

Inhaltsverzeichnis

Teil I Einführung in die moderne Astrophysik

1	Einige wichtige physikalische Grundlagen	3
1.1	Überblick	3
1.2	Größenordnungen und Modellbereiche	16
1.2.1	Orts- und Zeitskalen	16
1.2.2	Kräfte und Energieskalen	23
1.2.3	Gravitation	27
1.2.4	Modellbildung	31
1.3	Astrophysikalische Strukturen	35
1.3.1	Das Universum insgesamt	36
1.3.2	Virialtheorem	45
1.3.3	Größe von Strukturen	46
1.4	Strahlung und Helligkeit	58
1.4.1	Photonen im Gleichgewicht	60
1.4.2	Helligkeit und Größenklassen	67
1.4.3	Hertzsprung-Russell-Diagramm	75
1.5	Strahlungs- und Energietransport	76
1.5.1	Strahlungstransportgleichung	77
1.5.2	Diffusionsmodelle für den Transport	86
1.5.3	Konvektiver Transport	90
2	Beobachtungsmöglichkeiten	95
2.1	Klassische Verfahren	95
2.1.1	Methoden der Abstandsbestimmung	96
2.1.2	Stark vereinfachte Modelle für Cepheiden	108
2.1.3	Massenbestimmung	114
2.1.4	Radiusbestimmung	115
2.1.5	Oberflächentemperatur	116
2.1.6	Geschwindigkeitsbestimmung	117
2.2	Beobachtungsinstrumente	121

3	Kosmische Strahlung	139
3.1	Überblick	139
3.2	Beschleunigungsmechanismen	148
3.2.1	Beschleunigung durch magnetische Spiegel	149
3.2.2	Fermi-Beschleunigung	156
4	Sternaufbau und Sternentwicklung	163
4.1	Grundgleichungen für leuchtende Sterne	164
4.1.1	Sternaufbaugleichungen	166
4.1.2	Zustandsgleichungen	170
4.1.3	Sternaufbaugleichungen und Virialtheorem	175
4.2	Stellare Energiequellen	176
4.2.1	Grundsätzliches	177
4.2.2	Fusionsprozesse in Sternen	189
4.3	Unsere Sonne	193
4.3.1	Sonnenparameter	194
4.3.2	Transport und Stabilität	197
4.3.3	Sonnenatmosphäre	199
4.3.4	Helioseismologie	206
4.3.5	Prototyp eines Standardsonnenmodells	207
4.3.6	Solare Neutrinos	210
4.3.7	Ausblick	211
4.4	Zustandsgleichungen und Chandrasekhar-Masse	214
4.4.1	Ideales klassisches Gas	214
4.4.2	Ideale Quantengase	218
4.4.3	Weiße Zwerge	226
4.4.4	Polytrope Zustandsgleichungen	228
4.4.5	Chandrasekhar-Masse	231
4.4.6	Dichte Coulomb-Systeme	240
4.4.7	Neutronen kommen ins Spiel	249
4.5	Strukturbildung	253
4.5.1	Qualitative Aussagen	254
4.5.2	Jeans-Instabilität	257
4.6	Sternentwicklung: Anfänge	264
4.6.1	Entwicklung der Protosterne	265
4.6.2	Hertzsprung-Russell-Diagramm	271
4.6.3	Lösung der Sternaufbaugleichungen	275
4.6.4	Massengrenzen	285

5	Endstadien leuchtender Sterne	291
5.1	Sterbende Sterne	292
5.1.1	Weiße Zwerge	292
5.1.2	Neutronensterne	305
5.1.3	Quellen hochintensiver Strahlung	316
5.2	Schwarze Löcher	324
6	Galaxien	333
6.1	Die Milchstraße	333
6.2	Allgemeine Eigenschaften von Galaxien	339
6.2.1	Galaxienbeobachtung	339
6.2.2	Olbers'sches Paradoxon	346
6.2.3	Materiehaushalt	350
6.3	Modellierung	355

Teil II Einführung in die Allgemeine Relativitätstheorie

7	Rechenregeln der ART	361
7.1	Mathematische Terminologie der SRT	361
7.1.1	Lorentz-Transformation	362
7.1.2	Beschleunigte Bezugssysteme	370
7.2	Einstein'sche Feldgleichungen	372
7.2.1	Prinzipien	373
7.2.2	Die Feldgleichungen „fallen vom Himmel“	378
7.3	Newton'scher Grenzfall	384
7.3.1	Bewegungsgleichung	385
7.3.2	Bestimmungsgleichung für das Potenzial	386
7.4	Struktur der Einstein'schen Feldgleichungen	389
7.4.1	Mathematischer Hintergrund	391
7.4.2	Der Quellterm	398
7.4.3	Kovarianz der Bewegungsgleichung	401
7.5	Feldgleichungen und Variationsprinzip	404
7.5.1	Metrische Determinante	404
7.5.2	Homogene Einstein-Gleichungen	406
7.5.3	Energie-Impuls-Tensor	407
7.5.4	Kosmologische Konstante	408
7.5.5	Notationen im Vergleich	409

