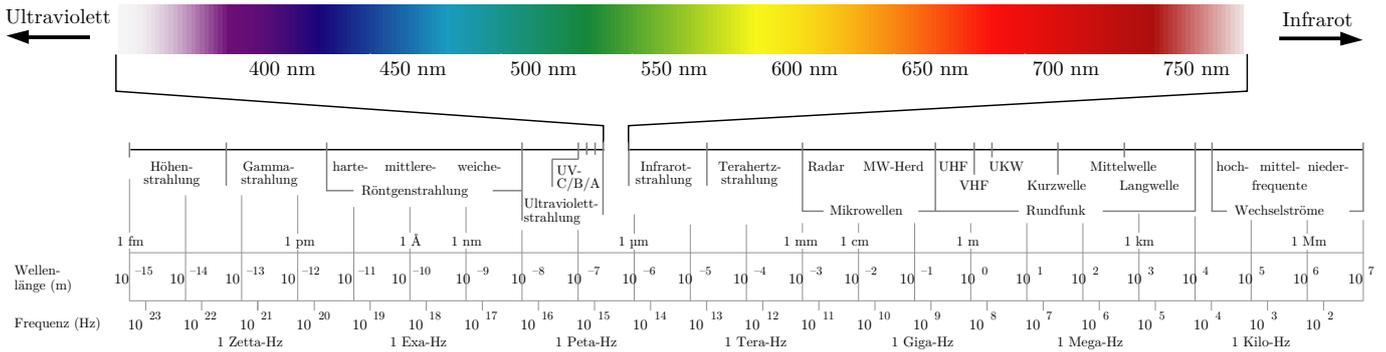
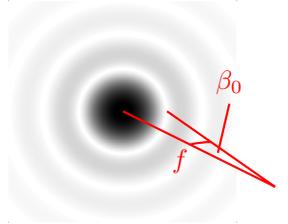


Das für den Menschen sichtbare Spektrum (Licht)

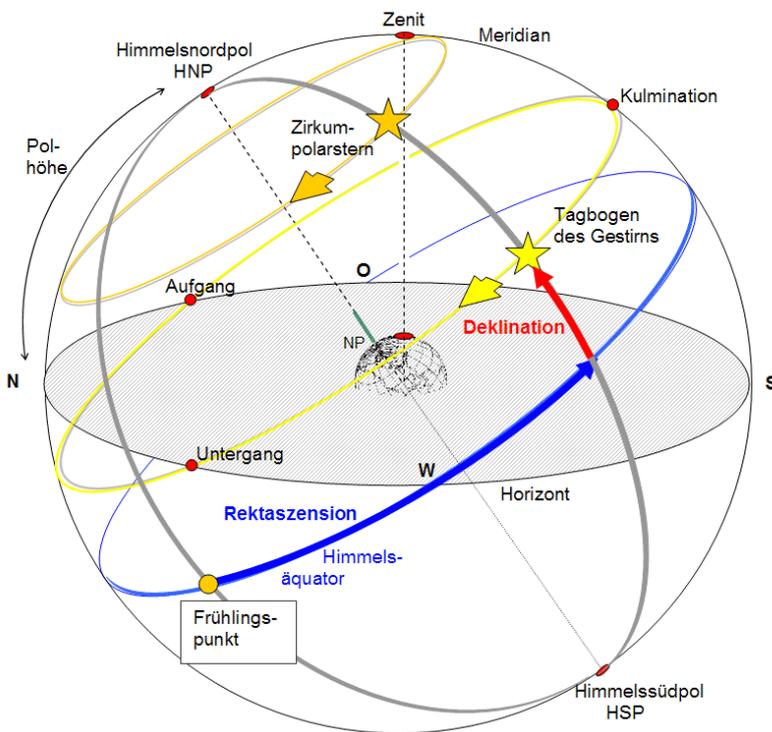


Auflösungsvermögen: minimaler Abstand, bei dem 2 Punktquellen noch unterscheidbar sind.

Für Kreisblende [-> 1. Nullstelle der Intensität des Airy-Scheibchens]: $\beta_0 = 1,22 \text{ rad} \frac{\lambda}{D}$.
 [Aperturdurchmesser D , Wellenlänge λ , Brennweite f]



Lichtsammelvermögen eines Teleskops $\propto \frac{D^2}{F}$. [Aperturdurchmesser D , Detektorfläche F]



Zenit Z [astronomisch]: Punkt über einem Beobachter auf der Verlängerung des Gravitationsvektors.

