

# Einfuehrung in die Astron. & Astrophysik I

Wintersemester 2013/2014: Henrik Beuther & Christian Fendt

- 17.10 Einfuehrung: Ueberblick und Geschichte (H.B.)*
- 24.10 Koordinatensys., Sternpositionen, Erde/Mond (C.F.)*
- 31.10 Teleskope und Instrumentierung (H.B.)*
- 07.11 Strahlung, Strahlungstransport (C.F.)*
- 14.11 Planetensystem(e) und Keplergesetze (H.B.)*
- 21.11 Sonne & Sterne, Typen, Klassifikationen, HR-Diagramm (C.F.)*
- 28.11 Interstellare Materie: Chemie und Materiekreislauf (H.B.)*
- 05.12 Sternentstehung, Akkretionsscheiben und Jets (H.B.)*
- 12.12 Sternaufbau und Sternentwicklung: Hauptreihe (C.F.)*
- 19.12 Sternaufbau und Sternentwicklung: Endstadien (C.F.)*
- 26.12 und 02.01 –*
- 09.01 Mehrfachsysteme und Sternhaufen, Dynamik (C.F.)*
- 16.01 Exoplaneten und Astrobiologie (H.B.)*
- 23.01 Die Milchstrasse (H.B.)*

**30.01 Zusammenfassung (C.F. & H.B.)**

**08.02 Klausur, 15:00-17:00, Philosophenweg 12, alle 3 Hoersaele**

• **Prüfung am 8.2.2014, 15:00 s.t. - 17:00**

• Philosophenweg 12:

- **GHs:** Gruppen A (Bialas), B (Thygesen), C (Baczynski)
- **KHs:** Gruppe D (Qian)
- **NHs:** Gruppen E (Kozlikin), F (Mitchell)

• 6 Klausuraufgaben je 10 Punkte

• **Wichtig:**

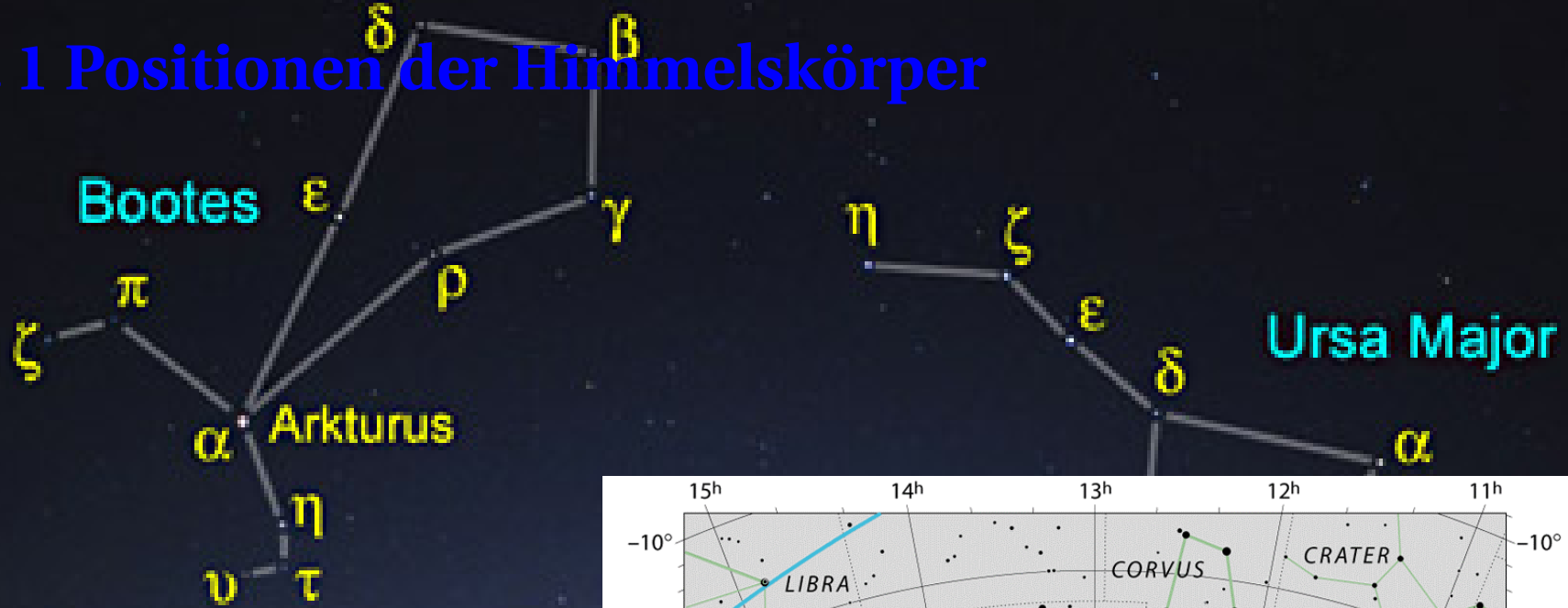
- (1) Bitte alle 6 Fragen auf **separaten Blättern** beantworten!  
(Blätter werden zur Verfügung gestellt)
- (2) Auf jedes Blatt **Namen** und **Matrikelnummer** schreiben!
- (3) **Elektronische Geräte** mit Möglichkeit zur Datenübertragung  
müssen ausgeschaltet in der Tasche bleiben!
- (4) Ein handgeschriebenes DinA4 Blatt (beidseitig) erlaubt.
- (5) Taschenrechner mitbringen (kein Computer!).

# Themen heute

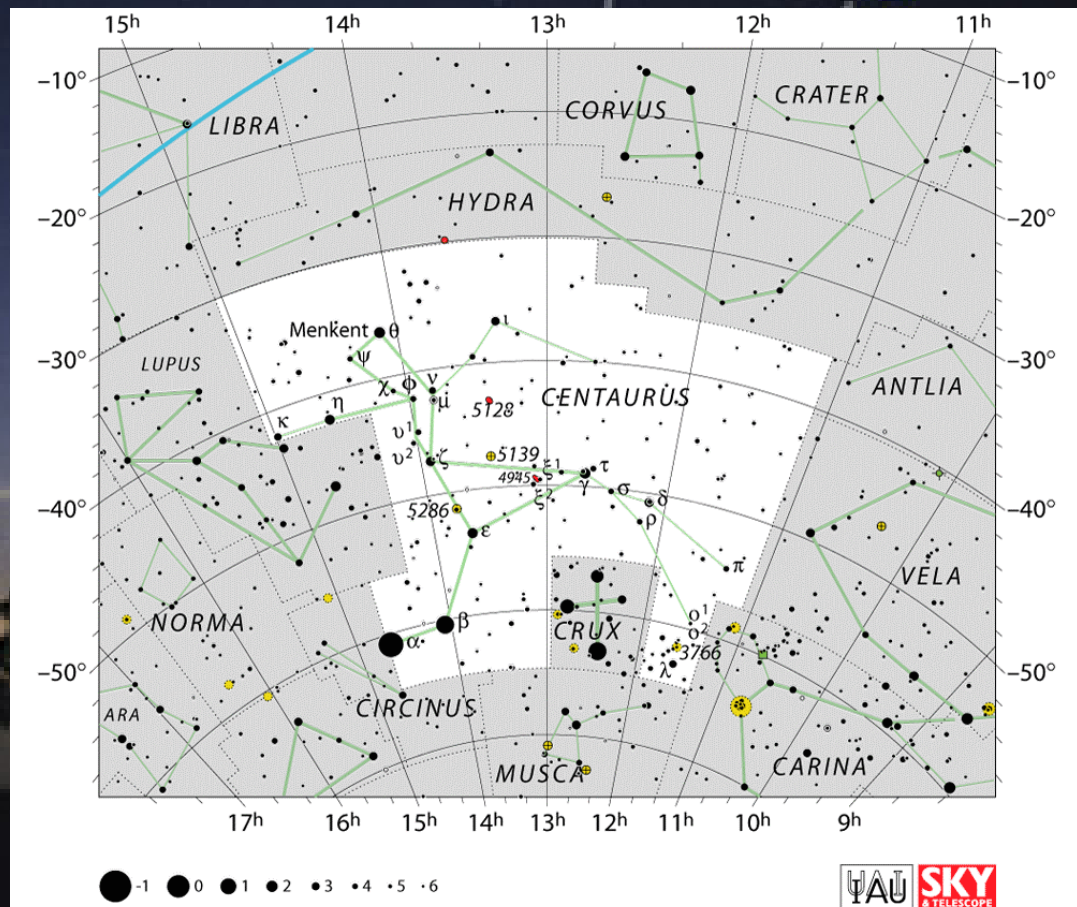
- Sternpositionen und Himmelskoordinaten
- Teleskope, Aufloesung und Wellenlaengen
- Strahlung, Sternklassifikation
- Sonnensystem, Keplergesetze und Exoplaneten
- ISM und Sternentstehung
- Sternentwicklung

# **Sternpositionen/ Himmelskoordinaten**

# 2.1 Positionen der Himmelskörper



Ursa Major



## 2.2 Himmelskoordinaten

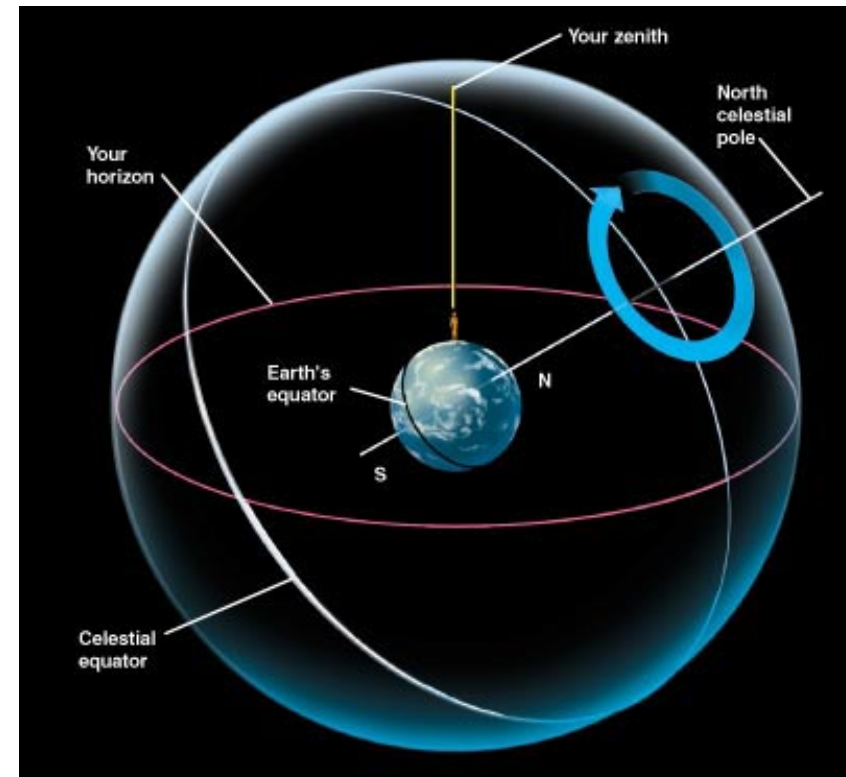
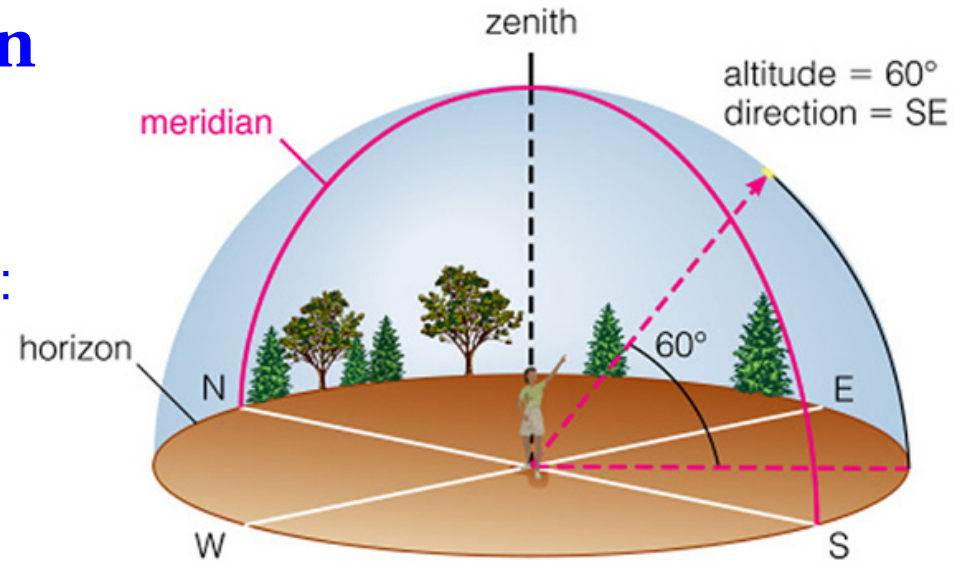
### Problematik:

### Orientierung @ Beobachtungsplatz:

- > horizontale Koordinaten  
(Zenit, Horizont)
- > "feste" äquatoriale Koordinaten  
-> fest für den Standort,  
aber nicht am Himmel

### Orientierung @ Himmel:

- > "mitbewegte" äquatoriale Koordinaten
- > festes Koordinatensystem am Himmel,  
-> Ausgleich der Bewegung der Erde
- > **sphärisches Koordinatensystem am Himmel**



## 2.2 Himmelskoordinaten

### Mitbewegtes äquatoriales Koordinatensystem

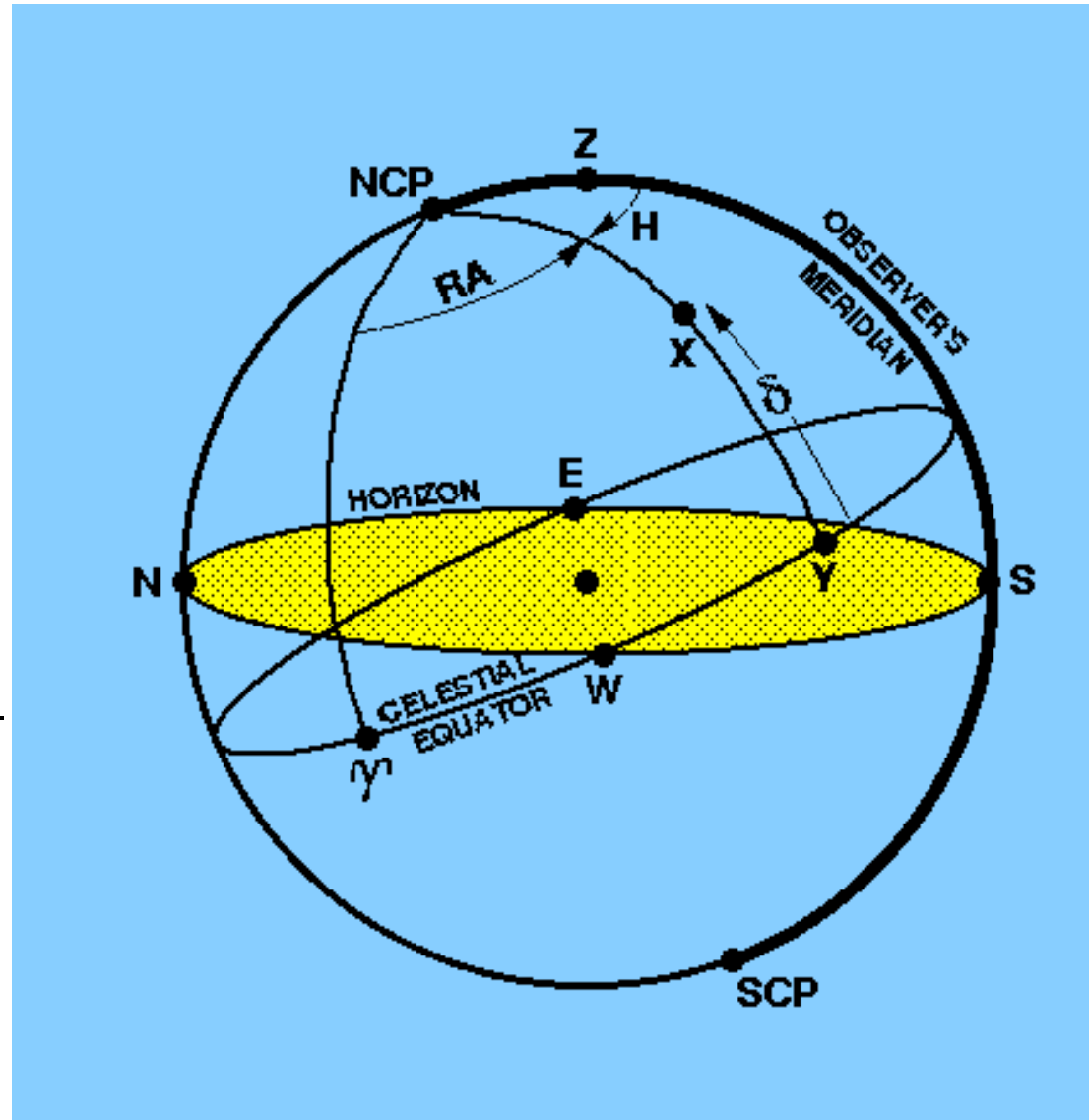
#### Koordinaten:

##### **Rektaszension $\alpha$ :**

R.A. (engl. right ascension) :  
Winkeldifferenz zwischen  
Stundenwinkeln von Objekt  
und **Frühlingspunkt  $\gamma$**

##### **Dekination $\delta$ :**

wie im ortsfesten Äquatorial-  
system, Winkeldistanz vom  
Äquator ( $-90^\circ \dots +90^\circ$ )



## 2.1 Positionen der Himmelskörper

### Sterne = “Fixsterne”

Scheinbar zeitlich feste Anordnung am Himmel:  
Sternbilder ( Planeten = “Wandelsterne” )

“Fest” nach historisch-menschlichem  
Maßstab:

Position der Sterne am Himmel **veränderlich**:

- 1) Himmelskugel dreht sich scheinbar wegen **Erdrotation** (täglich)
- 2) **Erdbahn** um die Sonne, **Parallaxe** (jährlich) -> Entfernungsmessung
- 3) **Eigenbewegung** der Sterne: **Pekuliarbewegung**, bis 10" pro Jahr  
(**Radialgeschwindigkeit**, Änderung in Entfernung, bis zu ~ 300km/s)
- 4) **Kreiselbewegung** der Erde in 26000 Jahren: **Präzession**
- 5) Bahnbewegung von **Mehrfachsternen** (Massenbestimmung)
- 6) **Aberration**: Erdbewegung gegen Lichteinfallrichtung
- 7) **Refraktion** der Erdatmosphäre bis 30'





## 2.1 Positionen der Himmelskörper

**Parallaxe:** Nahe Sterne werden auf verschiedene Positionen am Himmelshintergrund projiziert, wenn sich die Beobachterposition verändert

-> Erdbahn -> jährliche **Parallaxe  $\pi$**

$$\pi \equiv \alpha \simeq \sin \alpha = \frac{a}{R}$$

$a$  = Abstand Erde-Sonne = 150 Mio km  
( =1 AE, astronomische Einheit )

