

---

# Einführung in Astronomie und Astrophysik

---

Arnold Hanslmeier

# Einführung in Astronomie und Astrophysik

4. Auflage

 Springer Spektrum

Arnold Hanslmeier  
Institut für Physik, Universität Graz  
Graz, Österreich

ISBN 978-3-662-60412-0      ISBN 978-3-662-60413-7 (eBook)  
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-60413-7>

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

© Springer-Verlag GmbH Deutschland, ein Teil von Springer Nature 2002, 2007, 2014, 2020

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag, noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Planung/Lektorat: Margit Maly

Springer Spektrum ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer-Verlag GmbH, DE und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany

---

## Vorwort

Diese Buch erscheint nun in der vierten Auflage. Moderne Astrophysik wird heute auf nahezu allen Wellenlängen betrieben; das gesamte elektromagnetische Spektrum, von den Gamma-Strahlen bis hin zu Radiowellen liefert Information über astronomische Objekte. Wir können bis zu einem Zeitpunkt beobachten, als das Universum etwa 400 000 Jahre alt war. Je weiter wir in die Tiefe des Universums blicken, desto mehr beobachten wir in dessen Vergangenheit. Die Erforschung der frühen Phasen des Universums geht einher mit modernen Theorien der Physik, so beispielsweise der Vereinheitlichung der vier Grundkräfte, oder dem Versuch die Quantenphysik mit der Relativitätstheorie zu vereinen. Mit neuen Satellitenmissionen ist es möglich, bisher unvorstellbar genaue Daten von etwa 1 % aller Sterne der Milchstraße zu bekommen. Die Entdeckung neuer Planeten außerhalb des Sonnensystems ist zur Routine geworden. Eine Sensation war die erste direkte Beobachtung von Gravitationswellen. Damit eröffnet sich quasi ein neues Beobachtungsfenster für die Astrophysik.

Trotz der großen Fortschritte gibt es aber auch immer noch viele offene Fragen. Wie entstand Leben auf unserem Planeten? Gibt es auf anderen Objekten des Sonnensystems bzw. auf Exoplaneten Leben? Ist unser Sonnensystem einzigartig? Wie kann man die Dunkle Materie bzw. die Dunkle Energie erklären?

Das Buch umfasst 17 Kapitel beginnend mit klassischer Astronomie und einem kurzen Überblick über die Geschichte der Astronomie. Nach der Beschreibung astronomischer Beobachtungsinstrumente werden die Objekte des Sonnensystems vorgestellt, sowie die Physik der Sonne. Dann folgen Kapitel über Zustandsgrößen der Sterne, deren Aufbau und Entwicklung. In den nächsten Kapiteln geht es um die Beschreibung der interstellaren Materie und des Aufbaus unserer Milchstraße sowie von Galaxien allgemein. Dann folgt das Kapitel über Kosmologie in dem auch kurz neue physikalische Theorien skizziert werden, wie z. B. die Schleifengravitation und die Stringtheorien. Das Kapitel über Astrobiologie geht auf die Suche nach habitablen Planeten ein. Ein Besonderheit dieses Buches ist eine kurze Einführung über gängige mathematische Methoden, die in der wissenschaftlichen Praxis verwendet werden. Die Programme sind alle in der Programmiersprache Python angegeben, welche frei zugänglich ist, und inzwischen in der Astrophysik eine enorme Verbreitung gefunden hat.

Ich bedanke mich bei allen Kolleginnen und Kollegen die zum Zustandekommen dieses Buches beigetragen haben. Besonderen Dank möchte ich dem Springer Verlag aussprechen für die ausgezeichnete Zusammenarbeit, besonders mit Frau Meike Barth und Frau Margit Maly. Viele Studierende meiner Vorlesungen gaben Verbesserungsvorschläge, ebenso zahlreiche Emails von Leserinnen und Lesern.

Meiner Lebensgefährtin Anita und meinen Kindern danke ich für deren Geduld und Verständnis.

