

## Inhaltsverzeichnis

### Vorwort zur sechsten Auflage xv

<b>1</b>	<b>Physikalische Grundlagen</b>	<b>1</b>
1.1	Gravitation	1
1.1.1	Das Newtonsche Gravitationsgesetz	1
1.1.2	Zentralmassen- und Zweikörperproblem	2
1.1.3	Gravitationspotential	5
1.1.4	Drei- und Mehrkörpersysteme	7
1.1.5	Ausgedehnte Massenverteilungen	9
1.1.6	Gezeitenkräfte	11
1.2	Thermodynamik	12
1.2.1	Zustandsgrößen und Zustandsgleichung	12
1.2.2	Statistische Thermodynamik	14
1.2.3	Zustandsänderungen	16
1.3	Strahlung	18
1.3.1	Das elektromagnetische Spektrum	18
1.3.2	Strahlungsgrößen	19
1.3.3	Elementare Strahlungsprozesse: Emission und Absorption	20
1.3.4	Schwarzkörperstrahlung	21
1.3.5	Dopplereffekt	24
1.3.6	Absorption in Materie	24
1.3.7	Strahlungstransport	27
1.3.8	Verbreiterung von Spektrallinien	28
1.3.9	Anregungs- und Ionisationsstufen	29
1.3.10	Synchrotronstrahlung	30
1.3.11	Kosmische Strahlung	31
1.3.12	Gravitationswellen	31
<b>2</b>	<b>Astronomische Instrumente und Beobachtungstechniken</b>	<b>33</b>
2.1	Teleskope	33
2.1.1	Grundlagen	33
2.1.2	Beugung	35
2.1.3	Abbildungsfehler	36
2.1.4	Auflösungsvermögen	38

2.1.5	Astronomische Teleskope	39
2.1.6	Spezielle Teleskoptypen	41
2.2	Detektoren	42
2.2.1	Quantendetektoren	42
2.2.2	Integrale Detektoren	44
2.3	Auswirkungen der Erdatmosphäre	45
2.3.1	Atmosphärische Transmission	45
2.3.2	Streuung, Szintillation, „Seeing“	46
2.4	Beobachtungstechniken	47
2.4.1	Astrometrie	47
2.4.2	Photometrie	48
2.4.3	Die astronomische Magnitudenskala	50
2.4.4	Spektroskopie	51
2.4.5	Adaptive Optik	54
2.4.6	Interferometrie	55
2.4.7	Datenanalyse und Bildverarbeitung	58
2.5	Observatorien	59
2.5.1	Bodengebundene Sternwarten	59
2.5.2	Radio-Observatorien	60
2.5.3	Observatorien für Gammastrahlen, kosmische Teilchen, Gravitationswellen	61
2.5.4	Weltraumteleskope	62
2.6	Übungsaufgaben zu Kapitel 2	63
<b>3</b>	<b>Das Sonnensystem</b>	65
3.1	Mitglieder und Dimensionen	65
3.2	Bahnbewegungen im Sonnensystem	66
3.2.1	Keplersche Gesetze	66
3.2.2	Eigenschaften der Planetenbahnen	68
3.2.3	Umlaufzeiten und Aspekte	69
3.2.4	Entdeckung des Neptun	70
3.2.5	Periheldrehung des Merkur	71
3.3	Physik der Planeten	71
3.3.1	Energiebilanz und Oberflächentemperaturen	72
3.3.2	Atmosphären	75
3.3.3	Stabilität einer Atmosphäre	77
3.3.4	Innere Struktur von Planeten	77
3.3.5	Auswirkung von Rotation	80
3.3.6	Oberflächenformen terrestrischer Planeten	81
3.4	Planetenmonde	83
3.4.1	Stabilität im Gezeitenfeld	83
3.4.2	Eigenschaften von Morden im Sonnensystem	85
3.4.3	Planetenringe	86
3.5	Kleine Körper im Sonnensystem	86
3.5.1	Zwergplaneten	87
3.5.2	Asteroiden	88
3.5.3	Zentauren und Trans-Neptun-Objekte	89
3.5.4	Kometen	90
3.6	Zur Entstehung des Sonnensystems	92
3.7	Übungsaufgaben zu Kapitel 3	93