Nadir Z' : Gegenpunkt des Zenits.

Großkreis: beliebig orientierter Schnitt durch die Erdkugel, welcher den Erdmittelpunkt enthält.

Kleinkreis: beliebiger Schnitt durch die Erdkugel.

Meridian: Großkreis, welcher den Nordpol, den Südpol und den Zenit enthält.

Kulmination h_{ok}, h_{uk} : Durchgang eines Himmelsobjekts durch den höchsten/tiefsten Punkt auf seiner Bahn im Horizontsystem.

$$h_{ok} = 90^\circ - |\phi - \delta| \quad , \quad h_{uk} = -90^\circ + |\phi + \delta|$$

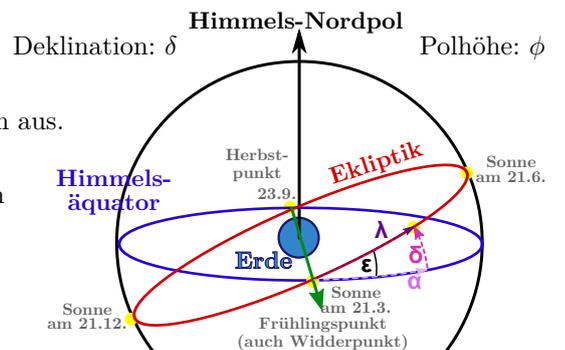
geographische Breite: $\Phi \in [-90^\circ, 90^\circ]$ vom Äquator aus.

geographische Länge: $\lambda \in [-180^\circ, 180^\circ]$ vom Greenwich-Meridian aus.

Ekliptik: Die scheinbare Bahn der Sonne im Lauf eines Jahres vor dem Fixsternhintergrund.

Rektaszension: α Schiefe der Ekliptik: ϵ [derzeit ca. $23,4^\circ$]

Ekliptische Länge: λ



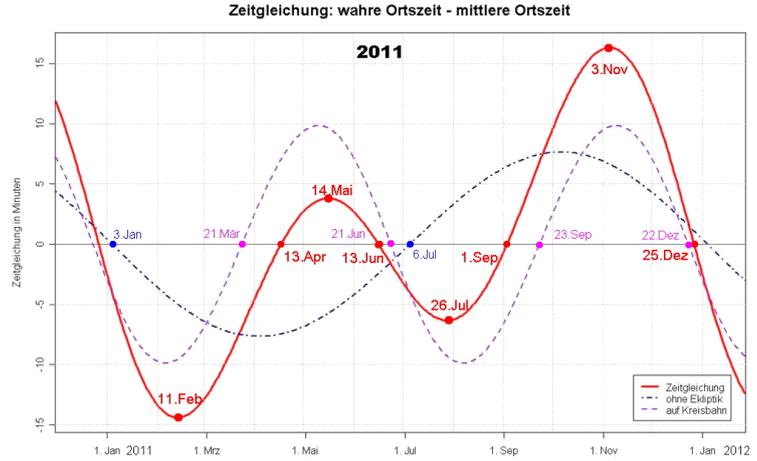
Zeitrechnung:

Sternzeit [θ - Stundenwinkel des Frühlingspunktes],

wahre Sonnenzeit [T_{\odot} - Stundenwinkel des Sonnenmittelpunktes + 12^h],

mittlere Sonnenzeit [T_m - Erde auf Kreisbahn um Sonne mit Rotationsachse \perp Ekliptik idealisiert + 12^h].

Zeitgleichung $\eta = T_{\odot} - T_m$.



Ein Sternzeittag dauert $\Delta T_m = 23^h 56^{\text{min}} 4^{\text{s}}$, da die Sonne je Tag ca. 1° mitrotiert. [$\frac{1}{365} \text{d} \approx 3^{\text{min}} 56^{\text{s}}$]

tropisches Jahr: Zeit zwischen 2 aufeinanderfolgenden Frühlings- [oder Herbst-] anfängen.

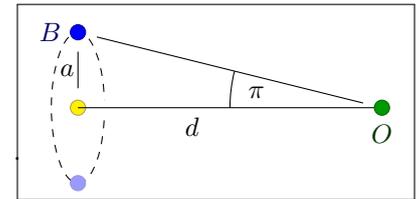
$$[\Delta T_m = 365,2422 \text{ d}, \Delta \theta = 366,2422 \text{ d}; \text{ dabei ist } T_m = \theta = 0 \text{ zum Herbstanfang}]$$

Gregorianischer Kalender: jedes 4., nicht durch 100 ganzzahlig teilbare Jahr [außer durch 400] einen Schalttag zusätzlich. [Das Jahr 0 gab es nicht.]

