

Inhaltsverzeichnis

Vorwort XV

1	Vom absoluten Raum und von absoluter Zeit zur dynamischen Raumzeit: Ein Überblick 1
1.1	Definition, Beschreibung und Ursprünge der Relativitätstheorie 1
1.2	Die newtonschen Gesetze und Inertialsysteme 6
1.3	Die Galilei-Transformationen 8
1.4	Newton'sche Relativität 9
1.5	Einwände gegen den absoluten Raum; das machsche Prinzip 10
1.6	Der Äther 12
1.7	Michelson und Morley suchen den Äther 13
1.8	Die lorentzsche Äthertheorie 14
1.9	Die Ursprünge der Speziellen Relativitätstheorie 16
1.10	Weitere Unterstützung für Einsteins Postulate 18
1.11	Kosmologie und erste Zweifel an Inertialsystemen 20
1.12	Träge und schwere Masse 22
1.13	Das einsteinsche Äquivalenzprinzip 24
1.14	Eine Vorschau auf die Allgemeine Relativitätstheorie 25
1.15	Vorbehalte gegen das Äquivalenzprinzip 29
1.16	Die gravitative Frequenzverschiebung und Lichtablenkung 31
1.17	Aufgaben 35

Teil I Spezielle Relativitätstheorie 39

2	Grundlagen der Speziellen Relativitätstheorie; die Lorentz-Transformationen 41
2.1	Über das Wesen physikalischer Theorien 41
2.2	Grundlegende Eigenschaften der Speziellen Relativitätstheorie 42
2.3	Relativistisches Lösen von Problemen 45
2.4	Die Relativität der Gleichzeitigkeit, Zeitdilatation, und Längenkontraktion: eine Vorschau 47

2.5	Relativitätsprinzip und die Homogenität und Isotropie der Inertialsysteme	48
2.6	Das Koordinatengitter; Definitionen der Gleichzeitigkeit	50
2.7	Herleitung der Lorentz-Transformationen	53
2.8	Eigenschaften der Lorentz-Transformation	57
2.9	Grafische Darstellung der Lorentz-Transformation	60
2.10	Die relativistische Geschwindigkeitsgrenze	66
2.11	Welche Transformationen erlaubt das Relativitätsprinzip?	69
2.12	Aufgaben	70
3	Relativistische Kinematik	75
3.1	Einleitung	75
3.2	Weltbild und Weltkarte	75
3.3	Längenkontraktion	76
3.4	Das Längenkontraktionsparadoxon	78
3.5	Zeitdilatation; das Zwillings-Paradoxon	79
3.6	Transformation der Geschwindigkeit; Relativ- und gegenseitige Geschwindigkeit	83
3.7	Transformation der Beschleunigung; Hyperbolische Bewegung	86
3.8	Starre Bewegung und der gleichmäßig beschleunigte Stab	87
3.9	Aufgaben	89
4	Relativistische Optik	95
4.1	Einleitung	95
4.2	Der Mitführereffekt	95
4.3	Der Doppler-Effekt	96
4.4	Aberration	100
4.5	Die optische Erscheinung bewegter Objekte	101
4.6	Aufgaben	104
5	Raumzeit und Vierervektoren	109
5.1	Die Entdeckung des Minkowski-Raums	109
5.2	3-dimensionale Minkowski-Diagramme	110
5.3	Lichtkegel und Intervalle	112
5.4	Dreiervektoren	115
5.5	Vierervektoren	118
5.6	Die Geometrie der Vierervektoren	123
5.7	Ebene Wellen	125
5.8	Aufgaben	128
6	Relativistische Teilchenmechanik	133
6.1	Gültigkeitsbereich der newtonischen Mechanik	133
6.2	Die Axiome der neuen Mechanik	134
6.3	Die Äquivalenz von Masse und Energie	137
6.4	Viererimpuls-Identitäten	141