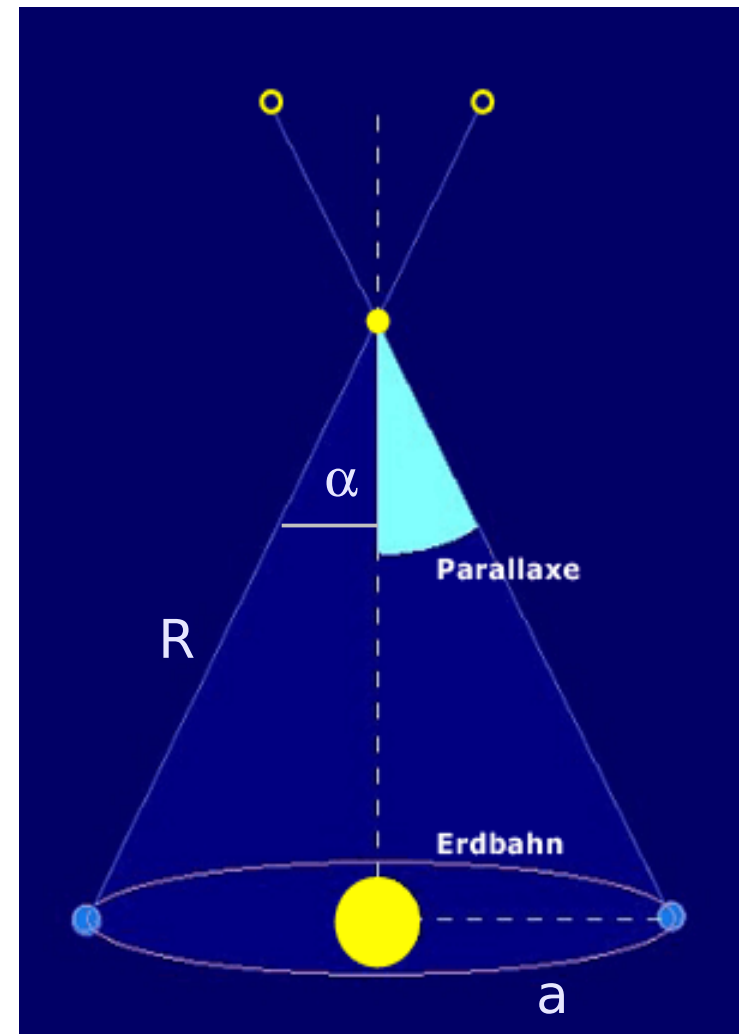
$R$  = **Abstand des Sterns**

-> **Entfernungsmessung**

$$\pi["] = 1 / R[\text{pc}]$$

-> **Definition: "parsec", pc**

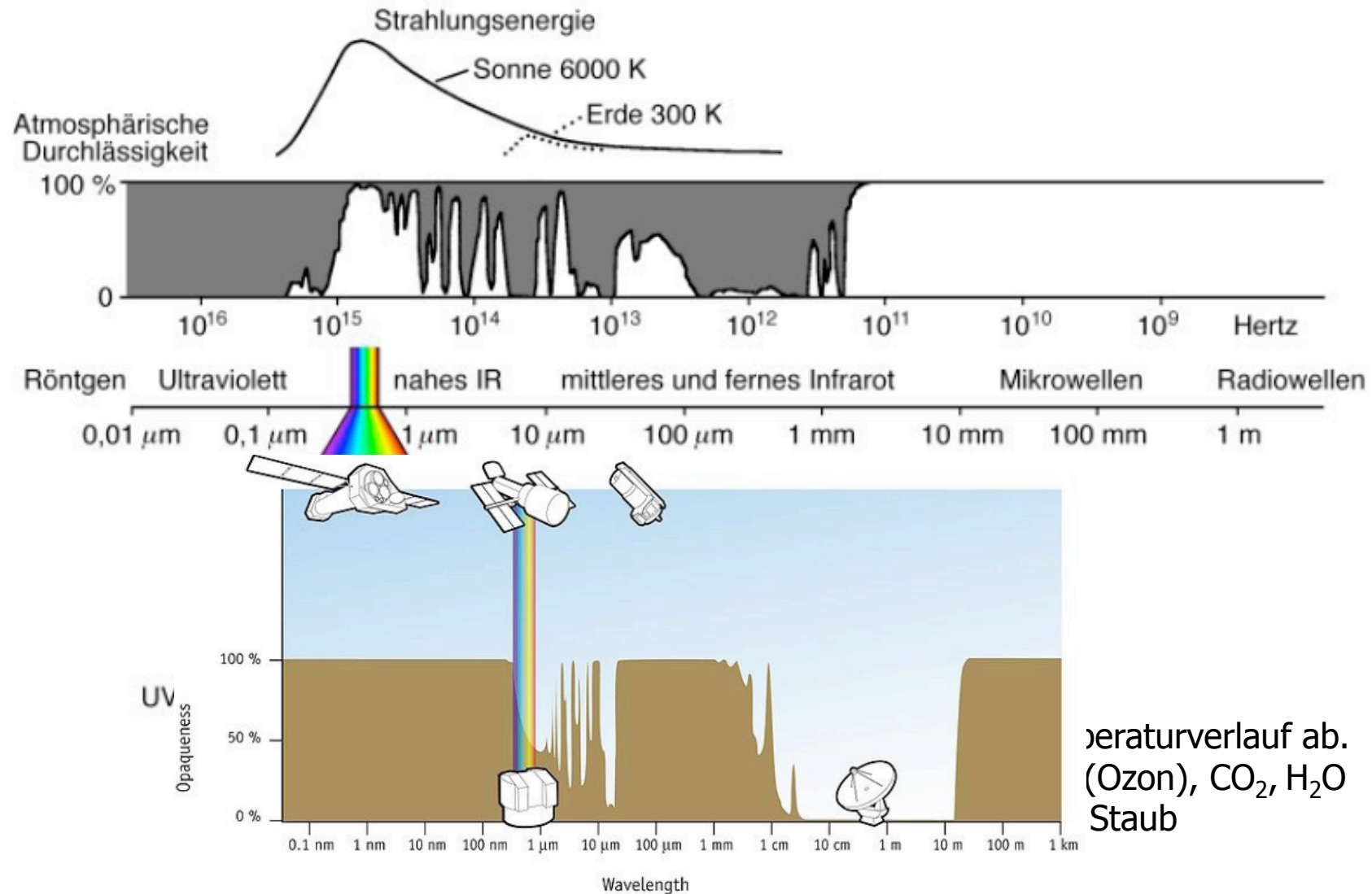
$$1\text{pc} = 206,265\text{AE} = 3.26L_j$$



# Themen heute

- Sternpositionen und Himmelskoordinaten
- **Teleskope, Aufloesung und Wellenlaengen**
- Strahlung, Sternklassifikation
- Sonnensystem, Keplergesetze und Exoplaneten
- ISM und Sternentstehung
- Sternentwicklung

# Transparenz der Erdatmosphäre I



# Auflösung eines Teleskops

$$r_{\text{Airy}} = m * z\lambda / (2a) \\ = m * f\lambda / D$$

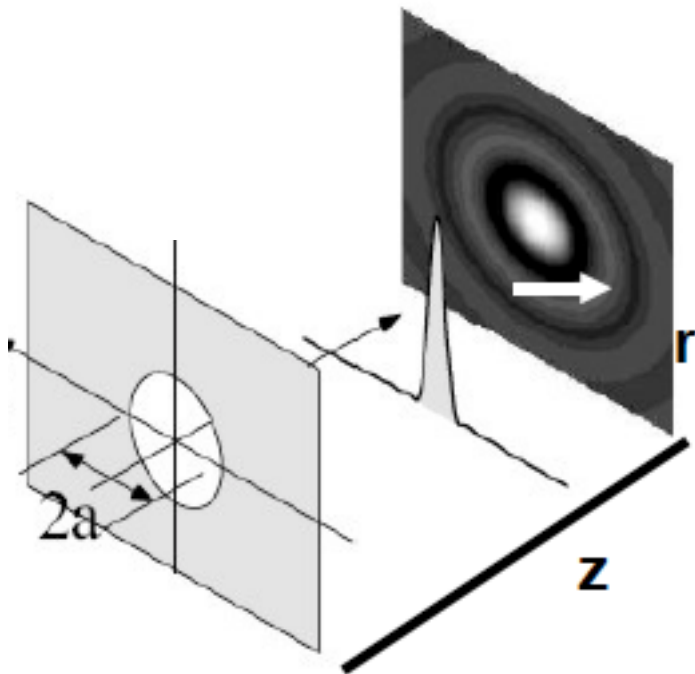
f: Fokusaenge

D: Teleskopdurchmesser

$\phi$ : Auflöesung

→ Im Fokus:  $\phi = m * \lambda / D$

Mit  $m=1.22$  im 1. Minimum



Beugung an Kreisöffnung:  
Airy-Scheibe (1835)



Beispiele:

Optisch:  $\lambda=550\text{nm}$ ,  $D=8\text{m} \rightarrow \phi=0.02''$

Mit infrarot:  $\lambda=12\mu\text{m}$ ,  $D=8\text{m} \rightarrow \phi=0.38''$

Radio:  $\lambda=1.2\text{cm}$ ,  $D=100\text{m} \rightarrow \phi=38''$

Radio Interferometer:

$\lambda=1.2\text{cm}$ ,  $D=10\text{km} \rightarrow \phi=0.3''$

# Szintillation und Seeing

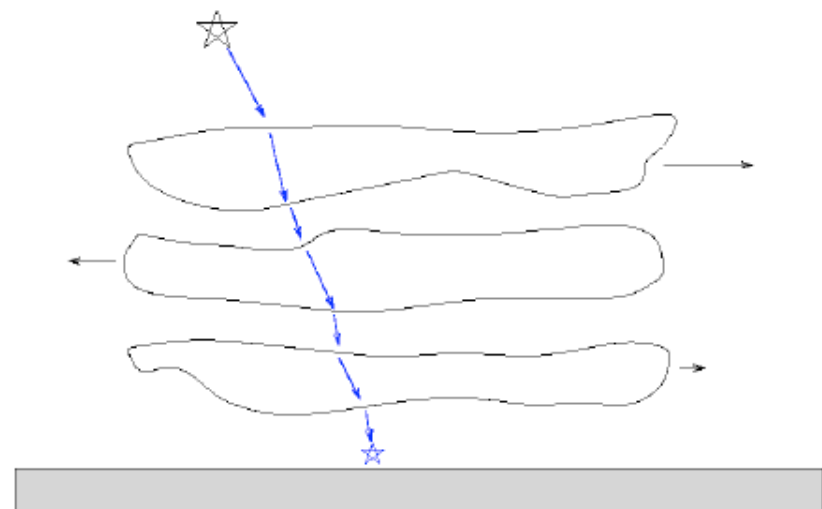
- Aufsteigende Blasen, sich verschiebende Schichten der Atmosphäre koennen schnelle Bewegungen und Helligkeitsaenderungen bewirken

→ Das Seeing ist definiert durch die Halbwertsbreite des Bildes einer Punktquelle

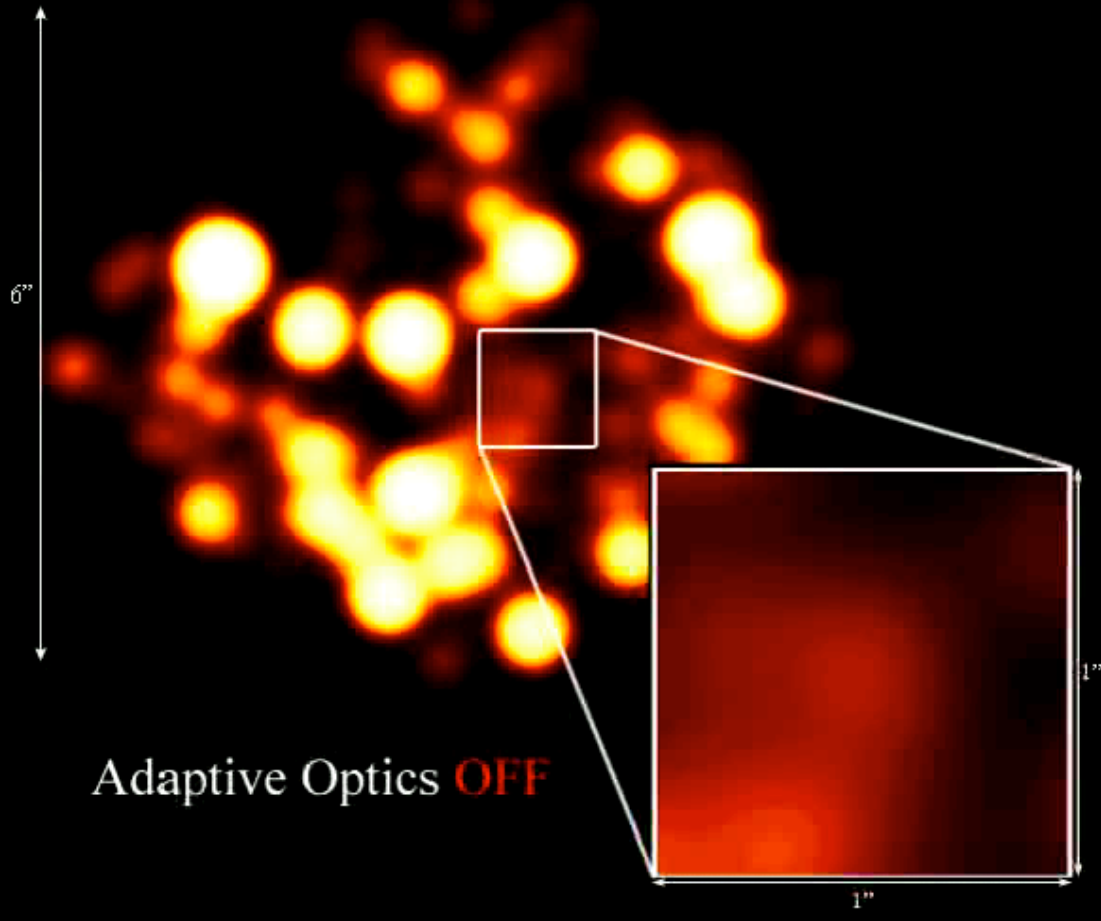
Oftmals Seeing im Optischen 1-2". Beste Standorte Hawaii, Chile mit Seeing von ca. 0.5" ueber 50% der Zeit. Optimal ca. 0.25".