Ein Bezugssystem ist die Realisierung eines Koordinatensystem [idealisiert]. Dabei gibt es „scheinbare Orte“ aufgrund Refraktion der Atmosphäre [wahre Zenitdistanz $z \approx z' + \tan(z') 1'$, scheinbare Zenitdistanz z'] und der relativen Bewegung von Beobachter und Objekt [Aberrationswinkel $\sigma \approx \frac{v}{c} \sin(\theta)$, Beobachterbewegung \vec{v} , $\theta = \angle(\vec{v}, \vec{c})$].

Parallaxe $\pi = \arctan\left(\frac{a}{d}\right)$;

Radius der Drehung a , Abstand des Objekts vom Drehzentrum d .



1 Parallaxensekunde [1 pc] ist d für $a = 1 \text{ AE}$ und $\pi = 1''$: $1 \text{ pc} = \frac{1 \text{ AE}}{\tan(1'')} \approx 3,26 \text{ ly}$

Abstand von Erde und Sonne heißt **Astronomische Einheit** [1 AE = 149 597 870 700 m].

Die Rotationsachse der Erde führt eine Präzession [im Uhrzeigersinn] mit $50''/\text{y}$ [\Leftrightarrow Periode von 26 000 y]. Dabei nutiert sie außerdem [Amplitude $< 10''$].

Keplersche Gesetze:

- i) Die Bahn eines Planeten ist eine Ellipse mit der Sonne in einem Brennpunkt.
- ii) Der Radiusvektor eines Planeten überstreicht in gleichen Zeiten gleiche Flächen.
- iii) Die Quadrate der Umlaufzeiten zweier Planeten verhalten sich wie die dritten Potenzen ihrer großen Halbachsen.

$$\left[\frac{P^2}{a^3} = \frac{4\pi^2}{G[M_1 + M_2]} \approx \frac{4\pi^2}{GM_1}\right]$$

Mit M_1 bei \vec{r}_1 , M_2 bei \vec{r}_2 , $\vec{r} = \vec{r}_2 - \vec{r}_1$, dem Radius $r = |\vec{r}|$, der Gravitationskonstante G , $\mu = G[M_1 + M_2]$, der Geschwindigkeit $v = |\dot{\vec{r}}|$ und der Radialgeschwindigkeit \dot{r} ergibt sich:

$$\ddot{\vec{r}} = -\mu \frac{\vec{r}}{r^3}$$

Konstanten dieser Bewegung sind

Drehimpuls: $\vec{c} = \vec{r} \times \dot{\vec{r}}$, Energie: $\frac{h}{2} = \frac{v^2}{2} - \frac{\mu}{r}$, Laplace-Integral: $-\mu \vec{e} = \vec{c} \times \dot{\vec{r}} + \mu \frac{\vec{r}}{r}$.

Durch die zusätzliche Wahl einer Anfangsbedingung ist dann die gesamte Bahn von M_2 relativ zu M_1 bestimmt; es ist [$\theta = \angle(\vec{e}, \vec{r})$, $e = |\vec{e}|$]:

$$r(\theta) = \frac{c^2}{\mu} \frac{1}{1 + e \cos(\theta)} \quad \text{- Kegelschnitte } [0 \leq e < 1 - \text{Ellipse}, e = 1 - \text{Parabel}, e > 1 - \text{Hyperbel}].$$

Für Ellipsen [Planetenbahnen - gebundene]:

a große Halbachse, $b = a\sqrt{1 - e^2}$ kleine Halbachse, $h = -\frac{\mu}{a}$, $c = \sqrt{\mu a [1 - e^2]}$, $v^2 = \mu \left[\frac{2}{r} - \frac{1}{a}\right]$.

