

Die Sonne (I)

1. Allgemeine Größen

1.1. Entfernung, Durchmesser, Masse

1.1.1. Entfernung von der Erde:

E. RABE gab 1967 in Auswertung der bis 1965 durchgeführten Eros-Beobachtungen die Entfernung Erde-Sonne mit 149 598 000 km an. Bei der Annahme des Erdradius von 6 378,5 km ermittelte er eine Sonnenparallaxe von $8.''79416$. Neuere Radarmessungen bestätigten diese Werte.

1.1.2. Durchmesser: Nach den Messungen von AUWERS, 1891, beträgt der mittlere scheinbare Durchmesser 1919.''3. Er schwankt infolge des unterschiedlichen Abstandes von der Erde zwischen 1955.''8 und 1891.''4. Daraus folgt ein wahrer Durchmesser von rund 1 391 400 km.

1.1.3. Masse: Die Masse der Sonne entspricht 332 488 Erdmassen. Wir erhalten aus der bekannten Erdmasse dann eine absolute Masse von 1.9866×10^{30} kg.

1.2. Helligkeiten:

1.2.1. Die scheinbare Helligkeit in Sterngrößen: $m_v = -26,88$

1.2.2. Die absolute Helligkeit: $M_v = +4,69$

1.2.3. Die absolute bolometrische Helligkeit: $M_{bol} = 4,62$

1.3. Energetische Größen

1.3.1. Für die uns zugestrahlte Energie ist die Solarkonstante von besonderer Bedeutung. Wir verstehen darunter den Energiebetrag q , der bei senkrechter Bestrahlung ohne Vorhandensein der Erdatmosphäre auf einen cm^2 in einer min eingestrahlt wird.

$$q = 1.97 \pm 0,01 \text{ cal} \cdot \text{cm}^{-2}$$

1.3.2. Die Kenntnis der Solarkonstanten ermöglicht die Berechnung der Flächenhelligkeit der Sonne. Man erhält für die Strahlung eines cm^2 der Sonnenoberfläche: $F = 6,35 \text{ kW cm}^{-2}$.

1.3.3. Multipliziert man diesen Betrag mit der Sonnenoberfläche, so erhält man die Gesamtausstrahlung, die Leuchtkraft der Sonne: $L = 3,861 \times 10^{23} \text{ kW}$.

1.3.4. Energieerzeugung: Die Sonne gewinnt ihre Energie wohl im wesentlichen durch die Umwandlung von Wasserstoff in Helium. Dabei wird aus vier Protonen ein Heliumkern aufgebaut. Die mittlere Energieerzeugung beträgt dabei $1,94 \cdot 10^{-7} \text{ W g}^{-1}$.

1.4. Temperatur: Die effektive Temperatur der Sonnenoberfläche wurde zu $T_e = 5 785 \text{ K}$ bestimmt.

1.5. Sonnenrotation: Die Sonnenrotation nimmt mit wachsender heliographischer Breite zu. Die siderischen und synodischen Rotationsperioden bei 16° Breite betragen $T_{sid} = 25,380 \text{ d}$ und $T_{syn} = 27,275 \text{ d}$.

Karteikarte der Zeitschrift „Astronomie in der Schule“; Fortsetzung Rückseite

2. Das Sonnenspektrum

Das Sonnenspektrum entspricht dem eines Sterns der Spektralklasse G 1 und der Leuchtkraftklasse V. Von rund 26 000 Linien zwischen 293,5 nm und 1 349,5 nm konnten bisher etwa 70 Prozent identifiziert werden. Dabei wurden 64 Elemente sicher nachgewiesen.

3. Die Photosphäre

Die Photosphäre der Sonne ist die leuchtende Schicht, aus der die Sonnenstrahlung in den Weltraum abgestrahlt wird, und die wir als die Oberfläche der Sonne erblicken. Ihre einzelnen Erscheinungen sind die Randverdunklung, die Granulation, die Sonnenflecken und die Fackeln.

3.1. Die Randverdunklung läßt sich bereits in kleineren Fernrohren beobachten. Sie entsteht dadurch, daß wir das beobachtete Licht aus verschiedenen tiefen Schichten, und damit aus verschiedenen heißen Schichten empfangen. Nach dem Rand nimmt die Tiefe ab. Wir beobachten daher kühlere, d. h. gleichzeitig dunklere Schichten.

3.2. Die Feinstruktur der Sonnenoberfläche erscheint uns körnig. Wir bezeichnen sie als Granulation. Die Granulen erscheinen vorwiegend in rundlicher Form. Ihre Lebensdauer wird im Mittel auf 3 bis 5 Minuten geschätzt. Der Durchmesser beträgt 0,3 bis 1,5 Bogensekunden. Die Ursache der Bildung der Granulation sind aufsteigende Ströme der Wasserstoffkonvektionszone.

3.3. Sonnenflecken

Die Größe beträgt im Mittel 1000 bis 3000 km und reicht bis zu Gebilden von einigen hunderttausend Kilometer Ausdehnung. Die Flecken bilden häufig Gruppen, die zur Ausbildung einer Bipolarität neigen. Die Lebensdauer ist von der Größe abhängig und schwankt zwischen wenigen Tagen und einigen Monaten. Während ihrer Entwicklung führen sie eine geringe Eigenbewegung aus. Die Sonnenfleckentwicklung unterliegt einer periodischen Änderung. Zur Ableitung der Periodizität bestimmt man die von den Flecken bedeckte Flächengröße, oder man ermittelt die Sonnenfleckenrelativzahl: $R = k (10 g + f)$. Dabei ist k ein individueller Gewichtungsfaktor, den man erhält, wenn das Ergebnis einer Beobachtungsreihe R' mit dem Ergebnis einer Standardreihe, z. B. den definitiven Züricher Sonnenfleckenrelativzahlen, verglichen wird. Es gilt $k = R_z / R'$. g ist die Anzahl der beobachteten Gruppen und f die Anzahl der einzelnen Flecken. Man kann die Ergebnisse beider Beobachtungsmethoden ineinander überführen. Wir erhalten die Fläche F in Millionstel der Sonnenoberfläche, wenn wir die Züricher Relativzahl mit 16,7 multiplizieren: $F = 16,7 R_z$. Die Sonnenfleckenperiode schwankt nach bisherigen Beobachtungen zwischen 7,3 und 19,1 Jahren. Der wahrscheinlichste Mittelwert beträgt 11,1 Jahre. Die Flecken erscheinen hauptsächlich in Zonen beiderseits des Sonnenäquators. Am Äquator und in Breiten über 30 Grad sind sie selten oder überhaupt nicht zu beobachten. Die Temperaturen der Flecken liegen mit 4 170 K unter der Temperatur der Sonnenoberfläche. 91 Prozent aller Fleckengruppen sind magnetisch bipolar.

Die Sonne (II)

3.4. Fackeln

Als Fackeln bezeichnen wir die hellen, schlangenförmigen Gebilde in der Umgebung von Sonnenflecken. Ihre Temperatur übertrifft die der Photosphäre um rund 2000 Grad. Fackeln zeigen das gleiche Verhalten wie Sonnenflecken. Sie sind jedoch langlebiger. Alle Flecken scheinen in Fackelgebieten zu liegen. Es gibt aber fleckenlose Fackeln. Eine sehr helle Fackel ist stets ein Anzeichen dafür, daß eine Fleckenentstehung unmittelbar bevorsteht, oder daß ein Fleck gerade verschwunden ist.

4. Chromosphäre

Die oberhalb der Photosphäre liegende sehr schwach leuchtende Schicht erstreckt sich weit in den Raum hinein, ist aber unter normalen Bedingungen unsichtbar. Bei Sonnenfinsternissen erscheint sie als rötlicher Farbsaum, den wir mit langbrennweitigen Fernrohren in einzelne „Flammenzungen“, die Spiculae, auflösen können. Das Leuchten ist rund 1000mal schwächer als das der Photosphäre. Die Dicke der Chromosphäre beträgt etwa 14 000 km. Die untere Chromosphäre hat eine Temperatur von 4 500 K. Die Temperatur nimmt mit der Höhe, allerdings ungleichmäßig, zu. In der Chromosphäre kommt es zu kurzzeitigen Helligkeitsausbrüchen, den Eruptionen. Nach Beobachtungen des Krim-Observatoriums sind 70 Prozent der Eruptionen flache Gebilde. Die über die Spiculae hinausreichenden Teile der Chromosphäre bezeichnen wir als Protuberanzen. Ihre Höhen schwanken zwischen rund 10 000 und einigen 100 000 km. Normale Protuberanzen besitzen eine hohe Stabilität. Ihre Lebensdauer beträgt nach D'AZAMBUJA bis zu 3 Sonnenrotationen. Die in der Hauptzone vorkommenden Protuberanzen zeigen in Häufigkeit und Breitenwanderung ein fleckenähnliches Verhalten. In manchen Fällen überschreiten die ausgeworfenen Massen die Entweichgeschwindigkeit und verlassen die Sonne.

5. Sonnenkorona

Bei totalen Sonnenfinsternissen beobachten wir eine ausgedehnte Zone schwachen Leuchtens, die Korona. Die mittlere Gesamthelligkeit beträgt nur halbe Vollmondhelligkeit. Die Temperatur beträgt bis etwa 1 Million Grad. Die Linien des Spektrums konnten mit hochionisierten Elementen identifiziert werden. Das Aussehen der Korona ändert sich mit der Sonnenfleckenperiode. Im Maximum beobachten wir häufig eine radialsymmetrische Struktur. Dagegen vereinigen sich die Koronastrahlen im Minimum der Fleckenperiode in der Nähe des Sonnenäquators zu einem schwalbenschwanzförmigen Gebilde.

6. Geometrische und physikalische Daten der Sonne

a) Geometrische und mechanische Daten

Mittlere tägliche Parallaxe	8."80 (8."79)
Mittlere Entfernung von der Erde	$149.5 \cdot 10^6$ km
Größte Entfernung von der Erde	$152.0 \cdot 10^6$ km
Kleinste Entfernung von der Erde	$147.0 \cdot 10^6$ km
Scheinbarer Halbmesser in der mittleren Entfernung	$16' 1.''2$
wahrer Halbmesser = 109.2 Erdhalbmesser	$6.9635 \cdot 10^5$ km
Oberfläche = 11 920 Erdoberflächen	$6.094 \cdot 10^{12}$ km ²
Volumen = $1.302 \cdot 10^6$ Erdvolumen	$1.414 \cdot 10^{18}$ km ³
Masse = 332 488 Erdmassen	$1.986 \cdot 10^{30}$ kg
Mittlere Dichte = 0.2554 der Erddichte	1.409 g/cm ³
Schwerebeschleunigung an der Oberfläche (= dem 27.95fachen der mittleren Schwerebeschleunigung auf der Erdoberfläche)	$2.7410 \cdot 10^2$ m · s ⁻²
Rotationszeit siderisch ¹	25.38 d
Rotationszeit, synodisch ¹	27.28 d
Neigung des Rotationsäquators gegen die Ekliptik	7° 15.'0

b) Temperatur, Strahlung und Helligkeit

Effektive Temperatur (Strahlungstemperatur der Gesamtstrahlung der Photosphäre)	5785 K
Solarkonstante	2.00 kW cm ⁻²
Gesamtleistung der Sonnenstrahlung	$3.73 \cdot 10^{23}$ kW
Leistung der auf die Erdoberfläche einfallenden Strahlung	$1.69 \cdot 10^{14}$ kW
Energieemission der Sonnenoberfläche	6.35 kW cm ⁻²
Absolute visuelle Größe	+ 4 ^m 69
Absolute photographische Größe	+ 5 ^m 39
Scheinbare visuelle Größe (in der mittleren Entfernung)	- 26 ^m 90
Scheinbare photographische Größe	- 26 ^m 18

¹ Bezogen auf die mittlere heliographische Breite der Fleckenzone und das Niveau der Flecken.

7. Literatur

- WEIGERT, A.; ZIMMERMANN, H.: **Brockhaus ABC der Astronomie**. Brockhaus-Verlag, Leipzig 1961.
- GRAFF-LAMBRECHT: **Grundriß der Astrophysik**. Band 2: **Das Sonnensystem**. Teubner-Verlag, Leipzig 1962.
- HOPPE, J.: **Planeten, Sterne, Nebel**. Verlag Enzyklopädie, Leipzig 1961.

GÜNTER LAMPE

Erdähnliche Planeten - physikalische Eigenschaften (1)

Die 9 Planeten werden hinsichtlich ihrer physikalischen Merkmale in 2 Gruppen eingeteilt: erdähnliche und jupiterähnliche (Riesen-)Planeten.

Erdähnliche Planeten sind Merkur, Venus, Erde, Mars, Pluto (?)*. Sie sind durch folgende Merkmale gekennzeichnet:

- Die geometrischen Dimensionen umfassen einen engen Wertebereich.
- Die mittleren Dichten, also die mittleren Quotienten Masse durch Raumeinheit, haben einen sehr engen Spielraum und sind wesentlich größer als bei den Riesenplaneten.
- Die Atmosphären, die nur bei Venus und Erde relativ dicht sind, bilden eine Übergangsschicht von der festen oder flüssigen Planetenoberfläche zum Weltraum.
- Alle Planeten haben gleiche Umlaufrichtung. Die Bahnneigung erreicht nur bei Pluto einen größeren Wert (17°).
- Den irdischen ähnliche Lebensformen sind schon der Temperaturen wegen auf anderen Planeten des Sonnensystems kaum zu erwarten.

