

# Einführung in die Astrophysik

Sattler, Stefan M.

29. Januar 2007, Graz

## Inhaltsverzeichnis

<b>1 Sphärische Astronomie</b>	<b>1</b>
<b>2 Geschichte der Astronomie</b>	<b>5</b>
<b>3 Physik der Körper des Sonnensystems</b>	<b>6</b>
3.1 Die Erde . . . . .	9
3.2 Der Mond . . . . .	11
3.3 Das Sonnensystem . . . . .	11
<b>4 Die Sonne</b>	<b>14</b>
4.1 Grunddaten der Sonne . . . . .	14
4.2 Der Aufbau der Sonne . . . . .	15
<b>5 Zustandsgrößen der Sterne und Sternatmosphären</b>	<b>16</b>
<b>6 Sternentwicklung</b>	<b>17</b>

Diese soll eine Ausarbeitung des Fragenkatalogs zu Einführung in die Astrophysik von *Prof. Dr. Arnold Hanslmeier* werden/sein.

## 1 Sphärische Astronomie

- **Was ist die *siderische Umlaufzeit des Mondes*?** In der Astronomie heißt 'siderisch', auf die Fixsterne bezogen. In diesem Fall ist der Begriff dem lateinischen 'sideris' entlehnt, das 'Stern' oder 'Gestirn' bedeutet. Der Mond benötigt für einen Umlauf um die Erde einen 'siderischen Monat', das sind genau 27,322 Tage.
- **Sie beobachten den Aufgang eines Sternes heute um 20.30 Uhr. Wann geht der Stern um 17 Uhr auf?** Bedingt durch den Umlauf der Erde um die Sonne in einem Jahr bewegt sich diese scheinbar in einem Jahr um den gesamten

Himmel ( $360^\circ$ ). Daher also pro Tag rund  $1^\circ$  nach Osten weiter, was etwa 4 Zeitminuten ausmacht.  $\rightarrow$  Sonnentag länger als Sterntag.  $3,5^h * 60^m / 4^m = 52,5^d$  Tage früher.

- **Was sind die Tierkreiszeichen?** Die Tierkreiszeichen, auch Sternzeichen teilen den Jahreslauf der Sonne in zwölf Abschnitte zu 30 Grad, die für die abendländische Astrologie eine wichtige Rolle spielen. Ihre Namen beruhen auf den zwölf Sternbildern der Ekliptik, mit denen sie vor 2500 Jahren deckungsgleich waren, gegen die sie sich jedoch aufgrund der Präzession verschoben haben. Die 12 astrologischen Sternzeichen werden traditionell in vier Gruppen eingeteilt: Luftzeichen, Erdzeichen, Feuerzeichen und Wasserzeichen. Diese Einteilungen spiegeln nach Überzeugung der Astrologen charakterliche Ähnlichkeiten der Menschen wieder, die in der gleichen Gruppe geboren wurden. Die Sonne durchwandert im Jahreskreis die 12 Tierkreiszeichen.
- **Was sind die Tierkreissternbilder?** Die Astronomie kennt zwölf (von insgesamt 88) Sternbilder, die die gleichen Namen tragen wie die zwölf Zeichen des Tierkreises. Hieraus ergibt sich leicht ein Irrtum. Es muss für die astrologischen Betrachtungen genau nach Sternbildern und Tierkreiszeichen unterschieden werden. Die Sternbilder sind Gebilde von Fixsterngruppen, die sich, wenn auch sehr langsam, gegen den als feststehend definierten Tierkreis verschieben (oder auch umgekehrt). Während die Tierkreiszeichen als gleich groß angenommen werden, sind die gleichnamigen Sternbilder des Tierkreises verschieden groß.
- **Was ist die Präzession?** Präzession ist allgemein die Lageveränderung der Achse eines rotierenden Kreisels, wenn äußere Kräfte auf ihn einwirken. Die Erde kann als Kreisel aufgefasst werden, der den Kräften vor allem der Sonne und des Mondes ausgesetzt ist. Dadurch ändert sich sowohl die Polachse der Erde als auch die Erdbahn selbst (Ekliptik). Man unterscheidet:
  1. *Lunisolare Präzession:* Anziehung von Mond und Sonne auf den Äquatorwulst der Erde. Dies bewirkt ein Drehmoment, das die Erdachse aufzurichten versucht, und diese reagiert mit einer Kreiselbewegung. Die Erdachse beschreibt einen Kegel mit  $23,5^\circ$  Öffnung um den Pol der Ekliptik. Der Frühlingspunkt wandert deshalb nach rückwärts (lat. *praecedere*) um den Wert  $P_o = 50,3878''$  pro Jahr. Dies sind die 20 Minuten Differenz zwischen siderischem und tropischen Jahr. Die Umlaufzeit beträgt 25700 Jahre (platonisches Jahr). In etwa 12000 Jahren ist als Wega Polarstern.
  2. *Planetare Präzession:* Durch den Einfluss der Planeten verlagert sich die Erdbahn, also der Pol der Ekliptik, dies bedingt eine zusätzliche Verschiebung des Frühlingspunktes um  $P_p l = 0,1055''$  pro Jahr. Sei  $A_0, E_0, F_0$  Äquator, Ekliptik bzw. Frühlingspunkt am Beginn eines Jahres und A, E, F am Ende des Jahres, dann hat man  $P_o = F_o F'$  die lunisolare Präzession und  $P_p l = F' F$  die Präzession durch die Planeten. Der Einfluss der Planeten (pro Jahr) auf die

Position der Sterne folgt aus:

$$n = 20,0431''$$

$$m = 46,1244'' = 3,0750''$$

$$\Delta\alpha = m + n \tan \delta \sin \alpha$$

$$\Delta\delta = n \cos \alpha$$

Gibt man also Sternkoordinaten an, muss man immer auch sagen, auf welches *Äquinotium* sie sich beziehen. Alle diese Größen sind auch noch zeitabhängig.

3. *Nutation*: Die Mondbahn ist um  $5^\circ$  gegenüber die Ekliptikebene geneigt. Die Sonne übt auf diese ein Drehmoment aus, welches versucht sie aufzurichten, und wiederum kommt es zu einer Kreisbewegung, bei der sich die Schnittpunkte der Mondbahn mit der Ekliptikebene (Knoten) mit einer Periode von 18,6 Jahren verschieben. Der wahre Pol beschreibt daher eine Nutationsellipse mit den Halbachsen  $9,21''$  bzw.  $6,86''$ .<sup>1</sup>

- **Was bedeutet Mondkalender?** Ein Kalender, welcher nur auf den Mond ausgerichtet ist.
  - Der Siderische Mondkalender, der bereits in der Altsteinzeit unter den Nomadenvölkern bekannt war. Er bestimmt den Tag nach der Position des Mondes auf dem Fixsternhimmel,
  - der Synodische Kalender, der sich an den Mondphasen orientiert und vermutlich in der Jungsteinzeit im Zuge der sogenannten Neolithischen Revolution entstanden ist.
- **Wie ist der Julianische Kalender definiert?** Alle 4 Jahre verschob sich das ganze um einen Tag. 238 v. Chr. wurde von *Ptolemäus III* im Dekret von *Canopus* der Kalender reformiert. Das Jahr hat 365 Tage und alle 4 Jahre gibt es einen zusätzlichen Tag, also 366 Tage. Im Jahre 48 v. Chr. landete dann J. Caesar mit seinen Truppen in Alexandria und bereits im Jahre 45 v. Chr. referformierte er den Kalender in Rom (*julianischer Kalender*). DAS JAHR HAT 365 TAGE UND ALLE 4 JAHRE EIN SCHALTJAHR ZU 366 TAGEN.
- **Warum wurde eine Kalenderreformation notwendig und wie ist der *Gregorianische Kalender* definiert?** Die Jahreslänge im juliansichen Kalender ist um 11 Minuten länger als das tropische Jahr. Im 19. Jahrhundert ergab sich daraus ein merkbarer Fehler von 10 Tagen. Papst *Gregor XIII* führte deshalb eine Reform

