

Kurzinhaltsverzeichnis

I	Spezielle Relativitätstheorie	1
1	Einführung in die SRT	3
2	Entwicklung und Grundprinzipien der SRT	4
3	Relativistische Kinematik	18
4	Relativistische Mechanik	74
5	Relativistische Formulierung der Elektrodynamik	120
6	Beschleunigte Bezugssysteme in der SRT	156
II	Allgemeine Relativitätstheorie	159
7	Einführung in die ART	161
8	Geometrische und physikalische Grundlagen der ART	165
9	Mathematische Grundlagen der ART	200
10	Physikalische Grundgesetze in der ART	241
11	Einfache Anwendungen der ART	292
12	Linearisierte Feldgleichungen und Gravitationswellen	326
13	Radialsymmetrische Lösungen der Feldgleichungen mit Materie	337
III	Einführung in die Kosmologie	367
14	Einführung	369
15	Newton- und SRT-Kosmologie	385
16	Mathematische Grundlagen der ART-Kosmologie	404
17	Kosmographie	428
18	Hydro-, Thermo- und Elektrodynamik des kosmischen Substrats	449
19	Grundgleichungen und Lösungsmannigfaltigkeit	468
20	Auswahl realistischer Weltmodelle	489
21	Frühes Universum und Umwandlungsprozesse im kosmischen Substrat	517

22	Nicht expandierende Objekte	528
23	Kosmische Inflation	537
24	Kausale Struktur des Universums	572
	Sachregister	591
	Symbolverzeichnis	603

Inhaltsverzeichnis

I	Spezielle Relativitätstheorie	1
1	Einführung in die SRT	3
2	Entwicklung und Grundprinzipien der SRT	4
2.1	Äthertheorie	4
2.2	Relativitätspostulat und Konstanz der Lichtgeschwindigkeit	10
2.3	Raum-Zeit-Struktur der SRT	12
2.4	Synchronisation von Uhren	14
2.5	Konsequenzen aus der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit	15
2.5.1	Relativität der Gleichzeitigkeit	15
2.5.2	Relativität und Messung von Längen	16
	Aufgaben	17
3	Relativistische Kinematik	18
3.1	Lorentz-Transformation	18
3.1.1	Affinität der Transformation	19
3.1.2	Standardkonfiguration	21
3.1.3	Lorentz-Transformation für Systeme in Standardkonfiguration	22
3.1.4	Eigentliche Lorentz-Transformation	27
3.1.5	Eigenschaften der Lorentz-Transformation	28
3.1.6	c als Maximalgeschwindigkeit und Kausalitätsprinzip	29
3.1.7	Transformation von Geschwindigkeiten und Beschleunigungen	31
3.2	Lorentz-Kontraktion	35
3.2.1	Fotografische Momentaufnahmen schnell bewegter Körper	37
3.3	Zeitdilatation	42
3.3.1	Theoretische Ableitung	42
3.3.2	Experimenteller Nachweis	43
3.3.3	Direkt beobachtbare Zeitveränderungen	46
3.4	Minkowski-Diagramme	47
3.4.1	Lorentz-Kontraktion und Zeitdilatation	48
3.4.2	Lichtkegel, Vergangenheit und Zukunft	49
3.5	Kinematische Paradoxa	51
3.5.1	Garagenparadoxon	52
3.5.2	Skifahrerparadoxon	53
3.5.3	Zwillingsparadoxon	55