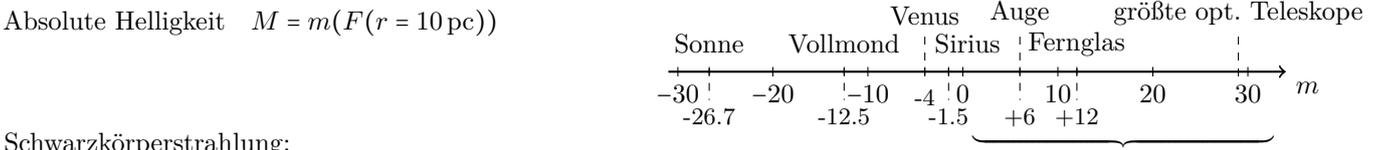
ϑ - Winkel zwischen Flächennormale der abstrahlenden Fläche und der Richtung des Beobachters; Raumwinkelement $d\omega = \sin(\vartheta) d\vartheta d\varphi$; OF-Element dA ; Zeit t ; Energie E .

[Spezifische] Intensität I_λ : $dE = I_\lambda d\lambda \cos(\vartheta) d\omega dA dt$ [Spektrale] Flussdichte $F_\lambda d\lambda = \int_{4\pi} I_\lambda d\omega d\lambda$

[Gesamt-] Flussdichte $F = \int_{\mathbb{R}} F_\lambda d\lambda$ [für isotrop strahlenden Körper gilt: $F(r) = F(R) \frac{R^2}{r^2}$.]

Leuchtkraft $L = \oint_{OF} F dA$

Scheinbare Helligkeit [Größenklassen nach Pogson]: $m(F) = -2,5 \log_{10}(\frac{F}{F_0})$ Von Erde aus:



Schwarzkörperstrahlung:

Planck: $B_\lambda d\lambda = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda k_B T}} - 1} d\lambda$

Wien'sches Verschiebungsgesetz: $\lambda_{\max} = 2,9 \text{ mm K} \frac{1}{T}$

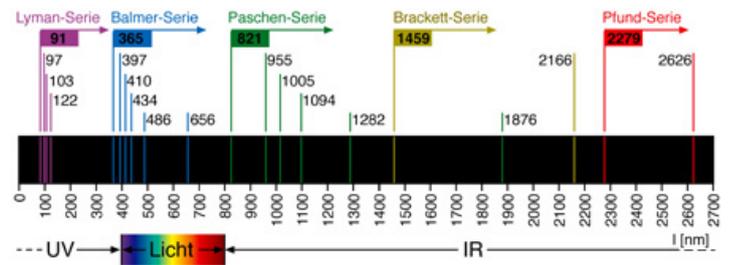
Isotroper Strahler $\Rightarrow L = \sigma AT^4$ [Stefan-Boltzmann-Konstante σ] [Maximum von $B_\lambda d\lambda$!]

Element-/Molekülspektren:

QM Energiezustände diskret; Emissionslinien diskret.
[z.B. H: $E_{ij} = E_1 \left[\frac{1}{i^2} - \frac{1}{j^2} \right]$, $E_1 \approx -13,6 \text{ eV}$]

Lebensdauer τ , nat. Energieunschärfe ΔE : $\tau \Delta E \geq \hbar$.

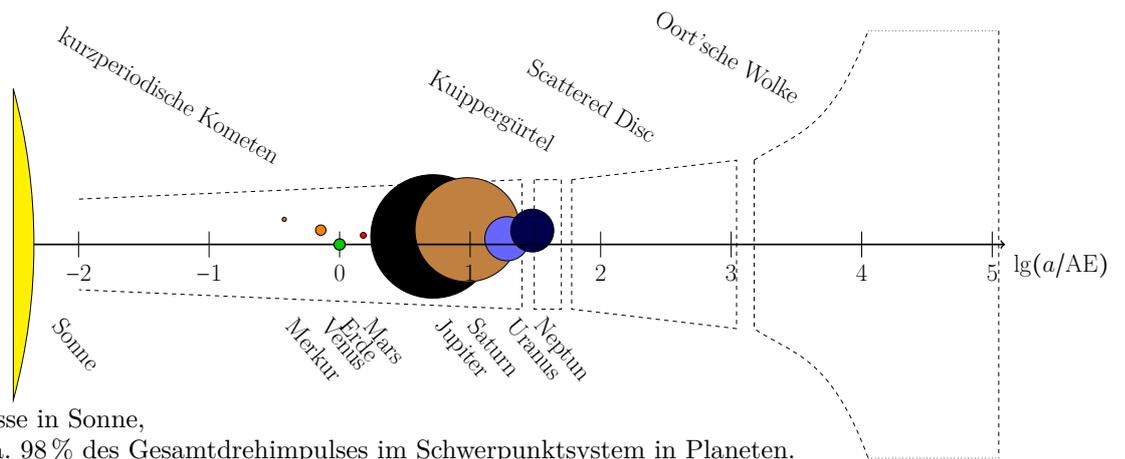
Bei Ionisation oder Elektroneneinfang aber auch Elementemission kontinuierlich.