---

<sup>1</sup>Unter Nutation versteht die Astronomie eine kleine, periodische Schwankung der Erdachse im Rhythmus von 18,6 Jahren. Sie entsteht durch eine Gravitationswirkung des Mondes auf die nicht ganz kugelförmige Erdfigur. Angeregt wird die Nutation durch die Neigung der Mondbahn zur Ekliptik ( $5,1^\circ$ ), wodurch die Präzession (das „Kreiseltaumeln“ der Erdachse) 9 Jahre stärker und 9 Jahre schwächer als im Mittel ist. Man zerlegt den Einfluss mathematisch in zwei Komponenten, die „Nutation in Länge“ von  $\pm 17,24''$  und jene in „Schiefe“ von  $\pm 9,21''$

durch: den *gregorianischen Kalender*: Das Jahr hat 365 Tage, alle 4 Jahre ist ein Schaltjahr, volle Jahrhunderte sind aber nur dann ein Schaltjahr, wenn sie durch 400 ohne Rest teilbar sind. Die Jahreslänge im gregorianischen Kalender beträgt:  $365 + 1/4 - 3/400 = 365^d 5^h 49^m 12^s$ .

- **Was versteht man unter der julianischen Tageszählung?** Zur Erleichterung chronologischer Berechnungen sowie für Beobachtungen und Ephemeriden hat *J. Scalinger* (1592) die *Julianische Tageszählung* (JD) eingeführt. Der Julianische Tag beginnt jeweils um  $12^h$  UT und den Beginn des Julianischen Tages 0 legte man auf den 1.1.4713 v. Chr. fest. Am 1.1.2002 fängt um  $12^h$  UT der Julianische Tag 2452276 an. Im Jahre 1975 führte man die modifizierte Julianische Tageszählung (MJD) ein:  $MJD = JD - 2400000$ .
- **Wie ist der Kalender der Mohammedaner definiert?** Die Monate beginnen mit dem ersten Sichtbarwerden der Mondsichel am Abendhimmel. 12 Monate werden zu einem Mondjahr zusammengefasst. Es gibt einen Schalttag, um die Monatsanfänge mit dem Aufleuchten der Mondsichel in Übereinstimmung zu halten. Innerhalb einer Jahresperiode von 30 Jahren gibt es 11 Schaltjahre. Die Jahreszählung erfolgt von der *Hedschra* aus (Flucht des Propheten Mohammed aus Mekka nach Medina, 622 n. Chr.).
- **Was ist der Frühlingspunkt?** Der Frühlingspunkt (auch Widderpunkt) ist der Punkt auf der imaginären Himmelskugel, bei dem die Sonne auf ihrer auf diese Kugel projizierten Bahn, der Ekliptik, auf dem Weg von Süden nach Norden den Himmelsäquator durchschneidet (Rektaszension =  $0^\circ$ ).<sup>2</sup>
- **Wie lauten die Koordinaten im Horizontsystem?** Ist das System der unmittelbaren Beobachtung. In welcher Himmelsrichtung und in welcher Höhe sieht man das Himmelsobjekt.
  - Grundkreis besteht aus dem *Horizont*. Der obere Pol ist der *Zenit*, der untere Pol heißt *Nadir*
  - Längengrade sind Großkreise durch den Zenit. Der Nulllängengrad, vertikal durch den Südpunkt heißt auch Meridian.
  - Koordinaten:
    - \* Höhe  $h$  über dem Horizont ( $0^\circ \dots 90^\circ$ )
    - \* Azimut  $a$ , ist der Winkel zwischen Vertikal durch das Objekt und Meridian; gezählt von S über W, N, O.
- **Wie lauten die Koordinaten im Äquatorsystem?**
  - **Festes Äquatorsystem:** dient zur Beobachtung am Teleskop.

---

<sup>2</sup><http://de.wikipedia.org/wiki/Frühlingspunkt>

- \* Grundkreis ist der Himmelsäquator = Projektion des Eräquators an die Himmelssphäre. Nord- und Südpol am Himmel ergeben sich als Verlängerung der Erdachse.
  - \* Der Null-Längenkreis (Meridian) geht durch Pol, Zenit und Südpol
  - \* Koordinaten: Deklination  $\delta$  (Abstand vom Äquator  $\pm 90^\circ$ ); Stundenwinkel  $t$  (Abstand des Längenkreises durch das Himmelsobjekt vom Meridian. Man zählt S-W-N-O).
- **Bewegliches Koordinatensystem:** Da sich der Stundenwinkel laufend ändert, definiert man das bewegliche Koordinatensystem.
- \* Grundkreis: Himmelsäquator
  - \* Null-Längenkreis: Stundenkreis durch den Frühlingspunkt.
  - \* Koordinaten: Deklination  $\delta$ , Rektaszension  $\alpha$  (Abstand der Stundenkreise durch das Himmelsobjekt und Frühlingspunkt. Wichtig  $\alpha$  wird nach Osten gezählt.)
- **Was ist der Meridian?** Der Meridian ist der senkrecht auf den Horizont des jeweiligen Beobachtungsortes stehende, durch den Zenit-Punkt (senkrecht über dem Kopf), den Südpunkt am Horizont, den Nadir-Punkt (senkrecht unter den Füßen), und über den Nordpunkt am Horizont wieder zum Zenit (ferner auch durch die Himmelspole) verlaufende Großkreis am Himmel. In der Meridianebene („im Meridian“) erreichen alle Fixsterne ihre größte Höhe (obere Kulmination) und 12 Stunden Sternzeit später ihre geringste (bei den meisten Sternen unter dem Horizont).
  - **Was bedeutet Sternzeit?** Die Sternzeit  $\Theta$  ist der Stundenwinkel des Frühlingspunktes:  $\Theta = t + \alpha$ .
  - **Was ist der Stundenwinkel?** Der Stundenwinkel  $t$  ist die seit dem Meridian-durchgang eines Sternes vergangene Zeit (Umrechnung  $24^h = 360^\circ$ )

## 2 Geschichte der Astronomie

- **Was ist die Methode des *Erathostenes* zur Bestimmung des Erdumfangs?** Um 220 versuchte *Erathostenes* den Erdumfang zu bestimmen. Zu einem bestimmten Datum des Jahres konnte die Sonne in Syene (das heutige Assuan) von einem tiefen Brunnen aus gesehen werden, nicht jedoch von Alexandria aus, das nördlicher liegt. Damit man die Sonne im tiefen Brunnen sehen kann, muss sie sich im Zenit befinden. Die Entfernung zwischen Syene und Alexandria beträgt  $770\text{km}$ , und in Alexandria stand die Sonne zum selben Zeitpunkt um  $7,2^\circ$  vom Zenit entfernt. Aus der Beziehung:

$$\frac{7,2^\circ}{360^\circ} = \frac{770\text{km}}{U}$$

folgt der Erdumfang  $U$ .

