

# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einleitung und Überblick</b>	<b>1.1 Einleitung</b> .....	1
	<b>1.2 Überblick</b> .....	4
	1.2.1 Unsere Galaxis als Galaxie .....	4
	1.2.2 Die Welt der Galaxien .....	6
	1.2.3 Die Hubble Expansion des Weltalls .....	9
	1.2.4 Aktive und Starburst Galaxien .....	11
	1.2.5 Voids, Galaxienhaufen und Dunkle Materie .....	13
	1.2.6 Weltmodelle und thermische Geschichte des Universums ....	15
	1.2.7 Strukturbildung und Galaxienentwicklung .....	18
	1.2.8 Kosmologie als Triumph des menschlichen Geistes .....	18
	<b>1.3 Werkzeuge der extragalaktischen Astronomie</b> .....	19
	1.3.1 Radioteleskope .....	20
	2.3.1 Infrarot-Teleskope .....	24
	1.3.3 Optische Teleskope .....	26
	1.3.4 UV-Teleskope .....	31
	1.3.5 Röntgen-Teleskope .....	32
	1.3.6 Gamma-Teleskope .....	33
<b>2. Die Galaxis als Galaxie</b>	<b>2.1 Galaktische Koordinaten</b> .....	35
	<b>2.2 Entfernungsbestimmungen innerhalb unserer Galaxis</b> ....	36
	2.2.1 Trigonometrische Parallaxe .....	37
	2.2.2 Eigenbewegungen .....	38
	2.2.3 Sternstromparallaxe .....	38
	2.2.4 Photometrische Entfernung; Extinktion und Rötung .....	40
	2.2.5 Spektroskopische Entfernung .....	43
	2.2.6 Entfernungen von visuellen Doppelsternen .....	44
	2.2.7 Entfernungen pulsierender Sterne .....	44
	<b>2.3 Struktur der Galaxis</b> .....	46
	2.3.1 Die Galaktische Scheibe: Sternverteilung .....	47
	2.3.2 Die Galaktische Scheibe: chemische Zusammensetzung und Alter .....	48
	2.3.3 Die Galaktische Scheibe: Staub und Gas .....	51
	2.3.4 Die kosmische Höhenstrahlung .....	53
	2.3.5 Der Galaktische Bulge .....	55
	2.3.6 Der sichtbare Halo .....	55
	2.3.7 Die Entfernung zum Galaktischen Zentrum .....	56
	<b>2.4 Kinematik der Galaxis</b> .....	57
	2.4.1 Bestimmung der Geschwindigkeit der Sonne .....	57

	2.4.2	Die Rotationskurve der Galaxis .....	60
	<b>2.5</b>	<b>Der Galaktische Mikrolinseneffekt:</b>	
		<b>Suche nach kompakter Dunkler Materie .....</b>	<b>65</b>
	2.5.1	Der Gravitationslinseneffekt I .....	65
	2.5.2	Galaktischer Mikrolinseneffekt .....	70
	2.5.3	Surveys und Resultate .....	73
	2.5.4	Variationen und Erweiterungen .....	75
	<b>2.6</b>	<b>Das Galaktische Zentrum .....</b>	<b>78</b>
	2.6.1	Wo ist das Galaktische Zentrum? .....	78
	2.6.2	Der zentrale Sternhaufen .....	80
	2.6.3	Schwarzes Loch im Zentrum der Milchstraße .....	81
	2.6.4	Die Eigenbewegung von Sgr A* .....	84
<b>3. Die Welt der Galaxien</b>	<b>3.1</b>	<b>Klassifikation .....</b>	<b>88</b>
	3.1.1	Morphologische Klassifikation: Die Hubble-Sequenz .....	88
	3.1.2	Andere Arten von Galaxien .....	89
	<b>3.2</b>	<b>Elliptische Galaxien .....</b>	<b>90</b>
	3.2.1	Unterteilung .....	90
