

EINFÜHRUNG IN DIE ASTRONOMIE

1. Astronomie als Wissenschaft

§1. Objekte der A.

A. untersucht Materie im Weltall und das Universum als Ganzes. Übungsaufg.

Himmelskörper (gut begrenzte, kompakte Objekte):
Schwarze Löcher (SL), Sterne, Planeten, Braune Zwergen,
Monde, Asteroiden, Kometen...

Systeme: Planetensystem, Sternhaufen, Galaxien, ...

Medium: Staub, Gas, Teilchen, Strahlung

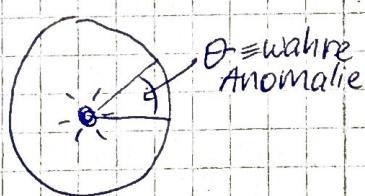
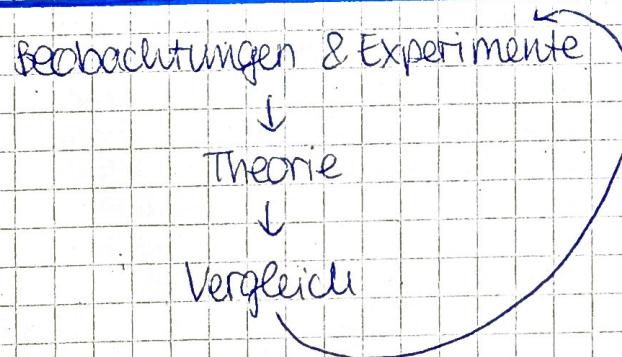
Felder: EM, Gravitation

1 Googol = $10^{100} < 70!$

$m_e \sim 10^{-27} \text{ g}$, $M_{\text{StG}} \sim 10^{53} \text{ g}$

SHG:
Supernova
Galaxie

§2. Methoden der Astronomie



§3. Unterteilung der Astronomie

Nach Methoden:

- beobachtende A.
- theoretische A.
- Laborastronomie

Nach Eigenschaften:

- Astrometrie
- Himmelsmechanik
- Kosmogonie

Nach Objekten:

- Sonnenphysik
- Extragalaktik
- ...
- Kosmologie

Nach A:

- optische A.
- IR-Astronomie
- Radio-Astronomie
- GW-Astronomie

§4. Astronomie und andere Wissenschaften

• Biologie

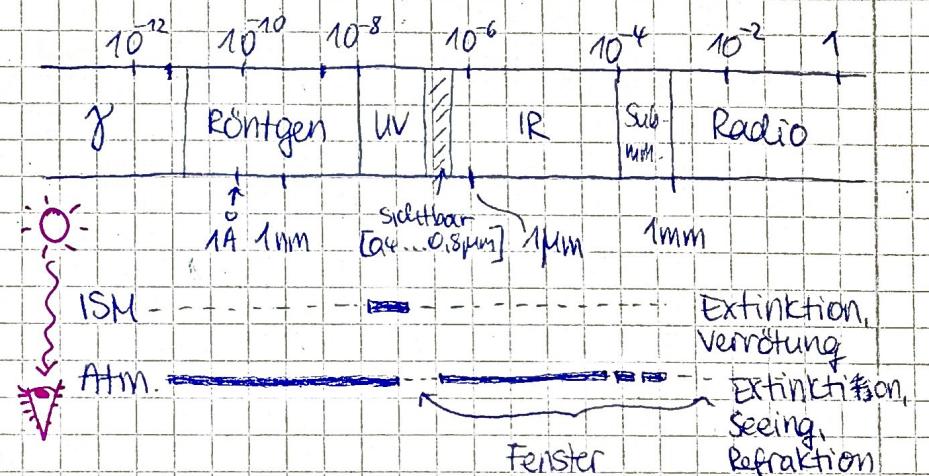
- Mathematik (komplexe Funktionentheorie stammt aus der A.)
→ Kepfersche Gleichung: $x - \text{asinx} = b$ ist nur im Komplexen lösbar
- Informatik (eigene Programmiersprache zur Steuerung der Teleskope: Fortran)

2. Astronomische Beobachtungen & Instrumente

S 1 Beobachtungen

- Richtung (Astrometrie)
- Menge (Photometrie)
- Spektrum (Spektroskopie)
- Polarisation (Polarimetrie)

der Photonen kann man messen!



Seeing:
bewegte, unruhige
Luft → Unschärfe
der Atmosphäre

§2 Teleskope

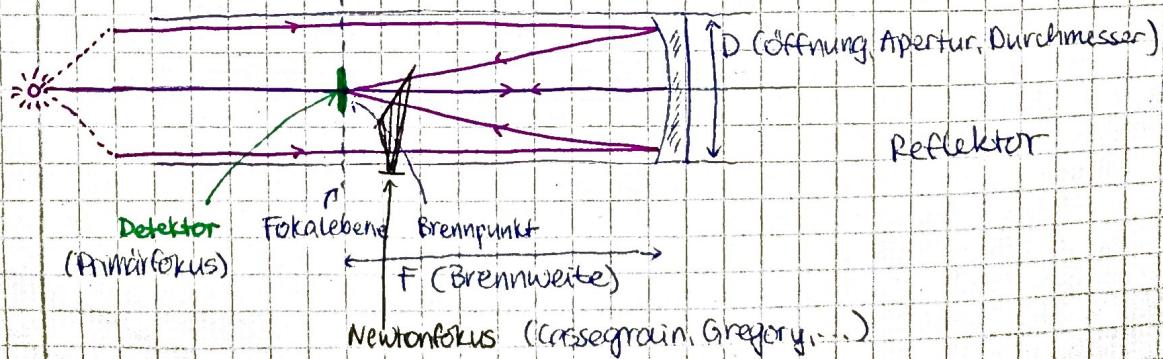
chromus (griech.):
= Farbe

Bestandteile:

- optisches System, Detektor, Montierung

Opt. Systeme (Objektiv)

- Refraktor (Linse, Galilei 1609), Reflektor (Spiegel, Newton 1671), Gemischt (Cassegrain, Schmidt, 1930)



Aberationen:

- chromatische $(n = n(\lambda)) \rightarrow$ Linse \approx Prisma \approx "Bekämpfung": versch. Linsen mit unterschiedl. Brechzahlen verwenden, insbesondere bei Refraktoren

→ sphärische (wenn Schicht auf Linse kugelförmig ist → je weiter die Strahlen am Rand der Linse aufkommen, werden sie weiter entfernt vom Brennpunkt aufkommen)

→ zylindrische, Astigmatismus, Koma, ...

§ 3. Leistungsvermögen der Teleskope

Wozu braucht man eigentlich Teleskope?

Aufgaben:

- mehr Licht, damit man auch schwächere Objekte besser sehen kann
- bessere Auflösung um optische Trennung von Objekten zu ermöglichen (z.B. Mondkrater)

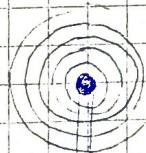
Lichtsammelvermögen

Punktwelle: $I \propto D^2$
Flächenobjekt: $I \propto \left(\frac{D}{F}\right)^2$ \leftarrow Öffnungsverhältnis

warum braucht man
immer große Teleskope?
 \leftarrow deshalb.

Auflösungsvermögen

theoretisch (β_0)



$$\beta_0 = 1,22 \frac{\lambda}{D} \text{ [rad]}$$

< praktisch (β) $\sim 1''$



Bsp: Ange ($D \approx 1\text{cm}$) $\rightarrow \beta_0 \approx \frac{5 \cdot 10^{-5}}{1} \text{ rad} \approx 5 \cdot 10^{-5} \cdot 2 \cdot 10^5 \approx 10''$

großes Teleskop ($D \approx 10\text{m}$) $\rightarrow \beta_0 \approx 0,001'' \approx 1\text{ mas} \ll \beta \approx 1''$

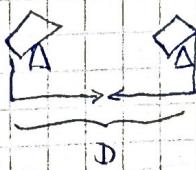
$$'' \text{ Bogensekunde} \\ 1'' = \frac{\pi}{64800} \text{ rad} \\ \approx 0,5 \cdot 10^{-5} \text{ rad}$$

mas =
milli arc secan.
≈ milli Bogensek

Spezielle Methoden

- Adaptive Optik (AO): das Teleskop strahlt mit einem Laser einen Leitstern in die Nähe des zu beobachtenden Objekts. Im ~~der~~ Brenn Teleskop gibt es einen Wellenfrontsensor, der analysiert wie die Luft den Leitstern verzerrt und überträgt das auf das Korrektionselement
 $\approx \beta \approx 10 \dots 30 \text{ mas}$

- Interferometrie:



Großteleskope

- Refraktor ($D=102\text{cm}$, Verres Obs., 1897)

- Reflektor ($D \approx 8 \dots 10\text{m}$, z.B. VLT in Chile)

- $D \approx 2\text{m}$, Tautenburg Landessternwarte, 1960)

- Weltraum ($D \approx 3,5\text{m}$, Herschel, 2009-2013)

(selbst
erarbeiten)

§ 4 Detektoren

Themen: CCD-Kameras, Spektrometer, Polarimeter

§ 5 Montierungen

Themen: Äquatoriale, azimutale
→ Achse auf
Polarstern

Radioteleskope (u.a. bei anderen Wellenlängen)

Welche sind andere Informationsträger als Photonen?

02.11.2017

3. Sphärische Astronomie

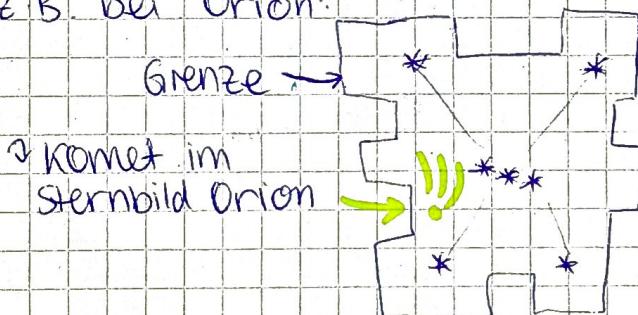
§ 1 Himmelsgugel, Sternbilder

Himmelskugel, $R=1$ (Einheit egal), Mittelpunkt: Beobachter

Position → Richtung
→ Entfernung

Welchen astronomischen Sinn haben Sternbilder?

z.B. bei Orion:



→ diese sind festgelegt vom IAU(1928): 88 Sternbilder

z.B. Orion = Ori

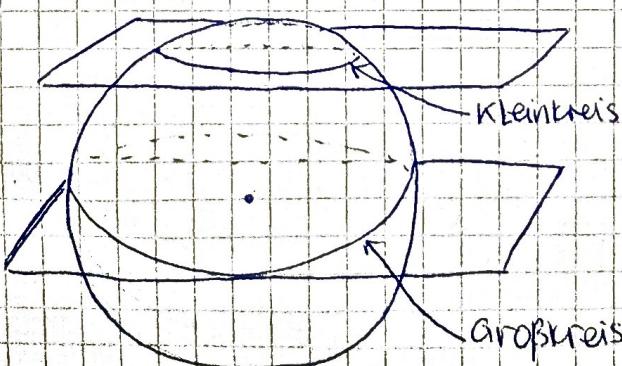
Ursa major (Wagen) = UMa

- hellster Stern wird mit α bezeichnet

→ α Ori = Betelgeuze (sprich: Alpha Orionis)

β Ori = Rigel (sprich: Beta)

§ 2 Sphärische Trigonometrie



(a,b,c:
Seiten;
A,B,C:
Winkel)

sphärisches Dreieck
(Innenwinkelsumme muss nicht
 180° sein!)