3.6	Vektoren und Tensoren in der vierdimensionalen Raum-Zeit	60
3.6.1	Koordinatenabhängige Definition von Tensoren	60
3.6.2	Metrik, Skalarprodukt, Heben und Senken von Indizes	64
3.6.3	Sätze über Tensoren und Lorentz-Transformation	67
	Exkurs 3.1: Zusammenhang zwischen koordinatenab- und unabhängiger Formulierung der Tensorrechnung	70
	Aufgaben	72
4	Relativistische Mechanik	74
4.1	Vorbetrachtungen	74
4.1.1	Zur Geschwindigkeitsabhängigkeit der Masse	74
4.1.2	Äquivalenz von Masse und Energie	76
4.2	Vierervektoren der Geschwindigkeit, Beschleunigung und Kraft	76
4.3	Relativistische Bewegungsgleichung eines einzelnen Massenpunktes	79
4.4	Relativistische Bewegungsgleichungen für Systeme von Massenpunkten	82
4.4.1	Zweierstöße	83
4.4.2	Inelastische Stöße mit Teilchenerzeugung und -vernichtung	86
4.5	Relativistische kinetische Energie und Energie-Masse-Äquivalenz	88
4.6	Photonenmasse	90
4.7	Äquivalenz von träger und schwerer Masse	91
4.8	Tachyonen	92
4.9	Energie-Impuls-Tensor	93
4.9.1	Einzelner Massenpunkt	93
4.9.2	System von Massenpunkten	95
	Exkurs 4.1: Plädoyer für die bewegte Masse	96
4.10	Lagrange- und Hamilton-Formulierung der Bewegungsgleichung	97
4.10.1	Systemabhängige Formulierung	97
4.10.2	Invariante Formulierung	99
4.11	Spezielle Probleme	103
4.11.1	Relativistische Weltraumfahrt	103
4.11.2	Lösung der Gleichungen für den elastischen Stoß	105
4.11.3	Schwellenenergie bei inelastischen Stößen	112
4.12	Mechanik idealer Flüssigkeiten	114
4.12.1	Druckfreie Flüssigkeiten	114
4.12.2	Flüssigkeiten mit isotropem Druck	116
	Aufgaben	118
5	Relativistische Formulierung der Elektrodynamik	120
5.1	Kovariante Formulierung der Maxwell-Gleichungen	120
5.2	Transformation der elektromagnetischen Feldgrößen	123
5.2.1	Transformation von E , B , ρ_{el} und j	123
5.2.2	Transformationsinvarianten	124
5.3	Maxwell-Gleichungen und Ohmsches Gesetz in Materie	126
5.4	Kovariante Darstellung avancierter und retardierter Potentiale	127
5.5	Potentiale und Felder einer beschleunigten Punktladung	129
5.6	Teilchenbewegung im elektromagnetischen Feld	132

5.7	Energie- und Impulserhaltung	136
5.8	Elektromagnetische Theorie des Elektrons	137
5.9	Doppler-Verschiebung und Aberration	139
5.10	Strahlungsprobleme bei der Bewegung geladener Teilchen	141
5.10.1	Energie- und Impulsabgabe eines strahlenden Teilchens	142
5.11	Lorentz-Dirac-Gleichung	145
5.11.1	Heuristische Ableitung	145
	Exkurs 5.1: Skizze der Diracschen Ableitung	147
5.11.2	Eigenschaften der Lorentz-Dirac-Gleichung	148
5.11.3	Lösung mit Strahlung und ohne Strahlungsreaktion	151
	Aufgaben	154
6	Beschleunigte Bezugssysteme in der SRT	156
II	Allgemeine Relativitätstheorie	159
7	Einführung in die ART	161
	Aufgaben	164
8	Geometrische und physikalische Grundlagen der ART	165
8.1	Geometrische Grundlagen	165
8.1.1	Gaußsche Geometrie gekrümmter Flächen	166
8.1.2	Riemannsche Geometrie	169
8.1.3	Finsler-Geometrie	170
8.2	Geometrie und physikalische Raum-Zeit	174
8.2.1	Eigenschaften der Raum-Zeit	174
8.2.2	Realisierung räumlicher und zeitlicher Koordinaten	175
8.3	Relativitätsprinzipien, Machsches Prinzip und Äquivalenzprinzip	178
8.3.1	Relativitätsprinzip der Newtonschen Theorie	178
8.3.2	Relativitätsprinzip der SRT	179
8.3.3	Machsches Prinzip	179
8.3.4	Äquivalenzprinzip	182
8.4	Folgerungen aus dem Äquivalenzprinzip	188
8.4.1	Metrik der ART	188
8.4.2	Relativitätsprinzip der ART	196
8.5	Grundlagen der Gravitationstheorie	197
8.6	ART und Machsches Prinzip	199
	Aufgaben	199
9	Mathematische Grundlagen der ART	200
9.1	Koordinatenabhängige Definition von Vektoren und Tensoren	200
9.2	Tensoralgebra	203
9.2.1	Invarianz von Symmetrien	204
9.2.2	Übertragung von Symmetrien	204
9.2.3	Quotientenkriterium	204

