

Inhaltsverzeichnis

1	Meilensteine in der Erforschung der kompakten Objekte	1
1.1	Chandrasekhar und die Weißen Zwerge	2
1.2	100 Jahre Gravitation ist Geometrie der RaumZeit	5
1.3	Neutronensterne – die ersten relativistischen Sterne	7
1.4	Schwarze Löcher sind reine Geometrie	14
1.5	Gammablitz – eine Gefahr für die Erde?	18
	Literaturverzeichnis	23
2	Die Sterne der Milchstraße	25
2.1	Sterne in der Beobachtung	26
2.1.1	Distanz der Sterne	26
2.1.2	Die Hipparcos Mission – 120.000 erlesene Sterne	27
2.1.3	Vermessung der Galaxis mit Gaia – eine Milliarde Sterne	29
2.1.4	Die Leuchtkraft der Sterne	35
2.1.5	Temperatur und Farben der Sterne	35
2.1.6	Stellare Radien	35
2.1.7	Stellare Massen	36
2.1.8	Chemische Zusammensetzung	38
2.2	Das Hertzsprung-Russell-Diagramm der Sterne	39
2.2.1	Farben-Helligkeits-Diagramme (FH)	39
2.2.2	Harvard-Spektralklassifikation	43
2.2.3	Hertzsprung-Russell-Diagramm (HRD)	47
2.2.4	Yerkes Leuchtkraftklassen	49
2.3	Braune Zwerge und Planeten	49
2.4	Der Sloan Digital Sky Survey SDSS	54
2.5	Weißer Zwerge und Neutronensterne	55
2.6	Fragen zur Vertiefung	58
	Literaturverzeichnis	59
3	Vom Protostern zum Schwarzen Loch	61
3.1	IMF und Protosterne	62
3.2	Entwicklung massearmer Sterne	65
3.2.1	Von der Molekülwolke zur Hauptreihe	65
3.2.2	Hauptreihenentwicklung	66
3.2.3	Vom Roten Riesen zum Weißen Zwerg	66
3.2.4	Die zeitliche Entwicklung der Sonne	70
3.3	Entwicklung massereicher Sterne	72
3.3.1	Entwicklungswege im HRD	72
3.3.2	Eddington-Leuchtkraft	72
3.4	Endphasen der Sternentwicklung	73

3.4.1 Planetarische Nebel und Weiße Zwerge	74
3.4.2 Supernovae und Neutronensterne	75
3.4.3 Hypernovae und Schwarze Löcher	80
3.4.4 Die ersten Sterne und Schwarzen Löcher im Universum	82
3.5 Fragen zur Vertiefung	84
Literaturverzeichnis	85
4 Gravitation kompakter Objekte	87
4.1 Die Galilei'sche Relativität	89
4.2 Das Einstein'sche Relativitätsprinzip	90
4.2.1 Die Suche nach dem Äther	91
4.2.2 Die Spezielle Relativität	94
4.2.3 Zeitdilatation – bewegte Uhren gehen langsamer	97
4.2.4 Längenkontraktion – bewegte Körper erscheinen verkürzt	98
4.2.5 Die Lorentz-Transformationen	99
4.2.6 Additionstheorem der Geschwindigkeiten	101
4.2.7 Ohne Spezielle Relativität keine Beschleuniger	103
4.2.8 Compton- und Doppler-Effekt	105
4.2.9 Spezielle Relativität ist lebensnotwendig	107
4.3 Ohne Gravitation ist die Welt flach	108
4.3.1 Die RaumZeit von Minkowski	108
4.3.2 Die kausale Struktur der Minkowski RaumZeit	111
4.3.3 Denken Sie in 1+2 Dimensionen!	111
4.4 Gauß und Riemann – die Vordenker Einsteins	113
4.4.1 Wie messe ich Distanzen auf gekrümmten Flächen?	114
4.4.2 Die Klein'sche Flasche	117
4.4.3 Die Tangentialebene an die Fläche	118
4.4.4 Die Gauß'sche Krümmung einer Fläche	120
4.4.5 Konzept der Riemann'schen Mannigfaltigkeit	124
4.4.6 Die Kugeloberfläche als 2-D-Mannigfaltigkeit	125
4.4.7 Transport von Vektoren und Krümmung	127
4.5 Die Äquivalenzprinzipien von Albert Einstein	128
4.5.1 Das Schwache Äquivalenzprinzip	129
4.5.2 Das Einstein'sche Äquivalenzprinzip	132
4.5.3 Das Starke Äquivalenzprinzip	133
4.6 Die RaumZeit der Allgemeinen Relativitätstheorie	133
4.6.1 Gravitation ist Geometrie der RaumZeit	134
4.6.2 Der Transport von Vektoren ist metrisch	136
4.6.3 Körper bewegen sich auf Geodäten in der RaumZeit	136
4.6.4 Die Einstein'schen Feldgleichungen	137
4.7 Einstein auf dem Prüfstand	142
4.7.1 Lichtablenkung am Sonnenrand	143

