

## Chemische Zusammensetzung

VI. 6-33

nur in den Atmosphären beobachtbar -

Sterninneres i.A. inhomogen: Kernprozesse!

- bei den meisten Sternen:

≈ "solare" Häufigkeiten der Elemente  
(oft fälschlich als "kosmisch" bezeichnet)

d.h. 70% H, 30% He, 2% "Metalle"

⇒ "Population I"

(vergl. V. 3)

- chemischer Gradient in der Galaxis  
"Metalle" nach außen abnehmend

- Kugelsternhaufen, "alte" Feldsterne  
Metalle bis zu  $\frac{1}{100}$  seltener als "solar"  
(sog. Population II - Sterne)

- andere Galaxien:  
abweichende Metall-Häufigkeiten

z.B. Große Magellansche Wolke: 0.3 × solar

Kleine Magellansche Wolke: 0.1 × solar

Andromeda-Nebel (M31) ≈ solar,

"chemischer Gradient":

im Zentrum 3 × solar

- Helium-Häufigkeiten sind nicht abhängig von der "Population" → "primordial"

- Sterne mit "anormalen" Häufigkeiten

- "entwickelte" Sterne: kernprozessierte Materie an der Oberfläche

- Helium-reiche Sterne

(engl.: helium-rich ≠ hydrogen-deficient)

z.B.: bestimmte O-subdwarfs (sdO)

• Weiße Zwerge (Typ DB)

• Wolf-Rayet-Sterne (Typ WN)

- Kohlenstoff-reiche Sterne

PG 1159 - Sterne ( $T_{\text{eff}} > 100 \text{ kK}$ )

Wolf-Rayet-Sterne (Typ WC)

...

VI. 6-35

- als Resultat von Entmischung (Diffusion)

- Gravitationsstreuung (bes. bei hohem  $\log g$  !)

- Strahlungsdruck (bes. bei heißen Sternen !)

notwendig: Abwesenheit von Konvektion, Turbulenz, Massenverlust...

z.B.: heliumarme Sterne (Helium seltener als solar !)

z.B. Weiße Zwerge (Typ DA):

nur dünne Schicht Wasserstoff,

dann He, dann C-O-Kern

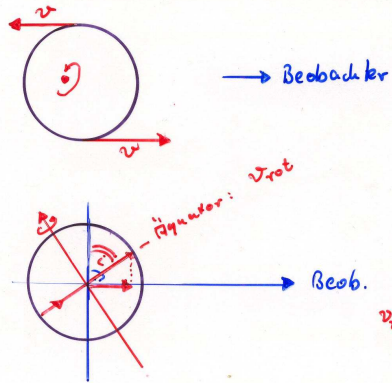
6-34

6-36

## Rotation

VI. 20 6-37

Nachweis: Verbreiterung der Spektrallinien (Doppler-Effekt!)



vom Beobachter: die eine Seite der "Sternscheibe" bewegt sich auf den Beobachter zu, die andere von ihm weg

$i \neq \text{Pol}$ , Beobachter  
Projektion der Äquator-Geschwindigkeit  $v_{\text{rot}}$  auf die Richtung zum Beobachter:  
 $\pm v_{\text{rot}} \cdot \sin i$

Problem:  $i$  ist i.A. nicht bekannt  
statistischer Mittelwert:  $\langle \sin i \rangle = 0.78$  ( $i = 52^\circ$ )

Beobachtete Rotationsgeschwindigkeiten bei

VI. 21 6-39

Hauptreihensternen:

| Typ     | $v_{\text{rot}}$ [km/s] |
|---------|-------------------------|
| O, B    | 100 ... 250             |
| A       | 0 ... 250               |
| F       | 0 ... 100               |
| G, K, M | 0 ... 25                |

Sonne (Typ G):

$$v_{\text{rot}} = \frac{2\pi R_\odot}{25d} \approx 2 \text{ km/s}$$

Erklärung: Abbremsungs-Effekt;