<b>4</b>	<b>Erde und Mond</b>	<b>95</b>
4.1	Bahnbewegung und Rotation	95
4.1.1	Die Erdbahn und die Jahreszeiten	95
4.1.2	Die Mondbahn um die Erde	95
4.1.3	Mondbewegung um die Sonne	97
4.1.4	Rotation des Mondes	98
4.2	Wechselwirkungen von Mond und Erde	99
4.2.1	Gezeiten auf der Erde	99
4.2.2	Gezeitenreibung	99
4.2.3	Sonnen- und Mondfinsternisse	100
4.3	Koordinaten und Zeit	102
4.3.1	Koordinatensysteme	102
4.3.2	Präzession und Nutation	105
4.3.3	Zeitmessung	106
4.3.4	Sternbilder und Bezeichnungen von Sternen	108
4.3.5	Die Messung von Sternpositionen	109
4.3.6	Refraktion	110
4.4	Parallaxen	111
4.5	Raumfahrt	113
4.5.1	Künstliche Erdsatelliten	113
4.5.2	Interplanetare Raumfahrt	114
4.5.3	Antrieb von Raumschiffen	115
4.6	Übungsaufgaben zu Kapitel 4	117
<b>5</b>	<b>Die Sonne</b>	<b>119</b>
5.1	Gesamtbild und Phänomene	119
5.1.1	Globale Eigenschaften	119
5.1.2	Schematischer Aufbau	120
5.1.3	Die Außenschichten der Sonne	121
5.2	Die solare Photosphäre	124
5.2.1	Modell der Sonnenatmosphäre	124
5.2.2	Das photosphärische Spektrum der Sonne	127
5.2.3	Erklärung der Mitte-Rand-Variation	130
5.3	Sonnenaktivität und das solare Magnetfeld	131
5.3.1	Sonnenflecken	132
5.3.2	Der solare Magnetismus	134
5.3.3	Eruptionen und die Heizung der Korona	136
5.4	Das Innere der Sonne	137
5.4.1	Gleichgewicht und Stabilität	137
5.4.2	Helioseismologie	138
5.4.3	Energiereservoir und Zeitskalen	139
5.4.4	Nukleare Energieerzeugung in der Sonne	140
5.4.5	Solare Neutrinos	142
5.5	Übungsaufgaben zu Kapitel 5	142
<b>6</b>	<b>Sterne</b>	<b>145</b>
6.1	Globale Größen	145
6.1.1	Strahlungsleistung und Effektivtemperatur	145
6.1.2	Sternradien	146

6.1.3	Sternmassen	147
6.2	Sternspektren	149
6.2.1	Spektralklassifikation	149
6.2.2	Quantitative Spektroskopie von Sternen	153
6.2.3	Die Zusammensetzung von Sternatmosphären	156
6.3	Das Hertzsprung-Russell-Diagramm	159
6.3.1	Temperatur-Leuchtkraft-Beziehung	159
6.3.2	Das klassische Hertzsprung-Russell-Diagramm	159
6.3.3	Farben-Helligkeits-Diagramme	161
6.3.4	Skalierungsrelationen für Hauptreihensterne	163
6.3.5	Veränderliche Sterne	165
6.4	Innerer Aufbau von Sternen	167
6.4.1	Kernfusion in Hauptreihensternen	167
6.4.2	Grundgleichungen des Sternaufbaus	168
6.4.3	Zustandsgleichung im Sterninneren	169
6.4.4	Energietransport	170
6.4.5	Modelle für Hauptreihensterne	172
6.4.6	Skalierungsrelationen und das HRD	173
6.4.7	Das obere und das untere Ende der Hauptreihe	176
6.5	Übungsaufgaben zu Kapitel 6	177
<b>7</b>	<b>Entstehung und Entwicklung von Sternen</b>	<b>179</b>
7.1	Sternentstehung	179
7.1.1	Voraussetzungen	179
7.1.2	Gravitativer Kollaps	181
7.1.3	Protosterne und Akkretionsscheiben	182
7.1.4	Entwicklung bis zur Hauptreihe	183
7.2	Vom Hauptreihenstern zum Roten Riesen	185
7.2.1	Sternentwicklung auf der Hauptreihe	185
7.2.2	Entwicklungswege im Hertzsprung-Russell-Diagramm	186
7.2.3	Rote Riesen	188
7.2.4	Heliumbrennen und Horizontalast	190
7.2.5	Der asymptotische Riesenast	192
7.2.6	Spätphasen massereicher Sterne	193
7.2.7	Farben-Helligkeits-Diagramme und Isochronen	194
7.2.8	Pulsationsveränderliche	196
7.3	Endstadien der Sternentwicklung	198
7.3.1	Übersicht	198
7.3.2	Weisse Zwerge	200
7.3.3	Kernkollaps-Supernovae	202
7.3.4	Neutronensterne und Pulsare	204
7.3.5	Stellare Schwarze Löcher	206
7.4	Enge Doppelsternsysteme	208
7.4.1	Äquipotentialflächen	208
7.4.2	Zur Entwicklung enger Doppelsternsysteme	209
7.4.3	Massentransfer und Akkretionsscheiben	210
7.4.4	Verschmelzende kompakte Objekte	213
7.5	Übungsaufgaben zu Kapitel 7	214