- **Weshalb verlagerten sich die Nilüberschwemmungen im Kalender der alten Ägypter?** Da im alten Ägypten ein reiner Sonnenkalender mit einem Jahr von 365 Tagen verwendet wurde und das tatsächliche Sonnenjahr um 1/4 Tag länger ist, durchläuft der Jahresbeginn nach 1461 Jahren einmal den gesamten Ägyptischen Kalender. Der Zeitpunkt der **Nilüberschwemmungen** fiel zunächst mit dem hliakischen Aufgang des Sirius (Sothis) zusammen (darunter versteht man den Zeitpunkt, wo Sirius zum ersten Mal wieder am Morgenhimmel gesehen werden kann nach seiner Konjunktion mit der Sonne). ALLE 4 JAHRE VERSCHOB SICH DAS GANZE UM EINEN TAG.

### 3 Physik der Körper des Sonnensystems

- **Was ist die Albedo?** Die *Albedo* beschreibt das Verhältnis des nach allen Seiten reflektierten bzw. gestreuten Sonnenlichts zum einfallenden Licht. Ihre Stärke und Wellenlängenabhängigkeit gibt Hinweise auf die Beschaffenheit der Planetenoberfläche. Dunkle Körper haben eine kleine Albedo, Erde: 0,3 (refl. Wolkendecke)

$$\frac{\text{Reflektiert}}{\text{Aufgenommen}}$$

- **Wie sieht die Strahlungsbilanz eines Planeten aus?**

$$\text{Zustrahlung} + Q = \text{Abstrahlung}$$

$$\text{Zustrahlung}/m^2 : S(r) = S_0 \left( \frac{r}{1AE} \right)^{-2}$$

Ein Planet mit Radius  $R$  nimmt davon den Betrag  $\pi R^2(1 - A)S(r)$  auf. Die Erde hat eine mittlere Albedo von  $A \approx 0,3$ . Die Abstrahlung erfolgt nach dem Gesetz von *Stefan-Boltzmann*:  $4\pi r^2\sigma T^4$ ,  $\sigma = 5,67 * 10^{-8} W m^{-2} K^{-4}$ . Der Erde erhält den inneren Wärmestrom  $Q$  aus radioaktivem Zerfall (Erde:  $Q = 0,06 W m^{-2}$  und Zustrahlung von der Sonne ( $S = 1,37 k W m^{-2}$ ))

$$\pi R^2(1 - A)S(r) + 4\pi R^2Q = 4\pi R^2\sigma T^4$$

- **Wie lautet die Bedingung für das *Hydrostatische Gleichgewicht*?** Wir betrachten ein Volumenelement im Abstand  $r$  vom Zentrum eines Planeten mit der Grundfläche  $dA$  und der Höhe  $dr$ . Seine Masse sei  $\rho(r)dAdr$  und für die Masse innerhalb  $r$  gilt:

$$M(r) = \int_0^r \rho(r')4\pi r'^2 dr' \xrightarrow{\text{mit}} \frac{dm(r)}{dr} = 4\pi r^2\rho(r)$$

Die Schwerebeschleunigung durch  $M(r)$  lautet:

$$g(r) = \frac{GM(r)}{r^2}$$

Im Bereich des betrachteten Volumenelements ändert sich der Druck  $p$  um:

$$-dp dA = \rho(r) dA dr g(r)$$

Damit erhält man die Bedingung für das **hydrostatische Gleichgewicht eines Planeten**:

$$\frac{dp}{dr} = -g(r)\rho(r)$$

Diese Bedingung ist auch eine Grundgleichung des Sternaufbaus.

- **Man leite die Formel für die Gezeitenkraft ab!** Wir gehen von einem Zentralkörper der Masse  $M$  aus, mit dem Radius  $R$  und der mittleren Dichte  $\bar{\rho}$ . Für den Satelliten hat man  $M_S, R_S, \bar{\rho}_S$ . Wir teilen den Satelliten in zwei Hälften  $M_S/2$ , die sich gegenseitig in einem Abstand  $R_S$  anziehen:

$$F \approx G \frac{M_S M_S}{4R_S^2}$$

Die *Gezeitenkraft* versucht den Satelliten auseinander zu reißen. Betrachten wir die Gezeitenkraft, die der Mond an der Erdoberfläche ausübt. Bei der untern Kulmination beträgt diese: Differenz zwischen der Gravitationsbeschleunigung durch die anziehende Masse  $M$  am Erdmittelpunkt (Entfernung  $r$ ) und der an der Erdoberfläche wirkenden Kraft (Abstand  $r + R$ ). Die Gezeitenkraft ist daher die Differenzbeschleunigung:

$$b_G = \frac{GM}{r^2} - \frac{GM}{(r+R)^2} \approx \frac{2GM}{r^3} R$$

In diesem Fall lautet dann die Gezeitenbeschleunigung:

$$GMM_S R_S / r^3$$

- **Man leite die Formel für die Roche Grenze ab!** *Fortsetzung der vorherigen Frage:* Die Bedingung für die Stabilität eines Satelliten lautet daher:

$$G \frac{M_S M_S}{4R_S^2} \geq kG \frac{MM_S}{r^3} R_S$$

Dabei ist  $k$  eine Konstante der Größenordnung 1. Nun gilt  $M_S = (4\pi/3) \bar{\rho}_S R_S^3$  und für den Planeten  $M = (4\pi/3) \bar{\rho} R^3$ , dann:

$$\frac{r}{R} \geq (4k)^{1/3} \left( \frac{\bar{\rho}}{\bar{\rho}_S} \right)^{1/3}$$

*Roche* hat 1850 gezeigt, dass für die Stabilität eines Satelliten gilt:

$$\frac{r}{R} \geq 2,44 \left( \frac{\bar{\rho}}{\bar{\rho}_S} \right)^{1/3}$$

Ein größerer Satellit, der dieselbe Dichte hat, wie sein Mutterplanet, darf diesem nicht näher kommen als 2,44 Planetenradien, ansonsten wird er durch die Gezeitenkräfte des Mutterplaneten auseinander gerissen. Bei kleineren Satelliten werden auch noch die Kohäsionskräfte wirksam und man findet  $r/R = 1,4$ .

- **Was ist die Skalenhöhe in einer Planetnatmosphäre?** Die Skalenhöhe (Äquivalenzhöhe)  $H$  ist jene Höhe, in der der Druck bzw. die Dichte auf das  $1/e$ -fache abgenommen hat.

$$H = \frac{kT}{g\bar{\mu}m_U}$$

- **Wie lautet die barometrische Höhenformel?** Wenn  $H$  (siehe oben) konstant ist, so folgt aus der Bedingung für das hydrostatische Gleichgewicht aus

$$\ln p - \ln p_0 = -h/H$$

die *barometrische Höhenformel*:

$$p = p_0 e^{-h/H}$$

Dabei ist  $p_0$  der Druck am Boden ( $h = 0$ ).