Physisches von den Einzelplaneten

Merkur

Die Ermittlung physischer Einzelheiten ist durch die Sonnennähe erschwert. Wegen der geringen Masse und der hohen Temperatur sind nur noch Reste einer **Atmosphäre** vorhanden, die den Blick auf die **Oberfläche** nicht behindern. Wegen der Sonnennähe sind trotzdem nur grobe Strukturen erkennbar. Nach radioastronomischen Messungen bei 2 cm Wellenlänge liegt die **Temperatur**, gemittelt über die Oberfläche und über längere Zeit, bei 350 K. Sie schwankt bis zu etwa 70 grd höheren und niedrigeren Werten mit der Periode der synodischen Rotation (176 Tage). Die aus Radarbeobachtungen ermittelte siderische **Rotationsperiode** ist 58,65 Tage (direkte Rotation). Die Apsidenlinie des Merkur dreht sich pro Jahrhundert um rund $43''$. Das entspricht einem Ergebnis der Relativitätstheorie.

Venus

Die sowjetischen Sonden Venus 4 bis Venus 6 übermittelten unmittelbare Meßergebnisse aus der **Atmosphäre**. Der Hauptbestandteil ist CO_2 mit rund 95 %; N_2 , Edelgase und Wasserdampf tragen nur wenig bei, O_2 höchstens 0,4 %. Der atmosphärische Druck am Boden liegt in der Größenordnung von 100 atm (abhängig von der Höhenlage des Landeplatzes). Die Oberfläche wird der Beobachtung durch Wolken entzogen, die vielleicht auch Staubeilchen enthalten. Nur Radarbeobachtungen lassen einige Strukturen wie „Ringgebirge“ erkennen. Durch die „Glashauswirkung“ des CO_2 ist die **Oberflächentemperatur** sehr hoch (etwa 400 C). Radarmessungen ergaben eine retrograde Rotation (siderisch 243 Tage, synodisch 217 Tage). Die Sonne geht also am Venushimmel im Westen auf.

* Die ungenauen Kenntnisse über Pluto erlauben noch keine sichere Einordnung.

Mars

Wegen seiner geringen Masse blieb nur eine dünne **Atmosphäre** erhalten. Aus verschiedenen Untersuchungen ergeben sich Bodendrücke von 3,5 bis etwa 30 mbar. Messungen der letzten Marssonden lassen auf einen Gehalt von 95 % CO_2 schließen, dazu kommen geringe Mengen von CO und Wasserdampf, auch O und H (atomar). Die **Oberfläche**, die auf Grund visueller Beobachtungen relativ detailliert kartiert wurde, zeigt helle, rötliche Gegenden und dunklere, im Kontrast etwas grünlich erscheinende Gebiete. Die dunklen Stellen, die nach Radarmessungen im allgemeinen höher liegen als die hellen, können zeitweise durch Staubstürme verschleiert werden. Den „Kanälen“, deren Beobachtung früher zu phantasievollen Spekulationen führte, entsprechen keine einfachen und einheitlichen Bodenstrukturen. Durch Marssonden erhaltene Nahaufnahmen zeigen auf der Marsoberfläche viele Einzelheiten, die den Ringgebirgen der Mondoberfläche sehr ähnlich sind. Die Achsenneigung von $25^\circ 12'$ führt zu **Jahreszeiten** mit unterschiedlichen Temperaturen, die entsprechend der größeren Umlaufperiode des Mars länger andauern als die Jahreszeiten auf der Erde. Die **Polkappen** sind in der kalten Zeit mit einer dünnen Schicht von festem CO_2 (Trockeneis) bedeckt (Temperatur um -125°C). Darüber bildet sich häufig eine Wolkenschicht aus. Auf manchen Marsaufnahmen scheint deshalb die Polkappe über den Planetenkörper hinauszuragen. Die **Durchschnittstemperatur** in mittlerer Entfernung von der Sonne (Mittel über Oberfläche und Marsjahr) liegt bei -53°C (Erde $+14^\circ\text{C}$). In tieferen Lagen der Äquatorzone werden Mittagstemperaturen um $+20^\circ\text{C}$ erreicht. Wegen der dünnen Atmosphäre ist die tägliche Temperaturschwankung groß (bis 130°). Die **Rotationsperiode** ergab sich durch eine Auswertung vieler Beobachtungen zu 24 h 37 min 22,668 s.

Für die beiden **Marsmonde** wurden bisher die Durchmesser mit einem angenommenen Wert der Albedo aus der gemessenen Helligkeit berechnet. Phobos konnte jetzt auf 2 von der Sonde Mariner 6 erhaltenen Aufnahmen vermessen werden. Er ist länglich mit Durchmessern von etwa 22,5 km und 18 km. Seine Albedo beträgt nur 0,065. Phobos geht am Marshimmel im Westen auf, da seine Umlaufperiode (7 h 39 min) kleiner als die Länge des Marstages ist. Die Umlaufperiode des Deimos (30 h 18 min) ist nur wenig größer als ein Marstag, deshalb beträgt die Zeit zwischen zwei aufeinanderfolgenden oberen Kulminationen am Marshimmel etwa 132 h.

Pluto

Aus einem lichtelektrisch beobachteten Rotationslichtwechsel wurde die **Rotationsperiode** zu rund 6,39 Tagen abgeleitet. KILADSE zeigte später, daß die Beobachtungen auch mit einer Periode von rund 1,18 Tagen verträglich sind. Die **Oberflächentemperatur** wird zu -220°C angenommen. Andere Daten mit Ausnahme der Bahndaten sind unsicher. In der Tabelle sind für Durchmesser und Masse obere Grenzwerte angegeben. Die Grenze für den Durchmesser ergab sich daraus, daß die mit einem größer angenommenen Durchmesser vorausberechnete Bedeckung eines Sterns durch Pluto nicht eingetreten ist. Die Masse wurde berechnet mit dem angegebenen Durchmesser und der Annahme, daß die mittleren Dichten von Pluto und Erde gleich wären, was wohl auch eine obere Grenze ist.

Dipl. Geogr. H. RISSE/Dr. habil. O. GÜNTHER

Fortsetzung auf Karteikarte „Erdähnliche Planeten – physikalische Eigenschaften (II)“

Erdähnliche Planeten - physikalische Eigenschaften (II)

Tabelle der Werte: oben absolute Werte, unten Vergleich mit Werten für die Erde

Planet	D (km)	m (10^{24} kg)	$\bar{\rho}$ ($g \cdot cm^{-3}$)	g ($m \cdot s^{-2}$)	v_E ($km \cdot s^{-1}$)	\bar{v}_U ($km \cdot s^{-1}$)	e	A (10^6 km)	Rot. (Tage)	Alb.
Merkur	4840	0,33	5,62	3,76	4,3	47,9	0,206	82...217	58,65	0,10
Venus	12100	4,87	5,09	8,88	10,3	35,0	0,007	41...257	243,09	0,76
Erde	12757	5,98	5,52	9,81	11,2	29,8	0,017	—	1,00	0,40
Mars	6780	0,64	3,97	3,72	5,0	24,1	0,093	55...400	1,03	0,15
Pluto	6800	0,90	5,50	—	—	4,7	0,253	29.. 50AE	6,39	—

	D	m	$\bar{\rho}$	g	v_E	\bar{v}_U
Merkur	0,38	0,06	1,02	0,38	0,38	1,61
Venus	0,95	0,81	0,92	0,90	0,92	1,17
Erde	1	1	1	1	1	1
Mars	0,53	0,11	0,72	0,38	0,45	0,81
Pluto	0,53	0,15	1,0	—	—	0,16

D Durchmesser

m Masse

$\bar{\rho}$ mittlere Dichte

g Schwerebeschleunigung an der Oberfläche

v_E Entweichgeschwindigkeit

(2. kosmische Geschwindigkeit)

\bar{v}_U mittlere Bahngeschwindigkeit

e Bahnexzentrizität

A Abstand von der Erde

Rotationsperiode

Alb. Albedo

Karteikarte der Zeitschrift „Astronomie in der Schule“; Fortsetzung Rückseite

Literatur:

- HOPPE, J.: **Planeten, Sterne, Nebel.** VEB Verlag Enzyklopädie, Leipzig 1961
- WEIGERT, A., ZIMMERMANN, H.: **Brockhaus ABC der Astronomie,** Leipzig 1961
- KUSMIN, A. D.: **Der Planet Venus.** Astronomie in der Schule 4 (1967) 2, S. 26
- REMANE, K.-H.: **Ergebnisse und Vermutungen über die Oberfläche und Atmosphäre der Venus.** Astronomie in der Schule 6 (1969) 4, S. 95
- GÜNTHER, O.: **Zu einigen astronomischen Ergebnissen der Raumfahrt.** Astronomie in der Schule 7 (1970) 1, S. 13

Vgl. auch Karteikarten

- Beobachtungsobjekte im Sonnensystem I/II
- Die Planeten (Überblick) I/II
- Vergleiche zum Lehrplanabschnitt „Das Sonnensystem“ I/II

Dipl. Geogr. H. RISSE/Dr. habil. O. GÜNTHER

Interstellare Materie (I)

6. Allgemeines

- 0.1. Literatur: WEIGERT, ZIMMERMANN; ABC der Astronomie
Stichwörter: Atombau, Interstellare Materie, Interstellarer Staub, Interstellares Gas, Milchstraßensystem, Spektrum sowie die dabei gegebenen Verweise.
- 0.2. Definition: I. M. = Im Raum zwischen den Sternen vorkommende nichtstellare Materie, zu der folgende Komponenten gehören:
1. Gas, 2. Staub, 3. Elektromagnetische Strahlung, 4. Teilchenstrahlung, 5. Magnetfelder.
Die Komponenten der I. M. befinden sich in ständiger Wechselwirkung miteinander.

1. Interstellares Gas

1.1. Erscheinungsformen im sichtbaren Spektralbereich

1.1.1. Thermisch leuchtende Emissionsnebel um heiße Sterne (W, O, B):

1. Planetarische Nebel, 2. Diffuse Emissionsnebel.

Spektrum: 1. Balmer-Linien von H in Emission, 2. Kontinua der Balmer- und Paschen-Serie in Emission, Verbotene Emissionslinien von O^{++} und O^+ u. a., Emissionslinien von He, C, Ne, O, S, N, Ar, Cl.

1.1.2. Nichtthermisch leuchtendes Gas (hauptsächlich Überreste explodierter Supernovae, z. B. Krebs-Nebel).

Spektrum: Synchrotronstrahlung (starke lineare Polarisation) + Emissionslinienspektrum ähnlich 1.1.1.

1.1.3. Vom interstellaren Gas herrührende scharfe Absorptionslinien in Sternspektren. Bisher wurden nachgewiesen: Ca^+ , Ca, Na, K, Fe, Ti^+ , CH, CH^+ , CN.

1.2. Erscheinungsformen im Radio-Gebiet

1.2.1. Kontinuierliche Radio-Emission der Galaxis, bestehend aus:

1. thermischer Strahlung der Emissionsnebel (frei-freie Übergänge), 2. nichtthermischer Strahlung der Objekte 1.1.2., 3. großräumiger nichtthermischer Emission (Synchrotronstrahlung in galaktischer Scheibe und im Halo).

1.2.2. Linienemission der interstellaren Gaswolken, bestehend aus:

1. der 21-cm-Linie des neutralen atomaren Wasserstoffs, 2. der 18-cm-Linie des OH-Radikals und einigen anderen Moleküllinien, die nur in speziellen Wolken auftreten, 3. Linien hoher Anregungsstufen von H, He und C im Radiospektrum von Emissionsnebeln.

1.2.3. Absorptionslinien in den Spektren von Radio-Quellen (21-cm-Linie, 18-cm-Linie).

1.3. Physik des thermischen Leuchtens der Emissionsnebel

1.3.1. Rekombinationsleuchten

Die kurzwellige Strahlung des heißen Sterns ionisiert das hauptsächlich aus Wasserstoff bestehende Nebelgas. Die Sternstrahlung muß dazu kurzwelliger als 912 \AA sein. Beim entgegengesetzten Prozeß, der Rekombination, gelangt das Elektron in der Regel zunächst auf ein oberes Niveau des Wasserstoffatoms und fällt von dort stufenweise bis zum Grundniveau herunter. Dabei werden z. B. die Balmer-Linien, das Balmer-Kontinuum und die Linien hoher Anregungsstufen (s. 1.2.2. Fall 3) erzeugt.

1.3.2. Verbotene Linien

Diese Linien treten unter irdischen Laborbedingungen nicht auf. Selbst im Hochvakuum ist die Gasdichte noch zu groß, so daß die Elektronen durch Stöße an der Emission dieser Linien behindert werden. Lediglich bei den viel geringeren Dichten im interstellaren Raum kommt es zu dem sehr unwahrscheinlichen Übergang und damit zur Emission der verbotenen Linien.

1.3.3. Physikalischer Zustand der Nebelmaterie

Das Nebelgas ist nahezu vollständig ionisiert. Da die Nebelmaterie im Gegensatz zur stellaren sehr weit vom Zustand des thermodynamischen Gleichgewichts entfernt ist, werden die Ionisationsverhältnisse von der modifizierten Saha-Gleichung beschrieben. Mit Hilfe dieser Gleichung können Modelle von Emissionsnebeln, die sogenannten Strömgren-Sphären (H II-Gebiete) berechnet werden, die die Erklärung dafür bieten, warum nur um sehr heiße Sterne Emissionsnebel beobachtet werden. Außerhalb der H II-Gebiete befindet sich der Wasserstoff im neutralen Zustand (H I-Gebiete).