<b>8</b>	<b>Extrasolare Planetensysteme</b>	217
8.1	Nachweis von Exoplaneten	217
8.1.1	Problemstellung	217
8.1.2	Direkte Abbildung von Planeten	218
8.1.3	Astrometrische Suche	219
8.1.4	Radialgeschwindigkeits-Variationen	220
8.1.5	Sternbedeckungen	223
8.1.6	Andere Verfahren	225
8.2	Eigenschaften von Exoplaneten	225
8.2.1	Bahnen und Massen	226
8.2.2	Radien und Dichten	227
8.2.3	Temperaturen, Oberflächen, Atmosphären	228
8.2.4	Eigenschaften der Zentralsterne	229
8.3	Entstehung von Planetensystemen	230
8.3.1	Protoplanetare Scheiben	230
8.3.2	Planetesimalen	232
8.3.3	Planetengestaltung	233
8.3.4	Zeitliche Entwicklung von Planetensystemen	234
8.4	Leben im Weltall?	235
8.4.1	Entwicklung von Leben auf der Erde	235
8.4.2	Habitable Zonen in Planetensystemen	236
8.4.3	Suche nach extraterrestrischem Leben	238
8.4.4	Zur Anzahl extrasolarer Zivilisationen: Die Drake-Formel	239
8.5	Übungsaufgaben zu Kapitel 8	240
<b>9</b>	<b>Interstellare Materie</b>	243
9.1	Erscheinungsformen	243
9.1.1	Leuchtende Gasnebel	243
9.1.2	Staub- und Molekülwolken	245
9.1.3	Das allgemein verteilte interstellare Medium	245
9.2	Physikalische Besonderheiten des ISM	246
9.2.1	Thermodynamisches Ungleichgewicht	246
9.2.2	Druckgleichgewicht und Phasen des ISM	247
9.2.3	Interstellare Kühlprozesse	250
9.3	Interstellare Absorptionslinien	251
9.3.1	Säulendichten und Linienstärken	251
9.3.2	Multiphasenstruktur und Elementhäufigkeiten im ISM	254
9.4	Ionisierte interstellare Materie	255
9.4.1	H II-Regionen	256
9.4.2	Emissionslinienspektren von ionisierten Gasnebeln	258
9.5	Heißes interstellares Gas	260
9.5.1	Nachweis	260
9.5.2	Interstellare Blasen und Superblasen	261
9.6	Das kühle und das kalte ISM	264
9.6.1	Neutraler Wasserstoff	264
9.6.2	Molekülwolken	266
9.7	Interstellarer Staub	268
9.7.1	Extinktion durch Staub	268
9.7.2	Thermische Strahlung des Staubs	270

