

# Sterne, Galaxien und das Universum

## Teil 2: Physikalische Eigenschaften der Sterne

Peter Hauschildt  
yeti@hs.uni-hamburg.de

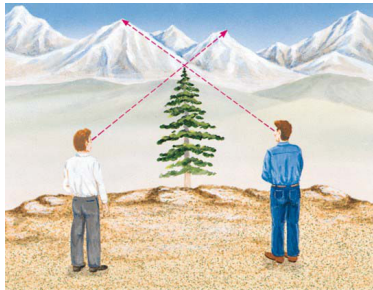
Hamburger Sternwarte  
Gojenbergsweg 112  
21029 Hamburg

29. Oktober 2019

# Übersicht

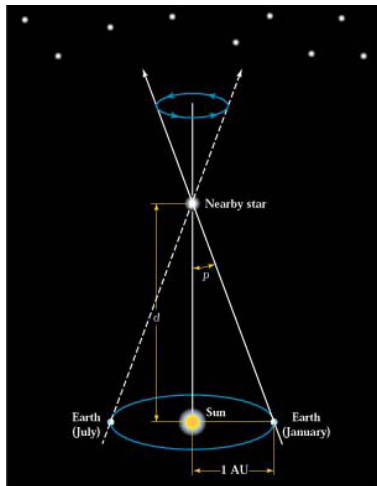
- ▶ Entfernungen
- ▶ Leuchtkräfte
- ▶ Farben
- ▶ Chemie
- ▶ Radian
- ▶ Doppelsterne

# Entfernungen

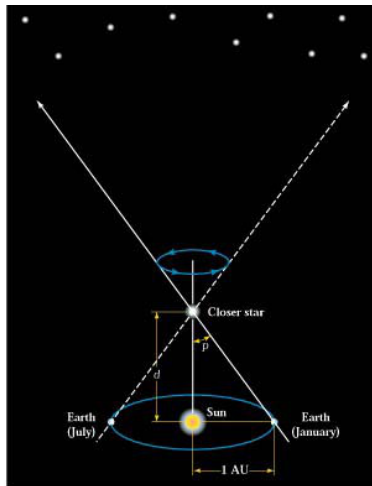


- ▶ scheinbare Helligkeit hat *nichts* mit Entfernung zu tun
- ▶ Parallaxe: alte Idee (Tycho!)
- ▶ Messung von Tycho →
- ▶ ohne Ergebnis!
- ▶ → Entfernungen zu Sternen sind sehr gross!
- ▶ verwende Erdbahn als Basislinie

# Parallaxe

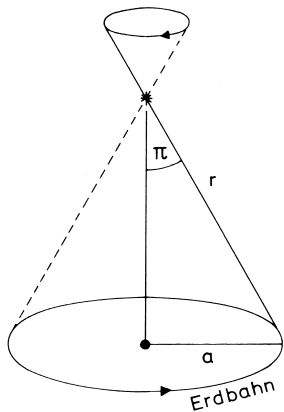


a



b

# Parallaxe



- ▶ Parallaxe  $\sin \pi = a/r$
- ▶  $\pi = 1'' \rightarrow 206265 \text{ AU}$
- ▶  $\rightarrow$  Definition des *parsec* (pc)
- ▶  $a/r \ll 1 \rightarrow \sin \pi \approx \pi$
- ▶  $\rightarrow \pi/1'' = 1 \text{ pc}/r$
- ▶  $1 \text{ arcsec} = 1 \text{ pc} = 3.26 \text{ ly}$

# Parallaxe

- ▶ stellare Parallaxen sind sehr klein:
- ▶ erster Erfolg: Bessel (1838):
- ▶ 61 Cyg:  $1/3 \text{ arcsec} = 3 \text{ pc}$
- ▶ nächster Stern: Proxima Cen
- ▶  $0.772 \text{ arcsec} = 1.3 \text{ pc}$
- ▶ ca. 10 cent Stück aus 3 km
- ▶ hellste Sterne im Himmel →
- ▶ Entfernung zu gross um vom Boden aus zu messen (100 pc)
- ▶ Satelliten: Hipparcos (ESA, 1989): 1000 pc
- ▶ GAIA (ESA, aktiv): gesamte Milchstrasse!