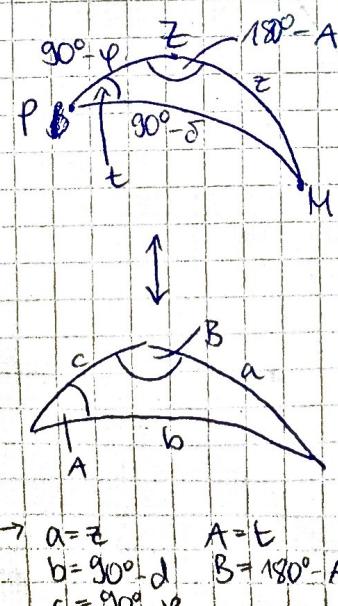
§ 4 Koordinatensysteme

KS	Ebene	Achse	Pole	Bezugs- punkt	KI	KII
geogra- phisch	Erdäquator	Erdrot- achse	N & S	Green- wich	geogr. Breite $\varphi \in [-90^\circ, 90^\circ]$	geogr. Länge $\lambda \in [0^\circ, 360^\circ]$
Horizont- system	Horizont	ZZI	Z, ZI	S	Höhe $h \in [90^\circ, 30^\circ]$ 0. Zenit- abstand $z = 90^\circ - h$	Azimut (in HBR) $\alpha \in [0^\circ, 360^\circ]$
Aquator- system I	Aquator	PPI	PPI	Q	Deklination $\delta \in [-90^\circ, 90^\circ]$	Stunden- winkel (in HBR) $t \in [0^\circ, 24^\circ]$
Aquator- system (II)	-	-	-	r	-	Rektaszen- sion (gegen HBR) $\alpha \in [0^\circ, 24^\circ]$
Ecliptik- system	-	-	-	-	-	-
Galaktik- system	-	-	-	-	-	-
...	-	-	-	-	-	-

§ 5 Transformationen zwischen KS

z.B. Aquatorsystem I \rightarrow Horizontsystem, $\delta, t \rightarrow z, \alpha$

betrachten sphärisches Dreieck aus voriger Skizze:



$$\sin z \sin A = \cos \delta \sin t$$

$$\cos z = \sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \cos t$$

$$\sin z \cos A = -\cos \delta \sin \delta + \sin \delta \cos \delta \cos t$$

$$A = t$$

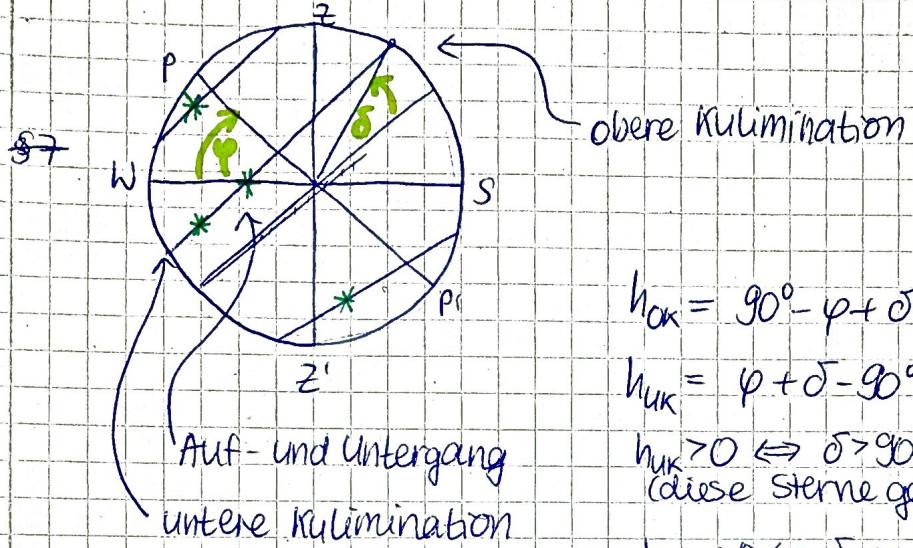
$$b = 90^\circ - d$$

$$c = 90^\circ - \phi$$

$$B = 180^\circ - A$$

§ 6 Tägliche Bewegungen der Sterne

(selbst nacharbeiten)



$$h_{\text{Ork}} = 90^\circ - \varphi + \delta$$

$$h_{\text{Ork}} = \varphi + \delta - 90^\circ$$

$$h_{\text{Ork}} > 0 \Leftrightarrow \delta > 90^\circ - \varphi$$

(diese Sterne gehen nie unter)

$$h_{\text{Ork}} < 0 \Leftrightarrow \delta < 90^\circ - \varphi$$

(diese Sterne gehen nie auf)

§ 7 Jährliche Bewegung der Sonne

Datum	α_\odot	δ_\odot	SB
21.03.	0h	0°	Widder
22.06.	6h	+ε = +23,5°	Krebs
23.09.	12h	0°	Waage
22.12.	18h	-ε = -23,5°	Steinbock

$\Rightarrow |\varphi| > 66,5^\circ \Rightarrow$ Polartag & -nacht möglich

$|\varphi| < 23,5^\circ \Rightarrow$ Sonne im Zenit möglich

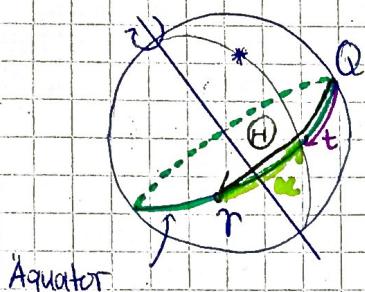
09.11.2017

4. Zeit und Kalender

"Taktgeber" des Verlaufs der Zeit: periodischer Prozess
Unterscheidung in Zeit / konzeptuelle Z. / perzeptuelle Z.

§1 Sternzeit

$$\textcircled{H} = t_p$$



Ω : höchster Punkt des Äquators

Sternzeittag:
 γ in O.K. \rightarrow γ wieder in O.K.

$$\textcircled{H} = \alpha + t$$

§2 Sonnenzeit

$$\text{währe Sonnenzeit} \rightarrow T_{\odot} \equiv t_0 + 12h$$

wahrer Sonnenzeittag: \odot in u.K. \rightarrow \odot wieder in u.K.

Ist die wahre Sonnenzeit eine gute Art. die Zeit zu messen?
Ja & Nein, denn:

wahre SZ ist bzgl. folgendem ungleichförmig:

- elliptische Erdbahn
- \odot in Ekliptik, nicht im Äquator

(Aphel: 4.7., A
Perihel: 3.1.) m

Mittlere Sonnenzeit

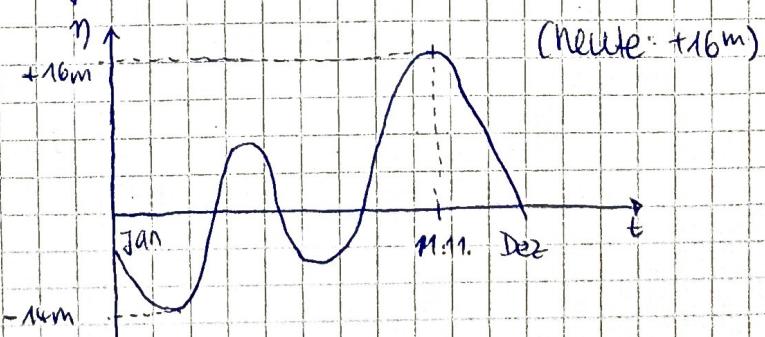
mittlere Ekliptiksonne (Π & A)
mittlere Äquatorsonne (Π , $\underline{\Omega}$)

$$T_m = t_m + 12h$$

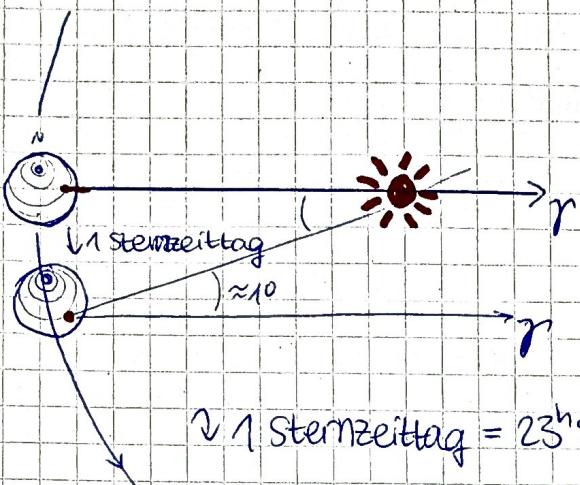
mittlerer Sonnenzeittag

Zeitgleichung

$$\Delta\gamma = T_{\odot} - T_m$$



83 Zusammenhang $T_m - \text{H}$



$$\rightarrow 1 \text{ Sternzeittag} = 23^h 56^m 04^s \text{ (sonnenzeiteinheit)}$$

1 tropisches Jahr: \odot im $\gamma \rightarrow \odot$ wieder im γ

$$= 365,2422 \dots$$

mittl. ~~8~~ Sonnen
zeittage

$$= 366,2422 \dots$$

Stemzeittage

Beispiel: H jetzt?

$$\begin{array}{ll} 23.09. \text{ um mittlerer Mitternacht} & \rightarrow \text{H} = 0^h \\ 22.12. -11^{\circ} & \rightarrow \text{H} = 6^h \\ 9.11. -11^{\circ} & \rightarrow \text{H} = 3^h \\ 9.11. \text{ um } 15\text{Uhr} & \rightarrow \text{H} = 3^h + 15^h = 18^h \end{array}$$

§4 Ortszeiten, Weltzeit, Zonenzeit

Ortszeiten

$$(\text{H}_1 - \text{H}_2) = \lambda_1 - \lambda_2 \quad (\lambda > 0 \text{ östl. von Greenwich})$$

$$T_{01} - T_{02} = \lambda_1 - \lambda_2$$

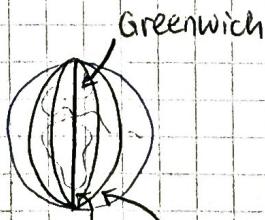
$$T_m - T_m = \lambda_1 - \lambda_2$$

Weltzeit (Universal Time)

$$UT = T_m |_{\lambda=0}$$

$$T_m = UT + \lambda \quad (\lambda = 46^m \text{ in Jena})$$

Zonenzeit



$$T_z = UT + nh$$

(in Indien gibt's auch halbe Zeitverschiebungen)

$$\text{Winterzeit} \quad T_w = T_z$$

$$\text{Sommerzeit} \quad T_s = T_z + 1^h$$

\rightarrow Beispiel: $T_0 = 12h$, $T_w = ?$

$$T_m = T_0 - \lambda = 11^h 44^m \rightarrow UT = T_m - \lambda = 10^h 58^m \rightarrow T_z = T_w = UT + nh = 11^h 58^m$$

§ 185 Kalender

= System zur Berechnung von Tagen im Jahr

1 trop. Jahr = 365,2422 .. mittl. Sonnentage

Julianischer Kalender (Caesar, 46 v. Chr., initiiert von Sosigenes)

$365 + 365 + 365 + 366 \leftarrow$ Schaltjahr: teilbar durch 4 (29.02.)

$\langle 1 \text{ Kljahr} \rangle = 365,25 \equiv \text{Fehler: } 3 \text{d in 400 Jahren}$

Gregorianischer Kalender (Papst Gregorius XIII, 1582, von Lilius)

Schaltjahre sind die, die $\frac{4}{4}$ teilbar sind, außer die, die (durch 100, aber nicht durch $\frac{400}{400}$) teilbar sind

Bsp.: 1600 1700 1800 1900 2000

~ Fehler: 1d in 3000 Jahren

5. Astrometrie

§ 1 Koordinatensysteme und Bezugssysteme

KS



BS

Realisierung/Verwirklichung/Materialisierung

Sternkatalog als BS:

Stern	α	δ
-	-	-
-	-	-



Annahmen:

- gemessene Koordinaten = wahre Koordinaten

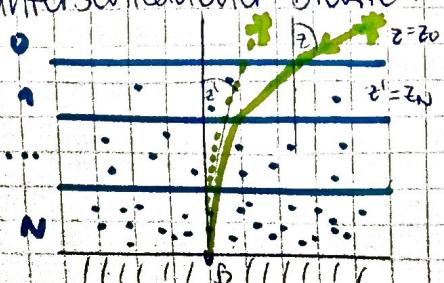
- Koordinaten bleiben konstant

Problem: beide stimmen nicht. Warum?

→ es gibt eine Reihe "kleiner Effekte", die das beeinflussen
(wir werden diese (bzw. einige davon) im folgenden vorstellen)

§ 2 Refraktion

Annahme/Vereinfachung: Erde ist umhüllt von Lufschichten unterschiedlicher Dicke.



z : wahrer Zenitabstand

z' : scheinbarer -||-

$z - z' \equiv g$ Refraktion

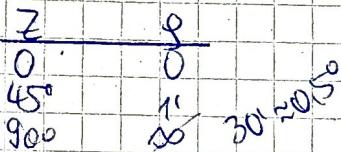
$$\text{Brechungsgesetz} \Rightarrow \frac{\sin z_0}{\sin z_1} = \frac{n_1}{n_2}, \frac{\sin z_1}{\sin z_2} = \frac{n_2}{n_3}, \dots, \frac{\sin z_{n-1}}{\sin z_n} = \frac{n_{n-1}}{n_n}$$

$$\text{Multiplikation aller Gleichungen} \Rightarrow \frac{\sin z_0}{\sin z_n} = \frac{n_1}{n_n} \Rightarrow \frac{\sin z}{\sin z'} = n_n$$

$$\frac{\sin(z) + g}{\sin z} = n_n, \quad \frac{\sin z' \cos g + \cos z' \sin g}{\sin z'} \approx 1$$

$$\Rightarrow 1 + \frac{g}{\tan z'} = n_n \quad \text{bzw. } g = (n_n - 1) \tan z'$$

$$\approx g \approx 1' \tan z'$$

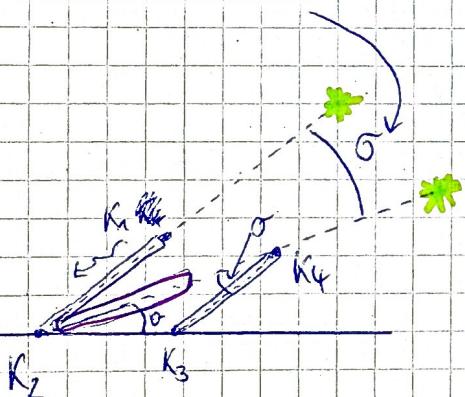


→ Stimmt nicht! → Vernachlässigung der Krümmung u.d.
dürfen nicht vernachlässigt werden



Differenzialreflektion

§ 3. Aberrationen (= Aberration in der Optik)



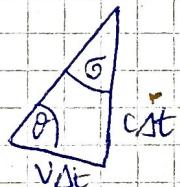
$$\frac{\sin \alpha}{v_{\text{rel}}} = \frac{\sin \theta}{c \sin t}$$

B: Beobachter

G: Geozentrum

S: Sonne

*: Stern



$$\vec{v}_{B*} = \vec{v}_{BG} + \vec{v}_{GS} + \vec{v}_{S*}$$

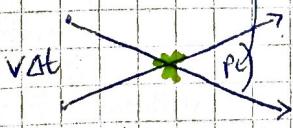
Häufige jährliche scheinbare
 $\leq 0.5''$ $\leq 205''$