„Störende“ Effekte: z.B. Stark-Effekt [elektrisch], Zeeman-Effekt [magnetisch], Fein- [ls-Kopplung], Hyperfeinstruktur [LS- oder JJ-Kopplung] bei Emission und gravitative-, kosmische- und Dopplerverschiebung vor Detektion.

optische Tiefe / Dicke: $\tilde{\tau}$ [Intensität I_0 nach Medium zu I_1 , so dass $I_1 = e^{-\tilde{\tau}} I_0$].

Sonnensystem:



> 99% der Gesamtmasse in Sonne,
ca. 98% des Gesamtdrehimpulses im Schwerpunktsystem in Planeten.

Eigenrotation und Sonnenumlauf aller Planeten vom ekliptischen Nordpol aus betrachtet im mathematisch positiven Sinne orientiert [gegen Uhrzeigersinn], bis auf die Eigenrotation von Venus und Uranus.

2 Gruppen:

1. erdähnliche: kleine große Halbachse a , langsame Eigenrotation, feste Oberfläche, keine Ringe, wenige Monde, hohe Dichte.
2. jupiterähnliche: entgegengesetzt...

Die Sonne:

Durchmesser: $D_{\odot} \approx 1,4 \cdot 10^9 \text{ m}$,
 Masse: $M_{\odot} \approx 2,0 \cdot 10^{30} \text{ kg}$, Dichte: $\rho_{\odot} \approx 1,4 \text{ g/cm}^3$,
 Leuchtkraft $L_{\odot} \approx 3,8 \cdot 10^{26} \text{ W}$

[Solarkonstante $Q = 1367 \text{ W/m}^2$] ,

siderische [auf Fixsternhimmel bezogene] differentielle
 Rotationsperiode: 25 d am Äquator, 30 d an Polen ,

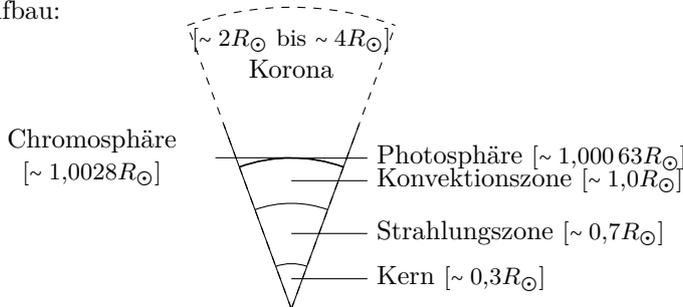
Abplattung: $J_{\odot} = \frac{R_{\text{Äqu}} - R_{\text{Pol}}}{R_{\text{Äqu}}} \approx 10^{-6}$
 [Erde: $J_{\oplus} \approx 10^{-3}$, Jupiter: $J_{\text{J}} \approx 10^{-1}$] .

Massenanteile:

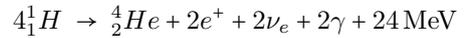
71% H , 27% He , 2% Rest [Metalle] .

Effektive OF-Temperatur: $T \approx 5778 \text{ K}$.

Aufbau:



Wasserstoffbrennen im Kern



Kern: $T = 14 \cdot 10^6 \text{ K}$, $p = 2,2 \cdot 10^{11} \text{ bar}$, $\rho = 150 \text{ g/cm}^3$.

Strahlungszone: Plasma, Energietransport durch Strahlung, 10^8 y für einen Durchgang [Brown'sche Bewegung, Streuung an e^-].

Konvektionszone: Ionen, Absorption der Photonen, Energietransport über Konvektion der Gase.

Photosphäre: effektiv 6000 K [innen] bis 4500 K [außen], $\rho = 10^{-7} \text{ g/cm}^3$, Granulation [typ. 1000 km groß, 5 min lang], Sonnenflecken [typ. bis 1 T, 3500 K, bis 10 000 km groß, Monate lang].

Chromosphäre: effektiv 4500 K [innen] bis 10^6 K [außen], $\rho = 10^{-7} \text{ g/cm}^3$ bis 10^{-15} g/cm^3 , Fortsetzung der Photosphären-Strukturen [Spikulen, Flocculi, ...].

