
Peter Schneider

Einführung in die Extragalaktische Astronomie und Kosmologie

Mit 444 Abbildungen und 10 Tabellen

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung und Überblick	1.1	Einleitung	1
	1.2	Überblick	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
	1.3	Werkzeuge der extragalaktischen Astronomie	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
2. Die Galaxis als Galaxie	2.1	Galaktische Koordinaten	35
	2.2	Entfernungsbestimmungen innerhalb unserer Galaxis	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	Entfernung von visuellen Doppelsternen	44
	2.2.7	Entfernung pulsierender Sterne	44
	2.3	Struktur der Galaxis	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
	2.4	Kinematik der Galaxis	57
	2.4.1	Bestimmung der Geschwindigkeit der Sonne	57

2.4.2	Die Rotationskurve der Galaxis	60
2.5	Der Galaktische Mikrolinseneffekt: Suche nach kompakter Dunkler Materie	65
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
2.6	Das Galaktische Zentrum	78
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
3.	Die Welt der Galaxien	
3.1	Klassifikation	88
3.1.1	Morphologische Klassifikation: Die Hubble-Sequenz	88
3.1.2	Andere Arten von Galaxien	89
3.2	Elliptische Galaxien	90
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
3.3	Spiralgalaxien	98
3.3.1	Trends innerhalb der Spiralsequenz	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
3.4	Skalierungsrelationen	104
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 – σ -Relation	109
3.5	Schwarze Löcher in Zentren von Galaxien	109
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
3.6	Extragalaktische Entfernungsbestimmungen	114
3.6.1	Entfernung zur LMC	115
3.6.2	Die Cepheiden-Entfernung	116
3.6.3	Sekundäre Entfernungsindikatoren	116
3.7	Leuchtkraftfunktion von Galaxien	118

3.8	Galaxien als Gravitationslinsen	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
3.9	Populationssynthese	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
3.10	Chemische Entwicklung von Galaxien	138
4.	Kosmologie I:	
	Homogene isotrope Weltmodelle	
4.1	Einleitung und grundlegende Beobachtungen	141
4.1.1	Grundlegende kosmologische Beobachtungen	142
4.1.2	Einfache Schlussfolgerungen	142
4.2	Ein expandierendes Universum	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
4.3	Konsequenzen der Friedmann-Expansion	153
4.3.1	Die Notwendigkeit eines Big Bang	153
4.3.2	Die Rotverschiebung	156
4.3.3	Entfernung in der Kosmologie	158
4.3.4	Spezialfall: Das Einstein-de-Sitter-Modell	160
4.3.5	Zusammenfassung	161
4.4	Thermische Geschichte des Universums	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
4.5	Erfolge und Probleme des Standardmodells	171
4.5.1	Erfolge	172
4.5.2	Probleme des Standardmodells	172
4.5.3	Erweiterung des Standardmodells; Inflation	175

5. Aktive Galaxienkerne	5.1 Einleitung 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
	5.2 Zoologie der AGNs 185
	5.2.1 QSOs 185
	5.2.2 Seyfert-Galaxien 186
	5.2.3 Radiogalaxien 186
	5.2.4 OVs 186
	5.2.5 BL Lac-Objekte 187
	5.3 Die zentrale Maschine: ein Schwarzes Loch 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
	5.4 Komponenten eines AGN 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
	5.5 Familiäre Beziehungen der AGNs 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
	5.6 AGNs und Kosmologie 217
	5.6.1 Die K-Korrektur 217
	5.6.2 Die Leuchtkraftfunktion der QSOs 218
	5.6.3 Absorptionslinien in Quasaren 220
6. Galaxienhaufen und Galaxiengruppen	6.1 Die Lokale Gruppe 226
	6.1.1 Phänomenologie 226
	6.1.2 Massenabschätzung 227
	6.1.3 Weitere Komponenten der Lokalen Gruppe 229
	6.2 Galaxien in Haufen und Gruppen 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
	6.3	Röntgenstrahlung von Galaxienhaufen	243
	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
	6.4	Skalierungsrelationen von Galaxienhaufen	257
	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
	6.5	Galaxienhaufen als Gravitationslinsen	261
	6.5.1	Leuchtende Bögen (Arcs)	261
	6.5.2	Der Schwache Linseneffekt	265
	6.6	Entwicklungseffekte	271
7.	Kosmologie II: Inhomogenitäten im Universum		
	7.1	Einleitung	277
	7.2	Gravitative Instabilität	278
	7.2.1	Überblick	278
	7.2.2	Lineare Störungstheorie	279
	7.3	Beschreibung der Dichtefluktuationen	282
	7.3.1	Korrelationsfunktionen	283
	7.3.2	Das Leistungsspektrum	285
	7.4	Entwicklung der Dichtefluktuationen	285
	7.4.1	Das anfängliche Leistungsspektrum	285
	7.4.2	Anwachsen der Dichtestörungen	286
	7.5	Nichtlineare Strukturbildung	289
	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
	7.6	Pekuliargeschwindigkeiten	306
	7.7	Der Ursprung der Dichtefluktuationen	308
8.	Kosmologie III: Die kosmologischen Parameter		
	8.1	Rotverschiebungssurveys von Galaxien	312
	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
8.2	Kosmologische Parameter aus Galaxienhaufen	323
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
8.3	Supernovae hoher Rotverschiebung und die kosmologische Konstante	326
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
8.4	Kosmische Scherung	331
8.5	Ursprung des Lymanα-Waldes	333
8.5.1	Das homogene intergalaktische Medium	333
8.5.2	Phänomenologie des Ly α -Waldes	334
8.5.3	Modelle des Ly α -Waldes	335
8.5.4	Der Ly α -Wald als kosmologisches Werkzeug	337
8.6	Winkelfluktuationen des CMB	338
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
8.7	Kosmologische Parameter	351
8.7.1	Kosmologische Parameter mit WMAP	351
8.7.2	Kosmische Harmonie	354
9. Das Universum bei hoher Rotverschiebung		
9.1	Galaxien bei hoher Rotverschiebung	358
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
9.2	Neue Typen von Galaxien	369
9.2.1	Starburst-Galaxien	369
9.2.2	Extremely Red Objects (EROs)	371
9.2.3	Submillimeter-Quellen: Blick durch dicken Staub	374
9.3	Hintergrundstrahlung bei kleineren Wellenlängen	376
9.3.1	Der IR-Hintergrund	377
9.3.2	Der Röntgenhintergrund	378

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