- **Was ist der adiabatische Temperaturgradient der Erdatmosphäre?** Heiße Materie steigt adiabatisch (ohne Wärmeaustausch) nach oben und abgekühlte nach unten. Eine solche Atmosphäre nennt man *konvektive Atmosphäre*. Dann gilt die Adiabaten-Gleichung:  $T \approx p^{1-(1/\gamma)}$ . Diese wird nun logarithmisch nach  $h$  differenziert:

$$\frac{1}{T} \frac{dT}{dh} = \left(1 - \frac{1}{\gamma}\right) \frac{1}{p} \frac{dp}{dh}$$

Setzt man hier die hydrostatische Gleichung ein sowie die Bedingung  $c_p - c_v = k/\bar{\mu}m_u$  bekommt man für den *adiabatischen Temperaturgradienten*:

$$\frac{dT}{dh} = -\frac{g}{c_p}$$

- **Weshalb unterscheidet sich der wahre Temperaturgradient der Erdatmosphäre vom adiabatischen?** Die untere Schicht der Erdatmosphäre, die etwa 12km hohe *Troposphäre* ist konvektiv. Da  $g = 9,81 \text{ M/s}^2$ ,  $c_p = 1005 \text{ J/kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$  bekommt man einen Gradienten von  $9,8 \text{ K/km}^{-1}$ . Dies gilt nur für trockene Luft. Bei feuchter Luft wird latente Wärme, die bei der Kondensation freigesetzt wird, den Gradienten um die Hälfte verringert. Man bekommt so einen mittleren Temperaturabnahme mit der Höhe in der Erdatmosphäre von  $6,5 \text{ K/km}^{-1}$ .
- **Gegeben sei ein Molekül der Masse  $m$ . Wie groß ist seine Geschwindigkeit in einer Atmosphäre? Wann kann es entweichen?** Die Wahrscheinlichkeit eines Moleküls, es entweichen zu lassen, ergibt sich aus der Gastheorie:

$$v = \sqrt{\frac{2kT}{m}}$$

Ein Molekül der Geschwindigkeit  $v$  kann von einem Planeten der Masse  $M$  entweichen, wenn gilt:

$$v^2/2 \geq GM/R$$

Deshalb können Mond und Merkur keine Atmosphäre halten.

### 3.1 Die Erde

- **Beschreiben sie den Aufbau der Erde.** Die Figur der Erde ist infolge ihrer Rotation ein Ellipsoid, das Erdsphäroid. Die mittlere Dichte beträgt  $\rho = 5520\text{kg/m}^3$ . Das Erdinnere ist schalenartig aufgebaut:
  - *Erdkruste*:  $330\text{kg/m}^3$ , sie wird unterteilt in: a) *Lithosphäre*, die aus Granitgestein besteht und unter den Kontinenten bis  $35\text{km}$  Tiefe reicht, die Basalte unter den Ozeanböden reichen nur  $5\text{km}$  tief; b) *Hydrosphäre*: 70% der Erdoberfläche besteht aus Wasser.
  - *Erdmantel*: Die Kruste schwimmt in großen Blöcken auf dem Erdmantel, wo Silikate wie Olivin vorkommen. Die Dichtewerte reichen von  $3400\text{kg/m}^3$  bis  $5500\text{kg/m}^3$ . Der Erdmantel reicht bis in  $2900\text{km}$  Tiefe.
  - Flüssiger *äußerer Erdkern*: etwa  $2000\text{km}$  dick.
  - Fester *innerer Kern* mit einem Radius von  $1300\text{km}$ .

Die Theorie der *Plattentektonik* wurde 1900 entwickelt.

- **Erdmagnetfeld?** Die magnetische Flussdichte am Äquator beträgt  $0,31$  Gauß. Das magnetische Moment  $\vec{M}$  zeigt in Richtung Dipolachse und durch Gradientenbildung bekommt man den Vektor der magnetischen Flussdichte  $\vec{B}$ :

$$\vec{B} = -\text{grad} \frac{\vec{M} \cdot \vec{r}}{r^3} = -\text{grad} \frac{M \sin \lambda}{r^2}$$

Die Achse des Erdmagnetfeldes ist  $12^\circ$  gegen die Rotationsachse der Erde geneigt. Das Erdmagnetfeld wird durch einen *selbsterregenden Dynamoprozess* aufrechterhalten (Änderung alle  $10^4$  bis  $10^5$  Jahre). An der Magnetopause trifft die Magnetosphäre der Erde auf den von der Sonne kommenden Partikelstrom (Sonnenwind). An der der Sonne zugewandten Seite wird das Erdmagnetfeld zusammengestaucht und dehnt sich nur etwa 10 Erdradien weit aus; an der Sonnenabgewandten Seite bildet es einen langen Schweif aus. Die Magnetopause lenkt die von der Sonne kommenden Protonen und Elektronen ab. Einige gelangen doch in die Magnetosphäre und werden in den *Van Allen Strahlungsgürteln* gefangen. Der innere Gürtel erstreckt sich zwischen 1 und 2 Erdradien und enthält Protonen mit Energie von 50 MeV sowie Elektronen mit 30 MeV. Dann gibt es eine Lücke und zwischen 3 und 4 Erdradien gibt es den äußeren Gürtel, wo sich weniger Energiereiche Teilchen finden. Der innere Gürtel ist relativ stabil, der äußere hängt von der Aktivität der Sonne ab und kann stark variieren. Die in den Gürteln eingefangenen Teilchen machen eine spiralförmige Bewegung um die magnetischen Feldlinien und springen

mit Perioden zwischen 0,1 bis 3,0 s zwischen den sog. magnetischen Spiegelpunkten hin und her. Teilchen des inneren Gürtels können mit der Atmosphäre in Wechselwirkung treten, wobei dann Nordlichter (engl. *Aurorae*) auftreten. Diese treten normalerweise in 100 km Höhe auf.

- **Was ist magnetische Rekonnexion und wo tritt diese auf?** Sie spielt eine wichtige Rolle bei der Entstehung von Nordlichtern. Bereiche mit entgegengesetztem Magnetfeld kommen zusammen und die Feldlinien brechen zusammen und verbinden sich zu neuen Kombinationen. Derartige Prozesse finden im Magnetschweif der Erde statt in einer Entfernung von etwa 100 Erdradien. Wenn der Sonnenwind so viel Energie zuführt, dann überdehnen sich die Feldlinien und Rekonnexion tritt schon bei 15 Erdradien Entfernung ein. Das Feld bricht zusammen, Elektronen gelangen in die Atmosphäre und die Nordlichter entstehen.
- **Man vergleiche die Planetenatmosphären.**

**Merkur:** Extrem dünne Na-Atmosphäre

**Venus:**  $CO_2$ , 750K, 90facher Erdatmosphärendruck. Unten heiß oben kalt → Treibhauseffekt. Troposphäre bis 50km, dort auch Wolken (schwefelhaltig, da nicht durch Niederschlag ausgewaschen). Der Sonnenwind wirkt direkt auf die Atmosphäre ein.

**Erde:**  $N_2$ ,  $O_2$ , wenig  $CO_2$ ,  $H_2O$ , Edelgase, Methan; Unten kalt, oben heiß. Jegliche energiereichere Strahlung als UV wird absorbiert. Die Troposphäre reicht bis 12km, dort sind Wolken zu finden.

