

# Inhaltsverzeichnis

|          |                                                                  |           |
|----------|------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>Meilensteine in der Erforschung der kompakten Objekte</b>     | <b>1</b>  |
| 1.1      | 1915 Einstein – Gravitation ist Geometrie der Raum-Zeit          | 3         |
| 1.2      | 1930 – Chandrasekhar und die Weißen Zwerge                       | 4         |
| 1.3      | 1967 – Neutronensterne als Pulsare                               | 7         |
| 1.4      | 1963 – Schwarze Löcher sind reine Geometrie                      | 13        |
| 1.4.1    | Schwarze Löcher in der Astronomie                                | 14        |
| 1.4.2    | 2015 – Wenn zwei Schwarze Löcher verschmelzen                    | 17        |
| 1.4.3    | 2019 – Das erste Bild eines Schwarzen Lochs                      | 19        |
| 1.5      | 2017 – Gammablitz und Kilonova                                   | 20        |
| 1.6      | Zusammenfassung                                                  | 25        |
|          | Literatur                                                        | 25        |
| <b>2</b> | <b>Die Sterne der Milchstraße</b>                                | <b>27</b> |
| 2.1      | Sterne in der Beobachtung                                        | 28        |
| 2.1.1    | Distanz der Sterne                                               | 29        |
| 2.1.2    | Die Hipparcos-Mission – 120.000 erlesene Sterne                  | 30        |
| 2.1.3    | Vermessung der Galaxis mit Gaia – 1,7 Mrd.<br>Sterne und Quasare | 32        |
| 2.1.4    | Die Leuchtkraft der Sterne                                       | 38        |
| 2.1.5    | Temperatur und Farben der Sterne                                 | 38        |
| 2.1.6    | Stellare Radien                                                  | 39        |
| 2.1.7    | Stellare Massen                                                  | 39        |
| 2.1.8    | Chemische Zusammensetzung                                        | 40        |
| 2.2      | Das Hertzsprung-Russell-Diagramm der Sterne                      | 41        |
| 2.2.1    | Farben-Helligkeits-Diagramme (FH)                                | 41        |
| 2.2.2    | Harvard-Spektralklassifikation                                   | 45        |
| 2.2.3    | Hertzsprung-Russell-Diagramm (HRD)                               | 49        |
| 2.2.4    | Yerkes Leuchtkraftklassen                                        | 52        |
| 2.3      | Braune Zwerge und Planeten                                       | 52        |
| 2.4      | Der Sloan Digital Sky Survey SDSS                                | 56        |
| 2.5      | Weißer Zwerge und Neutronensterne                                | 58        |
| 2.6      | Zusammenfassung                                                  | 60        |
| 2.7      | Lösungen zu Aufgaben                                             | 60        |
|          | Literatur                                                        | 60        |

|                                                                 |     |
|-----------------------------------------------------------------|-----|
| <b>3 Vom Protostern zum Schwarzen Loch</b>                      | 63  |
| 3.1 IMF und Protosterne                                         | 64  |
| 3.2 Entwicklung massearmer Sterne                               | 67  |
| 3.2.1 Von der Molekülwolke zur Hauptreihe                       | 67  |
| 3.2.2 Hauptreihenentwicklung                                    | 68  |
| 3.2.3 Vom Roten Riesen zum Weißen Zwerg                         | 68  |
| 3.2.4 Die zeitliche Entwicklung der Sonne                       | 71  |
| 3.3 Entwicklung massereicher Sterne                             | 74  |
| 3.3.1 Entwicklungswege im HRD                                   | 74  |
| 3.3.2 Eddington-Leuchtkraft                                     | 75  |
| 3.4 Endphasen der Sternentwicklung                              | 76  |
| 3.4.1 Planetarische Nebel und Weiße Zwerge                      | 77  |
| 3.4.2 Supernovae und Neutronensterne                            | 77  |
| 3.4.3 Hypernovae und Schwarze Löcher                            | 82  |