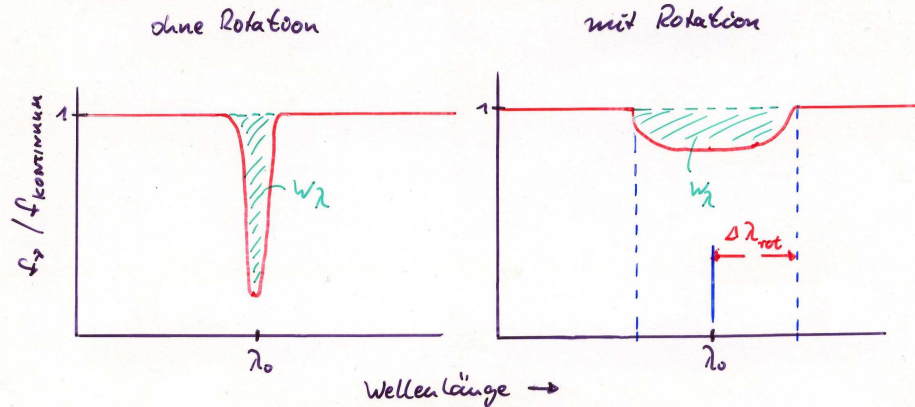
Drehimpuls-Verlust durch Sternwind

Effekt wird verstärkt durch Magnetfelder:

Corotation des Windes bis zum Alfvén-Radius (vergl. Sonne)

Verbreiterung einer (schmalen) Spektrallinie:

6-38



näherungsweise:  $w_\lambda$  bleibt erhalten; Profil  $\rightarrow$  Halb-Ellipse

$$\frac{v_{\text{rot}} \sin i}{c} = \frac{\Delta \lambda_{\text{rot}}}{\lambda_0}$$

Zum Vergleich:

6-40

$v_{\text{break-up}}$ : Grenze der Stabilität:

Fliehkraft = Gravitation

$$\frac{v_{\text{break-up}}^2}{R} = \frac{G M}{R^2}$$

$$\Rightarrow v_{\text{break-up}} = 440 \text{ km/s} \cdot \sqrt{\frac{M/M_\odot}{R/R_\odot}}$$

• Bei den meisten Sternen ist  $v_{\text{rot}} \ll v_{\text{break-up}}$

• Ausnahme: Typen Oe, Be:  $v_{\text{rot}} = 400 \dots 500 \text{ km/s}$

$\Rightarrow$  Ursache für Massenverlust am Äquator!



## Doppelsterne (engl. binaries)

VI. 22 6-41

- $\approx 50\%$  aller Sterne sind Mitglieder von Doppel- bzw. Mehrfach-Systemen
- wichtig für die Bestimmung von Massen

beobachtungstechnische Unterscheidung:

### 1. Visuelle Doppelsterne

Def.: beide Komponenten beobachtbar

Messgrenze = Auflösungsvermögen der Beobachtungen

klassisch, terrestrisch  $\approx 0''.1$

interferometrisch od. Weltraum  $\approx 0''.001$

(hängt auch von der Helligkeitsdifferenz  $\Delta m$ , ab)

## Spektroskopische Doppelsterne

VI. 26 6-43

Bahnbewegung  $\Rightarrow$  periodische Doppler-Verschiebung

Komponenten nicht aufgelöst:

im addierten Spektrum gesamte Verschiebung  
der Linien der beiden Komponenten

Unterscheidung:

Zwei-Spektren-Systeme (kurz: SB2)