**Mars:** sehr geringer Oberflächendruck: 0,01 facher Erdatmosphärendruck, 95%  $CO_2$ . Wolken: Staubwolken, Wassereiswolken, darüber: Kohlendioxid (Trockeneis), Polkappen aus  $CO_2$ ,  $H_2O$

**Jupiter:** große innere Wärmequelle → T-Zunahme nach innen.  $H_2$ ,  $N_2$ ,  $CO_2$ ,  $H_2O$ ,  $S_n$  (Schwefelwasserstoffe, diese ergeben die Farben). Wolken in Schichten, ganz oben  $NH_3$ , Obergrenze, 140K. Es gibt eine Ost-West Strömung wegen der starken Rotation. Der große Rote Fleck ist ein Wirbel in einer beständigen Hochdruckregion.

**Saturn:** ähnlich wie Jupiter

**Saturnmond Titan:**  $CH_4$ -Wolken,  $CH_4$  kann in allen Aggregatzuständen vorkommen: Regen, Seen, Ozeane.

**Uranus:**  $CH_4$ -Wolken, keine innere Wärmequelle, Atmosphäre damit sehr stabil

**Neptun:**  $CH_4$ -Wolken, selbe Oberflächentemperatur wie Uranus, weil innere Wärmequelle aber weit entfernt ist, beträgt die Temperatur an der Obergrenze der Troposphäre 70K.

**Neptunmond Triton:** aktive Geysire 35-40K

**Pluto:**  $CH_4$ ,  $NH_3$ , 50-60K

## 3.2 Der Mond

- **Was sind die wichtigsten Phänomene der Mondoberfläche? Was folgt aus der Kraterdichte?**
  - *Oberfläche*: Die Oberfläche, die viele Krater aufweist nennt man **Terrae**, aus Silikatgestein. Die dunklen großen Ebenen mit wenigen Kratern heißen *Maria* (Meere) und bestehen aus Basalt. Entstanden durch Meteoritenkrater, mit Lavagestein aufgefüllt (3,5 Mrd. Jahre), 17% der erdzugewandten Seite. **Gebirge**: Resultat von Impakten, Oberfläche mit **Staubschicht** (cm) bedeckt. **Flüsse** (von Vulkanausbrüchen) 1,5 Mrd. Jahren.
  - *Krater*: Aus der Anzahl der Krater, die ein bestimmtes Gebiet aufweist, kann man auf dessen Alter schließen, wenn ein Planet oder Mond geringe innere Aktivität bzw. Erosion hat. Die Rate der Kraterbildung ist mehrere Milliarden Jahre konstant gewesen, d.h. die Anzahl der Krater ist proportional zur Länge der Zeit, der die Oberfläche Einschlägen ausgesetzt war.

## 3.3 Das Sonnensystem

- **Man diskutiere Vulkanismus im Sonnensystem.**
  - Merkur**: ähnlich wie der Mond (z.B. Caloris Becken)
  - Venus**: erloschene Vulkane
  - Erde**: junge Vulkane
  - Mond**: toter Planet, Maria, Rillen, Ablagerungen, Schildvulkane
  - Mars**: Tharsis Region: große Schildvulkane (sehr ausgebreitet), keine Plattentektonik. Alte und junge Vulkane: *Olympus Mons*: 27 km - höchste Erhebung und größter Vulkan im Sonnensystem.
  - Io**: Aktivster Körper im Sonnensystem aufgrund sehr starker Gezeitenkräfte (wirken als „Heizung“).
- **Was sind die galileiischen Monde? Eigenschaften.** Jupiter besitzt 28 Satelliten und einen Ring. 1610 hat Galilei die nach ihm benannten Galileischen Monde entdeckt: Io, Europa, Ganymede und Callisto. Die kleinsten, Europa und Io sind in etwa so groß wie unser Mond, die anderen sind größer als Merkur. Die übrigen Monde sind viel kleiner.
  - Die Oberfläche von *Callisto* ist mit Impaktkratern übersät. Es handelt sich um einen Eismond und die Krater sehen flacher aus als bei Merkur oder Mond. Die Eiskruste erhitzt sich bis auf 130K und das bewirkt, dass das Eis weniger Widerstand hat und so die Einschlagsspuren flacher verlaufen. Er ist der Jupitermond mit der ältesten Oberfläche.
  - *Ganymede* ist der größte Mond im Sonnensystem und eine Milliarde Jahre nach seiner Entstehung ist es zu einer Restrukturierung seiner Oberfläche gekommen (auffällige Rillennuster), die ansonsten eher strukturlos erscheint.

- Auf *Io* gibt es aktive Vulkane, wobei Schwefel bzw. Schwefeldioxid ausgestoßen werden. Es gibt auch Schneefälle aus Schwefeldioxid. Man hat auch eine heiße Stelle auf *Io* gefunden, die 200km Durchmesser hat und wo eine Temperatur von 300K herrscht. Die Ursache für den Vulkanismus ist die Heizung infolge der Gezeitenwirkung. *Io* befindet sich in derselben Distanz zu Jupiter wie der Erdmond zur Erde, allerdings ist die Masse des Jupiter 300-mal so groß wie die Erdmasse und deshalb wird *Io* zusammengepresst und auseinandergezogen.
- Der Mond *Europa* ist von einem mächtigen Eispanzer bedeckt und ist eine weißleuchtende Kugel mit dunklen Streifen, die Risse in diesem Eispanzer sein können. Vielleicht waren innere Teile dieses Eispanzers infolge der Erwärmung durch die Radioaktivität geschmolzen und die Risse entstanden beim Erstarren. Möglicherweise gibt es unterhalb des Eispanzers auch jetzt noch flüssiges Wasser und damit wäre dieser Jupitermond ein Kandidat für Leben.
- **Was sind die Saturnringe?** Sie umkreisen den Saturn in der Äquatorebene, die um 27° geneigt ist zur Bahnebene des Planeten. Die hellsten Ringe sind der A-Ring (Radius 136780 km), der B-Ring und der innerste C-Ring (nur 12900 km von der Saturnoberfläche entfernt). A- und B-Ring sind durch die *Cassini-Teilung* getrennt. Die Ringe sind 70000 km breit, aber nur 20 m dick und bestehen aus Tennisball großen Eisstücken. Auf Satellitenaufnahmen zeigen sich unzählige Einzelringe. Wichtig für die Struktur der Ringe ist das Auftreten von *Resonanzen*<sup>3</sup>
- **Nach welchen Gesichtspunkten kann man Asteroiden einteilen?** Man unterteilt Asteroiden in 3 Gruppen:
  - C-Asteroiden:** Kohlenstoffreich, z.B. Ceres oder Pallas
  - S-Asteroiden:** felsig; es gibt keine dunklen Kohlenstoffverbindungen und somit höheren Albedo (Reflektivität 16%, wie der Erdmond); bestehen aus Silikatverbindungen.
  - M-Asteroiden:** Psyche ist der größte M-Typ. Bestehen aus Metallen. Ein 1-km-M-Abstand könnte den Weltverbrauch an Industriemetallen für Jahrzehnte abdecken.

Der Hauptgürtel liegt zwischen Jupiter und Mars. Erdbahnkreuzende werden als NEOs bezeichnet (Earth near objects).

