

Teil I

Beobachtungsinstrumente und -methoden

- 1 Beobachtungen
mit bloßem Auge
- 2 Atmosphäre der Erde
- 3 Optische Teleskope
- 4 Astrophotographie
- 5 Photometrie
- 6 Spektroskopie
- 7 Polarimetrie
- 8 Hochauflösende
Astronomie
- 9 Radioastronomie
- 10 Ultraviolett- und
Infrarotastronomie
- 11 Röntgen- und Gamma-
astronomie
- 12 Gravitationswellen-
astronomie
- 13 Virtuelles Observa-
torium
- 14 Interdisziplinäre
Zusammenarbeit

Teil II

Astronomische Grundlagen

- 15 Strahlung und Helligkeit
- 16 Entfernungen im Weltall
- 17 Koordinatensysteme
- 18 Chronologie
- 19 Teilchenphysik
- 20 Physik des Lichtes
- 21 Magnetismus

Teil III

Unser Sonnensystem

- 22 Sonne
- 23 Erdmond
- 24 Planeten und ihre
Monde
- 25 Zwerg- u. Kleinplaneten
- 26 Kometen
- 27 Meteore und Meteoriten
- 28 Planeten- und Kometen-
bahnen
- 29 Ephemeridenrechnung
und Bahnbestimmung
- 30 Entstehung des
Planetensystems
- 31 Exoplaneten und
Astrobiologie

Teil IV

Aufbau und Entwicklung der Sterne

- 32 Aufbau der Sterne
- 33 Zustandsdiagramme
- 34 Entstehung der Sterne
- 35 Entwicklung der Sterne
- 36 Endstadium der Sterne
- 37 Weiße Zwerge
- 38 Neutronensterne
- 39 Pulsare
- 40 Schwarze Löcher

Teil V

Unser Milchstraßensystem

- 41 Milchstraße
- 42 Interstellare Materie
- 43 Galaktische Nebel
- 44 Planetarische Nebel
- 45 Sternhaufen
- 46 Doppelsterne
- 47 Veränderliche Sterne
- 48 Supernovae

Teil VI

Extragalaktischer Kosmos

- 49 Galaxien
- 50 Aktive Galaxien
- 51 Gravitationslinsen
- 52 Kosmologie

Teil I

Beobachtungsinstrumente

1	Beobachtungen mit bloßem Auge	37	
	Motivation 37		
	Hilfsmittel 38		
	Sternkarten 39		
2	Atmosphäre der Erde	49	
	Aufbau 49		
	Atmosphärische Fenster 51		
	Warum der Himmel blau ist? 52		
	Extinktion 52		
	Refraktion 55		
	Szintillationsrauschen 56		
	Angaben zur Beobachtung 57		
	Taupunkt 59		
	Solar-terrestrische Beziehungen 60		
	Luftleuchten 62		
	Polarlichter 63		
	Nachtleuchtende Wolken 64		
	Haloerscheinungen 67		
	Grüner Strahl 69		
	Zodiakallicht 71		
	Dämmerung 72		
3	Optische Teleskope	75	
	Fernrohrtypen 76		
	Optische Fehler 82		
	Objektive 86		
	Okulare 97		
	Zusatzoptiken 100		
	Vergrößerung 103		
	Blickfeld 105		
	Lichtstärke 106		
	Auflösungsvermögen 108		
	Luftunruhe (Seeing) 112		
	Montierungen 113		
	Nachführfehler 116		
	Ausrichtung einer parallaktischen Montierung 118		
	Scheiner-Methode 118		
	Lüthen-Kahlhöfer-Methode 120		
	Stative 124		
	Tauschutz 125		
	Selbstbau 127		
	Zubehör 132		
	Kauftipps 134		
4	Astrophotographie	137	
	Aufnahmeverfahren 138		
	Sternfeldaufnahmen 138		
	Fokalaufnahmen 141		
	Projektionsaufnahmen 144		
	Bildgröße 144		
	Belichtungszeit 145		
	Filter 149		
	Digitaltechnik 151		
	Kameraobjektiv 163		
	Aufnahmesoftware 165		
	Hintergrund des Bildes 171		
	Nachbearbeitung am PC 185		
	Bildüberlagerung 186		
	Ebnen und Glätten 188		
	Kontrastverstärkung 193		
	Schärfung 195		