Graz  
Juli 2020

Arnold Hanslmeier

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	1
<b>2</b>	<b>Sphärische Astronomie</b> .....	5
2.1	Koordinatensysteme .....	6
2.1.1	Grundprinzip zur Erstellung von Koordinatensystemen .....	6
2.1.2	Horizontsystem .....	6
2.1.3	Äquatorsystem .....	8
2.1.4	Ekliptiksystem .....	10
2.1.5	Galaktisches System .....	10
2.1.6	Transformationen der Systeme .....	11
2.2	Die Zeit .....	12
2.2.1	Definitionen, Sonnenzeit und Sternzeit .....	12
2.2.2	Kalender .....	15
2.2.3	Der Stern von Bethlehem .....	19
2.3	Sternpositionen .....	20
2.3.1	Sternbilder und Tierkreis .....	20
2.3.2	Refraktion .....	21
2.3.3	Aberration .....	23
2.3.4	Parallaxe .....	24
2.3.5	Präzession, Nutation .....	27
2.3.6	Sternkataloge .....	28
2.3.7	Lichtablenkung und Exoplaneten .....	31
2.4	Orts- und Zeitbestimmung .....	32
2.4.1	Geographische Breite $\Phi$ .....	33
2.4.2	Zeitbestimmung .....	33
2.4.3	Moderne Navigationssysteme .....	35
2.5	Weiterführende Literatur .....	36
	Aufgaben .....	36

<b>3</b>	<b>Geschichte der Astronomie</b>	39
3.1	Astronomie der Vor- und Frühgeschichte	39
3.1.1	Steinzeit	40
3.1.2	Ägypten, Mesopotamien	41
3.1.3	China	43
3.1.4	Mittel- und Nordamerika	44
3.1.5	Altes Europa	44
3.2	Astronomie der Griechen	45
3.2.1	Philosophische Überlegungen	45
3.2.2	Erste Messungen	46
3.2.3	Navigation	48
3.3	Astronomie im Mittelalter und Neuzeit	49
3.3.1	Astronomie der Araber	50
3.3.2	Mittelalter	50
3.3.3	Geozentrisch → heliozentrisch	51
3.3.4	Kepler, Galilei, Newton	53
3.3.5	Himmelsmechanik	57
3.4	Moderne Astrophysik und Kosmologie	58
3.4.1	Die Entdeckung weiterer Objekte im Sonnensystem	58
3.4.2	Astrophysik	59
3.4.3	Das Universum	61
3.4.4	Schlussbemerkung	62
3.4.5	Was ist Materie?	63
3.5	Weiterführende Literatur	64
<b>4</b>	<b>Himmelsmechanik</b>	65
4.1	Mond- und Planetenbahnen	66
4.1.1	Beschreibung von Planetenbahnen, Bahnelemente	66
4.1.2	Ephemeridenrechnung	68
4.1.3	Scheinbare Planetenbahnen am Himmel	70
4.1.4	Periheldrehung	72
4.1.5	Mondbahn	73
4.1.6	Exoplaneten–Tidal locking	74
4.1.7	Gezeiten	75
4.1.8	Vergleich von Gezeitenkraft des Mondes und Kapillarwirkung in Pflanzen	77
4.2	Zweikörperproblem	78
4.2.1	Definition des Zweikörperproblems	78
4.2.2	Drehimpuls, Flächensatz	80
4.2.3	Bahnform	80
4.2.4	Energiesatz	81
4.2.5	Drittes Keplersgesetz	84