# Eigenbewegung



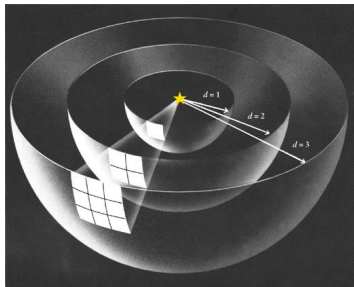
August 24, 1894



May 30, 1916

- ▶ echte Raumbewegung der Sterne
- ▶ Beispiel: Barnard's Stern (1.82 pc)
- ▶ 22 Jahre zwischen den Aufnahmen
- ▶ bewegt sich ca.  $0.5^\circ$  (Vollmond) in 200 Jahren

# Leuchtkräfte



- ▶ bei bekannter Entfernung  $r \rightarrow$
- ▶ mit scheinbarer Helligkeit  $b \rightarrow$
- ▶ berechne *Leuchtkraft*  $L$
- ▶ = gesamte Energieabstrahlung (Leistung) des Sterns

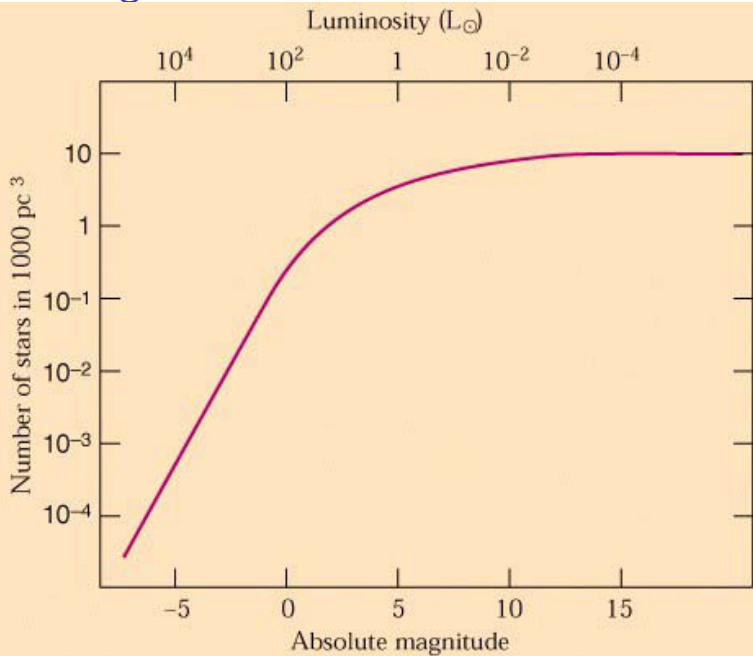
$$b = \frac{L}{4\pi r^2}$$



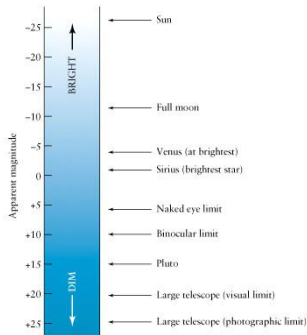
# Leuchtkräfte

- ▶ Sonne:  $L = 3.9 \times 10^{26} \text{ W}$
- ▶ scheinbare Helligkeit auf der Erde:
- ▶  $1370 \text{ W/m}^2$
- ▶ Sterne:
- ▶ riesiger Bereich:
- ▶ maximal ca.  $10^6 L_{\odot}$
- ▶ minimal ca.  $10^{-4} L_{\odot}$
- ▶ Bereich von 10 Milliarden!
- ▶ Sonne ungefähr im Mittelbereich

# Verteilung der Leuchtkräfte



# Größenklassen

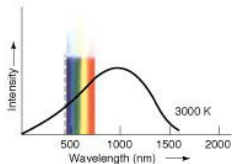


- ▶ astronomische Einheit der Helligkeit
- ▶ basiert auf Hipparchus
- ▶ hellster Stern: 1. Klasse
- ▶ gerade noch sichtbar: 6. Klasse
- ▶ logarithmische Skala (wie Auge!):
- ▶ 6. Klasse → 5. Klasse: 2.512 mal heller