- **Weshalb nimmt die Dichte der Planeten mit zunehmender Entfernung v.d. Sonne ab?** Die Elemente Wasserstoff und Helium wurden beim Urknall gebildet und machen fast die gesamte Materie im Universum aus. Wichtig für die weiteren Überlegungen ist, dass diese Elemente auch bei den nahe dem absoluten Nullpunkt liegenden Temperaturen gasförmig bleiben. 98% des solaren Urnebels war daher gasförmig. Elemente wie Kohlenstoff, Stickstoff, Sauerstoff kondensieren (z.B.  $H_2O$

---

<sup>3</sup>Resonanz, wenn zwei Objekte Umlaufperioden haben, die zueinander in einem ganzzahligen Vielfachen stehen.

oberhalb von 110 K). Deshalb ist zu erwarten, dass sich in den kühleren äußeren Regionen des Sonnensystems Eis bildete. Alle anderen Elemente (weniger als 0,3% der Masse des Urnebels) reagieren mit Sauerstoff und formen Moleküle, Silikate usw. Dies sind die erdähnlichen Planeten: Sie bestehen i.w. aus einem metallischen Kern umgeben von einem Silikatmantel. DURCH TEMPERATURUNTERSCHIEDE IM SOLAREN URNEBEL, KONDENSIERTEN DIE ELEMENTE UNTERSCHIEDLICH UND ES ERGABEN SICH UNTERSCHIEDLICHE DICHTEVERTEILUNGEN!

- **Was sind Besonderheiten im Sonnensystem?**
- **Saturnmond Titan?** Man kennt 30 Saturnmonde. Der Saturnmond *Titan* ist mit einem Durchmesser von 5150 km der zweitgrößte Mond im Sonnensystem und hat 1,9 Mondmassen. Die Dichte beträgt  $1,9\text{g/cm}^3$ . Er wurde 1655 von *Huygens* gefunden. 1944 hat man bei ihm eine Atmosphäre entdeckt. *Voyager* passierte Titan in nur 4000 km Abstand und wurde von der Erde aus gesehen von Titan bedeckt. Hauptbestandteile der Atmosphäre:  $N_2$ ,  $CH_4$ , Ar, es existiert  $HCN$ , welches als Grundbaustein für die DNA dient. Die niedrigen  $CH_4$ -Wolken reichen bis 10 km Höhe. Außerdem gibt es Ozeane aus flüssigem Methan (bei 90 K).
- **Wie konnte man die Masse des Pluto bestimmen?** Durch die Analyse der Bewegung des Doppelsystems Pluto-Charon.
- **Was ist die Oort'sche Wolke?** Im Jahre 1950 hat J. *Oort* die Existenz einer riesigen Wolke aus Kometen postuliert, die unser Sonnensystem einhüllt. Dies basiert auf 3 Beobachtungstatsachen:
  1. Es wurde kein Komet mit einem Orbit beobachtet, der zeigt, dass er aus dem interstellaren Raum kommt. Es gibt also keine hyperbolischen Geschwindigkeiten.
  2. Die Aphelien vieler langperiodischen Kometen scheinen bei einer Entfernung von 50000 AU zu liegen.
  3. Es gibt keine Hauptrichtung der Kometen. Es könnte dort  $10^{12}$  Kometen geben. Aufgrund der großen Entfernungen kann man diese Objekte aber nicht direkt sehen. Die Gesamtmasse beträgt möglicherweise mehr als 1 Jupitermasse.
- **Weshalb zeigen Kometenschweife immer von der Sonne weg?** Die UV-Strahlung der Sonne bricht die Wassermoleküle auf, und es bilden sich riesige H-Wolken um den Kometen herum. Kometenschweife zeigen immer von der Sonne weg. Der Stauschweif des Kometen wird vom Lichtdruck des Sonnenlichts von der Sonne weg gerichtet, der Ionenschweif hingegen vom Sonnenwind direkt.
- **Wie groß sind Kometen, woraus bestehen sie?** Kern: 1-50 km Durchmesser. Modell eines „schmutzigen Schneeballs“: Wasserdampf und andere leichtflüchtige Stoffe entkommen vom Kern und bilden den charakteristischen Kometenschweif.

Dies passiert, sobald ein Komet auf seiner Bahn innerhalb der Marsbahn ist. Die Atmosphäre eines Kometen besteht hauptsächlich aus  $H_2O$  und  $CO_2$ .

- **Welche Arten von Meteoriten gibt es?** Man unterteilt Meteorite in:
  - Eisenmeteorite, wobei es Metallmeteorite gibt (reines Fe und Ni) und die Sulfidmeteorite
  - Steinmeteorite:  $SiO_2$ ,  $MgO$ ,  $FeO$ ...
  - Tektite: Glasmeteorite, vorwiegend  $SiO_2$ . Oft rundliche oder kreisförmige Form. Man findet sie nur in bestimmten Gegenden.

oder nach einer anderen Einteilung:

- Undifferenzierte Meteorite (Chondrite). Sie enthalten 1 mm große Silikatkügelchen; es gibt noch die kohligen Chondrite.
  - Differenzierte Meteorite: Achondrite, metallreiche Meteorite.
- **Weshalb sieht man auf der Erde kaum Meteoritenkrater?** Verwitterung durch Lebewesen.

## 4 Die Sonne

### 4.1 Grunddaten der Sonne

- **Sonnendurchmesser, Masse, Temperaturen?** siehe Tabelle:

Entfernung	150 Millionen km
Masse	333000 Erdmassen = $1,98 * 10^{30} kg$
effektive Temperatur	5777K

- **Wie bestimmt man die Sonnenmasse?** Aus dem 3. Keplergesetz:

$$\frac{a^3}{p^2} = \frac{G}{4\pi^2} (M_1 + M_2)$$

Setzen wir z.B. ein:  $M_1$  Sonnenmasse,  $M_2$  Erdmasse,  $P$  Umlaufperiode Erde um Sonne (1 Jahr),  $a$  bekannte Entfernung Erde-Sonne. Dann ergibt sich sofort die Sonnenmasse. Die Masse der Erde  $M_2$  kann man hier vernachlässigen.

- **Wie bestimmt man die Temperatur der Sonne?** Gemäß dem Stefan Boltzmann'schen Gesetz gilt für den Gesamtstrahlungsstrom  $\pi F$  eines Sterns (darunter versteht man den Energiestrom, der z.B. pro  $cm^2$  an der Sternoberfläche aus dem Inneren kommt):

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

und man bekommt  $T_{eff} = 5770K$ . Die Messung von  $\pi F$  geht aus von der Messung der Solarkonstante  $S$ .

- **Was ist Helioseismologie?** Durch Beobachtungen: Die obere Photosphäre schwingt nach oben und unten mit einer Periode von 5 Minuten. Schwingungen im Inneren der Sonne → Information über das Innere, Schwingungsmuster bis in die Tiefe.