9.2.4	Folgerungen aus dem Quotientenkriterium	205
9.2.5	Spezielle Tensoren	205
9.2.6	Heben und Senken von Indizes, Skalarprodukt	206
9.2.7	Eigenschaften des metrischen Tensors $g_{\mu\nu}$	207
9.2.8	Orthogonale, zeitorthogonale und synchrone Koordinaten	208
9.2.9	Skalare und tensorielle Dichten	210
9.3	Tensoranalysis	211
9.3.1	Kovariante Ableitung	211
9.3.2	Parallelität im Kleinen und Paralleltransport	215
9.3.3	Skalarprodukt und Paralleltransport	216
9.3.4	Anschauliche Deutung der kovarianten Ableitung	216
9.3.5	Zusammenhang zwischen $\Gamma_{\mu\nu}^{\lambda}$ und $g_{\mu\nu}$	217
9.3.6	Kovariante Rotation	218
9.3.7	Kovariante Divergenz von Vektoren und Gaußscher Satz	218
9.3.8	Kovariante Ableitung von Tensoren	220
9.4	Geodätische Linien	220
9.5	Krümmungstensor	222
9.5.1	Paralleltransport auf geschlossenen Kurven	224
9.5.2	Global pseudo-euklidischer Raum	226
9.5.3	Eigenschaften des Krümmungstensors	228
9.5.4	Ricci-Tensor und Krümmungsskalar	229
9.6	Formulierung von Naturgesetzen mit Hilfe von Tensoren	230
	Exkurs 9.1: Koordinatenunabhängige Einführung von Vektoren und Tensoren	231
	Aufgaben	239
10	Physikalische Grundgesetze in der ART	241
10.1	Messung von Zeiten und Längen in der ART	241
10.1.1	Messung in Nichtinertialsystemen	242
10.1.2	Endliche Eigenzeitintervalle	250
10.2	Mechanik	251
10.2.1	Bewegungsgleichung für Massenpunkte	251
10.2.2	Physikalische Impulse und Geschwindigkeiten	253
10.2.3	Newtonscher Grenzfall für Einzelteilchen im Schwerfeld	254
10.2.4	Erhaltungssätze beim freien Fall	255
10.2.5	Relativbewegung im inhomogenen Schwerfeld	256
10.2.6	Mechanik idealer Flüssigkeiten	258
10.3	Elektrodynamik	258
10.3.1	Maxwell-Gleichungen der ART	258
10.3.2	Ladungserhaltung	260
10.4	Kopplung von Mechanik und Elektrodynamik	261
10.5	Lorentz-Dirac-Gleichung der ART	264
10.6	Einsteinsche Feldgleichungen im Vakuum	266
10.7	Einsteinsche Feldgleichungen mit Materie	267
10.7.1	Freiheiten bei der Lösung der Feldgleichungen	271
10.8	Materietensor für ein System geladener Punktteilchen	273