	3.2.2	Helligkeitsprofil .....	92
	3.2.3	Zusammensetzung von Elliptischen Galaxien .....	93
	3.2.4	Dynamik von Elliptischen Galaxien .....	93
	3.2.5	Anzeichen komplexer Entwicklung .....	96
	<b>3.3</b>	<b>Spiralgalaxien .....</b>	<b>98</b>
	3.3.1	Trends innerhalb der Spiralensequenz .....	98
	3.3.2	Helligkeitsprofil .....	98
	3.3.3	Rotationskurven und Dunkle Materie .....	100
	3.3.4	Stellare Population und Gasgehalt .....	102
	3.3.5	Spiralstruktur .....	103
	3.3.6	Korona von Spiralen? .....	104
	<b>3.4</b>	<b>Skalierungsrelationen .....</b>	<b>104</b>
	3.4.1	Die Tully–Fisher-Relation .....	104
	3.4.2	Die Faber–Jackson-Relation .....	107
	3.4.3	Die Fundamentalebene .....	107
	3.4.4	$D_n$ - $\sigma$ -Relation .....	109
	<b>3.5</b>	<b>Schwarze Löcher in Zentren von Galaxien .....</b>	<b>109</b>
	3.5.1	Die Suche nach supermassiven Schwarzen Löchern .....	110
	3.5.2	Beispiele für SMBHs in Galaxien .....	111
	3.5.3	Zusammenhang der SMBH-Masse mit Galaxieneigenschaften .....	113
	<b>3.6</b>	<b>Extragalaktische Entfernungsbestimmungen .....</b>	<b>114</b>
	3.6.1	Entfernung zur LMC .....	115
	3.6.2	Die Cepheiden-Entfernung .....	116
	3.6.3	Sekundäre Entfernungsindikatoren .....	116
	<b>3.7</b>	<b>Leuchtkraftfunktion von Galaxien .....</b>	<b>118</b>

	<b>3.8 Galaxien als Gravitationslinsen</b> .....	121
	3.8.1 Der Gravitationslinseneffekt – Teil II .....	121
	3.8.2 Einfache Modelle .....	122
	3.8.3 Beispiele für Gravitationslinsen .....	125
	3.8.4 Anwendungen des Linseneffekts .....	129
	<b>3.9 Populationssynthese</b> .....	131
	3.9.1 Modellannahmen .....	132
	3.9.2 Entwicklungswege im HRD; integriertes Spektrum .....	133
	3.9.3 Farbentwicklung .....	134
	3.9.4 Sternbildungsgeschichte und Galaxienfarben .....	135
	3.9.5 Metallizität, Staub, und HII Regionen .....	136
	3.9.6 Zusammenfassung .....	137
	3.9.7 Spektren von Galaxien .....	137
	<b>3.10 Chemische Entwicklung von Galaxien</b> .....	138
<b>4. Kosmologie I: Homogene isotrope Weltmodelle</b>	<b>4.1 Einleitung und grundlegende Beobachtungen</b> .....	141
	4.1.1 Grundlegende kosmologische Beobachtungen .....	142
	4.1.2 Einfache Schlussfolgerungen .....	142
	<b>4.2 Ein expandierendes Universum</b> .....	146
	4.2.1 Newtonsche Kosmologie .....	146
	4.2.2 Kinematische Beschreibung .....	146
	4.2.3 Dynamik der Expansion .....	147
	4.2.4 Modifikation durch die ART .....	148
	4.2.5 Die Materiekomponenten des Universums .....	150
	4.2.6 „Herleitung“ der Expansionsgleichung .....	150
	4.2.7 Diskussion der Expansionsgleichungen .....	151
	<b>4.3 Konsequenzen der Friedmann-Expansion</b> .....	153
	4.3.1 Die Notwendigkeit eines Big Bang .....	153
	4.3.2 Die Rotverschiebung .....	156
	4.3.3 Entfernungen in der Kosmologie .....	158