## 4.2 Der Aufbau der Sonne

- **Man skizziere den Sonnendynamoprozess**
- **Was sind Sonnenflecken?** Die Flecken bestehen aus einem dunklen Kern, der Umbra, die umgeben ist von einer filamentartigen helleren Penumbra. Die Anzahl der Flecken variiert mit einer Periode von 11 Jahren: *Sonnenfleckenzyklus*. Eine hohe Sonnenaktivität bewirkt viele Sonnenflecken. Flecken mit geringer Temperatur werden durch Fackeln überkompensiert (Überhitzungen der Photosphäre, 10% heller) → höhere Strahlung bei höherer Anzahl von Flecken. 91% aller Flecken treten als bipolare Gruppen auf. Es handelt sich um magnetische Schläuche, die durch den magnetischen Auftrieb vom Sonneninneren an die Oberfläche getrieben werden und an den beiden Durchstoßpunkten hat man dann eine bipolare Gruppe. Die Lebensdauer der Flecken beträgt einige Tage, 90% der Flecken < 11 Tage.
- **Was ist die Granulation?** Die Oberfläche der Sonne im Bereich der Photosphäre ist nicht homogen, sondern man erkennt ein zellförmiges Muster, das wegen des körnigen Aussehens auch als *Granulation* bezeichnet wird. Die Zellen haben eine Ausdehnung von 1000 km und eine Lebensdauer von 10 Minuten. Ab einer Tiefe von 200000 unterhalb der Sonnenoberfläche erfolgt der Energietransport durch Konvektion: Helle Granulation: Materie fließt nach oben; dunkle Granulation: Materie fließt nach unten.
- **Aufbau der Sonne?** Der Aufbau der Sonne lässt sich grob unterteilen in:
  - Sonneninneres (Kern),  $1/3$ ,  $20 \cdot 10^6$  Grad
  - Strahlungszone,  $1/3$ ,  $10 - 3,5 \cdot 10^6$  Grad
  - Konvektionszone,  $1/3$ , in 200000 km Tiefe
  - Photosphäre,  $\lambda = 500nm$ ,  $d = 500km$ ,  $T = 6000K$ , 99% der Energie, Randverdunklung
  - Chromosphäre, bis in  $10^4$  km Höhe,  $T = 4500K$  bis einige  $10^5K$  (Zunahme nach oben),  $d = 10^4km$ , monochromes Licht, wenig Strahlung aufgrund geringer Dichte.
  - Korona,  $T = 10^6K$ , Form abhängig von der Sonnenaktivität, beobachtbar im UV, Röntgen, Radio, Sonnenwind geht durch Löcher in magnetischen Feldlinien
- **Was ist der Sonnenaktivitätszyklus.** Sonnenfleckenzyklus: alle 11 Jahre, Gleissberg Zyklus (ca. 90 Jahre) und der magnetische Zyklus (Hale Zyklus)

- **Wie bestimmt man die Sonnenfleckenrelativzahl?** Flecken treten meist in Gruppen mit mehreren Einzelflecken auf. Die Relativzahl  $R$  wird bestimmt:

$$R = k(10g + f)$$

wobei  $g$  die Anzahl der Gruppen und  $f$  die Anzahl der Einzelflecken ist

## 5 Zustandsgrößen der Sterne und Sternatmosphären

- **Wie bestimmt man die Entfernung eines Sterns?** Die jährliche Bewegung der Erde um die Sonne führt zu den Fixsternparallaxen. Man sieht einen nahen Stern unter verschiedenen Winkeln vor weiter entfernten Hintergrundsternen. Wenn  $a$  die Distanz Sonne-Erde bedeutet und  $d$  der Abstand Erde-Stern, dann ergibt sich die Parallaxe eines Sterns:

$$\pi(rad) = a/d$$

Ein Stern befindet sich in der Entfernung 1 *Parsec*, wenn seine Parallaxe  $1''$  beträgt.

- **Wie bestimmt man Sternradien?** zu lange für hier.
- **Wie bestimmt man Sternmassen?** Am schwierigsten zu bestimmen, allerdings eine fundamentale Zustandsgröße von der viele anderen Parameter abhängen: Sternentwicklung, Alter der Sterne, Kernfusion usw. Direkt ableitbar ist sie nur, wenn der Stern einen Begleiter hat und man daher das dritte Kepler'sche Gesetz anwenden kann:

$$\frac{(M_1 + M_2)}{a^3} U^2 = const = 1$$

- **Wie lautet das Planck'sche Strahlungsgesetz?** Man behandelt den Stern als Schwarzen Körper:

$$I_\nu = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}$$

- **Wie lautet das Stefan-Boltzmann Gesetz und wie erhält man es?** Integriert man die Planckformel über alle Wellenlängen, ergibt sich das Stefan Boltzmann Gesetz:

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

- **Wie lautet das Wien'sche Gesetz?** Differenziert man das Planksche Gesetz und setzt die Ableitung = 0, dann ergibt sich, dass das Maximum der Ausstrahlung bei der Wellenlänge  $\lambda_{max}$  liegt und:

$$T\lambda_{max} = const = 2,9 * 10^{-3} mK$$

- **Skizzieren Sie das Spektrum eines Schwarzen Körpers mit  $T=10000$  K und  $T=5000$  K.**

- **Wie bestimmt man die Temperatur eines Sterns?** Hier gibt es verschiedene Definitionen:

**Effektive Temperatur** Diejenige Temperatur, welche der Strahlung eines Schwarzen Körpers, der pro Flächeneinheit dieselbe Energie abstrahlt wie der Stern entspricht.

**Strahlungstemperatur** Diejenige Temperatur, die der Strahlung eines Schwarzen Körpers in einem engen Wellenlängenbereich entspricht.

**Farbtemperatur** Diejenige Temperatur, die der Strahlung eines Schwarzen Körpers in einem Spektralbereich (=Farbe) entspricht.

**Gradationstemperatur** Diejenige Temperatur, deren Intensitäts-Wellenlänge-Kurve bei einer bestimmten Wellenlänge diese Steigung aufweist wie diejenige des Intensitätsverlaufs eines Schwarzen Körpers.

**Wien'sche Temperatur** folgt aus dem Maximum der Intensitätsverteilung

- **Wie entstehen Emissionslinien?** Anregung der Atome durch Strahlung oder Stöße
- **Wie entstehen Absorptionslinien?** Bestrahlt man eine Probe mit einem kontinuierlichem Spektrum, so treten dort Absorptionslinien auf, wo die Probe ein Photon absorbiert hat, um in einem angeregten Zustand zu gelangen; gibt also die Energieniveaus wieder.
- **Was ist die H-Alpha Linie?** Langwelligste Linie der Balmer-Serie von  $n = 3$  auf  $n = 2$ , 656,278 nm.
- **Was besagen die Spektralklassen?** Je nach Temperatur des Sterns werden verschiedene Atome angeregt; man kann keine Aussagen über die stoffliche Zusammensetzung machen (nur der Sternatmosphäre); Spektraltyp  $\rightarrow$  absolute Helligkeit, beobachtbare Helligkeit  $\rightarrow$  Entfernung.
- **Wodurch unterscheidet sich ein O von einem M Stern?** O-B-A-F-G-K-M (oh be a fine girl kiss me). Aus dem Emissionsspektrum ergeben sich verschiedene Stärken der H- $\alpha$ -Linie, jetzt wird nach der Temperatur eingeteilt. O: He-II-Linien, bläulich; B: He-I-Linien, weiß-blau; A: H-Linien, weiß; F: Ca-II-Linien, weiß bis leicht gelb; G: Ca-II-Linien und Metall, gelbliche Sterne, K: Molekülbanden TiO, rötliche Sterne; M: neutrale Metalllinien, rote Sterne, am kühnsten.

