

*Alfred Weigert, Heinrich J. Wendker, Lutz Wisotzki*

# **Astronomie und Astrophysik**

Ein Grundkurs

*4., völlig überarbeitete und erweiterte Auflage*



**WILEY-  
VCH**

WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA

# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b>	<b>XIII</b>
<b>1 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 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>