James Bradley (1728)

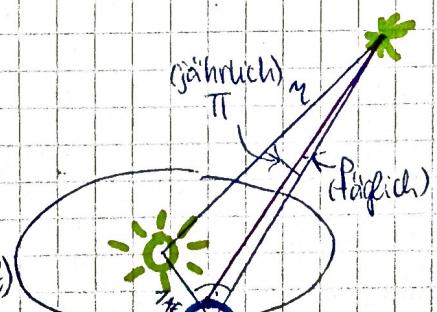
$$\alpha [\text{rad}] = \frac{v}{c} \sin \theta$$

$$\alpha ["] = 206265 \frac{v}{c} \sin \theta$$

§ 4 Parallaxe



parallax second
Entfernung zum Stern,
dessen jährl. α , $1''$ betrifft
= 206265 AE
 $\approx 3 \cdot 10^{18} \text{ cm}$
 $\approx 3.26 \text{ ly}$



$$P_{\text{rel}} \approx 57'', P_{\odot} \approx 8.8''$$

$$P_{\odot} \approx 0.00001'' = 40 \text{ mas (Gaia!!!)}$$

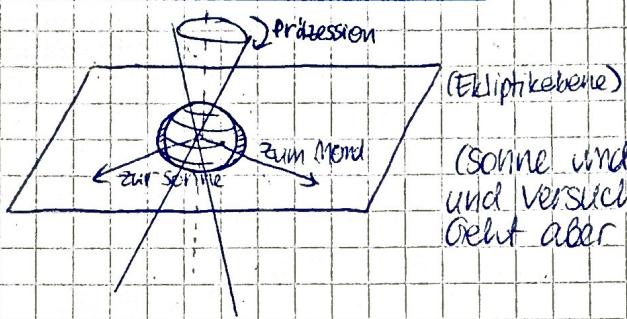
$$\sin \pi = \frac{1 \text{ AE}}{r}$$

$$\pi (\text{rad}) = \frac{1 \text{ AE}}{r}, \pi ["] = \frac{206265 \text{ AE}}{r}$$

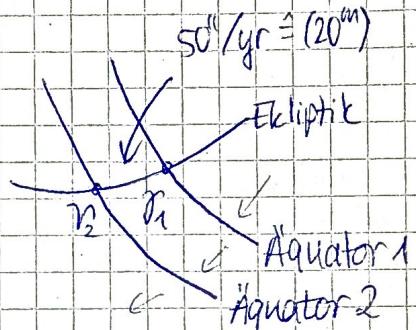
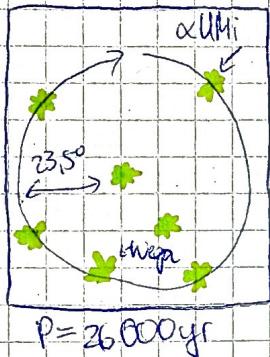
$$r = 1.5 pc$$

1858 Struve (α Lyr),
Henderson (α Cen), $\alpha'' = 0.75'' \Rightarrow$
Bessel (α Cyg)

§5 Präzession & Nutation



(Sonne und Mond "ziehen" an der Erde und versuchen diese aufzurichten. Geht aber nicht, da sie sich dreht)

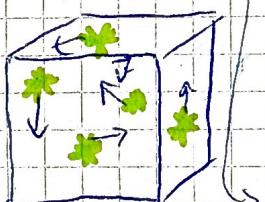


Hipparch (II Jhd. v. Chr.) hat die Präzession entdeckt.

Merkmal: Präzessiert auch \rightarrow es gibt noch einen zusätzlichen Term ω in der Bahngleichung
 \rightarrow dieser Effekt heißt Nutation ($\approx 9''$ entdeckt von Bradley, 1728)

§6 Eigenbewegung der Sterne

in Bezug aufeinander bewegen sich die Sterne irgendwie zufällig



$$v \sim 10 \text{ km/s}$$

\sim dadurch ändert sich natürlich auch die Position der Sterne, die wir messen wollen

$$\mu \equiv \frac{v}{\Delta n} \approx 1''/\text{Jahr}$$

"Rekord-Zeit": Barnard-Pfeilstern: $\mu = 10''/\text{Jahr}$

per Definition: $\mu_x = \dot{x} = \frac{dx}{dt}$ $\mu_\phi = \dot{\phi} = \frac{d\phi}{dt}$

$$\Rightarrow \mu^2 = (\mu_x \cos \phi)^2 + \mu_\phi^2$$

(zuerst entdeckt von Halley, 1718)

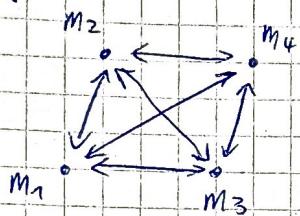
(erklärt von Bradley, 1727)

6. Himmelsmechanik

VL
23.11.2017
von Simon
abgeschrieben

§1 Problemstellung

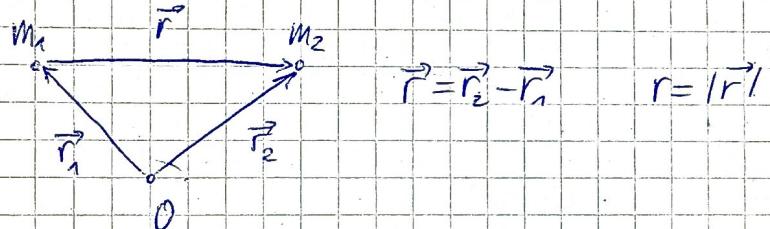
gravitatives N -Körper-Problem



jeweils m_i, \vec{F}_i
(in der Regel newtonische Kräfte)

~ im speziellen: 2-Körper-Problem
(z.B.: Erde-Mond, Sonne-Planet, Planet-Satellit,...)

§2 Bewegungsgleichung



$$\text{Kräfte: } \vec{F}_1 = G \frac{m_1 m_2}{r^3} \cdot \vec{r} = m_1 \ddot{\vec{r}}_1$$

$$\vec{F}_2 = -G \frac{m_1 m_2}{r^3} \cdot \vec{r} = m_2 \ddot{\vec{r}}_2$$

$$\text{Differenz: } \ddot{\vec{r}} = \ddot{\vec{r}}_2 - \ddot{\vec{r}}_1 = -G \frac{(m_1 + m_2)}{r^3} \vec{r} = -\mu \vec{r} \quad \text{mit } \mu = G(m_1 + m_2)$$

§3 Drehimpulserhaltung

$$\vec{r} \times \dot{\vec{r}} = \text{const.} \Rightarrow \frac{d}{dt} (\underbrace{\vec{r} \times \vec{r}}_{\text{spez. Drehimpuls}}) = 0$$

spez. Drehimpuls

$$\sim \frac{d}{dt} (\vec{r} \times \dot{\vec{r}}) = \underbrace{\dot{\vec{r}} \times \vec{r}}_{=0} + \vec{r} \times \ddot{\vec{r}} = -\vec{r} \times \left(\frac{\mu}{r^3} \vec{r} \right) = 0$$

→ Drehimpulserhaltung, $\vec{r} \times \dot{\vec{r}} = \vec{c}$ = konstanter Vektor

$\vec{r} \perp \vec{c}, \dot{\vec{r}} \perp \vec{c}$, Bewegung in Ebene

~ 3 Integrale

§4 Energieintegral

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\vec{r}^2}{2} - \frac{\mu}{r} \right) = 0$$

spez.
kin. Energie
 \uparrow
pot. Energie

$$\Rightarrow \frac{\vec{r}^2}{2} - \frac{\mu}{r} = \text{const} = \frac{h}{2} \rightarrow \text{Energieintegral} \rightarrow 4 \text{ Integrale}$$

$$\left(\frac{2\ddot{\vec{r}} \cdot \vec{r}}{r^2} + \frac{\mu \vec{r} \cdot \ddot{\vec{r}}}{r^3} - \vec{r} \cdot \underbrace{(\ddot{\vec{r}} + \frac{\mu \vec{r}}{r^3})}_{=0} \rightarrow \text{Bew. glg.}} \right)$$

$h < 0 \Rightarrow r$ beschränkt \Rightarrow gebundene Bew. | $h = 0$ | $h > 0 \Rightarrow r$ unbeschränkt \Rightarrow ungebundene Bew.

§5 Laplace-Integral

$$\vec{c} \times \ddot{\vec{r}} = (\vec{r} \times \ddot{\vec{r}}) \times (-\frac{M}{r^3} \vec{r}) = \frac{M}{r^3} \vec{r} \times (\vec{r} \times \ddot{\vec{r}}) = \frac{M}{r^3} [\vec{r}(\vec{r} \cdot \ddot{\vec{r}}) - \ddot{\vec{r}}(\vec{r} \cdot \vec{r})] =$$

$$= \frac{M r \ddot{r}}{r^2} - \frac{M \dot{r}^2}{r} = \frac{d}{dt} [M \frac{\vec{r}}{r}] = \frac{d}{dt} [\vec{c} \times \vec{r}]$$

$$\Rightarrow \vec{c} \times \vec{r} + M \frac{\vec{r}}{r} = \text{const.} \equiv \mu \vec{e}$$

$\vec{c} \perp \vec{r}$

Laplace-Vektor

$\mu^2(e^2 - 1) = hc^2 \Rightarrow$ mit \vec{e} haben wir nur einen Freiheitsgrad bestimmt \rightarrow nur 5 Integrale

ein Freiheitsgrad bleibt, der die Position $\vec{r}(t)$ auf der Bahn angibt

§6 Geometrie der Bahnen

$$\vec{r} \cdot \vec{e} = r \cos \theta = -\vec{r} \left[\frac{\vec{c} \times \vec{r}}{M} + \frac{\vec{r}}{r} \right] = \frac{\vec{r} \cdot (\vec{r} \times \vec{c})}{M} - r = \frac{c^2}{\mu} - r$$

$$\Rightarrow r = \frac{c^2/\mu}{1+e\cos\theta} \quad (\vec{e} \text{ als Bezugsnichtung})$$

- e: Exzentrizität $\rightarrow 0 \leq e \leq 1$ Ellipse
 $e=1$ Parabel
 $e > 1$ Hyperbel

- Drehimpulskonstante: $2a = r(\theta=0) + r(\theta=\pi) = \frac{c^2}{\mu} \left[\frac{1}{1+e} + \frac{1}{1-e} \right]$

$$\Rightarrow c = \sqrt{\mu a (1-e^2)}$$

- Energiekonstante: $n = -\frac{\mu}{a} \rightarrow v^2 = \mu \left(\frac{2}{r} - \frac{1}{a} \right)$

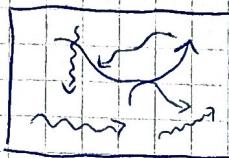
§7 Keplersche Gesetze

- Die Bahn eines Planeten ist eine Ellipse, in deren einem Brennpunkt die Sonne steht.
- Die vom Fahrstrahl überstrichene Fläche (pro Zeiteinheit) ist konstant.
- $S = \int_0^P \frac{1}{2} c dt = \frac{c P}{2} = \frac{\sqrt{\mu a (1-e^2)}}{2} P = \pi a b$ (Ellipsenfläche)
 $P = 2\pi \sqrt{\frac{a^3}{\mu}}$ $\approx \frac{P^2}{a^3} = \frac{4\pi^2}{\mu} \approx \frac{4\pi^2}{GM_1}$ (wenn $M_2 \ll M_1$)
 $\Rightarrow \frac{P^2}{a^3} = \text{const.}$ für alle Planeten

7. Astrophotometrie

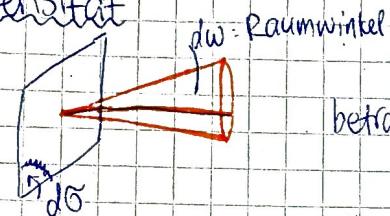
8.1 Grundbegriffe

Strahlungsfeld:



(viele Strahlen mit unterschiedl. λ unterschiedl. Richtung...)

