

# Inhaltsverzeichnis

## Vorwort

XIII

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>1</b> | <b>Bewegung von Himmelskörpern</b>           | <b>1</b>  |
| 1.1      | Gravitationsphysik                           | 1         |
| 1.1.1    | Das Gravitationsfeld                         | 1         |
| 1.1.2    | Das Zweikörperproblem – Keplersche Gesetze   | 2         |
| 1.1.3    | Bahnbestimmung und Bahngeschwindigkeit       | 5         |
| 1.1.4    | Roche-Grenze                                 | 6         |
| 1.1.5    | Bemerkung zu Vielteilchensystemen            | 7         |
| 1.1.6    | Starke Gravitationsfelder                    | 7         |
| 1.2      | Koordinatensysteme                           | 8         |
| 1.2.1    | Das Horizontsystem                           | 9         |
| 1.2.2    | Äquatorialsysteme                            | 10        |
| 1.2.3    | Das Ekliptikalsystem                         | 12        |
| 1.2.4    | Das Galaktische System                       | 12        |
| 1.3      | Bewegung der Erdachse und Koordinatensysteme | 12        |
| 1.3.1    | Lunisolar-Präzession                         | 13        |
| 1.3.2    | Die astronomische Nutation                   | 14        |
| 1.3.3    | Die Planetenpräzession                       | 14        |
| 1.3.4    | Koordinaten-Änderung durch Präzession        | 15        |
| 1.4      | Astronomie und Zeit                          | 16        |
| 1.4.1    | Die Sternzeit                                | 16        |
| 1.4.2    | Die wahre Sonnenzeit                         | 16        |
| 1.4.3    | Die mittlere Sonnenzeit                      | 17        |
| 1.4.4    | Ortszeit – Zonenzeit – Weltzeit              | 18        |
| 1.4.5    | Das Jahr                                     | 19        |
| 1.4.6    | Präzisionszeitmessungen                      | 20        |
| 1.5      | Sternörter                                   | 21        |
| 1.5.1    | Sternbilder und Bezeichnungen von Sternen    | 21        |
| 1.5.2    | Die Messung von Sternörtern                  | 21        |
| 1.5.3    | Die Aberration des Lichts                    | 23        |
| 1.6      | Die Parallaxe                                | 24        |
| <b>2</b> | <b>Strahlung</b>                             | <b>27</b> |
| 2.1      | Das elektromagnetische Spektrum              | 27        |
| 2.2      | Astrophysikalische Messgrößen                | 28        |
| 2.2.1    | Intensität und Strahlungsstrom               | 28        |
| 2.2.2    | Die astronomische Magnitudenskala            | 30        |

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| 2.2.3    | Helligkeitssysteme . . . . .                              | 31        |
| 2.2.4    | Farben . . . . .  | 33        |
| 2.2.5    | Weitere Messgrößen . . . . .                              | 33        |
| 2.3      | Elementare Strahlungsprozesse . . . . .                   | 34        |
| 2.3.1    | Emission und Absorption . . . . .                         | 34        |
| 2.3.2    | Hohlraumstrahlung . . . . .                               | 36        |
| 2.3.3    | Spektrallinien . . . . .                                  | 39        |
| 2.3.4    | Synchrotronstrahlung . . . . .                            | 40        |
| 2.4      | Kosmische Teilchen und Gravitationswellen . . . . .       | 41        |
| 2.4.1    | Kosmische Strahlung und Teilchenströme . . . . .          | 41        |
| 2.4.2    | Neutrinos . . . . .                                       | 42        |
| 2.4.3    | Gravitationswellen . . . . .                              | 42        |
| 2.5      | Ausbreitung von Strahlung . . . . .                       | 43        |
| 2.5.1    | Absorption in Materie . . . . .                           | 43        |
| 2.5.2    | Strahlungstransport . . . . .                             | 44        |