1.4. 21-cm-Strahlung des interstellaren Wasserstoffs

Der Hauptanteil des interstellaren Wasserstoffes befindet sich in neutralem Zustand (H I-Gebiet) und liegt in atomarer Form vor. Er kann nur über die 21-cm-Emission erforscht werden. Die 21-cm-Linie entsteht, weil der Grundzustand des Wasserstoffatoms in zwei eng benachbarte Hyperfeinstruktur-Niveaus aufgespalten ist (Spin des Atomkerns kann sich parallel oder antiparallel zum Spin der Hülle einstellen). Die Anregung der 21-cm-Linie erfolgt durch Stöße der Atome im H I-Gebiet (Temperatur 100 K).

Da die Galaxis für die 21-cm-Strahlung weitgehend durchlässig ist, kann mit ihrer Hilfe die großräumige Verteilung des interstellaren Gases erforscht werden (Spiralstruktur!).

Dr. J. DORSCHNER

Interstellare Materie (II)

2. Interstellarer Staub

2.1. Erscheinungsformen

2.1.1. Nebelfreie Zone

Der in einer dünnen Schicht in der galaktischen Ebene angeordnete Staub verhindert den Blick nach außen. Daher fehlen in einer schmalen Zone beiderseits des galaktischen Äquators die extragalaktischen Nebel.

2.1.2. Dunkelwolken

Durch Staubwolken vorgetäuschte Sternleere am Himmel. Entfernung, Tiefenerstreckung und Extinktionsbetrag einer Wolke können mit Hilfe der Wolfschen Kurven ungefähr ermittelt werden.

2.1.3. Verfärbungsgesetz

Die vom interstellaren Staub herrührende Lichtschwächung ist wellenlängenabhängig (selektive Extinktion). Dadurch wird das Licht hinter einer Staubansammlung stehender Sterne nicht nur geschwächt, sondern auch verfärbt. Diese Sterne erscheinen dann röter als ihnen auf Grund ihres Spektraltyps zukommt. Die Wellenlängenabhängigkeit des Extinktionsbetrages (in Größenklassen) heißt Verfärbungsgesetz. Im Visuellen geht der Extinktionsbetrag ungefähr proportional $1/\lambda$ (λ^{-1} -Gesetz). Extraterrestrische Messungen zeigen, daß der Extinktionsbetrag im Ultravioletten mit kleiner werdender Wellenlänge weiter kontinuierlich ansteigt.

2.1.4. Interstellare Polarisation

Das Licht verfärbter Sterne ist häufig schwach linear polarisiert. Die Polarisation wird durch im galaktischen Magnetfeld geeignet orientierte längliche Staubteilchen bewirkt.

2.1.5. Reflexionsnebel und diffuses Milchstraßenlicht

Staubansammlungen streuen öfters das Licht von in unmittelbarer Nähe befindlichen Sternen und werden dadurch als Reflexionsnebel sichtbar (z. B. Plejaden-Nebel). Insgesamt zeigt die Milchstraße eine schwache Aufhellung, die von der an den Staubteilchen gestreuten Sternstrahlung herrührt.

2.1.6. Diffuse Linien und Banden

Wahrscheinlich werden einige der in den Spektren stark verfärbter Sterne auftretenden diffusen Linien und Banden (z. B. die Bande bei 4430 Å) vom interstellaren Staub verursacht.

2.

Physik des interstellaren Staubes

Im Gegensatz zum Gas gibt es auf dem Gebiet des interstellaren Staubes noch keine geschlossene Theorie. Es gibt nur eine Reihe physikalischer Hypothesen in Form verschiedener Staubmodelle, die sich mit der Entstehung von Staubteilchen in den interstellaren Gaswolken und in den Atmosphären kühler Sterne, ihrer chemischen Zusammensetzung, ihrem physikalischen Verhalten usw. beschäftigen. Keines dieser Staubmodelle kann alle Beobachtungsbefunde widerspruchsfrei erklären.

Stellung der interstellaren Materie im Milchstraßensystem

Gas und Staub sind auf eine dünne Schicht in der galaktischen Ebene konzentriert (effektive Dicke 250 pc). Die mittlere Gasdichte in dieser Schicht beträgt 10^{-24} g/cm³, die mittlere Staubdichte 10^{-27} bis 10^{-26} g/cm³.

Die interstellare Materie gehört zur extremen Population I, insbesondere der Staub scheint ein Reservoir für schwere Elemente zu sein. Zwischen stellarer und interstellarer Materie bestehen kosmogonische Zusammenhänge. Die interstellare Materie ist das Baumaterial für heute entstehende Sterne und nimmt andererseits den Müll der Sternenentwicklung (Supernova-Explosionen) auf.

Gas und Staub sind in den Spiralarmen der Galaxis konzentriert. Sie weisen eine Wolkenstruktur auf, wobei die einzelnen Wolken als selbständige Gebilde aufgefaßt werden können. Die Wolkendurchmesser liegen im Mittel bei etwa 5 bis 10 pc. In den Wolken beträgt die Gasdichte ungefähr 10^{-23} g/cm³. Die Wolken bewegen sich relativ zueinander mit Geschwindigkeiten, die von gleicher Größe wie die Pekuliargeschwindigkeiten der Population I-Sterne sind. Dadurch beträgt die Lebenszeit einer Wolke etwa 10^7 Jahre, bevor sie mit einer anderen zusammenstößt und dabei ihre Selbständigkeit verliert.

Dr. J. DORSCHNER

Kleinkörper im Sonnensystem (I)

0. Definition: Zu den Kleinkörpern des Sonnensystems zählt man alle Körper mit Durchmessern < 1000 km, ausgenommen die Kleinmonde und die Elementarteilchen. Man unterscheidet 4 Gruppen: 1. Planetoiden, 2. Kometenkerne, 3. Meteorite, 4. Staubpartikel. Zwischen den Mitgliedern dieser Gruppen bestehen innere Zusammenhänge.

1. System der Planetoiden:

1.1. Räumliche Anordnung: Planetoiden (Kleine Planeten, auch Asteroiden) befinden sich überwiegend im Raum zwischen der Mars- und Jupiterbahn. Einige Mitglieder überschreiten den angegebenen Bereich nach innen und außen: EROS, AMOR, HERMES, IKARUS, HIDALGO. Bahnen mit großen Neigungswinkeln sind selten. Das System bildet etwa einen Ring mit elliptischem Querschnitt. Die Verteilung der mittleren Abstände von der Sonne zeigt Häufungsstellen und ausgeprägte Lücken, die man auf den Einfluß der Anziehungskraft von Mars und vor allem Jupiter zurückführt.

1.2. Anzahl, Größe und Helligkeit: Bisher sind etwa 4050 Planetoiden entdeckt, davon jedoch nur 1779 Bahnen bis 1971 bekannt. Für die übrigen Objekte liegen keine genauen Angaben vor. Die Gesamtzahl hängt von der angenommenen Grenzhelligkeit ab. Beobachtbar sind Planetoiden bis etwa zur mittleren Oppositionshelligkeit $m = 20^m$. Für Vergleichszwecke braucht man eine absolute Helligkeit $g = m - 5 \lg a (a-1)$; a = große Halbachse der Bahn in astr. Einheiten (AE). Die Gesamtzahl der Planetoiden nimmt von $g = 10^m$ nach der Formel $\lg N = -2.63 + 0.486g$ zu. Bis zur beobachtbaren Grenzhelligkeit $g = 16^m$ gibt es danach etwa 140 000 Planetoiden. Die kleinsten dieser Körper haben nach der Beziehung $\lg D = 3.57 - 0.2g$ einen mittleren Durchmesser von etwa 2 km. Die Anzahl der noch kleineren Körper ist viel größer und geht bei einem Durchmesser von 1 m über die Billion. Mikrometrische Durchmesserbestimmungen konnten nur bei den größten Planetoiden gemacht werden. Man fand bei CERES 770 km, PALLAS 490, JUNO 200, VESTA 390.

1.3. Massen der Planetoiden: Bisher konnte nur die Masse von Vesta aus der Störung der Bahn des Planetoiden ARETE berechnet werden. $M_V = 2,4 \times 10^{23}$ g. Die Dichte ist danach etwa 8 g/cm^3 (Eisen). Die mittlere Dichte für alle Planetoiden dürfte bei 4 g/cm^3 liegen. Danach hat man für die mittlere Masse eines Planetoiden die Formel $\lg M = 23,03 - 0,6g$ kg. Die danach berechnete Gesamtmasse aller Planetoiden ergibt etwa 5×10^{21} kg. Aus störungstheoretischen Betrachtungen folgt eine obere Grenze von weniger als 4×10^{24} kg.

2. System der Kometenkerne

2.1. Räumliche Struktur und Anzahl: Das System dieser Weltkörper erfüllt die Gravisphäre der Sonne im Milchstraßensystem, ein Volumen also, das mit einem Halbmesser von 150 000 AE rund das 50milliardenfache des von den bekannten Planeten erfüllten Raumes ausmacht. In dieser Raumkugel befinden sich etwa 10^{11} Kometenkerne, die sich in allen möglichen Richtungen und mit Perioden von 2000 bis 60 Millionen Jahren um die Sonne bewegen. Durch gegenseitige Störungen gelangen laufend Kometenkerne auf Bahnen, die in die innersten Bezirke des Sonnensystems führen. Dadurch befinden sich ständig etwa 14000 Kometenkerne in einer Raumkugel mit 40 AE Radius. Die Gesamtzahl der Kometenkerne, die im gleichen Raum ihr Perihel haben, wird auf 10^6 geschätzt.

	Stein	Steineisen	Eisen	Mittel	Erde
O	41,5	18,6	—	37,5	28,6
Mg	15,9	12,3	0,03	14,7	11,0
Si	20,8	8,1	—	18,8	14,5
Fe	15,8	55,3	90,5	22,9	37,0
Ni	—	5,4	8,5	1,0	3,0

Die Massenverteilung auf die drei Hauptklassen:

Klasse	Bezeichnung	Massenprozent
I	Stein	88,2
II	Steineisen	5,5
III	Eisen	6,3

4. Interplanetarer Staub

4.1. Erscheinungsformen: Die bekannteste Form, in der uns der interplanetare Staub entgegentritt, ist das Zodiakallicht. Die im Bereich des Systems der Planetoiden durch Zusammenstöße laufend gebildeten Partikel mit Durchmessern von 10^{-3} bis 10^{-5} cm werden durch den Poynting-Robertson-Effekt auf Spiralbahnen zur Sonne befördert und erfüllen den ganzen Innenraum des Sonnensystems. Die winzigen Teilchen streuen das Sonnenlicht und erzeugen so das Zodiakallicht. Die Dichte dieser interplanetaren Staubwolke nimmt von außen nach innen zu und beträgt in der Nähe der Erde etwa 3×10^{-20} g/cm³. Die Planeten fangen ständig Staubmassen auf. Bei der Erde ergibt sich die Falldichte zu 10^{-12} g/cm²s, so daß auf der ganzen Erde je Sekunde rund 5 Tonnen Staub aus dem Weltraum niederfallen.

Eine durch den kosmischen Staub hervorgerufene Erscheinung sind auch die sogenannten „Leuchtenden Nachtwolken“ (LNW). In den Sommermonaten, wenn in der Erdatmosphäre im Bereich der geographischen Breite von 50 bis 75° in 75 bis 85 km Höhe die meteorologischen Bedingungen einen Aufstau der einfallenden Staubpartikel bewirken, treten die LNW auf.

Literatur: A. WEIGERT/H. ZIMMERMANN: **Brockhaus ABC der Astronomie.** VEB Brockhaus Verlag, Leipzig 1971.

Prof. Dr. JOHANNES HOPPE

Kosmologische Modelle (I)

I. Grundlagen

Die wichtigsten kosmologischen Modelle basieren auf vier Voraussetzungen:

1. Alle auf der Erde gefundenen physikalischen Gesetzmäßigkeiten gelten in jedem Punkt des Raum-Zeit-Kontinuums.
2. Die Gravitationstheorie EINSTEINS ist die beste derzeitige Gravitationstheorie.
3. Die Geometrie und die Materieverteilung im Weltall ist im Großen homogen und isotrop (**Kosmologisches Prinzip**).
4. Das Weltall dehnt sich aus (**HUBBLE-Effekt**).

Aus dem kosmologischen Prinzip folgt einmal die Existenz einer universellen kosmischen Zeit (**Weltzeit**) und damit die Existenz eines Bezugssystems, in dem die Materie (bei Vernachlässigung der Pekuliarbewegung von Einzelobjekten) ruht (**Universelles Ruhssystem**). Zum anderen folgt die Möglichkeit der Beschreibung von kosmischer Materie (des **Weltsubstrats**) durch mittlere Dichten und Drücke. Voraussetzung 4 beruht auf der von E. HUBBLE 1929 gefundenen Tatsache, daß die Spektren der entfernten Galaxien eine **Rotverschiebung** aufweisen und diese linear mit der Entfernung zunimmt. Eine sinnvolle Kosmologie muß die Rotverschiebung in Zusammenhang mit 1 und 3 als **Dopplereffekt**, verursacht durch die Ausdehnung des Weltalls, deuten. Ein statischer Kosmos ist somit ausgeschlossen.

II. ROBERTSON-WALKER-Modelle

Die Raum-Zeit-Metrik eines Kosmos, die der 3. Voraussetzung in notwendiger und hinreichender Weise genügt, ist durch den raum-zeitlichen Abstand (**ROBERTSON-WALKER-Form**)

$$ds^2 = c^2 dt^2 - R(t) \frac{dx^2 + dy^2 + dz^2}{1 + \frac{k}{4}(x^2 + y^2 + z^2)}$$

gegeben, wobei x, y, z die räumlichen Koordinaten, R den Krümmungsradius, c die Lichtgeschwindigkeit, t die Weltzeit und $k = +1, 0, -1$ den Krümmungsindex bedeuten. Die einzelnen Werte des Krümmungsindex korrespondieren für eine bestimmte Weltzeit $t = t_0$ mit den dreidimensionalen sphärisch gekrümmten Räumen für $k = 1$, den dreidimensionalen hyperbolisch gekrümmten Räumen für $k = -1$ und den dreidimensionalen flachen Räumen für $k = 0$. Die **GAUSSsche Krümmung** des Raumes zu einer Zeit t ist durch $K(t) = k/R^2(t)$ gegeben. Aus dem Linienelement folgt ein allgemeiner Ausdruck für die Rotverschiebung, der sich in der ersten Näherung auf die erwähnte Proportionalität zwischen Rotverschiebung und Entfernung reduziert. Der Proportionalitätsfaktor ist die **HUBBLE-Zahl H**. Damit ist die 4. Voraussetzung erfüllt.