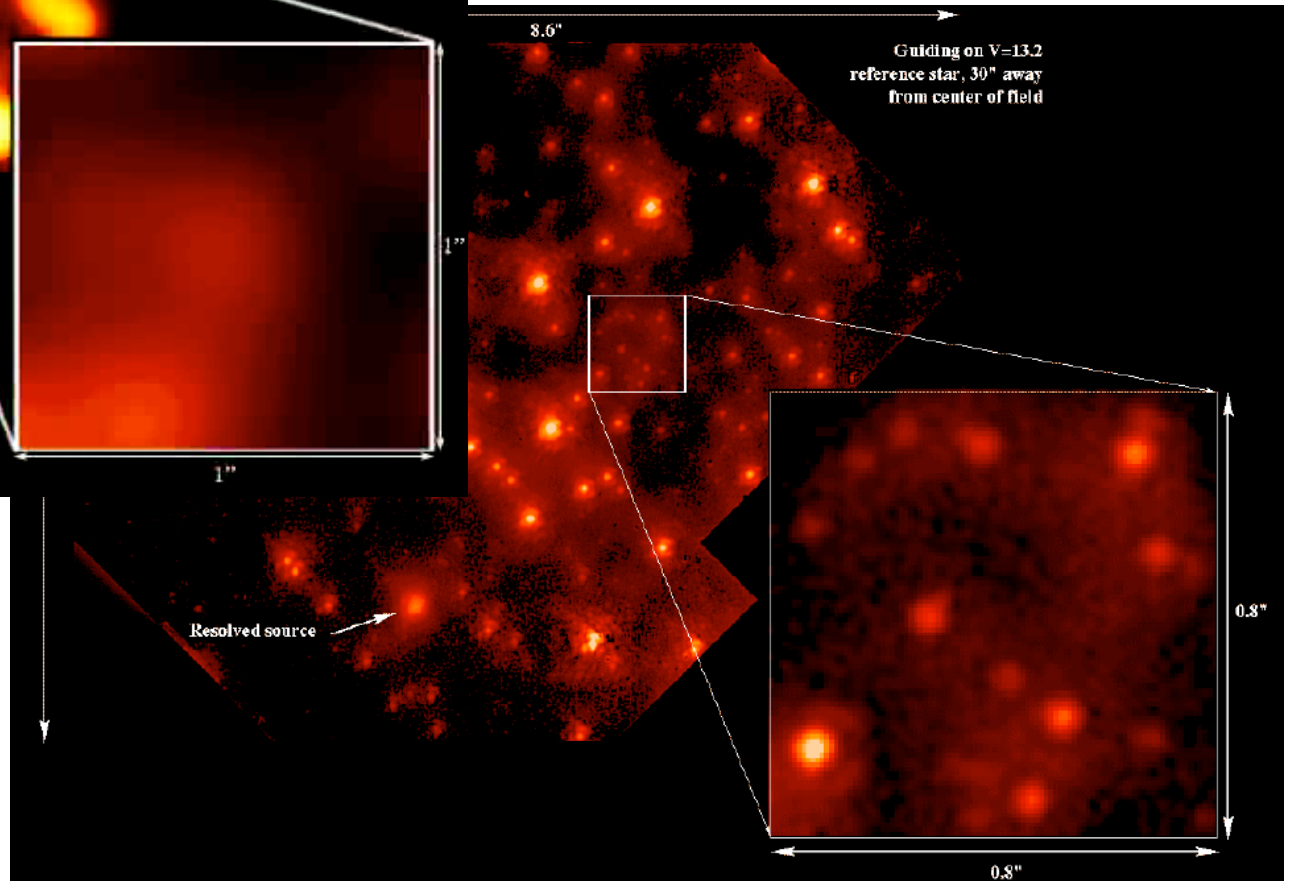
→ Zeit



# The Galactic Center at 2.2 microns



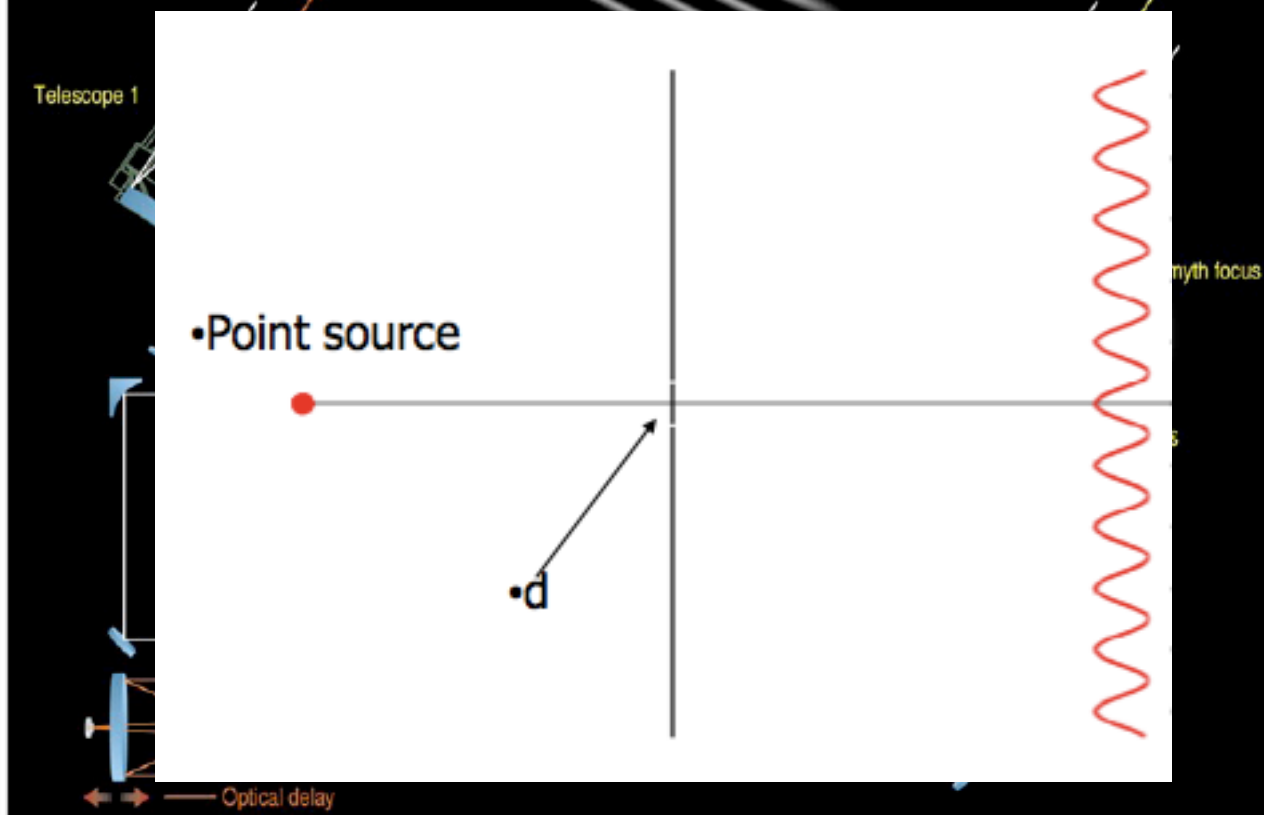
Ohne und mit  
aktiver Optik



**MIDI**  
**VLTI**

-  
**Interfero-  
metrie  
mit  
2 VLTs**

Auflösung eines Interferometers  $\lambda/(2D)$ , wobei D nun der Abstand der Antennen ist (Minimum eines klassischen Doppelspaltexperiments).



Overview of the VLT Interferometer

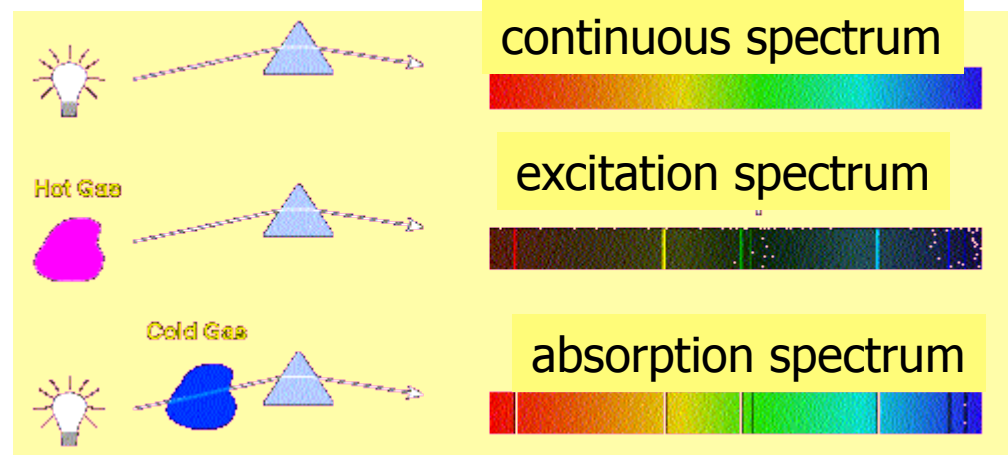
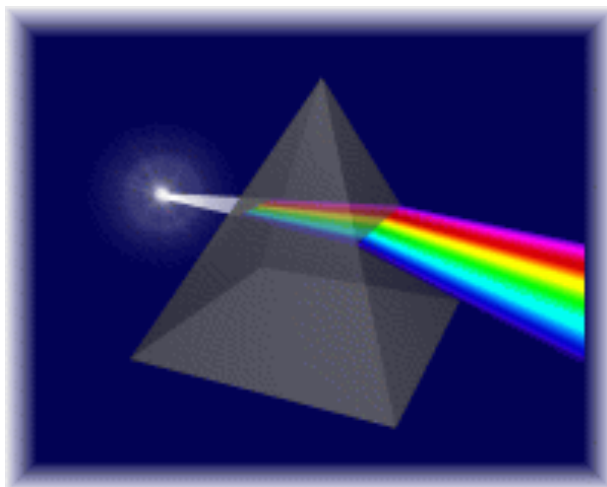
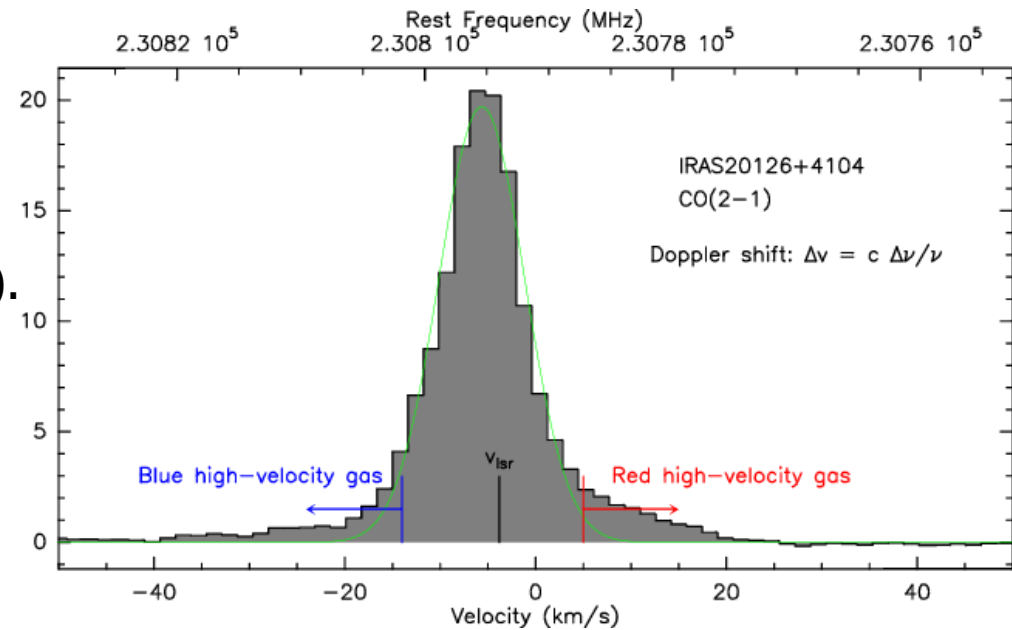
# Breitbandbeobachtungen und Spektroskopie II

- Strahlung wird aufgespalten durch Prisma, Gitter oder Schlitz

- Spektrale Auflösung  $A = \frac{\lambda}{\Delta\lambda}$

- im Optischen und Nahinfraroten ueblicherweise zwischen 100 und ein paar 1000 (max.  $10^5$ ).
- im Radiobereich viel hoeher

- Geschwindigkeitsaufloesung:  
 $\Delta v = c * \Delta\lambda/\lambda = c * \Delta\nu/\nu$





# Radioastronomie

- Ueberdeckt einen grossen Wellenlaengenbereich. Historisch cm Wellen, aber sowohl m-Wellen als auch submm-Wellenlaengen werden heute zu der Radioastronomie gezaehlt.
- Typische Prozesse:
  - Ionisiertes Gas bei cm-Wellenlaengen durch Frei-Frei Emission.
  - Synchrotron Emission bei cm-Wellenl.
  - Kalter Staub bei (sub)mm-Wellenlaengen
  - Sehr viele molekulare Linien ueber den ganzen Spektralbereich (hohe spektrale Aufloesung).
  - Atomarer Wasserstoff
- Wegen  $\lambda/D$  werden grosse Teleskope benoetigt. In der Radioastronomie ueblicherweise durch Interferometer realisiert.



# Themen heute

- Sternpositionen und Himmelskoordinaten
- Teleskope, Aufloesung und Wellenlaengen
- **Strahlung, Sternklassifikation**
- Sonnensystem, Keplergesetze und Exoplaneten
- ISM und Sternentstehung
- Sternentwicklung

# **Strahlung/ Sternklassifikation**

## 4.2. Strahlungsprozesse

### Thermisches Gleichgewicht:

#### Kirchhoff-Planck-Gesetz:

Intensität als Funktion der Frequenz  $\nu$  :

$$B_{\nu}(T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{\exp(h\nu/k_B T) - 1} \quad \text{in [erg/(Hz s cm}^2 \text{ sr)]}$$

Intensität als Funktion der Wellenlänge  $\lambda$ :

$$B_{\lambda}(T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp(hc/\lambda k_B T) - 1} \quad \text{in [erg/(s cm}^3 \text{ sr)]}$$

**Beachte** bei Umrechnung:  $\lambda\nu = c$ , also  $d\lambda/d\nu = -\lambda^2/c$

$$B_{\lambda} \neq B_{\nu}, \quad B_{\lambda} d\lambda = B_{\nu} d\nu$$

## 4.2. Strahlungsprozesse

### Thermisches Gleichgewicht:

#### Wien'sches Verschiebungsgesetz

$$\nu_{max} \propto T$$

-> Maximum von  $B_\nu$ :

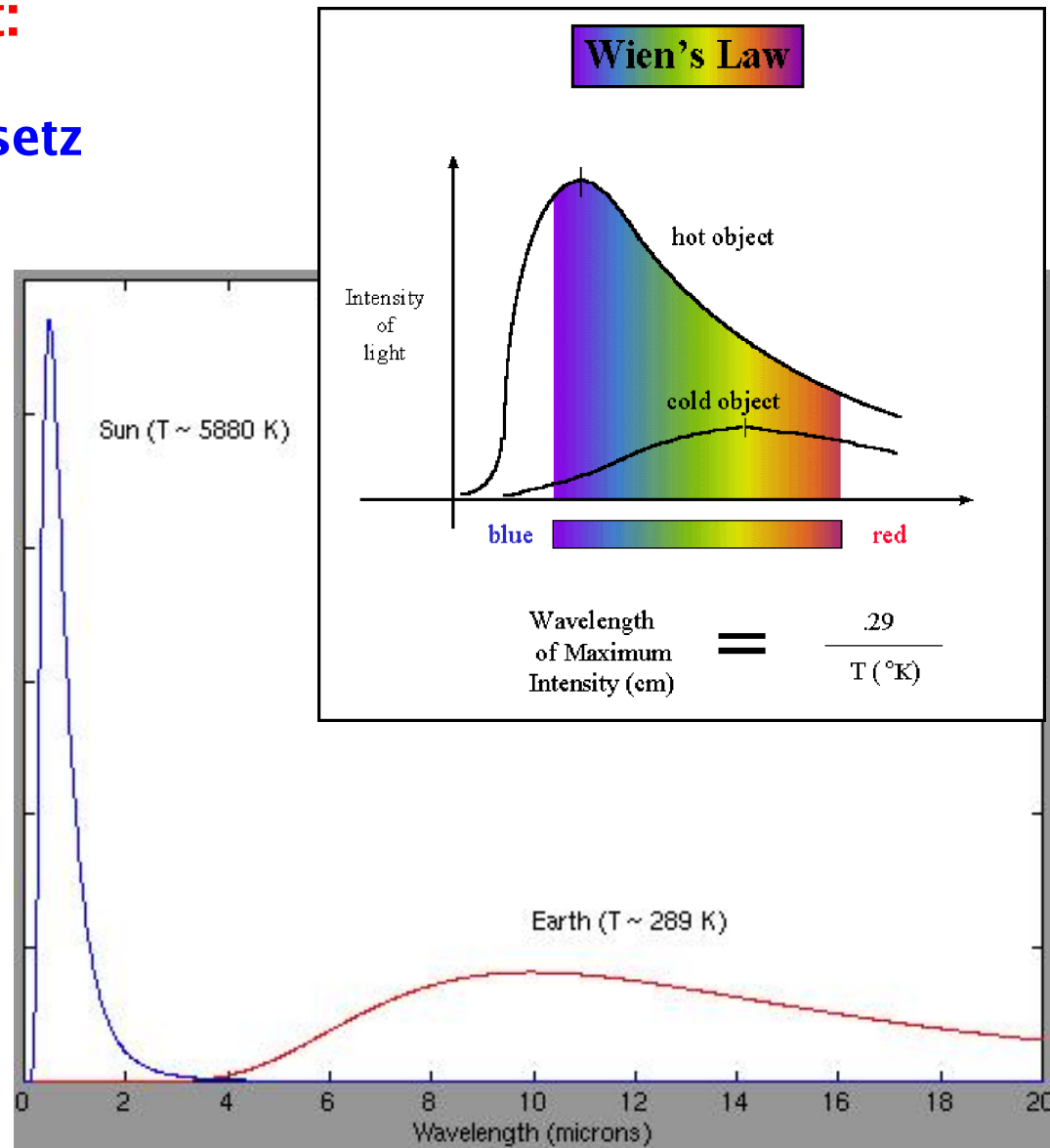
$$\nu_{max} = 6 \times 10^4 T [K] \text{ MHz}$$

-> Max. von  $B_\lambda$ :

$$\lambda_{max} = 0.29 \text{ cm} / T [K]$$

-> Beispiele:

- Erde: im FIR
- Sonne: im Optischen (grün)



## 4.3. Strahlungsgrößen

### “Helligkeit” eines Sterns

**Historisch:** Einteilung der Sterne in  
**Magnituden = “Größen”klassen = Helligkeitsklassen**

-> **Hipparchus (190-120 v. Chr.):**

Einteilung aller sichtbaren Sterne in 6 Größenklassen / **Magnituden**

-> 1. Magnitude ( $m = 1$ ) = hellste Sterne

-> 6. Magnitude ( $m = 6$ ) = Limit der Sichtbarkeit

-> **Pogson (1856): Numerische Skala:**

->  $m = 1$  Stern ist **100x heller** als  $m = 6$  Stern

->  $m = 1$  Stern ist 2.512 x heller als  $m = 2$  Stern

->  $m = 0$  ist 2.512 x heller als  $m = 1$

->  $m = -1$  ist 2.512 x heller als  $m = 0$

## 4.3. Strahlungsgrößen

### Strahlungstrom eines Sterns:

**Mittlerer Strahlungsstrom** von einem Punkt auf der Sternoberfläche in alle Richtungen **entspricht**

**Mittelwert des Strahlungsstroms** von allen Punkten der Sternoberfläche in eine Richtung (also zum Beobachter)

**Intensität  $I_\nu$**  wichtig bei aufgelöster Sternoberfläche (Sonne)

**Strahlungsstrom  $F_\nu$**  wichtig, wenn nur Gesamtfluß beobachtet wird

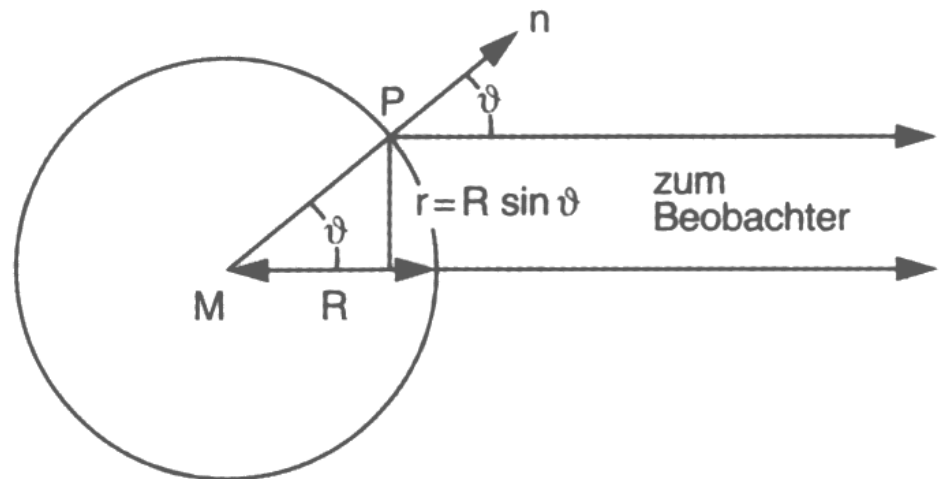
-> Leuchtkraft eines Sterns:

$$L \equiv 4 \pi R^2 F$$

Dimension: Energie/Zeit

Sonne:  $L_\odot = 3.82 \times 10^{33}$  erg/s

Überriesen:  $L = 10^6 L_\odot$



## 4.3. Strahlungsgrößen

### Helligkeit & Strahlungsfluß::

-> Meßwert hängt vom Detektor ab, “Empfindlichkeitsfunktion”  $E_\lambda$

-> Monochromatischer Strahlungsfluß des Sterns bei Abstand d:

$$f_\lambda = \frac{R^2}{d^2} F_\lambda$$

-> gemessener Gesamtstrahlungsfluß:

$$S = \int_0^\infty f_\lambda E_\lambda d\lambda$$

-> beobachtete Strahlungsflüsse von  $S_1 / S_2 \sim 10^{10}$

-> **Helligkeit definiert als Logarithmus des Strahlungsfluß**

-> **logarithmische Helligkeitsskala**     $m = -2.5 \log(S) + \text{const}$

Einheit [m] : mag (Magnitude) ;

Helligkeitsunterschiede:

$$m_1 - m_2 = -2.5 \log ( S_1 / S_2 )$$



## 4.3. Strahlungsgrößen

### Absolute Helligkeit eines Sterns:

-> absolute Magnitude  $M$  bei Norm-Entfernung von 10pc

-> Entfernungsmodul:

$$m - M = 5 \log\left(\frac{d[\text{pc}]}{10}\right) = -2.5 \log\left(\frac{10\text{pc}}{d}\right)^2$$

-> Absolute Helligkeiten: Sonne:  $M_{\text{vis}} \sim M_{\text{bol}} = 4.75$

Sirius (2.64 pc) :  $m = -1.46$ ,  $M = 1.43$ ;

Rigel (240 pc):  $m = 0.12$ ,  $M = -6.78$

### Bolometrische Magnitude:

-> Spiegelt die Gesamtleuchtkraft eines Sterne wieder

(über alle Frequenzen): -> bolometrische Magitude:  $m_{\text{bol}}$

Farbe, Farbindex F.I. :  $(U-B) = m_U - m_B$ ,  $(B-V) = m_B - m_V$ , ...