SB = Spectroscopic Binary

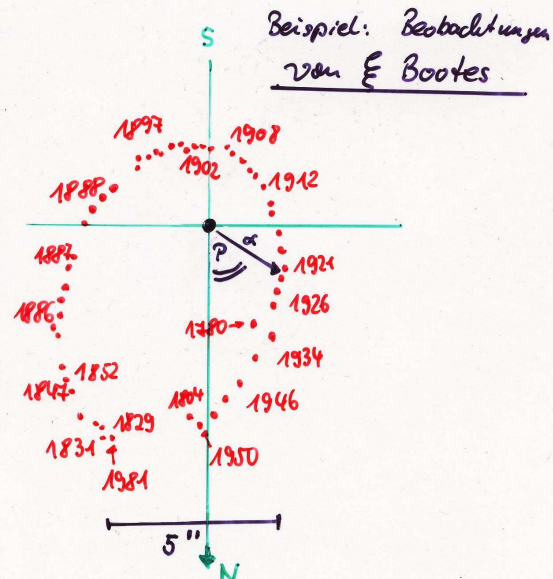
Linien beider Komponenten meßbar

sonst: Ein-Spektren-Systeme (SB1)

### Astrometrie:

Messung von  
Abstand  $\alpha$  und  
"Positionswinkel"  $P$   
als Funktion der  
Zeit.

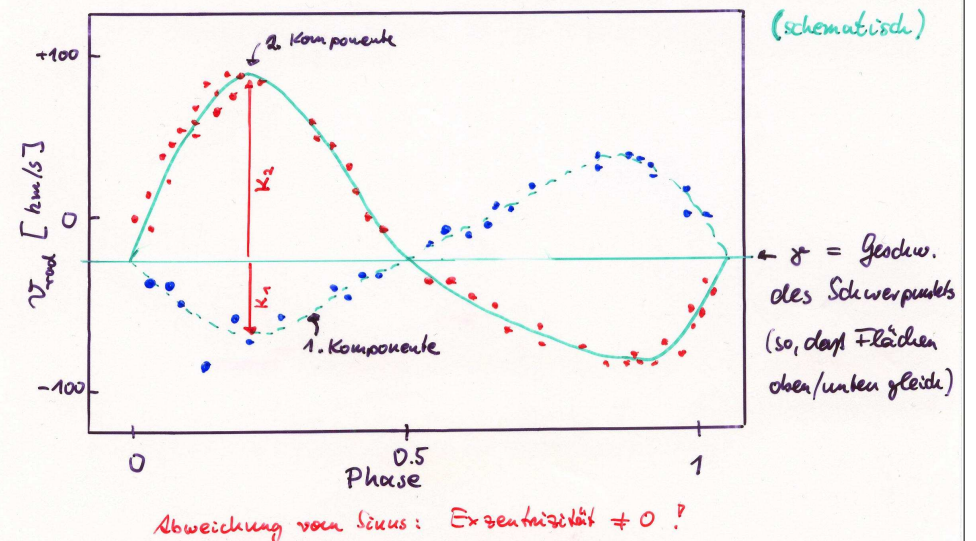
(schwächere Komponente  
relativ zur helleren)



6-42

### Beispiel einer gemessenen Radialgeschwindigkeits-Kurve

6-44



(ab hier:  $\varepsilon = 0$ )

VI. 25

$K_1, K_2 \approx$  halbe Amplituden

da Bahnumfang =  $2\pi a_{1/2}$ ;  $U$  = Umlaufzeit

$$\rightarrow K_1 = \frac{2\pi a_1}{U} \sin i, \quad K_2 = \frac{2\pi a_2}{U} \sin i$$

$$\Rightarrow a_1 \sin i = \frac{U}{2\pi} K_1 \quad \left[ a_2 \sin i = \frac{U}{2\pi} K_2 \text{ nur SB2} \right]$$

$\sin i$  ist nicht bestimmbar!

### Fall SB 1:

$$K_2 \text{ unbekannt; } K_2 = K_1 \frac{M_1}{M_2}$$

Einsetzen in  $\odot$ :

$$(M_1 + M_2) \sin^3 i = \frac{U}{2\pi G} \left[ K_1 \left( 1 + \frac{M_1}{M_2} \right) \right]^3$$

$$\Rightarrow \underbrace{\frac{M_2 \left( 1 + \frac{M_1}{M_2} \right) \sin^3 i}{\left( 1 + \frac{M_1}{M_2} \right)^3}}_{\text{def.: "Massenfunktion" } f(M)} = \underbrace{\frac{U K_1^3}{2\pi G}}_{\text{Beobachtungsgrößen!}}$$

def.: "Massenfunktion"  
 $f(M)$

Beobachtungsgrößen!