Die EINSTEINSchen Gleichungen (2. Voraussetzung) liefern für den Krümmungsradius $R = R(t)$, für den Druck $p = p(t)$ und die Dichte $\varrho = \varrho(t)$ des Weltsubstrats zwei Differentialgleichungen für die weltzeitliche Entwicklung dieser Größen. Um eine determinierte Zeitentwicklung zu erhalten, muß eine **Zustandsgleichung** des Weltsubstrats (1. Voraussetzung) vorgeschrieben werden. Bei festgelegter Zustandsgleichung erhält man für $k = 0$ eine einparametrische und für $k = \pm 1$ je eine zweiparametrische Lösungsschar. Das Weltmodell und das jetzige **Weltalter** t_0 werden also durch drei Parameter festgelegt. Geeignet sind die **HUBBLE-Zahl** $H_0 = (R/R)_0$, der **Verzögerungsparameter** $q_0 = -(\ddot{R}/\dot{R}^2)_0$ und die **Massendichte** ϱ_0 . Der Index 0 kennzeichnet das jetzige Weltalter; Punkte kennzeichnen die Ableitungen nach der Weltzeit. Die Gesamtheit der so erhaltenen Weltmodelle bezeichnet man als die **ROBERTSON-WALKER-Modelle**. Die empirisch ermittelbaren Werte von H_0 , q_0 , ϱ_0 streuen jedoch derart, daß aus ihnen nicht eindeutig auf ein bestimmtes Weltmodell geschlossen werden kann. Die EINSTEINSchen Gleichungen mit **kosmologischem Glied** Λ für die ROBERTSON-WALKER-Form liefern für die derzeitige Epoche $t = t_0$ folgende Beziehungen zwischen den angegebenen Größen (G ist die NEWTONsche Gravitationskonstante):

$$q_0 H_0^2 = \frac{4\pi}{3} G (\varrho_0 + 3 \frac{p_0}{c^2}) - \frac{1}{3} \Lambda c^2 \quad (1)$$

$$H_0^2 (2 q_0 - 1) = \frac{k c^2}{R_0^2} + \frac{8 \pi G}{c^2} p_0 - \Lambda c^2 \quad (2)$$

Spezielle kosmologische Modelle werden aus den obigen Gleichungen durch Angabe einer speziellen Zustandsgleichung erhalten. Die wichtigsten Fälle sind die **Staubmodelle** und die **Strahlungskosmen**. Im ersten Fall wird auf Grund der geringen Eigenbewegung der **Galaxien** (geringer kinetischer Druck) und der Kleinheit des intergalaktischen Strahlungs- und Gasdrucks $p = 0$ gesetzt. Im zweiten Fall (für frühe Stadien des Kosmos) wird die Zustandsgleichung $p = \frac{1}{3} \varrho c^2$ angenommen, wo ϱc^2 die Energiedichte der Strahlung bedeutet.

III. Literatur:

1. VOIGT, H.: **Außergalaktische Sternsysteme und Struktur der Welt im Großen**. Akademische Verlagsgesellschaft Geest & Portig, Leipzig 1960
2. SCHMUTZER, E.: **Relativistische Physik**. B. G. Teubner Verlagsgesellschaft, Leipzig 1968
3. TREDER, H.-J.: **Relativität und Kosmos**. Akademie Verlag, Berlin 1970.

Fortsetzung auf Karteikarte „Kosmologische Modelle II“

Dipl.-Phys. ULRICH DYLLONG

Kosmologische Modelle (II)

IV. Spezielle ROBERTSON-WALKER-Modelle

1. **EINSTEIN-Kosmos:** $\Lambda \neq 0, R \dot{=} 0, p = 0, k = +1$

Der EINSTEIN-Kosmos (1917) war der erste Kosmos auf der Basis der Relativitätstheorie. Es handelt sich hierbei um einen statischen und druckfreien Materiekosmos konstanter positiver Krümmung (**EINSTEINsche Zylinderwelt**). Mit $R = \text{konst.}$ gehört er zu den ROBERTSON-WALKER-Typen. Er erklärt nicht die Rotverschiebung und ist außerdem instabil. Aus (1) und (2) folgen die Beziehungen

$$\frac{4\pi G}{3} \rho_0 - \frac{1}{3} \Lambda c^2 = 0$$

$$\frac{c^2}{R_0^2} - \Lambda c^2 = 0$$

$$R_0 = \frac{c}{\sqrt{4\pi G \rho_0}}, \Lambda = \frac{1}{R_0^2}$$

$$\text{Masse: } M = \frac{c^2 \pi R_0}{2G}$$

Für $\rho_0 \sim 10^{-29} \text{ g/cm}^3$ ergeben sich folgende Werte:

$$R_0 \sim 10^{28} \text{ cm} \quad \Lambda \sim 10^{-56} \text{ cm}^{-2}$$

$$M \sim 10^{56} \text{ g}$$

2. **FRIEDMAN-Kosmen:** $\Lambda = 0, p = 0, k = \begin{cases} +1 \\ -1 \end{cases}$

Aus (1) und (2) folgen die Beziehungen

$$q_0 H_0^2 = \frac{4\pi}{3} G \rho_0$$

$$H_0^2 (2q_0 - 1) = \frac{k c^2}{R_0^2}$$

Der Typ des Kosmos wird durch q_0 bestimmt. Für $0 \leq q_0 < \frac{1}{2}$ liegt ein hyperbolisch gekrümmter

Raum vor, für $q_0 > \frac{1}{2}$ ein sphärisch gekrümmter Raum. q_0 selbst wird bei vorgegebenem H_0 durch

die Dichte bestimmt. Die **kritische Dichte** ist durch $\rho_c = 3H_0^2 / 8\pi G$ gegeben. Für $H_0 = 75 \text{ km/s Mpc}$ beträgt sie $1,19 \cdot 10^{-29} \text{ g cm}^{-3}$. Nähere Diskussion zeigt, daß das sphärisch gekrümmte Weltmodell eine Expansions- und eine Kontraktionsphase aufweist; das hyperbolisch gekrümmte Modell besitzt dagegen entweder eine Expansionsphase oder eine Kontraktionsphase. Der zeitliche Verlauf von $R = R(t)$ kann aus den EINSTEINschen Gleichungen gewonnen werden. Für Weltalter, Krümmung und Dichte läßt sich folgende Tabelle angeben:

Karteikarte der Zeitschrift „Astronomie in der Schule“, Fortsetzung Rückseite

Dichte: $\rho_0 = 10^{-28} \text{ g cm}^{-3}$ $\rho_0 = 10^{-29} \text{ g cm}^{-3}$
Weltalter: $t_0 = 4,64 \cdot 10^9 \text{ Jahre}$ $t_0 = 8,6 \cdot 10^9 \text{ Jahre}$

3. **EINSTEIN-DE-SITTER-Kosmos:** $p = 0$, $\Lambda = 0$, $k = 0$

Dieser Kosmos ist der einfachste expandierende FRIEDMAN-Kosmos. Der Wert von H_0 legt alles übrige fest. Es gelten folgende Relationen:

$$q_0 = \frac{1}{2}, \rho \sim R^{-3}, R \sim t^{2/3}, 3 H_0^2 = 8\pi G \rho_0$$

Für das Weltalter ergibt sich $t_0 = \frac{2}{3} H_0$. Mit dem obigen Wert für H_0 beträgt das Weltalter im EINSTEIN-DE-SITTER-Kosmos $8,3 \cdot 10^9$ Jahre.

Die hier angegebenen kosmologischen Modelle sind die einfachsten, die aus den allgemeinen Beziehungen (1) und (2) folgen.

V. Andere kosmologische Modelle

Die wichtigsten kosmologischen Modelle, die nicht auf der EINSTEINschen Gravitationstheorie basieren sind:

1. **Die NEWTONsche Kosmologie.** Grundlage ist hier die NEWTONsche Gravitationstheorie und Mechanik. Von der kinematischen Seite her führt sie größtenteils zu denselben Aussagen wie die relativistische Kosmologie. Schwierigkeiten ergeben sich bei der Verknüpfung von kinematischen mit optischen Aussagen.
2. **Die Steady-State-Theorie von BONDI und HOYLE.** Grundlage dieser Theorie ist die Forderung nach einer konstanten mittleren Dichte im expandierenden Weltmodell. Um sie zu erfüllen, muß eine fortlaufende Entstehung von Materie im Weltall angenommen werden. Mit der Entdeckung der 3-K-Strahlung kann die Steady-State-Theorie als widerlegt angesehen werden.

Neben diesen Theorien hat auch die relativistische Kosmologie in den letzten Jahren eine Weiterentwicklung erfahren. Es wurden hauptsächlich Weltmodelle mit geringerer Symmetrie als die ROBERTSON-WALKER-Modelle konstruiert (Aufgabe des kosmologischen Prinzips), um die zeitliche Entwicklung von Anisotropien zu untersuchen.

Bei allen hier aufgeführten Weltmodellen handelt es sich um physikalische Modelle und die Frage, welches Modell der Wirklichkeit am besten entspricht, ist eine physikalische Frage. Es geht dabei nicht darum, ob die Welt – im philosophischen Sinne – unendlich ist.

Sicher wirft die Diskussion um die Weltmodelle auch philosophische Fragen auf. Diese können nur im Zusammenwirken von Philosophen und Physikern geklärt werden.

Dipl.-Phys. ULRICH DYLLONG

Optische Systeme in Spiegelfernrohren (I)

Bilderklärung

Abb. 1a: Spiegelteleskop, welches im Prinzip dem holländischen Fernrohr ähnelt. Als Okular besitzt es eine Konkavlinse, die sich bei der Fokussierung auf unendlich um den Betrag der Brennweite vor dem Brennpunkt des Hohlspiegels befindet. Den ersten Versuch, an Stelle von Sammellinsen Hohlspiegel zu verwenden, führte 1616 NICOLAUS ZUCCIOUS durch.

Abb. 1b: Der Mathematiker GREGORY konstruierte 1660 ein Spiegelteleskop, in dem das Bild durch einen Fangspiegel noch einmal in der Nähe der Durchbohrung des Hauptspiegels abgebildet wurde. Dort wird es mit einem Linsenokular betrachtet.

Abb. 1c: NEWTON verwendete beim Bau seines ersten Spiegelteleskops (1668) einen parabolischen Hohlspiegel als Objektiv und ein normales Linsenokular. Durch einen kleinen, unter 45° stehenden Planspiegel im vorderen Ende des konvergenten Strahlengangs wird das Bild seitlich aus dem Tubus reflektiert.

Abb. 1d: 1672 konstruierte der Franzose CASSEGRAIN ein Spiegelteleskop, welches ebenfalls einen durchbohrten Spiegel besaß (vgl. Abb. 1b). An Stelle des ellipsoidischen Fangspiegels verwendete er einen gekrümmten Fangspiegel, der sich vor dem Brennpunkt des Hauptspiegels befindet.

Abb. 2a: Der Optiker SCHMIDT konstruierte ein Spiegelteleskop (1930) welches einen kugelförmig geschliffenen Spiegel besitzt. Seine Brennweite ist halb so groß wie sein Krümmungsradius.

Abb. 2b: Die sphärische Aberration korrigierte SCHMIDT mit einer Korrekptionsplatte, die die Lichtstrahlen in der Weise ablenkt, daß sie nach der Reflektion am Kugelspiegel sich in einem Punkt treffen. Der Schmidt-Spiegel ist bis heute die einfachste und leistungsfähigste Form eines Spiegelsystems geblieben. Das größte Schmidt-Teleskop der Erde mit einer freien Öffnung der Korrekptionsplatte von 1340 mm steht seit 1960 in Tautenburg bei Jena.

Abb. 3a: Der sowjetische Optiker MAKSTOW erfand um 1940 den Maksutow-Spiegel. Dieses System hat, wie der Schmidt-Spiegel, einen Kugelspiegel, aber statt der Korrekptionsplatte in der Nähe der Bildfläche eine dicke, zum Spiegel konzentrische Meniskuslinse, die die sphärische Aberration des Spiegels korrigiert.

Abb. 3b: Für visuelle Beobachtungen kann das Meniskusteleskop als Newtonspiegel gebaut werden.

Abb. 3c: Auch für die Bauweise nach CASSEGRAIN ist das Prinzip des Meniskusteleskops geeignet.

Abb. 4: Super-Schmidt-Systeme enthalten eine Kombination von Kugelspiegel, Meniskuslinsen und Korrekptionsplatte. Derartige Spiegel werden für große Gesichtsfelder und Öffnungsverhältnisse konstruiert.

Literatur: RIEKHER, R.: Fernrohre und ihre Meister. VEB Verlag Technik, Berlin 1957.