4.3	N-Körperproblem	84
4.3.1	Das allgemeine N-Körperproblem	84
4.3.2	Das allgemeine Dreikörperproblem	86
4.3.3	Eingeschränktes Dreikörperproblem	87
4.3.4	Das Runge-Kutta-Verfahrens zur numerischen Integration	90
4.3.5	Stabilität	91
4.4	Vielteilchensysteme	92
4.4.1	Virialsatz und Entfernung einer interstellaren Gaswolke	93
4.4.2	Ergodisches Verhalten	94
4.5	Raumflug	95
4.5.1	Entweichgeschwindigkeiten	95
4.5.2	Raketenformel	97
4.5.3	Satellit im Erdorbit	102
4.5.4	Einflüsse auf Satellitenbahnen	103
4.6	Resonanzen und Chaos im Planetensystem	104
4.6.1	Chaos	104
4.6.2	Resonanzen im Sonnensystem	105
4.6.3	Migration von Planeten	105
4.6.4	Chaos im Sonnensystem	106
4.7	Finsternisse	107
4.7.1	Mondfinsternisse	107
4.7.2	Sonnenfinsternisse	108
4.7.3	Planetentransits	112
4.8	Weiterführende Literatur	114
	Aufgaben	115
<b>5</b>	<b>Astronomische Instrumente</b>	<b>117</b>
5.1	Teleskope	117
5.1.1	Grundlegende Eigenschaften	118
5.1.2	Seeing und große Teleskope	122
5.1.3	Abbildungsfehler	123
5.1.4	Teleskoptypen	124
5.1.5	Teleskopmontierungen	126
5.1.6	Robotische Teleskope	128
5.2	Moderne optische Teleskope	130
5.2.1	Moderne erdgebundene Teleskope	130
5.2.2	Das Hubble-Space-Teleskop und andere Projekte	131
5.3	Detektoren	134
5.3.1	Menschliches Auge und Photographie	134
5.3.2	CCD	135
5.3.3	CMOS	136



5.3.4	Back-illuminated sensor	137
5.3.5	Speckle-Interferometrie	137
5.3.6	Bildkorrektur	137
5.4	Nicht-optische Teleskope	138
5.4.1	Radioteleskope	138
5.4.2	Infrarotteleskope	141
5.4.3	Röntgenteleskope	143
5.5	Spektroskopie	145
5.5.1	Allgemeines zur Spektroskopie	145
5.5.2	Typen von Spektrographen	147
5.6	Strahlung und Spektrum	148
5.6.1	Das elektromagnetische Spektrum	148
5.6.2	Thermische Strahlung	149
5.6.3	Emissions- und Absorptionslinien	151
5.6.4	Polarisiertes Licht	154
5.6.5	Magnetfelder und Strahlung	155
5.6.6	Einstein-Koeffizienten	157
5.6.7	Kohärenz	158
5.7	Weiterführende Literatur	158
	Aufgaben	159
<b>6</b>	<b>Physik der Körper des Sonnensystems</b>	<b>161</b>
6.1	Übersicht	161
6.1.1	Sonne und Planeten	162
6.1.2	Ein Modell des Sonnensystems	163
6.1.3	Das Sonnensystem von außen gesehen	164
6.2	Eigenschaften der Planeten	165
6.2.1	Rotationsdauer	165
6.2.2	Massenverteilung	166
6.2.3	Albedo	166
6.2.4	Spektrum	167
6.2.5	Globaler Energiehaushalt	168
6.2.6	Hydrostatisches Gleichgewicht	169
6.2.7	Stabilität eines Satelliten, Roche-Grenze	170
6.2.8	Planetenatmosphären	171
6.3	Erde und Mond	173
6.3.1	Aufbau der Erde	173
6.3.2	Geologische und biologische Entwicklung	175
6.3.3	Erdmagnetfeld	175
6.3.4	Erdatmosphäre	178
6.3.5	Der Mond–Allgemeines	183
6.3.6	Entstehung des Mondes	187