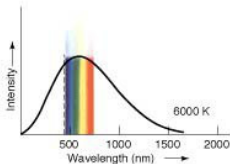
# Größenklassen

- ▶ *scheinbare Helligkeit*  $m$ : wie am Himmel
- ▶ *absolute Helligkeit*  $M$ : wie in 10pc Entfernung
- ▶  $m - M = 5 \log(d/1 \text{ pc}) - 5$
- ▶ 10 pc als Referenz ist willkürlich gewählt!

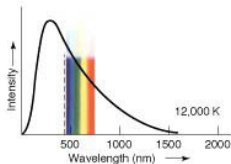
# Farben



a This star looks red



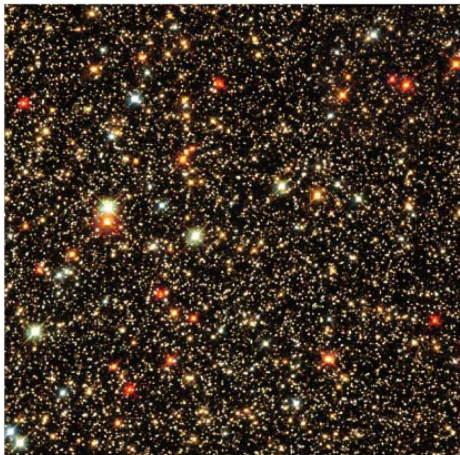
b This star looks yellow-white



c This star looks blue

- ▶ hängt von der Oberflächentemperatur ab!
- ▶ rot → kühl
- ▶ blau → heiss

# Farben einiger Sterne



Copyright © Addison Wesley

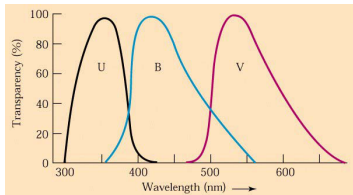
# Farben

- ▶ Wien'sches Verschiebungsgesetz:

$$\frac{\lambda_{\max}}{1\text{cm}} = \frac{0.29\text{ K}}{T}$$

- ▶  $\lambda_{\max}$ : Wellenlänge bei der der Stern am hellsten strahlt
- ▶  $T$ : absolute Temperatur [K]

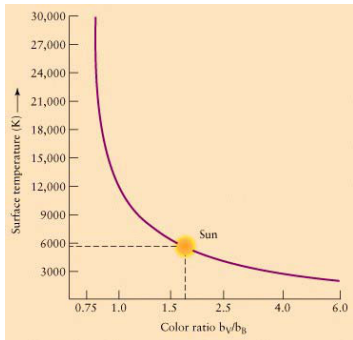
# Farbfilter



- ▶ genormte Filter zur Farbmessung
- ▶ *Photometrie*
- ▶ wird zur Temperaturbestimmung verwendet



# Farbfilter



- ▶  $b_V$ : Helligkeit im V Filter
- ▶  $b_B$ : Helligkeit im B Filter
- ▶ Vorsicht: Farben werden durch *interstellaren Staub* verfärbt!
- ▶ → entfernte Sterne erscheinen 'röter' als sie eigentlich sind

# Farben einiger Sterne

Table 19-1 Colors of Selected Stars

Star	Surface temperature (K)	$b_V/b_B$	$b_B/b_U$	Apparent color
Bellatrix ( $\gamma$ Orionis)	28,000	0.82	0.45	Blue
Regulus ( $\alpha$ Leonis)	22,000	0.90	0.72	Blue-white
Sirius ( $\alpha$ Canis Majoris)	10,000	1.00	0.95	Blue-white
Megrez ( $\delta$ Ursae Majoris)	8800	1.08	1.07	White
Altair ( $\alpha$ Aquilae)	7400	1.22	1.08	Yellow-white
Sun	5800	1.77	1.10	Yellow-white
Aldebaran ( $\alpha$ Tauri)	3700	4.13	5.75	Orange
Betelgeuse ( $\alpha$ Orionis)	2400	5.50	6.67	Red