| 2.5.3    | Dopplereffekt . . . . .                                   | 45        |
| 2.6      | Auswirkungen der Erdatmosphäre . . . . .                  | 46        |
| 2.6.1    | Atmosphärische Transmission . . . . .                     | 46        |
| 2.6.2    | Refraktion . . . . .                                      | 47        |
| 2.6.3    | Streuung . . . . .  | 49        |
| 2.6.4    | Szintillation und „Seeing“ . . . . .                      | 49        |
| <b>3</b> | <b>Astronomische Instrumente</b> . . . . .                | <b>51</b> |
| 3.1      | Teleskope . . . . .                                       | 51        |
| 3.1.1    | Grundlagen . . . . .                                      | 51        |
| 3.1.2    | Beugung . . . . .   | 54        |
| 3.1.3    | Abbildungsfehler . . . . .                                | 55        |
| 3.1.4    | Auflösungsvermögen . . . . .                              | 56        |
| 3.1.5    | Astronomische Teleskope . . . . .                         | 57        |
| 3.1.6    | Spezielle Teleskoptypen . . . . .                         | 58        |
| 3.2      | Detektoren . . . . .                                      | 60        |
| 3.3      | Beobachtungstechniken . . . . .                           | 62        |
| 3.3.1    | Photometrie . . . . .                                     | 62        |
| 3.3.2    | Spektroskopie . . . . .                                   | 63        |
| 3.3.3    | Adaptive Optik . . . . .                                  | 66        |
| 3.3.4    | Interferometrie . . . . .                                 | 67        |
| 3.3.5    | Elektronische Bildverarbeitung . . . . .                  | 69        |
| 3.4      | Observatorien . . . . .                                   | 70        |
| <b>4</b> | <b>Das Sonnensystem</b> . . . . .                         | <b>73</b> |
| 4.1      | Mitglieder und Dimensionen des Systems . . . . .          | 73        |
| 4.2      | Bahnbewegungen . . . . .                                  | 74        |
| 4.2.1    | Planetenbahnen . . . . .                                  | 74        |
| 4.2.2    | Die Erdbahn . . . . .                                     | 76        |
| 4.2.3    | Bahnen künstlicher Satelliten und Raumfahrzeuge . . . . . | 77        |

|          |  |            |
|----------|--|------------|
| 4.3      | Das System Erde-Mond   | 78         |
| 4.3.1    | Bewegung um die Erde   | 79         |
| 4.3.2    | Bewegung um die Sonne  | 80         |
| 4.3.3    | Rotation des Mondes  | 81         |
| 4.3.4    | Finsternisse   | 82         |
| 4.4      | Physik der Planeten  | 83         |
| 4.4.1    | Energiebilanz und Oberflächentemperaturen                    | 84         |
| 4.4.2    | Stabilität und Zusammensetzung der Atmosphären               | 87         |
| 4.4.3    | Gesamtaufbau   | 87         |
| 4.4.4    | Oberflächenformen terrestrischer Planeten                    | 91         |
| 4.5      | Monde  | 93         |
| 4.6      | Kleine Körper im Sonnensystem                                | 94         |
| 4.6.1    | Asteroiden   | 94         |
| 4.6.2    | Kometen  | 95         |
| 4.6.3    | Trans-Neptun-Objekte   | 97         |
| 4.7      | Zur Entstehung des Sonnensystems                             | 98         |
| 4.7.1    | Forderungen an die Kosmogonie                                | 99         |
| 4.7.2    | Von der protoplanetaren Scheibe zu Planetesimalen            | 99         |
| 4.7.3    | Entstehung der Planeten                                      | 101        |
| 4.7.4    | Katastrophenszenarien  | 102        |
| 4.7.5    | Extrasolare Planeten   | 103        |
| <b>5</b> | <b>Charakteristische Beobachtungsgrößen von Sternen</b>      | <b>105</b> |
| 5.1      | Strahlungsleistung   | 105        |
| 5.1.1    | Die Leuchtkraft  | 105        |