- 9.7.3 Herkunft und Zusammensetzung des Staubes 270
  - 9.8 Zum Ursprung der interstellaren Materie 271
  - 9.9 Übungsaufgaben zu Kapitel 9 272
- 10 Das Milchstraßensystem 273**
- 10.1 Globalansicht der Milchstraße 273
  - 10.1.1 Grundstruktur 273
  - 10.1.2 Galaktische Koordinaten und Geschwindigkeiten 275
  - 10.2 Entfernungsbestimmung 276
  - 10.2.1 Trigonometrische Parallaxen 276
  - 10.2.2 Dynamische Parallaxen 277
  - 10.2.3 Entfernung von Sternhaufen 277
  - 10.2.4 Standardkerzen 278
  - 10.3 Stellarstatistik 279
  - 10.3.1 Sterne der Sonnenumgebung 279
  - 10.3.2 Leuchtkraft- und Massen-Verteilungsfunktion 280
  - 10.3.3 Die Anfangs-Massenfunktion der Sterne 283
  - 10.4 Sternhaufen 284
  - 10.4.1 Charakterisierung von Sternhaufen 285
  - 10.4.2 Gravitative Wechselwirkung zwischen Sternen 286
  - 10.4.3 Zusammenhalt von Sternhaufen 289
  - 10.5 Die galaktische Scheibe 291
  - 10.5.1 Grundstruktur 291
  - 10.5.2 Kreisbahnen in der galaktischen Scheibe 293
  - 10.5.3 Differentielle Bahnbewegung in der Sonnenumgebung 293
  - 10.5.4 Die Rotationskurve der Milchstraße 297
  - 10.5.5 Abweichungen von der Kreisbahnnäherung 298
  - 10.6 Weitere Komponenten des Milchstraßensystems 301
  - 10.6.1 Die zentrale Aufwölbung (Bulge) 301
  - 10.6.2 Hat die Milchstraße einen Balken? 303
  - 10.6.3 Der galaktische stellare Halo 303
  - 10.6.4 Das galaktische Zentrum 304
  - 10.7 Sternpopulationen 306
  - 10.8 Übungsaufgaben zu Kapitel 10 307
- 11 Galaxien 309**
- 11.1 Extragalaktische Entfernungsbestimmung 309
  - 11.1.1 Standardkerzen und die extragalaktische Entfernungsleiter 309
  - 11.1.2 Die Hubble-Beziehung 311
  - 11.2 Formen, Größenverhältnisse, Strukturen 313
  - 11.2.1 Morphologische Klassifikation 313
  - 11.2.2 Strukturen und Symmetrien 316
  - 11.2.3 Flächenhelligkeiten 318
  - 11.2.4 Leuchtkräfte und Lineardimensionen 320
  - 11.3 Sternpopulationen 322
  - 11.3.1 Massen und Sternentstehungsraten 323
  - 11.3.2 Galaxienspektren 325
  - 11.3.3 Eine „Hauptreihe“ der Galaxien 325
  - 11.3.4 Interstellare Materie in Galaxien 327

11.4	Galaxiendynamik	328
11.4.1	Kinematik von Galaxien	328
11.4.2	Rotationskurven und Massenverteilung	330
11.4.3	Bahnen in galaktischen Potentialen	333
11.4.4	Spiralarme und Balken	335
11.4.5	Skalierungsrelationen	337
11.5	Schwarze Löcher und Aktive Galaxienkerne	338
11.5.1	Massereiche Schwarze Löcher in Galaxienzentren	339
11.5.2	Aktive Galaxienkerne: Typologie	341
11.5.3	Struktur von aktiven Galaxienkernen	343
11.5.4	Energieerzeugung durch Akkretion	344
11.6	Übungsaufgaben zu Kapitel 11	347

## **12 Die Verteilung der Materie im Universum** 349

12.1	Die Lokale Gruppe	349
12.1.1	Satelliten der Milchstraße	349
12.1.2	Die Andromeda-Galaxie und ihre Begleiter	351
12.1.3	Die Lokale Gruppe als System	351
12.1.4	Das „Lokale Volumen“	352
12.2	Die räumliche Verteilung von Galaxien	353
12.2.1	Galaxienkataloge	353
12.2.2	Gruppen, Haufen und Superhaufen	354
12.2.3	Die großräumige Struktur der Galaxienverteilung	355
12.2.4	Leuchtkraftfunktion und Massenfunktion von Galaxien	357
12.3	Galaxienhaufen	359
12.3.1	Charakterisierung von Haufen	359
12.3.2	Dynamik von Galaxienhaufen	361
12.3.3	Massenbestimmung	362
12.4	Materie außerhalb von Galaxien	364
12.4.1	Das intergalaktische Medium	364
12.4.2	Das zirkumgalaktische Medium	365
12.4.3	Gas in Gruppen und Haufen	367
12.5	Gravitationslinsen	368
12.6	Erscheinungsformen der Materie	371
12.6.1	Inventur der kosmischen Materiekomponenten	371
12.6.2	Was ist Dunkle Materie?	373
12.6.3	Dunkle Materie und Galaxien	375
12.7	Übungsaufgaben zu Kapitel 12	377