6.5	Relativistisches Billard	142
6.6	Das Zero-Impuls-System	143
6.7	Schwellwert-Energien	145
6.8	Lichtquanten und de-Broglie-Wellen	147
6.9	Der Compton-Effekt	149
6.10	Viererkraft und Dreierkraft	151
6.11	Aufgaben	154
7	Vierertensoren; Elektromagnetismus im Vakuum	161
7.1	Tensoren: Einführende Gedanken und Notation	161
7.2	Tensoren: Definitionen und Eigenschaften	164
7.2.1	Definition der Tensoren	164
7.2.2	Drei grundlegende Tensoren	165
7.2.3	Die Gruppeneigenschaften	166
7.2.4	Tensoralgebra	166
7.2.5	Ableitung von Tensoren	168
7.2.6	Die Metrik	168
7.2.7	Vierertensoren	171
7.3	Die maxwellschen Gleichungen in Tensor-Form	172
7.4	Das Viererpotenzial	177
7.5	Transformation von e und b . Das duale Feld	179
7.6	Das Feld einer gleichförmig bewegten Punktladung	182
7.7	Das Feld eines unendlich langen, geraden Stroms	184
7.8	Der Energie-Impuls-Tensor des elektromagnetischen Felds	186
7.9	Von der Mechanik des Felds zur Kontinuumsmechanik	189
7.10	Aufgaben	192
 Teil II Allgemeine Relativitätstheorie 201		
8	Gekrümmte Räume und die grundlegenden Ideen der Allgemeinen Relativitätstheorie	203
8.1	Gekrümmte Flächen	203
8.2	Gekrümmte Räume höherer Dimensionen	207
8.3	Riemannsche Räume	211
8.4	Ein Plan für die Allgemeine Relativitätstheorie	216
8.5	Aufgaben	220
9	Statische und stationäre Raumzeiten	225
9.1	Das Koordinatengitter	225
9.2	Die Synchronisierung von Uhren	226
9.3	Erste Standardform der Metrik	229
9.4	Newtonsche Anhaltspunkte für das geodätische Bewegungsgesetz	231

9.5	Symmetrien und die geometrische Beschreibung statischer und stationärer Raumzeiten	234
9.6	Die kanonische Metrik und relativistische Potenziale	238
9.7	Das gleichförmig rotierende Gitter im Minkowski-Raum	242
9.8	Aufgaben	244
10	Geodäten, der Krümmungstensor und die Vakuumfeldgleichungen	247
10.1	Tensoren für die Allgemeine Relativitätstheorie	247
10.2	Geodäten	249
10.3	Geodätische Koordinaten	252
10.4	Kovariante und absolute Ableitung	255
10.5	Der riemannsche Krümmungstensor	262
10.6	Die einsteinschen Vakuumfeldgleichungen	267
10.7	Aufgaben	271
11	Die Schwarzschild-Metrik	277
11.1	Herleitung der Metrik	277
11.2	Eigenschaften der Metrik	279
11.2.1	Feldstärke und die Bedeutung von m	279
11.2.2	Das Birkhoff-Theorem	280
11.2.3	Der Schwarzschild-Radius	281
11.3	Die Geometrie des Schwarzschild-Koordinatengitters	281
11.4	Beitrag der räumlichen Krümmung zu post-newtonischen Effekten	283
11.5	Koordinaten und Messungen	285
11.6	Die gravitative Frequenzverschiebung	287
11.7	Isotrope Metrik und die Shapiro-Verzögerung	287
11.8	Teilchenbahnen im Schwarzschild-Raum	288
11.9	Die Periheldrehung des Merkur	292
11.10	Photonenbahnen	296
11.11	Lichtablenkung an einer kugelsymmetrischen Masse	298
11.12	Gravitationslinsen	301
11.13	de-Sitter-Präzession mittels rotierender Koordinaten	304
11.14	Aufgaben	306
12	Schwarze Löcher und der Kruskal-Raum	311
12.1	Schwarzschild'sche Schwarze Löcher	311
12.1.1	Die Bildung von Horizonten	311
12.1.2	Die Regularität des Horizonts	312
12.1.3	Einlaufende Teilchen	313
12.1.4	Die Nichtstatizität des inneren Schwarzschild-Raums	314
12.1.5	Trichtergeometrie	315
12.1.6	Die Bildung Schwarzer Löcher	316

