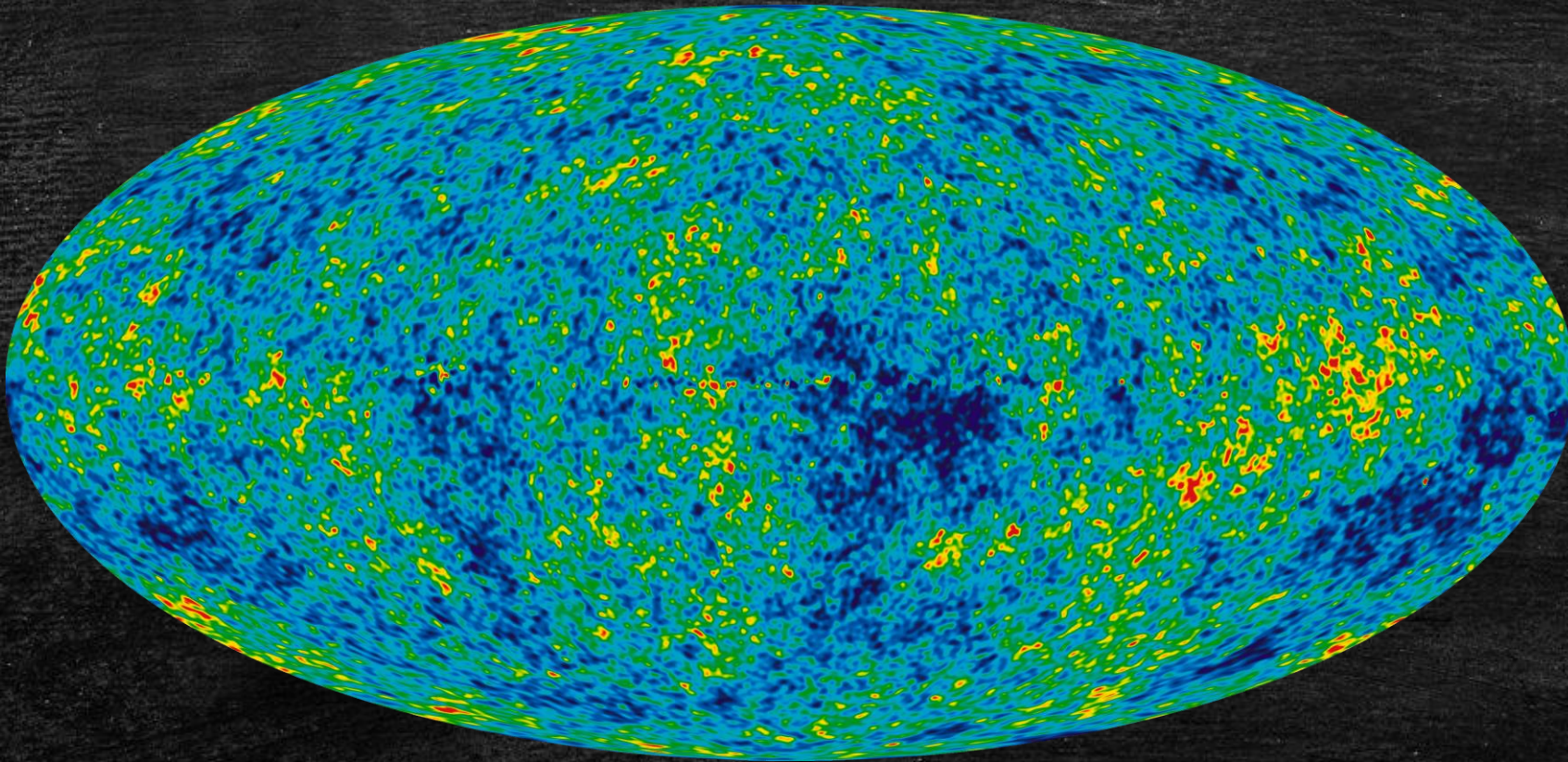
Quelle: <https://de.wikipedia.org/wiki/Astrophysik>

Vom Urknall bis in die Gegenwart



- 10^{-43} Sek ABB: Planck-Ära, Quantenschaum, Größe = 10^{-35} Meter, Temp. = 10^{32} Kelvin
- 10^{-35} bis 10^{-32} Sek ABB: Inflation mit Überlichtgeschwindigkeit um den Faktor 10^{30} bis 10^{50}
- 10^{-12} bis 1 Sek ABB: Elementarteilchen und die 4 Grundkräfte entstehen
- 1 - 3 Sek ABB: Entkoppelung der Neutrinos, Neutronen entstehen
- 1-3 Min. ABB: Primordiale Nukleosynthese, erste Atomkerne (H, He, Li)
- 300,000 – 380,000 Jahre ABB: Rekombinationsphase → stabile Atome entstehen; Universum wird transparent
- Universum heute: 73,3% H, 25% He, 1,7% Metalle, Temp. = 2,725 Kelvin

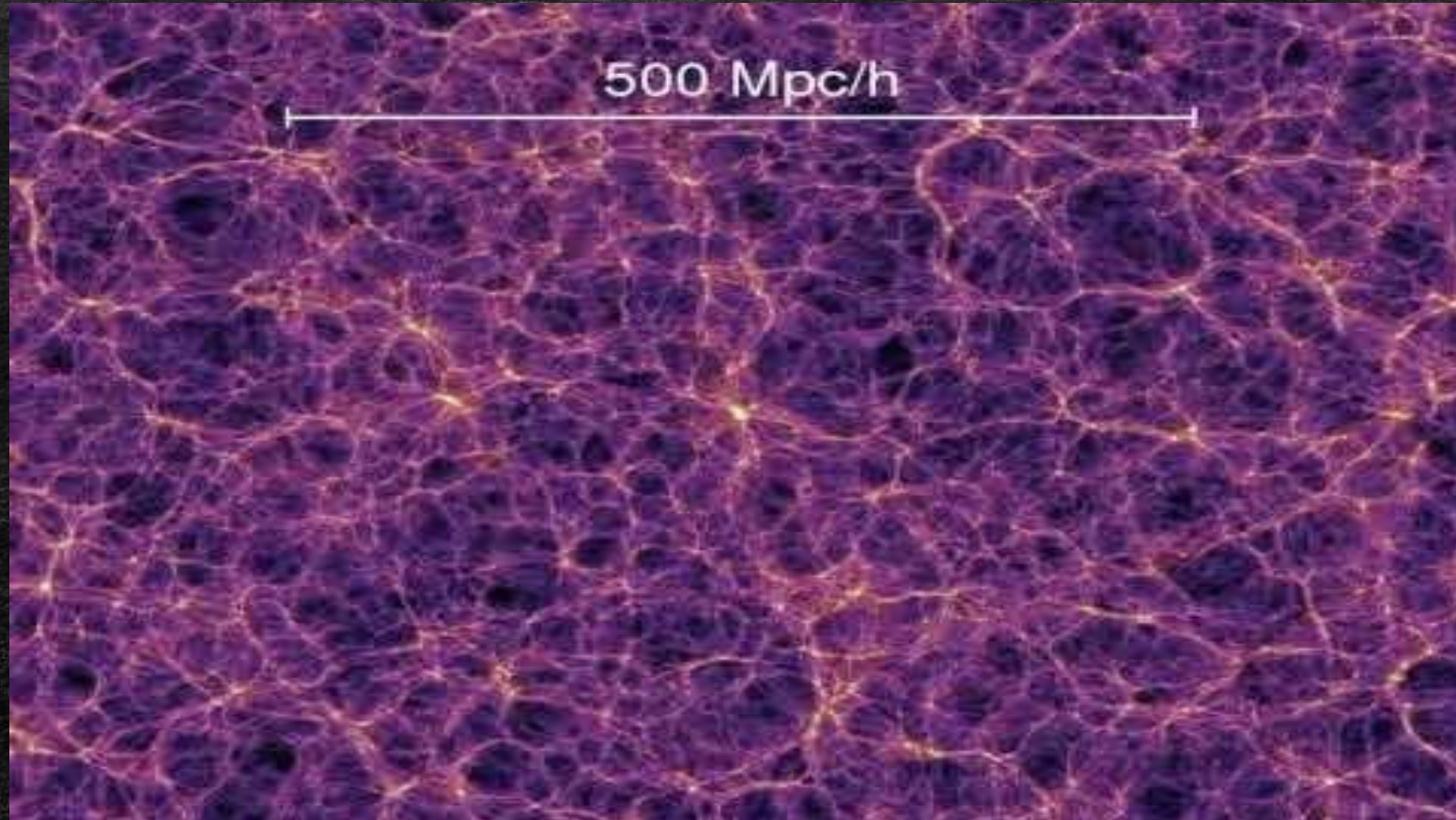
Kosmische Hintergrundstrahlung (CMB)