## 6 Sternentwicklung

- **Was sind Überriesen?** Man erkennt beim Überriesen im HSR-Diagramm bei gegebener Temperatur eine wesentlich höhere Leuchtkraft. Daher muss er eine größere Oberfläche besitzen; man spricht von einem *Riesens Stern*
- **Skizziere die Entwicklung der Sonne im HRD!** siehe Hanslmeier, Seite 295

- **Wie kann man das Alter eines Sternhaufens ermitteln?** Die Mitglieder eines Sternhaufens bewegen sich in dieselbe Richtung zum Fluchtpunkt. Wenn  $\alpha$  der Winkel zwischen Verbindungslinie und Bewegungsrichtung (Fluchtpunkt) ist,  $v_f$  die Eigenbewegung des Sterns (in 00 pro Jahr),  $v_r$  die Radialgeschwindigkeit in km/s. Dann gilt:

$$\tan \alpha = \frac{T}{v_r}$$

$$\tan \mu = \frac{T}{r}$$

$$f = v_r \frac{\tan \alpha}{\tan \mu}$$

T...Eigenbewegung, r...Abstand.

- **Was sind Kugelhaufen?** Im sphärischen Raum von etwa  $50kpc$  Radius um das Zentrum der Milchstraße herum verteilt. Sie nehmen nicht an der galaktischen Rotation teil. Kugelsternhaufen sind kugelförmig angeordnete Ansammlungen von einigen  $10^4$  Sternen, die in einem Halo um eine Galaxie herum verteilt sind. In ihnen findet man die ältesten Sterne.
- **Was sind Cepheiden?** Pulsationsveränderliche Sterne. Der Lichtwechsel erfolgt streng regelmäßig mit einer Periode zwischen 1 und 50 Tagen. Es sind sehr helle Überriesen (F bis K). Man unterteilt:
  - $\delta$ -Cephei-Sterne: Sie kommen in der galaktischen Ebene vor, Cepheiden der Population I
  - W-Virginis-Cepheiden: Sie kommen im Halo der Galaxis vor bzw. im galaktischen Zentrum, Cepheiden der Population II.

Die Amplituden betragen weniger als  $2^m$ , im blauen größer als im roten. Ursache sind Pulsationen, wobei die Radiusveränderungen bei den  $\delta$ -Cephei-Sternen etwa 10% betragen, bei den W-Virginis-Cepheiden etwa 50%. Durch Messung der Dopplerverschiebung der Spektrallinien kann man die Geschwindigkeiten bestimmen. Es gibt eine Beziehung zwischen ihrer scheinbaren Helligkeit und der Periode gab. Sobald man also die Periode dieser Objekte bestimmt hat, kennt man deren absolute Helligkeit und somit die Entfernung. Dies ist eine sehr wichtige Methode der Entfernungsbestimmung bei nahen Galaxien.

- **Was sind RR Lyrae Sterne?** Sie kommen in Kugelsternhaufen vor. Die Perioden sind  $< 1^d$ , Spektraltypen B8...F2, Amplituden um  $1^m$ . Manchmal überlagern sich mehrere Perioden. Sie zeichnen sich durch eine absolute Helligkeit von  $M_{vis} = +0,5 \pm 0,4$  aus. Im HRD liegen sie an der Lücke im horizontalen Ast, wo es keine stabilen Sterne geben kann.
- **Was sind Novae?** Diese Objekte werden manchmal als kataklysmische Veränderliche bezeichnet. Es handelt sich um heiße Zwergsterne, deren Helligkeit innerhalb

kurzer Zeit (Stunden bis Monate) um 7 bis 20 Größenklassen ansteigt. Nach kurzem Maximum kehrt die Helligkeit dann im Verlauf von Jahren bis Jahrzehnten wieder zum ursprünglichen Wert zurück. Bei den Novae handelt es sich um enge Doppelsterne mit einer heißen, blauen Komponente (Weißer Zwerg). Die masseärmere kühlere rote Komponente gibt Materie an den Weißen Zwerg ab. Dessen Temperatur und Dichte am Boden der Atmosphäre nimmt zu es bildet sich ein heißer Fleck aus und thermonukleare Reaktionen können einsetzen. Während des Ausbruchs wird etwa  $10^{15}$  erg frei.

- **Welche Gesetze gelten für einen schwarzen Körper?** Absorbiert die gesamte Strahlung, Planck'sche Strahlungsformel, Wien'sches Verschiebungsgesetz, Stefan-Boltzmann-Gesetz
- **Was ist ein A0 II Stern?** Weißer Stern, H-Linien dominieren, Heller Riese.
- **Was ist ein Hauptreihenstern?** Ein Stern mit 1 Sonnenmasse erreicht die Nullalterhauptreihe, sobald die pp Kette zündet. Nach etwa 10 Milliarden Jahren endet sein Hauptreihenasein, fast der gesamte Wasserstoff im Kern wurde in Helium umgewandelt; Masse-Leuchtkraft Beziehung:  $L \approx M^{3,5}$
- **Weshalb treten bei späten Spektraltypen Metalllinien auf?** Aufgrund bestimmter Temperaturen, Tripple- $\alpha$ -Zyklus.
- **Was bedeutet hydrostatisches Gleichgewicht?** In einem stabilen Stern herrscht folgendes Gleichgewicht: Gravitation = innerer Druck. Schaltet man den Inneren Druck aus würde durch die Gravitation sofort ein Kollaps eintreten
- **Was sind Supernovae?** Siehe Hanslmeier Seite 305.
- **Man erläutere die Elementsynthese während der Sternenentwicklung.** Wasserstoff wird zu Helium verbrannt. Helium kann in Sauerstoff, Kohlenstoff oder Neon verbrannt werden. Sauerstoff kann weiter zu Schwefel, Phosphor und Silizium verbrannt werden. Kohlenstoff zu Magnesium, Natrium und Neon.
- **Was besagt der Farbindex und das Zweifarbendiagramm?** Von der Beobachtungsseite her ist das *Farbhelligkeitsdiagramm*, *FHD* noch einfacher zu gewinnen. Man trägt die Farbe (ein Maß für die Temperatur und daher den Spektraltyp) gegen die Leuchtkraft (absolute Helligkeit) auf. Zur Bestimmung der Farbe wird mit zwei verschiedenen Farbfiltern die Helligkeit gemessen. Beim *Zweifarbendiagramm* trägt man z.B. B-V gegen U-B auf. Es ergibt sich eine Welle im Diagramm.
- Was sind Mirasterne?
- Was ist ein Pulsar?
- Wie bekommt man den Schwarzschildradius?
- Was ist der Unterschied zwischen weißen und braunen Zwergen?

- Man erläutere das Prinzip der Kernfusion sowie die pp-Reaktion.
- Was ist die Chandrasekhar Grenzmasse?

Was sind H-II Regionen? 2. Weshalb sieht man H-I Regionen? 3. Wie kann man interstellaren Staub nachweisen? 4. Was wissen Sie über Sternpopulationen? 5. Was bestimmt die Sternmasse? 6. Wie bestimmt man die Masse einer Galaxie? 7. Diskutieren Sie die Rotation der Galaxis. 8. Was sind AGNs? 9. Was sind Seyfert Galaxien? 10. Was sind Quasare? 11. Wie lautet die Formel für den klass. Und den rel. Dopplereffekt? 12. Wodurch entstehen die Spiralarme? 13. Was ist die Hubble-Beziehung und das Hubble-Alter? 14. Was bedeutet inflationäre Phase? 15. Was bedeutet Symmetriebrechung? 16. Was ist die Einsteinsche Feldgleichung? 17. Wie kann man die Entfernung von Galaxienhaufen bestimmen? 18. Was ist die kritische Materiedichte? 19. Was ist dunkle Materie? 20. Wie hat Ihnen die VL gefallen?