	4.3.4 Spezialfall: Das Einstein–de-Sitter-Modell .....	160
	4.3.5 Zusammenfassung .....	161
	<b>4.4 Thermische Geschichte des Universums</b> .....	161
	4.4.1 Expansion in strahlungsdominierter Phase .....	162
	4.4.2 Entkopplung der Neutrinos .....	162
	4.4.3 Paarvernichtung .....	164
	4.4.4 Primordiale Nukleosynthese .....	164
	4.4.5 Rekombination .....	168
	4.4.6 Zusammenfassung .....	170
	<b>4.5 Erfolge und Probleme des Standardmodells</b> .....	171
	4.5.1 Erfolge .....	172
	4.5.2 Probleme des Standardmodells .....	172
	4.5.3 Erweiterung des Standardmodells; Inflation .....	175

<b>5. Aktive Galaxienkerne</b>	<b>5.1 Einleitung</b> .....	179
	5.1.1 Kurze Geschichte der AGNs .....	179
	5.1.2 Grundlegende Eigenschaften von Quasaren .....	180
	5.1.3 Quasare als Radioquellen; Synchrotron-Strahlung .....	180
	5.1.4 Breite Emissionslinien .....	184
	<b>5.2 Zoologie der AGNs</b> .....	185
	5.2.1 QSOs .....	185
	5.2.2 Seyfert-Galaxien .....	186
	5.2.3 Radiogalaxien .....	186
	5.2.4 OVV's .....	186
	5.2.5 BL Lac-Objekte .....	187
	<b>5.3 Die zentrale Maschine: ein Schwarzes Loch</b> .....	188
	5.3.1 Warum Schwarzes Loch? .....	189
	5.3.2 Akkretion .....	189
	5.3.3 Superluminal Motion .....	191
	5.3.4 Weitere Argumente für SMBHs .....	194
	5.3.5 Erste Massenabschätzung des SMBH: die Eddington-Leuchtkraft .....	196
	<b>5.4 Komponenten eines AGN</b> .....	198
	5.4.1 Das IR, optische und UV-Kontinuum .....	198
	5.4.2 Die breiten Emissionslinien .....	200
	5.4.3 Schmale Emissionslinien .....	205
	5.4.4 Die Röntgenemission .....	206
	5.4.5 Die Host-Galaxie .....	206
	<b>5.5 Familiäre Beziehungen der AGNs</b> .....	208
	5.5.1 Vereinheitlichungsmodelle .....	208
	5.5.2 Beaming .....	211
	5.5.3 Beaming auf großen Skalen .....	213
	5.5.4 Jets bei höheren Frequenzen .....	213
	<b>5.6 AGNs und Kosmologie</b> .....	217
	5.6.1 Die K-Korrektur .....	217
	5.6.2 Die Leuchtkraftfunktion der QSOs .....	218
	5.6.3 Absorptionslinien in Quasaren .....	220
<b>6. Galaxienhaufen und Galaxiengruppen</b>	<b>6.1 Die Lokale Gruppe</b> .....	226
	6.1.1 Phänomenologie .....	226
	6.1.2 Massenabschätzung .....	227
	6.1.3 Weitere Komponenten der Lokalen Gruppe .....	229
	<b>6.2 Galaxien in Haufen und Gruppen</b> .....	231
	6.2.1 Der Abell-Katalog .....	231
	6.2.2 Leuchtkraftverteilung der Haufengalaxien .....	233
	6.2.3 Morphologische Klassifikation von Haufen .....	233
	6.2.4 Räumliche Verteilung der Galaxien .....	234
	6.2.5 Dynamische Masse von Haufen .....	236

	6.2.6	Weitere Bemerkungen zur Haufendynamik .....	237
	6.2.7	Intergalaktische Sterne in Galaxienhaufen .....	239
	6.2.8	Galaxiengruppen .....	240
	6.2.9	Die Morphologie-Dichte-Relation .....	241