Optische Systeme in Spiegelfernrohren (II)

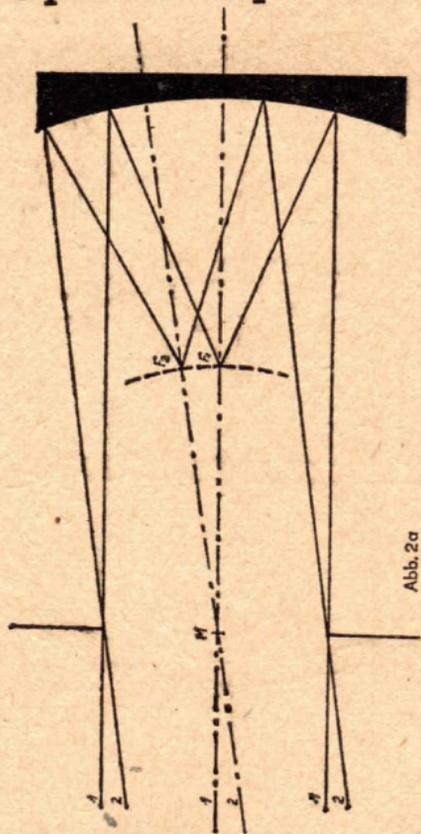


Abb. 2a

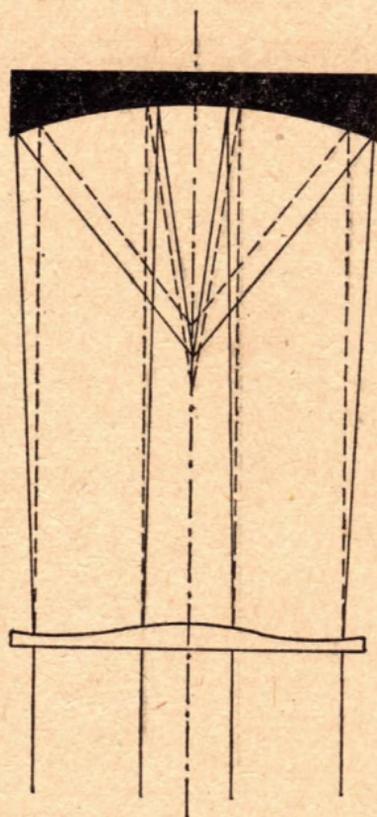


Abb. 2b

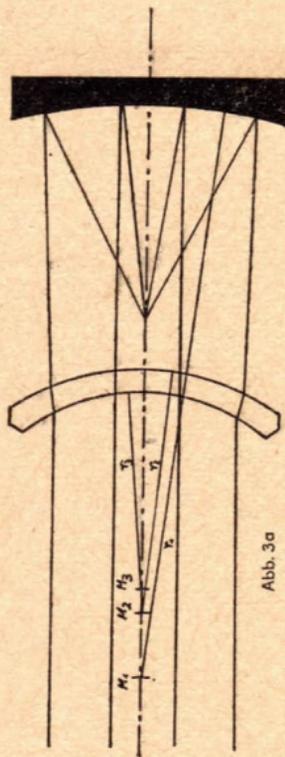


Abb. 3a

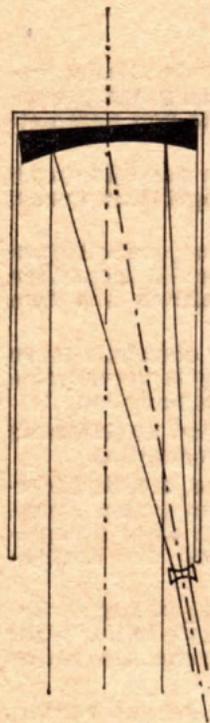


Abb. 1a

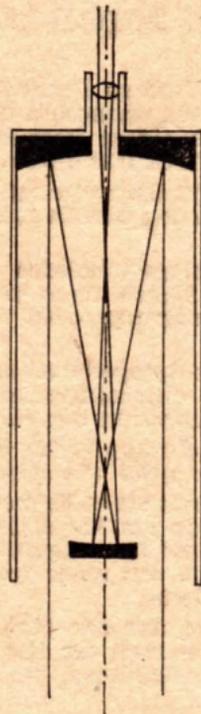


Abb. 1b

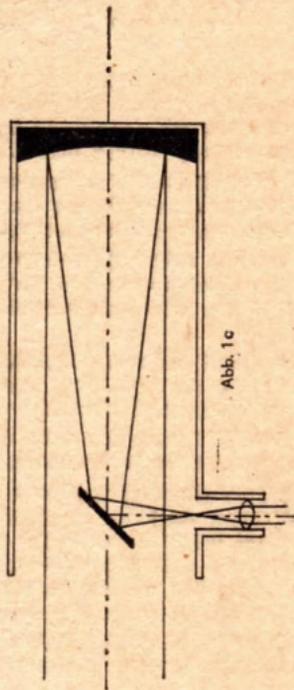


Abb. 1c

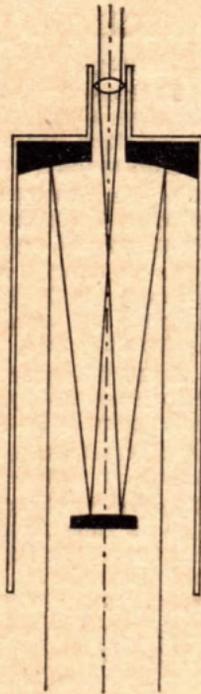


Abb. 1d

Fortsetzung auf Karteikarte „Optische Systeme in Spiegelfernrohren (II)“
WALDEMAR HÖHNE

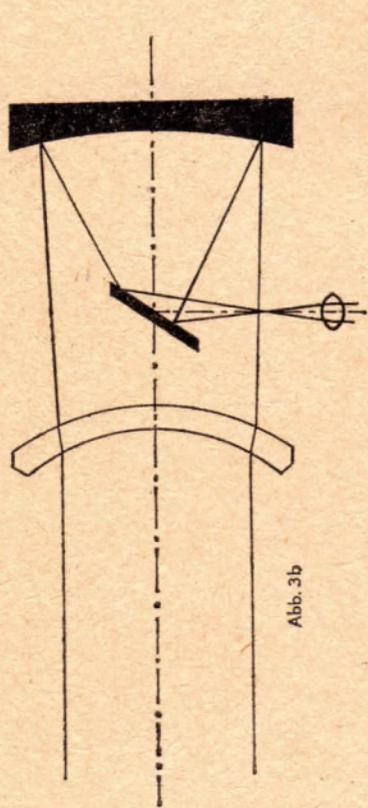


Abb. 3b

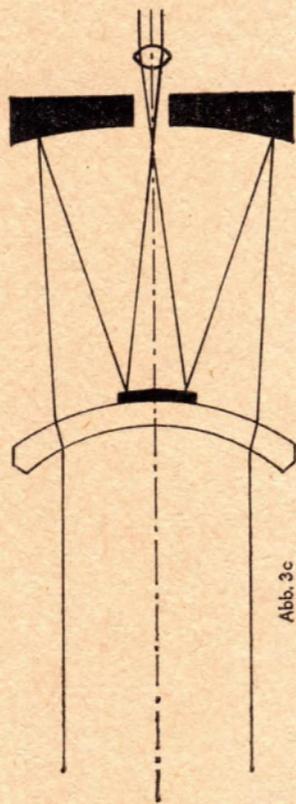


Abb. 3c

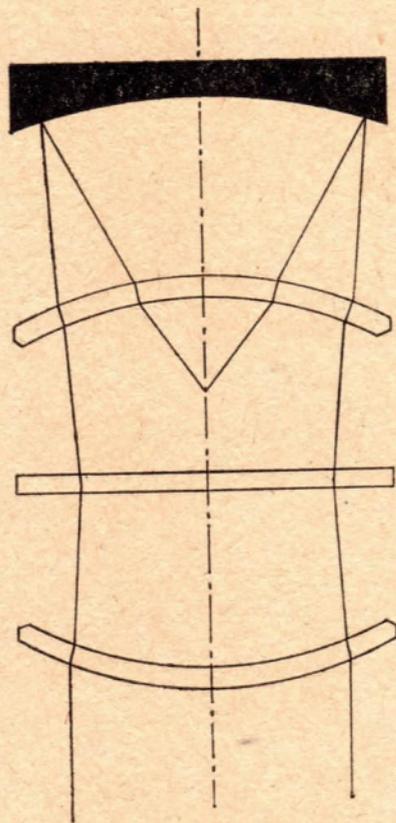


Abb. 4

Spektroskopie (I)

1. Allgemeines

Unter Spektroskopie versteht man die Auflösung der in einen Spektralapparat einfallenden Strahlung in ihre spektralen Anteile. Als Meßgrößen werden dabei die Wellenlängen von spektralen Merkmalen und die Intensitätsverteilung im Spektrum gewonnen. Innerhalb der Astronomie nimmt die Spektroskopie einen wichtigen Platz ein, da sie die einzige Möglichkeit bietet, die stoffliche Beschaffenheit der entfernteren Himmelskörper zu studieren. Außerdem leistet die Spektroskopie eine wesentliche Hilfe bei der Untersuchung der Bewegungsverhältnisse der Himmelskörper im Raum und zum Teil an ihren Oberflächen. Aus historisch verständlichen Gründen waren die ersten Spektralapparate für visuelle Beobachtungen eingerichtet und erhielten die Bezeichnung Spektroskope. Mit der Einführung der Fotografie in die Astronomie wurden auch Spektralapparate konstruiert, die als Strahlungsempfänger Fotoplatten verwenden und Spektrographen genannt werden.

2. Historische Entwicklung

Die Anfänge der Spektroskopie gehen in das Jahr 1666 zurück, in dem NEWTON bei der prismatischen Zerlegung des Sonnenlichtes zu der Erkenntnis kam, daß es aus einer Mischung von verschieden brechbaren Strahlen besteht. Die ersten sieben Linien im Sonnenspektrum entdeckte WOLLASTON 1802, als er Sonnenlicht durch einen Spalt auf ein Prisma fallen ließ. Mit einem wesentlich verbesserten Spektralapparat vermaß FRAUNHOFER in den Jahren 1812–1814 etwa 600 dunkle Linien im Sonnenspektrum. Im Jahre 1823 stellte FRAUNHOFER einige spektroskopische Beobachtungen bei helleren Sternen an und machte auf die Unterschiede zwischen den Sternspektren aufmerksam. Etwa um die gleiche Zeit beschäftigte er sich mit der Herstellung von Beugungsgittern und deren Theorie. Die erste fotografische Aufnahme des Linienspektrums der Sonne von 340 nm bis 770 nm gelang BERQUEL 1842.

Die Begründung der „Chemischen Analyse durch Spektralbeobachtungen“ durch KIRCHHOFF und BUNSEN fiel in das Jahr 1859. Bereits zwei Jahre danach veröffentlichte KIRCHHOFF die erste Analyse des Sonnenspektrums. Etwa von 1860 an wurden durch verschiedene Astronomen Versuche unternommen, für die Sternspektren Klassifikationssysteme aufzustellen. Diese Bemühungen führten 1901 zur Aufstellung der berühmten HARVARD-Klassifikation. An ihrer Vervollkommnung unter teilweise neuen Gesichtspunkten wurde auch später noch weiter gearbeitet.

3. Spektralapparate

3.1. Objektivprismenspektrograph

Der einfachste Spektrograph besteht aus einem Prisma, das vor dem Objektiv einer Astrokamera befestigt ist. Durch das Prisma wird die von den Sternen einfallende Strahlung spektral zerlegt. Die fadenförmigen Spektren können durch eine Bewegung der Sterne senkrecht zur Dispersionsrichtung in gewünschter Weise verbreitert werden.

3.2. Spaltspektrograph

Gegenüber dem Objektivprismenspektrographen ist der Spaltspektrograph komplizierter aufgebaut. Bei ihm befindet sich im Brennpunkt des Teleskops ein Präzisionsspalt, durch den das Licht

des zu untersuchenden Sterns fällt. Es wird durch den Kollimator parallel gemacht und passiert dann das Prisma bzw. mehrere Prismen. Durch eine weitere Linse wird das entstandene Spektrum auf der Photoplatte abgebildet. Beiderseits des Spektrums können Vergleichsspektren aufgenommen werden, die von Lichtquellen im Spektrographen stammen. Da die Wellenlängen der dabei auftretenden Linien bekannt sind, lassen sich die Wellenlängen der Linien in den Spektren der Himmelskörper bestimmen.

Falls in einem Spektrographen mehrere Prismen zur Erreichung einer gewünschten spektralen Auflösung erforderlich sind, macht sich der lange Glasweg nachteilig bemerkbar, da er starke Lichtverluste verursacht. Den ebengenannten Nachteil besitzen die Beugungsgitter nicht. Bei ihnen wird das Licht an regelmäßig angeordneten eng beieinander stehenden Stegen spektral zerlegt. Je nach Güte des Gitters befinden sich 300 bis 700 Linien pro Millimeter auf ihm. Entsprechend den Beugungsgesetzen entstehen bei einem Gitter mehrere Spektren unterschiedlicher Dispersion und Intensität, die sich teilweise überlappen. Daher wird das Sternlicht auf mehrere Spektren verteilt und geschwächt. Gibt man jedoch den eingeritzten Linien ein besonderes geometrisches Profil, dann gelingt es, das meiste Licht in einem Spektrum zu konzentrieren. Gitter mit dieser Eigenschaft werden als Glanz (blaze)-Gitter bezeichnet.

Neben der Fotoplatte zur Aufnahme des Spektrums werden auch lichtelektrische Zellen zur Registrierung der Spektren eingesetzt. Entsprechend den Erfordernissen wurden ebenso Spektrographen zur Untersuchung des infraroten und ultravioletten Spektrums entwickelt. Für die spektrale Untersuchung der Sonne schuf man spezielle Instrumente. Auf radioastronomischem Gebiet werden mit Hilfe der Hochfrequenztechnik in schmalen Wellenlängenbereichen spektrale Untersuchungen angestellt.

