

Inhaltsverzeichnis

Vorwort zur sechsten Auflage xv

1	Physikalische Grundlagen	1
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
2	Astronomische Instrumente und Beobachtungstechniken	33
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
3	Das Sonnensystem	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 Monden 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

4	Erde und Mond	95
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
5	Die Sonne	119
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
6	Sterne	145
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
7	Entstehung und Entwicklung von Sternen	179
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	Weißer 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

8 Extrasolare Planetensysteme 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 Planetesimale 232
 - 8.3.3 Planetenbildung 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

9 Interstellare Materie 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 Hochenergiekosmos; 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 Entfernungsmaße:	459
F.5	Parameter von Hauptreihensternen (gerundet):	459
Index		460