CMB = 2,725 Kelvin

Quelle: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Ilc_9yr_moll4096.png

Strukturbildung im Universum

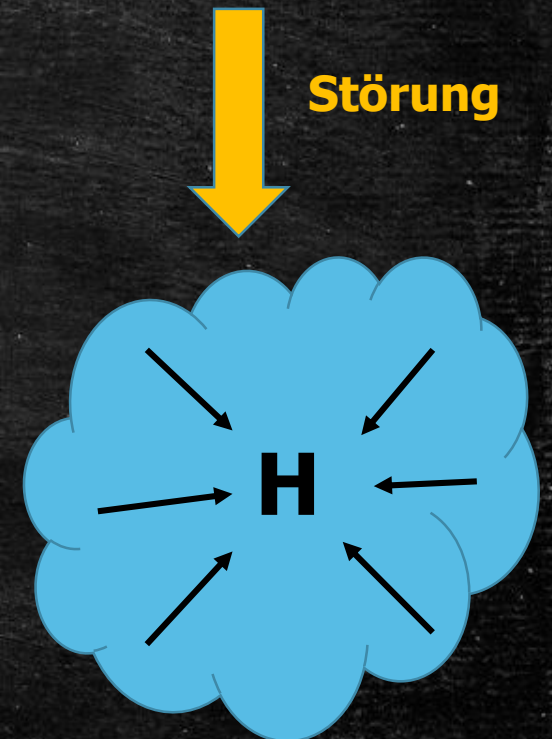


Kosmologisches Prinzip

- Das Universum ist homogen und isotrop
- Materie und Strahlung sind gleichmäßig verteilt
- Das Universum hat einen Anfang
- Das Universum hat keinen Mittelpunkt
- Das Universum dehnt sich kontinuierlich weiter aus (Olber's Paradoxon, Hubble-Lemaitre-Gesetz)
- Überall im (uns bekannten) Universum gelten die gleichen physikalischen Gesetze

A Star is born

- Sterne entstehen durch Kollaps einer kalten Molekül-Wolke
- Kollaps meist durch externe Ereignisse, z.B. Supernovae
- Der nach außen wirkende Gasdruck muss kleiner sein als der nach innen wirkende Gravitationsdruck
- Masse der komprimierten Gaswolke $> 0,07$ Sonnenmassen \rightarrow Kernfusion ($H \rightarrow He$)
- Masse der komprimierten Gaswolke $< 0,07$ Sonnenmassen \rightarrow Brauner Zwerg (${}^2H \rightarrow He$)
- Kinetische Energie der Gasteilchen durch Kernfusion \rightarrow erzeugt im Stern Strahlungsdruck, welcher der Gravitation entgegenwirkt
- Sterne bilden in der Regel Mehrfachsysteme mit komplexen Bahnformen



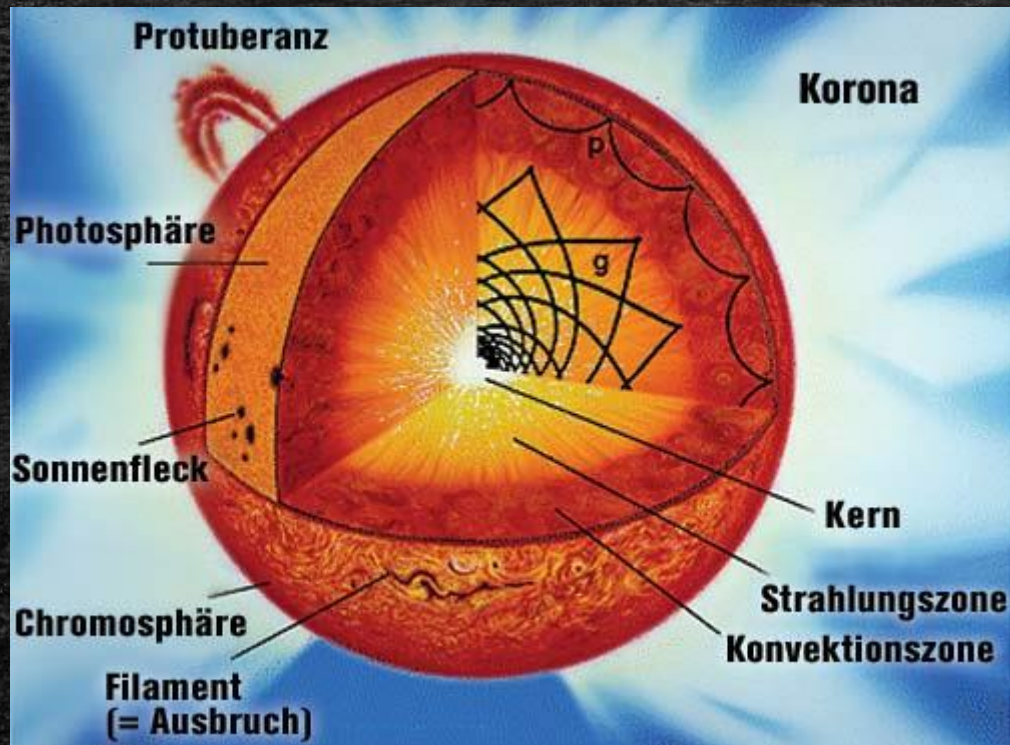
Orion-Nebel – eine Sternfabrik



Foto: Christian Maurer

- 1350 Lj. entfernt
- Ausdehnung 30 Lj.
- Teilgebiet einer interstellaren Molekülwolke
- Emissionsnebel
- Besteht v. a. aus Wasserstoff
- Ionisierende Strahlung entstehender Sterne bringt den H zum Leuchten
- Enthält protostellare Staubscheiben

Aufbau eines Sterns



- Gaskugel im hydrostatischen Gleichgewicht
- Kern: Fusion $H \rightarrow He$
- Gasdruck und Strahlungsdruck wirken der Gravitation entgegen
- Energietransport:
 - Strahlung
 - Konvektion
- Magnetfeld

