

## Inhaltsverzeichnis

**Vorwort zur Fünften Auflage** XV

**Aus dem Vorwort zur Ersten Auflage** XVII

<b>1</b>	<b>Bewegung von Himmelskörpern</b>	<b>1</b>
1.1	Gravitation	1
1.2	Das Zweikörperproblem	2
1.2.1	Keplersche Gesetze	2
1.2.2	Bahnbestimmung	6
1.2.3	Kreisbahnen	7
1.2.4	Entweichgeschwindigkeit	7
1.2.5	Gezeitenkräfte	8
1.3	Mehr- und Vielteilchensysteme	9
1.3.1	Reduziertes Dreikörperproblem	9
1.3.2	Störungsrechnung	11
1.3.3	Energieerhaltung und Virialsatz	12
1.4	Zur allgemeinen Relativitätstheorie	14
1.4.1	Grundzüge	14
1.4.2	Starke Gravitationsfelder	16
1.5	Koordinatensysteme	17
1.5.1	Das Horizontsystem	18
1.5.2	Äquatorialsysteme	18
1.5.3	Das Ekliptikalsystem	21
1.5.4	Das Galaktische System	21
1.5.5	Präzession und Nutation	22
1.5.6	Koordinaten-Änderung durch Präzession	24
1.6	Astronomie und Zeit	25
1.6.1	Die Sternzeit	25
1.6.2	Die wahre Sonnenzeit	25
1.6.3	Die mittlere Sonnenzeit	26
1.6.4	Ortszeit – Zonenzeit – Weltzeit	28
1.6.5	Das Jahr	28
1.6.6	Präzisionszeitmessungen	30

- 1.7 Sternörter 31
- 1.7.1 Sternbilder und Bezeichnungen von Sternen 31
- 1.7.2 Die Messung von Sternörtern 31
- 1.7.3 Die Aberration des Lichts 33
- 1.8 Die Parallaxe 34
- 1.9 Übungsaufgaben zu Kapitel 1 36

## **2 Strahlung 39**

- 2.1 Das elektromagnetische Spektrum 39
- 2.2 Astrophysikalische Messgrößen 40
  - 2.2.1 Intensität und Strahlungsstrom 41
  - 2.2.2 Die astronomische Magnitudenskala 42
  - 2.2.3 Helligkeitssysteme 44
  - 2.2.4 Farben 46
  - 2.2.5 Weitere Messgrößen 47
- 2.3 Elementare Strahlungsprozesse 48
  - 2.3.1 Emission und Absorption 48
  - 2.3.2 Hohlraumstrahlung 50
  - 2.3.3 Spektrallinien 53
  - 2.3.4 Synchrotronstrahlung 54
- 2.4 Kosmische Teilchen und Gravitationswellen 55
  - 2.4.1 Kosmische Strahlung und Teilchenströme 56
  - 2.4.2 Neutrinos 57
  - 2.4.3 Gravitationswellen 57
- 2.5 Ausbreitung von Strahlung 58
  - 2.5.1 Absorption in Materie 58
  - 2.5.2 Strahlungstransport 59
  - 2.5.3 Dopplereffekt 61
- 2.6 Auswirkungen der Erdatmosphäre 61
  - 2.6.1 Atmosphärische Transmission 62
  - 2.6.2 Refraktion 63
  - 2.6.3 Streuung 64
  - 2.6.4 Szintillation und „Seeing“ 65
- 2.7 Übungsaufgaben zu Kapitel 2 66

## **3 Astronomische Instrumente 69**

- 3.1 Teleskope 69
  - 3.1.1 Grundlagen 69
  - 3.1.2 Beugung 73
  - 3.1.3 Abbildungsfehler 74
  - 3.1.4 Auflösungsvermögen 75
  - 3.1.5 Astronomische Teleskope 77
  - 3.1.6 Spezielle Teleskoptypen 79
- 3.2 Detektoren 80