Intensität



betrachtet nur $[v, v+dv]$
 $[t, t+dt]$

$$\sim dE_v = I_v d\omega dv dt$$

(spezifische) Intensität

$$[I_v] = \frac{\text{erg}}{\text{cm}^2 \cdot \text{sterad} \cdot \text{Hz} \cdot \text{s}}$$

sterad
= $[\omega]$
(Raumwinkel)

(natürlich auch als I_ν darstellbar)

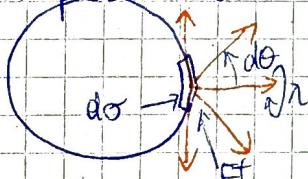
$$\rightarrow (\text{Gesamt})\text{Intensität} \quad I = \int_0^\infty I_\nu dv = \int_0^\infty I_\nu dr$$

Fluss

$$dE_v = F_\nu d\omega dv dt$$

(spez.) Fluss (dichte) \rightarrow analog F_λ, F

Kugelförmig,
isotrop strahlend

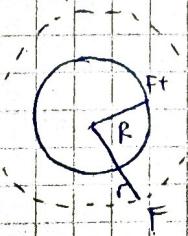


$$F_\nu = \int_{HR}^{TH} I_\nu \cos\theta d\omega = \int_0^{\pi/2} \int_0^{2\pi} I_\nu \cos\theta \sin\theta d\theta d\phi = \dots = \pi I_\nu$$

Leuchtkraft (eines Körpers)

$$dE = L dt, \quad [L] = \frac{\text{erg}}{\text{s}}$$

$$L_\odot = 4 \cdot 10^{26} \text{ W}$$



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

$$\sim F = F^+ \left(\frac{R}{F}\right)^2$$

§2 Scheinbare Helligkeit

$$F \left[\frac{\text{erg}}{\text{cm}^2 \cdot \text{s}} \right] \leftrightarrow m \text{ [Größenklassen, Magnituden]}$$

Hipparch (2. Jh. v. Chr) : $m = 1, \dots, 6$

Pogson (1856) : $m = -2,5 \log F + C$

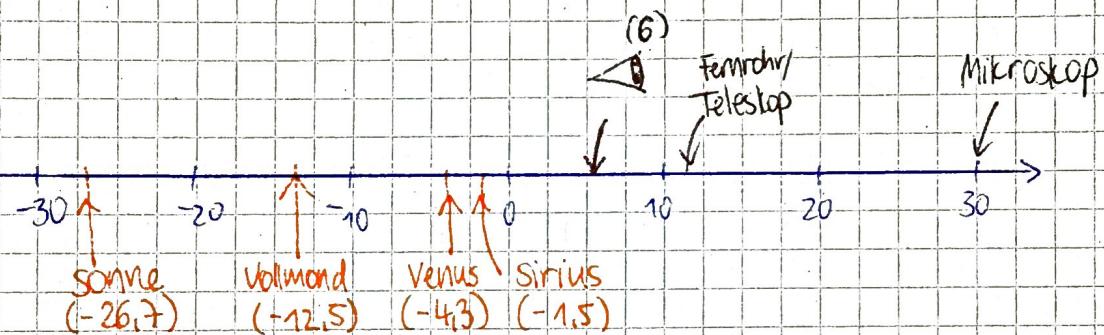
$\sim m \in \mathbb{R}$, invers
(helles Objekt $\Rightarrow M_{\min}$)

$$m_1 - m_2 = 2,5 \log \frac{F_2}{F_1}$$

$$\frac{F_2}{F_1} = 10^{0,4(m_1 - m_2)}$$

$$\sqrt[5]{100} = 2,512 \dots$$

m nicht linear!
Aber F !!!



§3 Absolute Helligkeiten

$$L \left[\text{W} \right] \leftrightarrow M \text{ [Gr., Magn.]}$$

$$M = -2,5 \log L + C_1$$

$$M = m \Big|_{r=10 \text{ pc}}$$

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

$$m = -2,5 \log F + C$$

$$\Rightarrow \dots \Rightarrow M - m = 5 \log r + C_2$$

$$M - m = 5 \log r [\text{pc}] - 5 \quad \text{Entfernungsmittel}$$

$$M_{\odot} = +4,8^m \quad \Rightarrow \text{die Sonne ist eigentlich kein besonders heller Stern}$$

§ 4 Schwarzer Strahler

Strahlungsmechanismen

- thermische Strahlung → hierfür haben wir ein tolles Modell: den schwarzen Strahler (= Körper, der alle ankommende Strahlung absorbiert)
- Brennstrahlung
- Lumineszenz

$$I_\nu \stackrel{\text{black}}{=} B_\nu(\nu, T)$$

§ 5 Planck'sches Gesetz (1900)

$$B_\nu(\nu, T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} [e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1]^{-1}$$

Achtung: $B_\nu \neq B_\lambda$

Sondern: $B_\lambda(d\lambda) = B_\nu(d\nu)$

$$\Leftrightarrow B_\lambda(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} [e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1]^{-1}$$

$$\begin{aligned} (\nu &= \frac{c}{\lambda}) \\ \rightarrow d\nu &= \frac{c}{\lambda^2} d\lambda \end{aligned}$$

§ 6 Näherungen

Wien-Näherung $\nu \gg kT$ (Strahlungsenergie dominiert über innere Energie)

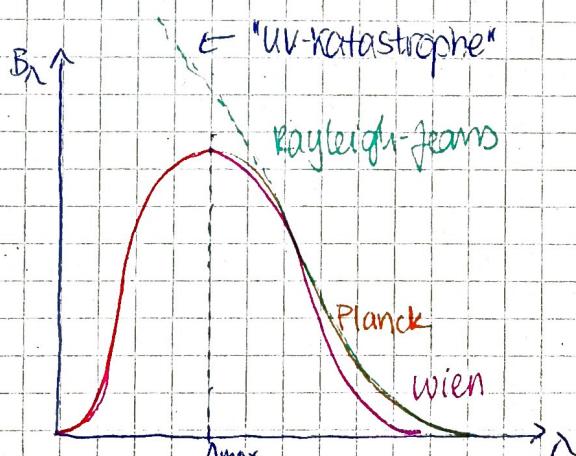
$$\Rightarrow B_\nu \approx \frac{2h\nu^3}{c^2} e^{-\frac{h\nu}{kT}}$$

Rayleigh-Jeans-Näherung $\nu \ll kT$

$$\Rightarrow B_\nu \approx \frac{2h\nu^3}{c^2} \left[1 + \frac{h\nu}{kT} + \dots - 1 \right]^{-1} \approx \frac{2\nu^2}{c^2 kT}$$

Fehler in Rayleigh-Jeans-Näherung:

$$B_\nu(\nu, T) \approx \frac{2kT\nu^2}{c^2}$$



Hintergrundstrahlung hat 2,7 K.

§ 7 Wien'sches Verschiebungsgesetz

$$B_\nu(\nu, T) \rightarrow \max$$

$$\lambda_{\max} [\text{cm}] = \frac{0,29}{T [\text{K}]}$$

§ 8 Stefan-Boltzmann-Gesetz

$$F^2 = \pi B = \pi \int_0^\infty B_\nu d\nu = \sigma T^4$$

$$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-5} \frac{\text{erg}}{\text{cm}^2 \text{s} \text{K}^4}$$

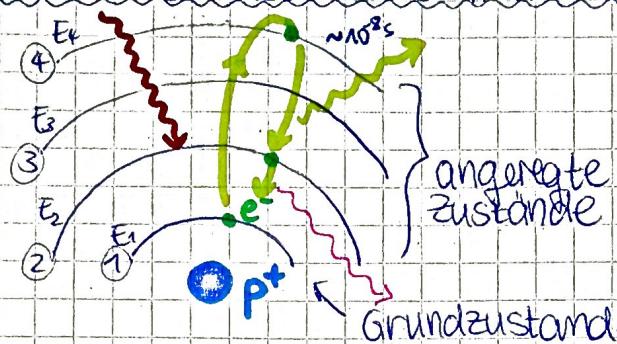
$$\text{bsp. Wien: } T = 1000 \text{ K}$$

$$F^2 = 6 \cdot 10^9 \frac{\text{W}}{\text{cm}^2} = 60 \frac{\text{kW}}{\text{cm}^2} \approx 10^{13} \frac{\text{W}}{\text{cm}^2} \approx 1 \text{ MW} \frac{\text{W}}{\text{cm}^2}$$

8. Astrospektroskopie

§ 1 Absorption und Emission der Strahlung

Fahr'sches Modell des H-Atoms (1913)



$$E_i = \frac{E_1}{i^2}$$

$$E_1 = -13,56 \text{ eV}$$

BB-Übergänge (bound-bound)

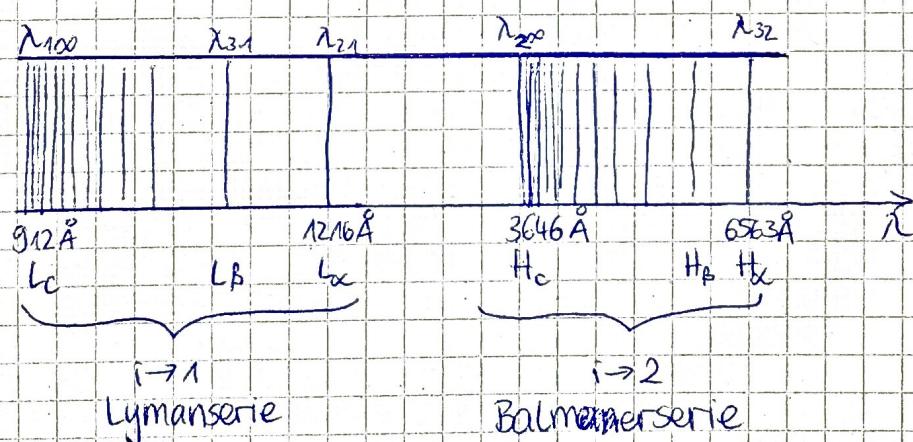
- Absorption eines Photons \rightsquigarrow Anregung \rightsquigarrow Abregung

$$i \rightarrow k \quad E_{ik}$$

$$\hbar\nu_{ik} = |E_i - E_k| = |E_1| \left| \frac{1}{i^2} - \frac{1}{k^2} \right| = \hbar\nu_{100} \left| \frac{1}{i^2} - \frac{1}{k^2} \right|$$

$$\lambda\nu = c \quad \Rightarrow \quad \lambda_{ik} = \lambda_{100} \frac{i^2 k^2}{i^2 - k^2} \quad \text{mit } \lambda_{100} = 912 \text{ Å} = 912 \text{ nm}$$

Spektralserien



Verbogene Linien

(metastabil), $\sim 10^6 \text{ yr}$



ISM

Andere Übergänge

- BF-Übergänge (bound-free, Ionisation)
- FB-Übergänge (free-bound, Rekombination)
- FF-Übergänge (free-free, Streuung)

$\lambda = 21 \text{ cm}$
(Radiowellen)

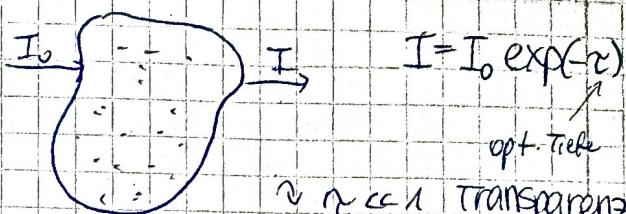
Polarlichter
in grün sind
Ausdruck ver-
botener Linien
(des Sauerstoffs)