| 3.4.4 Die ersten Sterne und Schwarzen<br>Löcher im Universum    | 83  |
| 3.5 Zusammenfassung                                             | 85  |
| 3.6 Lösungen zu Aufgaben                                        | 85  |
| Literatur                                                       | 85  |
| <b>4 Gravitation kompakter Objekte</b>                          | 87  |
| 4.1 Die Galilei'sche Relativität                                | 90  |
| 4.2 Das Einstein'sche Relativitätsprinzip                       | 91  |
| 4.2.1 Die Suche nach dem Äther                                  | 92  |
| 4.2.2 Die Spezielle Relativität                                 | 94  |
| 4.2.3 Zeitdilatation – bewegte Uhren gehen langsamer            | 95  |
| 4.2.4 Längenkontraktion – bewegte Körper erscheinen<br>verkürzt | 97  |
| 4.2.5 Die Lorentz-Transformationen                              | 97  |
| 4.2.6 Additionstheorem der Geschwindigkeiten                    | 100 |
| 4.2.7 Ohne Spezielle Relativität keine Beschleuniger            | 102 |
| 4.2.8 Compton- und Doppler-Effekt                               | 104 |
| 4.2.9 Spezielle Relativität ist lebensnotwendig                 | 105 |
| 4.3 Ohne Gravitation ist die Welt flach                         | 106 |
| 4.3.1 Die Raum-Zeit von Minkowski                               | 107 |
| 4.3.2 Die kausale Struktur der Minkowski-Raum-Zeit              | 108 |
| 4.3.3 Denken Sie in 1+2 Dimensionen!                            | 109 |
| 4.4 Gauß und Riemann – die Vordenker Einsteins                  | 112 |
| 4.4.1 Wie messe ich Distanzen auf gekrümmten Flächen?           | 112 |
| 4.4.2 Die Klein'sche Flasche                                    | 115 |
| 4.4.3 Die Tangentialebene an die Fläche                         | 116 |
| 4.4.4 Die Gauß'sche Krümmung einer Fläche                       | 117 |
| 4.4.5 Konzept der Riemann'schen Mannigfaltigkeit                | 121 |
| 4.4.6 Die Kugeloberfläche als 2-D-Mannigfaltigkeit              | 123 |
| 4.4.7 Transport von Vektoren und Krümmung                       | 124 |

|          |                                                                          |            |
|----------|--------------------------------------------------------------------------|------------|
| 4.5      | Die Äquivalenzprinzipien von Albert Einstein .....                       | 126        |
| 4.5.1    | Das Schwache Äquivalenzprinzip .....                                     | 127        |
| 4.5.2    | Das Einstein'sche Äquivalenzprinzip .....                                | 129        |
| 4.5.3    | Das Starke Äquivalenzprinzip .....                                       | 130        |
| 4.6      | Die Raum-Zeit der Allgemeinen Relativitätstheorie .....                  | 131        |
| 4.6.1    | Gravitation ist Geometrie der Raum-Zeit .....                            | 131        |
| 4.6.2    | Der Transport von Vektoren ist metrisch .....                            | 133        |
| 4.6.3    | Körper bewegen sich auf Geodäten in der<br>Raum-Zeit .....               | 133        |
| 4.6.4    | Die Einstein'schen Feldgleichungen .....                                 | 134        |
| 4.7      | Einstein auf dem Prüfstand .....                                         | 140        |
| 4.7.1    | Lichtablenkung am Sonnenrand .....                                       | 141        |
| 4.7.2    | Apsidendrehung der Merkurbahn .....                                      | 144        |
| 4.7.3    | Shapiro-Effekt – Radiosignale verzögern sich .....                       | 145        |
| 4.7.4    | Tests des Starken Äquivalenzprinzips .....                               | 145        |
| 4.7.5    | Gravity Probe B misst Krümmung und<br>Frame-Dragging der Erde .....      | 146        |
| 4.8      | Zusammenfassung .....                                                    | 148        |
| 4.9      | Lösungen zu Aufgaben .....                                               | 148        |
|          | Literatur. ....                                                          | 150        |
| <b>5</b> | <b>Weißer Zwerge – Diamanten der Milchstraße.</b> .....                  | <b>151</b> |
| 5.1      | Sirius B – ein junger Weißer Zwerg. ....                                 | 152        |