---

6.3.7	Das Mondinnere	188
6.3.8	Die Rückseite des Mondes	189
6.4	Merkur und Venus	190
6.4.1	Merkur–Grunddaten	190
6.4.2	Die Rotation des Merkur	191
6.4.3	Die Oberfläche des Merkur	192
6.4.4	Venus–Grunddaten	193
6.4.5	Oberfläche der Venus	194
6.4.6	Atmosphäre der Venus	196
6.4.7	Venus und der Klimawandel auf der Erde	198
6.5	Mars	199
6.5.1	Mars–Allgemeine Daten	200
6.5.2	Marsoberfläche	200
6.5.3	Marsatmosphäre	205
6.5.4	Mars – Terraforming?	206
6.5.5	Marsmonde	208
6.6	Jupiter und Saturn	209
6.6.1	Jupiter–Allgemeine Eigenschaften	209
6.6.2	Raumfahrtmissionen zum Jupiter	210
6.6.3	Aufbau der Riesenplaneten	211
6.6.4	Jupiteratmosphäre	212
6.6.5	Magnetosphäre des Jupiters	213
6.6.6	Jupiterringe und Jupitermonde	215
6.6.7	Saturn–Allgemeine Daten	219
6.6.8	Saturnringe	220
6.6.9	Saturnmonde	221
6.7	Uranus und Neptun	224
6.7.1	Entdeckung des Uranus und Neptun	225
6.7.2	Ringe und Satelliten von Uranus und Neptun	225
6.8	Zwergplaneten und Asteroiden	228
6.8.1	Pluto	228
6.8.2	Ceres und weitere Zwergplaneten	230
6.8.3	Asteroiden: Benennung und Typen	232
6.8.4	Verteilung der Asteroiden	235
6.8.5	NEOs	237
6.9	Kometen	240
6.9.1	Kometen: Grundeigenschaften	240
6.9.2	Kuipergürtel und Oort’sche Wolke	244
6.9.3	Sungrazer	246
6.10	Meteoroiden	247
6.10.1	Nomenklatur	247
6.10.2	Klassifikation	248

6.10.3	Interplanetare Materie .....	249
6.11	Entstehung des Sonnensystems .....	250
6.11.1	Extrasolare Planetensysteme .....	250
6.11.2	Theorien der Entstehung .....	251
6.11.3	Protoplanetarer Nebel .....	253
6.12	Weiterführende Literatur .....	254
	Aufgaben .....	254
<b>7</b>	<b>Die Sonne</b> .....	<b>257</b>
7.1	Grunddaten und Koordinaten .....	257
7.1.1	Grunddaten .....	258
7.1.2	Koordinaten .....	258
7.1.3	Entfernung .....	259
7.1.4	Sonnenmasse .....	260
7.1.5	Radius .....	261
7.1.6	Leuchtkraft .....	261
7.1.7	Effektive Temperatur .....	262
7.1.8	Sonnenbeobachtung .....	262
7.2	Der Aufbau der Sonne, die ruhige Sonne .....	265
7.2.1	Genereller Aufbau der Sonne .....	265
7.2.2	Sonneninneres .....	266
7.2.3	Photosphäre .....	267
7.2.4	Chromosphäre .....	268
7.2.5	Korona .....	271
7.3	Die aktive Sonne .....	272
7.3.1	Sonnenflecken .....	272
7.3.2	Fackeln .....	278
7.3.3	Protuberanzen .....	279
7.3.4	Flares und koronale Massenauswürfe .....	279
7.3.5	Die Radiostrahlung .....	283
7.3.6	Röntgenstrahlung der Korona .....	286
7.4	Das Weltraumwetter–Solarerterrestrische Beziehungen .....	289
7.4.1	Der Sonnenaktivitätszyklus .....	289
7.4.2	Zeitreihen, Periodenanalyse .....	290
7.4.3	Die solare Irradianz .....	291
7.5	Helioseismologie .....	295
7.5.1	Mathematische Beschreibung .....	296
7.5.2	Beobachtungsergebnisse .....	299
7.6	Magnetohydrodynamik der Sonne .....	301
7.6.1	Maxwell-Gleichungen .....	301
7.6.2	Induktionsgleichung .....	303