### Fall SB2:

• Massenverhältnis  $\frac{M_1}{M_2} = \frac{a_2}{a_1} = \frac{K_2}{K_1}$

• Massensumme aus 3. Kepler'schen Gesetz (I.21):

$$M_1 + M_2 = \frac{4\pi^2}{GU^2} a^3 \quad (\text{mit } a = a_1 + a_2)$$

$$\Rightarrow (M_1 + M_2) \sin^3 i = \frac{U (K_1 + K_2)^3}{2\pi G} \quad \odot$$

... und somit  $M_1 \sin^3 i, M_2 \sin^3 i$

(ohne Kenntnis der Entfernung!)

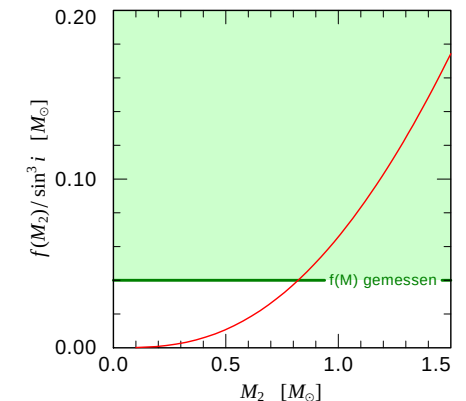
Problem:  $\sin i$  nicht bekannt

- außer bei Bedeckungsveränderlichen (siehe später)

### Fiktives Beispiel

- Bei einem SB1 werden Periode und die Amplitude der Radialgeschwindigkeit gemessen und ergeben  $f(M) = 0.04 M_\odot$
- Aus dem Spektrum wird der Spektraltyp zu A0V bestimmt  
 $\rightarrow M_1 = 2.9 M_\odot$

Abb.: Masse des Begleiters in Abhängigkeit von  $f(M)/\sin^3 i$



$\rightarrow$  Aus dem Messwert folgt:  $M_2 > 0.8 M_\odot$

Angenommen, man findet jetzt bei dem Stern einen Bedeckungslichtwechsel  $\rightarrow i \approx 90^\circ$

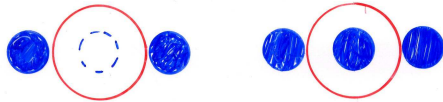
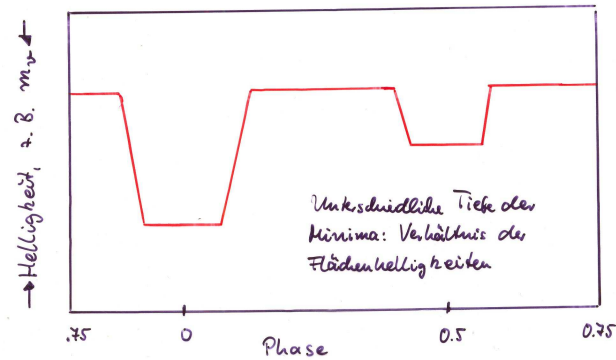
$\rightarrow M_2 = 0.8 M_\odot$ , also ist der Begleiter ein K-Hauptreihenstern oder ein Weisser Zwerg

## Photometrische Doppelsterne:

6-49

### "Bedeckungsveränderliche"

Lichtkurve (schematisch):



Bei streifender Bedeckung:  kein konstantes Minimum.

6-50

Bedeutung: Spektroskopische Doppelsterne mit Bedeckung  
 $\Rightarrow \sin i \approx 1$

- Radialgeschwindigkeitskurven (SB2)  
 $\Rightarrow$  Massen  $M_1, M_2$  (ohne Kenntnis von  $d$ !)
- Bei vollständiger Bedeckung:  
Radialgeschwindigkeitskurve  $\Rightarrow$  Bahnadise  
 $\Rightarrow$  Sternradien  $R_1 [R_2]$   
(daraus  $d$  ableitbar)