3.3	Beobachtungstechniken	83
3.3.1	Photometrie	83
3.3.2	Spektroskopie	85
3.3.3	Adaptive Optik	88
3.3.4	Interferometrie	90
3.3.5	Elektronische Bildverarbeitung	93
3.4	Observatorien	94
3.4.1	Bodengebundene Sternwarten	94
3.4.2	Radioobservatorien	96
3.4.3	Observatorien im Weltraum	97
3.5	Übungsaufgaben zu Kapitel 3	99
<b>4</b>	<b>Das Sonnensystem</b>	<b>101</b>
4.1	Mitglieder und Dimensionen des Systems	101
4.2	Bahnbewegungen	103
4.2.1	Bahnen der Planeten	103
4.2.2	Die Erdbahn	105
4.2.3	Bahnen künstlicher Satelliten und Raumfahrzeuge	106
4.3	Das System Erde-Mond	108
4.3.1	Bewegung um die Erde	108
4.3.2	Bewegung um die Sonne	110
4.3.3	Rotation des Mondes	111
4.3.4	Finsternisse	111
4.4	Physik der Planeten	113
4.4.1	Energiebilanz und Oberflächentemperaturen	114
4.4.2	Stabilität und Zusammensetzung der Atmosphären	118
4.4.3	Gesamtaufbau	118
4.4.4	Auswirkung von Rotation	121
4.4.5	Oberflächenformen terrestrischer Planeten	123
4.5	Monde	125
4.5.1	Stabilität im Gezeitenfeld	125
4.5.2	Eigenschaften von Monden im Sonnensystem	127
4.6	Kleine Körper im Sonnensystem	128
4.6.1	Zwergplaneten und Plutoiden	128
4.6.2	Asteroiden	129
4.6.3	Trans-Neptun-Objekte	130
4.6.4	Kometen	130
4.7	Zur Entstehung des Sonnensystems	133
4.8	Übungsaufgaben zu Kapitel 4	135
<b>5</b>	<b>Charakteristische Beobachtungsgrößen von Sternen</b>	<b>137</b>
5.1	Strahlungsleistung	137
5.1.1	Leuchtkraft	137
5.1.2	Absolute Helligkeit	138
5.1.3	Flächenhelligkeit und Effektivtemperatur	139

5.2	Radius, Masse und hieraus abgeleitete Größen	140
5.2.1	Sternradius	140
5.2.2	Sternmasse	142
5.2.3	Mittlere Dichte und Schwerebeschleunigung	144
5.3	Sternspektren und Spektralklassifikation	145
5.3.1	Definition der Spektralklassen	146
5.3.2	Leuchtkraftklassen	151
5.3.3	Praxis der Spektralklassifikation	152
5.4	Rotation der Sterne	154
5.5	Beziehungen zwischen verschiedenen Messgrößen	157
5.5.1	Hertzsprung-Russell-Diagramm	157
5.5.2	Farben-Helligkeits-Diagramm	160
5.5.3	Masse-Leuchtkraft- und Masse-Radius-Beziehung für Hauptreihensterne	162
5.6	Veränderliche Sterne	164
5.7	Doppelsterne und Mehrfachsysteme	166
5.8	Übungsaufgaben zu Kapitel 5	168
<b>6</b>	<b>Die Außenschichten von Sonne und Sternen</b>	<b>171</b>
6.1	Die Außenschichten der Sonne	171
6.1.1	Die Photosphäre	171
6.1.2	Die Chromosphäre	173
6.1.3	Die Übergangsregion zur Korona	174
6.1.4	Die solare Korona	175
6.1.5	Der Sonnenwind	177
6.2	Die Aktivität der Sonne	179
6.2.1	Sonnenflecken	179
6.2.2	Eruptionen	181
6.2.3	Radio- und Röntgenstrahlung der Sonne	182
6.2.4	Das Magnetfeld der Sonne	183
6.3	Sternaktivität	185
6.3.1	Phänomene	185
6.3.2	Stellare Dipolfelder	187
6.4	Physik der Sternatmosphären	187
6.4.1	Schichtung einer Sternatmosphäre	187
6.4.2	Modellatmosphären	190
6.5	Analyse von Sternspektren	192
6.5.1	Absorptionsquerschnitt und Linienverbreiterung	192
6.5.2	Anregung und Ionisation	194
6.5.3	Absorptionskoeffizient und Sternspektren	196
6.5.4	Stärke von Absorptionslinien	197
6.5.5	Die chemische Zusammensetzung von Sternatmosphären	200
6.6	Übungsaufgaben zu Kapitel 6	203