12.2	Potenzielle Energie; ein allgemein-relativistischer ‚Beweis‘ von $E = mc^2$	317
12.3	Die Fortsetzbarkeit der Schwarzschild-Raumzeit	319
12.4	Das gleichmäßig beschleunigte Gitter	322
12.5	Der Kruskal-Raum	326
12.6	Die Thermodynamik Schwarzer Löcher	333
12.7	Aufgaben	336
13	Eine analytisch exakte, ebene Gravitationswelle	341
13.1	Einleitung	341
13.2	Die Metrik der ebenen Welle	341
13.3	Wenn die Welle auf Staub trifft	344
13.4	Inertialkoordinaten hinter der Welle	345
13.5	Wenn die Welle auf Licht trifft	348
13.6	Die Penrose-Topologie	349
13.7	Die Lösung der Feldgleichung	350
13.8	Aufgaben	352
14	Die vollständigen Feldgleichungen; der de-Sitter-Raum	355
14.1	Die physikalischen Gesetze in der gekrümmten Raumzeit	355
14.2	Die vollständigen Feldgleichungen (endlich!)	358
14.3	Die kosmologische Konstante	363
14.4	Der modifizierte Schwarzschild-Raum	365
14.5	Der de-Sitter-Raum	366
14.6	Der Anti-de-Sitter-Raum	373
14.7	Aufgaben	375
15	Die linearisierte Allgemeine Relativitätstheorie	379
15.1	Die Grundgleichungen	379
15.2	Gravitationswellen; die TT-Eichung	385
15.3	Die Physik ebener Wellen	387
15.4	Die Erzeugung und die Detektion von Gravitationswellen	392
15.5	Die elektromagnetische Analogie in der linearisierten ART	398
15.6	Aufgaben	405
Teil III Kosmologie 409		
16	Kosmologische Raumzeiten	411
16.1	Grundlagen	411
16.1.1	Einleitung	411
16.1.2	Die Regularität des Universums	411
16.1.3	Die Geschichte der modernen Kosmologie	412
16.1.4	Sterne und Galaxien	415
16.1.5	Homogenität und Isotropie	416

16.1.6	Kosmologischer Strahlungshintergrund	417
16.1.7	Die Hubble-Expansion	418
16.1.8	Der Urknall	419
16.1.9	Das Alter des Universums	420
16.1.10	Die kosmologische Konstante	421
16.1.11	Die Dichte des Universums	422
16.1.12	Kosmogenese	424
16.2	Die Konstruktion des kosmologischen Modells	425
16.3	Das Milne-Universum	427
16.4	Die Friedmann-Robertson-Walker-Metrik	431
16.4.1	Einleitung	431
16.4.2	3-Metriken konstanter Krümmung	431
16.4.3	Die Friedmann-Robertson-Walker-Metrik	433
16.5	Der Satz von Robertson und Walker	436
16.6	Aufgaben	437
17	Lichtausbreitung in FRW-Universen	443
17.1	Repräsentation von FRW-Universen durch Subuniversen	443
17.2	Die kosmologische Frequenzverschiebung	445
17.3	Kosmologische Horizonte	446
17.4	Der <i>Apparent Horizon</i>	453
17.5	Observable	455
17.6	Aufgaben	460
18	Die Dynamik von FRW-Universen	465
18.1	Die Anwendung der Feldgleichungen	465
18.2	Was uns die Feldgleichungen sagen	467
18.2.1	Energieerhaltung	467
18.2.2	Die Friedmann-Gleichung	468
18.2.3	Die newtonsche Analogie	468
18.2.4	Druck	469
18.2.5	Der Energie-Impuls-Tensor des Vakuums	470
18.2.6	Universen mit mehreren Komponenten	471
18.3	Die Friedmann-Modelle	472
18.3.1	Einführung	472
18.3.2	Statische Modelle	473
18.3.3	Leere Modelle	474
18.3.4	Die drei nicht-leeren Modelle mit $\Lambda = 0$	476
18.3.5	Die nicht-leeren Modelle mit $\Lambda \neq 0$	479
18.4	Der Vergleich mit Beobachtungen	482
18.5	Inflation	487
18.6	Das anthropische Prinzip	492
18.7	Aufgaben	493

**Anhang A Komponenten des Krümmungstensors
der Diagonalmetrik 497**

Stichwortverzeichnis 501