4.7.2 Apsidendrehung der Merkurbahn	145
4.7.3 Shapiro-Effekt – Radiosignale verzögern sich	146
4.7.4 Tests des Starken Äquivalenzprinzips	147
4.7.5 Gravity Probe B misst Krümmung und Frame-Dragging der Erde	148
4.8 Fragen zur Vertiefung	149
Literaturverzeichnis	151
5 Weiße Zwerge – Diamanten der Milchstraße	153
5.1 Was ist Sirius B?	153
5.2 Bosonen und Fermionen	156
5.3 Chandrasekhar kämpft gegen das Establishment	158
5.4 Struktur der Weißen Zwerge	159
5.5 Polytropen-Näherung	161
5.6 Die Chandrasekhar-Masse – fundamentales Konzept der Astrophysik ..	165
5.7 Warum werden Weiße Zwerge instabil?	167
5.8 Weiße Zwerge in der Milchstraße	169
5.8.1 Spektraltypen Weißer Zwerge	170
5.8.2 Weiße Zwerge in Sonnenumgebung	171
5.8.3 Weiße Zwerge im Sloan Digital Sky Survey	171
5.9 Kühlung Weißer Zwerge	175
5.10 Fragen zur Vertiefung	176
Literaturverzeichnis	177
6 Neutronensterne – die kompaktesten Sterne	179
6.1 Struktur der Neutronensterne	181
6.2 Zustandsgleichung Neutronensternmaterie	182
6.2.1 Das freie Neutronengas	182
6.2.2 Das Tröpfchenmodell für die Krusten	183
6.2.3 Die Neutronenflüssigkeit im Core	184
6.2.4 Quark-Hadronen-Phasenübergang im Zentrum	188
6.3 Tolman-Oppenheimer-Volkoff-Gleichungen	191
6.3.1 Die TOV-Gleichungen	191
6.3.2 Dichte-Sequenz der Neutronensterne	194
6.3.3 Die kritische Masse von Neutronensternen	195
6.3.4 Massen-Radius-Beziehung und gravitative Rotverschiebung	196
6.4 Wann rotieren Neutronensterne schnell?	198
6.4.1 Die Metrik langsam rotierender Sterne	201
6.4.2 Elektrodynamik um rotierende Sterne	202
6.5 Neutronensterne als Radiopulsare	203
6.5.1 Was ist ein Pulsar?	204
6.5.2 Das Pulsar-Diagramm	206
6.5.3 Der Pulsar als Rotator	209

