

Inhaltsverzeichnis

Vorwort des Herausgebers XV

Vorwort des Herausgebers zur ersten deutschen Ausgabe XVII

Überblick 1

1 Der Aufbau des Buches 3

1.1 Hinweise für den studentischen Leser 3

1.2 Danksagungen 6

1.3 Ein kurzer Abriß der Relativitätstheorie 9

1.4 Hinweise für den Lehrenden 10

1.5 Ein letzter Hinweis für den weniger begabten studentischen Leser 13

Übungen 15

Teil A. Die Spezielle Relativitätstheorie 17

2 Der k -Kalkül 19

2.1 Modellbildung 19

2.2 Historischer Hintergrund 20

2.3 Das Newtonsche Begriffssystem 21

2.4 Galileitransformationen 23

2.5 Das spezielle Relativitätsprinzip 24

2.6 Die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit 25

2.7 Der k -Faktor 26

2.8 Die Relativgeschwindigkeit zweier inertialer Beobachter 28

2.9 Das Additionstheorem für Geschwindigkeiten 30

2.10 Die Relativität der Gleichzeitigkeit 31

2.11 Das Uhrenparadoxon 34

2.12 Die Lorentztransformationen 35

2.13 Die vierdimensionale Welt 37

Übungen 40

3	Die Grundbegriffe der Speziellen Relativitätstheorie	43
3.1	Die Standardableitung der Lorentztransformationen	43
3.2	Mathematische Eigenschaften der Lorentztransformationen	46
3.3	Die Längenkontraktion	47
3.4	Die Zeitdilatation	49
3.5	Die Transformation der Geschwindigkeiten	50
3.6	Die Beziehung zwischen den Raumzeit-Diagrammen inertialer Beobachter	51
3.7	Die Beschleunigung in der Speziellen Relativitätstheorie	53
3.8	Gleichförmige Beschleunigung	55
3.9	Das Zwillingsparadoxon	56
3.10	Der Dopplereffekt	58
	<i>Übungen</i>	61
4	Die Elemente der relativistischen Mechanik	65
4.1	Die Newtonsche Theorie	65
4.2	Isolierte Teilchensysteme in der Newtonschen Mechanik	68
4.3	Die relativistische Masse	69
4.4	Die relativistische Energie	72
4.5	Photonen	75
	<i>Übungen</i>	78
Teil B.	Der Tensorformalismus	81
5	Tensoralgebra	83
5.1	Einführung	83
5.2	Mannigfaltigkeiten und Koordinaten	84
5.3	Kurven und Flächen	86
5.4	Koordinatentransformationen	87
5.5	Kontravariante Tensoren	89
5.6	Kovariante und gemischte Tensoren	91
5.7	Tensorfelder	93
5.8	Elementare Operationen mit Tensoren	94
5.9	Die indexfreie Interpretation kontravarianter Vektorfelder	95
	<i>Übungen</i>	99
6	Der Tensorkalkül	101
6.1	Die partielle Ableitung eines Tensors	101
6.2	Die Lie-Ableitung	102
6.3	Der affine Zusammenhang und die kovariante Ableitung	107
6.4	Affine Geodäten	110
6.5	Der Riemannsche Krümmungstensor	113
6.6	Geodätische Koordinaten	114

6.7	Affine Flachheit*	115
6.8	Die Metrik	120
6.9	Metrische Geodäten	121
6.10	Der metrische Zusammenhang	123
6.11	Metrische Flachheit	125
6.12	Der Krümmungstensor	126
6.13	Der Weyl-Tensor	128
	<i>Übungen</i>	131
7	Integration, Variation und Symmetrie	135
7.1	Tensordichten	135
7.2	Das alternierende Levi-Civita-Symbol*	136
7.3	Die Determinante der Metrik	137
7.4	Integrale und das Stokessche Theorem*	140
7.5	Die Euler-Lagrange-Gleichungen	142
7.6	Die Variationsmethode für Geodäten*	145
7.7	Isometrien	148
	<i>Übungen</i>	151

Teil C. Die Allgemeine Relativitätstheorie 153

8	Noch einmal Spezielle Relativitätstheorie	155
8.1	Die Minkowski-Raumzeit	155
8.2	Der Lichtkegel	157
8.3	Die Lorentzgruppe*	158
8.4	Die Eigenzeit	160
8.5	Eine axiomatische Formulierung der Speziellen Relativitätstheorie	162
8.6	Ein Zugang zur klassischen Mechanik über ein Variationsprinzip*	164
8.7	Ein Zugang zur relativistischen Mechanik über ein Variationsprinzip	166
8.8	Die kovariante Formulierung der relativistischen Mechanik*	168
	<i>Übungen</i>	171
9	Die Prinzipien der Allgemeinen Relativitätstheorie	175
9.1	Die Rolle physikalischer Prinzipien	175
9.2	Das Machsche Prinzip	176
9.3	Die Masse in der Newtonschen Theorie	182
9.4	Das Äquivalenzprinzip	186
9.5	Das Prinzip der allgemeinen Kovarianz	190
9.6	Das Prinzip der minimalen gravitativen Kopplung	191
9.7	Das Korrespondenzprinzip	191
	<i>Übungen</i>	193