Quelle: <https://www.br-online.de/wissen-bildung/spacenight/sterngucker/deepsky/sonnendiagramm-gr.html>

Entstehung von Planetensystemen



Quelle: NASA, <https://www.youtube.com/watch?v=UNPj7e6XJCQ>

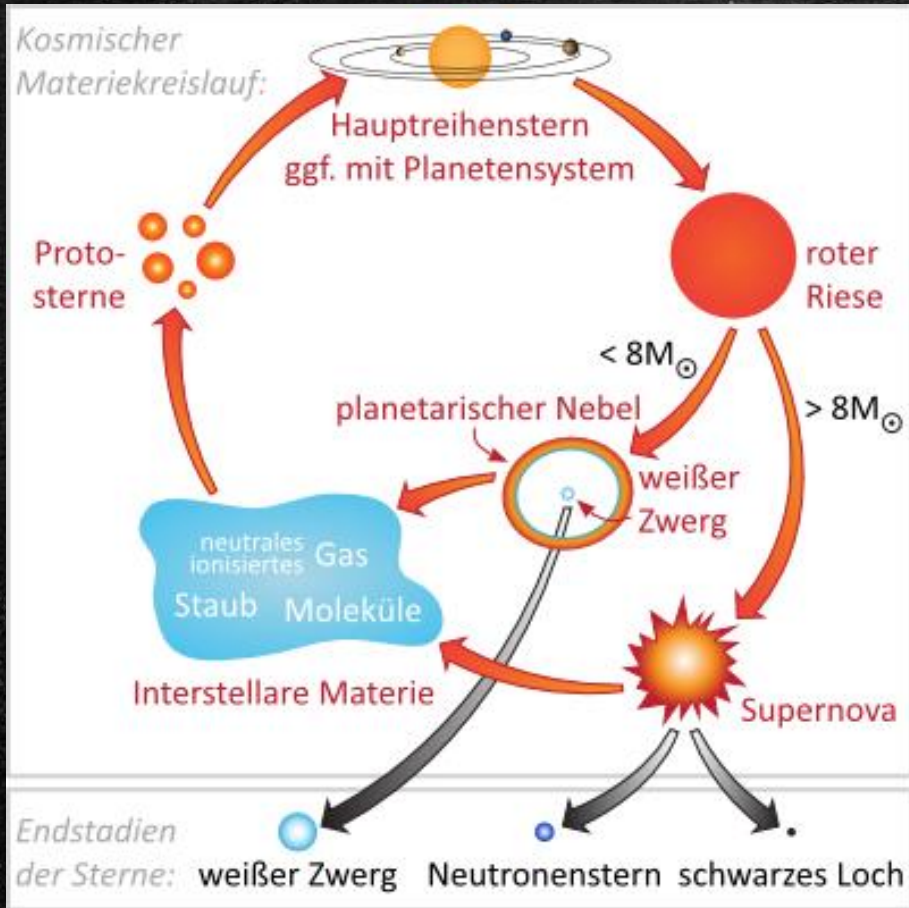
2 Prozesse:

- Koagulation
- Agglomeration
- Aus Planetesimalen entstehen größere, massereichere Objekte → höhere Koagulationsrate



Quelle:
<https://almascience.eso.org/almascience/planet-forming-disks>

Evolution der Sterne



Ausgangsmasse	Massenabstoßung	Restmasse	Endstadium
$0,75 \leq m \leq 8 \cdot m_{\odot}$	Planetarischer Nebel	$m < 1,4 \cdot m_{\odot}$	Weißer Zwerg
$8 \cdot m_{\odot} < m < 25 \cdot m_{\odot}$	Supernova	$1,4 \cdot m_{\odot} < m < 3 \cdot m_{\odot}$	Neutronenstern
$m > 25 \cdot m_{\odot}$	Supernova	$> 3 \cdot m_{\odot}$	Schwarzes Loch

Beispiele:

- Weißer Zwerg: Sirius B
- Neutronenstern: RX J1856-3754 in Corona Australis, Durchmesser 11km, 1,5 Sonnenmassen
- Schwarzes Loch im Zentrum von M87 mit 6,5 Milliarden Sonnenmassen

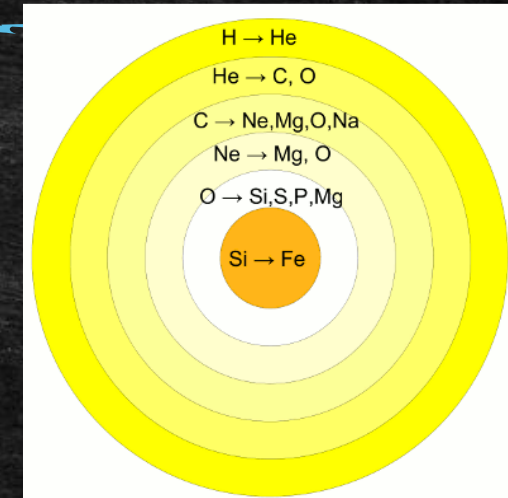


(Quelle: <https://lp.uni-goettingen.de/get/text/7181>)

Rote Riesen Stadium

- Entwicklungszeit = stabile Phase eines Sterns → hydrostatisches Gleichgewicht (Gravitationsdruck, Strahlungsdruck, Zentrifugalkraft)
- Kein H mehr im Kern → Kernfusion erlischt → kein Strahlungsdruck mehr → Gravitationsdruck kontrahiert den He-Kern → Gravitationsenergie heizt Kern auf → bei 600 Mio °C fusioniert He zu C → Stern bläht sich auf
- Bei massereichen Sternen mehrmaliger Kreislauf Kontraktion → Aufheizung → Zündung Kernfusion → Erlöschen Kernfusion → Kontraktion → ... : H-, He-, C-, Ne-, O-, Si-Brennen
- Gravitationsdruck und Energieabstrahlung aus dem Kern heizen äußere Sternmaterie auf. Innerhalb der Sternhülle setzt Fusion von H zu He ein (= Schalenbrennen)
- Zunehmender thermischer Druck von innen bläht Stern auf → Oberfläche kühlt ab → Stern wird zum Roten Riesen → Planetarischer Nebel / Supernova
- Masse des Sterns im Roten-Riesen-Stadium bestimmt weitere Entwicklung

Schalenbrennen



M27 - Vulpecula



Fotos: Christian Maurer

Auf die Masse kommt es an

- Je massereicher ein Stern, desto kürzer ist seine Lebensdauer
- Sterne zwischen 0,08 aber weniger als 0,5 Sonnenmassen verbrennen H zu He; können kein He zünden
- Sterne mit 0,5-8 Sonnenmassen verbrennen zuerst H und danach He; können keinen C zünden
- Sterne mit mehr als 8 aber weniger als 50 Sonnenmassen verbrennen C zu Si und danach Si zu Fe
- Sterne mit mehr als 50 Sonnenmassen → instabil und explodieren bevor Si-Brennen beginnt

Zustandsgrößen von Sternen

- Masse
- Leuchtkraft (scheinbare vs. absolute Helligkeit)
- Radius
- Mittlere Dichte und Schwerebeschleunigung
- Oberflächentemperatur
- Spektralklasse bzw. Leuchtkraftklasse
- Rotationsgeschwindigkeit an der Sternoberfläche
- Magnetfeld
- Chemische Zusammensetzung