## 6.2. Sternklassifikation

**Leuchtkraft** des Sterns (Definition):

$$L = 4 \pi R^2 F$$

->  $F$  ist ausgestrahlte Energie pro Fläche

Für Schwarzkörper: Stefan-Boltzmann-Gesetz:

$$F = \sigma_{SB} T^4 \quad \sigma_{SB} = 5.67 \times 10^{-5} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ K}^{-4}$$

**Aber:** Sterne sind keine schwarzen Körper!!

-> Definition einer

**“Effektivtemperatur”:**

$$T_{eff} = \left( \frac{L}{\sigma_{SB} 4 \pi R^2} \right)^{1/4}$$

Effektivtemperatur keine echte Temperatur, sondern quantifiziert Energieausstrahlung / Fläche

Dennoch:  $T_{eff}$  ist typische Temperatur der Sternatmosphäre

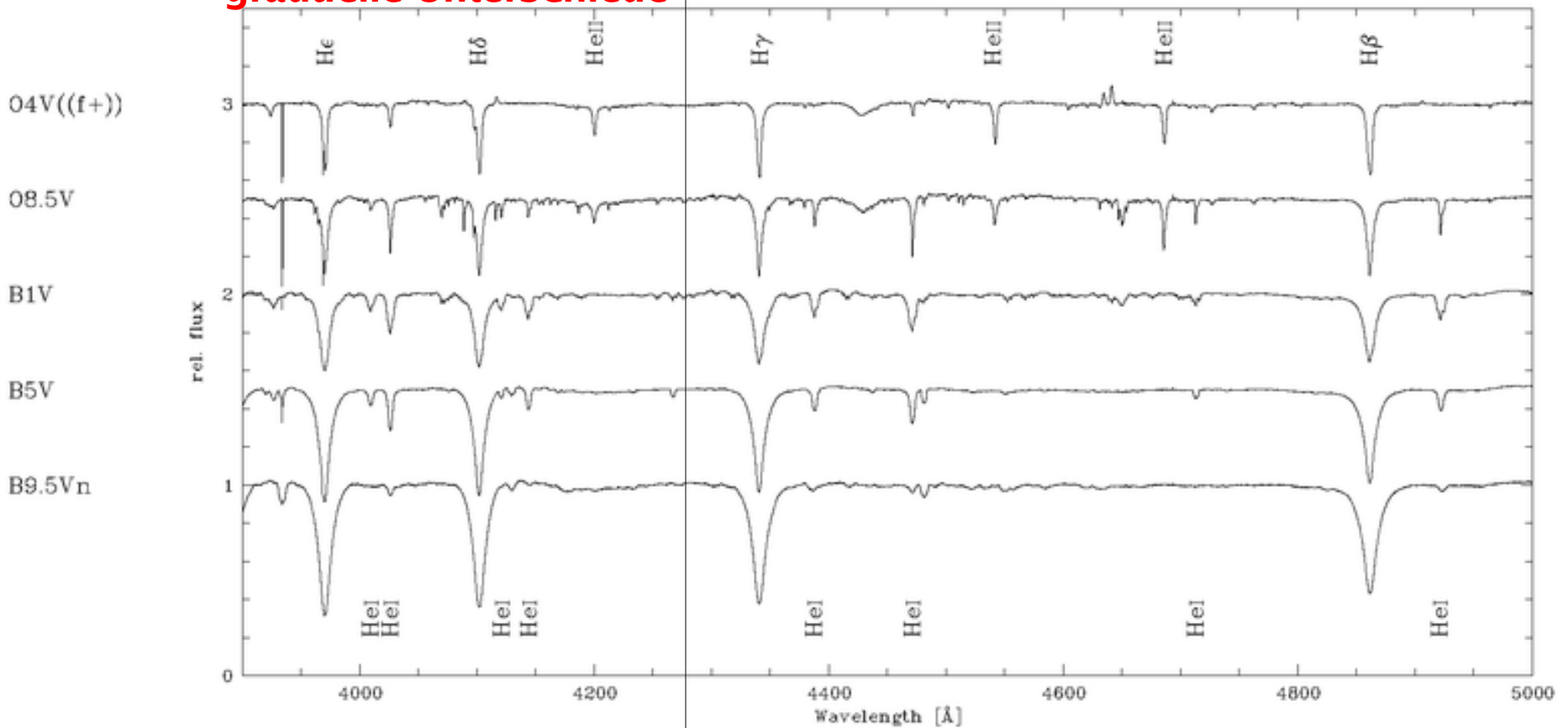
->  $T_{eff}$  ist der wichtigste Sternparameter, der aus der Analyse des Sternlichts gewonnen werden kann ...

## 6.2. Sternklassifikation

Sterne haben verschiedene Temperatur / Effektivtemperatur

-> verschiedene spektrale Verteilungen, Linien, und Linienprofile

graduelle Unterschiede

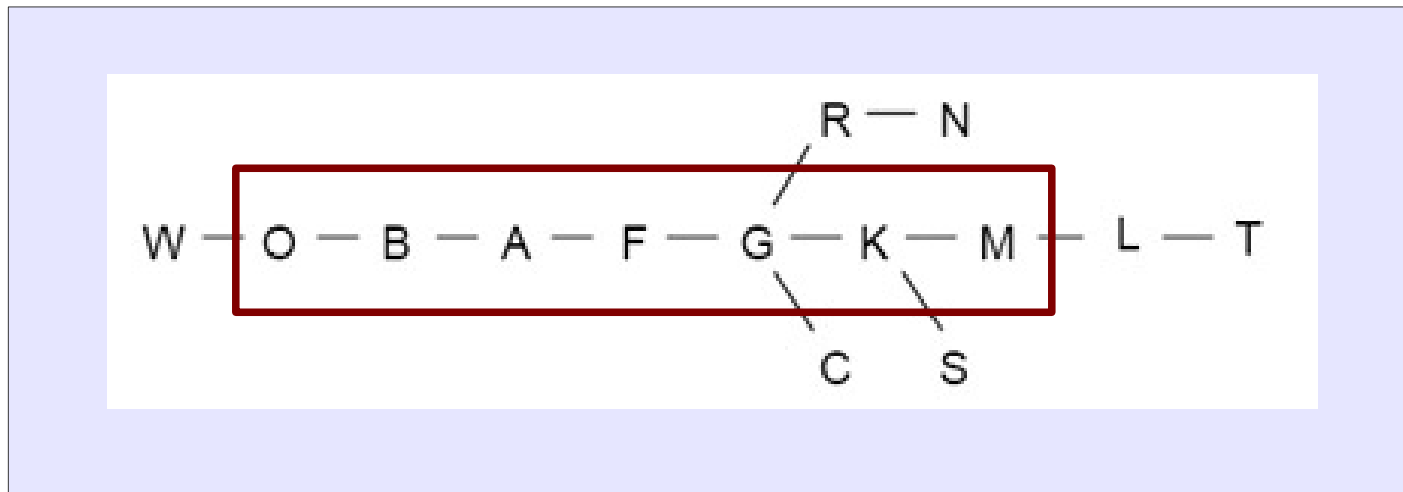


## 6.2. Sternklassifikation

### Spektral-Klassifikation

-> **Harvard-Klassifikation von Sternspektren:**

ein-dimensionale Sequenz von **Spektren**,  
korreliert mit **Sternfarbe**, **Farb-Index**, also **Temperatur**



## 6.2. Sternklassifikation

### Spektral-Klassifikation

-> Spektraltyp SpT, absolute visuelle Magnitude, Farbindex, Effektiv-Temperatur, Farb-Temperatur, Bolometrische Korrektur, bolometrische Magnitude typischer Sterne

SpT	$M_V$	B-V	U-B	$T_{\text{eff}}$	$T_c$	B.C.	$M_{\text{Bol}}$
O5	-6	-0.45	-1.2	35 000	70 000	4.6	-10.6
B0	-3.7	-0.31	-1.07	21 000	38 000	3.0	-6.7
B5	-0.9	-0.17	-0.56	13 500	23 000	1.6	-2.5
A0	+0.7	0.00	0.00	9 700	15 400	0.68	0.0
A5	+2.0	+0.16	+0.09	8 100	11 100	0.30	+1.7
F0	+2.8	+0.30	+0.02	7 200	9 000	0.10	+2.7
F5	+3.8	+0.45	-0.01	6 500	7 600	0.00	+3.8
G0	+4.6	+0.57	+0.04	6 000	6 700	0.03	+4.6
G5	+5.2	+0.70	+0.20	5 400	6 000	0.10	+5.1
K0	+6.0	+0.84	+0.46	4 700	5 400	0.20	+5.8
K5	+7.4	+1.11	+1.06	4 000	4 500	0.58	+6.8
M0	+8.9	+1.39	+1.24	3 300	3 800	1.20	+7.6
M5	+12.0	+1.61	+1.19	2 600	3 000	2.1	+9.8

(Aus: Scheffler/Elsässer Physik der Sterne und der Sonne)

## 6.2. Sternklassifikation

### Leuchtkraftklasse:

Sterne gleicher Spektralklasse (Sp) können verschiedene Leuchtkraft haben

-> **Leuchtkraftklasse (LC)**

-> MK-Klassifikation (Morgan & Keenan)

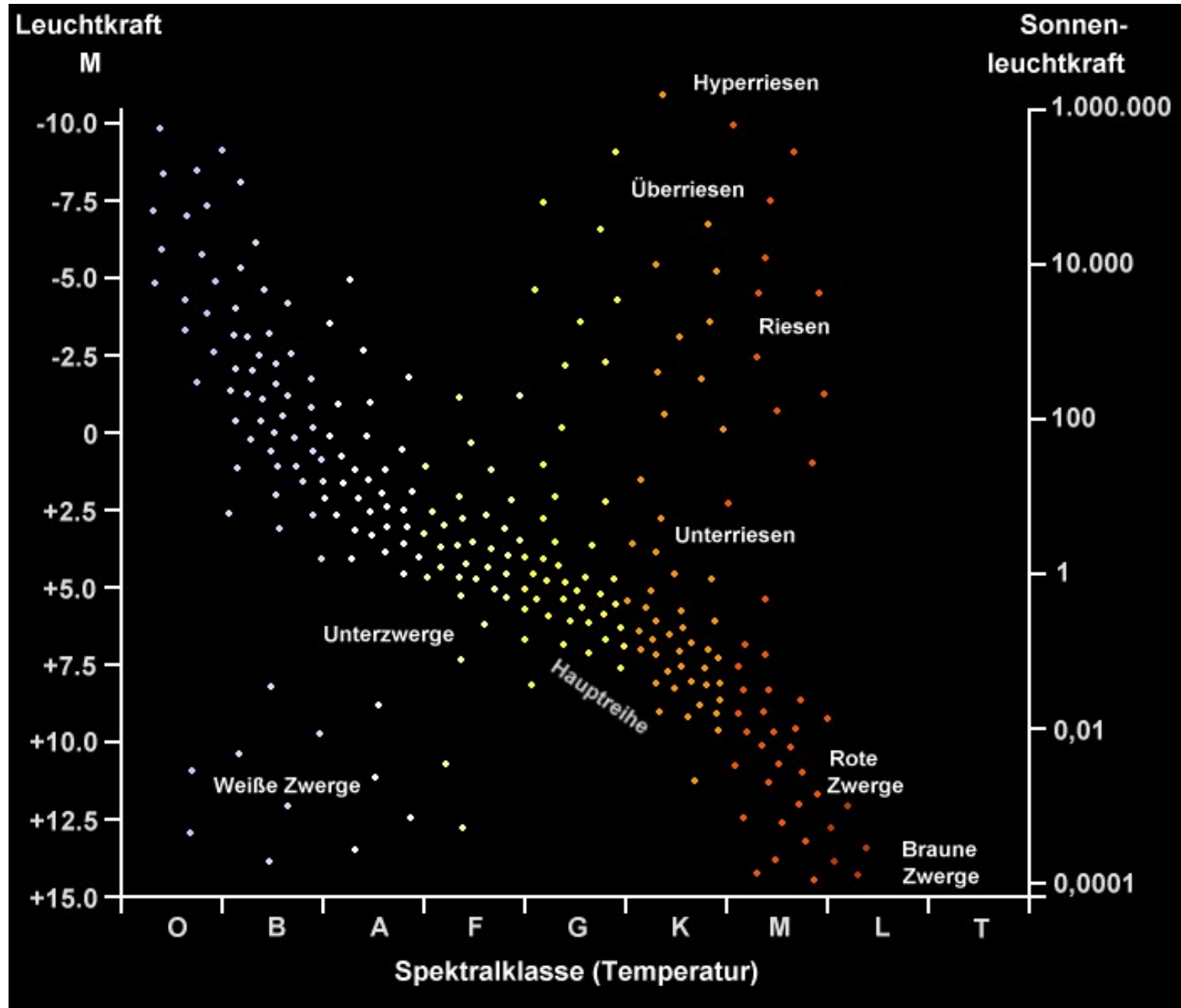
-> Grund: **Radius** der Sterne:

$$L = 4 \pi R^2 F$$

$$F = \sigma_{SB} T^4$$

**Klassen:** I = Überriesen, II = helle Riesen, III = Riesen,  
IV = Unterriesen, V = Zwergsterne, VI = Unterzwerge

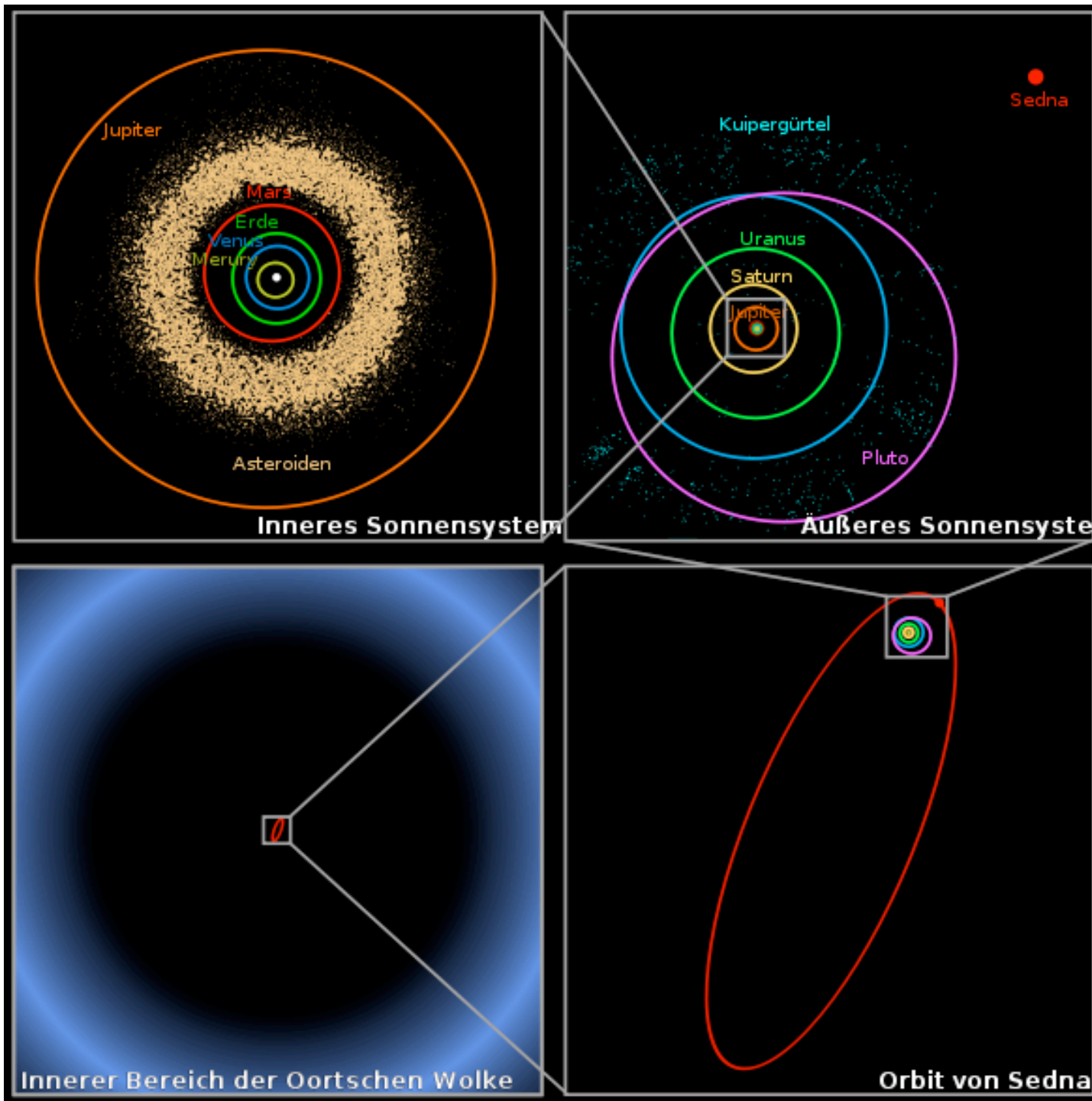
## 6.3. Hertzsprung-Russell-Diagramm



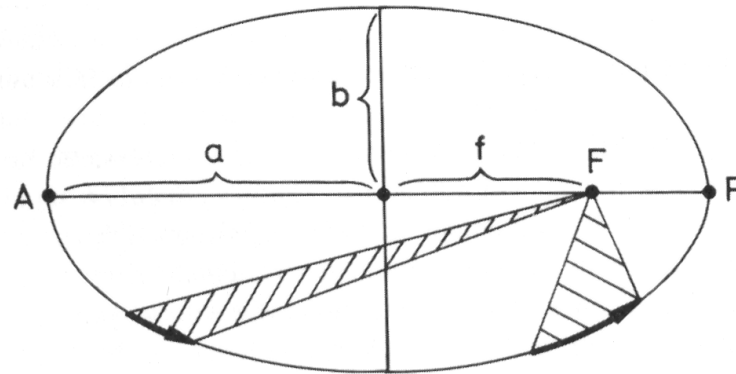
# Themen heute

- Sternpositionen und Himmelskoordinaten
- Teleskope, Aufloesung und Wellenlaengen
- Strahlung, Sternklassifikation
- Sonnensystem, Keplergesetze und Exoplaneten
- ISM und Sternentstehung
- Sternentwicklung