10	Die Feldgleichungen der Allgemeinen Relativitätstheorie	195
10.1	Nichtlokale Fahrstuhlexperimente	195
10.2	Die Newtonsche Deviationsgleichung	197
10.3	Die Gleichung der geodätischen Abweichung	199
10.4	Die Newtonsche Korrespondenz	203
10.5	Die Vakuumfeldgleichungen der Allgemeinen Relativitätstheorie	205
10.6	Die Geschichte bis hierher	206
10.7	Die vollen Feldgleichungen der Allgemeinen Relativitätstheorie	207
	<i>Übungen</i>	209
11	Die Ableitung der ART aus einem Variationsprinzip	211
11.1	Die Palatini-Gleichung	211
11.2	Differentielle Bindungsgleichungen der Feldgleichungen	212
11.3	Ein einfaches Beispiel	214
11.4	Die Einstein-Lagrangedichte	215
11.5	Eine indirekte Ableitung der Feldgleichungen	216
11.6	Eine äquivalente Lagrangedichte *	218
11.7	Der Palatini-Zugang	220
11.8	Die vollen Feldgleichungen *	221
	<i>Übungen</i>	223
12	Der Energie-Impuls-Tensor	225
12.1	Ausblick	225
12.2	Inkohärente Materie	225
12.3	Die ideale Flüssigkeit	228
12.4	Die Maxwell'schen Gleichungen	229
12.5	Die Potentialformulierung der Maxwell'schen Gleichungen	232
12.6	Der Maxwell'sche Energie-Impuls-Tensor	234
12.7	Weitere Energie-Impuls-Tensoren *	236
12.8	Die Bedingung der Energiedominanz *	237
12.9	Der Newtonsche Grenzfall	238
12.10	Die Kopplungskonstante *	241
	<i>Übungen</i>	243
13	Die Struktur der Feldgleichungen	245
13.1	Interpretation der Feldgleichungen	245
13.2	Bestimmtheit, Nichtlinearität und Differenzierbarkeit	246
13.3	Der kosmologische Term	248
13.4	Die Erhaltungsgleichungen	250
13.5	Das Cauchy-Problem *	251
13.6	Das Lochproblem *	256
13.7	Das Äquivalenzproblem	257
	<i>Übungen</i>	259

- 14 Die Schwarzschild-Lösung** 261
- 14.1 Stationäre Lösungen 261
- 14.2 Hyperflächenorthogonale Vektorfelder 262
- 14.3 Statische Lösungen 266
- 14.4 Kugelsymmetrische Lösungen 268
- 14.5 Die Schwarzschild-Lösung 271
- 14.6 Eigenschaften der Schwarzschild-Lösung 273
- 14.7 Isotrope Koordinaten 275
- Übungen* 277
- 15 Experimentelle Tests der Allgemeinen Relativitätstheorie** 279
- 15.1 Einführung 279
- 15.2 Die klassische Keplerbewegung 280
- 15.3 Die Periheldrehung des Merkur 283
- 15.4 Die Lichtablenkung 287
- 15.5 Die gravitative Rotverschiebung 292
- 15.6 Laufzeitverzögerung des Lichts* 296
- 15.7 Das Eötvös-Experiment* 298
- 15.8 Die Abplattung der Sonne* 299
- 15.9 Eine Chronologie experimenteller und beobachteter Ereignisse 300
- 15.10 Gummimattengeometrie 301
- Übungen* 305
- Teil D. Schwarze Löcher** 307
- 16 Nichtrotierende Schwarze Löcher** 309
- 16.1 Charakterisierung von Koordinaten 309
- 16.2 Singularitäten 311
- 16.3 Räumliche und Raumzeit-Diagramme 312
- 16.4 Das Raumzeit-Diagramm in Schwarzschild-Koordinaten 315
- 16.5 Ein radial einfallendes Teilchen 317
- 16.6 Eddington-Finkelstein-Koordinaten 319
- 16.7 Ereignishorizonte 321
- 16.8 Schwarze Löcher 322
- 16.9 Ein klassisches Argument 325
- 16.10 Gezeitenkräfte in einem Schwarzen Loch 326
- 16.11 Hinweise auf Schwarze Löcher aus Beobachtungsergebnissen 328
- 16.12 Der Stand der theoretischen Untersuchung Schwarzer Löcher 329
- Übungen* 332
- 17 Maximale Erweiterung und konforme Kompaktifizierung** 335
- 17.1 Maximale analytische Erweiterungen 335
- 17.2 Die Kruskal-Lösung 336