| 5.1.2    | Absolute Helligkeiten  | 106        |
| 5.1.3    | Flächenhelligkeit und Effektivtemperatur                     | 106        |
| 5.2      | Radius, Masse und hieraus abgeleitete Größen                 | 107        |
| 5.2.1    | Sternradien  | 107        |
| 5.2.2    | Masse der Sterne   | 109        |
| 5.2.3    | Mittlere Dichte, Schwerebeschleunigung                       | 111        |
| 5.3      | Spektralklassifikation                                       | 112        |
| 5.3.1    | Definition der Spektralklassen                               | 112        |
| 5.3.2    | Leuchtkraftklassen   | 117        |
| 5.3.3    | Praxis der Spektralklassifikation                            | 118        |
| 5.4      | Rotation der Sterne  | 121        |
| 5.5      | Korrelationen zwischen verschiedenen Messgrößen              | 123        |
| 5.5.1    | Hertzsprung-Russell-Diagramm und Farbdiagramme               | 124        |
| 5.5.2    | Beziehungen zwischen $R$ , $L$ und $M$ für Hauptreihensterne | 127        |
| 5.5.3    | Übersicht über charakteristische Größen von Sternen          | 128        |
| 5.6      | Veränderliche Sterne   | 128        |
| 5.7      | Doppelsterne und Mehrfachsysteme                             | 133        |
| 5.7.1    | Häufigkeiten   | 133        |
| 5.7.2    | Hierarchie   | 133        |
| 5.7.3    | Bedeckungsveränderliche                                      | 134        |

|          |  |            |
|----------|--|------------|
| <b>6</b> | <b>Die Außenschichten von Sonne und Sternen</b>    | <b>135</b> |
| 6.1      | Die Außenschichten der Sonne                       | 135        |
| 6.1.1    | Die Photosphäre                                    | 135        |
| 6.1.2    | Die Chromosphäre                                   | 137        |
| 6.1.3    | Die Korona   | 138        |
| 6.1.4    | Der Sonnenwind                                     | 140        |
| 6.2      | Die Aktivität der Sonne                            | 141        |
| 6.2.1    | Sonnenflecken                                      | 142        |
| 6.2.2    | Andere Aktivitätserscheinungen                     | 145        |
| 6.2.3    | Radio- und Röntgenstrahlung                        | 146        |
| 6.2.4    | Aktivität bei anderen Sternen                      | 148        |
| 6.3      | Stellare Magnetfelder                              | 149        |
| 6.3.1    | Ionisiertes Plasma und Magnetfelder                | 149        |
| 6.3.2    | Stellare Dipolfelder                               | 150        |
| 6.3.3    | Magnetfeld als Energiereservoir                    | 151        |
| 6.4      | Physik der Sternatmosphären                        | 151        |
| 6.4.1    | Schichtung einer Sternatmosphäre                   | 151        |
| 6.4.2    | Modellatmosphären                                  | 154        |
| 6.5      | Analyse von Sternspektren                          | 155        |
| 6.5.1    | Prinzipielles zur Spektralanalyse                  | 155        |
| 6.5.2    | Absorptionsquerschnitt                             | 155        |
| 6.5.3    | Anregung und Ionisation                            | 157        |
| 6.5.4    | Absorptionskoeffizient und Sternspektren           | 159        |
| 6.5.5    | Die chemische Zusammensetzung der Sternatmosphären | 160        |
| <b>7</b> | <b>Innerer Aufbau der Sterne</b>                   | <b>163</b> |
| 7.1      | Grundgleichungen des Sternaufbaues                 | 163        |
| 7.1.1    | Grundlagen   | 163        |
| 7.1.2    | Massenverteilung                                   | 164        |
| 7.1.3    | Mechanisches Gleichgewicht                         | 164        |
| 7.1.4    | Energiesatz  | 164        |
| 7.1.5    | Energietransport                                   | 166        |
| 7.1.6    | Gesamtproblem                                      | 167        |