4. Anwendungsgebiete der Spektroskopie

4.1. Quantitative Spektralanalyse

Wie bereits KIRCHHOFF und BUNSEN zeigten, ermöglicht die Untersuchung der Spektren der Himmelskörper Rückschlüsse auf deren stoffliche Zusammensetzung. Bei der quantitativen Spektralanalyse kann aus den Linienstärken in den Spektren die Anzahl der absorbierenden bzw. emittierenden Atome berechnet werden, wenn auch Druck und Temperatur bestimmbar sind.

4.2. Verschiebung der Linien, Untersuchung von Linienprofilen

Unter Ausnutzung des Dopplereffektes wird aus den vorhandenen Linienverschiebungen die Radialgeschwindigkeit der Himmelskörper bestimmt.

Im Fall der Sonne können eingehend Bewegungsvorgänge auf ihrer Oberfläche, wie z. B. Strömungen in der Nähe von Sonnenflecken, aktive Protuberanzen studiert werden. Die Untersuchung der Linienprofile in den stellaren Linien ermöglichen, für den Fall, daß wir ziemlich senkrecht auf die Rotationsachsen der Sterne blicken, eine Bestimmung ihrer Rotationsgeschwindigkeit. Ist dagegen die Rotationsachse auf uns gerichtet, dann läßt sich unter Umständen die Stärke des stellaren Magnetfeldes aus der ZEEMAN-Aufspaltung der Linien ableiten. Auch expandierende Gas-hüllen, die von Novae oder Supernovae abgestoßen werden, und Gasströme zwischen den Komponenten enger Doppelsternsysteme verraten sich in den Sternspektren.

Die Untersuchungen der inneren Bewegungen von Gasnebeln und Sternsystemen sowie die Flucht-bewegung der Sternsysteme gehören ebenfalls zu den wesentlichen Aufgaben der Spektroskopie.

Dr. CHRISTIAN FRIEDEMANN

Sternaufbau (I)

1. Allgemeines

1.1. **Literatur:** WEIGERT, ZIMMERMANN: **ABC der Astronomie**. 3. Aufl. Leipzig 1971. Stichwörter: **Sternaufbau, Energieerzeugung der Sterne, Zustandsgleichung, Sternentwicklung** und alle dabei gegebenen Verweise.

1.2. **Definitionen:** Sternatmosphäre = der Teil eines Sterns, von dem Licht direkt in den Raum ausgestrahlt wird (mit herkömmlichen Mitteln direkt beobachtbar). Sterninneres = der Teil eines Sterns, der mit herkömmlichen Mitteln nicht direkt beobachtbar ist; nur theoretische Überlegungen und Rechnungen geben Aufschluß über die physikalischen und chemischen Verhältnisse. Die Theorie des Sternaufbaus befaßt sich nur mit dem Sterninneren. Es enthält fast die gesamte im Stern vereinigte Masse und umfaßt den weitaus größten Teil des Gesamtvolumens des Sterns.

1.3. Sterne sind kugelförmig. Ausnahmen nur bei schneller Rotation, bei starken Magnetfeldern oder bei nahen Begleitern.

2. Mechanisches Gleichgewicht

Die beobachtbaren Zustandsgrößen (z. B. Leuchtkraft, effektive Temperatur) eines Sterns (bei physischen Veränderlichen die Mittelwerte dieser Größen) ändern sich nur in sehr langen Zeiträumen. Ausnahmen bilden die relativ sehr seltenen Novae und Supernovae sowie gerade entstehende und Sterne in gewissen kurzen Abschnitten ihrer Entwicklung. Folgerung: der innere Aufbau ändert sich auch nur langsam, so daß sich im Stern überall mechanisches Gleichgewicht einstellt, d. h. an jeder Stelle ist der nach außen wirkende Druck gleich dem Gewicht der über der Stelle befindlichen Sternmaterie. (Bei Verletzung des Gleichgewichts würde eine **schnelle Expansion** oder Kontraktion erfolgen.) Der nach außen wirkende Druck setzt sich aus Gas- und Strahlungsdruck zusammen; bis auf massereiche Sterne ist der Strahlungsdruck unbedeutend.

3. Zustandsgleichung

3.1. Im Sterninneren ist die Materie im allgemeinen gasförmig. Zur Beschreibung des Zusammenhangs zwischen Druck, Temperatur und Dichte kann die ideale Gasgleichung benutzt werden: der Druck ist dem Produkt aus Dichte und Temperatur proportional.

3.2. Im Innern von Weißen Zwergen und im Zentralgebiet einzelner Riesensterne ist die Materie so dicht, daß die Elektronen nicht der idealen Gasgleichung gehorchen. Sie sind entartet. Der Druck hängt (bei vollständiger Entartung) nur von der Dichte, nicht von der Temperatur ab.

3.3. In Weißen Zwergen sehr niedriger Temperatur kann es zur Verflüssigung und zur Gitterbildung (Verfestigung) der Materie kommen. Die Beziehungen zwischen Druck, Dichte und Temperatur sind dann sehr kompliziert.

4. Energiebilanz

Die von einem Stern ausgestrahlte Energie stammt aus dem Vorrat von Kernenergie, potentieller Energie (Gravitationsenergie) und Wärmeenergie.

4.1. Kernenergie. Aus leichten Atomkernen werden schwerere gebildet. Da Atomkerne positive elektrische Ladungen tragen, sich also gegenseitig abstoßen, finden Kernprozesse nur bei hohen Temperaturen (hohe kinetische Energie der Reaktionspartner) statt. Je höher die Kernladungen, um so höher müssen die Temperaturen sein. Die höchsten Temperaturen sind im Sterninnern nahe dem Zentrum, die Kernenergiequellen daher im allgemeinen dort konzentriert. Die Ergiebigkeit hängt von Dichte, Temperatur und chemischer Zusammensetzung ab. Ist eine Kernsorte durch die Bildung schwererer Kerne im Sternzentrum verbraucht, können die Kernprozesse in einer Kugelschale um das Zentrum herum stattfinden.

4.1.1. Wasserstoffprozesse. Pro Gramm Reaktionsmaterial wird bei den Wasserstoffprozessen die meiste Energie frei. Über Zwischenstufen wird im Endeffekt aus vier Wasserstoffkernen ein Heliumkern aufgebaut. Die H-H-Reaktion läuft bei mindestens 10 bis $12 \cdot 10^6$ K, der C-N-O-Zyklus bei mindestens $16 \cdot 10^6$ K ab.

4.1.2. Heliumprozesse. Aus Heliumkernen werden Kohlenstoff-, Sauerstoff-, Neon- und noch schwerere Kerne bis Kalzium gebildet. Mindesttemperatur $100 \cdot 10^6$ K.

4.1.3. Ist alles Helium in den zentrumsnahen Gebieten verbraucht, können auch Kohlenstoff- bzw. Sauerstoffkerne miteinander reagieren.

4.2. Gravitationsenergie wird durch Kontraktion der Sternmaterie frei. Sie spielt vor dem Beginn der Wasserstoffprozesse und jeweils zwischen dem Erschöpfen einer Kernenergiequelle und dem Einsetzen einer neuen Kernreaktion eine Rolle. Die freigesetzte Energie wird teils ausgestrahlt, teils dient sie der Temperatursteigerung.

4.3. Wärmeenergie. Bei Abkühlung nimmt die gespeicherte Wärmeenergie ab; sie wird in Strahlung umgesetzt und vom Stern abgestrahlt. Weiße Zwerge decken so ihre Energieausstrahlung.

Dr. habil. H. ZIMMERMANN

Fortsetzung 6/72 auf Kartelkarte „Sternaufbau“ (II)

Sternhaufen (I)

1. Allgemeines

1.1. Definition

Sternhaufen sind Ansammlungen von physisch zusammengehörigen Sternen im Milchstraßensystem (oder in extragalaktischen Sternsystemen). Im allgemeinen Sternfeld fallen die Haufen durch die erheblich höhere Sterndichte auf. Die Mitglieder eines Haufens zeigen einheitliches Bewegungsverhalten, sind gleichen Ursprungs und haben damit das gleiche Alter. Der Zusammenhalt des Haufens erfolgt durch die von allen Mitgliedern ausgehende Schwerkraft.

1.2. Benennung

Die häufigsten und seit dem Altertum bekannten Sternhaufen tragen spezielle Namen (Plejaden, Hyaden, Praesepe). Später entdeckte werden gewöhnlich mit der Nummer bezeichnet, die sie im Katalog von Messier (M + Nummer), in Dreyers New General Catalogue of Nebulae and Clusters of Stars (NGC + Nummer) und den beiden ergänzenden Indexkatalogen (IC + Nummer) besitzen. Neuerdings aufgefundene Haufen erhalten die Nummer im Katalog ihres Entdeckers (Abkürzung des Namens des Entdeckers + Nummer).

1.3. Klassifikation

Es gibt drei Arten von Sternhaufen: Offene Sternhaufen, Kugelsternhaufen und Bewegungshaufen. Sie unterscheiden sich durch ihr Erscheinungsbild am Himmel, durch Sternreichtum und -konzentration zum Zentrum, durch die Verteilung im Milchstraßensystem, die Sternpopulation und die Beschaffenheit des Farben-Helligkeits-Diagramms.

1.4. Anzahlen

Bisher wurden 1039 offene, 125 Kugelsternhaufen und 16 Bewegungshaufen entdeckt.

2. Offene (früher auch galaktische) Sternhaufen

2.1. Definition

Offene Sternhaufen sind unregelmäßig begrenzte Sternhaufen, zu denen einige Dutzend bis zu einigen 10 000 Sternen gehören, die eine mäßige Konzentration zum Haufenzentrum erkennen lassen.

2.2. Räumliche Verteilung

Die offenen Sternhaufen sind Mitglieder des Milchstraßensystems und zeigen eine auffällig starke Konzentration zur galaktischen Ebene. Diejenigen offenen Sternhaufen, die heiße Hauptreihensterne enthalten, befinden sich bevorzugt innerhalb von Spiralarmen und werden daher zum Nachweis der Spiralstruktur in der Sonnenumgebung benutzt. Die Gesamtzahl der offenen Sternhaufen im Milchstraßensystem wird auf mehr als 10 000 geschätzt.

2.3. Physikalische Eigenschaften

2.3.1. Durchmesser

Die linearen Durchmesser der offenen Sternhaufen liegen im Bereich zwischen 1 und 10 pc; die meisten offenen Sternhaufen haben einen Durchmesser zwischen 3 und 5 pc.

2.3.2. Massen

Die Massen der meisten offenen Sternhaufen liegen zwischen 250 und 3000 Sonnenmassen.

2.3.3. Sterndichte und Haufenauflösung

Während sich in der Sonnenumgebung etwa 0.1 Sterne pro pc^3 befinden, treten in offenen Sternhaufen Dichten im Bereich zwischen 0.25 und 80 pro pc^3 auf. Haufen mit Massendichten unterhalb 0.1 Sonnenmassen pro pc^3 sind instabil und lösen sich unter der Einwirkung des allgemeinen Schwerefeldes des Milchstraßensystems auf. Die Haufenmitglieder werden somit zu Feldsternen. Auch innerhalb dichter offener Sternhaufen treten Auflösungserscheinungen auf. Durch Begegnungen untereinander können Haufenmitglieder die zum Verlassen des Haufens notwendige Fluchtgeschwindigkeit erreichen und zu Feldsternen werden. Die meisten offenen Sternhaufen haben danach eine Lebensdauer von einigen 10^8 bis 10^{10} Jahren.

2.3.4. Farben-Helligkeits-Diagramm

Wenn die Störung durch bei der Photometrie irrümlich miterfaßte Vorder- und Hintergrundsterne nicht zu stark ist, zeigen die FHD der offenen Sternhaufen eine deutlich ausgebildete Hauptreihe und einen (meist weniger markanten) Riesenast. Die Hauptreihe besitzt bei den einzelnen Haufen unterschiedliche Länge. Im Gegensatz zur Hauptreihe im HRD fehlen in den FHD oft die massereichen und heißen Hauptreihensterne. Es handelt sich dabei um einen kosmogonischen Effekt: Die Sterne eines offenen Sternhaufens sind etwa gleichzeitig entstanden. Die einzelnen Haufenmitglieder entwickeln sich aber (d. h. verbrauchen ihren Vorrat an Kernbrennstoff) um so schneller, je größer ihre Masse (und damit ihre Leuchtkraft und Oberflächentemperatur) ist. Die Hauptreihe wird daher nach und nach von oben nach unten (in Richtung abnehmender Leuchtkraft und Oberflächentemperatur) entvölkert. Die Sterne wandern zunächst in das Riesengebiet ab und werden dann wahrscheinlich, nach Verbrauch ihrer Reserven an Kernbrennstoff, zu leuchtschwachen Endprodukten der Sternentwicklung (Weißen Zwergen, Neutronensternen). Während ein Haufen mit einem Alter von einigen 10^6 Jahren noch die gesamte Hauptreihe bis zu den O-Sternen zeigt, fehlen bei einem solchen vom Alter der Sonne bereits die O-, B-, A- und F-Sterne. Aus dem oberen Endpunkt der Hauptreihe eines Sternhaufens läßt sich unter Benutzung der Ergebnisse der Theorie der Sternentwicklung das Alter des Haufens bestimmen.

Sternhaufen (II)

3. Kugelsternhaufen

3.1. Definition

Kugelsternhaufen sind auffallend radialsymmetrisch aufgebaute Sternhaufen mit Mitgliederzahlen in der Größenordnung von 10^4 bis 10^7 , die eine starke Konzentration zum Zentrum erkennen lassen.