# Keplergesetze

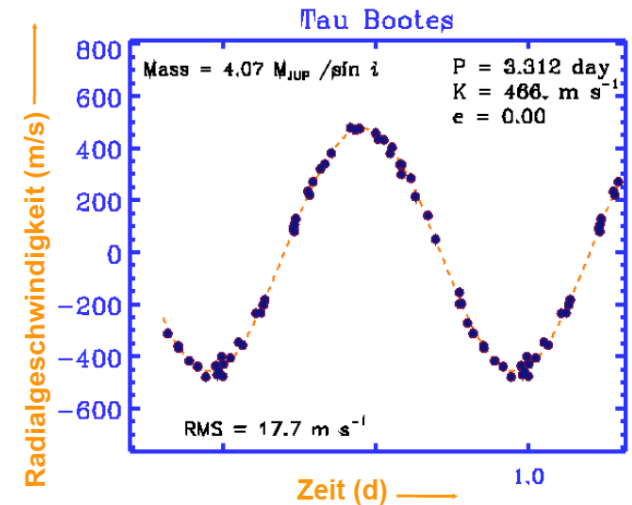
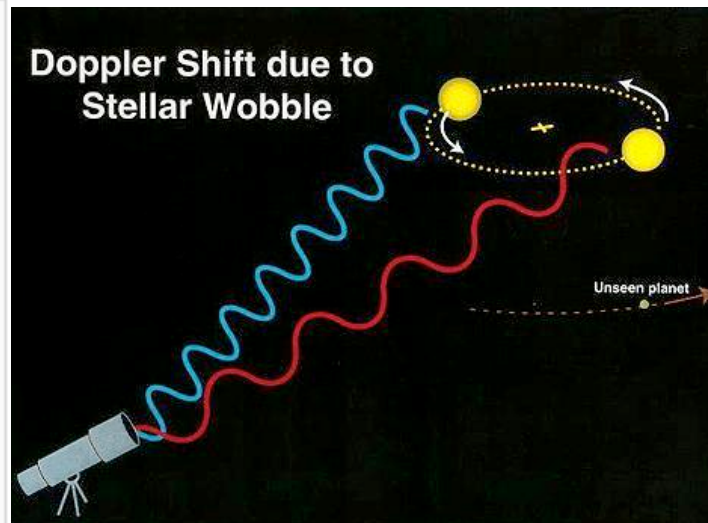
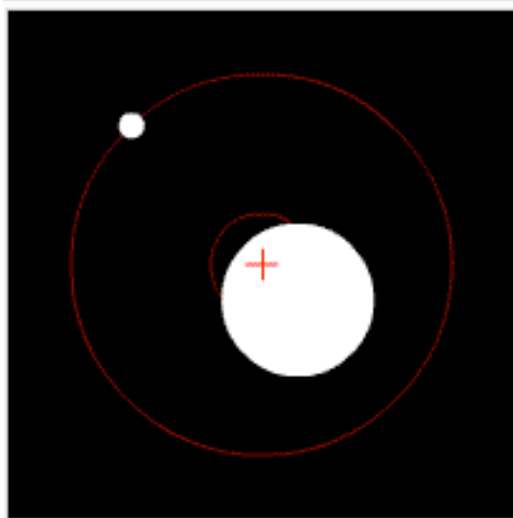


- 1.) Die Körper bewegen sich relativ zur Sonne in Ellipsen, in deren einem Brennpunkt die Sonne steht.
- 2.) Der von der Sonne zum umlaufenden Himmelskörper gezogene Radiusvektor überstreicht in gleichen Zeiten gleiche Flächen.  
→ Konstanz des Bahndrehimpulses
- 3.) Das Quadrat der Umlaufzeit  $U$  wächst proportional zur dritten Potenz der grossen Halbachse  $a$  und umgekehrt proportional zur Massensumme:

$$U^2 = 4\pi^2 a^3 / (G(m_1 + m_2))$$

Da  $m_2 \ll m_1 \rightarrow U^2$  proportional zu  $a^3$

# Radialgeschwindigkeitsmethode



Schwerpunktsatz:  $M_p a_p = M_s a_s \rightarrow M_p = M_s a_s / a_p$

Kepler 3:  $a_p^3 = G (M_s + M_p) U^2 / (4\pi^2) \sim G M_s U^2 / (4\pi^2)$

Stern ungefaehr auf Kreisbahn:  $v_s U = 2\pi a_s \rightarrow a_s = v_s U / (2\pi)$

$\rightarrow M_p = v_s * (M_s^2 U / (2\pi G))^{(1/3)}$  oder  $M_p = v_s \sqrt{(M_s a_p / G)}$

Einschraenkung:

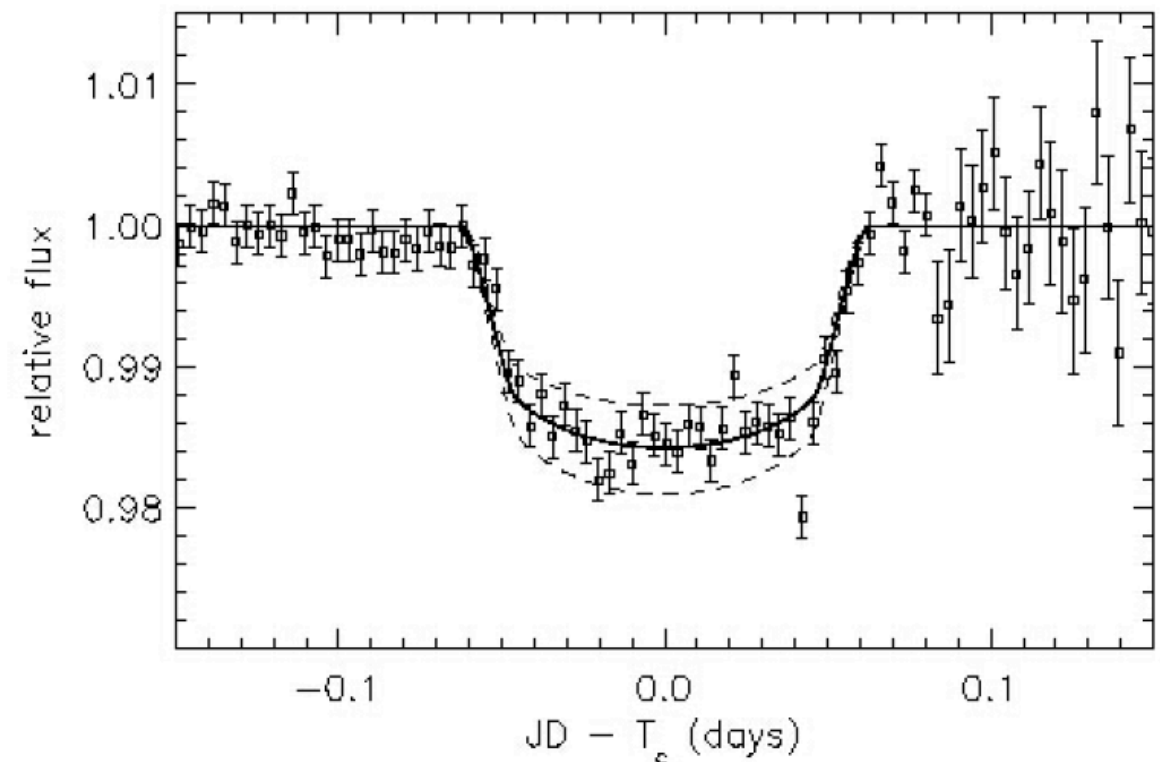
- Ueblicherweise Inklinationswinkel  $\rightarrow$  nur unteres Limit  $M_p(\sin i)$
- Oftmals keine Kreis- sondern Ellipsenbahnen  $\rightarrow$  Exzentrizitaet

( $M_s, M_p, a_s, a_p$ : Massen und Halbachsen von Stern & Planet  
U: Umlaufzeit)

# Detektionstechniken

- Pulsarplaneten
  - erste extrasolare
- Radialgeschwindigkeit
  - bisher effizienteste
- Direktes Abbilden
  - technisch schwierig
- Astrometrie
  - Positionsveränderung

## Bedeckungen



- Bedeckungen/Transits
  - Abschwächung des Sternlichts beim Vorübergang eines Planeten - Vergleiche auch Venustransit
- Microlensing

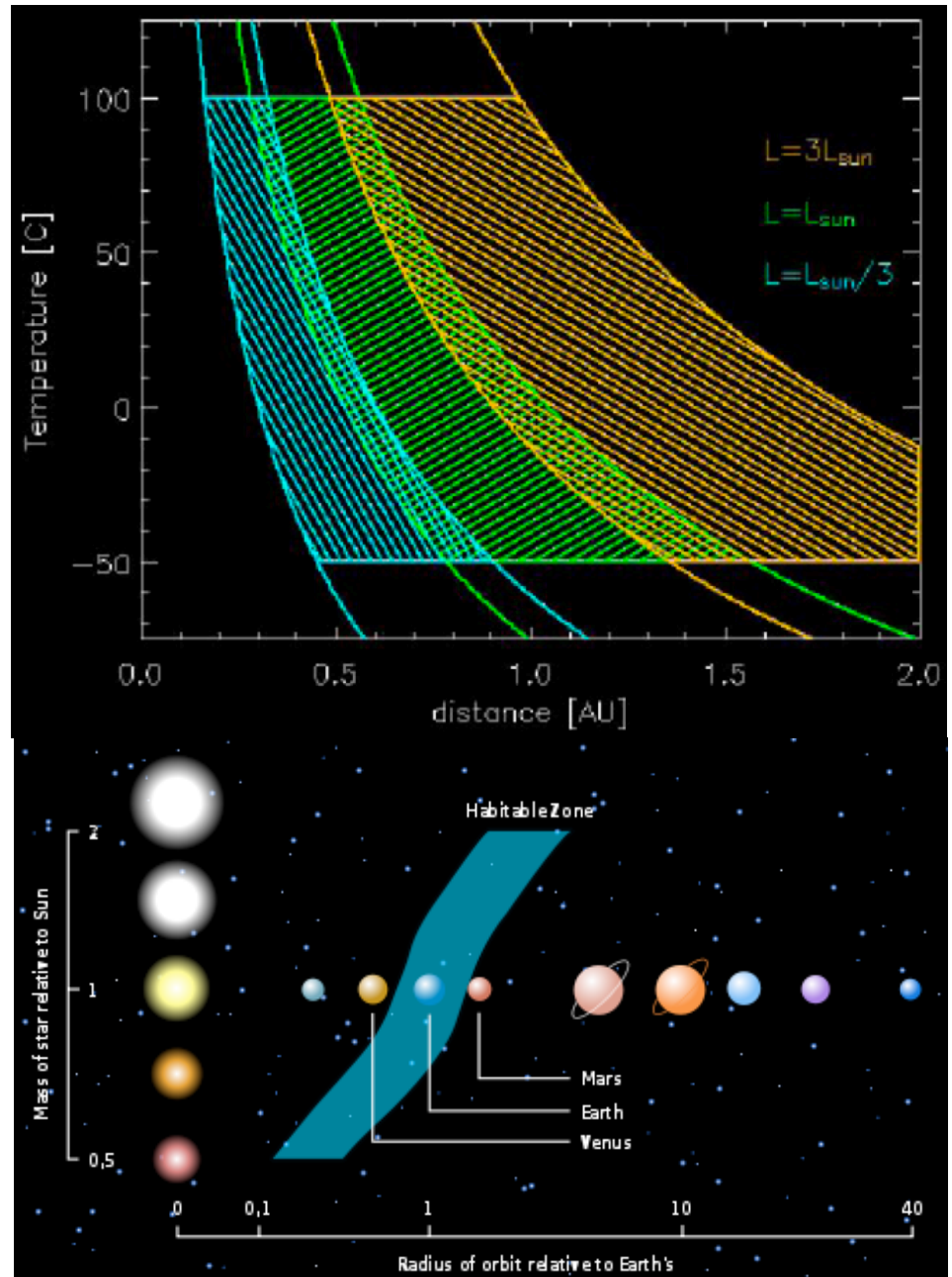
# Habitable Zone

Einfache Abschaetzung fuer T von fluessigem Wasser:

$$T = \sqrt[4]{\frac{(1 - A)L_{\text{sun}}}{16\pi\sigma d^2}}$$

- T: Temperatur Planet
- $\sigma$ : Stefan-Boltzmann-Konstante
- $L_{\text{sun}}$ : Leuchtkraft des Sterns
- d: Abstand Stern-Planet
- A: Albedo/Reflektivitaet
  - Ozeane: 7-9%
  - Wald: 12%
  - Sand: 30%
  - Schnee: 60%
  - Wolken: 30-90%
  - Mittelwert: 30%

In Realitaet komplizierter da auch Atmosphaere mit beruecksichtigt werden muss.



# Themen heute

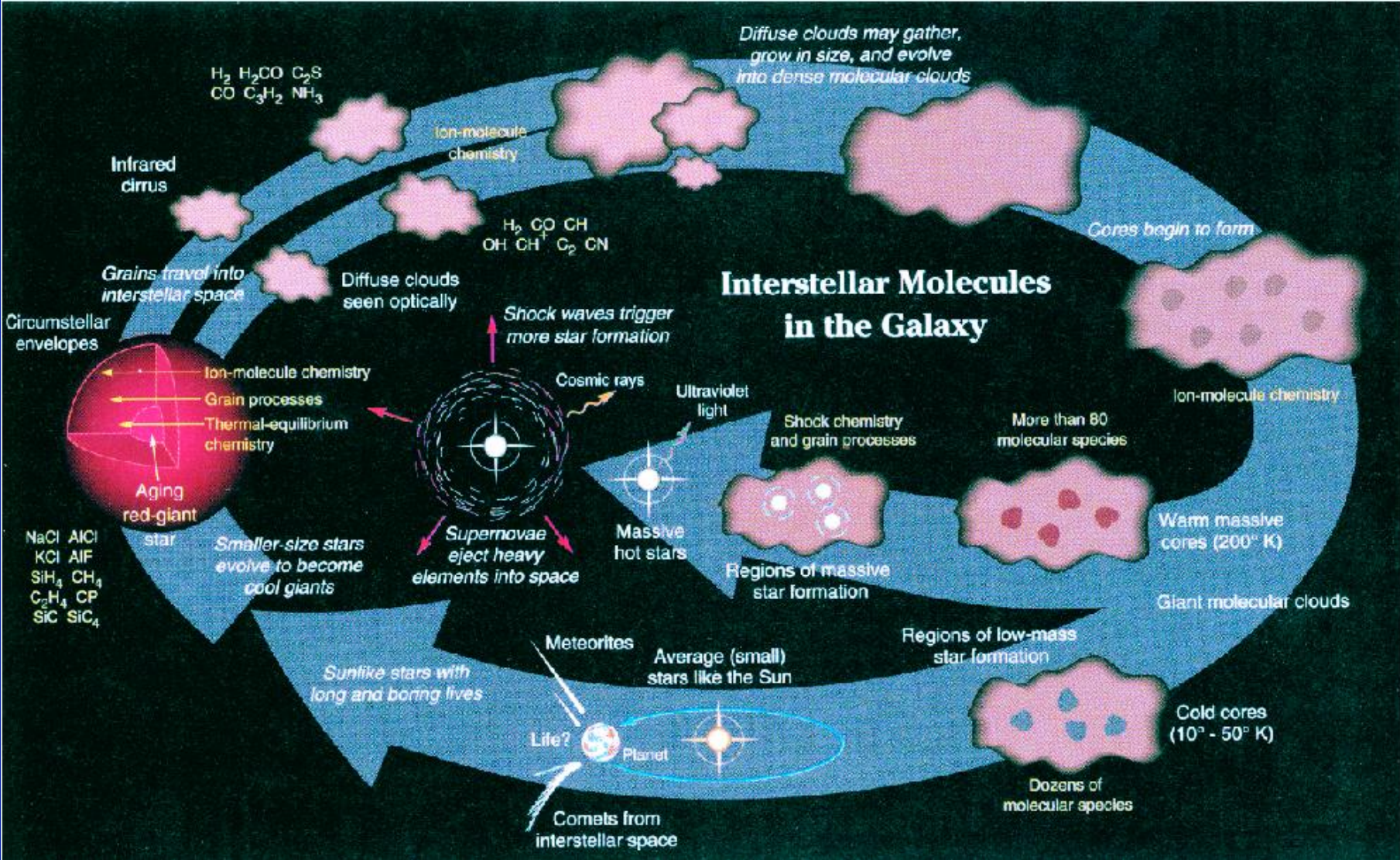
- Sternpositionen und Himmelskoordinaten
- Teleskope, Aufloesung und Wellenlaengen
- Strahlung, Sternklassifikation
- Sonnensystem, Keplergesetze und Exoplaneten
- **ISM und Sternentstehung**
- Sternentwicklung

# Ueberblick ueber die Komponenten

Phase	$n$ [cm <sup>-3</sup> ]	$T$ [K]	$f$	$M$ [ $10^9 M_{\odot}$ ]
Hot ionised medium	0.003	$10^6$	0.5	0.1
Warm ionised medium	0.3	8000	0.1	1.0
Warm neutral medium (HI)	0.5	8000	0.4	1.4
Cold neutral medium (HI clouds)	50	80	-	2.5
Molecular clouds	>300	10	-	2.5
HII regions	$1 - 10^5$	$10^4$	-	0.05

$f$  als Volumenfuellfaktor der Galaktischen Scheibe

# Der kosmische Zyklus





# Molekuele im All

2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	atoms
H2	C3	c-C3H	C5	C5H	C6H	CH3C3N	CH3C4H	CH3C5N?	HC9N	CH3OC2H5	HC11N	
AlF	C2H	l-C3H	C4H	l-H2C4	CH2CHCN	HCOOCH3	CH3CH2CN	(CH3)2CO				
AlCl	C2O	C3N	C4Si	C2H4	CH3C2H	CH3COOH?	(CH3)2O	NH2CH2COOH?				
C2	C2S	C3O	l-C3H2	CH3CN	HC5N	C7H	CH3CH2OH	CH3CH2CHO				
CH	CH2	C3S	c-C3H2	CH3NC	HCOCH3	H2C6	HC7N					
CH+	HCN	C2H2	CH2CN	CH3OH	NH2CH3	CH2OHCHO	C8H					
CN	HCO	CH2D+?	CH4	CH3SH	c-C2H4O	CH2CHCHO						
CO	HCO+	HCCN	HC3N	HC3NH+	CH2CHOH							
CO+	HCS+	HCNH+	HC2NC	HC2CHO								
CP	HOC+	HNCO	HCOOH	NH2CHO								
CsI	H2O	HNCS	H2CHN	C5N								
HCl	H2S	HOCO+	H2C2O	HC4N								
KCl	HNC	H2CO	H2NCN									
NH	HNO	H2CN	HNC3									
NO	MgCN	H2CS	SiH4									
NS	MgNC	H3O+	H2COH+									
NaCl	N2H+	NH3										
OH	N2O	SiC3										
PN	NaCN	C4										
SO	OCS											
SO+	SO2											
SiN	c-SiC2											
SiO	CO2											
SiS	NH2											
CS	H3+											
HF	SiCN											
SH	AlNC											
FeO(?)	SiNC											