7.6.3	Plasmagleichungen	303
7.6.4	Bewegung eines Teilchens in einem Magnetfeld	305
7.7	Weiterführende Literatur	309
	Aufgaben	309
<b>8</b>	<b>Zustandsgrößen der Sterne</b>	<b>311</b>
8.1	Entfernung, Helligkeiten	311
8.1.1	Scheinbare Helligkeit	312
8.1.2	Entfernung	313
8.1.3	Absolute Helligkeit, Entfernungsmodul	314
8.1.4	Bolometrische Helligkeit	315
8.2	Sternradien	316
8.2.1	Grundprinzip	317
8.2.2	Sterninterferometer	317
8.2.3	Sternbedeckungen durch den Mond	318
8.2.4	Bedeckungsveränderliche Sterne	319
8.2.5	Speckle-Interferometrie	321
8.2.6	Microensing	322
8.3	Masse	322
8.3.1	Drittes Keplergesetz	322
8.3.2	Gravitationsrotverschiebung	324
8.3.3	Microensing	325
8.3.4	Abgeleitete Größen	325
8.4	Sterntemperaturen	326
8.4.1	Sterne als Schwarze Körper	326
8.4.2	Weitere Temperaturbegriffe	327
8.5	Klassifikation der Sterne, HRD	327
8.5.1	Spektralklassifikation	328
8.5.2	Das Hertzsprung-Russell-Diagramm	330
8.5.3	Leuchtkraftklassen	333
8.5.4	Balmersprung	335
8.5.5	Sternpopulation und FHD	336
8.5.6	Die Masse-Leuchtkraft-Beziehung	337
8.6	Rotation und Magnetfelder	337
8.6.1	Rotation	338
8.6.2	Magnetfelder	340
8.7	Besondere Sterne	341
8.7.1	Helle Sterne	341
8.7.2	Algol und Bedeckungsveränderliche	341
8.8	Weiterführende Literatur	344
	Aufgaben	344

<b>9</b>	<b>Sternatmosphären</b> .....	347
9.1	Quantenmechanische Beschreibung .....	348
9.1.1	Beschreibung eines Teilchens .....	348
9.1.2	Schrödinger-Gleichung .....	348
9.1.3	Wellenfunktionen für Wasserstoff .....	349
9.1.4	Quantenzahlen .....	352
9.1.5	Elektronenkonfigurationen .....	353
9.1.6	Wasserstoff-Feinstruktur .....	354
9.1.7	Komplexe Atome .....	355
9.2	Anregung und Ionisation .....	356
9.2.1	Thermodynamisches Gleichgewicht .....	356
9.2.2	Boltzmann-Formel .....	357
9.2.3	Saha-Gleichung .....	359
9.3	Strahlungstransport .....	360
9.3.1	Transportgleichung .....	360
9.3.2	Lösungen der Transportgleichung .....	364
9.4	Absorptionskoeffizienten .....	367
9.4.1	Kontinuierliche Absorption .....	367
9.4.2	Streuung .....	368
9.4.3	Theorie der Absorptionslinien .....	369
9.5	Linienprofile .....	371
9.5.1	Dämpfung .....	371
9.5.2	Dopplerverbreiterung .....	373
9.5.3	Voigt-Profil .....	374
9.6	Analyse von Sternspektren .....	375
9.6.1	Wachstumskurven .....	376
9.6.2	Quantitative Spektralanalyse .....	377
9.7	Sternatmosphärenmodelle .....	378
9.7.1	Vergleich: Sonne und Wega .....	378
9.7.2	Numerische Lösungen .....	380
9.8	Asteroseismologie .....	382
9.8.1	Beobachtungen .....	382
9.8.2	Typen von Wellen .....	384
9.9	Weiterführende Literatur .....	387
	Aufgaben .....	387
<b>10</b>	<b>Sternaufbau</b> .....	389
10.1	Physikalische Grundgesetze des Sternaufbaus .....	389
10.1.1	Hydrostatisches Gleichgewicht .....	390
10.1.2	Bewegungsgleichung bei sphärischer Symmetrie .....	392
10.1.3	Allgemeine Relativitätstheorie .....	394