E beliebig, weil mit F

$$\sum n_{ik}$$

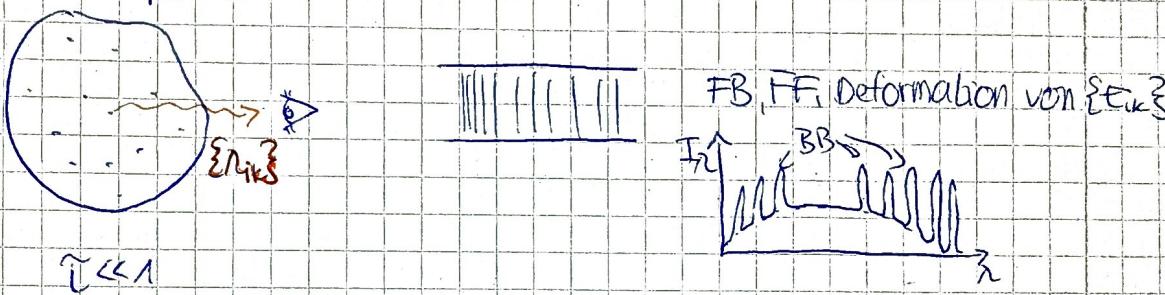
§2 Typen von Spektren

- optische Tiefe/Dicke

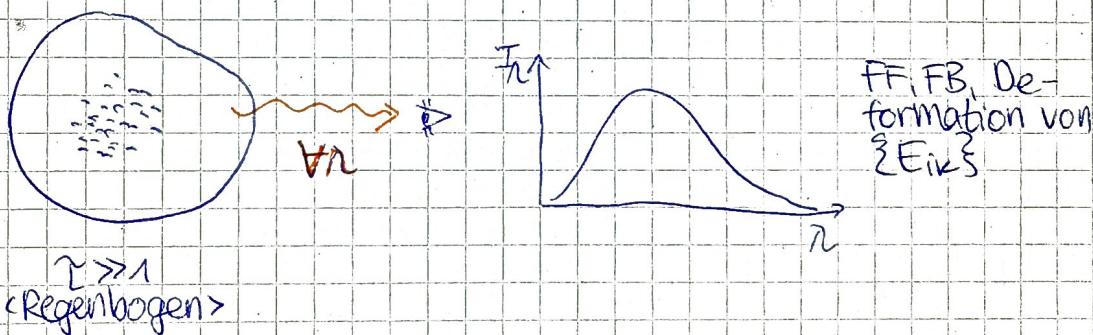


$\sim z \ll 1$ Transparenz
 $\gg 1$ Intransparenz
 $z = z(\lambda)$

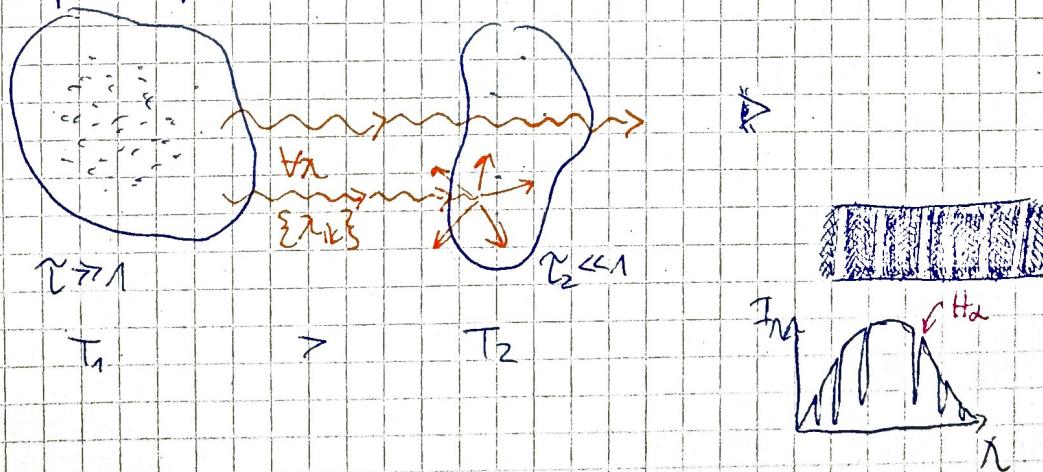
- Emissionsspektren



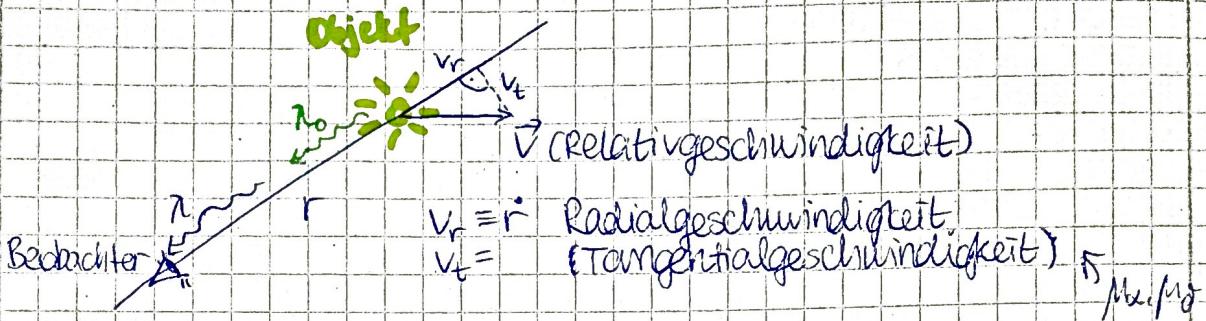
- Kontinuierliche Spektren



- Absorptionspektren



§ 3 Doppeler-Effekt



"Problem": abgestrahlte WL $\lambda_0 \neq$ beobachtete WL λ
(falls $v_r \neq 0$)

Näherungsformel

$$z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} = \frac{v_c}{c}$$

$v_r > 0 \Leftrightarrow r \uparrow \Leftrightarrow \lambda > \lambda_0 \Leftrightarrow$ Rotverschiebung

$v_r < 0 \Leftrightarrow r \downarrow \Leftrightarrow \lambda < \lambda_0 \Leftrightarrow$ Blauverschiebung

$z \approx \max 7$
aber! Formel
gilt da
nicht

Exakte Formel

$$z = \sqrt{\frac{1 + v/c}{1 - v_r/c}} - 1 \text{ (spez. Relativitätstheorie)}$$

Beispiele

- Radialgeschwindigkeit der Sterne leicht messbar
- Thermische Verbreiterung von Linien
- Rotation der Sterne
- Doppelsterne / Stern+Planet

9 Das Sonnensystem

VL
14.12.2017

§ 1 Überblick

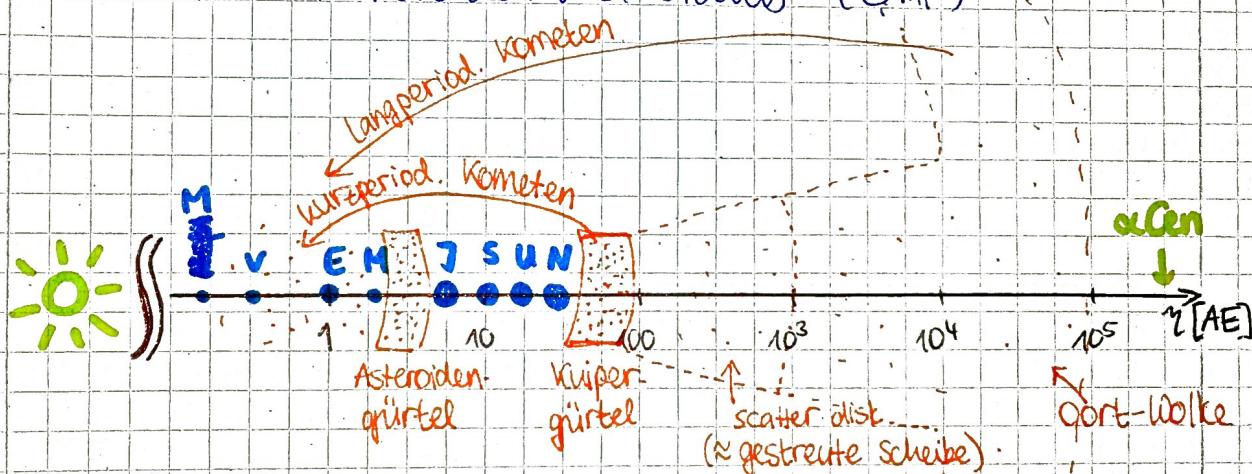
Komponenten

- (Sonne) (ausgeklammert, weil sie ein Stern ist)
- Planeten
- Monde und Ringe
- Kleinkörper (Asteroiden, Kometen, ...)
- Meteoriten und Staub
- ...

Was ist die "wichtigste" Komponente?

→ in welchem Sinne "wichtig"?

- Masse: Sonne
- Drehimpuls: Planeten ($\sum m_i v_i$)
- Querschnitt: Meteoroiden und Staub ($\sum m_i^{1/3}$)



→ flache Geometrie

- Planeten: $\langle e \rangle \sim \langle I \rangle \sim 0$, Umlauf \textcirclearrowleft , Rotation \textcirclearrowright (außer ^{Venus} & ^{Uranus} \textcirclearrowleft)
- Asteroiden: $\langle e \rangle \sim 0.1$, $\langle I \rangle \sim 10^\circ$
- Kometen: $\langle e \rangle \sim 0.7$, $\langle I \rangle \sim 10^\circ$

I: Inklination
(Winkel bzgl.
"Ebene" des SS)

§ 2 Planeten

Planet	a[AE]	e	I[°]	P	M [M_\oplus]	$S [cm^{-2}]$	Prot	Oberfläche?	Sortell?	Ring?
Merkur	0,4	0,2	7	88d	0,06	↑	58d	+	0	-
Venus	0,7	↑	≈ 0	225d	0,82	≈ 4,6	243d	+	0	-
Erde	1,0	↑	0	1 yr	1	↓	1d	+	1	-
Mars	1,5	-	↑	-	0,11	↓	1d	-	2	-
Jupiter	5,2	≈ 0,1	f	-	300	↑	11d	+	69	+
Saturn	9,5	↓	≈ 0	-	95	≈ 1	1d	+	62	+
Uranus	19	↓	↓	-	15	↓	-	-	27	+
Neptun	30	↓	↓	160 yr	17	↓	↓	-	14	+

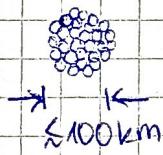
Erdähnliche
terrestrische
Planeten

Jupiterähn.
(Gasriesen)
(Feuerriesen)

	ähnliche Erdatmosphäre	Jupiter, Saturn	Uranus, Neptun
Innenter Aufbau	<p>Atmosphäre Kruste Mantel Kern (Fe+Ni)</p>	<p>Atmosph. flüss. metall. Kern steiniger Kern</p>	<p>Atm. Eis und Gestein</p>
Atmosphären	Diversität, z.B. - Erde: N_2 , $p=1\text{ bar}$ - Venus: CO_2 , $p=100\text{ bar}$	H, He	H, He, (O), (C)
chem. Zusammen- setzung	<p>z.B. Erde: Fe (35%), Si (30%), O (15%), Mg (13%)</p>	H, He	H, He

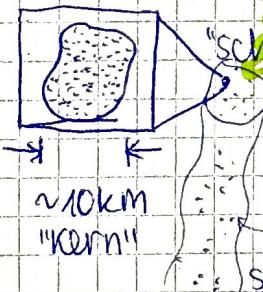
§ 3 Kleinkörper

Asteroiden



"Schotterhaufen" aus C, Si, Metallen

Kometen



"schmutziger Schneeball"

→ wenn der Komet sich der Sonne nähert,
"schmilzt" die Eismatrix

staubkörner

≈ sichtbares Nichts

- Meteoroiden-Staub-Grenze ist fließend (Konvention: $V \leq 1\text{ mm}^3/\text{Staub}$).

- Unterschied Meteorit / Meteoroid / Meteor

↑
erreicht die
Erd-OF

↑
Überbegriff

↑
vorglüht vollständig in
der Erdatmosphäre
(= Sternschnuppe)

§4 Extrasolare Planetensysteme

Seit 1995: ~ 4000 Planeten ($\sim 25\%$ Sterne)

Methoden:

- Radialgeschwindigkeit / -methode
- Transit-Methode



SO

Wenn der Planet vom Stern steht, wird ein Teil dessen Helligkeit abgeschirmt



Ergebnisse: Diversität!

z.B.:

- exzentrische Bahnen ($e \approx 0.9$)
- "heile Jupiter" ($a \ll 1 \text{ AE}$)
- "Supererden"

VL
21.12.2017
(von Simon
abgeschrieben)

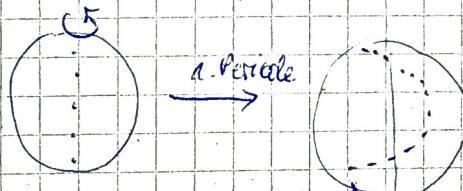
10. Die Sonne

§1 Beobachtungsdaten

- Radius $R_\odot = 7 \cdot 10^{10} \text{ cm} = 7 \cdot 10^5 \text{ km}$
- Masse $M_\odot = 2 \cdot 10^{30} \text{ kg}$
- Solarkonstante $Q = 1,36 \frac{\text{ kW}}{\text{ m}^2} = 1,36 \cdot 10^6 \frac{\text{ erg}}{\text{ cm}^2 \text{ s}}$

$$M_\odot = 1,4 \frac{\text{ g}}{\text{ cm}^3}$$

- Rotation



Differential-
rotation

- Prot (Äquator) $= 25 \text{ d}$ (+2d von Erde aus gesehen)
- Prot (Pol) $= 30 \text{ d}$
- Neigung Sonnenäquator-Ecliptik $\approx 7^\circ$
- Form: Relativabplattung $J_\odot = \frac{R_{\text{Äqu}} - R_{\text{Pol}}}{R_{\text{Äqu}}} \approx 10^{-6}$
- Vergleich: $J_\oplus \approx 10^{-3}$, $J_J \approx 10^{-2}$ (Jupiter)

§2 Spektrum

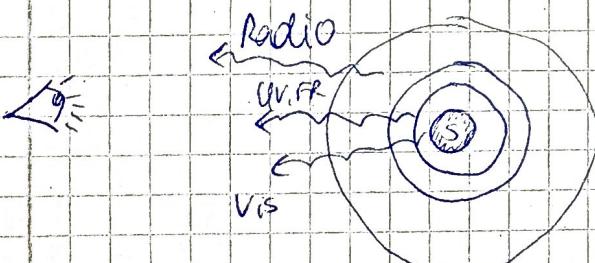
chemische Zusammensetzung:

- L_{\odot} (1216 Å) in Emission
- H & K (Ca II (Ionisierungsgrad +1, 4000 Å))
- H α , H β , H γ (Na (5900 Å))
- D $_1$ & D $_2$
- Metalle (z.B. Fe, Ti, Ni, ...)

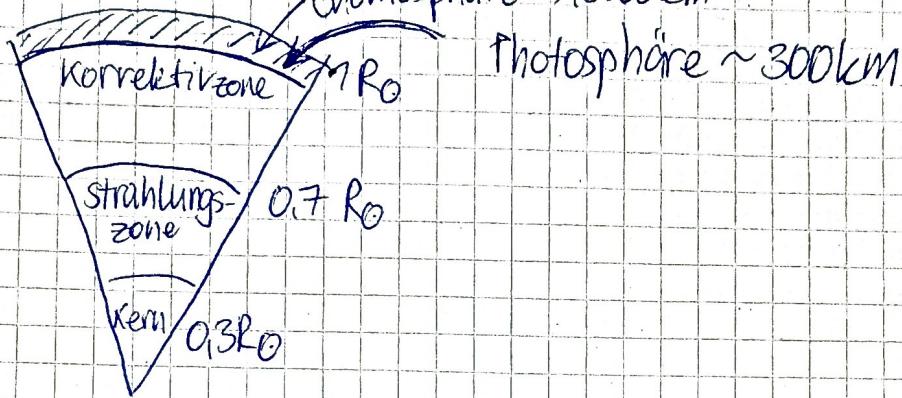
Massenanteile: H \approx 71%, He \approx 27%, Metalle \approx 2%

- Temperatur:

- Effektivtemperatur: $\pi \int I_{\lambda} d\lambda = \pi \int B_{\lambda} d\lambda$
 $\approx T_{eff} = 5800 K$
- Strahlungstemperatur: $T = T(\lambda_*) \leftarrow I_{\lambda_*} = B_{\lambda_*}$
- $T_{str} (Vis) \approx 6000 K$
 $T_{str} (UV) \approx T_{str} (FIR) \approx 4.5 \cdot 10^3 K$
 $T_{str} (Radio) \approx (1 \dots 2) \cdot 10^6 K$ (!!!)