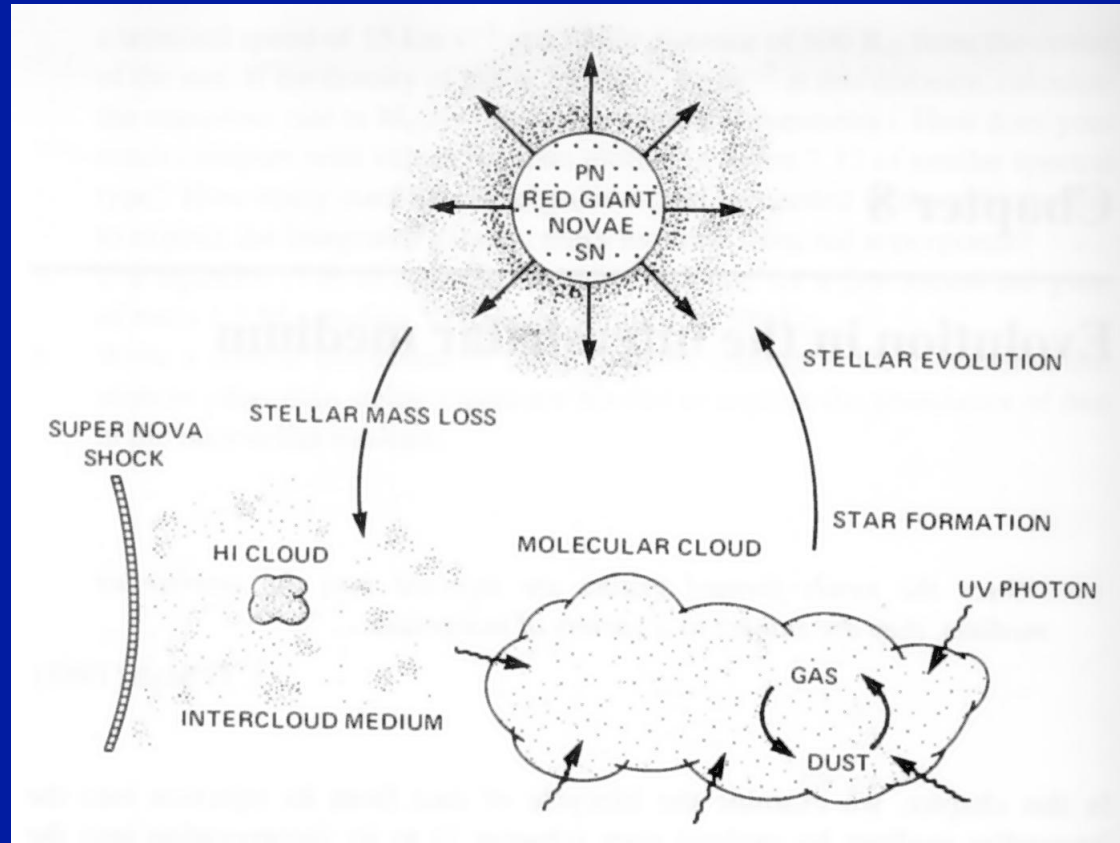
Um die 180 detektierten interstellare Molekuele (Nov. 2013) ([www.cdms.de](http://www.cdms.de)). 55 (+2 tentative) Molekueledetektionen in extragalaktischen Systemen.

Interessante Webseiten:

<http://physics.nist.gov/cgi-bin/micro/table5/start.pl> → Im ISM beobachtet

<http://www.cdms.de> → Labordaten

# Staub im Materiekreislauf



Staub wird groesstenteils in den Endstadien der Sterne produziert: Huellen von roten Riesen, planetare Nebel, Supernovae.  
Staub kann aber auch direkt im ISM entstehen

## Staubzusammensetzung:

Graphite	C
Silicon carbide	SiC
Enstatite	(Fe,Mg)SiO <sub>3</sub>
Olivine	(Fe,Mg) <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>
Iron	Fe
Magnetite	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>

## Groessenverteilung:

Zwischen 0.005 und 1μm  
 $n(a) \sim a^{-3.5}$  (a: size)  
 (Mathis, Rumpl, Nordsieck 1977)

## Gas-Staub-

## Massenverhaeltnis:

Kanonisch 1:100

Neuere Arbeiten

1:150 (Draine et al. 2009)

# Jeans-Analyse

Die Jeans-Längen  $\lambda_j$  und Jeans-Massen  $M_j$ , oberhalb derer Molekülwolken gravitativ instabil werden und kollabieren, sind:

$$\lambda_j = (\pi a_t^2 / (G \rho_0))^{1/2} = 0.19 \text{ pc } (T / (10 \text{ K}))^{1/2} (n_{\text{H}_2} / (10^4 \text{ cm}^{-3}))^{-1/2}$$

$a_t$ : Schallgeschw.

$$M_j = a_t^3 / (\rho_0^{1/2} G^{3/2}) = 1.0 M_{\text{sun}} (T / (10 \text{ K}))^{3/2} (n_{\text{H}_2} / (10^4 \text{ cm}^{-3}))^{-1/2}$$

→ Werte darueber lassen die Wolken kollabieren. Im Umkehrschluss koennen sehr kleine und massearme Wolken leichter stabil bleiben.

Beispiel: Eine grosse Moelkuelwolke mit  $T=10\text{K}$  und  $n_{\text{H}_2}=10^3\text{cm}^{-3}$

$$\rightarrow M_j = 3.2 M_{\text{sun}}$$

Um Groessenordnungen zu niedrig.

→ Andere Stabilisierungsquellen notwendig, z.B. Magnetfelder oder Turbulenz



# Anwendungen des Virialtheorems I

Wenn alle Kraefte zu schwach sind um W auszugleichen

$$1/2 (\delta^2 I / \delta t^2) = W \sim Gm^2/r$$

Daraus laesst sich eine Freifallzeit ableiten:

$$t_{ff} \sim (G\rho)^{-1/2}$$

Oder exakter fuer eine druckfreie 3D homogene Kugel

$$t_{ff} = (3\pi/32G\rho)^{1/2}$$

---

Fuer eine grosse Molekuelwolke erhaelt man:

$$t_{ff} \sim 7 \cdot 10^6 \text{ yr } (m/10^5 M_{\text{sun}})^{-1/2} (R/25 \text{ pc})^{3/2}$$

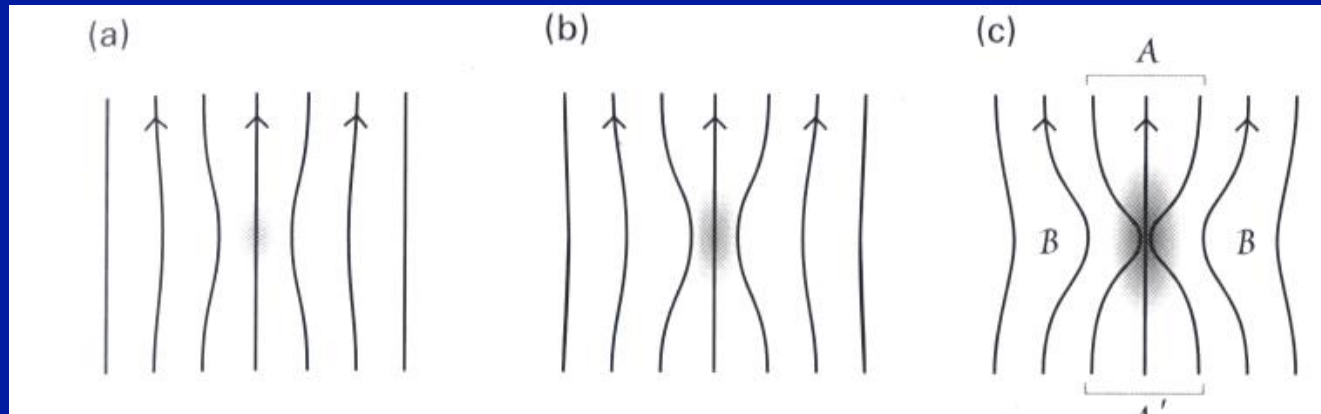
(R: Radius  
m: Masse)

Fuer einen dichten Kern mit  $\rho \sim 10^5 \text{ cm}^{-3}$  ist  $t_{ff}$  ungefaehr  $10^5 \text{ yr}$ .

Aber global kollabierende Wolken nicht beobachtet  $\rightarrow$  Andere Kraefte

# Ambipolare Diffusion

- Magnetfelder koppeln an das ionisierte Gas, dieses wiederum durch Stoesse an das neutrale Gas.



→ Neutrales und ionisiertes Gas koennen teilweise entkoppeln, so dass neutrales Gas durch Magnetfeld hindurchdiffundieren und leichter kollabieren kann.

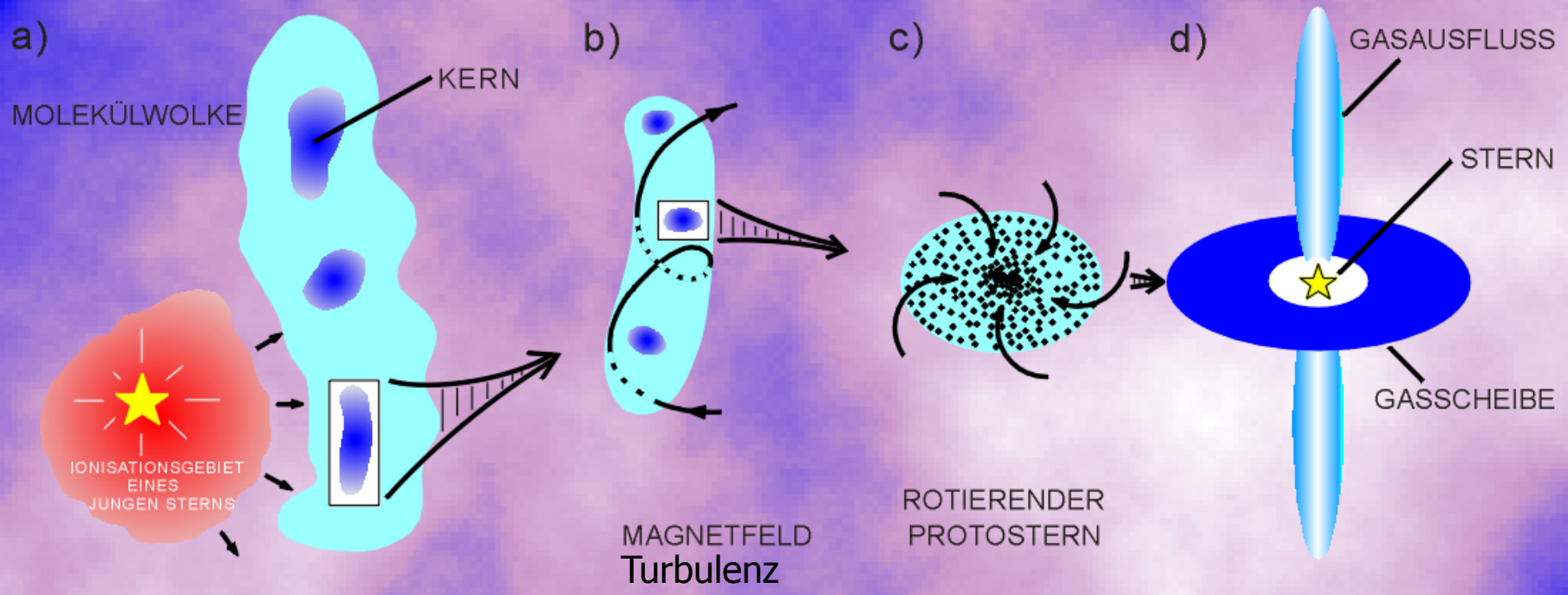
(L: Laenge)

Ambipolare Zeitskala:  $t_{ad} \approx 3 \times 10^6 \text{ yr} (n_{\text{H}_2}/10^4 \text{ cm}^{-3})^{3/2} (B/30 \mu\text{G})^{-2} (L/0.1 \text{ pc})^2$

Diese Zeitskala erscheint sehr lang, und es ist immer noch Thema der aktuellen Forschung, ob ambipolare Diffusion wichtig fuer Stabilitaet ist, oder ob nicht doch Turbulenz dominiert.

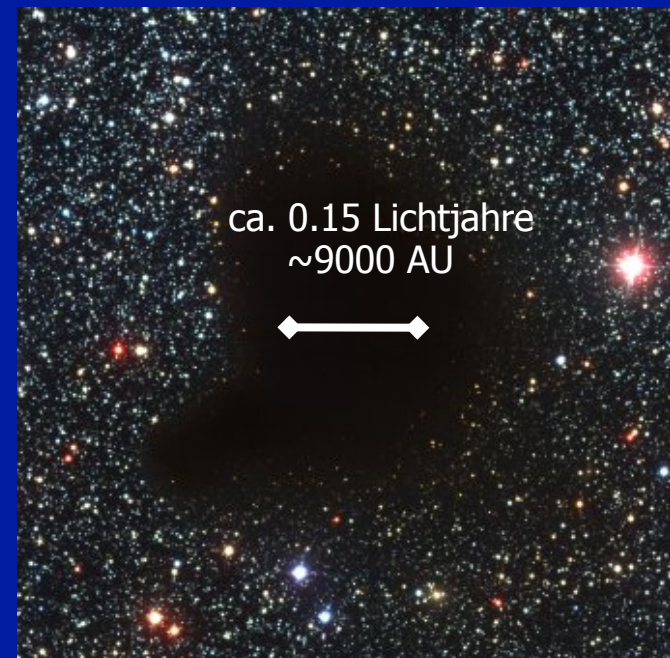
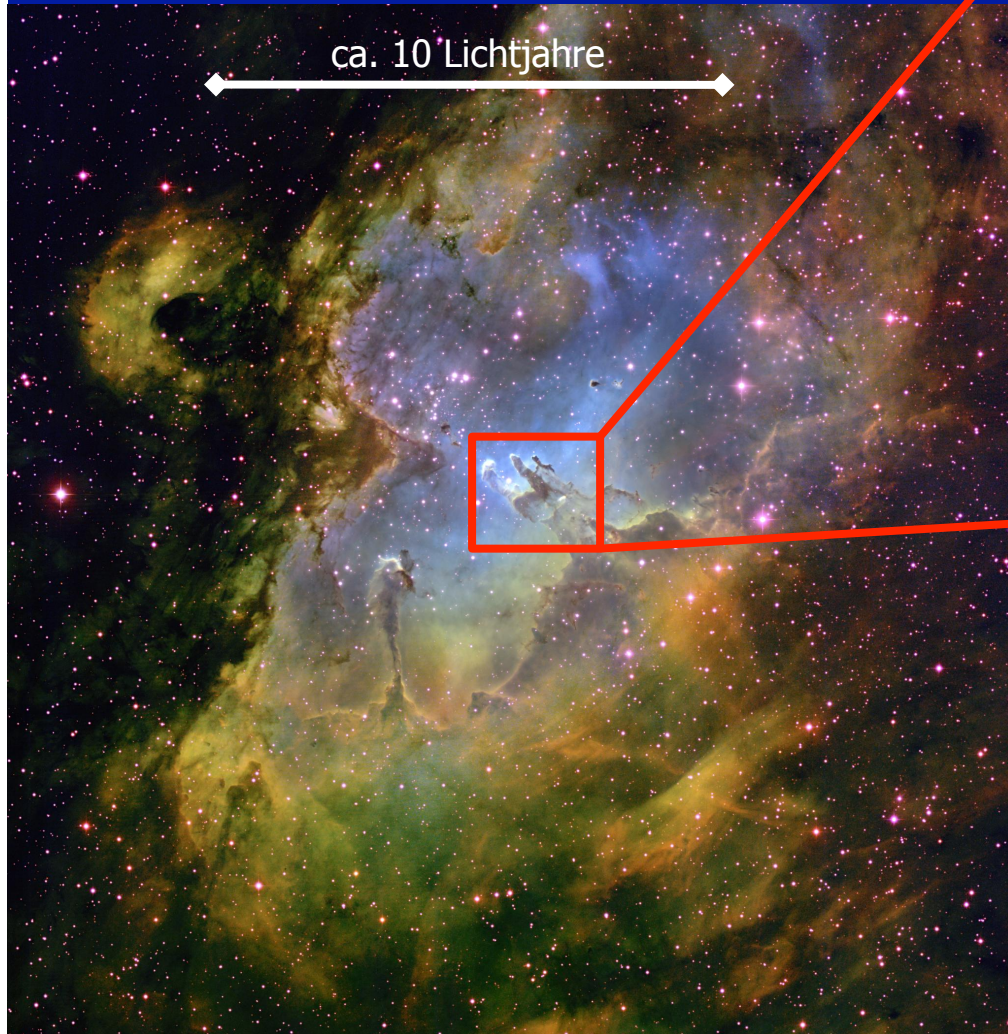
# Sternentstehungsparadigma

## DIE ENTWICKLUNGSTUFEN DER STERNENTSTEHUNG



Zeitskalen: Hauptakkretionsphase ca. 500 000 Jahre  
Vorhauptreihenentwicklung ca. einige Mio Jahre

# Molekülwolkenkalen



Sternentstehungseffizienz nur ein paar Prozent



# Protostern & Vorhauptreihenstern

Def. Protostern: Ein Objekt, das den Grossteil seiner Leuchtkraft aus dem Akkretionsschock gewinnt (Phasen 2 und 3).

Def. Vorhauptreihenstern: Anschliessende Phase, in der das zentrale Objekt seine Leuchtkraft grosstenteils aus gravitativer Kontraktion produziert.

