

Inhaltsverzeichnis

1. Einführung		1
I. Klassische Astronomie und das Planetensystem		6
Sterne und Menschen: Beobachten und Denken		
Historische Einleitung in die klassische Astronomie		6
2. Klassische Astronomie		
2.1 Koordinaten und Zeit:		
Bewegungen von Sonne, Erde und Mond		10
2.1.1 Die Himmelskugel. Astronomische Koordinatensysteme		10
2.1.2 Die Bewegungen der Erde. Jahreszeiten und Tierkreis		12
2.1.3 Die Zeit: Tag, Jahr und Kalender		15
2.1.4 Der Mond		17
2.1.5 Mond- und Sonnenfinsternisse		19
2.2 Bahnbewegungen und Entfernungen im Planetensystem		20
2.2.1 Planetenbewegungen und Bahnelemente		21
2.2.2 Kometen und Meteore		23
2.2.3 Entfernungsbestimmungen, Dopplereffekt und Aberration		26
2.3 Mechanik und Gravitationstheorie		28
2.3.1 Newtonsche Gesetze		28
2.3.2 Impuls- oder Schwerpunktsatz		29
2.3.3 Drehimpuls- oder Flächensatz		30
2.3.4 Energiesatz		31
2.3.5 Virialsatz		31
2.3.6 Gravitationsgesetz. Gravitationsenergie		32
2.4 Himmelsmechanik		34
2.4.1 Erstes und zweites Keplergesetz: Planetenbahnen		34
2.4.2 Drittes Keplergesetz: Massenbestimmung		34
2.4.3 Energiesatz und Entweichgeschwindigkeit		35
2.4.4 Rotation und Trägheitsmoment		36
2.4.5 Präzession		36
2.4.6 Gezeiten		37
2.4.7 Ptolemäisches und kopernikanisches Weltsystem		38
2.5 Weltraumforschung		39
2.5.1 Bahnen künstlicher Satelliten und Raumfahrzeuge		39
2.5.2 Astronomische Beobachtungen vom Weltraum aus		40
2.5.3 Erkundung des Mondes		42
2.5.4 Raumfahrtmissionen im Planetensystem		43

3. Physikalische Beschaffenheit der Körper im Planetensystem		
3.1	Globale Eigenschaften der Planeten und Satelliten	47
3.1.1	Möglichkeiten zur Erforschung der Planeten und Satelliten	47
3.1.2	Globaler Energiehaushalt der Planeten	48
3.1.3	Innerer Aufbau und Stabilität	49
3.1.4	Aufbau der Planetenatmosphären	51
3.2	Erde, Mond und erdähnliche Planeten	53
3.2.1	Innerer Aufbau der erdähnlichen Planeten	53
3.2.2	Radioaktive Altersbestimmungen. Erdgeschichte	54
3.2.3	Magnetfelder. Plattentektonik	55
3.2.4	Mondoberfläche	58
3.2.5	Oberflächen der erdähnlichen Planeten	61
3.2.6	Atmosphären der erdähnlichen Planeten	68
3.3	Planetoiden oder kleine Planeten (Asteroiden)	71
3.3.1	Bahnen der Planetoiden	71
3.3.2	Eigenschaften der Planetoiden	72
3.4	Die großen Planeten	74
3.4.1	Jupiter	74
3.4.2	Saturn	79
3.4.3	Uranus	83
3.4.4	Neptun	84
3.5	Pluto und transneptunische Objekte	87
3.5.1	Pluto und Charon	87
3.5.2	Transneptunische Objekte	88
3.6	Kometen	88
3.6.1	Struktur, Spektren und chemische Zusammensetzung	89
3.6.2	Entwicklung der Kometen	91
3.7	Meteore und Meteorite	91
3.7.1	Meteorite und Einschlagkrater	91
3.7.2	Meteore in der Erdatmosphäre	92
3.7.3	Eigenschaften und Herkunft der Meteorite	92
3.8	Interplanetare Materie	96
II. Strahlung, Instrumente und Beobachtungsverfahren		100
Entwicklung astronomischer Beobachtungsverfahren		
Historische Einführung in die Erschließung des elektromagnetischen Spektrums		100
4. Strahlung und Materie		
4.1	Elektromagnetische Strahlung	103
4.2	Spezielle Relativitätstheorie	104
4.2.1	Lorentztransformation. Dopplereffekt	105
4.2.2	Relativistische Mechanik	105
4.3	Strahlungstheorie	106
4.3.1	Phänomenologische Strahlungsgrößen	106
4.3.2	Emission und Absorption. Strahlungstransportgleichung	109
4.3.3	Thermodynamisches Gleichgewicht und Hohlraumstrahlung	111