<b>7</b>	<b>Innerer Aufbau der Sterne</b>	<b>205</b>
7.1	Grundgleichungen des Sternaufbaus	205
7.1.1	Massenverteilung	206
7.1.2	Mechanisches Gleichgewicht und Virialsatz	207
7.1.3	Energiesatz	208
7.1.4	Energietransport	210
7.1.5	Gesamtproblem	211
7.2	Materialfunktionen	212
7.2.1	Die Zustandsgleichung	212
7.2.2	Der Absorptionskoeffizient	214
7.3	Nukleare Energieerzeugung	215
7.3.1	Wasserstoffbrennen	217
7.3.2	Heliumbrennen	218
7.3.3	Kohlenstoff-, Sauerstoff- und Siliziumbrennen	219
7.4	Einfache Sternmodelle	221
7.4.1	Sternmodell für eine Sonnenmasse	221
7.4.2	Hauptreihensterne	223
7.4.3	Braune Zwerge	226
7.4.4	Sterne mit Konvektion und die Hayashi-Linie	226
7.4.5	Weißer Zwerge	228
7.5	Beobachtungen des Inneren von Sternen	230
7.5.1	Helio- und Asteroseismologie	230
7.5.2	Solare und stellare Neutrinos	231
7.6	Übungsaufgaben zu Kapitel 7	233
<b>8</b>	<b>Sternentstehung und Sternentwicklung</b>	<b>235</b>
8.1	Sternentstehung	235
8.1.1	Voraussetzungen für gravitativen Kollaps	235
8.1.2	Ablauf des Kollaps	237
8.1.3	Protosterne und Akkretionsscheiben	238
8.1.4	Entwicklung bis zur Hauptreihe	240
8.2	Hauptreihensterne	242
8.2.1	Energiereservoir und Zeitskalen	242
8.2.2	Sternentwicklung auf der Hauptreihe	244
8.3	Von der Hauptreihe zum Riesenast	245
8.3.1	Heliumbrennen	245
8.3.2	Rote Riesen	248
8.3.3	Vergleich mit Beobachtungen	250
8.3.4	Pulsationsveränderliche	253
8.4	Spätstadien der Sternentwicklung	256
8.5	Endprodukte der Sternentwicklung	258
8.5.1	Weißer Zwerge	258
8.5.2	Supernovae	259
8.5.3	Neutronensterne und Pulsare	262
8.5.4	Schwarze Löcher	265

8.6	Enge Doppelsternsysteme	266
8.6.1	Äquipotentialflächen	266
8.6.2	Massentransfer und Akkretionsscheiben	267
8.6.3	Akkretionsscheiben um Weiße Zwerge	269
8.6.4	Röntgendoppelsterne	270
8.6.5	Zur Entwicklung enger Doppelsternsysteme	272
8.7	Übungsaufgaben zu Kapitel 8	273
<b>9</b>	<b>Extrasolare Planetensysteme</b>	<b>275</b>
9.1	Die Suche nach extrasolaren Planeten	275
9.2	Nachweis von Exoplaneten: Radialgeschwindigkeiten	276
9.2.1	Beschreibung der Methode	277
9.2.2	Planeten auf exzentrischen Bahnen	279
9.2.3	Systeme mit mehreren Planeten	281
9.3	Weitere Methoden zum Nachweis von Exoplaneten	282
9.3.1	Sternbedeckungen	282
9.3.2	Astrometrische Suche	283
9.3.3	Direkte Abbildung von Planeten	284
9.3.4	Mikro-Gravitationslinseneffekt	285
9.3.5	Planeten um Pulsare	286
9.4	Eigenschaften von Exoplaneten	286
9.4.1	Verteilung der Bahnparameter	287
9.4.2	Massen, Radien und Dichten	288
9.4.3	Temperaturen, Atmosphären, Oberflächen	289
9.4.4	Eigenschaften der Zentralsterne	290
9.4.5	Protoplanetare Scheiben	291
9.5	Entstehung von Planetensystemen	292
9.5.1	Bildung protoplanetarer Scheiben	292
9.5.2	Planetesimale	293
9.5.3	Entstehung der Planeten	295
9.5.4	Entwicklung von Planetensystemen	296
9.6	Leben im Weltall?	297
9.6.1	Entwicklung von Leben auf der Erde	297
9.6.2	Habitable Zonen in Planetensystemen	298
9.6.3	Suche nach extraterrestrischem Leben	300
9.6.4	Zur Wahrscheinlichkeit extrasolaren Lebens: Die Drake-Formel	302
9.7	Übungsaufgaben zu Kapitel 9	303
<b>10</b>	<b>Interstellare Materie</b>	<b>305</b>
10.1	Physikalische Besonderheiten des ISM	305
10.1.1	Thermodynamisches Ungleichgewicht	305
10.1.2	Druckgleichgewicht	307
10.1.3	Phasen des interstellaren Mediums	309
10.2	Das kühle interstellare Gas	310
10.2.1	Die 21 cm-Linie des neutralen Wasserstoffs	310