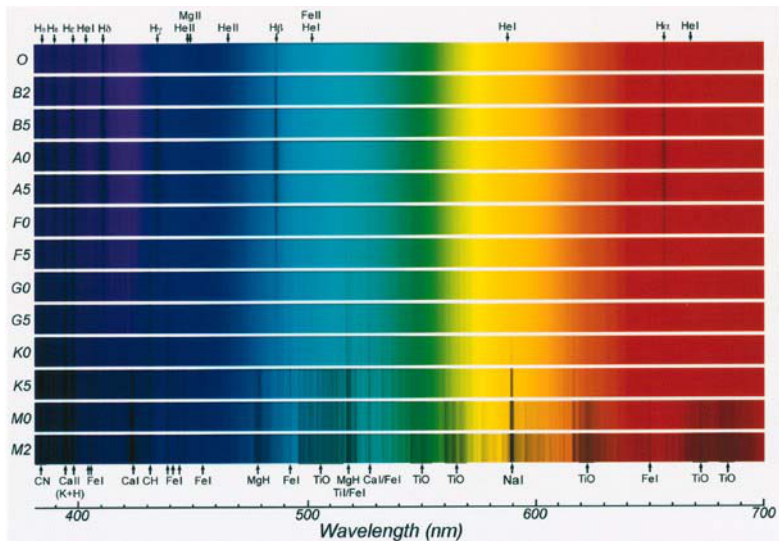
# Sternspektren

- ▶ Sternspektren sehen dem der Sonne oft generell ähnlich
- ▶ um die Menge der Spektren zu ordnen
- ▶ → *Spektralklassen*
- ▶ spätes 19. Jahrhundert: Klassen A-P
- ▶ Relation zu Temperatur etc waren unbekannt

# Sternspektren

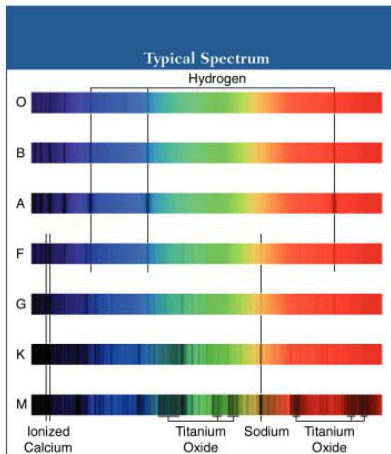
- ▶ Harvard Klassifikation:
- ▶ von Edward Pickering, Williamina Fleming, Annie Jump Cannon
- ▶ alte Klassen um- oder aussortiert
- ▶ neues Schema: *OBAFGKM(LT)*
- ▶ neu: Unterteilung 0–9
- ▶ Anordnung so dass Spektrallinien sich systematisch ändern:

# Spektralklassen



# Spektralklassen

**Table 13.1(b)**  
**The Spectral**  
**Sequence**

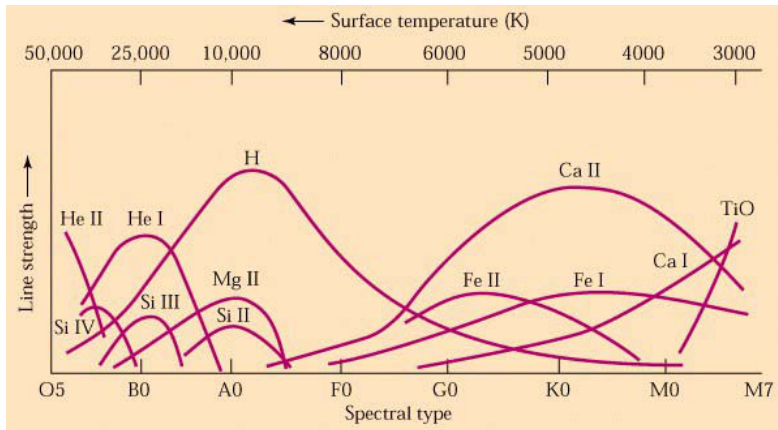


Copyright © Addison Wesley

# Sternspektren

- ▶ woher kommen die systematischen Änderungen?
- ▶ Temperaturvariationen!
- ▶ z.B. Wasserstoff
- ▶ niedrige Temperaturen
- ▶ → Linien nicht angeregt
- ▶ höhere Temperaturen:
- ▶ → Stösse regen Atome an → Linien stärker
- ▶ ganz hohe Temperaturen:
- ▶ → Wasserstoff ionisiert → Linien weg!