## Quasi-hydrostatische Phase:

- Dynamische Phase beendet → quasi-statische Kelvin-Helmholtz-Kontraktion:

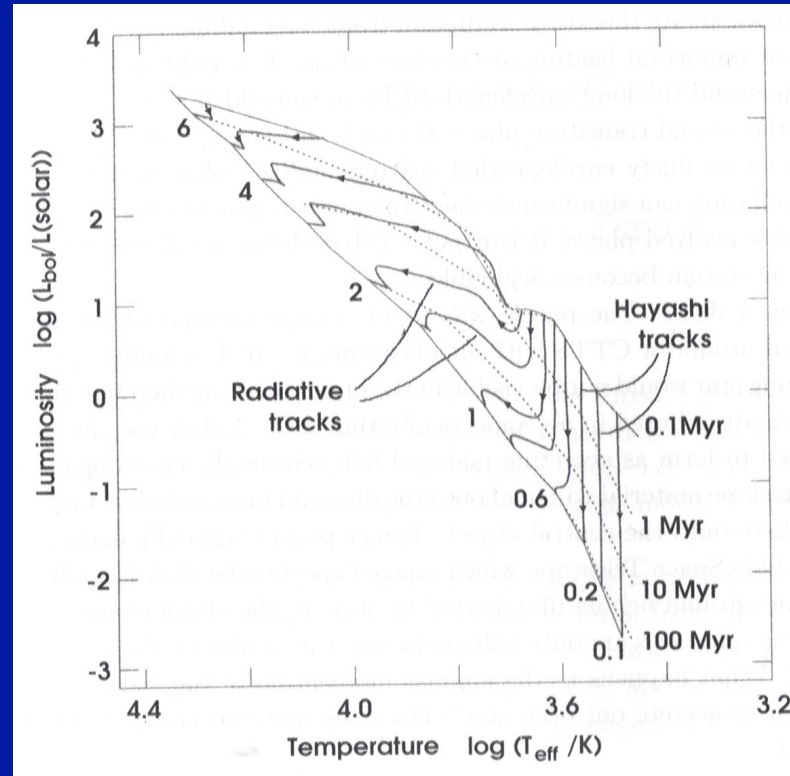
Virialtheorem:  $2T = -W = GM^2/R$  → wird in Leuchtkraft umgewandelt

$$\rightarrow t_{\text{KH}} = W/L = (GM^2/R)/L = 3 \times 10^7 \text{yr} (M/1M_{\text{Sonne}})^2 (R/1R_{\text{Sonne}})^{-1} (L/1L_{\text{Sonne}})^{-1}$$

→ Endet wenn Zentraltemperatur zum H-Brennen erreicht ist ( $\sim 10^7\text{K}$ )

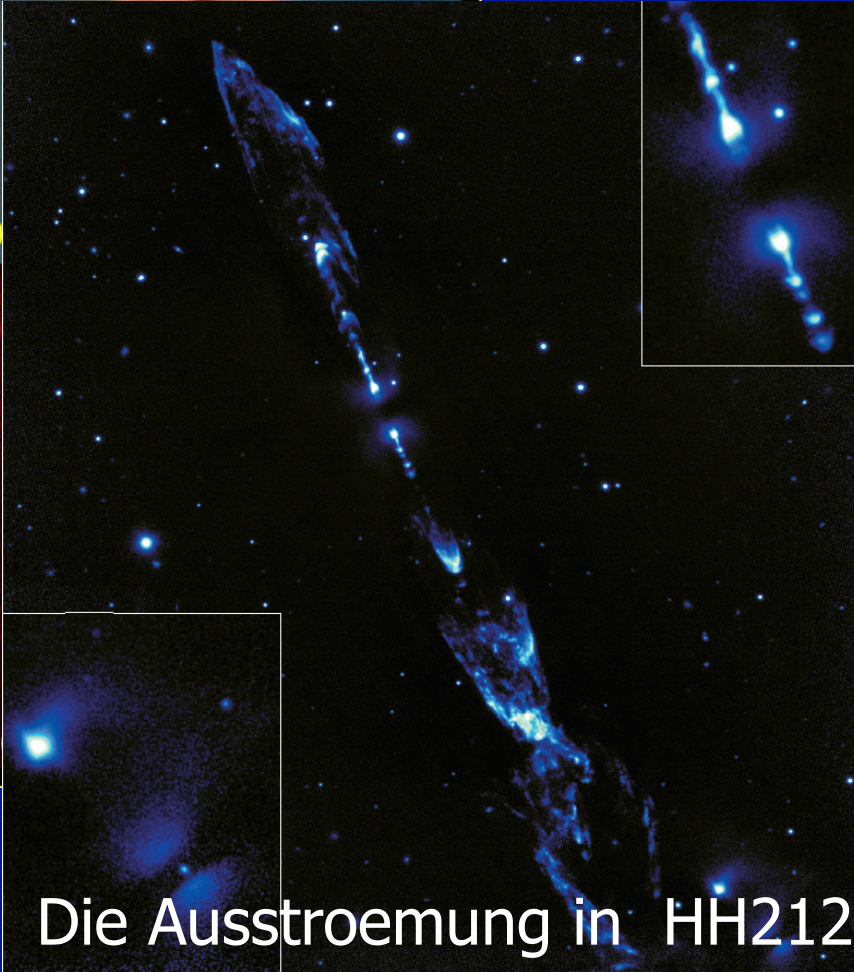
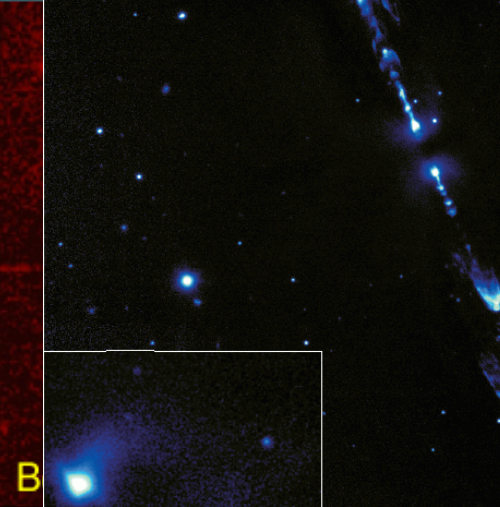
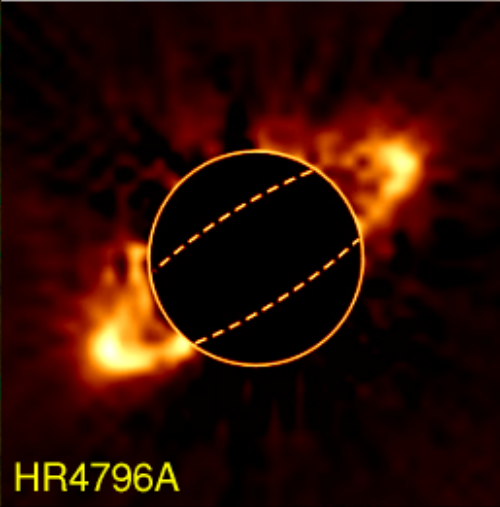
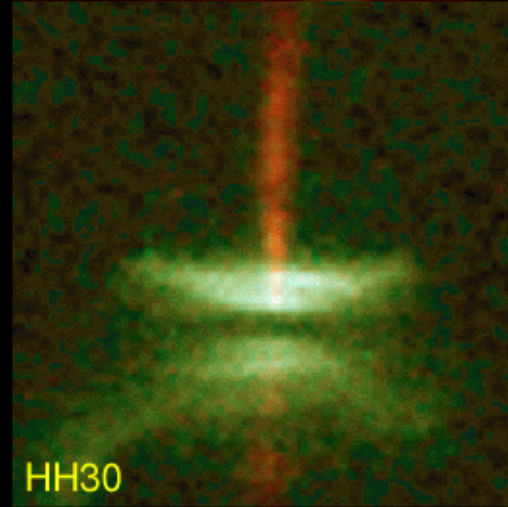
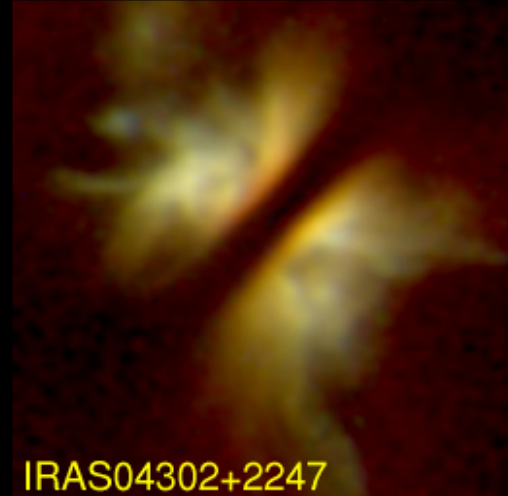
→ Stern ist geboren!

# Hertzsprung Russell (HR) Diagramm



- Die "Birthline" wurde zuerst aus der Beobachtung als der Ort identifiziert, an dem Sterne das erste Mal im HR Diagramm sichtbar werden.
- Theoretisch kann man die "Birthline" definieren als den Zeitpunkt, an dem die Hauptakretionsphase beendet ist, und die Leuchtkraft aus Kontraktion gewonnen wird → Start der Vorhauptreihenentwicklung

# Scheiben und Jets



# Themen heute

- Sternpositionen und Himmelskoordinaten
- Teleskope, Aufloesung und Wellenlaengen
- Strahlung, Sternklassifikation
- Sonnensystem, Keplergesetze und Exoplaneten
- ISM und Sternentstehung
- **Sternentwicklung**

# **Sternentwicklung**

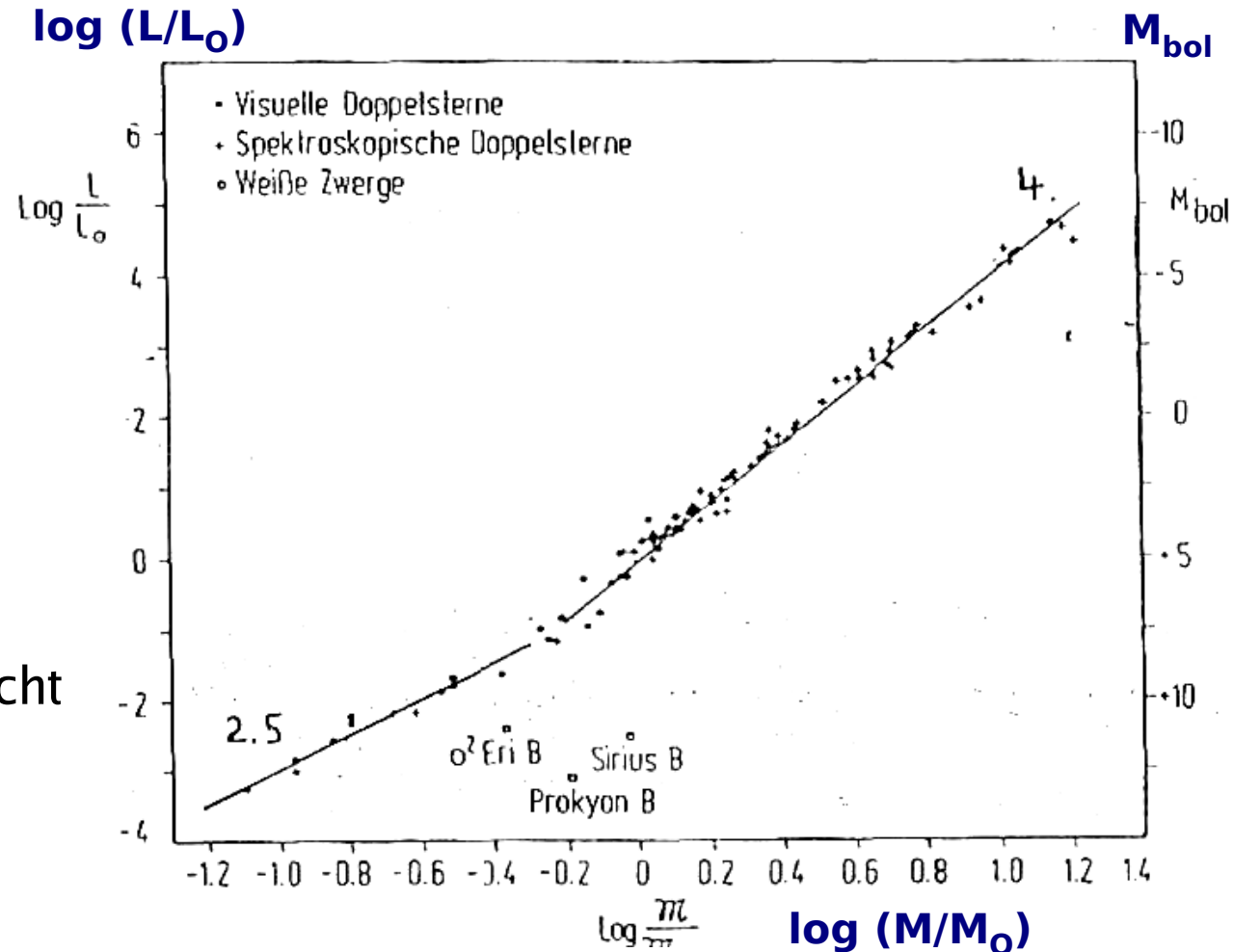
# 9.1. Weitere Sternparameter

## Empirische Masse-Leuchtkraft-Beziehung

Beobachtungsdaten (1980):

Beste Massen-  
bestimmungen aus  
26 visuellen  
Doppelsternen,  
93 Bedeckungs-  
veränderlichen,  
4 spektroskopischen  
Doppelsternen

“Weiße Zwerge”  
weichen ab, liegen nicht  
auf der Hauptreihe



## 9.1. Weitere Sternparameter

### Empirische Masse-Leuchtkraft-Beziehung

In erster Näherung:

$$L \propto M^3$$

Bessere Approximation:

$$L \propto M^{2.5} \quad \left[ M < 1/2 M_{\odot} \right]$$

$$L \propto M^{3.8} \quad \left[ M > 1/2 M_{\odot} \right]$$

-> Diese Beziehungen sind durch die Physik der **Sternaufbaus** und der **Sternentwicklung** bestimmt (kommt später...)

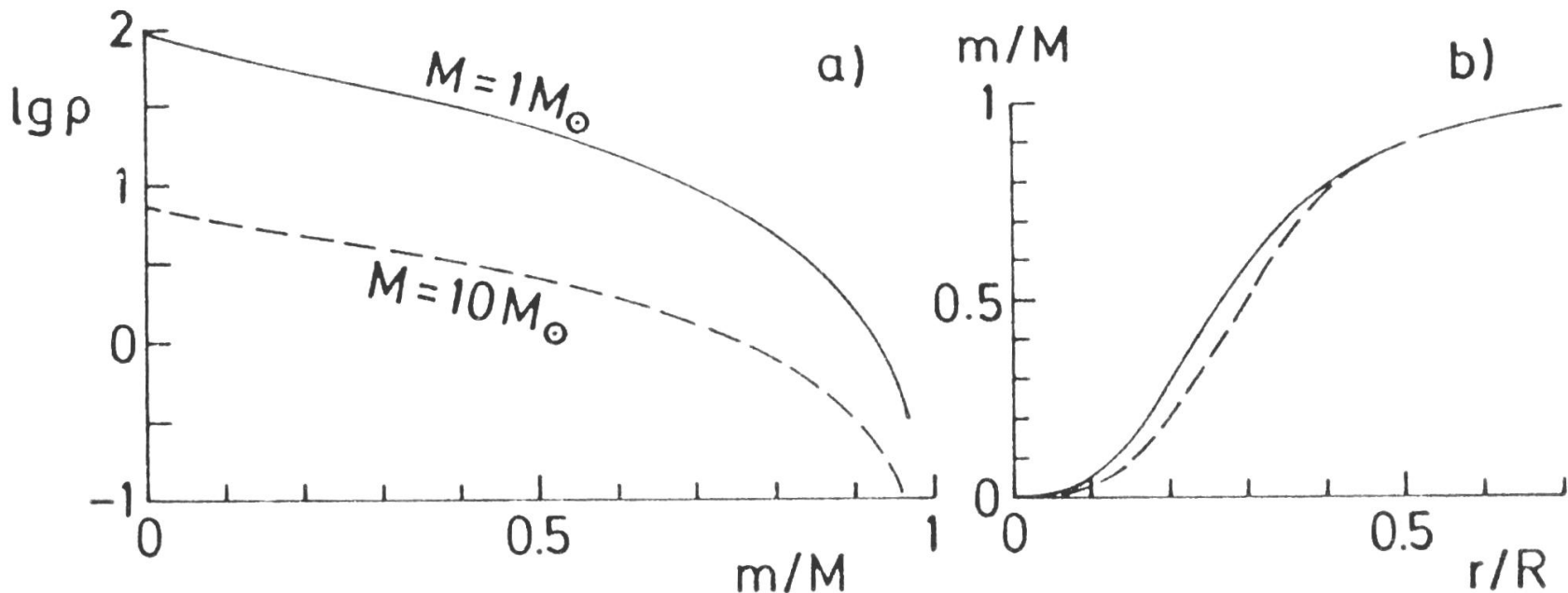
-> **Massereichere Sterne "leben" kürzer:**  $L \sim M^4$ ,  $\tau \sim M/L \sim M^{-3}$

-> **Fundamentale Beziehung zum Verständnis der leuchtenden Materie im Universum**

## 10.3 Sternentwicklung - Hauptreihe

### Sternaufbau, Sternentwicklung:

-> **Quasistationärer Gleichgewichtszustand** als Resultat **numerischer Lösungen** der Sternaufbaugleichungen:



Z.B.: -> **Massereiche Sterne haben kleinere Zentraldichten**

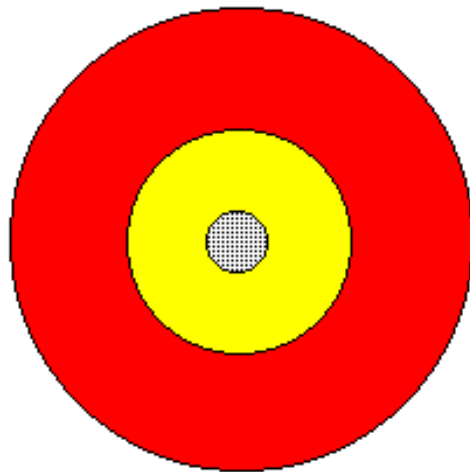


## 9.4. Energietransport

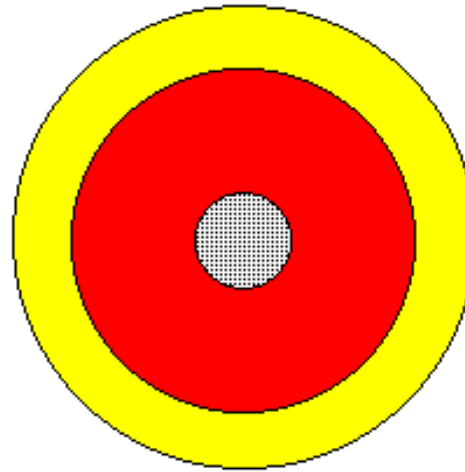
### Sternaufbau verschiedener Sternklassen (Hauptreihe)

- > Unterschiedliche Lage der radiative / konvektive Zonen:
  - “obere” Hauptreihe: radiative Hülle, konvektiver Kern
  - “untere” Hauptreihe: konvektive Hülle, radiativer Kern

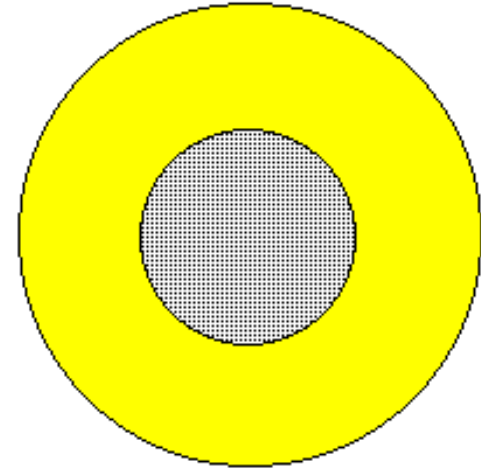
Internal Structure for Main Sequence Stars



O star  
(60 solar masses)



G star  
(1 solar mass)



M star  
(0.1 solar masses)



radiative zone



convective zone

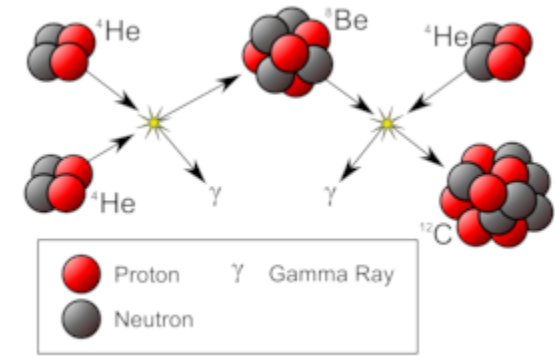


nuclear burning region

# 10.2 Stellare Energieerzeugung

## Stellare Energie-Erzeugung:

### Kernfusion:



-> thermische Energie & Gravitationsenergie können die langen “Lebens”zeiten der Sterne **nicht** erklären