4.4	Materie im thermodynamischen Gleichgewicht	113
4.4.1	Boltzmann-Statistik	113
4.4.2	Geschwindigkeitsverteilung	114
4.4.3	Thermische Anregung	114
4.4.4	Thermische Ionisation	114
4.4.5	Massenwirkungsgesetz	115
4.5	Wechselwirkung von Strahlung mit Materie	116
4.5.1	Freie Weglänge	116
4.5.2	Wirkungsquerschnitt und Reaktionsrate	116
4.5.3	Stoß- und Strahlungsprozesse: Kinetische Gleichungen	117
4.5.4	Atomare Elementarprozesse	118
4.5.5	Extinktions- und Emissionskoeffizienten	121
4.5.6	Energereiche Photonen und Teilchen	122
5.1	Teleskope und Detektoren im Optischen und Ultraviolett	125
5.1.1	Teleskope herkömmlicher Art	125
5.1.2	Auflösungsvermögen und Lichtstärke.	
	Optische Interferometer	130
5.1.3	Adaptive und aktive Optik. Großteleskope	133
5.1.4	Optische Detektoren	138
5.1.5	Spektrographen	140
5.1.6	Weltraumteleskope	144
5.2	Teleskope und Detektoren für den Radio- und Infrarotbereich	145
5.2.1	Radioteleskope	146
5.2.2	Empfänger und Spektrometer für den Radiofrequenzbereich	151
5.2.3	Beobachtungsverfahren im Infrarot	153
5.3	Instrumente der Hochenergieastronomie	155
5.3.1	Teilchendetektoren	155
5.3.2	Teleskope für die Kosmische Strahlung	157
5.3.3	Gammastrahlenteleskope	158
5.4	Instrumente im Röntgenbereich und extremen Ultraviolett	160
5.4.1	Detektoren und Spektrometer im Röntgenbereich	161
5.4.2	Teleskope und Satelliten im Röntgenbereich	161
5.4.3	Teleskope für das extreme Ultraviolett	163

III. Sonne und Sterne: Astrophysik des einzelnen Sterns 166

Astronomie + Physik = Astrophysik

Historische Einleitung	166
------------------------	-----

6. Entfernungen und Zustandsgrößen der Sterne	6.1 Die Sonne	171
	6.1.1 Photosphärisches Spektrum. Mitte-Rand-Variation	172
	6.1.2 Energieverteilung	173
	6.1.3 Leuchtkraft und Effektivtemperatur	173