# Linienstärken





# Effektive Temperatur

- ▶ Flächenhelligkeit

$$F = \frac{L}{4\pi R^2}$$

- ▶  $R$ : Radius des Sterns (unbekannt!)
- ▶ Leistung pro  $\text{m}^2$  der Sternoberfläche
- ▶ i.A. ist  $R$  nicht bekannt
- ▶ Definiere *effektive Temperatur*  $T_{\text{eff}}$  über

$$F = \sigma T_{\text{eff}}^4$$

- ▶ *Stefan-Boltzmann Gesetz*
- ▶  $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2/\text{K}^4$

# Effektive Temperatur

- ▶  $T_{\text{eff}}$  ist die Temperatur eines Hohlraumstrahlers der das gleiche  $F$  wie der Stern hat
- ▶  $\rightarrow T_{\text{eff}}$  ist nur Maß für “mittlere” Temperatur der sichtbaren Atmosphäre des Sterns.
- ▶ Sonne:  $T_{\text{eff}} = 5780 \text{ K}$
- ▶  $T_{\text{eff}}$  für Sterne im Bereich  $2000 \dots 50\,000 \text{ K}$

# Radien

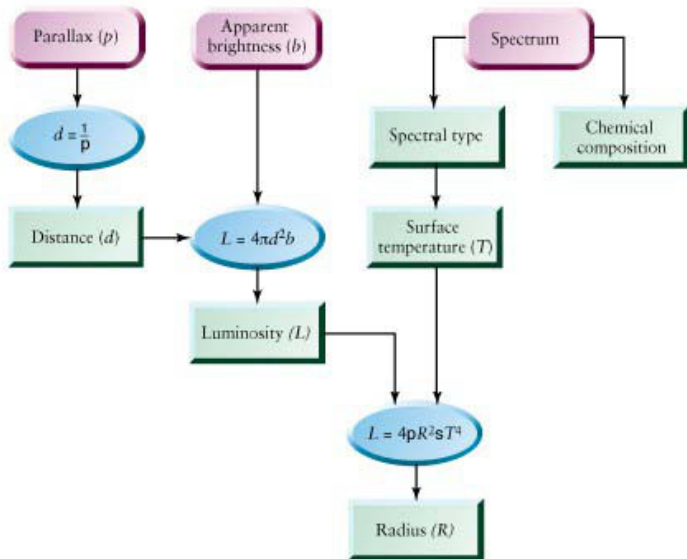
- ▶ Stern i.A. zu weit entfernt für direkte Messung
- ▶ → indirekte Methoden müssen verwendet werden
- ▶ Beispiel: Leuchtkraft sei bekannt
  - ▶ Entfernung und scheinbare Helligkeit gemessen
  - ▶ → Leuchtkraft
- ▶  $T_{\text{eff}}$  sei auch bekannt (Spektrum)
- ▶ Leuchtkraft = Oberfläche  $\times$  Flächenhelligkeit!
- ▶ →

$$L = 4\pi R^2 \sigma T_{\text{eff}}^4$$

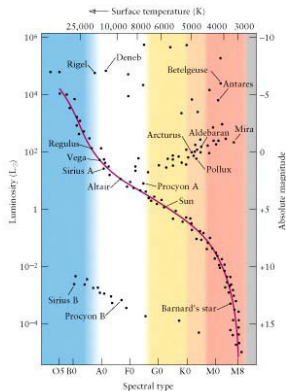
# Radien

- ▶ Ergebnisse:
  - ▶ kleinste 'Sterne' (Weisse Zwerge)  $\approx$  Erde
  - ▶ kleinste echte Sterne  $\approx$  Jupiter
  - ▶ grösste Sterne  $\approx 1000 \times$  Sonne (Jupiter-Bahn)
- ▶ Radius ist nicht eindeutig mit Leuchtkräft korreliert:
- ▶ kleiner aber heisser Stern kann höheres  $L$  haben als die Sonne

