

Inhaltsverzeichnis

Teil I Spezielle Relativitätstheorie

1 Grundlagen der Speziellen Relativitätstheorie	3
1.1 Das Newton'sche Relativitätsprinzip	3
1.2 Das Einstein'sche Relativitätsprinzip	8
1.3 Relativität der Gleichzeitigkeit, Zeitdilatation	10
1.4 Längenkontraktion	13
1.5 Doppler-Effekt in der Speziellen Relativitätstheorie	16
1.6 Lorentz-Transformationen	19
1.7 Raumzeitintervalle	24
1.8 Lorentz- und Poincaré-Gruppe	28
2 Die Raumzeit der Speziellen Relativitätstheorie	39
2.1 Indexnotation und Einstein'sche Summenkonvention	39
2.2 Minkowski-Raum	41
2.3 Semi-Skalarprodukt im Minkowski-Raum	43
2.4 Transformationen	45
2.5 Weltlinien in der Raumzeit	46
3 Relativistische Mechanik	51
3.1 Impuls, Masse, Energie, Kraft	51
3.2 Natürliche Einheiten	59
3.3 Vierergeschwindigkeit, Viererimpuls	60
3.4 Relativistische Dynamik	65
4 Tensorrechnung im Minkowski-Raum	69
4.1 Dualraum und Einsformen	70
4.2 Tensoren vom Rang $(0, N)$	76
4.3 Tensoren vom Rang $(M, 0)$	80
4.4 Tensoren vom Rang (M, N)	81
4.5 Kontraktion von Tensoren	82
4.6 Ableitungen von Tensoren im Minkowski-Raum	84

5	Elektrodynamik	87
5.1	Maxwell-Gleichungen	87
5.2	Feldstärketensor	93
5.3	Lorentz-Invarianz der Maxwell-Gleichungen	96
5.4	Lorentz-Kraft	100
5.5	Lorentz-invarianter Lagrange-Formalismus	101
6	Energie-Impuls-Tensoren in der Speziellen Relativitätstheorie	113
6.1	Energie-Impuls-Tensor des elektromagnetischen Feldes	113
6.2	Energie-Impuls-Tensor für Staub	116
6.3	Ideale Fluide	124
6.4	Allgemeine Energie-Impuls-Tensoren	129
 Teil II Grundlagen der Allgemeinen Relativitätstheorie		
7	Gravitation und Raumzeitmodell	133
7.1	Newton'sche Gravitation	134
7.2	Schwere und träge Masse, Äquivalenzprinzip	140
7.3	Gravitativer Doppler-Effekt	142
7.4	Lichtablenkung an der Sonne im Newton'schen Gravitationsfeld	144
7.5	Gravitation und Krümmung	145
7.6	Allgemeine Koordinatensysteme	151
8	Mannigfaltigkeiten	157
8.1	Topologische und differenzierbare Mannigfaltigkeiten	157
8.2	Differenzierbare Abbildungen	165
8.3	Tangentialraum	168
8.4	Basis des Tangentialraumes	172
8.5	Vektorfelder	175
9	Tensorrechnung auf Mannigfaltigkeiten	183
9.1	Einsformen	183
9.2	Tensorfelder	186
9.3	Kontraktion und Quotientenregel	192
9.4	Abbildungen zwischen Mannigfaltigkeiten	194
9.5	Tensoranalysis	199
9.6	Lie-Ableitung	202
10	Differenzialformen auf Mannigfaltigkeiten	215
10.1	Differenzialformen	215
10.2	Dachprodukt	218
10.3	Die äußere (Cartan'sche) Ableitung	223
10.4	Integration auf Mannigfaltigkeiten	229
10.5	Der Satz von Stokes	236
10.6	Differenzialformen und klassische Vektoranalysis	244