83 Aufbau und Energiequelle
korona Chromosphäre $\sim 15000\text{ km}$

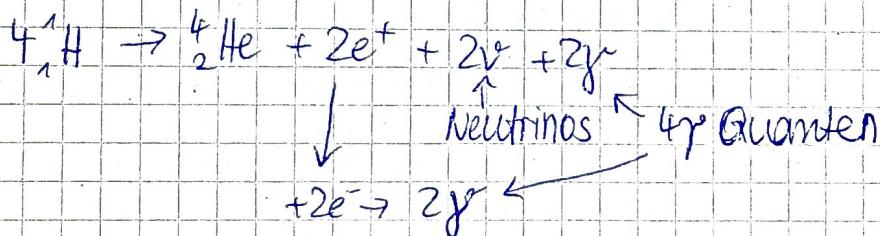


• Kern: $T_c \sim 14 \cdot 10^6 \text{ K}$

$$\rho_c \sim 150 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$$

$$P_c \sim 220 \cdot 10^9 \text{ bar}$$

$[\text{Proton-Proton}] \times [\text{Zyklus-Kette}]$



• Strahlungszone: FF-Übergänge

$$\gamma \rightarrow X \rightarrow \text{UV} \rightarrow \text{Vis}$$

• Konvektivzone $\sim 1\text{--}2 \text{ km/s}$

• Photosphäre $\rho \sim 10^{-7} \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$ Granulation

• Chromosphäre $\rho \sim 10^{-9}\text{--}10^{-15} \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$

• Korona  Akustische Stoßwellen

11 Sterne

§ 1. Allgemeines

Was ist ein Stern?

- A. (1) eine große heiße Gas-Kugel (es gibt welche, die sind weder groß, noch heiß, noch kugelförmig, noch aus Gas :))
- besser (aber länger):

- räumlich isolierte

- gravitativ gebundene

- für die eigene Strahlung undurchlässige Ansammlung von Materie, in der die Umwandlung von leichtem Wasserstoff in Helium ($^1\text{H} \rightarrow \text{He}$) stattgefunden hat / stattfindet oder stattfinden wird.

Warum sind Sterne wichtig?

- "Lager" des Universums (meiste Masse bzw. Materie "liegt" dort)
- "Kraftwerke" (meiste Strahlungsenergie kommt von dort)
- "Chemische Fabriken" (alle Elemente - bis auf H & He - gibt's/gab's dort)

→ ersteres wird durch die Existenz der "dunklen Materie" angezweifelt
 → zweiteres wird durch die Hintergrundstrahlung (die vom Urknall kommt) relativiert

Warum sind Sterne für uns wichtig?

- trivial: die Sonne ermöglicht das Leben auf der Erde → wir brauchen C und O
- "anthropisches Prinzip": das Universum ist so gebaut, damit es jemanden gibt, der es beobachtet
- oder (Physiker): die Naturkonstanten sind, wie sie sind, weil es sonst kein Leben auf der Erde gäbe

§ 2 Kenngrößen

Parameter	Methode	Ergebnisse
Massen M unseere Galaxie:  \rightarrow Population I Population II $\rightarrow z \sim 0.01 \dots 0.03$ $\rightarrow z \ll 0.01$ $(x, y, z):$ Anteil an H, He, Metallen	direkte: 3. Keplersches Gesetz	$0.08 \leq \frac{M}{M_\odot} \leq 50 \dots 100$ " " $80 M_{\text{jup}}$
Leuchtkraft L (absolute Helligkeit M)	$m-M = 5 \log \frac{L}{L_\odot} + 5$	$10^{-4} \leq \frac{L}{L_\odot} \leq 10^6$
Radius R	direkt: Interferometrie	$0.1 \leq \frac{R}{R_\odot} \leq 1000$
Effektivtemperatur T_{eff}	Spektrum, $L \propto T_{\text{eff}}^4 \cdot 4\pi R^2$	$2500 \leq T_{\text{eff}} [\text{K}] \leq 50000$
chem. Zusammensetzung (x, y, z)	Linien	$x \sim 3/4, y \sim 1/4, z: \text{siehe Rand}$

§ 3 Spektralklassifikation

Harvard-Klassifikation (nach Annie Cannon u.a.) 1918-1924

→ HD-Katalog (beinhaltet 225 000 Sterne)

- quasi alle Sterne, die mit einem Fernglas sichtbar waren

- durch ein Prisma vor dem Objektiv konnte man die Spektren aufnehmen & auswerten (natürlich nicht besonders gut aufgelöst...)

Typ	Linien	Teff [10^3 K]	Farbe	Bsp.
Oh	O	HeII, CIII, NIII, OIII	30...50	blau
be	B	HeI	10...30	weiß-blau Spica (α Vir), Rigel (β Ori)
a	A	H I	7...10	weiß Sirius (α CMa), Canopus (α Car), Vega
fine	F	H I, ionis. Metalle	6...7	weiß-gelb Procyon (α Mi)
gigl	G	H & K (α II), Metalle	5...6	gelb Sonne
hiss	K	G-Bande (CH), Metalle	3.5...5	orange Aldebaran (α Tau)
me	M	TiO u.a. Molekülbänder	2.5...3.5	rot Betelgeuze (α Ori), Merksätee, Antares (α Sco)

weitere: G0, G1, ... G9 (unsere Sonne: G2), späte frühe

L, T
zusätze: "p", "V" (variabel)

Leuchtkraftklassifikation (nach MKK) 1943

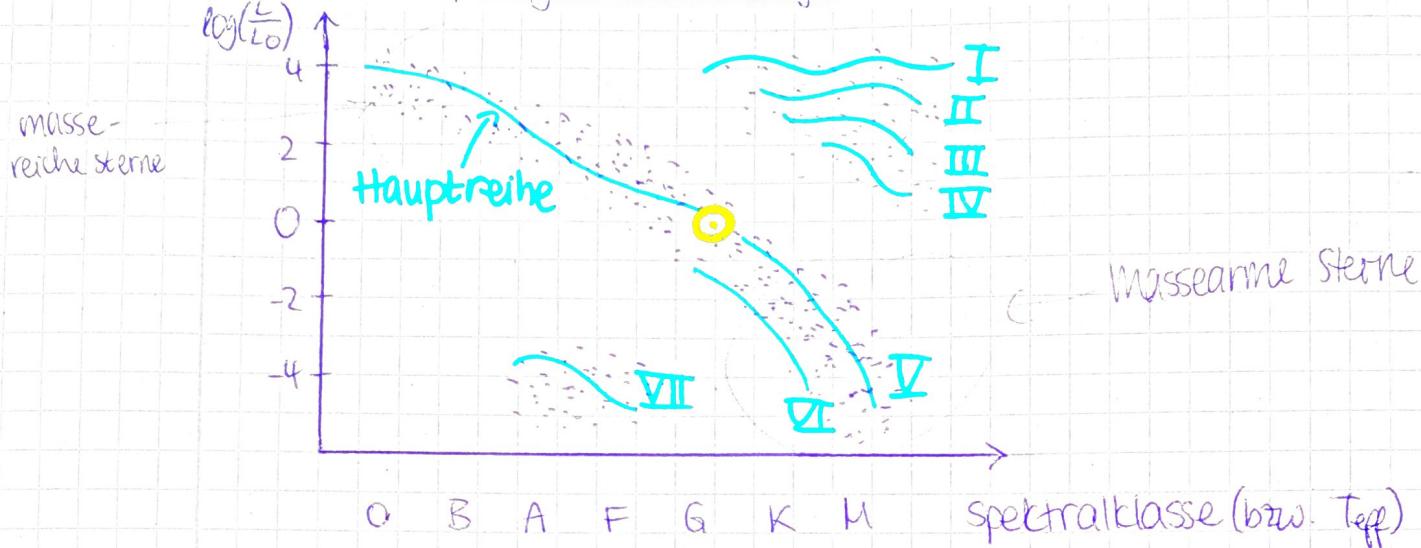
Bsp.: Zwei Sterne haben die gleiche Teff, aber unterschiedliche Leuchtkräfte L, dann müsste resultieren: $R_1 < R_2$ ($\text{Teff}_1 = \text{Teff}_2, L_1 < L_2$) sowie $M_1 \sim M_2, g_1 > g_2, p_1 > p_2, g_1 > g_2$ und Stern 1 hat breite Linien, Stern 2 schmale Linien.
z.B.: Sirius (1), Canopus (2)

~ Klassen von Leuchtkraft:

- I Überriesen
- II Helle Riesen
- III Riesen
- IV Untermiesen
- V Zwerge (\leftarrow Sonne)
- VI Unterzwerge
- VII Weiße Zwerge

~ Vollständige spektrale Klassifikation: Sonne: G2V

§4 Hertzsprung-Russell-Diagramm (HRD) 19.10.13

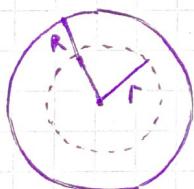


- vielleicht ändern die Sterne im Laufe des (Mrd.) Jaltze ihre Position auf dem HRD ändern!

- für die Hauptreihe gilt: $L \propto M^{3.8}$

12. Sternentwicklung

§1 Modelle



- Gleichung des hydrostatischen Gleichgewichts: (Gravitation = Gasdruck)

$$\frac{dp}{dr} = f_p(\gamma, g)$$

- Zustandsgleichung (z.B. ideales Gas)

$$p(r) \propto g(r) T(r)$$

$$\frac{dT}{dr} = f_T(\gamma, \dots, L_\gamma)$$

- Energieerhaltung

$$\frac{dL_\gamma}{dr} = f_L(\gamma, \dots)$$

$\mu(t, r)$ Molekülmasse
fließt dort mit ein

... das alles gibt uns: $p(r), g(r), T(r), L_\gamma(r)$

zeitliche Entwicklung

\Rightarrow Fusionskinetik \Rightarrow

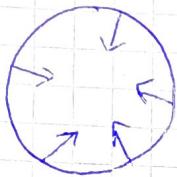
$$p(t, r), g(t, r), T(t, r), L_\gamma(t, r), M(t, r)$$

Vogt-Russell-Satz

Die Beschaffenheit eines Sterns hängt nur von seinem Alter, Masse und der chemischen Zusammensetzung ab.

§ 2 Entstehung

- im Kollaps von Molekülwolken im Interstellaren Medium



Jeans-Kriterium: Kollaps entsteht gdw. $M > M_{\text{krit}}$ wobei $M_{\text{krit}} = M_{\text{krit}}(T, g)$

→ Vergleich mit Realität: Massen aller Sterne ist größer als diese kritische Masse ☺

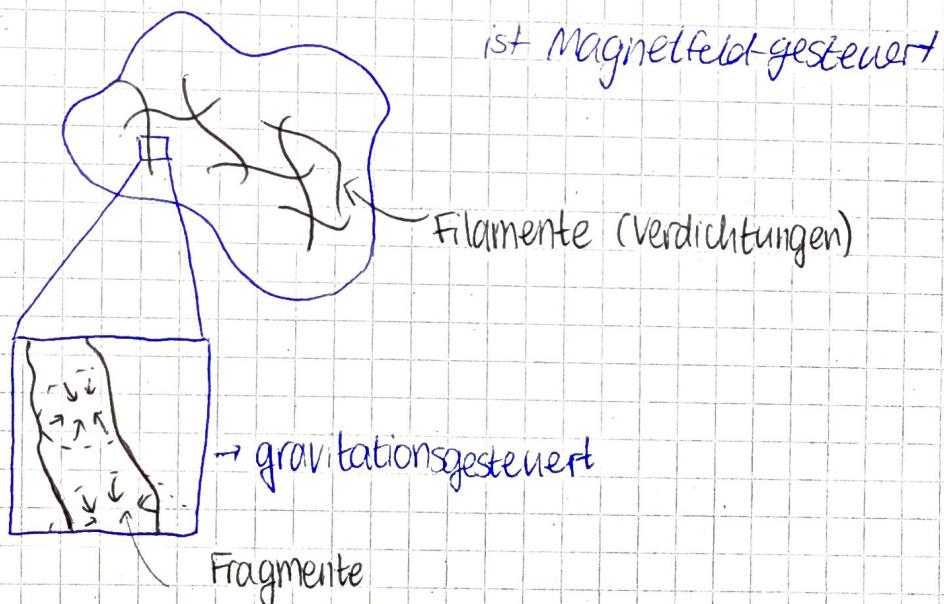
~ Modell ist "zu einfach"

→ gegen den Kollaps (trotz "zu hoher" Masse) spricht:

Rotation, Magnetfeld, ...