# Zusammenfassung

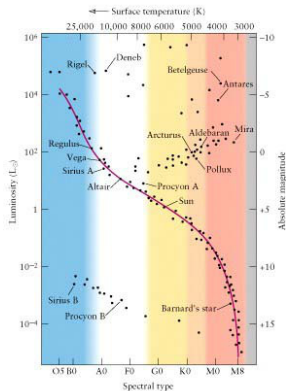


# HRD



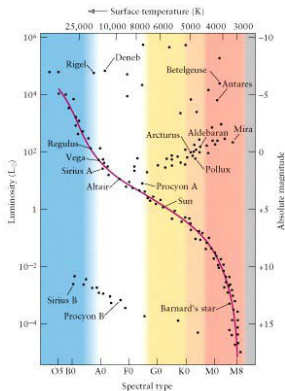
- ▶ kommen Sterne in allen möglichen Kombinationen ( $T_{\text{eff}}, L$ ) vor?
- ▶ Hertzsprung (1911), Russell (1913) → Nein!
- ▶ Trage Sterne in ein Diagramm Spektrale Klasse vs. Leuchtkraft ein

# HRD



- ▶ → Sterne sind *systematisch* verteilt im
- ▶ *Hertzsprung-Russell Diagramm (HRD)*
- ▶ Beachte:  $T_{\text{eff}}$  steigt nach *links* hin an!
- ▶ Grund: HRD zuerst in sp. Typen gemacht!

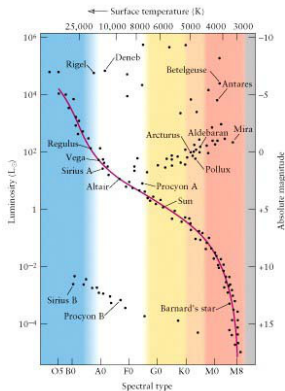
# HRD



- ▶ Mehrheit der Sterne →
- ▶ *Hauptreihe* (main sequence)
- ▶ das schliesst die Sonne ein!
- ▶ Sterne verbringen den grössten Teil ihres Lebens auf der HR
- ▶ Wasserstoffbrennen!

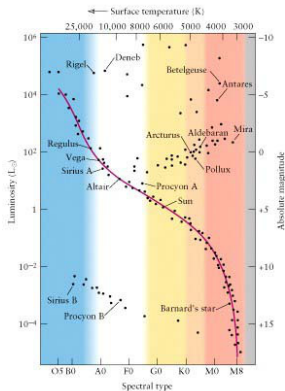


# HRD



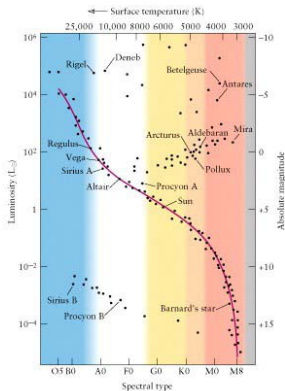
- ▶ Riesen(sterne):
- ▶ kühl (GKM)
- ▶ ca. 10-100 mal so gross wie die Sonne
- ▶ Rote Riesen (Arcturus, Aldebaran)
- ▶ spätere Entwicklungsphase (nach der HR!)