| 7.2      | Materialfunktionen                                 | 168        |
| 7.2.1    | Die Zustandsgleichung                              | 168        |
| 7.2.2    | Der Absorptionskoeffizient                         | 169        |
| 7.3      | Nukleare Energieerzeugung                          | 170        |
| 7.3.1    | Wasserstoffbrennen                                 | 172        |
| 7.3.2    | Heliumbrennen                                      | 173        |
| 7.3.3    | Kohlenstoff-, Sauerstoff- und Siliziumbrennen      | 174        |
| 7.4      | Einfache Sternmodelle                              | 175        |
| 7.4.1    | Sternmodell für eine Sonnenmasse                   | 175        |
| 7.4.2    | Hauptreihensterne                                  | 176        |
| 7.4.3    | Weißer Zwerge                                      | 178        |
| 7.4.4    | Sterne mit Konvektion und die Hayashi-Linie        | 179        |

|          |  |            |
|----------|--|------------|
| 7.4.5    | Solare und stellare Neutrinos . . . . .            | 181        |
| 7.4.6    | Helio- und Asteroseismologie . . . . .             | 181        |
| <b>8</b> | <b>Sternentstehung und Sternentwicklung</b>        | <b>183</b> |
| 8.1      | Energiereservoir und Zeitskalen . . . . .          | 183        |
| 8.2      | Stern- und Planetenentstehung . . . . .            | 185        |
| 8.2.1    | Gravitativer Kollaps . . . . .                     | 185        |
| 8.2.2    | Von Protosternen zu Protoplaneten . . . . .        | 186        |
| 8.2.3    | Vorhauptreihensterne . . . . .                     | 188        |
| 8.2.4    | Grenzmassen . . . . .                              | 188        |
| 8.2.5    | Braune Zwerge . . . . .                            | 189        |
| 8.3      | Vom Wasserstoffbrennen zum Heliumbrennen . . . . . | 190        |
| 8.3.1    | Heliumbrennen . . . . .                            | 192        |
| 8.3.2    | Pulsationsveränderliche . . . . .                  | 195        |
| 8.4      | Endstadien der Sternentwicklung . . . . .          | 200        |
| 8.4.1    | Späte Phasen der Sternentwicklung . . . . .        | 200        |
| 8.4.2    | Weißer Zwerge . . . . .                            | 201        |
| 8.4.3    | Supernovae . . . . .                               | 202        |
| 8.4.4    | Neutronensterne . . . . .                          | 205        |
| 8.4.5    | Pulsare . . . . .                                  | 206        |
| 8.4.6    | Schwarze Löcher . . . . .                          | 208        |
| 8.5      | Entwicklung in engen Doppelsternsystemen . . . . . | 209        |
| 8.5.1    | Bedeckungsveränderliche . . . . .                  | 209        |
| 8.5.2    | Äquipotentialflächen . . . . .                     | 211        |
| 8.5.3    | Massenaustausch . . . . .                          | 213        |
| 8.5.4    | Novae und Zwergnovae . . . . .                     | 214        |
| 8.5.5    | Röntgendoppelsterne . . . . .                      | 215        |
| <b>9</b> | <b>Das Milchstraßensystem</b>                      | <b>217</b> |
| 9.1      | Entfernungsbestimmung . . . . .                    | 217        |
| 9.1.1    | Trigonometrische Parallaxen . . . . .              | 217        |
| 9.1.2    | Photometrische Parallaxen . . . . .                | 218        |
| 9.1.3    | Sternhaufenparallaxen . . . . .                    | 219        |
| 9.1.4    | Weitere Verfahren . . . . .                        | 219        |
| 9.2      | Stellarstatistik . . . . .                         | 220        |
| 9.2.1    | Leuchtkraftfunktion . . . . .                      | 220        |
| 9.2.2    | Massenfunktion der Sterne . . . . .                | 222        |
| 9.2.3    | Anzahl-Helligkeits-Relation . . . . .              | 222        |