10.9	Hilbertsches Variationsprinzip	274
10.10	Energie des Gravitationsfeldes in der Newton-Theorie	276
10.10.1	Reine Newton-Theorie	277
10.10.2	Speziellrelativistisch modifizierte Newton-Theorie	277
10.11	Energie-Impuls-Komplex	282
10.11.1	Lokale und globale Erhaltungssätze	285
10.11.2	Definition von Massen und Feldenergien.	289
10.12	Symmetrie und Erhaltungssätze	289
	Exkurs 10.1: Ungeladene Teilchen in inhomogenen Schwerfeldern* . .	290
	Aufgaben	291
11	Einfache Anwendungen der ART	292
11.1	Schwarzschild-Lösung	292
11.1.1	Allgemeine Metrik mit räumlicher Kugelsymmetrie	292
11.1.2	Christoffel-Symbole und Ricci-Tensor bei Kugelsymmetrie . .	294
11.1.3	Lösung der Vakuum-Feldgleichungen	296
11.1.4	Kruskal-Form der Schwarzschild-Metrik	300
11.2	Bewegung eines Punktteilchens im Schwarzschild-Feld	303
11.2.1	Periheldrehung gebundener Bahnen	305
11.2.2	Eigenzeit in einem Satelliten	307
11.2.3	Freier Fall in radialer Richtung	308
11.2.4	Schwerebeschleunigung im Schwarzschild-Feld	313
11.3	Ausbreitung von Licht im Schwarzschild-Feld	314
11.3.1	Grundgleichungen	314
11.3.2	Lichtablenkung	316
11.3.3	Gravitationslinsen	319
11.3.4	Einfang von Licht	320
11.4	Rotverschiebung von Spektrallinien im Gravitationsfeld	322
11.4.1	Beobachtung von Unter- und Überlichtgeschwindigkeiten . . .	324
	Aufgaben	325
12	Linearisierte Feldgleichungen und Gravitationswellen	326
12.1	Linearisierung der Feldgleichungen	326
12.2	Lösung der inhomogenen Gravitationswellengleichung	329
12.3	Ebene Gravitationswellen	330
12.4	Zur Energie von Gravitationswellen	331
12.5	Wirkung von Gravitationswellen auf Probeteilchen	333
12.6	Experimente zum Nachweis von Gravitationswellen	334
12.7	Existenz und indirekter Nachweis von Gravitationswellen	335
	Aufgaben	336
13	Radialsymmetrische Lösungen der Feldgleichungen mit Materie	337
13.1	Sternleichgewicht	339
13.1.1	Gleichungen für statisches Gleichgewicht	339
13.1.2	Gleichgewichtslösung für konstante Dichte	342
13.1.3	Massendefekt	343

13.1.4	Energie-Komplex und Gravitationsfeldenergie des Sterns* . . .	345
13.1.5	Neudefinition der Bestandteile des Energie-Impuls-Komplexes*	351
13.2	Kugelsymmetrischer Gravitationskollaps	353
13.2.1	Übergang zu mitbewegten Koordinaten	353
13.2.2	Feldgleichungen für den Kollaps eines druckfreien Gases konstanter Dichte	354
13.2.3	Lösung der Feldgleichungen	355
	Exkurs 13.1: Energiekomplex kollabierender Sterne und Energie des Gravitationsfeldes*	360
13.3	Schwarze Löcher	362
13.3.1	Hawking-Strahlung schwarzer Löcher	365
	Aufgaben	366