10.2.2	Metalle im neutralen ISM	312
10.2.3	Molekülwolken	313
10.3	Das warme ISM	316
10.3.1	H II-Regionen	316
10.3.2	Planetarische Nebel	320
10.3.3	Diffuses warmes Gas	321
10.4	Das heiße interstellare Medium	322
10.4.1	Nachweis des heißen Gases	322
10.4.2	Supernovae und interstellare Stoßfronten	322
10.5	Interstellarer Staub	325
10.5.1	Interstellare Extinktion	325
10.5.2	Thermische Strahlung des Staubs	328
10.5.3	Herkunft und Zusammensetzung des Staubes	329
10.6	Interstellare Kühlprozesse	330
10.7	Der Materiekreislauf	331
10.8	Übungsaufgaben zu Kapitel 10	332
<b>11</b>	<b>Das Milchstraßensystem</b>	<b>335</b>
11.1	Struktur der Milchstraße	335
11.1.1	Koordinaten und Geschwindigkeiten	337
11.2	Entfernungsbestimmung	338
11.2.1	Trigonometrische Parallaxen	338
11.2.2	Dynamische Parallaxen	339
11.2.3	Entfernung von Sternhaufen	340
11.2.4	Standardkerzen	341
11.3	Stellarstatistik	342
11.3.1	Sterne der Sonnenumgebung	343
11.3.2	Leuchtkrafftfunktion	344
11.3.3	Massenfunktion der Sterne	345
11.3.4	Anzahl-Helligkeits-Relation	347
11.3.5	Sternzählungen und Extinktion	349
11.4	Rotation der Milchstraße	350
11.4.1	Differentielle Rotation	350
11.4.2	Die Rotationskurve der Milchstraße	354
11.4.3	Massenverteilung der Milchstraße	356
11.4.4	Stoße zwischen Sternen	358
11.5	Komponenten des Milchstraßensystems	361
11.5.1	Die galaktische Scheibe und die Spiralarme	361
11.5.2	Der galaktische Halo	364
11.5.3	Das Zentrallengipsoid (Bulge)	364
11.5.4	Das galaktische Zentrum	365
11.6	Sternhaufen	369
11.6.1	Offene Sternhaufen	369
11.6.2	Kugelsternhaufen	371
11.7	Sternpopulationen	372

- 11.8 Zur Entstehung und Entwicklung der Milchstraße 374
- 11.9 Übungsaufgaben zu Kapitel 11 376

**12 Galaxien 379**

- 12.1 Extragalaktische Entfernungsbestimmung 379
  - 12.1.1 Standardkerzen 380
  - 12.1.2 Die extragalaktische Entfernungsleiter 382
  - 12.1.3 Die Hubble-Beziehung 383
- 12.2 Klassifikation von Galaxien 385
- 12.3 Hubble-Schema 386
  - 12.3.1 Erweiterte Galaxienklassifikation 388
- 12.4 Globale Eigenschaften 389
  - 12.4.1 Lineardimensionen und Leuchtkräfte 389
  - 12.4.2 Farben und Spektren 391
  - 12.4.3 Massen 393
- 12.5 Dynamischer Aufbau von Galaxien 394
  - 12.5.1 Strukturen 394
  - 12.5.2 Rotationskurven von Spiralgalaxien 396
  - 12.5.3 Spiralarme 398
  - 12.5.4 Balkenspiralen 399
  - 12.5.5 Elliptische Galaxien 400
  - 12.5.6 Skalierungsrelationen für Galaxien 402
  - 12.5.7 Schwarze Löcher in Galaxienzentren 403
- 12.6 Zeitliche Entwicklung von Galaxien 404
  - 12.6.1 Verlauf der Sternentstehung 404
  - 12.6.2 Materiekreislauf und chemische Entwicklung 406
  - 12.6.3 Leuchtkraftentwicklung 407
  - 12.6.4 Wechselwirkung zwischen Galaxien 407
  - 12.6.5 Galaxienverschmelzung 409
  - 12.6.6 Galaxien im jungen Universum 411
- 12.7 Aktive Galaxienkerne und Quasare 412
  - 12.7.1 Seyfert-Galaxien 413
  - 12.7.2 Radiogalaxien 413
  - 12.7.3 Quasare 415
  - 12.7.4 Der extragalaktische Röntgenhintergrund 417
  - 12.7.5 Struktur von aktiven Galaxienkernen 418
  - 12.7.6 Energieerzeugung durch Akkretion 420
  - 12.7.7 Eddington-Leuchtkraft und Massenwachstum 421
- 12.8 Übungsaufgaben zu Kapitel 12 423