<https://www.leifiphysik.de/astronomie/sonne/grundwissen/solarkonstante-und-strahlungsleistung>

Leuchtkraft der Sonne
 $L_{\odot} = 3,826 \times 10^{26} \text{ W}$

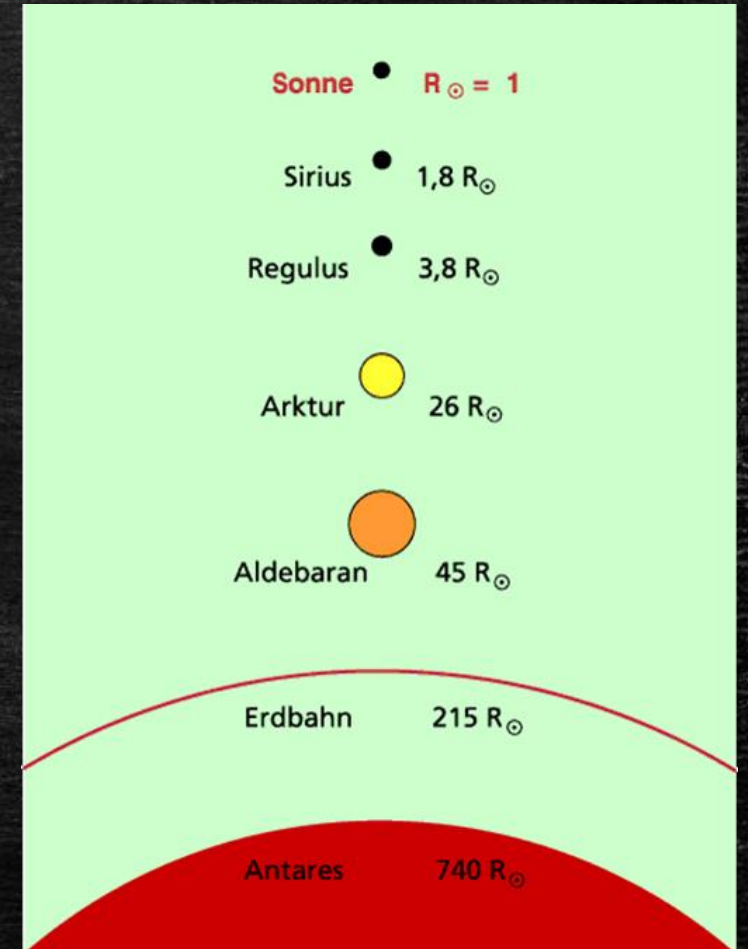
Strahlungsintensität der Sonne =
Solarkonstante = $1,368 \text{ kW/m}^2$

Masse-Leuchtkraft Beziehung

- Leuchtkraft eines Sternes hängt von seiner Masse ab: große Masse → hohe Energieproduktion → hohe Kerntemperatur → kurze Lebensdauer
- Leuchtkraft eines Sternes als Vielfaches der Leuchtkraft der Sonne ($L_{\odot} = 3,826 \times 10^{26} \text{ W}$)
- Mittlere Hauptreihensterne: $L \sim M^{3,5}$ / Sterne $< 0,43 M_{\odot}$: $L \sim M^{2,3}$ / Sterne $> 0,43 M_{\odot}$: $L \sim M^4$
- Relative Leuchtkraft $L^* = L / L_{\odot}$; z. B. Sirius: $L^*=20,9$, Atair: $L^*=8,3$, 61 Cygni: $L^*=0,096$, Betelgeuse: $L^*=10\ 000$

Masse-Radius Beziehung

- Bei einer bestimmten Temperatur hängt die Leuchtkraft eines Sterns nur noch von seinem Radius ab
- Je höher die Leuchtkraft bei einer bestimmten Temperatur ist, umso größer der Radius
- Radien der Hauptreihensterne: $0,1 - 10 R_{\odot}$
- Sterne bis $1 M_{\odot}$: $R \sim M^{0,9}$
- Sterne $> 1 M_{\odot}$: $R \sim M^{0,7}$

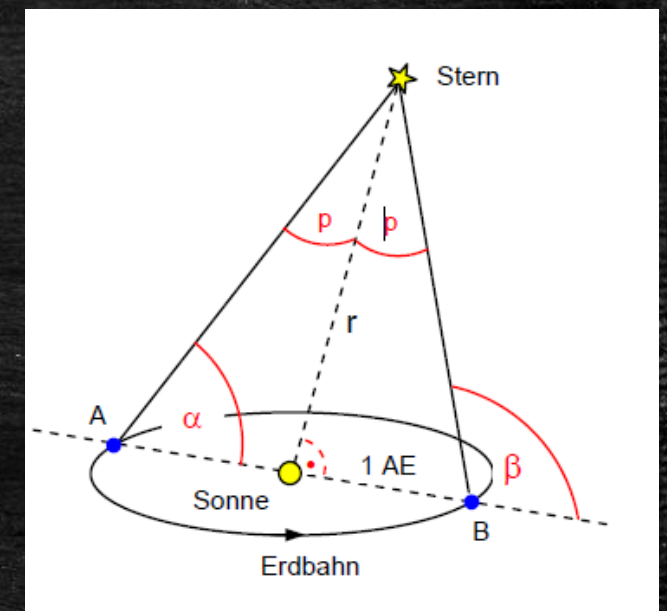


Entfernungsmessung

Methoden:

- Trigonometrische Parallaxenmessung
 - 1838 misst F. W. Bessel die Sternparallaxe von 61 Cygni mit $0,31''$
- Entfernungsmodul $m-M$
 - Kennt man die absolute Leuchtkraft eines Sternes, kann man aus der Helligkeit, mit der er von der Erde aus erscheint, seine Entfernung bestimmen
 - Problem: Bestimmung der absoluten Helligkeit eines Objekts oder Sterns
 - Lösung: Standardkerzen, z. B. Veränderliche Sterne, Supernovae SN Ia, Galaxien
- Perioden-Leuchtkraft-Beziehung:
 - bei Veränderlichen Sternen (z. B. Cepheiden, RR Lyrae, Mira) ist Helligkeitsperiode proportional zur Leuchtkraft → Bestimmung Periode → Bestimmung absolute Helligkeit → Bestimmung Entfernung
- Spektroskopie

Jährliche Parallaxe

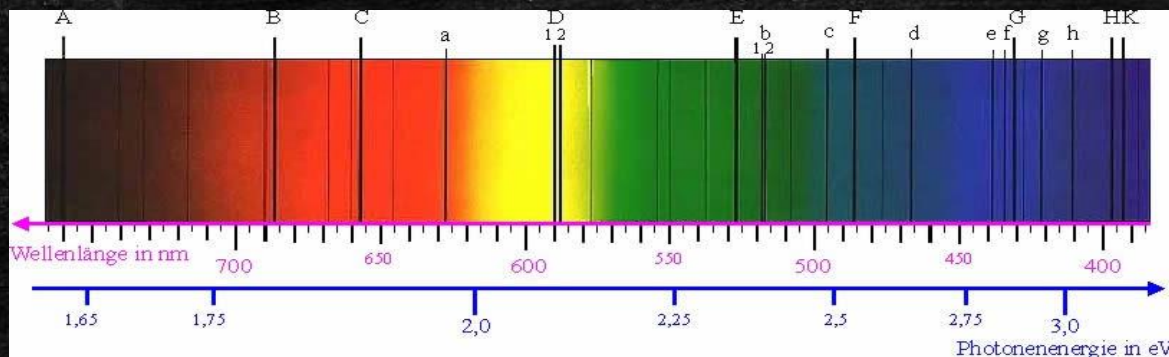


Quelle: Grundlagen der Astrophysik, 2009

<https://www.leifiphysik.de/astrophysik/fixsterne/grundwissen/jaehrliche-sternbewegung>