# HRD



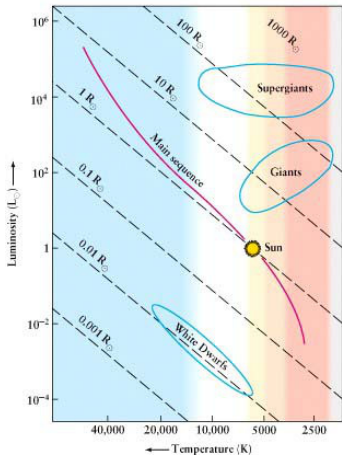
- ▶ Überriesen:
- ▶ ca. 1000 mal so gross wie die Sonne
- ▶ Betelgeuze, Antares
- ▶ spätere Entwicklungsphase (nach der HR!)
- ▶ kommen auch heiss vor (Rigel, Deneb)
- ▶ noch spätere Phase

# HRD



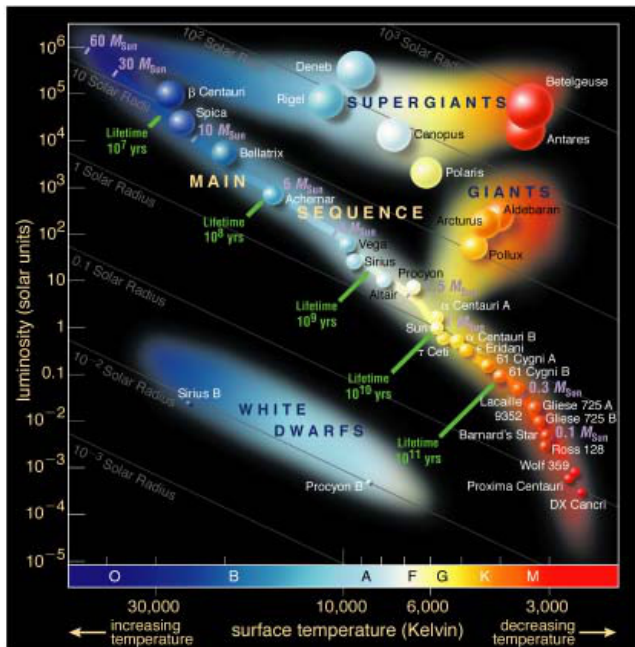
- ▶ Weisse Zwerge:
- ▶ klein (Erde!) aber heiss
- ▶ Sirius B, Procyon B
- ▶ Endstadium der (ex) Sterne

# HRD



- ▶ schematisches HRD
- ▶ mit Linien konst. Radius'
- ▶ HRD ist *extrem* nützlich und wichtig
- ▶ Verständnis der Sternentwicklung

# HRD



# Leuchtkraftklassen



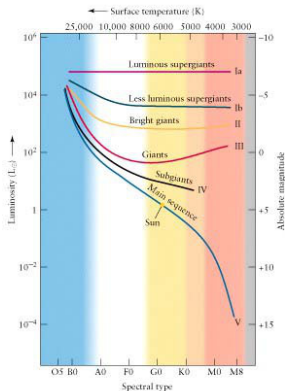
- ▶ kann man Leuchtkraft aus dem Spektrum schätzen?
- ▶ Morgan + Keenan (1930s) → ja!
  - ▶ oben: B8 Überriese Rigel ( $L = 58000 L_{\odot}$ )
  - ▶ unten B8 HR Stern Algol ( $L = 100 L_{\odot}$ )

# Leuchtkraftklassen



- ▶ (Wasserstoff) Linien sind druck- und temperatur-abhängig!
- ▶ Riesen haben *kleinere* Drücke in ihren Atmosphären
- ▶ → Linien sind *schmäler*

# Leuchtkraftklassen



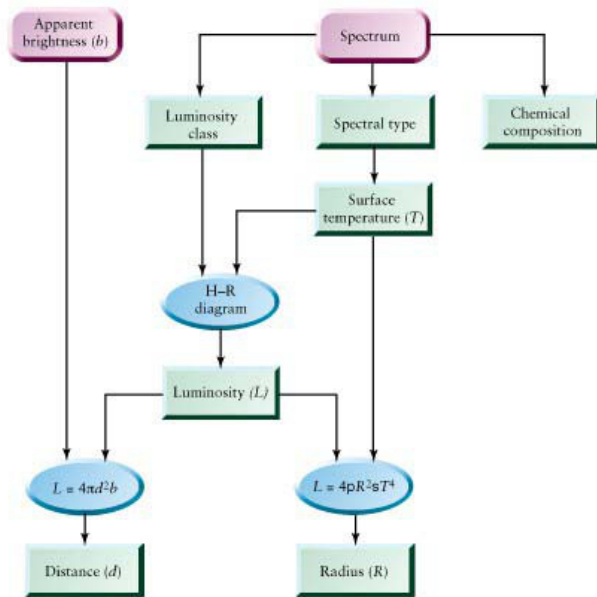
- ▶ 6 Hauptklassen wurden definiert
- ▶ Beispiele:
  - ▶ Sonne: G2V (HR Stern oder *Zwerg*)
  - ▶ Aldebaran: K5III



