

# Inhaltsverzeichnis

**Vorwort** XI

**Konstanten, Umrechnungsfaktoren und Symbole** XV

- 1 Ein historischer Abriss kosmologischer Theorien** 1
- 2 Beobachtungen – ein Überblick** 3
  - 2.1 Im sichtbaren Licht 4
  - 2.2 In anderen Wellenbereichen 8
  - 2.3 Homogenität und Isotropie 10
  - 2.4 Die Expansion des Universums 10
  - 2.5 Teilchen im Universum 13
    - 2.5.1 Welche Teilchen gibt es? 13
    - 2.5.2 Die thermische Verteilung und das Schwarzkörper-Spektrum 16
- 3 Newton'sche Gravitation** 20
  - 3.1 Die Friedmann-Gleichung 21
  - 3.2 Über die Bedeutung der Expansion 24
  - 3.3 Schneller als das Licht 25
  - 3.4 Die Flüssigkeitsgleichung 25
  - 3.5 Die Beschleunigungsgleichung 27
  - 3.6 Über Masse, Energie und verschwindende  $c^2$ -Faktoren 28
- 4 Die Geometrie des Universums** 29
  - 4.1 Die flache Geometrie 29
  - 4.2 Die sphärische Geometrie 30
  - 4.3 Die hyperbolische Geometrie 33
  - 4.4 Unendliche und beobachtbare Universen 34
  - 4.5 Wo fand der Urknall statt? 34
  - 4.6 Die drei Werte von  $k$  35

<b>5</b>	<b>Einfache kosmologische Modelle</b>	<b>38</b>
5.1	Das Hubble-Gesetz	38
5.2	Expansion und Rotverschiebung	39
5.3	Lösen der Gleichungen	41
5.3.1	Materie	41
5.3.2	Strahlung	43
5.3.3	Gemische	44
5.4	Teilchendichten	45
5.5	Die Evolution inklusive Krümmung	46
<b>6</b>	<b>Beobachtbare Parameter</b>	<b>51</b>
6.1	Die Expansionsrate $H_0$	51
6.2	Der Dichteparameter $\Omega_0$	53
6.3	Der Abbremsparameter $q_0$	55
<b>7</b>	<b>Die kosmologische Konstante</b>	<b>58</b>
7.1	Die Einführung der kosmologischen Konstante $\Lambda$	58
7.2	Die Flüssigkeitsbeschreibung von $\Lambda$	59
7.3	Kosmologische Modelle mit $\Lambda$	61
<b>8</b>	<b>Das Alter des Universums</b>	<b>64</b>
<b>9</b>	<b>Die Dichte des Universums und die Dunkle Materie</b>	<b>69</b>
9.1	Wie schwer ist das Universum?	69
9.1.1	Sterne zählen	69
9.1.2	Nukleosynthese vorweggenommen	70
9.1.3	Rotationskurven von Galaxien	71
9.1.4	Die Zusammensetzung von Galaxienhaufen	73
9.1.5	Bewegung größerer Gebiete im Universum	74
9.1.6	Die Strukturbildung	75
9.1.7	Die Geometrie des Universums und die Helligkeit von Supernovae	75
9.1.8	Überblick	76
9.2	Was könnte Dunkle Materie bloß sein?	77
9.2.1	Elementarteilchen	77
9.2.2	Kompakte Objekte	78
9.3	Die Suche nach der Dunklen Materie	80
<b>10</b>	<b>Die kosmische Hintergrundstrahlung</b>	<b>83</b>
10.1	Die Eigenschaften der kosmischen Hintergrundstrahlung	83
10.2	Das Verhältnis der Photonenzahl zur Baryonenzahl	85
10.3	Der Ursprung der kosmischen Hintergrundstrahlung	87
10.4	Der Ursprung der kosmischen Hintergrundstrahlung (Fakultative Betrachtung für Fortgeschrittene)	90

- 11 Das frühe Universum 94**
- 12 Die Nukleosynthese: Der Ursprung der leichten Elemente 101**
- 12.1 Wasserstoff und Helium 101
- 12.2 Vergleich mit Beobachtungen 104
- 12.3 Gegenüberstellung von Entkopplung und Nukleosynthese 107
- 13 Das inflationäre Universum 109**
- 13.1 Probleme der Urknalltheorie 109
- 13.1.1 Das Flachheitsproblem 109
- 13.1.2 Das Horizontproblem 111
- 13.1.3 Häufigkeiten von Reliktteilchen 112
- 13.2 Die inflationäre Expansion 113
- 13.3 Die Lösung der Probleme der Urknalltheorie 115
- 13.3.1 Das Flachheitsproblem 115
- 13.3.2 Das Horizontproblem 116
- 13.3.3 Reliktteilchen-Häufigkeiten 117
- 13.4 Wie viel Inflation? 117
- 13.5 Die Inflationstheorie und die Teilchenphysik 118
- 14 Die Anfangssingularität (der Urknall) 122**
- 15 Das Standardmodell der Kosmologie im Überblick 126**
- 15.1 Expansion 126
- 15.2 Geometrie 127
- 15.3 Alter 127
- 15.4 Das Schicksal des Universums 127
- 15.5 Der Inhalt des Universums 128
- 15.6 Frühgeschichte des Universums 129
- 15.7 Ausblick 129
- Themen für Fortgeschrittene 131**
- F1 Relativistische Kosmologie 131**
- F1.1 Die Raumzeit-Metrik 131
- F1.2 Die Einstein'schen Gleichungen 133
- F1.3 Exkurs: Die Topologie des Universums 135
- F2 Klassische Kosmologie: Abstände und Leuchtkräfte 138**
- F2.1 Lichtausbreitung und Rotverschiebung 138
- F2.2 Das beobachtbare Universum 141
- F2.3 Die Leuchtkraftentfernung 142
- F2.4 Winkelabstand 146
- F2.5 Die Statistik beobachteter Quellen 149

<b>F3</b>	<b>Neutrino-Kosmologie</b>	152
F3.1	Masselose Neutrinos	152
F3.2	Massive Neutrinos	154
F3.2.1	Leichte Neutrinos	155
F3.2.2	Schwere Neutrinos	156
F3.3	Neutrinos und Strukturbildung	156
<b>F4</b>	<b>Die Baryogenese</b>	159
<b>F5</b>	<b>Strukturen im Universum</b>	163
F5.1	Die beobachteten Strukturen	163
F5.2	Die Gravitationsinstabilitäten	165
F5.3	Die Verteilung der Galaxien	167
F5.4	Anisotropien in der kosmischen Hintergrundstrahlung	169
F5.4.1	Die statistische Beschreibung der Anisotropien	169
F5.4.2	Die Berechnung von $C_\ell$	171
F5.4.3	Beobachtungen des Mikrowellenhintergrunds	173
F5.4.4	Die räumliche Geometrie	174
F5.5	Der Ursprung der Struktur	175
<b>F6</b>	<b>Einschränkende kosmologische Modelle</b>	179
F6.1	Kosmologische Modelle und Parameter	179
F6.2	Kosmologische Schlüsselbeobachtungen	180
F6.3	Kosmologische Datenanalyse	181
F6.4	Das kosmologische Standardmodell – Ausgabe 2008	183
F6.5	Die Zukunft	185
	<b>Bibliographie</b>	187
	<b>Lösungen und Tipps zu den Aufgaben</b>	189
	<b>Sachregister</b>	195