→ für Supernova-Stoffwellen

- Wolke

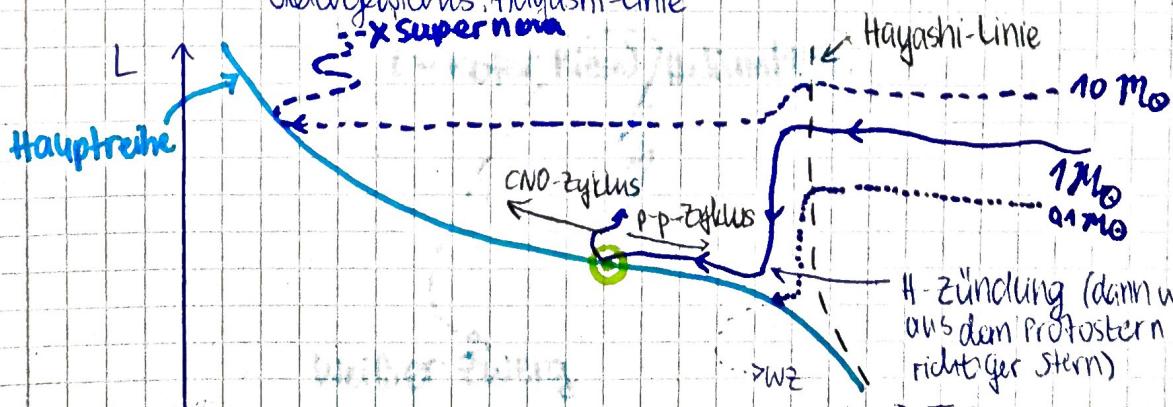


§ 3 Protostern

= kollabierendes Fragment stellarer Masse

RV JT

Ab $T \sim 10^4 \text{ K}$: HII, Stern opak, vollkonvektiv. Erreichen des hydrostatischen Gleichgewichts, Hayashi-Linie



R \rightarrow $T \rightarrow \sim H$ -Zündung

R \rightarrow $T \rightarrow \sim$ Erreichen der Hauptreihe

Dauer: $1 M_{\odot} \rightarrow \sim 10^6 \dots 10^7 \text{ yr}$
 $10 M_{\odot} \rightarrow \sim 10^5 \text{ yr}$

§4 Hauptreihe

- als $M < 1.5 M_{\odot}$ gilt der p-p Zzyklus
 $4^1H \rightarrow ^4_2He + 2e^+ + 2\nu + 2p$

- bei $M > 1.5 M_{\odot}$: CNO-Zzyklus:
(aber mit C, N, O als Katalysatoren) $E \propto T^{18}$

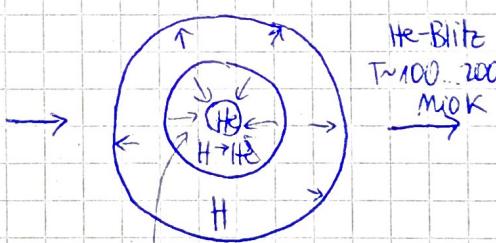
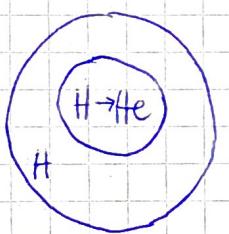
- Dauer hängt stark von der Masse ab! (weil die Masse zeigt, wie viel Wasserstoff vorhanden ist!)

$$\begin{aligned} M_{\odot} &\sim 10^{10} \text{ yr} \\ 10 M_{\odot} &\sim 10^7 \text{ yr} \end{aligned}$$

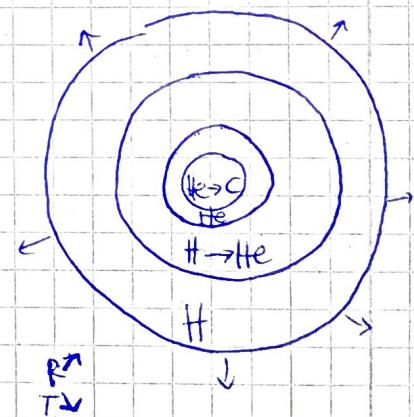
$$\propto \frac{M}{L} \propto \frac{m}{m^4} \propto m^{-3}$$

§5 Roter Riese

$$M > 0.3 M_{\odot}$$



\approx "Zwiebelstruktur"



$$M < M_{\odot}/3: H \rightarrow He \rightarrow C$$

$$M > 3 M_{\odot}: H \rightarrow He \rightarrow C \rightarrow Si \rightarrow O \rightarrow \dots (Fe, Ni)$$

Dauer: $\sim 10\%$ der Hauptreihenphase

§6 Endstadien

$$M_{\text{kern}} < 1.4 M_{\odot} \quad (M < 8 M_{\odot})$$

\sim (Massenverlust, "planetarische Nebel", ...) \rightarrow Weißer Zwerg
Chandrasekhar-Grenze

$$1.4 M_{\odot} < M_{\text{kern}} \leq 2.5 \dots 3 M_{\odot} \rightarrow (\text{SN-Explosion}) \rightarrow \text{Neutronenstern}$$

$$M_{\text{kern}} > 2.5 \dots 3 M_{\odot} \rightarrow \text{Schwarzes Loch}$$

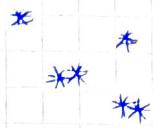
13. "Ungewöhnliche" Sterne

VL
25.01.2018

§1 Doppelsterne

Häufigkeit

- ca. $\frac{1}{3}$ bis $\frac{2}{3}$ aller (Sterne) sind Doppelsterne



Wichtigkeit

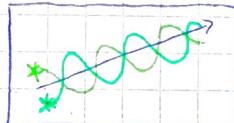
- Anwendung des 3. Keplerschen Gesetzes möglich
- Tests für Entwicklungstheorien
- die beiden Sterne tauschen Teile ihrer Masse aus

Klasse

Methode

Beispiel

Visuelle DS
(astrometrische DS)



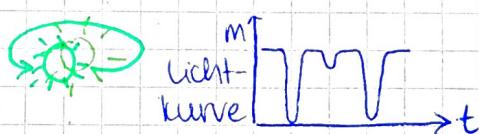
ε UMa
(Mizar + Alkor)

Spektroskopische DS

{ } (Spektrallinien gehen auseinander aufeinander zu)

- II-

Photometrische DS
(Bedeckungsveränderliche)



B Per
(Algol)

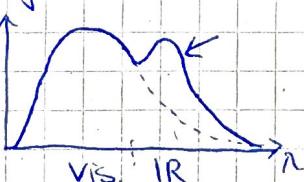
(Methoden funktionieren auch für Exoplaneten)

§2 Eruptionsveränderliche

- Veränderlicher (Stern): $m \neq \text{const.}$ (unregelmäßige Helligkeitschwankungen)

T-Tau-Sterne

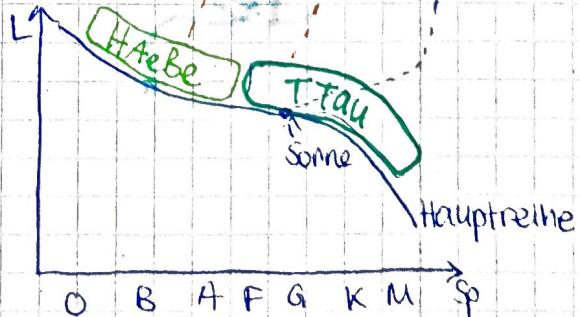
- Spektralklassen F, G, K (relativ spät)
- Helligkeitsschwankung $\Delta m \approx 3m$ unregelmäßig
- Emissionslinien
- Infrarot-Exzess:



Instabilitätsstreifen



- IR-Exzess wird durch Staubs verursacht
- die Sonne war auch mal TTau-Stern



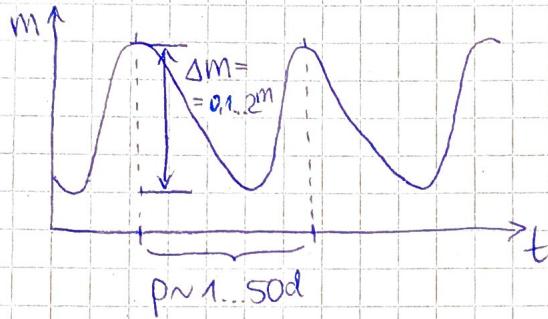
Herrlich - Ae/Be-Sterne

- Spektralklassen = B, A
- alles andere: s. T Tauri

§ 3 Pulsationsveränderliche

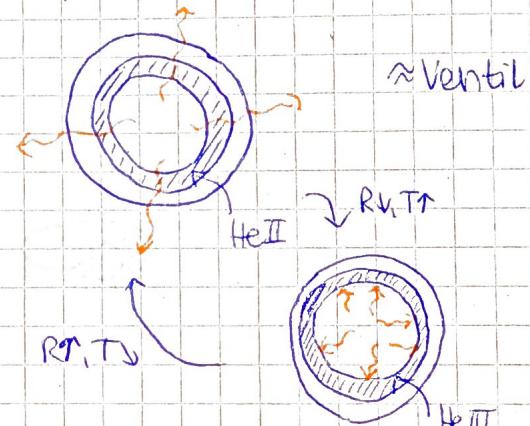
Cephiden (δ Cep)

- Spektralklassen: F, G, K
- Riesen oder Überriesen



warum hören diese Schwingungen nicht auf?

→ "K-Mechanismus"
→ Opazität



- Mittlere absolute Helligkeit:

$$\bar{M} = -1,3^m - 3,0 \log P [d]$$

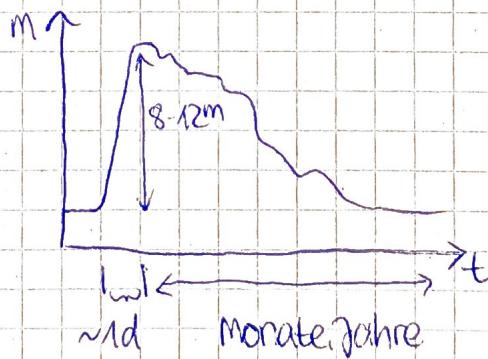
⇒ je länger die Pulsationsperiode, desto heller.

- aus m und \bar{M} (aus P) kann man die Entfernung messen / berechnen

§ 4. Novae und Supernovae

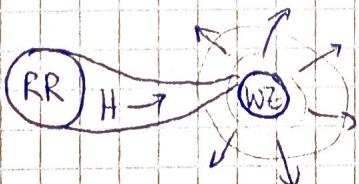
Novae

- charakteristisch:



x^m , x Magnitude

- alle Novae sind Doppelsterne aus Rotem Riesen und Weißen Zwerg:



Roter Riese gibt Masse an WZ ab
→ H-Zündung
→ WZ stößt "Hülle" ab
Hülle löst sich dann auf...

- das ganze kann sich wiederholen

Supernovae



* (zwei Möglichkeiten)

"Thermonukleare" Supernovae (Typ Ia)

- Doppelsterne, aber nicht mit normaler H-Explosion, schielen $M_{\text{WZ}} > 1.4 M_{\odot}$ (WZ überlebt nicht)

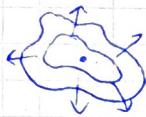
"Kernkollaps"-Supernovae

- lebensende massereicher Sterne
- $8 M_{\odot} < M < 30 M_{\odot} \rightarrow$ Supernovae Typ II
- $M > 30 M_{\odot} \rightarrow$ Typ Ib, Ic

- Beispiel:

- SN 1054 \rightarrow Krebsnebel (Kernkollaps-SN, zurück blieb Neutronenstern)

- SN 1572 (Brüder)
- SN 1604 (Kepler)



§ 5 Kompakte Sterne

(selbst ausarbeiten)

Was passiert nach SN?

- Weiße Zwerge
- Neutronenstern
- Schwarze Löcher

14. Die Milchstraße

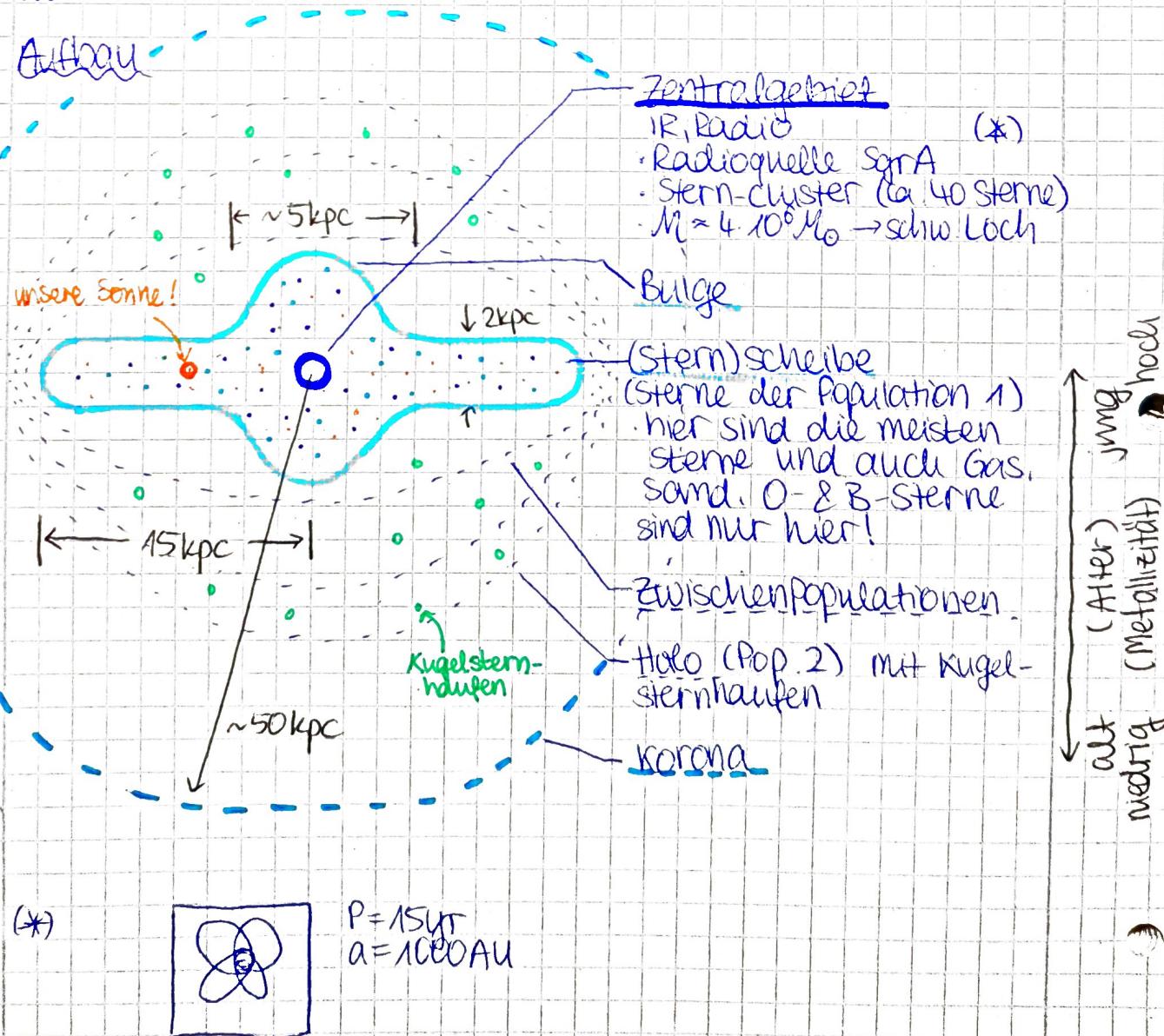
§1 Bestandteile und Aufbau

Geschichte (der Milchstraßenforschung):