Korona: effektiv $1 \cdot 10^6 \text{ K}$ [innen] bis $2 \cdot 10^6 \text{ K}$ [außen], Proturbanzen [kalte Materieschläuche aus unteren Schichten, $\sim 10^4 \text{ K}$]; Sonnenwind äußeres Ende [e^- , ${}^1_1H^+$, ${}^4_2He^{2+}$; 5 Protonen je Sekunde bei Erde mit 500 km/s]

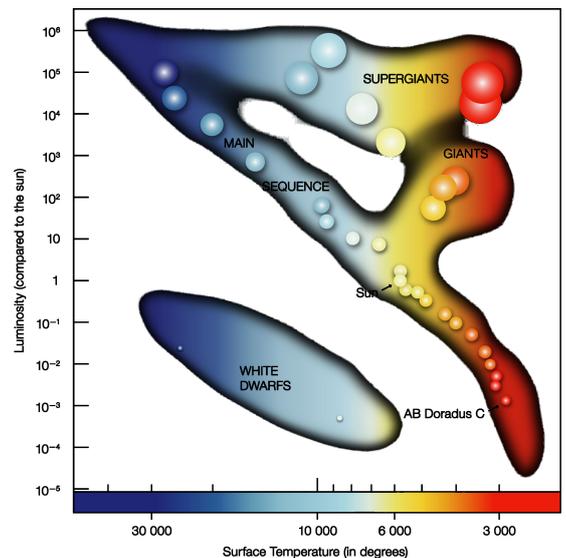
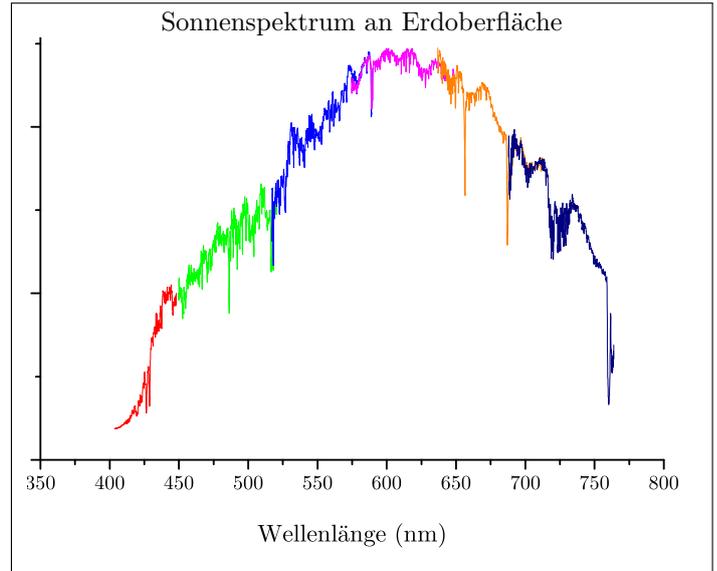
Sonnenaktivität: Leuchtkraft konstant [bis auf 0,1 %], Aufwickeln des inneren Magnetfelds durch differentielle Rotation \rightarrow periodisches Umpolen [Periode 22 y].

Sterne:

Massereicher, räumlich isolierter, gravitationsgebundener und für die eigene Strahlung undurchsichtiger Himmelskörper aus Gas und Plasma, in welchem in großem Maßstab Wasserstoffbrennen stattfindet [zu irgendeinem Zeitpunkt].

Beobachtetes:

- Leuchtkraft: $10^{-4} L_{\odot} < L < 10^6 L_{\odot}$
- Masse: $0,08 m_{\odot} < m < 100 m_{\odot}$
- Radius: $10^{-1} R_{\odot} < R < 10^3 R_{\odot}$
- chemisches: $H \sim \frac{3}{4}$, $He \sim \frac{1}{4}$, schwerere Elemente [1% - 3% - Population I, \ll 1% Population II]



frühere Spektralklassen

Spektralklassen: O [50 000 K - 30 000 K], B [30 000 K - 10 000 K], A [10 000 K - 7 000 K],
 F [7 000 K - 6 000 K],
 G [6 000 K - 5 000 K], K [5 000 K - 3 500 K], M [3 500 K - 2 500 K]

späte Spektralklassen

Leuchtkraftklassen: 0 - Hyperriesen, I - Überriesen, II - Helle Riesen, III - Riesen, IV - Unterriesen, V - Zwerge,
 VI - Unterzwerge, VII - weiße Zwerge.