III Einführung in die Kosmologie 367

14	Einführung	369
14.1	Historischer Rückblick	371
14.2	Zur empirischen Struktur des Universums	378
15	Newton- und SRT-Kosmologie	385
15.1	Newtonsche und pseudo-Newtonsche Kosmologie	385
15.1.1	Grundgleichungen und Hubblesches Expansionsgesetz	385
15.1.2	Übergang zu mitbewegten Koordinaten	389
15.1.3	Ableitung der kosmologischen Gleichungen in mitgeführten Koordinaten	390
15.1.4	Interpretation und Gültigkeitsgrenzen	391
15.1.5	Kosmologische Kraft	392
15.1.6	Kosmologische Gleichungen mit kosmologischer Kraft	394
15.1.7	Statische Lösung	396
15.1.8	Stationäre Lösung	397
15.1.9	Rein Newtonsche Lösungen mit Urknall	398
15.2	SRT-Modell von Milne	399
	Aufgaben	402
16	Mathematische Grundlagen der ART-Kosmologie	404
16.1	Symmetrische Räume, Bewegungsgruppen und Killing-Vektoren	404
16.2	Homogenität, Isotropie und maximale Symmetrie	408
16.3	Metrik maximal symmetrischer Räume	414
16.3.1	Raumartige Räume maximaler Symmetrie	415
16.3.2	Maximal symmetrische Raum-Zeit	416
16.3.3	Homogenität und Isotropie in einem Unterraum	417
16.3.4	Räumlich homogene und isotrope Raum-Zeit	418
16.4	Maximal forminvariante Tensoren in maximal symmetrischen Räumen	421
	Aufgaben	423

17	Kosmographie	428
17.1	Kosmologisches Prinzip und Robertson-Walker-Metrik	428
17.2	Abstands- und Zeitmessung	430
17.3	Expansion und Kontraktion des Weltalls	432
17.4	Teilchen- und Ereignishorizont	434
17.5	Bewegung von Teilchen	438
17.6	Rotverschiebung	439
	17.6.1 Zusammenhang zwischen Rotverschiebung und Ort bzw. Zeit der Lichtemission	441
17.7	Zum Olbersschen Paradoxon	445
	Aufgaben	447
18	Hydro-, Thermo- und Elektrodynamik des kosmischen Substrats	449
18.1	Hydrodynamik des kosmischen Substrats	449
18.2	Thermodynamik relativistischer Fluide	453
	18.2.1 Zustandsgleichungen	453
	18.2.2 Kosmische Hintergrundstrahlung	455
	18.2.3 Entropie und Entropiesatz	459
18.3	Skalenverhalten von Druck, Dichte und Temperatur	460
	18.3.1 Entkoppelte Strahlung und Materie	460
	18.3.2 Gekoppelte Strahlung und Materie	461
18.4	Elektrische Ladung des Universums	464
	Aufgaben	465
19	Grundgleichungen und Lösungsmannigfaltigkeit	468
19.1	Feldgleichungen der Robertson-Walker-Metrik	468
19.2	Erste Folgerungen	473
	19.2.1 Urknall	473
	19.2.2 Raumkrümmung und Krümmung der Raum-Zeit.	474
19.3	Druckfreie Lösungen der Friedmann-Lemaître-Gleichung	474
	19.3.1 Umformung und Parameterabhängigkeit der Gleichung	474
	19.3.2 Einsteins statische Lösung	475
	19.3.3 Lösungen ohne Materie	476
	19.3.4 Lösungen ohne kosmologische Kraft: Standardmodell	477
	19.3.5 Lösungen mit Materie und kosmologischer Kraft	479
19.4	Lösungen mit endlichem Druck und $\Lambda=0$	482
	19.4.1 Strahlungsuniversum	482
	19.4.2 Entkoppelte Strahlung und Materie	483
19.5	Stationäres Universum	485
	Aufgaben	487
20	Auswahl realistischer Weltmodelle	489
20.1	Komponenten des kosmischen Substrats	489
20.2	Grundgleichung und relative Dichteparameter	490
20.3	Separate Behandlung verschiedener Evolutionsphasen	493
	20.3.1 Materie-Strahlung-Gleichgewicht	494