| 5.2      | Die Zustandsgleichung eines Fermigas .....                               | 155        |
| 5.2.1    | Eine Welt von Bosonen und Fermionen .....                                | 155        |
| 5.2.2    | Die Zustandsgleichung des idealen Fermigas .....                         | 156        |
| 5.2.3    | Elektrostatische Wechselwirkung .....                                    | 160        |
| 5.3      | Chandrasekhar kämpft gegen das Establishment. ....                       | 160        |
| 5.4      | Struktur der Weißen Zwerge .....                                         | 161        |
| 5.5      | Polytropen-Näherung. ....                                                | 163        |
| 5.6      | Die Chandrasekhar-Masse – fundamentales<br>Konzept der Astrophysik ..... | 169        |
| 5.7      | Warum werden Weiße Zwerge instabil? .....                                | 170        |
| 5.8      | Weißer Zwerge in der Milchstraße .....                                   | 172        |
| 5.8.1    | Spektraltypen Weißer Zwerge .....                                        | 172        |
| 5.8.2    | Weißer Zwerge in Sonnenumgebung .....                                    | 174        |
| 5.8.3    | Weißer Zwerge in SDSS und Gaia DR2. ....                                 | 176        |
| 5.9      | Kühlung Weißer Zwerge .....                                              | 177        |
| 5.10     | Zusammenfassung .....                                                    | 179        |
| 5.11     | Lösungen zu Aufgaben .....                                               | 180        |
|          | Literatur. ....                                                          | 180        |
| <b>6</b> | <b>Neutronensterne – die kompaktesten Sterne</b> .....                   | <b>181</b> |
| 6.1      | Struktur der Neutronensterne. ....                                       | 182        |
| 6.2      | Zustandsgleichung Neutronensternmaterie .....                            | 185        |

|       |                                                                           |     |
|-------|---------------------------------------------------------------------------|-----|
| 6.2.1 | Das freie Neutronengas . . . . .                                          | 185 |
| 6.2.2 | Das Tröpfchenmodell für die Krusten . . . . .                             | 187 |
| 6.2.3 | Die Neutronenflüssigkeit im Core . . . . .                                | 188 |
| 6.2.4 | Quark-Hadronen-Phasenübergang im Zentrum. . . . .                         | 191 |
| 6.3   | Tolman-Oppenheimer-Volkoff-Gleichungen . . . . .                          | 194 |
| 6.3.1 | Die TOV-Gleichungen . . . . .                                             | 194 |
| 6.3.2 | Dichtesequenz der Neutronensterne . . . . .                               | 197 |
| 6.3.3 | Die kritische Masse von Neutronensternen . . . . .                        | 197 |
| 6.3.4 | Massen-Radius-Beziehung und gravitative<br>Rotverschiebung . . . . .      | 199 |
| 6.4   | Wann rotieren Neutronensterne schnell? . . . . .                          | 202 |
| 6.4.1 | Die Metrik langsam rotierender Sterne . . . . .                           | 203 |
| 6.4.2 | Elektrodynamik um rotierende Sterne. . . . .                              | 204 |
| 6.5   | Neutronensterne als Radiopulsare . . . . .                                | 205 |
| 6.5.1 | Was ist ein Pulsar? . . . . .                                             | 206 |
| 6.5.2 | Abbremsrate und Pulsardiagramm . . . . .                                  | 208 |
| 6.5.3 | Der Pulsar als magnetischer Rotator . . . . .                             | 212 |
| 6.5.4 | Spindown-Alter und die Entwicklungszeit . . . . .                         | 213 |
| 6.5.5 | Die jüngsten und ältesten Pulsare . . . . .                               | 215 |
| 6.5.6 | Struktur der Pulsarmagnetosphäre. . . . .                                 | 217 |
| 6.5.7 | MHD-Pulsarwinde. . . . .                                                  | 221 |
| 6.6   | Neutronensterne als Röntgendoppelsterne. . . . .                          | 223 |
| 6.6.1 | Akkretion auf Neutronensterne . . . . .                                   | 224 |
| 6.6.2 | Klassen von Röntgendoppelsternen. . . . .                                 | 225 |