3.2. Räumliche Verteilung

Die Kugelsternhaufen bilden ein die Scheibe des Milchstraßensystems einhüllendes, nur wenig abgeplattetes System, den galaktischen Halo. Die Gesamtzahl der Kugelsternhaufen im Milchstraßensystem schätzt man auf 200 bis 300. Auch in extragalaktischen Sternsystemen wurden Kugelsternhaufen nachgewiesen.

3.3. Physikalische Eigenschaften

3.3.1. Durchmesser

Die linearen Durchmesser der Kugelsternhaufen streuen zwischen 16 und 190 pc; die meisten liegen im Bereich von 20 bis 30 pc.

3.3.2. Massen

Entsprechend den Mitgliederzahlen werden die Massen der Kugelsternhaufen auf 10^4 bis 10^6 Sonnenmassen geschätzt.

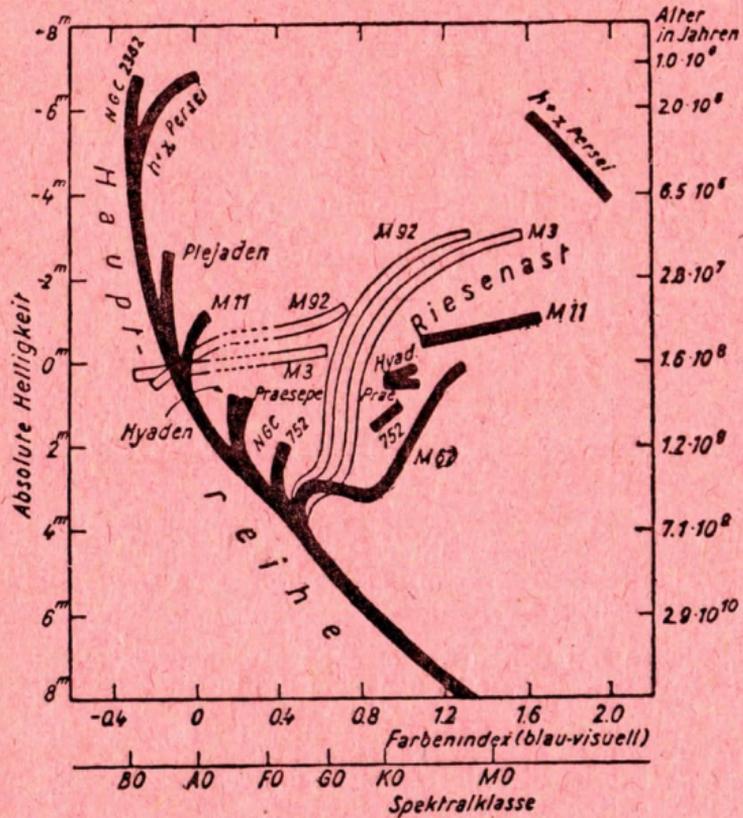
3.3.3. Sterndichte und Haufenauflösung

In einem durchschnittlichen Kugelsternhaufen beträgt die Sterndichte größenordnungsmäßig 10^2 bis 10^3 pc⁻³. Die Kugelsternhaufen sind im Milchstraßenschwerefeld stabil. Infolge ihres Sternreichtums können sie sich eine relativ große Rate an entweichenden Sternen leisten, ohne sich während des Alters des Milchstraßensystems vollständig aufzulösen.

3.3.4. Farben-Helligkeits-Diagramm (s. Abb. Rückseite)

Die FHD der Kugelsternhaufen wirken, verglichen mit denen der offenen Sternhaufen, ziemlich einheitlich. Die Hauptreihe endet innerhalb der Spektralklasse G. Sie biegt um in einen steil nach oben verlaufenden Riesenast. Dieser „vertikale“ Riesenast mündet in einen „horizontalen“ Riesenast ein. Die Kugelsternhaufen sind die ältesten Objekte des Milchstraßensystems; ihr FHD spiegelt diesen Umstand deutlich wider. Vergleicht man die sehr alter offener Sternhaufen mit denen gleichaltriger Kugelsternhaufen, dann fallen charakteristische Unterschiede in der Lage der Riesenäste auf. Sie rühren daher, daß beide Typen von Sternhaufen unterschiedliche Sternpopulationen besitzen. Die Mitglieder von Kugelsternhaufen repräsentieren die extreme Population II (Halo-Population), d. h. sie sind sehr arm an schweren Elementen, während die offenen Sternhaufen zur Population I gehören, deren Ausgangsmaterial an schweren Elementen schon beträchtlich angereichert war.

Karteikarte der Zeitschrift „Astronomie in der Schule“ – Fortsetzung Rückseite



Alter
in Jahren
 $10 \cdot 10^9$
 $20 \cdot 10^8$
 $6.5 \cdot 10^7$
 $2.8 \cdot 10^7$
 $1.6 \cdot 10^6$
 $1.2 \cdot 10^6$
 $7.1 \cdot 10^5$
 $2.9 \cdot 10^{10}$

4. Bewegungshaufen

Bewegungshaufen sind teils auf engem Raum konzentrierte, teils aber auch über den ganzen Himmel verstreute Sterngruppen. Sie fallen durch ihre einheitliche Bewegung auf; scheinbar streben sie einem Zielpunkt (Vertex) zu. Der bekannteste Bewegungshaufen sind die Hyaden. Die meisten Bewegungshaufen umfassen nur einige Dutzend Mitglieder und sind dynamisch instabil.

5. Literatur

WEIGERT, A.; ZIMMERMANN, H.: **Brockhaus ABC der Astronomie**. 3. Auflage, VEB F. A. Brockhaus-Verlag, Leipzig 1971

FRIEDMANN, CH.: **Das Weltall – eine moderne Kosmogonie**. Urania-Verlag, Leipzig/Jena/Berlin 1969; Illustrationsvorschlag: FHD aus ABC Astronomie, 3. Auflage, S. 247

Dr. JOHANN DORSCHNER

Farben-Helligkeits-Diagramm einiger offener Sternhaufen sowie der Kugelsternhaufen M 92 und M 3

Teilgebiete der Astronomie (I)

1. Einleitung

Auf einem langen Entwicklungswege durch die Jahrtausende hat die astronomische Wissenschaft ihre heutige vielfältige und komplizierte Struktur erlangt. Die Komplexität der Astronomie ist eine Folge der Wechselwirkung zwischen der ständigen Verfeinerung der Meßinstrumente und der Interpretation der Meßergebnisse einerseits und der allgemeinen Entwicklung von Technik und Naturwissenschaft, insbesondere Mathematik und Physik andererseits. Im Lichte der Dialektik bedingt die Art und Weise des Entstehens des derzeitigen Wissensgebäudes der Astronomie eine starke Verflechtung der astronomischen Teilgebiete, die wechselseitig befruchtend aufeinander wirken. Es gibt deshalb verschiedene Gesichtspunkte für die Einteilung der Astronomie in Teilgebiete. In der Sowjetunion sind alle Zweige der astronomischen Wissenschaft sehr hoch entwickelt, so daß es zweckmäßig erscheint, für die vorliegende Karteikarte die in sowjetischen Lehr- und Handbüchern eingeführte Einteilung der Astronomie im wesentlichen als Grundlage zu verwenden. [1], [2], [3], [4]

2. Allgemeine Formulierung der Aufgaben der astronomischen Teilgebiete

Die Astronomie ist die Wissenschaft von den Positionen, den Bewegungen, dem Bau, der Entstehung und der Entwicklung der Himmelskörper und ihrer Systeme einschließlich des interstellaren und intergalaktischen Mediums. Sie stand und steht in enger Wechselwirkung mit einer Reihe von Natur- und Gesellschaftswissenschaften, in erster Linie mit Mathematik, Physik, Chemie und Philosophie, aber auch mit den technischen Wissenschaften.

Bei der Lösung ihrer Probleme hat die Astronomie drei grundlegende Aufgaben zu bewältigen [2]:

- Die Untersuchung der scheinbaren und der wahren Orte und Bewegungen der Himmelskörper im Raum sowie die Bestimmung ihrer Ausmaße und Formen. (Lösung durch die Teilgebiete Astrometrie, Himmelsmechanik und theoretische Astronomie, die auch als klassische Astronomie bezeichnet werden.)
- Die Untersuchung des physischen Baus der Himmelskörper, d. h. die Untersuchung der chemischen Zusammensetzung und der physikalischen Bedingungen (Dichte, Druck, Temperatur usw.) an der Oberfläche und im Inneren der Himmelskörper und ihrer Systeme. (Lösung durch die Teilgebiete Astrophysik und Stellarastronomie.)
- Probleme der Entstehung, der bisherigen Entwicklung und nach Möglichkeit der weiteren Entwicklung einzelner Himmelskörper und der Systeme von Himmelskörpern sowie des Universums als Einheit. (Lösung durch die Teilgebiete Kosmogonie und Kosmologie.)

Karteikarte der Zeitschrift „Astronomie in der Schule“, Fortsetzung auf Karte II, Vorderseite

3. Tabellarische Übersicht der Teilgebiete

Teilgebiet Astrometrie	Objekte	Instrumente	Methoden	Ziele und Ergebnisse
- sphärische Astro- nomie		Rechenmaschinen Computer Hilfstafeln	mathematische Methoden zur Re- duktion von be- obachteten Ge- stirnskoordinaten (wegen Refrak- tion, Aberration, Parallaxe, Nu- tation, Präzession, Eigenbewegun- gen, Unregel- mäßigkeiten der Erddrotation)	Sternkataloge, Fundamentalkataloge, Eigenbewegungen der Fixsterne, Rotation des Milchstraßensystems, astronomische Konstanten, Inertialsystem, Inertialzeit
- fundamen- tale Astro- nomie	Körper des Sonnen- systems (ein- schließlich künstlicher Himmelskör- per), Fix- sterne, Galaxien	Meridiankreis, Vertikalkreis, Passageinstru- ment, Astrograph	Visuelle, photo- graphische, photoelektrische, fernsehtechnische Positionsbestim- mungen (absolut und differentiell)	
- praktische Astro- nomie		Universalinstr., Passageinstr., Theodolit, Höhen- durchgangsinstr.	Beobachtung der Durchgangszeit durch einen be- stimmten Verti- kal oder Almukantarat	Astronomische Bestimmung geographischer Koordinaten auf der Erdoberfläche und deren Veränderung mit der Zeit (Rotationszeitschwankungen, Polbewegung, Kontinentaldrift)

Teilgebiete der Astronomie (II)

In der historischen Entwicklung, aber auch aus sachlichen Gründen ergibt sich die Einteilung der Astronomie in 6 Teilgebiete [1], [2].

Die **Astrometrie** ist die Wissenschaft von der Vermessung von Raum und Zeit. Ihr mathematisches Skelett wird von der sphärischen Astronomie gebildet, die die Theorien der Gesetzmäßigkeit der Veränderung von Gestirnskoordinaten mit der Zeit ausarbeitet. Die praktischen Arbeiten der Astrometrie zerfallen in die fundamentalen Arbeiten der Aufstellung von Sternkatalogen (Bestimmung von Sternkoordinaten und deren Veränderungen) sowie von astronomischen Konstanten und in die Arbeiten der Bestimmung von Orten, Zeiten und Richtungen auf der Erdoberfläche sowie zur Überwachung und Deutung der Unregelmäßigkeiten der Bewegung des Erdkörpers.

Die **Himmelsmechanik** untersucht die Bewegungsgesetze der Himmelskörper unter dem Einfluß der Schwerkraft, bestimmt die Massen und Formen der Himmelskörper und den Bau ihrer Systeme.

Die **theoretische Astronomie** (Bahnbestimmung) liefert die Methoden für die Bestimmung von Bahnelementen der Himmelskörper aus den Beobachtungen scheinbarer Örter und umgekehrt die Berechnung von Ephemeriden, wie sie in astronomischen Jahrbüchern oder Kalendern gebraucht werden, aus bekannten Bahnelementen.

Den breitesten Raum in der astronomischen Forschung nimmt die **Astrophysik** ein. Sie untersucht den Aufbau, die chemische Zusammensetzung und die physikalischen Eigenschaften (Zustandsgrößen) der Gestirne und ihrer Atmosphären sowie des interstellaren Mediums. Die Astrophysik erforscht die Energiequellen der Sonne, der Fixsterne, des Gases und des Staubes im interstellaren Raum. In den letzten Jahrzehnten sind neue Spezialgebiete der Astrophysik erschlossen worden: Radio-, Röntgen-, Gamma-, Infrarot- und Neutrinoastronomie. Besonders groß ist bis jetzt die Zahl der Entdeckungen und Ergebnisse mit Hilfe der Radioastronomie (Entfernungsmessungen im Sonnensystem, Quasare, quasistellare Galaxien, Pulsare, interstellare Moleküle). Während die praktische Astrophysik sich mit der Entwicklung der Beobachtungsinstrumente und der Gewinnung von Beobachtungsdaten beschäftigt, gibt die theoretische Astrophysik auf der Grundlage physikalischer Gesetze Erklärungen und Interpretationen der Beobachtungsergebnisse.

Die **Stellarastronomie** untersucht u. a. mit statistischen Methoden die Gesetzmäßigkeiten der Verteilung der Sterne, der Sternsysteme und des interstellaren Mediums im Raum und ihre systematischen Bewegungen unter Berücksichtigung der physikalischen Eigenschaften der kosmischen Erscheinungsformen. Bei ihrer Untersuchung bedient sich die Stellarastronomie der Ergebnisse aller anderen bisher genannten Teilgebiete.