6.5.4	Spin-Down-Alter und die Entwicklungszeit	211
6.5.5	Die jüngsten und ältesten Pulsare	212
6.5.6	Struktur der Pulsarmagnetosphäre	215
6.5.7	MHD-Pulsarwinde	219
6.6	Neutronensterne als Röntgendoppelsterne	221
6.6.1	Akkretion auf Neutronensterne	221
6.6.2	Klassen von Röntgendoppelsternen	222
6.7	Pulsare in Doppelsternsystemen	224
6.7.1	Pulsare als Uhren	226
6.7.2	Was ist Pulsar-Timing?	226
6.7.3	Klassische Bahnelemente im Doppelsternsystem	230
6.7.4	Post-Kepler'sche Effekte in Binärsystemen	231
6.7.5	Der erste Doppelpulsar	236
6.7.6	Ein Dreifachsystem mit Pulsar testet Einstein	242
6.8	Magnetfelder der Neutronensterne	244
6.8.1	Ursprung der Magnetfelder	246
6.8.2	Zeitliche Entwicklung der Magnetfelder	248
6.8.3	Recycling und Millisekundenpulsare	249
6.8.4	Magnetfelder akkretierender Neutronensterne	251
6.9	Cassiopeia A – der jüngste Neutronenstern in der Milchstraße	251
6.10	Pulsarsuche mit SKA	254
6.11	Fragen zur Vertiefung	256
	Literaturverzeichnis	259
7	Schwarze Löcher sind reine Geometrie	261
7.1	Das nicht-rotierende Schwarze Loch	262
7.1.1	Die Schwarzschild-Metrik	264
7.1.2	Der Horizont	264
7.1.3	Das Kepler-Problem und die Apsidendrehung	266
7.1.4	Lichtablenkung und die Photonensphäre	272
7.2	Schwarze Löcher und modernes Vakuum	273
7.3	Das rotierende Schwarze Loch	277
7.3.1	Die Kerr-Lösung	278
7.3.2	Horizont und Ergosphäre	278
7.3.3	Die innerste Kreisbahn ISCO	283
7.3.4	Strahlungseffizienz eines Schwarzen Lochs	285
7.4	Photonen in der Kerr-Geometrie	287
7.4.1	Rotverschiebungsfaktor	288
7.4.2	Ansichten einer Akkretionsscheibe	291
7.5	Entropie eines Schwarzen Lochs	292
7.5.1	Geometrie des Horizonts	292
7.5.2	Massenformel	294

7.5.3	Oberflächengravitation	295
7.5.4	Hauptsätze der Schwarz-Loch-Entwicklung	295
7.5.5	Bekenstein-Entropie eines Schwarzen Lochs	296
7.5.6	Rotationsenergie Schwarzer Löcher	299
7.5.7	Was ist Entropie?	299
7.5.8	Informationsverlustparadoxon	301
7.5.9	Singularitäten werden weggequantelt	302
7.6	Schwarze Löcher als astronomische Objekte	305
7.6.1	Stellare Schwarze Löcher	305
7.6.2	Schwarze Löcher in Zentren von Galaxien	308
7.6.3	Das Schwarze Loch im galaktischen Zentrum	317
7.7	Fragen zur Vertiefung	327
	Literaturverzeichnis	329
8	Gravitationswellen von kompakten Objekten	331
8.1	Einstein postuliert die Existenz von Gravitationswellen	333
8.2	Was sind Gravitationswellen?	333
8.3	Welche Objekte erzeugen Gravitationswellen?	339
8.3.1	Supernovae vom Typ II	341
8.3.2	Enge Doppelsternsysteme	344
8.3.3	Inspiral von Neutronensternen und Schwarzen Löchern	345
8.3.4	Berge auf schnell rotierenden Neutronensternen	348
8.3.5	Der Sound des Urknalls	349
8.4	Wie kann man Gravitationswellen detektieren?	349
8.4.1	Signal eines Gravitationswellendetektors	349
8.4.2	Erste Versuche: resonante Zylinderantennen	350
8.4.3	GWellen-Interferometer der ersten Generation	351
8.4.4	GWellen-Interferometer der zweiten Generation	353
8.4.5	Weltraumobservatorien für GWellen	355
8.4.6	Das europäische Weltraumobservatorium eLISA	359
8.4.7	Zu erwartende Detektionsraten	359
8.5	ET Xylophon – das GWellenobservatorium der Zukunft	361
8.6	Fragen zur Vertiefung	364
	Literaturverzeichnis	365
A	Allgemeine Lehrbücher	367
B	Physikalische Konstanten	369
C	Meilensteine in der Entwicklung der kompakten Objekte	371
D	Glossar	373
	Index	389