17.3	Die Einstein-Rosen-Brücke *	338
17.4	Das Penrose-Diagramm für die Minkowski-Raumzeit	340
17.5	Das Penrose-Diagramm für die Kruskal-Lösung *	345
	<i>Übungen</i>	348
18	Geladene Schwarze Löcher	349
18.1	Das Feld eines geladenen Massenpunktes	349
18.2	Intrinsische und Koordinatensingularitäten	351
18.3	Das Raumzeit-Diagramm der Reissner-Nordström-Lösung	353
18.4	Neutrale Teilchen in der Reissner-Nordström-Raumzeit *	355
18.5	Penrose-Diagramme der maximal analytischen Erweiterungen *	356
	<i>Übungen</i>	360
19	Rotierende Schwarze Löcher	363
19.1	Nulltetraden	363
19.2	Die Kerr-Lösung aus einer komplexen Transformation	365
19.3	Die drei wichtigsten Formen der Kerr-Lösung	367
19.4	Grundlegende Eigenschaften der Kerr-Lösung	369
19.5	Singularitäten und Horizonte	371
19.6	Die Hauptnullkongruenzen	374
19.7	Eddington-Finkelstein-Koordinaten	376
19.8	Der stationäre Grenzfall	377
19.9	Die maximale Erweiterung für den Fall $a^2 < m^2$ *	379
19.10	Die maximale Erweiterung für den Fall $a^2 > m^2$ *	380
19.11	Rotierende Schwarze Löcher	382
19.12	Die Singularitätentheoreme	385
19.13	Der Hawking-Effekt	387
	<i>Übungen</i>	390
Teil E.	Gravitationswellen	393
20	Ebene Gravitationswellen	395
20.1	Die linearisierten Feldgleichungen	395
20.2	Eichtransformationen	397
20.3	Linearisierte ebenfrontige Gravitationswellen	399
20.4	Polarisationszustände	404
20.5	Strenge ebenfrontige Gravitationswellen	406
20.6	Ebene Gravitationsstoßwellen *	408
20.7	Kollidierende ebenfrontige Gravitationsstoßwellen *	410
20.8	Kollidierende Gravitationswellen *	412
20.9	Der Nachweis von Gravitationswellen	414
	<i>Übungen</i>	418

21	Strahlung von einer isolierten Quelle	421
21.1	Strahlende isolierte Quellen	421
21.2	Charakteristische Hyperflächen der Einsteinschen Gleichungen	423
21.3	Strahlungskordinaten	425
21.4	Die Bondische Strahlungsmetrik	427
21.5	Das charakteristische Anfangswertproblem *	428
21.6	Newsfunction und Massenverlust *	431
21.7	Die Petrow-Klassifikation *	433
21.8	Das Aufspaltungstheorem *	436
21.9	Die optischen Skalare *	438
	<i>Übungen</i>	440

Teil F. Kosmologie 443

22	Relativistische Kosmologie	445
22.1	Ausblick	445
22.2	Das Olberssche Paradoxon	447
22.3	Newtonsche Kosmologie	449
22.4	Das kosmologische Prinzip	452
22.5	Das Weylsche Postulat	455
22.6	Relativistische Kosmologie	456
22.7	Räume konstanter Krümmung	458
22.8	Die Geometrie dreidimensionaler Räume konstanter Krümmung	460
22.9	Die Friedmannsche Gleichung	465
22.10	Die Lichtausbreitung	467
22.11	Eine kosmologische Abstandsdefinition	470
22.12	Das Hubblesche Gesetz der relativistischen Kosmologie	472
	<i>Übungen</i>	476

23	Kosmologische Modelle	479
23.1	Die flachen Raummodelle	479
23.2	Modelle mit verschwindender kosmologischer Konstante	482
23.3	Die Klassifikation der Friedmannschen Modelle	484
23.4	Das de-Sitter-Modell	487
23.5	Die ersten Modelle	488
23.6	Das Zeitskalenproblem	489
23.7	Spätere Modelle	490
23.8	Das Problem der fehlenden Materie	492
23.9	Die Standardmodelle	494
23.10	Frühe Epochen des Universums *	495
23.11	Kosmische Koinzidenzen	495
23.12	Die Steady-State-Theorie	496
23.13	Der Ereignishorizont des de-Sitter-Universums	500

23.14	Teilchen- und Ereignishorizonte*	503
23.15	Die konforme Struktur von Robertson-Walker-Raumzeiten*	505
23.16	Die konforme Struktur der de-Sitter-Raumzeit*	507
23.17	Inflation*	510
23.18	Das anthropische Prinzip*	513
23.19	Schluß	515
	<i>Übungen</i>	518
	Lösungen zu Übungsaufgaben	521
	Weiterführende Literatur	545
	Ausgewählte Literatur	549
	Stichwortverzeichnis	553