Spektroskopie

- Zerlegt man das Licht eines Sterns mittels eines optischen Gitters oder eines Prismas in die Spektralfarben erhält man ein Absorptionsspektrum mit schwarzen Linien
- 1814 entdeckte Joseph Fraunhofer in den Spektren der Sonne und von Fixsternen dunkle Linien
- G. R. Kirchhoff und R. W. Bunsen erkannten 1859, dass diese die chemischen Elemente der Sternatmosphäre anzeigen

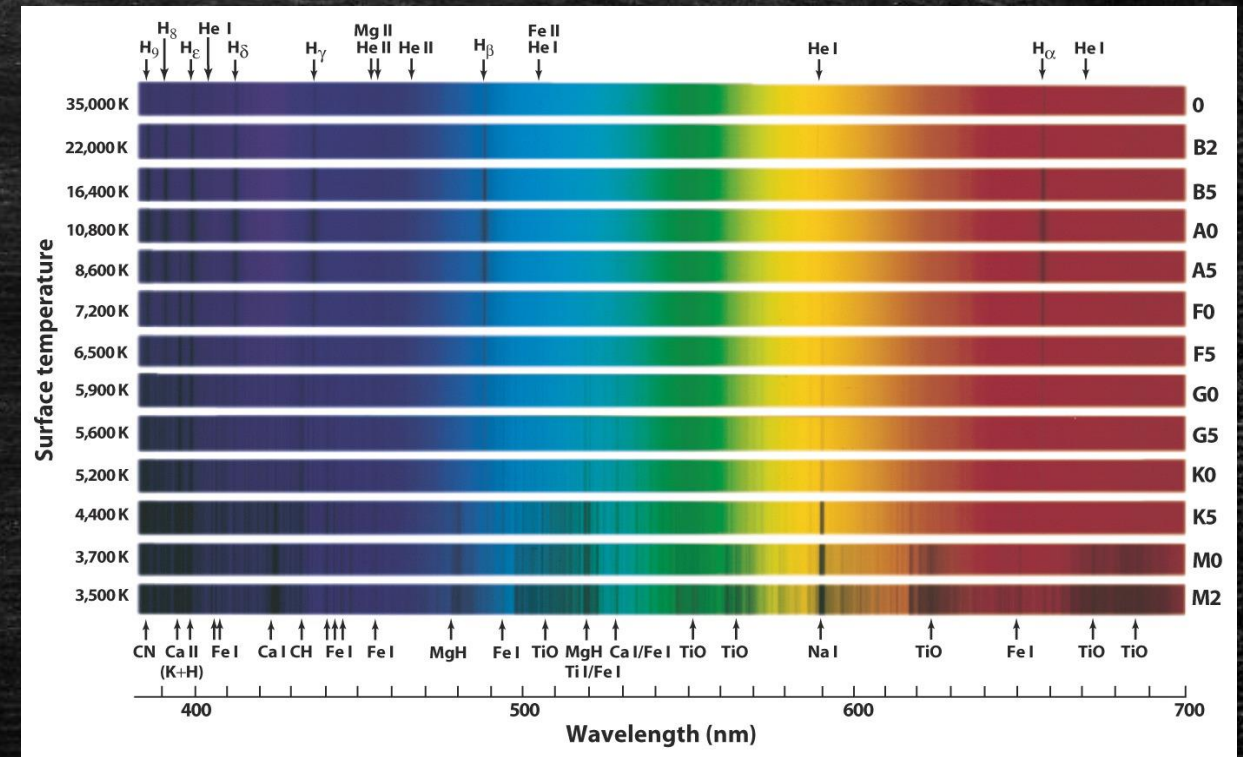


Bezeichnung	Ursache	λ [nm]
A	O ₂	760
B	O ₂	687
C	H	656
A	O ₂	628
D ₁	Na	590
D ₂	Na	589
E	Fe	527
b ₁	Mg	518
b ₂	Mg	517
c	Fe	496
F	H	486
d	Fe	467
e	Fe	438
f	H	434

(Quelle: <https://www.leifiphysik.de/atomphysik/atomarer-energieaustausch/geschichte/joseph-von-fraunhofer-1787-1826>)

Nutzen von Spektren

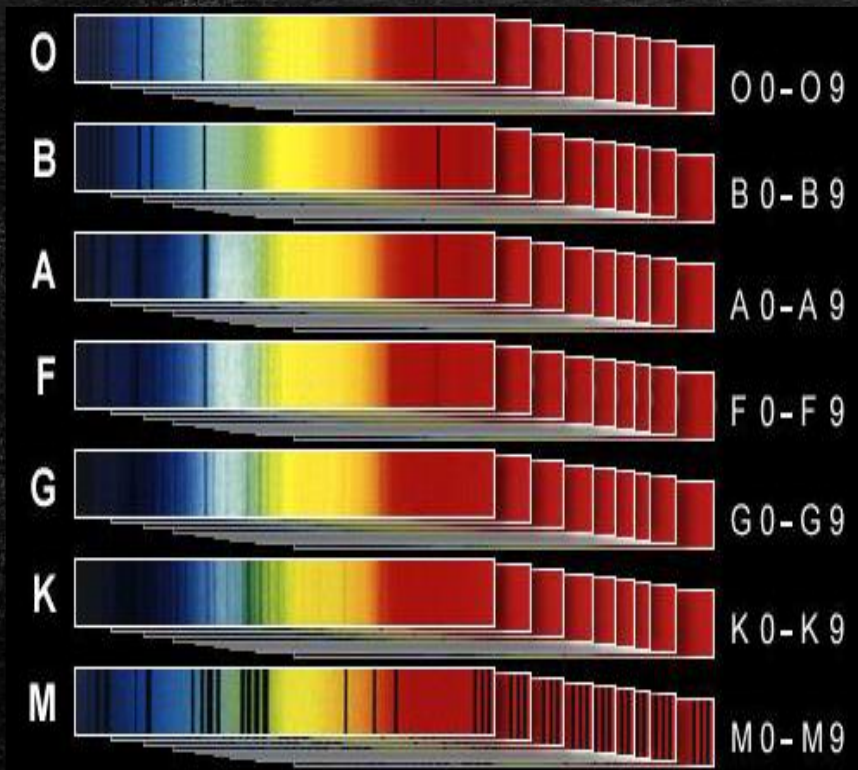
- Zuordnung eines Sterns zu einer Spektralklasse
- Chemische Elemente, aus denen ein Stern/Objekt besteht
- Temperatur des Sterns/Objekts
- Radialgeschwindigkeit aufgrund der Rot- bzw. Blauverschiebung – Dopplereffekt
- Rotationsgeschwindigkeit von Galaxien
- Bestimmung von Objekten, z. B. Galaxien zeigen Absorptionslinien, Nebel Emissionslinien