	6.2	Entfernungen und Geschwindigkeiten der Sterne	175
	6.2.1	Trigonometrische Parallaxe	175
	6.2.2	Radialgeschwindigkeit und Eigenbewegung	176
	6.2.3	Stromparallaxe	176
	6.2.4	Sternpositionen und Kataloge	177
	6.3	Helligkeiten, Farben und Radien der Sterne	178
	6.3.1	Scheinbare Helligkeit	178
	6.3.2	Farbindex und Energieverteilung	179
	6.3.3	Absolute Helligkeit	182
	6.3.4	Bolometrische Helligkeit und Leuchtkraft	183
	6.3.5	Sternradien	183
	6.4	Klassifikation der Sternspektren.	
		Hertzprung-Russell-Diagramm	184
	6.4.1	Spektraltyp	185
	6.4.2	Hertzprung-Russell-Diagramm. Leuchtkraftklasse	185
	6.4.3	MK-Klassifikation	187
	6.4.4	Zweifarbendiagramm	189
	6.4.5	Rotation der Sterne	190
	6.5	Doppelsterne und die Massen der Sterne	190
	6.5.1	Visuelle Doppelsterne	191
	6.5.2	Spektroskopische Doppelsterne. Bedeckungsveränderliche	191
	6.5.3	Perioden und Rotation	192
	6.5.4	Massen der Sterne	193
	6.5.5	Enge Doppelsternsysteme	194
	6.5.6	Pulsare in Doppelsternsystemen	195
	6.5.7	Begleiter mit substellaren Massen:	
		Braune Zwerge und Exoplaneten	197
7. Spektren und Atmosphären der Sterne	7.1	Spektren und Atome	200
	7.1.1	Grundbegriffe der Atomspektroskopie	200
	7.1.2	Anregung und Ionisation	203
	7.1.3	Linienabsorptionskoeffizient	206
	7.1.4	Verbreiterung der Spektrallinien	207
	7.1.5	Bemerkungen zur Molekülspektroskopie	209
	7.2	Physik der Sternatmosphären	210
	7.2.1	Aufbau der Sternatmosphären	210
	7.2.2	Absorptionskoeffizienten in Sternatmosphären	213
	7.2.3	Modellatmosphären. Spektrale Energieverteilung	215
	7.2.4	Strahlungstransport in den Fraunhoferlinien	217
	7.2.5	Wachstumskurve	219
	7.2.6	Quantitative Analyse der Sternspektren	220
	7.2.7	Elementhäufigkeiten in der Sonne und den Sternen	221
	7.3	Die Sonne: Chromosphäre und Korona.	
		Strömungen, Magnetfelder und Aktivität	224
	7.3.1	Granulation und Konvektion	225
	7.3.2	Magnetfelder und Magnetohydrodynamik	226

7.3.3	Sonnenflecke und Aktivitätszyklus. Magnetische Flußröhren	228
7.3.4	Chromosphäre und Korona	232
7.3.5	Protuberanzen	238
7.3.6	Sonneneruptionen oder Flares	240
7.3.7	Sonnenwind	243
7.3.8	Oszillationen: Helioseismologie	247
7.4	Veränderliche Sterne.	
	Strömungen, Magnetfelder und Aktivität bei Sternen	250
7.4.1	Pulsierende Sterne. R Coronae Borealis-Sterne	251
7.4.2	Magnetische oder Spektrum-Veränderliche.	
	Ap-Sterne und Metallliniensterne	254
7.4.3	Aktivität, Chromosphären und Koronen bei kühlen Sternen	255
7.4.4	Koronen, Sternwinde und Variabilität bei heißen Sternen	259
7.4.5	Kataklysmische Veränderliche: Novae und Zwergnovae	261
7.4.6	Röntgendoppelsterne: Akkretion auf Neutronensterne	263
7.4.7	Supernovae und Pulsare	267
7.4.8	Stellare Gammaquellen	275
7.4.9	Gammaburster	276
8. Aufbau und Entwicklung der Sterne	8.1 Grundgleichungen des Sternaufbaus	280
	8.1.1 Hydrostatisches Gleichgewicht und Zustandsgleichung der Materie	280
	8.1.2 Temperaturverteilung und Energietransport	281
	8.1.3 Energieerzeugung durch Kernreaktionen	282
	8.1.4 Gravitationsenergie und thermische Energie	286
	8.1.5 Stabilität der Sterne	288
	8.1.6 Grundgleichungssystem und allgemeine Folgerungen	289
	8.2 Entwicklung der Sterne	290
	8.2.1 Hauptreihensterne: Zentrales Wasserstoffbrennen	291
	8.2.2 Aufbau der Sonne. Solare Neutrinos	292
	8.2.3 Vom Wasserstoff- zum Heliumbrennen	295
	8.2.4 Spätphasen der Sternentwicklung	297
	8.2.5 Nukleosynthese in Sternen	302
	8.2.6 Enge Doppelsternsysteme	305
	8.2.7 Physik der Akkretionsscheiben	307
	8.3 Endstadien der Sternentwicklung	309
	8.3.1 Braune Zwerge	309
	8.3.2 Zustandsgleichung elektronenentarteter Materie	310
	8.3.3 Aufbau der Weißen Zwerge	311
	8.3.4 Neutronensterne	312
	8.4 Starke Gravitationsfelder	313
	8.4.1 Allgemeine Relativitätstheorie	314
	8.4.2 Kugelsymmetrische Felder im Vakuum	315
	8.4.3 Lichtablenkung und Gravitationslinsen	316
	8.4.4 Schwarze Löcher	319
	8.4.5 Gravitationswellen	319