[z.B. Sonne G2V]

Sternentwicklung:

Druck p , Temperatur T und Leuchtkraft L eines Sterns sind voneinander und von z.B. dem Ort, der Zeit und anderen Größen abhängig.

Für ein ideales Gas [Stern in 1. Näherung] ergeben sich Konvektionen, falls [Temperatur T , Radius r , Fallbeschleunigung g , spezifische Wärmekapazität c_p] $-\frac{dT}{dr} > \frac{g(r)}{c_p(r)}$ - Schwarzschild-Kriterium .

Vogt-Russel-Theorem:

Entwicklung eines Sterns [p, T_{eff}, R] fast ausschließlich von Anfangsmasse [und Zusammensetzung] abhängig.

Jeans-Kriterium:

Aus einer protostellaren Wolke [riesige Ansammlung loser Materie] entstehen durch Kontraktion viele Sterne; jedoch nur, falls $E_{\text{grav}} > E_{\text{kin}}$ für alle Teilchen, i.e. [Wolkenmasse M , Gravitationskonstante γ , Teilchenmasse m] $M > \frac{Rk_B T}{\gamma m}$.

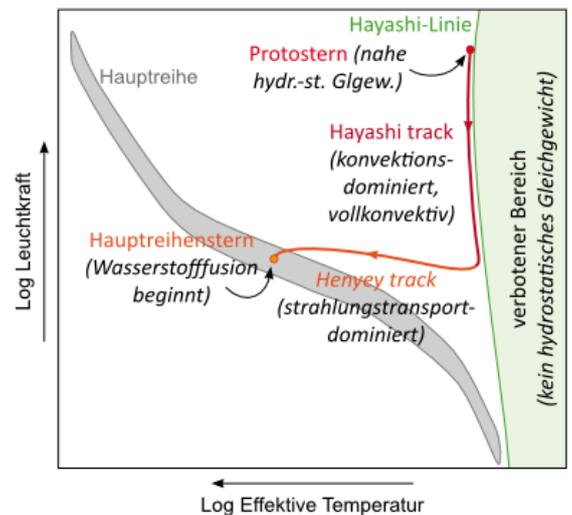
Die in der protostellaren Wolke entstandenen Materieklumpen heizen sich durch Akkretion auf und gelangen in ein hydrostatisches Gleichgewicht \rightarrow Protostern. [10^5 y- 10^8 y in diesem Zustand]

Anschließend daran wird er zu einem Hauptreihenstern. Dies ist der am längsten dauernde Zustand eines aktiven Sterns; jedoch umso kürzer, je höher die Masse des Sterns.

Ist der Brennstoff im Kern aufgebraucht [Wasserstoff] folgt Kontraktion bis Elektronentartungsdruck weitere verhindert, Temperaturerhöhung, Schalenbrennen, anschließendes Aufblähen und Helium-Fusion [massereichere Sterne auch Elemente bis Eisen] \rightarrow Rote Riesen.

Schließlich nach Fusions-Ende:

- $M_{\text{Kern}} < 1,4M_{\odot}$: stabiles Auskühlen, Abstoßen der Hülle \rightarrow **weißer Zwerg** [typ. $\rho \sim 10^6 \text{ g/cm}^3, R \sim 10^4 \text{ km}$] [Gravitationsdruck durch Elektronentartungsdruck kompensiert]
- $1,4M_{\odot} < M_{\text{Kern}} < 3M_{\odot}$: Abstoßen der Hülle \rightarrow **Neutronensterne** [typ. $\rho \sim 10^{13} \text{ g/cm}^3, R \sim 10 \text{ km}$, schnelle Rotation und Translation, starke Magnetfelder \rightarrow Pulsare [e^-]] [Gravitationsdruck durch Neutronentartungsdruck kompensiert]
- $M_{\text{Kern}} > 3M_{\odot}$: potentiell Schwarzes Loch oder Quark-Stern