**Kernfusion:** “Brennen” von nieder- zu höherzahligen Elementen:

-> Energiegewinn aus **Bindungsenergie:**

-> verschiedene Fusionsprozesse & Zeitskalen

-> Langfristige Änderung des “Rohstoff”- und Energiehaushalts

-> **“Sternentwicklung”:**

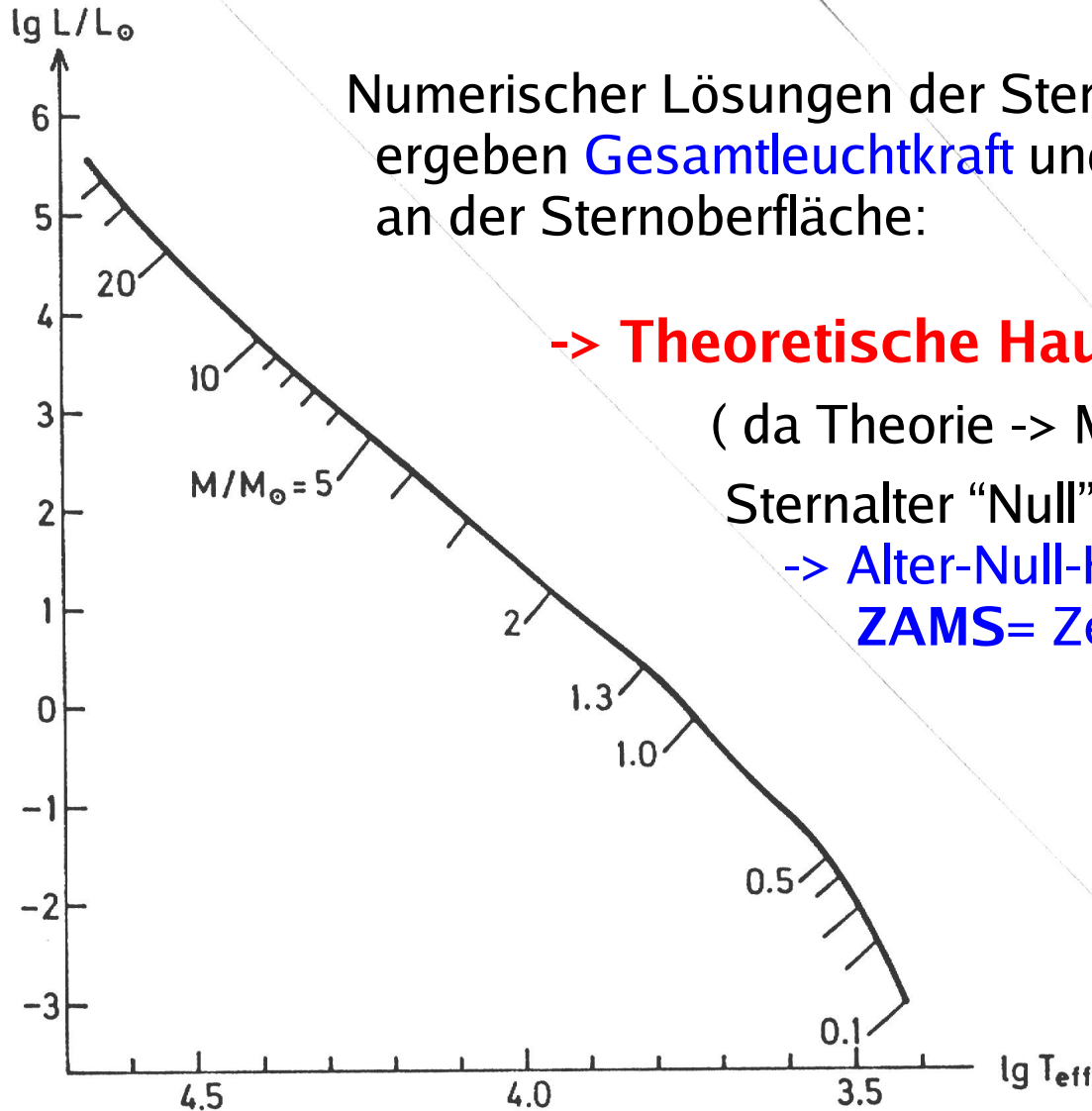
1) **quasi-stationäres Gleichgewicht** für Sterne der Hauptreihe

2) Entwicklung auf **kurzen Zeitskalen** außerhalb der Hauptreihe

-> **Eine Haupterkenntnis der Astrophysik des 20. Jhrts**

# 10.3 Sternentwicklung - Hauptreihe

## Sternentwicklung: Alter-Null-Hauptreihe (ZAMS)



Numerischer Lösungen der Sternaufbaugleichungen ergeben **Gesamtleuchtkraft** und **Effektivtemperatur** an der Sternoberfläche:

-> **Theoretische Hauptreihe**

( da Theorie -> Masse bekannt ! )

Sternalter "Null":

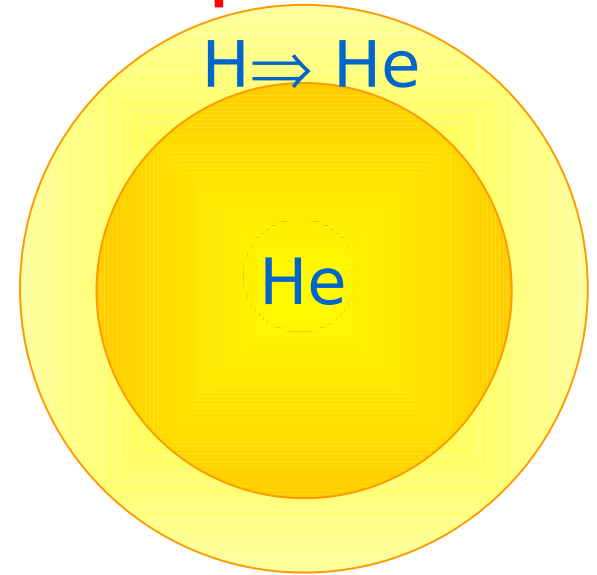
-> **Alter-Null-Hauptreihe**

**ZAMS= Zero Age Main Sequence**

## 10.4 Sternentwicklung - Spätphasen

### Sternentwicklung: Altersentwicklung ab der Hauptreihe

Blick in den Kernbereich:



-> **ZAMS**-Zusammensetzung:

70% H, 27% He

-> Nach **5 Mrd** Jahren H-Brennen:

65% He, 35% H

-> **Ende des Hauptreihenstadiums:**

- **Heißer Kern, reich an Helium**

- Energieproduktion durch **Schalenbrennen von H**

- Strahlungsdruck des heißen Kerns

-> Expansion der äußeren Hüllen (> Erdbahn), **Roter Riese**

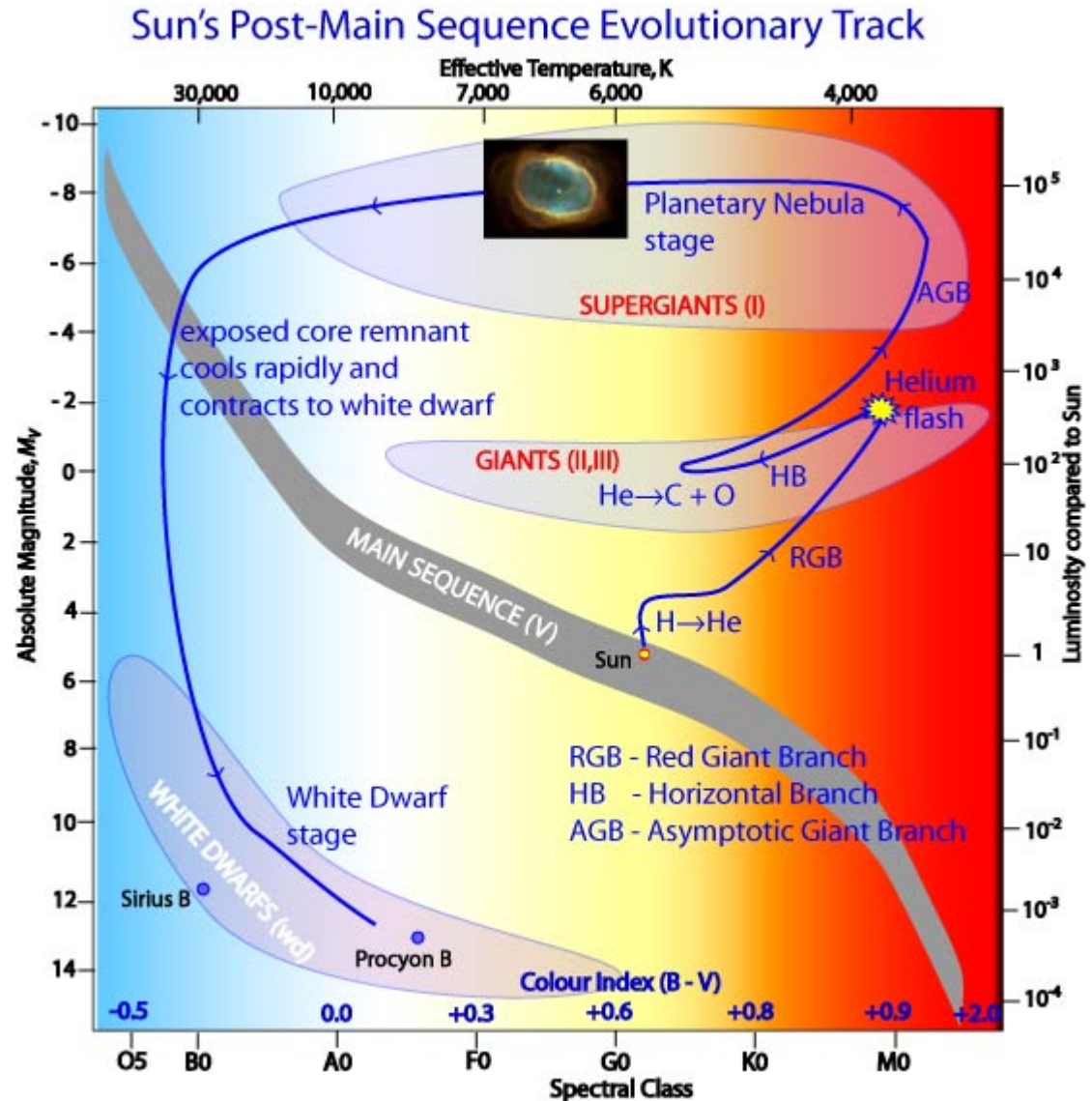
- Kern wird weiter gravitativ komprimiert -> heißer, dichter

-> Kernmaterie "**entartet**": **Änderung der Zustandsgleichung**

-> Bei 100 Mio K -> **He-Brennen im Kern**

# 10.4 Sternentwicklung - Spätphasen

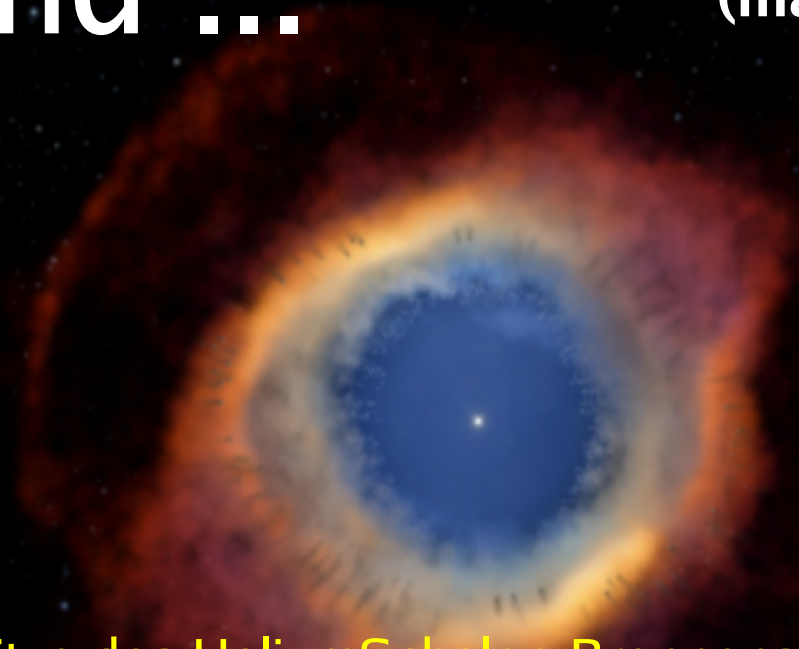
Entwicklung eines  
Sterns von  $1 M_{\odot}$   
im HRD



## 10.4 Sternentwicklung - Spätphasen

# The end ...

(massearme Sterne)

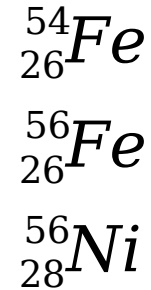


- > Sternwinde, Blitze des HeliumSchalen-Brennens und thermische Energie blasen äußere Schalen weg
- > Starke Massenverlust
- > Sternhülle wird zum **Planetarischen Nebel**
- > Heißer Kern ionisiert das Material, regt es zum Leuchten an
- > Kern entwickelt sich zum **Weißer Zwerg**

# 10.4 Sternentwicklung - Spätphasen

## Entwicklung massereicher Sterne $> 8 M_{\odot}$

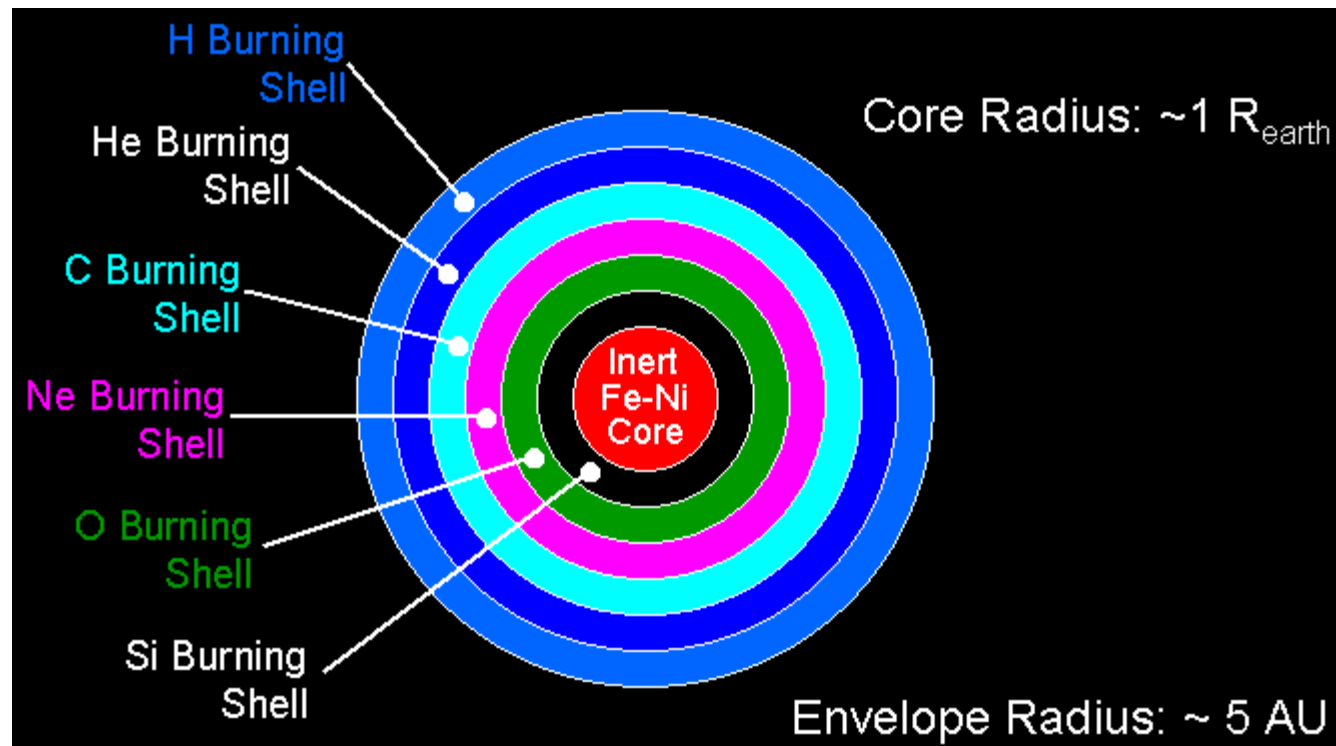
- > Zwiebelschalenstruktur bis zum Si-Brennen
- > Eisenkern von 1.3-2.5  $M_{\odot}$
- > Si-Brennen produziert verschiedene Elemente nahe des Eisen (Stabilitätsmaximum) ----->



Am Ende:

Kollaps des Zentralbereichs:

- > freier Fall: 0.1s
- > Supernova-Explosion, Typ II



## 10.4 Sternentwicklung - Spätphasen

# The end ... (massereiche Sterne)

- > Starke Massenverluste
- > Kollaps des Kerns
- > Stern wird zerissen: **Supernova-Explosion**
- > Durch Kollaps und Explosion starke Neutronenflüsse  
Aufbau schwerer Kerne > Eisen: **s, r -Prozesse**
- > Je nach Masse entwickelt sich Kern zum  
**Neutronenstern oder Schwarzen Loch**

Krebsnebel



# Einfuehrung in die Astron. & Astrophysik I

Wintersemester 2013/2014: Henrik Beuther & Christian Fendt

- 17.10 Einfuehrung: Ueberblick und Geschichte (H.B.)*
- 24.10 Koordinatensys., Sternpositionen, Erde/Mond (C.F.)*
- 31.10 Teleskope und Instrumentierung (H.B.)*
- 07.11 Strahlung, Strahlungstransport (C.F.)*
- 14.11 Planetensystem(e) und Keplergesetze (H.B.)*
- 21.11 Sonne & Sterne, Typen, Klassifikationen, HR-Diagramm (C.F.)*
- 28.11 Interstellare Materie: Chemie und Materiekreislauf (H.B.)*
- 05.12 Sternentstehung, Akkretionsscheiben und Jets (H.B.)*
- 12.12 Sternaufbau und Sternentwicklung: Hauptreihe (C.F.)*
- 19.12 Sternaufbau und Sternentwicklung: Endstadien (C.F.)*
- 26.12 und 02.01 –*
- 09.01 Mehrfachsysteme und Sternhaufen, Dynamik (C.F.)*
- 16.01 Exoplaneten und Astrobiologie (H.B.)*
- 23.01 Die Milchstrasse (H.B.)*
- 30.01 Zusammenfassung (C.F. & H.B.)*

**08.02 Klausur, 15:00-17:00, Philosophenweg 12, alle 3 Hoersaele**