

Inhaltsverzeichnis

Vorwort zur Fünften Auflage XV

Aus dem Vorwort zur Ersten Auflage XVII

1	Bewegung von Himmelskörpern	1
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
4	Das Sonnensystem	101
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 Morden 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
5	Charakteristische Beobachtungsgrößen von Sternen	137
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 Schwerkraftbeschleunigung	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
6	Die Außenschichten von Sonne und Sternen	171
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

7	Innerer Aufbau der Sterne	205
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	Weisse 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
8	Sternentstehung und Sternentwicklung	235
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	Weisse 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	Röntgendifoppelsterne	270
8.6.5	Zur Entwicklung enger Doppelsternsysteme	272
8.7	Übungsaufgaben zu Kapitel 8	273
9	Extrasolare Planetensysteme	275
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	Planetesimalen	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
10	Interstellare Materie	305
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 Staubs 329
 - 10.6 Interstellare Kühlprozesse 330
 - 10.7 Der Materiekreislauf 331
 - 10.8 Übungsaufgaben zu Kapitel 10 332
-
- 11 Das Milchstraßensystem 335**
 - 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 Leuchtkraftfunktion 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 Stöße 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 Zentralellipsoid (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 Entfernungslleiter	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	Leuchtkraftfunktion	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 Entfernung 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