20.3.2	Die ersten zweieinhalb Milliarden Jahre	495
20.3.3	Von der Strahlungsentkopplung bis $t = \infty$	497
20.3.4	Einschränkungen des Parameterbereichs für $t \geq t_e$	499
20.4	Bestimmung von H_0 , Ω_{m0} und Ω_{A0}	502
20.5	Favorisiertes Modell	505
20.6	Probleme der Weltmodelle	509
20.6.1	Durch Urknall gelöste und im Rahmen von Urknallmodellen lösbare Probleme	509
20.6.2	Flachheitsproblem	510
20.6.3	Problem der fehlenden Masse und dunkle Materie	511
Aufgaben	513
21	Frühes Universum und Umwandlungsprozesse im kosmischen Sub- strat	517
21.1	Problem der Anfangssingularität	517
21.2	Einfluß von Quanteneffekten	518
21.3	Evolutionsszenario	520
21.3.1	Ära relativistischer Teilchen und der Strahlung	520
21.3.2	Materiedominierte Ära	524
21.3.3	Temperaturentwicklung	526
Aufgaben	527
22	Nicht expandierende Objekte	528
22.1	Einstein-Strauss-Vakuole	528
22.2	Berücksichtigung dunkler Energie*	531
22.2.1	Ursache von Nichtexpansion	533
22.2.2	Zusammenwirken von Expansion und Nichtexpansion	535
22.3	Grenzen der Nichtexpansion*	535
23	Kosmische Inflation	537
23.1	Urknall-Probleme	537
23.1.1	Horizontproblem	537
23.1.2	Problem der magnetischen Monopole	539
23.1.3	Umformulierung des Flachheitsproblems	539
23.2	Konzept der kosmischen Inflation	539
23.2.1	Beschleunigung der Expansion	540
23.2.2	Mindestmaß inflationärer Expansion	544
23.2.3	Vermeidung größerer Dichteinhomogenitäten	546
23.3	Problemlösungen durch inflationäre Expansion	547
23.3.1	Lösung des Problems der Anfangsmasse.	547
23.3.2	Lösung des Flachheitsproblems	548
23.3.3	Lösung des Monopol-Problems	548
23.4	Inflation mit skalarem Quantenfeld	549
23.4.1	Reines Inflatonfeld Φ	551
23.4.2	Vollständige Inflationsszenarien	560
23.5	Vorinflationäre Phase*	561

17	Kosmographie	428
17.1	Kosmologisches Prinzip und Robertson-Walker-Metrik	428
17.2	Abstands- und Zeitmessung	430
17.3	Expansion und Kontraktion des Weltalls	432
17.4	Teilchen- und Ereignishorizont	434
17.5	Bewegung von Teilchen	438
17.6	Rotverschiebung	439
	17.6.1 Zusammenhang zwischen Rotverschiebung und Ort bzw. Zeit der Lichtemission	441
17.7	Zum Olbersschen Paradoxon	445
	Aufgaben	447
18	Hydro-, Thermo- und Elektrodynamik des kosmischen Substrats	449
18.1	Hydrodynamik des kosmischen Substrats	449
18.2	Thermodynamik relativistischer Fluide	453
	18.2.1 Zustandsgleichungen	453
	18.2.2 Kosmische Hintergrundstrahlung	455
	18.2.3 Entropie und Entropiesatz	459
18.3	Skalenverhalten von Druck, Dichte und Temperatur	460
	18.3.1 Entkoppelte Strahlung und Materie	460
	18.3.2 Gekoppelte Strahlung und Materie	461
18.4	Elektrische Ladung des Universums	464
	Aufgaben	465
19	Grundgleichungen und Lösungsmannigfaltigkeit	468
19.1	Feldgleichungen der Robertson-Walker-Metrik	468
19.2	Erste Folgerungen	473
	19.2.1 Urknall	473
	19.2.2 Raumkrümmung und Krümmung der Raum-Zeit.	474
19.3	Druckfreie Lösungen der Friedmann-Lemaître-Gleichung	474
	19.3.1 Umformung und Parameterabhängigkeit der Gleichung	474
	19.3.2 Einsteins statische Lösung	475
	19.3.3 Lösungen ohne Materie	476
	19.3.4 Lösungen ohne kosmologische Kraft: Standardmodell	477
	19.3.5 Lösungen mit Materie und kosmologischer Kraft	479
19.4	Lösungen mit endlichem Druck und $\Lambda=0$	482
	19.4.1 Strahlungsuniversum	482
	19.4.2 Entkoppelte Strahlung und Materie	483
19.5	Stationäres Universum	485
	Aufgaben	487
20	Auswahl realistischer Weltmodelle	489
20.1	Komponenten des kosmischen Substrats	489
20.2	Grundgleichung und relative Dichteparameter	490
20.3	Separate Behandlung verschiedener Evolutionsphasen	493
	20.3.1 Materie-Strahlung-Gleichgewicht	494