10.1.4	Zustandsgleichung .....	395
10.1.5	Entartung .....	397
10.1.6	Zusammenfassung: Zustandsgleichung .....	399
10.2	Energietransport .....	399
10.2.1	Konvektion .....	400
10.2.2	Opazität .....	403
10.3	Energiequellen .....	405
10.3.1	Thermonukleare Energieerzeugung .....	407
10.3.2	Neutrinos .....	413
10.4	Spezielle Sternmodelle .....	415
10.4.1	Polytrope Modelle .....	415
10.4.2	Homologe Gleichungen .....	418
10.5	Weiterführende Literatur .....	419
	Aufgaben .....	420
<b>11</b>	<b>Sternentwicklung</b> .....	<b>421</b>
11.1	Sternentstehung und -entwicklung .....	422
11.1.1	Protosterne .....	422
11.1.2	Kollaps eines sonnenähnlichen Sterns .....	424
11.1.3	Das Alter der Sterne .....	425
11.1.4	Entwicklung eines Sterns mit einer Sonnenmasse .....	426
11.2	Vergleich der Sternentwicklung .....	429
11.2.1	Massearme Sterne .....	429
11.2.2	Massereiche Sterne .....	429
11.3	Weißer Zwerge .....	431
11.3.1	Allgemeine Eigenschaften .....	431
11.3.2	Allgemeine Relativitätstheorie und Weißer Zwerge .....	433
11.3.3	Magnetfelder .....	433
11.3.4	Brauner Zwerge .....	434
11.4	Neutronensterne .....	434
11.4.1	Bildung von Neutronensternen .....	434
11.4.2	Pulsare .....	436
11.5	Supernovae .....	440
11.5.1	Klassifizierung .....	440
11.5.2	Kernsynthese während einer SN .....	442
11.5.3	Beobachtete Supernovae .....	443
11.6	Schwarze Löcher .....	445
11.6.1	Allgemeines .....	446
11.6.2	Kandidaten für Schwarze Löcher .....	447
11.6.3	Quantentheorie Schwarzer Löcher .....	448
11.6.4	Akkretion .....	450

11.7	Gamma Ray Bursts	451
11.7.1	Eigenschaften der GRB	451
11.7.2	Erklärung der GRB	451
11.8	Veränderliche Sterne	453
11.8.1	Allgemeines	453
11.8.2	Pulsationsveränderliche	456
11.8.3	Halbregelmäßig Veränderliche	459
11.8.4	Eruptive Veränderliche	460
11.8.5	Pekuliare Sterne	463
11.8.6	Planetarische Nebel	463
11.9	Sternaktivität	465
11.9.1	Sternaktivität und Konvektion	465
11.9.2	Masseverlust von Sternen	467
11.10	Weiterführende Literatur	469
	Aufgaben	469
<b>12</b>	<b>Interstellare Materie</b>	<b>473</b>
12.1	Entdeckung, allgemeine Eigenschaften	473
12.1.1	Entdeckung der interstellaren Materie	474
12.1.2	Zusammensetzung der interstellaren Materie	474
12.2	Interstellarer Staub	475
12.2.1	Extinktion	475
12.2.2	Streuung	477
12.2.3	Polarisation	478
12.3	Interstellares Gas	479
12.3.1	Neutraler Wasserstoff	479
12.3.2	Emissionsnebel, H-II-Regionen	481
12.3.3	Besondere Emissionsnebel	484
12.3.4	Lichtechos	485
12.4	Kosmische Strahlung	486
12.4.1	Entdeckung	486
12.4.2	Zusammensetzung und Herkunft	486
12.4.3	Magnetfelder und geladene Teilchen	486
12.4.4	Sonnenaktivität und kosmische Strahlung	487
12.5	Weiterführende Literatur	488
	Aufgaben	488
<b>13</b>	<b>Die Galaxis</b>	<b>489</b>
13.1	Methoden zur Entfernungsbestimmung	490
13.1.1	Trigonometrische Methoden	490
13.1.2	Photometrische Standardkerzen	492