Schwarzschild-Radius eines schwarzen Lochs

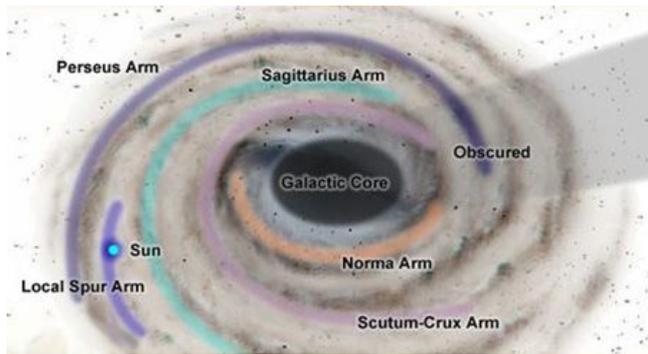
$$R = \frac{2\gamma M}{c^2}$$

Veränderliche Sterne

- Novae: Massentransfer auf Hauptreihen-Stern \rightarrow Wasserstoffbrennen [Faktor 10^3 - 10^5 in Helligkeit, mehrfach]
- Supernovae: [Faktor 10^8 in Helligkeit, einfach]
 - \sim Typ Ia: Massentransfer auf weißen Zwerg \rightarrow Kernkollaps & Aufprall der Hülle \rightarrow Explosion
 - \sim Typ Ib & II: Stern mit $M_{\text{Kern}} > 8M_{\odot}$ \rightarrow Kernkollaps und anschließendem Abstoßen der Hülle

- Pulsationsveränderliche: über κ -Mechanismus [Opazität = Undurchsichtigkeit κ steigt mit Druck/Temperatur]:
 1. lokale Druck-/Temperaturerhöhung \rightarrow stärkere Lichtabsorption \rightarrow stärkerer Druck-/Temperaturanstieg \Rightarrow exponentielle Expansion
 2. starkes Abkühlen \rightarrow schwächere Lichtabsorption \rightarrow stärkeres Abkühlen \Rightarrow exponentieller Kollaps \Rightarrow Helligkeitspulsation

Periode zu Leuchtkraftbeziehung [M - Absolute Helligkeit, P - Periode]: $M \approx -1,3 - 3 \log_{10} \left(\frac{P}{1 \text{ d}} \right)$



Die Milchstrasse:

- etwa $10^{12} M_{\odot}$ [98% Sterne, 2% Gas, Elektro-magn. Felder]
- Zentralbereich mit massereichem schwarzen Loch [$\sim 10^6 M_{\odot}$] und hoher Sterndichte
- Scheibe [Population I] dominiert; junge, metallreiche Sterne
- Halo [Population II] mit älteren, metallarmen Sternen
- Korona mit ältesten Sternen; größte Massenanteil an Galaxie

- differentielle Rotation der Scheibe
- Sonnensystemumlaufperiode $260 \cdot 10^6 \text{ y}$ [momentan]
- Halo mit isotroper Geschwindigkeitsverteilung \rightarrow effektiv keine Rotation
- jedoch Geschwindigkeitsprofil anders als erwartet \rightarrow Dunkle Materie
- Spiralarme sind Dichtewellen im Gas; halbe Umlaufzeit der Sterne

Interstellares Medium:

- Wasserstoff [ionisiert, atomar [$\sim 70\%$ Massenanteil]], Molekülwolken
- optische Tiefe $\tau \sim 1,4$ auf 1 kpc
- Polarisation durch ferromagnetischen Staub

- Assoziationen: gravitative, i.d.R. nicht gebundene, junge Sterne gleichen Ursprungs [aus selbem Gebiet] [$\leq 10 \cdot 10^6 \text{ y}$]
- offene Sternhaufen: etwas älter, schwächer gebunden [etwa 10 - 100 Sterne] [$\leq 100 \cdot 10^6 \text{ y}$]
- Kugelsternhaufen: kompakter, viele Sterne [$\sim 10^6$], wesentlich älter [heißen auch „Zwerggalaxien“] [$\geq 10 \cdot 10^9 \text{ y}$]

Galaxien:

- beobachtbar sind Sterne [heißer $\rightarrow \lambda <$], Gas und Staub [kühler $\rightarrow \lambda >$]
- Entfernungsbestimmung über Objekte bekannter Helligkeit [Pulsare, Novae, ...] oder der kosmologischen Rotverschiebung [Hubble-Gesetz: $cz = Hr$, c - Lichtgeschw., z - Rotverschiebung, H - Hubble-Konstante [ca. $75 \frac{\text{km}}{\text{s Mpc}}$]]
- $10^7 \dots 10^{13}$ Sterne, 1 kpc ... 100 kpc Durchmesser, Morphologie [Form] \rightarrow Hubbleklassifikationen
- typ. Verhältnis Abstand-zu-Größe von Galaxien nur $10^1 \dots 10^2$
- geschätzt 10^{11} Galaxien im beobachtbaren Universum