Teilgebiet Astrometrie	Objekte	Instrumente	Methoden	Ziele und Ergebnisse
Stellar- astronomie	Fixsterne (Veränderl., magnetische Sterne, Dop- pelsterne) interstellare Materie, Sterngruppen, Galaxien, z. B. Seyfert- u. Markarjan- galaxien	astrometrische und astrophysikali- sche Instrumente	Vorwiegend sta- tistische Unter- suchungen der Er- gebnisse der Astrometrie, theoretischen Astronomie und Astrophysik, Auswertung der radioastronomi- schen Messungen	Gesetzmäßigkeiten im Auf- bau der Galaxien, in der Be- wegung der Materie und Untersuchung der Eigen- schaften von Feldern im bis- her überschaubaren Teil des Weltalls. Entfernungs- bestimmungen, Radial- geschwindigkeiten, Eigen- bewegungen, Bestimmung der Zustandsgrößen der Sterne und deren Verände- rungen.
Himmels- mechanik	Körper des Sonnen- systems (einschl. deren künstlicher Satelliten und Raumsonden), Mehrfach- sterne, Stern- systeme	Instrumente für visuelle, photo- graphische und fernsehtechnische Positionsbeob- achtungen, funk- technische Bewe- gungsbeobach- tungen (Doppler- effekt)	Untersuchung der Bewegung- gesetze der Him- melskörper unter dem Einfluß der Gravitation	Massen und Formen der Himmelskörper sowie Bau und Dynamik ihrer Systeme, Definition des Inertial- systems
Theoretische Astronomie (Bahn- bestimmung)			Ableitung und ständige Verbes- serung der Bahn- elemente aus Be- obachtungen	Vorausberechnung von scheinbaren Örtern aus be- kannten Bahnelementen (Ephemeridenrechnungen)

Teilgebiete der Astronomie (III)

Fortsetzung von Karteikarte II (Rückseite)

Teilgebiet Astrophysik	Objekte	Instrumente	Methoden	Ziele und Ergebnisse
<p>- praktische Astrophysik</p>	<p>Sonne, Körper des Sonnensystems, Fixsterne, spezielle Einheiten des Sternsystems, interstellares Medium, Milchstraßensystem, Galaxien</p>	<p>Spiegelteleskope bis zu den größten Öffnungen und Öffnungsverhältnissen, teilw. Refraktoren. Zusatzgeräte: fotogr., fotoel. u. thermoelektrische Fotometer, Prismen-, Gitterspektrographen, Objektivprismen, Instrumente zum Empfang der Radio-, Gamma- und Röntgenstrahlung</p>	<p>Messende Untersuchung d. Quantität und Qualität der von den Himmelskörpern und dem Medium zwischen ihnen kommenden Strahlung des gesamten elektromagnetischen Spektrums (z. B. Fotometrie, Spektralfotometrie, Polarimetrie, Spektroskopie)</p>	<p>Physikalische Eigenschaften und chemische Zusammensetzung der Sterne. Deutung der Sternstrahlung, insbes. des Spektrums. Entfernungen und Bewegungen der Sterne. Erkennen der integralen Eigenschaften von Einzelsternen und Sterngruppen durch Bestimmung der stellaren Zustandsgrößen und deren gegenseitiger funktionaler Abhängigkeit mit Hilfe von Zustandsdiagrammen und Zustandsgleichungen. Innerer Aufbau und Entwicklung der Sterne. Sternatmosphären. Wechselwirkung zwischen den Sternen und dem interstellaren Medium. Besonders intensive Untersuchung der Sonne und ihrer Atmosphäre, als Beispiel für einen Stern der Hauptreihe. Neuere Entdeckungen der Astrophys.: Magnetische Eigenschaften der Sterne, Quasare, quasistellare Galaxien, Pulsare; Moleküle und organische Verbindungen im Weltraum.</p>
<p>- theoretische Astrophysik</p>			<p>Deutung der Beobachtungstatistiken der praktischen Astrophysik durch Anwendung allgemein-</p>	

Teilgebiet	Objekte	Instrumente	Methoden	Ziele und Ergebnisse
noch Astrophysik			gültiger physikalischer Gesetze.	den folgende Zweige besonders gefördert: Erforschung der Planetenoberflächen, der Atmosphären der Planeten und ihrer Monde; solar-terrestrische Beziehungen
Kosmogonie	Erde, alle Körper des Sonnensystems, Sterne, Sternsysteme, interstellares Medium	Neben den eigentlichen astronomischen Instrumenten spielen Raumsonden eine große Rolle (Mond, Mars, Venus)	Auswertung der auf allen Gebieten der Astronomie erhaltenen Ergebnisse unter Einbeziehung der Geowissenschaften und Physik	Entstehung und Entwicklung der Himmelskörper. Untersuchung und kritische Prüfung der vorhandenen kosmogonischen Hypothesen und Theorien
Kosmologie	Universum als Ganzes		Untersuchung verschied. Weltmodelle, Relativistische u. extragalakt. Forschung	Untersuchung der allgemeinen Gesetzmäßigkeiten des Baus und der Entwicklung des Universums. Expansion, 3-Kelvin-Strahlung

Die **Kosmogonie** beschäftigt sich mit Fragen der Entstehung und Entwicklung der Himmelskörper (einschließlich derer des Sonnensystems, insbesondere auch der Erde) und der Sternsysteme. Die Kosmogonie stützt sich in ihrer Aussage und in ihren Schlußfolgerungen auf das Beobachtungsmaterial aller Zweige der Astronomie und auf die Ergebnisse der Physik.

Die **Kosmologie** schließlich untersucht die allgemeinen Gesetzmäßigkeiten des Baus und der Entwicklung des Gesamtweltalls.

Literatur:

- [1] KULIKOVSKIJ, P. G.: Spravočnik ljubitelja astronomii. Izdatel'stvo „Nauka“, Moskva 1971, S. 11–13.
- [2] BAKULIN, P. I.; KONONVIČ, E. V.; MOROZ, V. I.: Kurs obščej astronomii. Izdatel'stvo „Nauka“, Moskva 1970, S. 11–13.
- [3] MARTYNOV, D. J.: Kurs praktičeskoj astrofiziki. Izdatel'stvo „Nauka“, Moskva 1967.
- [4] PODOBED, V. V.: Fundamental'naja astrometria. Izdatel'stvo „Nauka“, Moskva 1968.
- [5] WEIGERT, A. und ZIMMERMANN, H.: Brockhaus ABC der Astronomie. VEB F. A. Brockhaus-

Wahre und scheinbare Bewegungen der Himmelskörper

1. Vorbemerkungen

Der Inhalt dieser Karteikarte enthält naturgemäß wenig neue Fakten für den Leser. Deswegen brauchen Einzelheiten, wie Bestimmungsverfahren, Zahlenangaben, Erklärungen usw., nur angedeutet zu werden. Es kommt vielmehr darauf an, über die wahren und scheinbaren Bewegungen im Weltall einen zusammenfassenden Überblick zu geben und dabei eine Reihe von Begriffen zu nennen, über die in [1] nachgelesen werden kann.

In der geschichtlichen Entwicklung des astronomischen Weltbildes spielten entsprechend dem geozentrischen bzw. topozentrischen Standpunkt des irdischen Beobachters die scheinbaren Bewegungen der Gestirne eine große Rolle. Erst in einem langwierigen Erkenntnisprozeß konnte der Charakter der wahren Bewegungen erkannt und durch empirisch, z. T. auch spontan gefundene allgemeingültige Gesetze belegt werden.

Der Inhalt dieser Karteikarte sollte verwendbar sein bei der unterrichtlichen Behandlung der zusammenfassenden Lehrbuchthemen: Vorstellungen über das Planetensystem, Überblick über die Struktur der Galaxis, wichtige Entwicklungsetappen der astronomischen Wissenschaft, unsere Vorstellungen vom Weltall.

2. Wahre Bewegungen

2.1. Rotationsbewegungen führen fast alle Himmelskörper aus. Besonderheiten sind die **gebundene Rotation** (Erdmond), die **retrograde Rotation** (Venus) und die **differentielle Rotation**.

2.2. Keplerbewegungen (Bahnbewegungen, Revolutionsbewegungen der Planeten) führen Himmelskörper aus, die sich unter der Wirkung der **Gravitation** nach den drei Keplergesetzen umeinander bewegen. Hierzu gehören die Bewegungen der Planeten, der Monde und aller natürlichen und künstlichen Kleinkörper um ihre Zentralmasse. Hierzu gehören auch die Bewegungen der Komponenten von Doppel- und Mehrfachsystemen um den gemeinsamen Schwerpunkt.

In ihrer allgemein anwendbaren Form lauten die drei Keplergesetze nach [2]:

1. Unter der Wirkung der Anziehungskraft bewegt sich ein Himmelskörper im Schwerfeld eines anderen Himmelskörpers auf einem Kegelschnitt (Kreis, Ellipse, Parabel oder Hyperbel).

2. Die Fläche, die der Radiusvektor zu einem Himmelskörper in der Zeiteinheit überstreicht, ist eine konstante Größe.

3. Das 3. Gesetz beschreibt die Bewegung von zwei Massen m_1 und m_2 um ihre Zentralmasse M_1 und M_2

$$\frac{T_1^2}{T_2^2} \cdot \frac{(M_1 + m_1)}{(M_2 + m_2)} = \frac{a_1^3}{a_2^3} \quad (1)$$

Bewegen sich m_1 und m_2 um die gleiche Zentralmasse M und gilt $m_1 \approx m_2 \ll M$, so wird aus (1) die bekannte einfache Form des dritten Keplergesetzes;

Die ersten beiden KEPLERSchen Gesetze gelten streng nur im **Zweikörperproblem der Himmelsmechanik**. Meist vorhandene Kraftwirkungen weiterer Körper bewirken **Störungen** der Kepler-

Karteikarte der Zeitschrift „Astronomie in der Schule“ – Fortsetzung Rückseite

bewegungen, die mit Hilfe mathematischer Näherungsmethoden berechnet werden können (z.B. Bewegung des Mondes oder der kleinen Planeten). Weitere Begriffe: **Bahnbestimmung, Bahnelemente, Präzession, Apsiden, Aphel, Perihel, Periheldrehung.**

2.3. Die **Rotation des Milchstraßensystems** ist eine differentielle Bewegung des gesamten Sternsystems um sein Zentrum. Die Geschwindigkeit von Objekten in großer Entfernung von diesem Zentrum wird mit wachsendem r kleiner (ähnlicher Effekt wie der durch das 3. Keplergesetz beschrieben). Die **Rotation des Milchstraßensystems** wird mit den **Oortschen Formeln** durch die Komponenten der Raumgeschwindigkeit

$$\text{Radialgeschwindigkeit } RG = A \cdot R / \sin 2(\gamma + \lambda_0) \text{ und } (2) \text{ Tangentialgeschwindigkeit } TG = A \cdot r \cos 2(\lambda + \lambda_0) + B \cdot r$$

beschrieben. λ_0, λ : galaktische Länge des galaktischen Zentrums bzw. eines Objektes. Die Tangentialgeschwindigkeit wird meist unkorrekt als Eigenbewegung bezeichnet (s. 8.3.). Die Konstanten A und B lassen sich schwer bestimmen, da die Objekte außer der durch die Rotation hervorgerufenen Raumbewegung (motus parallacticus) noch individuellen Bewegungen (motus peculiaris) unterliegen [3].

2.4. Die **Expansionsbewegung** der Sternsysteme wird erkennbar durch die Rotverschiebung in den Spektrallinien der Galaxis, die einen Dopplereffekt darstellt. Nach der Formel

$$v = H \cdot r \text{ in km/s} \quad (3)$$

erhält man die Radialgeschwindigkeit einer Galaxie, die um so größer ist, je größer ihr Abstand vom Beobachter ist. $H = 50 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Mpc}^{-1}$ ist die Hubble-Konstante (Formel (3) wird allerdings nicht zur Bestimmung der Geschwindigkeit verwendet).

3. Scheinbare Bewegungen

3.1. Die **scheinbaren täglichen Bewegungen** der Himmelskörper entstehen durch die Rotation der Erde für einen geozentrischen bzw. topozentrischen Beobachter; Begriffe: **Auf- und Untergang, Kulmination, Zirkumpolarstern, Polarnacht, tägliche Parallaxe.**

3.2. Die **scheinbaren Bewegungen der Sonne, der Planeten, des Mondes und der Kleinkörper unter den Sternen** infolge der Bahnbewegungen gehören zu den auffälligsten Erscheinungen am Himmel. Begriffe: **Konjunktion, Elongation, Quadratur, Opposition (Schleifenbewegung); Äquinoktium, Solstitien, Tierkreiszeichen und Sternbilder; Radiant eines Meteorstroms; Fixsternparallaxe, jährliche Aberration.**

3.3. Die **wahren Raumbewegungen der Fixsterne** werden von der Erde aus als **Eigenbewegungen** EB beobachtet. Die EB ist der Winkel, unter dem sich ein Stern infolge seiner Tangentialgeschwindigkeit (s. 2.3.) in der Zeiteinheit (z. B. 1 Jahr) an der Himmelskugel gegenüber sehr weit entfernten Fixsternen oder Galaxien mit vernachlässigbaren EB bewegt. Der Effekt der Rotation der Galaxis wird von der **Pekuliarbewegung** der Sonne in Richtung auf den **Apex** überdeckt. Anmerkung: Über die Begriffe in fetter Schrift kann in [1] nachgelesen werden.

Literatur:

[1] WEIGERT-ZIMMERMANN: **ABC der Astronomie.** VEB Brockhaus-Verlag Leipzig 1961 und 1971.
[2] BAKULIN, P. I., KONONOVIC, E. V. und MOROZ, V. I.: **Kurs obšcej astronomii.** Izdatel'stvo Nauka, Moskva 1970. S. 93-96.
[3] STEINERT, K. G.: **Astronomie in der Schule** 5, 1968, 4. S. 75-80.

Dr. habil. KLAUS-GÜNTHER STEINERT