20.3.2	Die ersten zweieinhalb Milliarden Jahre	495
20.3.3	Von der Strahlungsentkopplung bis $t = \infty$	497
20.3.4	Einschränkungen des Parameterbereichs für $t \geq t_e$	499
20.4	Bestimmung von H_0 , Ω_{m0} und Ω_{A0}	502
20.5	Favorisiertes Modell	505
20.6	Probleme der Weltmodelle	509
20.6.1	Durch Urknall gelöste und im Rahmen von Urknallmodellen lösbare Probleme	509
20.6.2	Flachheitsproblem	510
20.6.3	Problem der fehlenden Masse und dunkle Materie	511
Aufgaben	513
21	Frühes Universum und Umwandlungsprozesse im kosmischen Sub- strat	517
21.1	Problem der Anfangssingularität	517
21.2	Einfluß von Quanteneffekten	518
21.3	Evolutionsszenario	520
21.3.1	Ära relativistischer Teilchen und der Strahlung	520
21.3.2	Materiedominierte Ära	524
21.3.3	Temperaturentwicklung	526
Aufgaben	527
22	Nicht expandierende Objekte	528
22.1	Einstein-Strauss-Vakuole	528
22.2	Berücksichtigung dunkler Energie*	531
22.2.1	Ursache von Nichtexpansion	533
22.2.2	Zusammenwirken von Expansion und Nichtexpansion	535
22.3	Grenzen der Nichtexpansion*	535
23	Kosmische Inflation	537
23.1	Urknall-Probleme	537
23.1.1	Horizontproblem	537
23.1.2	Problem der magnetischen Monopole	539
23.1.3	Umformulierung des Flachheitsproblems	539
23.2	Konzept der kosmischen Inflation	539
23.2.1	Beschleunigung der Expansion	540
23.2.2	Mindestmaß inflationärer Expansion	544
23.2.3	Vermeidung größerer Dichteinhomogenitäten	546
23.3	Problemlösungen durch inflationäre Expansion	547
23.3.1	Lösung des Problems der Anfangsmasse.	547
23.3.2	Lösung des Flachheitsproblems	548
23.3.3	Lösung des Monopol-Problems	548
23.4	Inflation mit skalarem Quantenfeld	549
23.4.1	Reines Inflatonfeld ϕ	551
23.4.2	Vollständige Inflationsszenarien	560
23.5	Vorinflationäre Phase*	561

23.5.1	Symmetrisches Universum	561
23.5.2	Zeit und Volumen unsymmetrischer Universen*	564
	Exkurs 23.1: Lösungen mit inflationärer Zwischenphase	567
	Aufgaben	571
24	Kausale Struktur des Universums	572
24.1	Urknalluniversen ohne Inflation*	572
24.2	Urknalluniversen mit Inflation*	576
24.3	Paralleluniversen in einem Multiversum und ewige Inflation	578
24.3.1	Spielzeugmodelle für Fluktuationen*	580
24.3.2	Konsequenzen, Spekulationen und Probleme	582
24.4	Globale Energieerhaltung*	585
24.5	Anthropisches Prinzip	589
	Aufgaben	590
	Sachregister	591
	Symbolverzeichnis	603