- in Sterne aufgelöst (Galilei, 17 Jh.)
- Einblicke in die Struktur (\approx Sternzählungen etc., Herschel, 18 Jh.)
- Sonne nicht im Zentrum, erste Größenabschätzung der Galaxis (Shapley, 1918)
- Galaxis ist gefüllt mit interstellarem Staub (Trumpler, 1930)
- Existenz interstellaren Gases ($21\text{cm}-\text{H-Linie}$, 1950er)
- im Zentrum der Milchstraße ist ein massenreiches schwarzes Loch (2002)

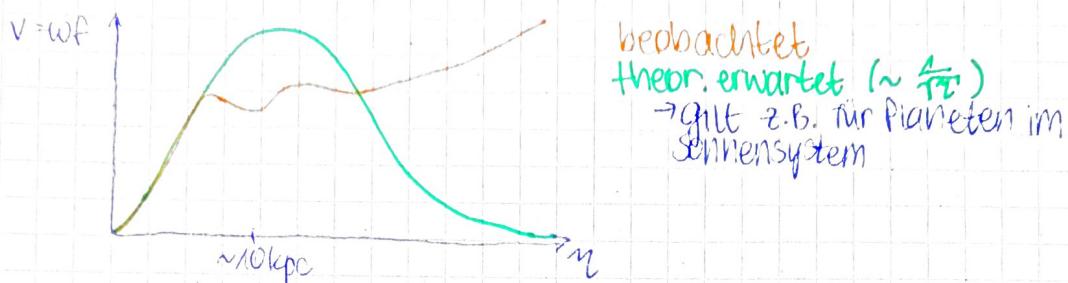
Komponenten

- Sterne (97...99% der Masse, ca. $2 \cdot 10^{11}$ Stück)
- Gas (1...3% der Masse)
- Staub (ca. 1% des Gases)
- kosmische Strahlung
- Magnetfeld (typ. $\approx 10^{-5}$ Gauss)
- ...



§2 Rotation, Masse und Spiralstruktur

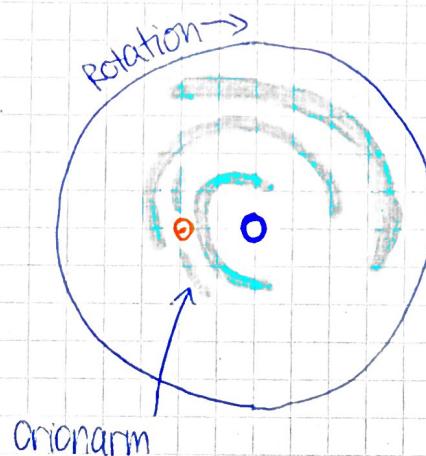
- Halo rotiert nicht
- Scheibe allerdings schon! $\propto \text{Proj}(z=8\text{kpc}) \approx 22\text{Myr} = "1 \text{ galaktisches Jahr}"$
 $\approx \omega(r)$ sinkt ("Differentialrotation")



⇒ ganz viel "unsichtbare" Materie muss irgendwo in der Peripherie sitzen = "Dunkle Materie"
 (kann nicht beobachtet werden)

Was ist die "Dunkle Materie"?

- weiße Zwerge? Braune Zwerge? ...?
- dunkle Gaswolken?
- Elementarteilchen?
- non-ART-Theorien?



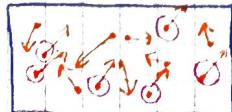
§2...4. Spiralarme

Dichtewellen
(Lindblad, 1960er)

§3 Sternhaufen

es gibt 3 verschiedene Typen:

A-Ssoziationen
"moving stars"

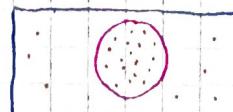


die haben alle die gleiche Trajektorie!
 gravitativ nicht gebunden
 $N \sim 10^1 \dots 10^2$
 $D \sim 10 \dots 100\text{pc}$

z.B.
 Sco-Cen-
 Assoziation
 $(\sim 5 \dots 10\text{ Myr})$

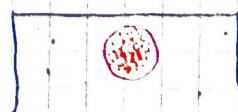
T-Assoziationen (T Tau)
 OB-Assoziationen (H II Reg.)

Offene ST



schwach gebunden
 $N \sim 10^2 \dots 10^5$
 $D \sim 10 \dots 100\text{pc}$
 z.B. Pleiaden
 ~100 Myr

Kugelsternhaufen



gebunden
 $N \sim 10^5 \dots 10^6$
 $D \sim 100\text{pc}$
 z.B. M13 (Hertules)
 ~100 Myr
 (schwerkräftig)

15. Galaxien

- Mai 1920: "Shapley-Curtis-Debatte" → dne Ergebnis
↳ Big Galaxy Theory → Weltinsel
- 1924 messen Hubble & Humason die Entfernung zu den Cepheiden im Andromedanebel

§1 Entfernungsbestimmung

I "Standardkerzen"

- Cepheiden (M-P Relation)
- Novae ($M \sim -10$)
(Helligkeit ist bekannt!)
- Kugelsternhaufen ($M \sim -10$)
- Hellste Sterne (M_1)
- Supernovae ($M \sim -18 \dots -19$)
- Galaxien selbst (einfachste, triviale Methode)

II Kosmologische Rotverschiebung

- Expansion des Universums

→ Hubble-Gesetz: $z = \Delta\lambda/\lambda$ $C \cdot z = H \cdot z$
(Idee: wie ein sich aufzäsendes Stadl von Galaxien)

- Näherung $v_z \ll c$: $z = v_z/c \Rightarrow v_z \approx H \cdot z$
- Exakt: $z = \sqrt{\frac{1+v_z/c}{1-v_z/c}} - 1$
- Erkennung dieses Gesetzes (\approx der Hubble-Konstanten) sehr schwierig

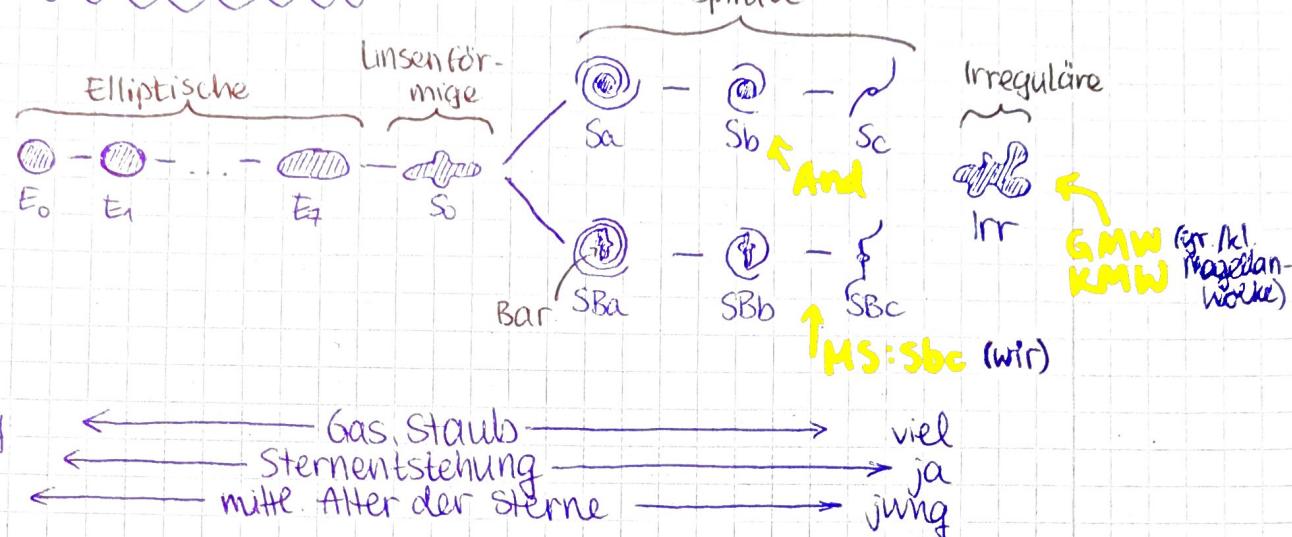
Hubble-Konstante ← nicht so einfach zu bestimmen

- Andromeda-Galaxie nähert sich uns (aber wahrscheinlich treffen sich die Sterne nicht)
- Hubble-Konstante: $H = 70 \frac{\text{km}}{\text{s} \cdot \text{Mpc}}$

§2 Klassifikation

- Komponenten aller Galaxien sind gleich: Sterne, Staub, Gas, dunkle Materie
- Anzahl der Sterne: $10^7 \dots 10^{13}$

Hubble-Klassifikation (1926)



- Hypothese / Interpretation: Galaxien entwickeln sich von Irregulären zu "perfekten" Kugeln
- Aber: es gibt in allen Galaxien auch sehr alte Sterne ↗
- Alternativ: Anfangsbedingungen entscheiden über Aussehen und Eigenschaften der Galaxien:
 - Masse
 - Drehimpuls
 - Umgebung
- nicht in Hubbles Klassifikation vorhanden:
CD-Galaxien "elliptische Riesengalaxien", die benachbarte Galaxien sogar aufessen!

§3. Galaxien mit aktiven Kernen

Quasare

- Entdeckung: 1963
- große z-Werte (\Rightarrow starke Rotverschiebung) → weit weg von uns?
z.B. 3C273 (erster entdeckter Quasar) $z=0,16 \rightarrow r \approx 18 \text{ Gpc}$
- aber: Variabilität der Leuchtkraft sehr hoch → nah am uns?
- dann, 1980er: Erklärung
- Kerne anderer Galaxien

Aktive Kerne

- senden Radiostrahlen (synchrone Strahlung, nicht thermisch)
- Röntgen- und Gammastrahlen
- Variabilität in der Strahlung
- Emissionslinien
- hohe Leuchtkraft $L \sim 10^{15} L_\odot \rightarrow$ hellste uns im Kosmos bekannte Objekte

Interpretation

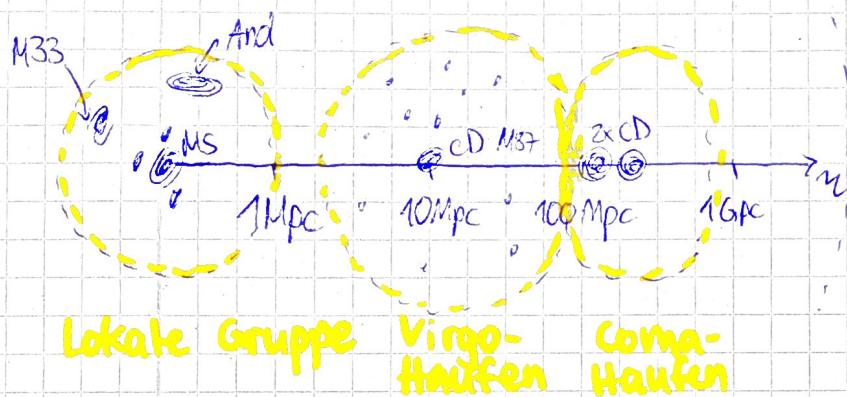
- Materieakkretion auf's Schwarze Loch

warum sind alle Quasare so weit weg?

→ weil wir ja "in die Vergangenheit" schauen und "früher" Materie dichter war und also mehr Quasare hatte

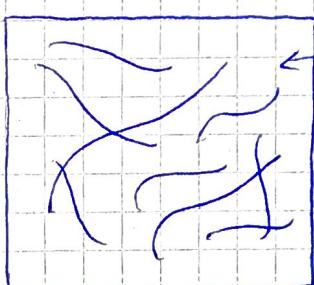
§ 4. Verteilung

Galaxien-Haufen



wir fliegen in diese Richtung!!!

Superhaufen von Galaxien



Anzahl der Galaxien $\sim 10^{11}$

Wie ist diese Struktur entstanden?
→ einfach so kosmologisch durch die Dichteveränderung bei Ausdehnung

"Wabenstruktur"