---

13.2	Der Aufbau unserer Milchstraße	494
13.2.1	Grober Aufbau	494
13.2.2	Galaktische Koordinaten	495
13.2.3	Verteilung der Sterne	497
13.2.4	Galaxis: Komponenten	499
13.2.5	Lokale Sonnenumgebung, Local Bubble	501
13.2.6	Stellarstatistik	502
13.3	Sternpopulationen und Dichtewellen	503
13.3.1	Sternpopulationen	503
13.3.2	Dichtewellen, Spiralstruktur	504
13.4	Rotation der Galaxis	506
13.4.1	Radial- und Tangentialbewegung	506
13.4.2	Galaktische Rotation, LSR	507
13.4.3	Galaktische Rotationskurve	509
13.5	Dunkle Materie in der Milchstraße	514
13.5.1	Die Natur der Dunklen Materie	515
13.5.2	Galaktisches Microlensing	515
13.6	Galaktisches Zentrum	516
13.6.1	Definition des Zentrums	516
13.6.2	Zentraler Sternhaufen und Schwarzes Loch	517
13.7	Entwicklung der Galaxis	518
13.7.1	Theorien zur Entstehung der Spiralarme	518
13.7.2	Alter der Galaxis und Magnetfeld	518
13.8	Weiterführende Literatur	520
	Aufgaben	521
<b>14</b>	<b>Extragalaktische Systeme</b>	<b>523</b>
14.1	Klassifikation	523
14.1.1	Verzeichnisse	524
14.1.2	Hubble-Klassifikation	526
14.1.3	Aktive Galaxien	529
14.1.4	Andere Klassifikationen von Galaxien	530
14.2	Besprechung der einzelnen Typen	530
14.2.1	Elliptische Galaxien, E	530
14.2.2	Spiralgalaxien	532
14.2.3	Irreguläre Galaxien	533
14.2.4	Verteilung auf die Typen	534
14.2.5	Integrale Eigenschaften und Durchmesser	536
14.2.6	Die Magellan'schen Wolken	537
14.2.7	Populationssynthese	538



14.3	Supermassive Schwarze Löcher	539
14.3.1	Detektion von SMBHs	539
14.3.2	SMBHs und Galaxieneigenschaften	540
14.4	Aktive Galaxien	541
14.4.1	Aktive Galaxienkerne	541
14.4.2	Radiogalaxien	543
14.4.3	Quasare	547
14.4.4	Galaxien mit hoher Rotverschiebung	552
14.4.5	Blazare	552
14.5	Galaxienhaufen	552
14.5.1	Die Lokale Gruppe	552
14.5.2	Abell-Verzeichnis von Galaxienhaufen	553
14.5.3	Galaxienkollisionen	553
14.5.4	Superhaufen	556
14.5.5	Besondere Galaxienhaufen	556
14.6	Weiterführende Literatur	558
	Aufgaben	560
<b>15</b>	<b>Kosmologie</b>	<b>561</b>
15.1	Expansion des Universums	562
15.1.1	Blick in die Vergangenheit	562
15.1.2	Olbers-Paradoxon	563
15.1.3	Zählungen	563
15.1.4	Die Galaxienflucht	564
15.1.5	Das Alter des Universums	565
15.1.6	Homogenität und Isotropie	566
15.1.7	Methoden der Entfernungbestimmung	567
15.2	Newton'sche Kosmologie	568
15.2.1	Expansion	568
15.2.2	Bewegungsgleichung	569
15.2.3	Energieerhaltung	569
15.3	Relativitätstheorie	570
15.3.1	Spezielle Relativitätstheorie	571
15.3.2	Vierervektoren, Transformationen	574
15.3.3	Allgemeine Relativitätstheorie	576
15.3.4	Materie und Raum-Zeit-Krümmung	577
15.3.5	Metrik des Raumes	579
15.3.6	Friedmann-Lemaître-Gleichungen	582
15.3.7	Gravitationswellen	586
15.4	Dunkle Energie, beschleunigte Expansion	587
15.4.1	Beobachtungen	587
15.4.2	Dunkle Energie	588