# spektroskopische Parallaxe

- ▶ wenn die LC (Leuchtkraftklasse) bekannt (Spektrum)
- ▶ schätze Entfernung!
- ▶ das kann verwendet werden wenn Parallaxe nicht bekannt!
- ▶ aber ist nicht sehr genau (Streuung, Rötung)
- ▶ besser als nichts
- ▶ statistische Verwendung!

# Zusammenfassung

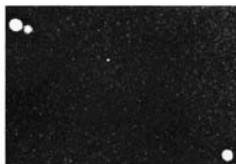


# Massen

- ▶ Masse eines Sterns ist sehr schwer zu bestimmen
- ▶ unmöglich für Einzelstern
- ▶ aber es gibt Doppelsterne die sich umkreisen:
- ▶ Beispiel: Krüger 60



1908

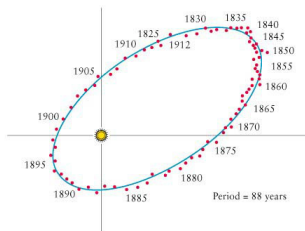


1915



1920

# Massen

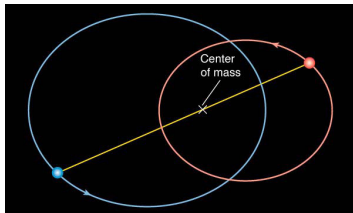


- ▶ dann lässt sich u.U. das 3. Kepler'sche Gesetz

$$M_1 + M_2 = \frac{a^3}{P^2}$$

- anwenden
- ▶ ergibt immerhin die Summe der Massen!

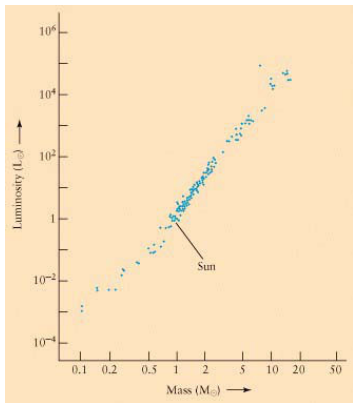
# Massen



b

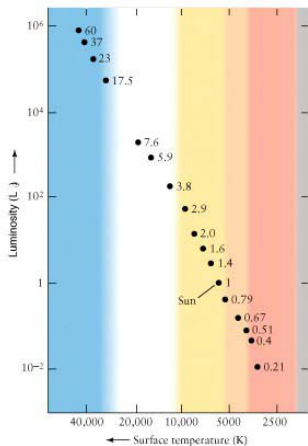
- ▶ wenn man Bahn beider Sterne beobachten kann
- ▶ → Masse jeder Komponente kann bestimmt werden
- ▶ Leider gibt es nicht viele solcher Systeme

# Massen



- ▶ Ergebnis:
- ▶ Beziehung zwischen Masse und Leuchtkraft
- ▶  $L \propto M^3$

# Massen



- ▶ gilt nur für Hauptreihensterne
- ▶ höhere Massen ( $> 100 M_{\odot}$ ) nicht möglich
- ▶  $\rightarrow$  Stern dann instabil
- ▶ beliebig kleine Massen ( $< 0.07 M_{\odot}$ ) nicht möglich
- ▶  $\rightarrow$  Fusion startet nicht
- ▶  $\rightarrow$  Brauner Zwerg

# Bedeckungsveränderliche