IV. Sternsysteme. Kosmologie und Kosmogonie	322
Der Vorstoß ins Weltall	
Historische Einleitung in die Astronomie des 20. Jahrhunderts	322
9. Sternhaufen	
9.1 Offene Sternhaufen und Sternassoziationen	328
9.1.1 Offene (galaktische) Sternhaufen	328
9.1.2 Sternassoziationen	329
9.1.3 Farben-Helligkeits-Diagramme und Alter offener Haufen	329
9.2 Kugelsternhaufen	332
9.2.1 Kugelhaufen in der Milchstraße	332
9.2.2 Metallhäufigkeit und Zweifarbendiagramm	333
9.2.3 Farben-Helligkeits-Diagramme und Alter der Kugelhaufen	334
9.2.4 Kugelhaufen in anderen Galaxien	337
10. Interstellare Materie und Sternentstehung	
10.1 Interstellarer Staub	339
10.1.1 Dunkelwolken	340
10.1.2 Interstellare Extinktion und Verfärbung	340
10.1.3 Polarisierung von Sternlicht durch interstellaren Staub	342
10.1.4 Eigenschaften der Staubkörner	342
10.1.5 Diffuse interstellare Absorptionsbänder	344
10.2 Neutrales interstellares Gas	345
10.2.1 Atomare interstellare Absorptionslinien	345
10.2.2 Die 21 cm-Linie des neutralen Wasserstoffs. H I-Wolken	347
10.2.3 Interstellare Moleküllinien. Molekülwolken	349
10.3 Ionisiertes Gas: Leuchtende Gasnebel	352
10.3.1 H II-Regionen	352
10.3.2 Planetarische Nebel	356
10.3.3 Supernovaüberreste	358
10.3.4 Heißes interstellares Gas	364
10.4 Hochenergetische Komponenten	365
10.4.1 Interstellare Magnetfelder	365
10.4.2 Kosmische Strahlung	366
10.4.3 Galaktische Gammastrahlung	371
10.5 Frühe Entwicklung und Entstehung der Sterne	374
10.5.1 Vor-Hauptreihensterne	375
10.5.2 Sternentstehungsgebiete	377
10.5.3 Gravitationsinstabilität und Fragmentation	379
10.5.4 Entwicklung der Protosterne	380
10.5.5 Strömungen in der Umgebung der Protosterne	382
10.5.6 Stellarstatistik und Geburtsraten der Sterne	385
11. Aufbau und Dynamik des Milchstraßensystems	
11.1 Sterne und der Bau der Milchstraße	389
11.1.1 Galaktische Koordinaten	389
11.1.2 Sternzählungen	389