| 9.2.4    | Sternzählungen und Extinktion . . . . .            | 224        |
| 9.3      | Sterne der Sonnenumgebung . . . . .                | 225        |
| 9.4      | Sternhaufen . . . . .                              | 226        |
| 9.4.1    | Offene Sternhaufen . . . . .                       | 226        |
| 9.4.2    | Assoziationen . . . . .                            | 227        |
| 9.4.3    | Kugelsternhaufen . . . . .                         | 228        |
| 9.5      | Rotation der Milchstraße . . . . .                 | 229        |

|           |  |            |
|-----------|--|------------|
| 9.6       | Komponenten des Milchstraßensystems . . . . .            | 234        |
| 9.6.1     | Die galaktische Scheibe und die Spiralarme . . . . .     | 234        |
| 9.6.2     | Der galaktische Halo . . . . .                           | 237        |
| 9.6.3     | Das Zentralellipsoid . . . . .                           | 238        |
| 9.6.4     | Das galaktische Zentrum . . . . .                        | 238        |
| 9.7       | Die Sternpopulationen . . . . .                          | 241        |
| 9.8       | Zur Entstehung und Entwicklung der Milchstraße . . . . . | 243        |
| <b>10</b> | <b>Interstellare Materie</b>                             | <b>245</b> |
| 10.1      | Globale Eigenschaften und Phasen des ISM . . . . .       | 246        |
| 10.2      | Diffuse Wolken . . . . .                                 | 248        |
| 10.2.1    | Die 21 cm-Linie des neutralen Wasserstoffs . . . . .     | 248        |
| 10.2.2    | Beobachtungsergebnisse . . . . .                         | 249        |
| 10.3      | Molekülwolken . . . . .                                  | 251        |
| 10.3.1    | Übersicht über die Ergebnisse . . . . .                  | 253        |
| 10.3.2    | Maser- und Antimaseraktivität . . . . .                  | 255        |
| 10.4      | Emissionsnebel . . . . .                                 | 256        |
| 10.4.1    | Strahlung klassischer H II-Regionen . . . . .            | 256        |
| 10.4.2    | Ausdehnung und Temperatur von H II-Regionen . . . . .    | 258        |
| 10.4.3    | Zeitliche Entwicklung von H II-Gebieten . . . . .        | 260        |
| 10.4.4    | Besondere Emissionsnebel . . . . .                       | 261        |
| 10.5      | Röntgen- und Synchrotronstrahlung des ISM . . . . .      | 263        |
| 10.5.1    | Interstellare Stoßfronten . . . . .                      | 263        |
| 10.5.2    | Diffuse Röntgenstrahlung . . . . .                       | 264        |
| 10.5.3    | Synchrotronstrahlung . . . . .                           | 264        |
| 10.6      | Interstellarer Staub . . . . .                           | 265        |
| 10.6.1    | Interstellare Extinktion . . . . .                       | 266        |
| 10.6.2    | Thermische Strahlung . . . . .                           | 268        |
| 10.6.3    | Herkunft und Zusammensetzung des Staubes . . . . .       | 269        |
| 10.7      | Kühlfunktion und Materiekreislauf des ISM . . . . .      | 270        |
| <b>11</b> | <b>Galaxien</b>  | <b>273</b> |
| 11.1      | Extragalaktische Entfernungsbestimmung . . . . .         | 273        |
| 11.1.1    | Standardkerzen . . . . .                                 | 274        |
| 11.1.2    | Die extragalaktische Entfernungsleiter . . . . .         | 275        |
| 11.1.3    | Die Hubble-Beziehung . . . . .                           | 276        |
| 11.2      | Klassifikation von Galaxien . . . . .                    | 278        |
| 11.3      | Globale Eigenschaften . . . . .                          | 281        |
| 11.3.1    | Lineardimensionen und Leuchtkräfte . . . . .             | 281        |
| 11.3.2    | Farben und Spektren . . . . .                            | 282        |
| 11.3.3    | Massen . . . . .   | 285        |