8	ART-Effekte	411
8.1	Äußere Schwarzschild-Metrik	411
8.1.1	Metrische Koeffizienten	411
8.1.2	Teilchen im Schwarzschild-Feld	414
8.2	Periheldrehung des Merkurs	421
8.3	Licht im Schwerefeld	424
8.3.1	Lichtablenkung im Schwerefeld	424
8.3.2	Frequenzverschiebung	430
8.3.3	Laufzeitverzögerung	431
8.4	Gravitationswellen	433
8.4.1	Wellengleichung im materiefreien Raum	434
8.4.2	Eichung, Polarisierung und Erzeugung	436
8.4.3	Nachweismethoden	446
9	Relativistische Sterndynamik	457
9.1	Relativistische Sternleichgewichte	457
9.1.1	Innere Schwarzschild-Metrik	458
9.1.2	Relativistische Gleichgewichte	464
9.1.3	Stabilität	468
9.2	Gravitationskollaps	478
9.2.1	Zeitabhängige Metriken	478
9.2.2	Zeitabhängige Lösungen	484
9.3	Rotierende Schwarze Löcher	490
9.3.1	Grundsätzliches	491
9.3.2	Kerr-Metrik	493
9.3.3	Aktuelle Forschung zu Schwarzen Löchern	494
 Teil III Einführung in die Kosmologie		
10	Homogene Kosmologie	501
10.1	Ausgangslage für kosmologische Ansätze	501
10.2	Friedmann-Lemaître-Gleichungen	504
10.2.1	Robertson-Walker-Metrik	504
10.2.2	Friedmann-Lemaître-Gleichungen	508
10.2.3	Historische Rückschau	510
10.2.4	Friedmann-Gleichung für $P = 0$	512
10.2.5	Friedmann-Gleichung mit drei Komponenten	519
10.2.6	Universum mit Strahlungsdominanz	523
10.2.7	Dominanz von Materie	525
10.2.8	Von Strahlungs- zu Materiedominanz	526
10.2.9	Kosmografie	528

10.3	Weltmodelle	530
10.3.1	Kosmologische Konstante	530
10.3.2	Schwarzschild-deSitter-Raum	533
10.3.3	Lösungen der Friedmann-Lemaître-Gleichungen	533
11	Primordiale Nukleosynthese	545
11.1	Grundlagen	546
11.1.1	Bausteine des Universums	546
11.1.2	Freiheitsgrade	549
11.2	Thermische Entwicklung des jungen Universums	552
11.2.1	Die ersten Bruchteile von Sekunden	553
11.2.2	Ausfrieren von Freiheitsgraden	563
11.3	Das Universum wird „erwachsen“	568
12	Supernovae Surveys	571
12.1	Entfernungsmaße	571
12.2	Beobachtungslängen	579
12.3	Auswertungen	584
12.3.1	Leuchtkraftentfernung und Rotverschiebung	584
12.3.2	Beobachtungen	587
13	Kosmische Mikrowellenhintergrundstrahlung	589
13.1	Beobachtungen	589
13.2	Erste Analysen	597
13.2.1	Temperatur und Skalenfaktor	597
13.2.2	Entkopplungsmodell	599
13.2.3	Horizontproblem der CMB	601
14	Inflation	603
14.1	Ansätze	603
14.1.1	Konforme Zeit	605
14.1.2	Phänomenologie der Inflation	609
14.2	Inflatonfeld in klassischer Beschreibung	616
14.2.1	Normierungen und Konventionen	616
14.2.2	Modell	619
14.2.3	Approximative Lösung	622
14.2.4	Auflösung wichtiger kosmologischer Probleme	626
14.2.5	Flachheitsproblem	627
14.2.6	Monopolproblem	628

15	Inhomogene Kosmologie	629
15.1	Newton'sche Subhorizontstörungen	630
15.1.1	Jeans-Rechnung mit expandierendem Hintergrund	630
15.1.2	Jeans-Masse	632
15.1.3	Verhalten Dunkler Materie	638
15.2	Grundlagen der inhomogenen Kosmologie	639
15.2.1	Gestörte metrische Koeffizienten	639
15.2.2	Freiheit der Eichung	642
15.2.3	Gestörter Energie-Impuls-Tensor	647
15.2.4	Gestörte Einstein-Gleichungen	653
15.3	Informationsübertrag aus der Frühphase	659
15.3.1	Entwicklung der Krümmungsstörung	659
15.3.2	Eintritt in den Horizont	664
15.3.3	Spektrale Verteilungen	673
15.4	Quantenfluktuationen	680
15.4.1	Zusammenhang zwischen $\mathcal{R}$ und $\delta\phi$	680
15.4.2	Subhorizontartige Feldfluktuationen	681
15.4.3	Krümmungsskalar	684
15.5	Phänomenologie	686
15.5.1	Dichte- und Massenansammlungen	687
15.5.2	Vermessung von Galaxien	689
15.5.3	Fluktuationen in der CMB	694
15.5.4	Polarisation in der CMB	701
	Literatur	707
	Stichwortverzeichnis	711