5 Photometrie 201

Lichtelektrische Photometrie 202
Photographische Photometrie 202
Visuelle Schätzung 204
Schätzung mit künstl. Vergleichsquelle 206
Interpolationsmethode nach Pickering 207
Stufenschätzmethode nach Argelander 208
Digitalphotometrie 212
Datenformat und Sättigung 213
Punktspreizfunktion (PSF) 216
Polsequenz 217
Spektralphotometrie 218
Messmethoden 219
Umrechnungsfunktion 224
Extinktion 228
Genauigkeit 230
JPEG und Sättigung 234
Photometriesoftware 239
Aufgabenbereiche 244
Zusammenfassung und Ausblick 246

6 Spektroskopie 247

Spektrograph 247
Spaltlose Spektroskopie 254
Objektivgitter 263
Aufnahmen von Spektren 272
Kalibrierung 278
Spektrallinien 286
Energiesparlampe 289
Themengebiete 291
Spektralklassifikation 293
Vermessung der Linien 299
Äquivalentbreite 308
Spektrumsphotometrie 315
Jugend forscht 321

Teil I

Beobachtungsinstrumente (Fortsetzung)

7	Polarimetrie	323
	Theorie der Polarisation	323
	Beobachtung	329
	Messverfahren	332
	Kometen	337
	Be-Sterne	338
	Wolf-Rayet-Sterne	341
	Sternhaufen	345
	Galaxien	349
	Polarisation und Farben der Mineralien beim Mond	351
	Software	357
8	Hochauflösende Astronomie	359
	Großteleskope	359
	Aktive Optik	361
	Adaptive Optik	362
	Prinzip der Interferometrie	362
	Radiointerferometer	363
	Optisches Interferometer	364
	Speckle-Interferometrie	365
	Doppler-Tomographie	376
9	Radioastronomie	377
	Radioteleskope	377
	LOFAR	379
	Square Kilometre Array	380
	Beobachtungstechniken	383
	Radioquellen	384
	Physik der Radiostrahlung	385
	Beteigeuze (α Orionis)	387
	Einfaches Radioteleskop für Amateure	390
	Amateur-Radioteleskop »Spider 230«	394
10	Ultraviolett- und Infrarot- astronomie	399
	UV-Satelliten	399
	IR-Forschung	400
	IR-Satelliten und -sonden	401
	IR-Bänder	401
	IR für Amateure	402
	Kühlung	403
11	Röntgen- und Gamma- astronomie	405
	Satelliten	405
	Röntgenteleskope	406
	Wolter-Teleskop	406
	Gammadetektoren	407
	Tscherenkow-Teleskop	407
	Fluoreszenz-Teleskop	409
	Gammapektrometer	409
12	Gravitationswellen- astronomie	411
	Gravitationswellen	411
	Gravitationswellendetektoren	413
	Parameter eines Binärsystems	419
	Gravitationswellenobjekte	423

13 Virtuelles Observatorium 431

Einleitung 431
Data-Mining 432
Kataloge 433
Bedienung 442
Werkzeuge 462
Citizen-Science (Bürgerwissenschaft) 470
Zooniverse 471