	<b>6.3</b>	<b>Röntgenstrahlung von Galaxienhaufen</b> .....	<b>243</b>
	6.3.1	Allgemeine Eigenschaften der Röntgenstrahlung .....	244
	6.3.2	Modelle der Röntgenemission .....	247
	6.3.3	Cooling Flows .....	249
	6.3.4	Der Sunyaev–Zeldovich-Effekt .....	253
	6.3.5	Röntgenkataloge von Haufen .....	255
	<b>6.4</b>	<b>Skalierungsrelationen von Galaxienhaufen</b> .....	<b>257</b>
	6.4.1	Masse-Temperatur-Beziehung .....	257
	6.4.2	Masse-Geschwindigkeitsdispersion-Beziehung .....	259
	6.4.3	Masse-Leuchtkraft-Beziehung .....	259
	6.4.4	Nah-Infrarot-Leuchtkraft als Massenindikator .....	260
	<b>6.5</b>	<b>Galaxienhaufen als Gravitationslinsen</b> .....	<b>261</b>
	6.5.1	Leuchtende Bögen (Arcs) .....	261
	6.5.2	Der Schwache Linseneffekt .....	265
	<b>6.6</b>	<b>Entwicklungseffekte</b> .....	<b>271</b>
<b>7. Kosmologie II: Inhomogenitäten im Universum</b>	<b>7.1</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>277</b>
	<b>7.2</b>	<b>Gravitative Instabilität</b> .....	<b>278</b>
	7.2.1	Überblick .....	278
	7.2.2	Lineare Störungstheorie .....	279
	<b>7.3</b>	<b>Beschreibung der Dichtefluktuationen</b> .....	<b>282</b>
	7.3.1	Korrelationsfunktionen .....	283
	7.3.2	Das Leistungsspektrum .....	285
	<b>7.4</b>	<b>Entwicklung der Dichtefluktuationen</b> .....	<b>285</b>
	7.4.1	Das anfängliche Leistungsspektrum .....	285
	7.4.2	Anwachsen der Dichtestörungen .....	286
	<b>7.5</b>	<b>Nichtlineare Strukturbildung</b> .....	<b>289</b>
	7.5.1	Modell des sphärischen Kollaps .....	290
	7.5.2	Anzahldichte von Halos Dunkler Materie .....	291
	7.5.3	Numerische Simulationen .....	294
	7.5.4	Profil von Halos Dunkler Materie .....	299
	7.5.5	Das Problem der Substruktur .....	303
	<b>7.6</b>	<b>Pekuliargeschwindigkeiten</b> .....	<b>306</b>
	<b>7.7</b>	<b>Der Ursprung der Dichtefluktuationen</b> .....	<b>308</b>
<b>8. Kosmologie III: Die kosmologischen Parameter</b>	<b>8.1</b>	<b>Rotverschiebungssurveys von Galaxien</b> .....	<b>312</b>
	8.1.1	Einleitung .....	312
	8.1.2	Rotverschiebungssurveys .....	312

8.1.3	Bestimmung des Leistungsspektrums	315
8.1.4	Einfluss von Pekuliargeschwindigkeiten	318
8.1.5	Winkelkorrelationen von Galaxien	320
8.1.6	Kosmische Pekuliargeschwindigkeiten	321
<b>8.2</b>	<b>Kosmologische Parameter aus Galaxienhaufen</b>	<b>323</b>
8.2.1	Anzahldichte	323
8.2.2	Masse-zu-Leuchtkraft-Verhältnis	324
8.2.3	Baryonenanteil	325
8.2.4	Die LSS der Galaxienhaufen	325
<b>8.3</b>	<b>Supernovae hoher Rotverschiebung und die kosmologische Konstante</b>	<b>326</b>
8.3.1	Sind SN Ia Standardkerzen?	326
8.3.2	Beobachtungen von SN Ia bei hohen Rotverschiebungen	327
8.3.3	Resultate	328
8.3.4	Diskussion	329
<b>8.4</b>	<b>Kosmische Scherung</b>	<b>331</b>