| 11.4      | Dynamischer Aufbau von Galaxien . . . . .                | 285        |
| 11.4.1    | Zur Dynamik von Sternsystemen . . . . .                  | 285        |
| 11.4.2    | Rotationskurven von Spiralgalaxien . . . . .             | 288        |
| 11.4.3    | Spiralstruktur . . . . .                                 | 290        |
| 11.4.4    | Balkenspiralen . . . . .                                 | 292        |

|           |   |            |
|-----------|---|------------|
| 11.4.5    | Elliptische Galaxien . . . . .                              | 292        |
| 11.4.6    | Schwarze Löcher in Galaxienzentren . . . . .                | 294        |
| 11.5      | Zeitliche Entwicklung von Galaxien . . . . .                | 295        |
| 11.5.1    | Verlauf der Sternentstehung . . . . .                       | 295        |
| 11.5.2    | Materiekreislauf und chemische Entwicklung . . . . .        | 296        |
| 11.5.3    | Leuchtkraftentwicklung . . . . .                            | 297        |
| 11.5.4    | Wechselwirkung zwischen Galaxien . . . . .                  | 297        |
| 11.5.5    | Galaxien im jungen Universum . . . . .                      | 300        |
| 11.6      | Aktive Galaxienkerne und Quasare . . . . .                  | 302        |
| 11.6.1    | Seyfert-Galaxien . . . . .                                  | 302        |
| 11.6.2    | Radiogalaxien . . . . .                                     | 303        |
| 11.6.3    | Quasare . . . . .   | 304        |
| 11.6.4    | Der extragalaktische Röntgenhintergrund . . . . .           | 306        |
| 11.6.5    | Struktur von aktiven Galaxienkernen . . . . .               | 306        |
| 11.6.6    | Energieerzeugung durch Akkretion . . . . .                  | 308        |
| 11.6.7    | Die kosmische Entwicklung der Quasare . . . . .             | 310        |
| <b>12</b> | <b>Die Verteilung der Materie im Universum</b>              | <b>311</b> |
| 12.1      | Die Umgebung der Milchstraße . . . . .                      | 311        |
| 12.1.1    | Die Lokale Gruppe . . . . .                                 | 311        |
| 12.2      | Die räumliche Verteilung von Galaxien . . . . .             | 313        |
| 12.2.1    | Galaxienkataloge . . . . .                                  | 313        |
| 12.2.2    | Gruppen, Haufen, Superhaufen . . . . .                      | 313        |
| 12.2.3    | Großräumige Struktur der Galaxienverteilung . . . . .       | 315        |
| 12.3      | Galaxienstatistik . . . . .                                 | 317        |
| 12.3.1    | Anzahldichte und radiale Verteilung von Galaxien . . . . .  | 317        |
| 12.3.2    | Leuchtkraftfunktion . . . . .                               | 319        |
| 12.3.3    | Entwicklung der Galaxienpopulation . . . . .                | 320        |
| 12.4      | Galaxienhaufen . . . . .                                    | 321        |
| 12.4.1    | Charakterisierung von Haufen . . . . .                      | 321        |
| 12.4.2    | Masse und Stabilität . . . . .                              | 322        |
| 12.4.3    | Zur Entwicklung von Galaxien in Haufen . . . . .            | 325        |
| 12.5      | Dunkle Materie . . . . .                                    | 326        |
| 12.5.1    | Das intergalaktische Medium . . . . .                       | 326        |
| 12.5.2    | Gravitationslinsen . . . . .                                | 327        |
| 12.5.3    | Nicht-baryonische Dunkle Materie . . . . .                  | 329        |
| <b>13</b> | <b>Kosmologie</b>   | <b>331</b> |
| 13.1      | Das empirische Fundament der Kosmologie . . . . .           | 331        |
| 13.1.1    | Die Expansion des Universums . . . . .                      | 331        |
| 13.1.2    | Die kosmische Hintergrundstrahlung . . . . .                | 332        |