14 Interdisziplinäre Zusammenarbeit 475

Überblick 475
ProAm-Kampagnen 477
Amateure unter sich 479
Einzelobjekte 480

Teil II

Astronomische Grundlagen

15	Strahlung und Helligkeit	489	18	Chronologie	541
	Strahlungsintensität	489		Zeitmessung	541
	Strahlungsstrom	489		Gregorianischer Kalender	547
	Photometrische Systeme	490		Jahreslängen	548
	Auge	495		Monatslängen	549
	RGB-Systeme	496		Julianisches Datum	549
	Referenzfeld M67	501		Osterformel	552
	Polsequenz	502			
	Farbindex	503	19	Teilchenphysik	553
	Bolometrische Korrektur	504		Elementarteilchen	553
	Größenklassen	505		Quarks	555
	Helligkeit der Sonne	505		Wechselwirkung	556
	Weber-Fechner-Gesetz	506		Loop-Quantengravitation	559
	Entfernungsmodul	506		Vakuumfluktuation	562
	Helligkeiten der Planeten	507			
	Farbskalen	509	20	Physik des Lichtes	563
16	Entfernungen im Weltall	511		Welle-Teilchen-Dualismus	563
	Einheiten	511		Lichtgeschwindigkeit	565
	Methoden	512		Lichtablenkung	565
	Parallaxe	514		Lichtbrechung	566
	Leuchtkraftentfernung	518		Reflexion und Vergütung	570
17	Koordinatensysteme	523		Spektrum	571
	Himmelskoordinaten	523		Doppler-Effekt	578
	Umrechnung der Koordinaten	526		Zeeman-Effekt	579
	Präzession	528		Tscherenkow-Strahlung	580
	Umrechnung des Äquinoktiums	529		Poynting-Robertson-Effekt	580
	Sichtbarkeit eines Gestirns	531		Jarkowski-Effekt	580
	Bestimmung des geographischen Ortes	531		YORP-Effekt	581
	Koordinatennetze der Himmelskörper	534			

21 Magnetismus

583

Einleitung 583

Einheiten 584

Entstehung 585

Synchrotronstrahlung 586

Messung 588

Sonne 588

Erdmagnetfeld 590

Magnetische Stürme 591

Van-Allen-Gürtel 591

Teil III

Unser Sonnensystem

22 Sonne

Überblick 595
Innerer Aufbau 596
Rotation und Magnetfeld 599
Oberfläche 600
Wilson-Effekt 604
Atmosphäre 608
Beobachtung 610
Photographie 613
Sonnenflecken 616
Schwankungen der Sonnenflecken-
aktivität 619
Klassifizierung 622
Auswertemethoden 624
Software *SUNMAP* 629
Sonnenfinsternisse 639

23 Erdmond

Überblick 643
Formationen 644
Libration 645
Sternbedeckung 645
Durchmesser eines Kraters 648
Zeichnen von Mondkratern 649
Höhe eines Mondberges 654
Mondfinsternisse 657
Lunar Transient Phenomena 661
Ebbe und Flut 662

24 Planeten und ihre Monde

Definition eines Planeten 665
Übersicht 667
Temperatur 669
Definition der Oberfläche bei
Gasplaneten 670
Innerer Aufbau 670
Beobachtung 671

595

643

665

Merkur 672
Venus 674
Erde 681
Mars 682
Jupiter 686
Saturn 696
Uranus 704
Neptun 707

25 Zwerg- und Kleinplaneten 709

Übersicht 709
Kommensurabilitäten 712
Erdnahe Objekte 713
Zwergplaneten 714
Einzelobjekte 715
Interstellare Objekte 724
Beobachtung 725

26 Kometen 729

Kern und Staubbkoma 731
Koma 732
Schweif 732
Chemische Zusammensetzung 733
Bahnen 733
Namensgebung 734
Einzelobjekte 735
Beobachtung 744

27 Meteore und Meteorite 753

Begriffe 753
Übersicht 754
Meteorströme 754
Historische Einschläge 756
Beobachtung 759

28 Planeten- und Kometen- bahnen 761

Kepler-Problem 761
Kepler'sche Gesetze 765
Librationspunkte 766
Hill-Sphäre 767
Bahnelemente und Koordinaten-
systeme 768
Bahnelemente der Planeten 770