Quelle: <http://www.sirtf.nau.edu/~koerner/ast180/lectures/lec20.html>

Spektralklassen

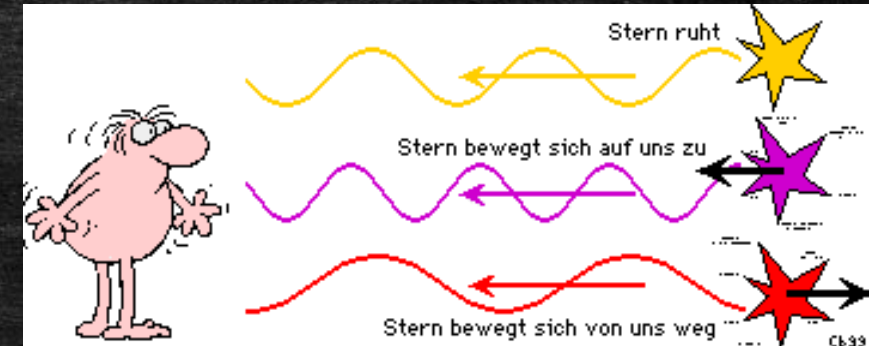
Sterne werden nach ihrer Farbe bzw. ihrer Oberflächentemperatur und dem Aussehen ihres Spektrums in Spektralklassen eingeteilt.



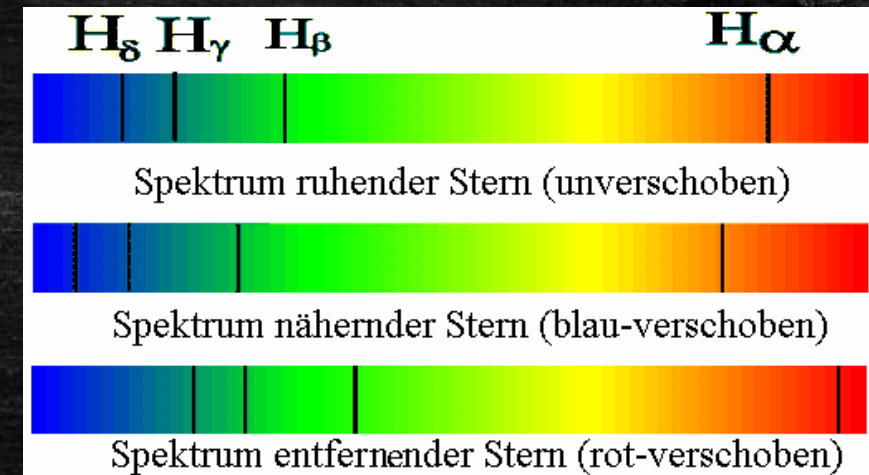
Spektralkl.	Temp. in 10^3 K	Farbe	Absorptionslinien
O	50-30	blau weiß	Ionisiertes He
B	25-15	bläulich weiß	H, neutrales He
A	12-8	weiß	Balmerlinien des H im Max., ionisiertes Fe und Ca
F	8-6	gelb weiß	Stark ausgeprägte Ca-Linien, Metalllinien
G	6-5	gelb	Starke Ca-Linien, schwache Balmer-Linien, Fe-Linien
K	4	gelb rötlich	Fe-Linien und andere Metalle
M	2-3,5	rot	Linien neutraler Metalle, v.a. Fe, TiO-Banden, Ca-Linien

Spektroskopische Entfernungsmessung

- Rotverschiebung z : beobachtete Wellenlänge λ_{beob} ist größer als die Ruhewellenlänge λ_0
- Je größer die Rotverschiebung z eines Objektes, desto weiter ist das Objekt entfernt und umso jünger ist das Weltall, aus dem uns das Licht erreicht (Hubble-Gesetz)
- Ursachen für die Rotverschiebung entfernter Objekte:
 - Doppler-Effekt
 - Raumdehnung
 - Gravitation, z. B. Gravitationslinsen

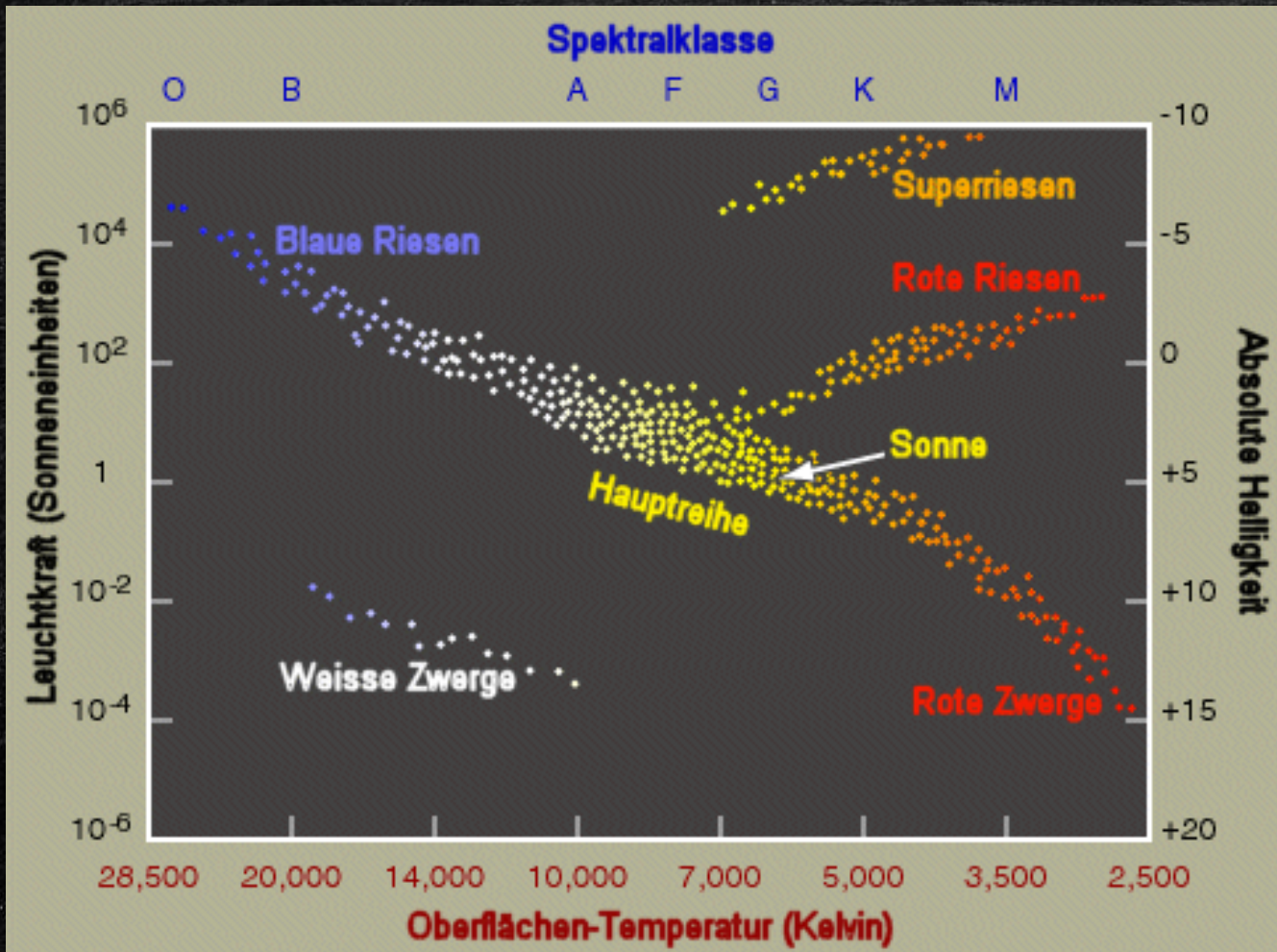


(Quelle: <https://www.roboternetz.de/>)