**13 Die Verteilung der Materie im Universum 425**

- 13.1 Die Lokale Gruppe 425
- 13.2 Die räumliche Verteilung von Galaxien 428
  - 13.2.1 Galaxienkataloge 428
  - 13.2.2 Gruppen, Haufen und Superhaufen 428



- 13.2.3 Großräumige Struktur der Galaxienverteilung 430
- 13.3 Galaxienstatistik 433
  - 13.3.1 Anzahldichte und radiale Verteilung von Galaxien 433
  - 13.3.2 Leuchtkrafftfunktion 434
  - 13.3.3 Entwicklung der Galaxienpopulation 436
- 13.4 Galaxienhaufen 437
  - 13.4.1 Charakterisierung von Haufen 437
  - 13.4.2 Dynamik von Galaxienhaufen 440
  - 13.4.3 Massenbestimmung 441
  - 13.4.4 Zur Entwicklung von Galaxien in Haufen 443
- 13.5 Dunkle Materie 444
  - 13.5.1 Das intergalaktische Medium 445
  - 13.5.2 Gravitationslinsen 446
  - 13.5.3 Nicht-baryonische Dunkle Materie 450
- 13.6 Übungsaufgaben zu Kapitel 13 452
  
- 14 Kosmologie 453**
  - 14.1 Das empirische Fundament der Kosmologie 453
    - 14.1.1 Die Expansion des Universums 453
    - 14.1.2 Die kosmische Hintergrundstrahlung 455
    - 14.1.3 Olbers' Paradox 457
    - 14.1.4 Das kosmologische Prinzip 458
  - 14.2 Weltmodelle 458
    - 14.2.1 Vorbetrachtung im Rahmen der klassischen Mechanik 459
    - 14.2.2 Raumkrümmung 460
    - 14.2.3 Grundgleichungen der Kosmologie 462
    - 14.2.4 Rotverschiebung und Distanzen 466
  - 14.3 Kosmologische Parameter 468
    - 14.3.1 Expansionsrate und kritische Dichte 468
    - 14.3.2 Materiedichte 469
    - 14.3.3 Strahlungsdichte 470
    - 14.3.4 Raumkrümmung 470
    - 14.3.5 Das Alter des Universums 471
    - 14.3.6 Dunkle Energie 471
  - 14.4 Der Urknall und das frühe Universum 474
    - 14.4.1 Bausteine des Kosmos 474
    - 14.4.2 Zeitabhängigkeit der kosmologischen Parameter 475
    - 14.4.3 Die Temperatur des Universums 477
    - 14.4.4 Der Hochenergiekosmos; Inflation 479
    - 14.4.5 Entstehung der leichten Elemente 482
    - 14.4.6 Die Entkopplung von Strahlung und Materie 483
  - 14.5 Die Entstehung von Galaxien 484
    - 14.5.1 Fluktuationen der Hintergrundstrahlung 485
    - 14.5.2 Wachstum von Dichtekontrasten 486
    - 14.5.3 Strukturbildung im Universum 488

- 14.5.4 Kollaps und Galaxienentstehung 490
- 14.5.5 Die ersten Sterne 491
- 14.6 Die Zukunft des Weltalls 493
- 14.7 Übungsaufgaben zu Kapitel 14 495

**Farbtafeln** 497

**Anhang A** 513

- A.1 Physikalische Konstanten und Einheiten 513
- A.2 Astronomische Daten 514
  - A.2.1 Körper des Sonnensystems 514
  - A.2.2 Entfernungen und kosmologische Parameter 515
  - A.2.3 Charakteristische Größen von Sternen 516
- A.3 Lösungen der Übungsaufgaben 518

**Anhang B: Weiterführende Literatur** 525

**Anhang C: Astronomische Seiten im Internet** 529

**Anhang D: Abbildungs- und Quellennachweis** 531

**Register** 533