29 Ephemeridenrechnung und Bahnbestimmung 771

Wahre Anomalie 771
Ephemeridenrechnung 775
Bahnbestimmung 780

30 Entstehung des Planeten- systems 791

Historische Weltbilder 791
Entstehung der Planeten 792
Einzelphänomene 797

31 Exoplaneten und Astro- biologie 803

Braune Zwerge 803
Exoplaneten 805
Astrobiologie 819

Teil IV

Aufbau und Entwicklung der Sterne

32	Aufbau der Sterne	831	35	Entwicklung der Sterne	897
	Relationen	831		Hydrostatische Zeitskala	897
	Masse	833		Kelvin-Helmholtz-Zeitskala	897
	Radius	837		Nukleare Zeitskala	898
	Dichte	841		Schönberg-Chandrasekhar-Grenze	900
	Temperatur	841		Kritische Masse	901
	Konvektionszone	845		Brenndauer bei massereichen Sternen	901
	Rotation	847		Abzweigen von der Hauptreihe	902
	Populationen	848		Thermische Stabilität	903
	Energieprozesse	849		Übergang zum Heliumbrennen	904
	Sternaufbaurechnungen	856		Schalenbrennen um einen entarteten Kern	905
				Zweischalenbrennen	906
33	Zustandsdiagramme	869		Wiederbelebung Weißer Zwerge	907
	Hertzsprung-Russell-Diagramm	869		Pulsation der Sterne	907
	Hayashi-Linie	871		Einzelobjekte	910
	Farben-Helligkeits-Diagramm	872			
	Zwei-Farben-Diagramm	876			
	Umrechnungen	878			
34	Entstehung der Sterne	881	36	Endstadium der Sterne	913
	Kritische Masse	881		Urmasse	913
	Gasfinger	885		Massenverlust	916
	Mikroturbulenz	885		Akkretionsscheibe	917
	Magnetfelder	885			
	Bildung von Sternhaufen	885			
	Sternentstehungseffizienz	886			
	Molekülwolken	886			
	Drehimpulsproblem	887			
	Entstehung eines Sterns mit einer Sonnenmasse	888			
	Lada-Klassen	889			
	IRDC	890			
	TW Hydrae	891			
	MN Lupi	891			
	Rho Ophiuchi	892			
	Epsilon Aurigae	893			

37 Weiße Zwerge 919

Zustandsgrößen 919
Stabilität 924
Heliumblitz der zweiten Generation 926
Spektralklassifikation 927
Planetarischer Nebel 928
ZZ-Ceti-Sterne 928

38 Neutronensterne 931

Entstehung 931
Abschätzung des Magnetfeldes 933
Abschätzung der Dichte 933
Magnetare 934
Thermische Röntgen-Neutronensterne 936
Quasiperiodische Oszillatoren (QPO) 936
Quarksterne 938
RRATs 939
Einzelobjekte 939

39 Pulsare 943

Physik der Pulsare 943
Einzelobjekte 948
Entfernungsbestimmung 954

40 Schwarze Löcher 955

Schwarzschild-Radius 955
Hawking-Strahlung 956
Modelle 958
Kerr'sche Löcher 959
Verschmelzung von Neutronensternen 960
Mikroquasar 960
Holosterne und Gravasterne 961
Einzelobjekte 962

Teil V

Unser Milchstraßensystem

41	Milchstraße	969	44	Planetarische Nebel	1019
	Aufbau	969		Allgemeines	1019
	Struktur	970		Übersicht	1023
	Gaia	972		Einzelobjekte	1023
	Sternströme und Hyperschnellläufer	973			
	Ausstoß von Wasserstoffwolken	974	45	Sternhaufen	1035
	Gasblasen	974		Offene Sternhaufen	1035
	Galaktischer Kern	975		Kugelsternhaufen	1044
	Begleiter	976		Entwicklung eines Sternhaufens	1049
	Kollisionskurs	976		Altersbestimmung	1050
42	Interstellare Materie	979	46	Doppelsterne	1059
	Allgemeines	979		Visuelle Doppelsterne	1059
	Lokale Blase	980		Astrometrische Doppelsterne	1059
	Wasserstoffmoleküle H_2	981		Spektroskopische Doppelsterne	1060
	Organische Moleküle	982		Photometrische Doppelsterne	1060
	Interstellare Extinktion	982		Kataklysmische Systeme	1062
	Farbexzess	983		Statistik	1063
	Q-Methode	984		Systemparameter	1064
	Balmer-Dekrement	985		Radiusbestimmung	1064
43	Galaktische Nebel	989		Massenbestimmung	1066
	Allgemeines	989		Massenaustausch bei Doppelsternen	1066
	Radius von HII-Regionen	990		Beobachtungsobjekte	1070
	Übersicht	992		Einzelobjekte	1073
	Beobachtung	992		Bestimmung von Abstand und	
	Einzelobjekte	993		Positionswinkel	1084
	Objekte für Teleobjektive	1012		Ephemeridenrechnung	1096
	Herbig-Haro-Objekte	1018			