| 6.7   | Pulsare in Doppelsternsystemen . . . . .                                  | 227 |
| 6.7.1 | Pulsare als Uhren. . . . .                                                | 227 |
| 6.7.2 | Was ist Pulsar-Timing? . . . . .                                          | 227 |
| 6.7.3 | Klassische Bahnelemente im Doppelsternsystem . . . . .                    | 231 |
| 6.7.4 | Post-Kepler'sche Effekte in Binärsystemen. . . . .                        | 233 |
| 6.7.5 | Der erste Doppelpulsar . . . . .                                          | 240 |
| 6.7.6 | Ein Dreifachsystem mit Pulsar testet Einstein. . . . .                    | 243 |
| 6.8   | Magnetfelder der Neutronensterne . . . . .                                | 245 |
| 6.8.1 | Ursprung der Magnetfelder . . . . .                                       | 247 |
| 6.8.2 | Zeitliche Entwicklung der Magnetfelder . . . . .                          | 248 |
| 6.8.3 | Recycling und Millisekundenpulsare. . . . .                               | 250 |
| 6.8.4 | Magnetfelder akkretierender Neutronensterne . . . . .                     | 252 |
| 6.9   | Cassiopeia A und SN 87A – die beiden jüngsten<br>Neutronensterne. . . . . | 252 |
| 6.9.1 | Wie kühlen Neutronensterne? . . . . .                                     | 253 |
| 6.9.2 | Cassiopeia A – der jüngste Neutronestern in der<br>Milchstraße . . . . .  | 254 |
| 6.9.3 | Neutronestern in SN 1987A? . . . . .                                      | 257 |
| 6.10  | 20.000 Pulsare mit SKA . . . . .                                          | 258 |

|          |                                                        |            |
|----------|--------------------------------------------------------|------------|
| 6.11     | Neutronensterne – die Zukunft beginnt gerade . . . . . | 260        |
| 6.12     | Zusammenfassung . . . . .                              | 261        |
| 6.13     | Lösungen zu Aufgaben . . . . .                         | 261        |
|          | Literatur. . . . .                                     | 261        |
| <b>7</b> | <b>Schwarze Löcher sind reine Geometrie . . . . .</b>  | <b>263</b> |
| 7.1      | Das nichtrotierende Schwarze Loch . . . . .            | 266        |
| 7.1.1    | Die Schwarzschild-Metrik . . . . .                     | 266        |
| 7.1.2    | Der Horizont . . . . .                                 | 267        |
| 7.1.3    | Das Kepler-Problem und die Apsidendrehung . . . . .    | 268        |
| 7.1.4    | Lichtablenkung und Photonensphäre. . . . .             | 275        |
| 7.2      | Schwarze Löcher und modernes Vakuum . . . . .          | 275        |
| 7.3      | Das rotierende Schwarze Loch . . . . .                 | 281        |
| 7.3.1    | Die Kerr-Lösung . . . . .                              | 281        |
| 7.3.2    | Horizont und Ergosphäre. . . . .                       | 281        |
| 7.3.3    | Die innerste Kreisbahn ISCO . . . . .                  | 285        |
| 7.3.4    | Strahlungseffizienz eines Schwarzen Lochs . . . . .    | 288        |
| 7.4      | Photonen in der Kerr-Geometrie . . . . .               | 291        |
| 7.4.1    | Rotverschiebungs- und Doppler-Faktor. . . . .          | 292        |
| 7.4.2    | Ansichten einer Akkretionsscheibe . . . . .            | 294        |
| 7.4.3    | Das erste Bild eines Schwarzen Lochs . . . . .         | 295        |
| 7.5      | Entropie eines Schwarzen Lochs . . . . .               | 299        |
| 7.5.1    | Geometrie des Horizonts . . . . .                      | 299        |
| 7.5.2    | Massenformel . . . . .                                 | 300        |
| 7.5.3    | Oberflächengravitation. . . . .                        | 301        |
| 7.5.4    | Hauptsätze der Schwarz-Loch-Entwicklung . . . . .      | 301        |
| 7.5.5    | Bekenstein-Entropie eines Schwarzen Lochs . . . . .    | 303        |
| 7.5.6    | Rotationsenergie Schwarzer Löcher . . . . .            | 305        |
| 7.5.7    | Was ist Entropie? . . . . .                            | 306        |
| 7.5.8    | Informationsverlustparadoxon . . . . .                 | 307        |
| 7.5.9    | Singularitäten und Quantengravitation . . . . .        | 308        |