11.1.3	Raumgeschwindigkeiten der Sterne	390
11.1.4	Sternhaufen: Entfernungsbestimmung und Bau der Milchstraße	391
11.2	Dynamik und Verteilung der Materie	393
11.2.1	Rotation der galaktischen Scheibe	394
11.2.2	Verteilung der interstellaren Materie	396
11.2.3	Galaktische Bahnen der Sterne. Lokale Massendichte	400
11.2.4	Massenverteilung in der Milchstraße	401
11.2.5	Dynamik der Spiralarme	403
11.2.6	Populationen und Elementhäufigkeiten	404
11.3	Zentralbereich der Milchstraße	408
11.3.1	Galaktischer Bulge ($R \leq 3$ kpc)	408
11.3.2	Kernbereich des galaktischen Bulge ($R \leq 300$ pc)	409
11.3.3	Zirkumnukleare Scheibe und Minispirale ($R \leq 10$ pc)	411
11.3.4	Innerster Bereich ($R \leq 1$ pc) mit Sgr A*	412
12.	Galaxien und Galaxienhaufen	
12.1	Normale Galaxien	415
12.1.1	Entfernungsbestimmung	415
12.1.2	Klassifikation und absolute Helligkeiten	418
12.1.3	Leuchtkraftfunktion	422
12.1.4	Helligkeitsprofil und Durchmesser	423
12.1.5	Dynamik und Massen	425
12.1.6	Sternpopulationen und Elementhäufigkeiten	429
12.1.7	Gas- und Staubverteilung	432
12.2	Infrarot- und Starburst-Galaxien	436
12.2.1	Infrarotgalaxien	436
12.2.2	Starburst-Aktivität	438
12.3	Radiogalaxien, Quasare und Aktivität in Galaxienkernen	439
12.3.1	Synchrotronstrahlung	439
12.3.2	Nichtthermische Radiostrahlung normaler Galaxien	442
12.3.3	Radiogalaxien	443
12.3.4	Quasare (Quasistellare Objekte)	447
12.3.5	Seyfert-Galaxien	455
12.3.6	Aktivität in Galaxienkernen	457
12.4	Haufen und Superhaufen von Galaxien	461
12.4.1	Lokale Gruppe	461
12.4.2	Klassifikation und Massen der Galaxienhaufen	462
12.4.3	Gas in Galaxienhaufen	464
12.4.4	Wechselwirkung der Galaxien. Entwicklung der Galaxienhaufen	466
12.4.5	Superhaufen von Galaxien	467
12.5	Entstehung und Entwicklung der Galaxien	469
12.5.1	Entstehung der Galaxien und Galaxienhaufen	470
12.5.2	Intergalaktisches Medium und Lyman α -Systeme	473

	12.5.3 Wechselwirkende Galaxien	474
	12.5.4 Entwicklung der Galaxien	476
	12.5.5 Galaxien im frühen Universum	481
13. Kosmologie:	13.1 Weltmodelle	484
Der Kosmos als Ganzes	13.1.1 Fluchtbewegung der Galaxien	484
	13.1.2 Newtonsche Kosmologie	485
	13.1.3 Relativistische Kosmologie	487
	13.1.4 Materiekosmos	490
	13.2 Strahlung und Beobachtung.	
	Elemententstehung im Kosmos	491
	13.2.1 Ausbreitung von Strahlung	491
	13.2.2 Mikrowellen-Hintergrundstrahlung	493
	13.2.3 Strahlungskosmos	496
	13.2.4 Elemententstehung im Kosmos	497
	13.2.5 Beobachtete Parameter des heutigen Kosmos	498
	13.2.6 Olbers-Paradox	502
	13.3 Evolution des Kosmos	502
	13.3.1 Planckzeit	503
	13.3.2 Fundamentale Teilchen und Wechselwirkungen	503
	13.3.3 Entwicklung des Kosmos nach dem Standardmodell	505
	13.3.4 Inflationärer Kosmos	508
	13.3.5 Andere Kosmologien	509
14. Kosmogonie	14.1 Entstehung der Sonne und des Planetensystems	511
des Sonnensystems	14.1.1 Überblick über das Planetensystem	511
	14.1.2 Protoplanetare Scheibe und Entstehung der Planeten	513
	14.1.3 Entstehung der Meteorite	515
	14.1.4 Entstehung des Erde-Mond-Systems	517
	14.1.5 Planetensysteme bei anderen Sternen	520
	14.2 Entwicklung der Erde und des Lebens	522
	14.2.1 Entwicklung der Atmosphäre und der Ozeane	522
	14.2.2 Molekularbiologische Grundlagen	523
	14.2.3 Präbiotische Moleküle	526
	14.2.4 Entwicklung der Lebewesen	528
Anhang	A.1 Verschiedene Einheiten, Internationales Einheitensystem	
	und Gaußsches System	535
	A.2 Namen der Sternbilder	539
Ausgewählte Probleme		541
Literatur und Daten		549
Quellennachweis		557
Sachverzeichnis		563
Physikalische Fundamentalkonstanten (Hintere Einbandinnenseite)		
Astronomische Konstanten und Einheiten (Hintere Einbandinnenseite)		