47 Veränderliche Sterne

Klassifikation 1099
Pulsationsveränderliche 1101
Eruptionsveränderliche 1110
Rotationsveränderliche 1111
Röntgenveränderliche 1111
Kataklysmische Veränderliche 1112
Novae 1122
Einzelobjekte 1133
Auswahl der Vergleichssterne 1134
Lichtkurve 1140
Bestimmung von Minimums- und
Maximumszeitpunkten 1147
Fehler bei der Minimums- und
Maximumsbestimmung 1153
Systemparameter 1154
(B–R)-Diagramm 1154
Spezielle Objekte 1162
Gemeinschaftslichtkurve 1163

1099

48 Supernovae

Überblick 1171
Ursache 1172
Supernova Typ Ia 1174
Supernova Typ II 1175
Lichtkurven 1176
Lichtecho 1178
Einzelobjekte 1179
Supernovaüberreste 1188

1171

Teil VI

Extragalaktischer Kosmos

49 Galaxien

1197

Klassifikation 1198
Bildung der Galaxien 1204
Entstehung der Spiralarme 1206
Rotation 1207
Dunkle Materie 1210
Zwerggalaxien 1212
Wechselwirkende Galaxien 1214
Starburstgalaxien 1219
Galaxienhaufen 1220
Super(galaxien)haufen 1222
Massen 1223
Walls und Voids 1223
Einstein-Straus-Vakuolen 1224
Statistik 1224
Beobachtungsobjekte 1225
Objekte für Teleobjektive 1235

50 Aktive Galaxien

1239

Aktive Galaktische Kerne 1241
Leuchtkraft 1242
Eddington-Grenze 1243
Maximalmasse 1244
Entwicklung von Quasaren und AGN 1244
Binäre Schwarze Löcher 1245
Quasare 1246
Radiogalaxien 1247
BL-Lacertae-Objekte 1247
Blasare 1249
Seyfert-Galaxien 1249
N-Galaxien 1250
M87 – Zentralgalaxie des
Virgohaufens 1251

51 Gravitationslinsen

1253

Physik der Linsen 1253
Lichtzeitdifferenzen 1256
Kosmische Fäden 1258
Abell 1835 IR 1916 1258
Mikrolinseneffekt 1259

52 Kosmologie

1261

Hubble-Gesetz 1261
Expansion 1264
Raumkrümmung 1264
Alter der Welt 1266
Zeitlicher Verlauf der Expansion 1268
Entfernungsmaß 1269
Evolution des Universums 1275
Temperatur 1275
Planck-Blase 1276
Planck-Ära (Urschaum) 1278
Symmetriebrechung 1. Art
(X-Ära, GUT-Ära) 1278
Kosmische Fäden 1279
Inflation 1280
Symmetriebrechung 2. Art
(Quark-Ära, Gluonen-Ära) 1283
Symmetriebrechung 3. Art 1283
Hadronen-Ära 1284
Leptonen-Ära 1285
Photonen-Ära 1285
Materie-Ära 1286
Quasare 1289
Kosmische Hintergrundstrahlung 1290
Kosmologische Modelle 1292
Hierarchie im Weltraum 1301