## **13 Kosmologie** 379

13.1	Das empirische Fundament der Kosmologie	379
13.1.1	Die Expansion des Universums	379
13.1.2	Die kosmische Hintergrundstrahlung	380
13.1.3	Olbers' Paradoxon	382
13.1.4	Das kosmologische Prinzip	383
13.2	Weltmodelle	383
13.2.1	Vorbetrachtung im Rahmen der klassischen Mechanik	384
13.2.2	Raumkrümmung	385
13.2.3	Grundgleichungen der Kosmologie	387

- 13.2.4 Spezielle Lösungen der Friedmann-Gleichung 389
- 13.2.5 Rotverschiebung und Distanzen 391
- 13.2.6 Rotverschiebung und kosmische Zeit 393
- 13.3 Bestimmung der kosmologischen Parameter 394
  - 13.3.1 Expansionsrate 394
  - 13.3.2 Materie- und Energiedichte 395
  - 13.3.3 Dunkle Energie 396
  - 13.3.4 Das Alter des Universums 399
- 13.4 Der Urknall und das frühe Universum 399
  - 13.4.1 Bausteine des Kosmos 400
  - 13.4.2 Zeitabhängigkeit der kosmologischen Parameter 400
  - 13.4.3 Die Temperatur des Universums 401
  - 13.4.4 Der Hochenergielosmos; Inflation 402
  - 13.4.5 Entstehung der leichten Elemente 405
  - 13.4.6 Die Entkopplung von Strahlung und Materie 406
- 13.5 Übungsaufgaben zu Kapitel 13 407

## **14 Entstehung und Entwicklung von Galaxien 409**

- 14.1 Strukturbildung im Universum 409
  - 14.1.1 Kosmische Dichtefluktuationen 409
  - 14.1.2 Wachstum von Dichtekontrasten 411
  - 14.1.3 Kollaps zu Halos und Galaxien 412
  - 14.1.4 Ausbildung der großräumigen Struktur 414
- 14.2 Populationsstatistik für kosmische Epochen 416
  - 14.2.1 Galaxien im jungen Universum 416
  - 14.2.2 Stellare Massendichte 419
  - 14.2.3 Die kosmische Sternentstehungsrate 419
  - 14.2.4 Kernaktivität und das Wachstum Schwarzer Löcher 422
- 14.3 Entwicklungsprozesse in Galaxien 424
  - 14.3.1 Einfache Modelle der Galaxienentwicklung 424
  - 14.3.2 Materiekreislauf und chemische Häufigkeiten 425
  - 14.3.3 Strukturelle Entwicklung 429
  - 14.3.4 Wechselwirkungen und Galaxienverschmelzung 431
  - 14.3.5 Rückkopplungseffekte 435
- 14.4 Galaxienentstehung im kosmologischen Kontext 437
  - 14.4.1 Hierarchisches Wachstum 437
  - 14.4.2 Was bestimmt die Struktur einer Galaxie? 439
  - 14.4.3 Selbstregulierung 441
  - 14.4.4 Die ersten Sterne 443
  - 14.4.5 Die Zukunft der Galaxien 445
- 14.5 Übungsaufgaben 446

## **Anhang 449**

- A Lösungen der Übungsaufgaben 449
- B Weiterführende Literatur 452
  - B.1 Periodika 452
    - B.1.1 Allgemeinverständliche Zeitschriften: 452
    - B.1.2 Fachzeitschriften (in englischer Sprache, Open Access, nur Online): 452
    - B.1.3 Jahrbücher: 452

- B.2 Nachschlagewerke 452
- B.3 Lehrbücher 453
- C Astronomische Seiten im Internet 454
- D Quellennachweis für Abbildungen und Tabellen 455
- E Physikalische Konstanten und Einheiten 458
  - E.1 Konstanten: 458
  - E.2 Einheiten: 458
- F Astronomische Daten 459
  - F.1 Sonne: 459
  - F.2 Erde: 459
  - F.3 Jupiter: 459
  - F.4 Entfernungen und Entfernungsmäße: 459
  - F.5 Parameter von Hauptreihensternen (gerundet): 459
- Index 460**