15.5	Das frühe Universum	590
15.5.1	Urknall-Beobachtungshinweise	590
15.5.2	Sunyaev-Zel'dovich-Effekt	591
15.5.3	Akustische Oszillationen	595
15.5.4	Bildung der Teilchen	596
15.5.5	Quarks und Quark-Gluonen-Plasma	597
15.5.6	Teilchenerzeugung	598
15.6	Symmetriebrechung im frühen Universum	600
15.6.1	Die vier Naturkräfte	600
15.6.2	Das frühe Universum	602
15.6.3	Inflationäres Universum	602
15.6.4	Stringtheorie	605
15.6.5	Quantenschaum	609
15.6.6	Quantenvakuum	609
15.6.7	Schleifengravitation, Quantum Loop Gravity	610
15.6.8	Die ersten Sterne	611
15.6.9	Paralleluniversen	612
15.7	Zeitskala	612
15.8	Weiterführende Literatur	613
	Aufgaben	614
<b>16</b>	<b>Astrobiologie</b>	<b>617</b>
16.1	Leben auf der Erde und im Sonnensystem	617
16.1.1	Was ist Leben?	617
16.1.2	Leben auf der Erde	618
16.1.3	Schutzschirme für Leben auf der Erde	620
16.1.4	Leben im Sonnensystem	621
16.2	Entdeckung extrasolarer Planetensysteme	621
16.2.1	Astrometrie	621
16.2.2	Radialgeschwindigkeitsmethode	622
16.2.3	Lichtkurven, Transitbeobachtungen	622
16.2.4	Microlensing	623
16.2.5	Einstein-Beaming	623
16.2.6	Erdgebundene Beobachtungen	624
16.3	Host Stars	625
16.3.1	Hertzsprung-Russell-Diagramm	625
16.3.2	Habitable Zone	627
16.3.3	Beispiele	628
16.4	Weiterführende Literatur	631
	Aufgaben	631

<b>17</b>	<b>Mathematische Methoden</b>	633
17.1	Python–ein Crashkurs	633
17.1.1	Was ist Python?	633
17.1.2	Ein erstes einfaches Python-Programm	634
17.1.3	Ein Beispiel: Helligkeitsmessungen	635
17.2	Statistik	636
17.2.1	Mittelwerte	636
17.2.2	Verteilungsfunktionen	639
17.2.3	Momente	640
17.3	Kurvenfits und Korrelationsrechnung	642
17.3.1	Anpassen von Kurven, Methode kleinster Quadrate	642
17.3.2	Korrelationen	646
17.4	Differenzialgleichungen	649
17.4.1	Lineare Differenzialgleichungen erster Ordnung	650
17.4.2	Schwingungsgleichung	651
17.4.3	Partielle Differenzialgleichungen	651
17.5	Numerische Mathematik	652
17.5.1	Interpolationspolynome	652
17.5.2	Dividierte Differenzen	653
17.5.3	Newton'sches Interpolationsverfahren	654
17.5.4	Interpolation mit ungleichmäßig verteilten Stützstellen	655
17.5.5	Numerische Differenziation	656
17.5.6	Numerische Integration	658
17.5.7	Numerische Lösung von Differenzialgleichungen	659
17.6	Fouriermethoden	663
17.6.1	Autokorrelation	663
17.6.2	Die schnelle Fourier Transformation, FFT	664
17.6.3	Digitale Filter	665
17.6.4	Fouriertransformationen in der Optik	667
17.7	Vektorrechnung	669
17.7.1	Allgemeines	669
17.7.2	Gradient, Divergenz, Rotation	671
17.7.3	Anwendungen	672
17.8	Splines	672
17.9	Spezielle Softwarepakete	674
17.9.1	Das Programmpaket ephem	674
17.9.2	Berechnung der Lichtkurven von Exoplanetentransits	675
17.9.3	Bildverarbeitung–image processing	676
17.9.4	Das Dateiformat fits	677
17.10	Weiterführende Literatur	679
	Aufgaben	679

---

<b>18 Anhang</b> .....	683
18.1 Literatur .....	683
18.1.1 Allgemein .....	683
18.1.2 Zeitschriften .....	684
18.1.3 Wichtige Internetadressen .....	684
18.1.4 Software (professionelle) .....	685
18.2 Testfragen .....	685
18.3 Tabellen .....	687
<b>Stichwortverzeichnis</b> .....	693