(Quelle: <https://www.leifiphysik.de/>)

Hertzprung-Russell-Diagramm

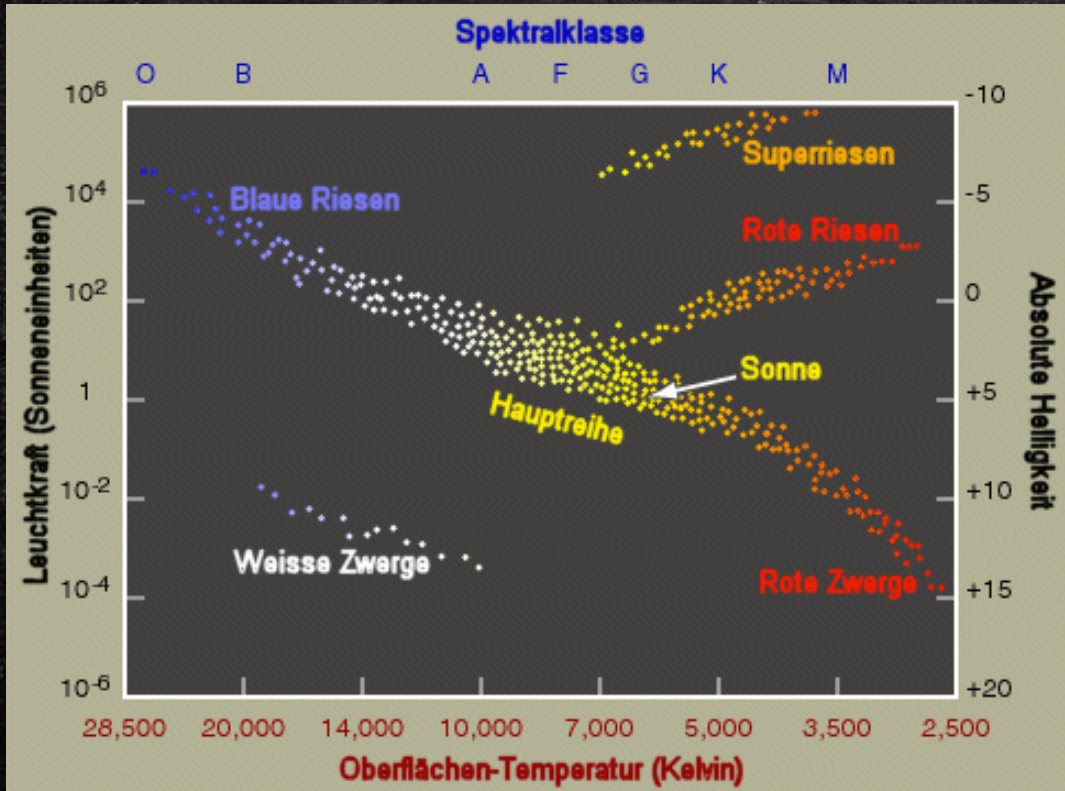


Leuchtkraftklassen:

- **0:** Hyperriesen
- **Ia/b:** Überriesen
- **II:** helle Riesen
- **III:** Riesen
- **IV:** Unterriesen
- **V:** Zwerge (normale Hauptreihe, z. B. Sonne)
- **VI:** Unterzwerge
- **VII:** Weiße Zwerge

STERN	Ort	V-Helligk.	B-V	T.	Sp.	Abs.	Name	Entf.
8 ε	Mon	δ	• 4.3	* 0.2	↓ A6	1 ^M	.....	128Lj
T	Mon	δ	• 5.6-6.6	1.0	↓ G8	-6	.....	6 000
3 β	CMi	□	• 2.9	-1	↓ B8	-1	Gomeisa	170
4 γ	CMi	□	• 4.3	1.4	↓ K3	-1	.....	400
10 α	CMi	□	● 0.4	0.4	↓ F5	3	Prokyon	11.4
√16 ζ	Cnc	□	• 4.7	* 0.5	↓ G0	3	.....	84
17 β	Cnc	□	• 3.5	1.5	↓ K4	-1	Altarf	300
√23 φ ²	Cnc	□	• 5.5	* 0.2	↓ A4	1	.....	280
43 γ	Cnc	δ	• 4.7	0.0	↓ A1	1	Asellus Borealis	160
47 δ	Cnc	δ	• 3.9	1.1	↓ K0	1	Asellus Australis	135
48	Cnc	□	• 4.7	0.5	↓ G0	3	.....	84

Hertzsprung-Russell-Diagramm

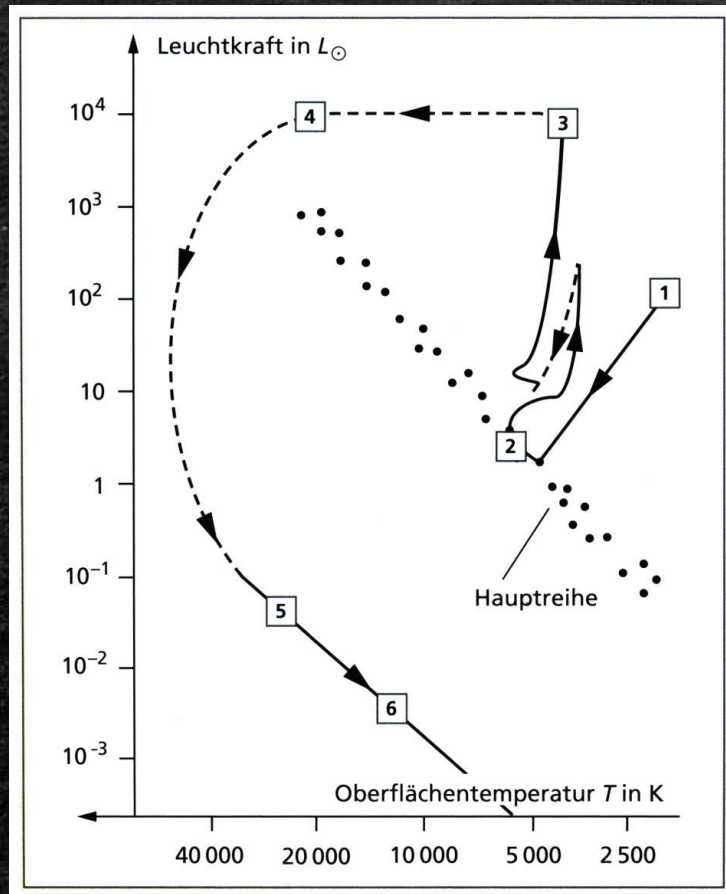


(Quelle: http://www.drfreund.net/mainframe.htm?main#astronomy_hrd.htm)

Entfernungsbestimmung mittels HRD:

- Wenn die Spektralklasse und Zugehörigkeit zu einer Leuchtkraftklasse bekannt sind, kann die absolute Helligkeit M direkt aus dem HRD abgelesen und die Entfernung berechnet werden
- Position eines Sternes im HRD bekannt: Spektralklasse \rightarrow Temperatur, absolute Helligkeit \rightarrow relative Leuchtkraft L
- Für Hauptreihensterne gilt Masse-Leuchtkraft-Beziehung: $L \sim M^3$
- Sternradius R mit Stefan-Boltzmann Gesetz
- Radius R und Masse M bekannt \rightarrow mittlere Dichte ρ

Sternentwicklung im HRD



1. Protostern
2. Hauptreihenstern
3. Roter Riese
4. Planetarischer Nebel
5. Weißer Zwerg
6. Abkühlungssequenz

Galaxien soweit das Auge reicht

- Bottom-up Strategie kosmologischer Strukturen:
 - Sterne → Galaxien → Galaxienhaufen
- Ca. 200 Mrd. Galaxien mit insgesamt 10^{22} Sternen
- 2 Entstehungsmechanismen:
 - Sterne entstehen in der Protogalaxie
 - Protogalaxie akkretiert benachbarte kleinere Galaxien und sammelt Sterne von außen ein
- Typen (nach Hubble, de Vaucouleurs, Yerkes-Morgan-Schema):
 - Spiralgalaxien
 - Elliptische Galaxien
 - Balkengalaxien
 - Irreguläre Galaxien
 - Ringförmigkeit, Spektralklassen, Neigung

M101, Feuerradgalaxie



Foto: Christian Maurer

Galaxien soweit das Auge reicht

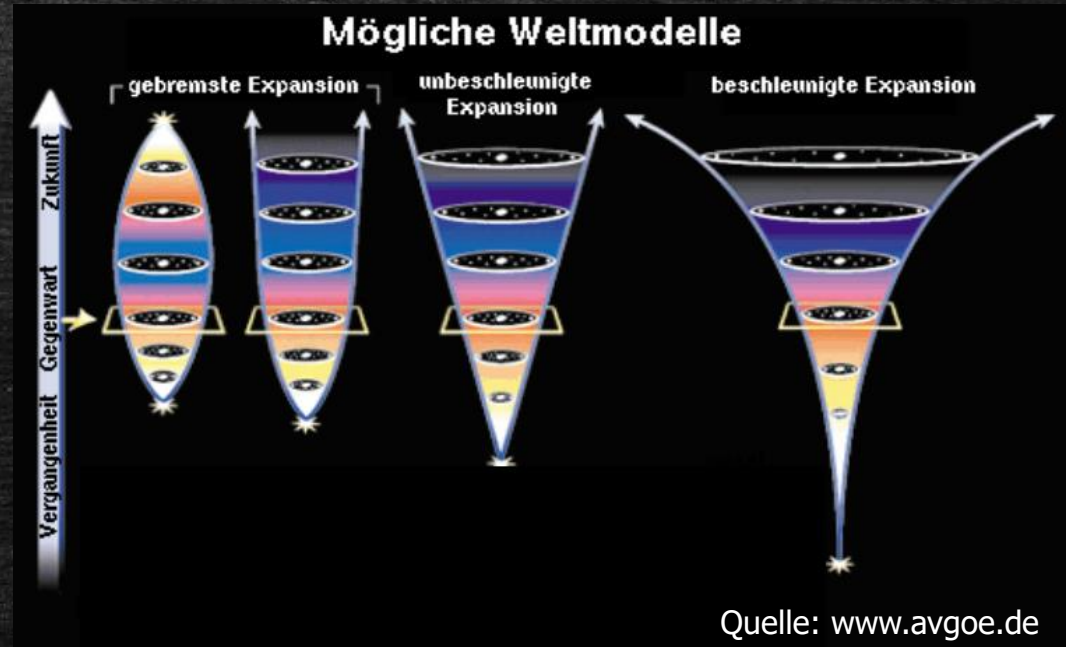
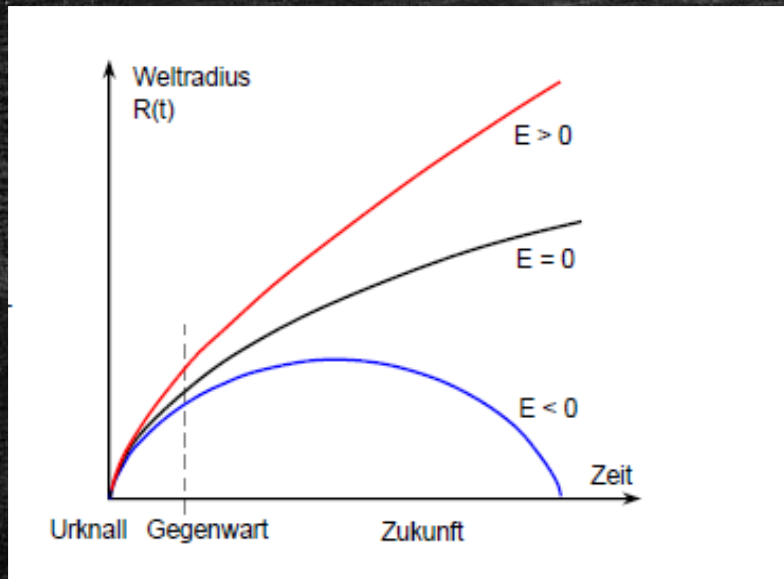
- Galaxien bilden Gruppen, Haufen und Super-Haufen, getrennt durch Voids und Walls
- Großteil der Masse von Galaxien und Galaxienhaufen besteht aus Dunkler Materie
- Im Zentrum von Scheiben-Galaxien und elliptischen Galaxien ist ein supermassives Schwarzes Loch mit mehreren Mio bis Mrd Sonnenmassen
- Verschmelzung unserer Milchstraße mit der Andromeda-Galaxie in ca. 4-10 Mrd. Jahren

M51, Whirlpool Galaxie



Foto: Christian Maurer

Zukunft des Universums



- In 10^{13} Jahren: das Universum wird dunkel. Es bilden sich Supergalaxien aus Sternleichen
- In 10^{32} Jahren: Baryonische Materie und Supergalaxienhaufen lösen sich auf. Materie ist nur noch in Schwarzen Löchern konzentriert
- Nach 10^{66} Jahren: Schwarze Löcher zerstrahlen über die Hawking-Strahlung
- In 10^{100} Jahren: alle kosmischen Strukturen sind verschwunden

Danke und Clear Skies!

M81, M82



Markajansische Kette



Fotos: Christian Maurer

Literatur

- Hawking, Stephen (2002): Die illustrierte kurze Geschichte der Zeit
- Hawking, Stephen (2001): Das Universum in der Nussschale
- Kellerer, Andreas (2018): Rote Riesen, Weiße Zwerge und Schwarze Löcher. Teil 1: Astrophysik
- Perlov, Delia & Vilenkin, Alex (2021): Kosmologie für alle, die mehr wissen wollen
- Schwarz, Andreas (2018): Grundlagen der Astronomie und Astrophysik - Eine Gesamtdarstellung. Grundlagen der Astrophysik
- Teichmann, Jürgen (2021): Der Geheimcode der Sterne. Die Geburt von Spektroskopie und Astrophysik
- Wischnewski, Erik (2021): Astronomie in Theorie und Praxis.