11	Semi-Riemann'sche Mannigfaltigkeiten	251
11.1	Die Metrik	251
11.2	Längen, Integration und Isometrien	257
11.3	Zusammenhang und kovariante Ableitung	265
11.4	Der Levi-Civita-Zusammenhang	274
11.5	Paralleltransport und Geodäten	278
11.6	Normalkoordinaten und Äquivalenzprinzip	294
12	Krümmung der Raumzeit	299
12.1	Paralleltransport und Krümmung	300
12.2	Riemann'scher Krümmungstensor	303
12.3	Symmetrien des Riemann'schen Krümmungstensors	309
12.4	Ricci-Tensor und Krümmungsskalar	314
12.5	Zusammenhangs- und Krümmungsformen, Cartan'sche Strukturgleichungen	318
12.6	Symmetrien und Killing-Vektoren	332
 Teil III Einstein-Gleichungen, Schwarzschild-Lösung, Gravitationswellen		
13	Physikalische Gesetze in der Raumzeit, Einstein-Gleichungen	347
13.1	Kovarianzprinzip	347
13.2	Energie-Impuls-Tensoren in der Lorentz-Mannigfaltigkeit	350
13.3	Newton'scher Grenzfall	352
13.4	Einstein'sche Feldgleichungen	354
13.5	Interpretation der Einstein-Gleichungen	360
13.6	Ableitung der Einstein-Gleichungen mit dem Lagrange-Formalismus	366
14	Die Schwarzschild-Lösung	375
14.1	Äußere Schwarzschild-Metrik	375
14.2	Der Riemann-Tensor der (äußeren) Schwarzschild-Raumzeit	386
14.3	Physikalische Interpretation der (äußeren) Schwarzschild-Lösung	388
14.4	Isotrope Schwarzschild-Koordinaten	390
14.5	Birkhoff'sches Theorem	393
14.6	Die Killing-Vektoren der Schwarzschild-Metrik	397
15	Klassische Tests der Allgemeinen Relativitätstheorie	401
15.1	Kepler-Bewegung in der Newton'schen Gravitationstheorie	401
15.2	Geodäten in der Schwarzschild-Raumzeit	408
15.3	Die Periheldrehung des Merkurs	417
15.4	Lichtablenkung in der Schwarzschild-Raumzeit	421
15.5	Gravitative Rotverschiebung in der Schwarzschild-Raumzeit	425

16	Gravitationswellen	431
16.1	Einstein-Gleichungen für schwache Gravitationsfelder.	431
16.2	Ausbreitung von Gravitationswellen	437
16.3	Beobachtung von Gravitationswellen	441
16.4	Erzeugung von Gravitationswellen	445
16.5	Gravitationswellenenergie	450
16.6	Nachweis von Gravitationswellen	469
 Teil IV Gravitationskollaps und Schwarze Löcher		
17	Gravitationskollaps und die innere Schwarzschild-Metrik	485
17.1	Einführendes Beispiel: Innere Lösung in der Elektrodynamik	486
17.2	Innere Schwarzschild-Metrik.	488
17.3	Innere Schwarzschild-Metrik für nichtkomprimierbare Fluide.	493
17.4	Physikalische Interpretation der inneren Lösung.	498
18	Schwarze Löcher in der Schwarzschild-Raumzeit	505
18.1	Singularitäten.	505
18.2	Einige Eigenschaften Schwarzer Löcher.	507
18.3	Radialer Fall in der Schwarzschild-Raumzeit	510
18.4	Eddington-Finkelstein-Koordinaten.	519
18.5	Kruskal-Koordinaten	525
19	Diagramme, Flächen und Horizonte	535
19.1	Einbettungsdiagramme und Wurm Löcher.	535
19.2	Penrose-Diagramme.	540
19.3	Dreidimensionale Flächen	549
20	Geladene Schwarze Löcher	553
20.1	Die Reissner-Nordström-Lösung	553
20.2	Grundlegende Eigenschaften der Reissner-Nordström-Lösung.	557
20.3	Eddington-Finkelstein-Koordinaten der Reissner-Nordström-Lösung	559
20.4	Penrose-Diagramme für die Reissner-Nordström-Lösung	562
21	Rotierende Schwarze Löcher	567
21.1	Die Kerr-Lösung	567
21.2	Nulltetraden	568
21.3	Die Kerr-Metrik in Kerr-Eddington-Koordinaten	571
21.4	Die Kerr-Metrik in Boyer-Lindquist-Koordinaten.	576
21.5	Singularitäten und Horizonte.	580
21.6	Die Ergosphäre.	585
21.7	Der Penrose-Prozess	590
21.8	Die Thermodynamik von Schwarzen Löchern	594

Teil V Kosmologie

22	Unser Universum	603
22.1	Die beobachtete Zusammensetzung unseres Universums	603
22.2	Entfernungsbestimmung im Weltall	607
22.3	Ausdehnung des Universums	612
22.4	Homogenität und Isotropie des Universums	615
23	Kosmologische Modelle	619
23.1	Ein Modell des Universums in der klassischen Mechanik	619
23.2	Robertson-Walker-Metrik	622
23.3	Kosmologische Rotverschiebung und Hubble-Parameter	633
23.4	Die Friedmann-Gleichungen	637
24	Evolution des Universums	645
24.1	Entwicklung der Energiedichte	645
24.2	Zustandsgleichungen	647
24.3	Qualitative Analyse der Friedmann-Gleichung	651
24.4	Spezielle analytische Lösungen der Friedmann-Gleichungen	656
A	Anhang: Nützliche Formeln, Einheiten und Tabellen	663
	Literatur	673
	Stichwortverzeichnis	677