| 13.1.3    | Olbers' Paradox . . . . .                                   | 335        |
| 13.1.4    | Das kosmologische Prinzip . . . . .                         | 335        |
| 13.2      | Weltmodelle . . . . .                                       | 336        |
| 13.2.1    | Vorbetrachtung im Rahmen der klassischen Mechanik . . . . . | 336        |

|           |  |            |
|-----------|--|------------|
| 13.2.2    | Zur allgemeinen Relativitätstheorie . . . . .                          | 338        |
| 13.2.3    | Grundgleichungen der Kosmologie . . . . .                              | 341        |
| 13.2.4    | Rotverschiebung und Distanzen . . . . .                                | 345        |
| 13.3      | Kosmologische Parameter . . . . .                                      | 346        |
| 13.3.1    | Expansionsrate und kritische Dichte . . . . .                          | 347        |
| 13.3.2    | Materiedichte . . . . .  | 347        |
| 13.3.3    | Strahlungsdichte . . . . .   | 348        |
| 13.3.4    | Raumkrümmung . . . . .   | 348        |
| 13.3.5    | Die kosmologische Konstante . . . . .                                  | 348        |
| 13.3.6    | Das Alter des Universums . . . . .                                     | 350        |
| 13.4      | Der Urknall und das frühe Universum . . . . .                          | 351        |
| 13.4.1    | Bausteine des Kosmos . . . . .   | 351        |
| 13.4.2    | Zeitabhängigkeit der kosmologischen Parameter . . . . .                | 352        |
| 13.4.3    | Die Temperatur des Universums . . . . .                                | 354        |
| 13.4.4    | Der Hochenergiekosmos; Inflation . . . . .                             | 355        |
| 13.4.5    | Entstehung der leichten Elemente . . . . .                             | 356        |
| 13.4.6    | Die Entkopplung von Strahlung und Materie . . . . .                    | 358        |
| 13.5      | Die Entstehung von Galaxien . . . . .                                  | 359        |
| 13.5.1    | Fluktuationen der Hintergrundstrahlung . . . . .                       | 360        |
| 13.5.2    | Wachstum von Dichtekontrasten . . . . .                                | 361        |
| 13.5.3    | Strukturbildung im Universum . . . . .                                 | 363        |
| 13.5.4    | Kollaps und Galaxienentstehung . . . . .                               | 365        |
| 13.5.5    | Die ersten Sterne . . . . .  | 366        |
| 13.6      | Die Zukunft des Weltalls . . . . .                                     | 367        |
| <b>14</b> | <b>Leben im Weltall?</b>   | <b>369</b> |
| 14.1      | Suche nach Leben . . . . .   | 369        |
| 14.1.1    | Entwicklung von Leben auf der Erde . . . . .                           | 370        |
| 14.1.2    | Suche nach Leben im Sonnensystem . . . . .                             | 370        |
| 14.1.3    | Beobachtungsnachweis extrasolarer Zivilisationen . . . . .             | 371        |
| 14.2      | Zur Wahrscheinlichkeit extrasolaren Lebens: Die Drake-Formel . . . . . | 372        |
| 14.3      | Bemerkungen zur Raumfahrt . . . . .                                    | 373        |
| 14.4      | Das anthropische Prinzip . . . . .                                     | 375        |
|           | <b>Farbtafeln</b>  | <b>377</b> |
|           | <b>Anhang</b>  | <b>393</b> |
|           | Physikalische Konstanten, Einheiten und Notationen . . . . .           | 393        |
|           | Astronomische Daten . . . . .  | 394        |
|           | Übungsaufgaben . . . . .   | 395        |
|           | Lösungen der Übungsaufgaben . . . . .                                  | 403        |
|           | Literatur . . . . .  | 406        |
|           | Abbildungs- und Quellennachweis . . . . .                              | 409        |
|           | <b>Register</b>  | <b>411</b> |