| 7.6      | Schwarze Löcher als astronomische Objekte . . . . .    | 310        |
| 7.6.1    | Stellare Schwarze Löcher . . . . .                     | 310        |
| 7.6.2    | Mittelschwere Schwarze Löcher . . . . .                | 313        |
| 7.6.3    | Schwarze Löcher in Zentren von Galaxien . . . . .      | 313        |
| 7.7      | Das Schwarze Loch im galaktischen Zentrum. . . . .     | 323        |
| 7.7.1    | Der nukleare Sternhaufen . . . . .                     | 324        |
| 7.7.2    | Sagittarius A* und Einstein . . . . .                  | 327        |
| 7.7.3    | GRAVITY – ganz nahe am Schwarzen Loch . . . . .        | 331        |
| 7.8      | Zusammenfassung . . . . .                              | 333        |
| 7.9      | Lösungen zu Aufgaben . . . . .                         | 334        |
|          | Literatur. . . . .                                     | 334        |

|          |                                                               |     |
|----------|---------------------------------------------------------------|-----|
| <b>8</b> | <b>Gravitationswellen von kompakten Objekten</b>              | 337 |
| 8.1      | Einstein postuliert die Existenz von Gravitationswellen       | 339 |
| 8.2      | Was sind Gravitationswellen?                                  | 340 |
| 8.3      | Welche Objekte erzeugen Gravitationswellen?                   | 346 |
| 8.3.1    | Supernovae vom Typ II                                         | 347 |
| 8.3.2    | Enge Doppelsternsysteme                                       | 348 |
| 8.3.3    | Inspiral von Neutronensternen und Schwarzen Löchern           | 352 |
| 8.3.4    | Berge auf schnell rotierenden Neutronensternen                | 355 |
| 8.3.5    | Der Sound des Urknalls                                        | 355 |
| 8.4      | Wie kann man Gravitationswellen detektieren?                  | 356 |
| 8.4.1    | Signal eines Gravitationswellendetektors                      | 356 |
| 8.4.2    | Erste Versuche: resonante Zylinderantennen                    | 357 |
| 8.4.3    | GWellen-Interferometer der ersten Generation                  | 358 |
| 8.4.4    | GWellen-Interferometer der zweiten Generation                 | 360 |
| 8.5      | Wenn Schwarze Löcher verschmelzen                             | 361 |
| 8.5.1    | Kompakte Objekte in Binärsystemen erzeugen Gravitationswellen | 361 |
| 8.5.2    | Die ersten Schwarz-Loch-Merger mit advLIGO                    | 362 |
| 8.5.3    | Der Nobelpreis in Physik 2017                                 | 364 |
| 8.5.4    | Das Chirp-Signal der Gravitationswellen                       | 368 |
| 8.5.5    | Das Massenspektrum Schwarzer Löcher                           | 369 |
| 8.5.6    | Drehimpulsverteilung                                          | 373 |
| 8.6      | Kilonovae – wenn Neutronensterne verschmelzen                 | 374 |
| 8.7      | GWellen-Detektoren der dritten Generation                     | 378 |
| 8.7.1    | Cosmic Explorer CE                                            | 379 |
| 8.7.2    | ET Xylophon                                                   | 379 |
| 8.8      | Weltraumobservatorien für Gravitationswellen                  | 384 |
| 8.8.1    | Wissenschaftspolitik und Weltraumprogramme                    | 384 |
| 8.8.2    | Das europäische Weltraumobservatorium LISA                    | 385 |
| 8.9      | Zu erwartende Detektionsraten                                 | 387 |
| 8.10     | Dezi-Hertz-Gravitationswellen                                 | 390 |
| 8.11     | Zusammenfassung                                               | 390 |
| 8.12     | Lösungen zu Aufgaben                                          | 393 |
|          | Literatur                                                     | 393 |
| <b>9</b> | <b>Anhang</b>                                                 | 395 |
| 9.1      | Lehrbücher                                                    | 395 |
| 9.2      | Konstanten der Physik und Astronomie                          | 396 |
| 9.3      | Meilensteine in der Entwicklung der kompakten Objekte         | 398 |
| 9.4      | Glossar                                                       | 399 |
|          | <b>Stichwortverzeichnis</b>                                   | 415 |