<b>8.5</b>	<b>Ursprung des Lyman<math>\alpha</math>-Waldes</b>	<b>333</b>
8.5.1	Das homogene intergalaktische Medium	333
8.5.2	Phänomenologie des Ly $\alpha$ -Waldes	334
8.5.3	Modelle des Ly $\alpha$ -Waldes	335
8.5.4	Der Ly $\alpha$ -Wald als kosmologisches Werkzeug	337
<b>8.6</b>	<b>Winkelfluktuationen des CMB</b>	<b>338</b>
8.6.1	Ursprung der Anisotropie: Überblick	338
8.6.2	Beschreibung der CMB-Anisotropie	340
8.6.3	Das Fluktuationsspektrum	341
8.6.4	Beobachtungen der CMB-Anisotropie	344
8.6.5	WMAP: Präzisionsmessungen der CMB-Anisotropie	347
<b>8.7</b>	<b>Kosmologische Parameter</b>	<b>351</b>
8.7.1	Kosmologische Parameter mit WMAP	351
8.7.2	Kosmische Harmonie	354
<b>9.</b>	<b>Das Universum bei hoher Rotverschiebung</b>	
<b>9.1</b>	<b>Galaxien bei hoher Rotverschiebung</b>	<b>358</b>
9.1.1	Lyman-Break-Galaxien (LBGs)	358
9.1.2	Photometrische Rotverschiebungen	362
9.1.3	Hubble Deep Field(s)	364
9.1.4	Natürliche Teleskope	366
<b>9.2</b>	<b>Neue Typen von Galaxien</b>	<b>369</b>
9.2.1	Starburst-Galaxien	369
9.2.2	Extremely Red Objects (EROs)	371
9.2.3	Submillimeter-Quellen: Blick durch dicken Staub	374
<b>9.3</b>	<b>Hintergrundstrahlung bei kleineren Wellenlängen</b>	<b>376</b>
9.3.1	Der IR-Hintergrund	377
9.3.2	Der Röntgenhintergrund	378

	<b>9.4 Die Reionisation des Universums</b>	379
	9.4.1 Die ersten Sterne	380
	9.4.2 Der Reionisationsprozess	382
	<b>9.5 Die kosmische Geschichte der Sternentstehung</b>	384
	9.5.1 Indikatoren für Sternentstehung	384
	9.5.2 Rotverschiebungsabhängigkeit der Sternentstehung: Das Madau-Diagramm	386
	<b>9.6 Galaxienentstehung und Entwicklung</b>	387
	9.6.1 Erwartungen aus der Strukturbildung	387
	9.6.2 Die Bildung von Ellipsen	388
	9.6.3 Semi-analytische Modelle	391
	<b>9.7 Gamma-Ray Bursts</b>	396
<b>10. Ausblicke</b>		401
<b>Anhang</b>		
<b>A. Das elektromagnetische Strahlungsfeld</b>	<b>A.1 Die Größen des Strahlungsfeldes</b>	411
	<b>A.2 Strahlungstransport</b>	411
	<b>A.3 Schwarzkörper-Strahlung</b>	412
	<b>A.4 Das Magnitudensystem</b>	414
	A.4.1 Scheinbare Helligkeit	414
	A.4.2 Filter und Farben	414
	A.4.3 Absolute Helligkeit	416
	A.4.4 Bolometrische Größen	416
<b>B. Eigenschaften von Sternen</b>	<b>B.1 Zustandsgrößen der Sterne</b>	419
	<b>B.2 Spektralklasse, Leuchtkraftklasse und das Hertzsprung–Russell-Diagramm</b>	419
	<b>B.3 Struktur und Entwicklung von Sternen</b>	421
<b>C. Einheiten und Konstanten</b>		425
<b>D. Literaturempfehlungen</b>	<b>D.1 Allgemeine Lehrbücher</b>	427
	<b>D.2 Speziellere Literatur</b>	427
	<b>D.3 Übersichtsartikel, Aktuelle Literatur und Journale</b>	428
<b>E. Benutzte Akronyme</b>		431
<b>F. Quellennachweis der Abbildungen</b>		435
<b>Sachverzeichnis</b>		447