

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> . . . . .	<b>1</b>
1.1	Was ist Kern-, Elementarteilchen- und Astrophysik? . . . . .	2
1.2	Historische Entwicklung der Kern- und Elementarteilchenphysik . . . . .	3
1.3	Bedeutung der Kern-, Elementarteilchen- und Astrophysik; offene Fragen . . . . .	5
1.4	Überblick über das Konzept des Lehrbuches . . . . .	6
	Literaturverzeichnis . . . . .	7
<b>2</b>	<b>Aufbau der Atomkerne</b> . . . . .	<b>9</b>
2.1	Untersuchungsmethoden . . . . .	10
2.2	Ladung, Größe und Masse der Kerne . . . . .	11
2.3	Massen- und Ladungsverteilung im Kern . . . . .	13
2.3.1	Massendichteverteilung . . . . .	14
2.3.2	Ladungsverteilung im Kern . . . . .	15
2.4	Aufbau der Kerne aus Nukleonen; Isotope und Isobare . . . . .	18
2.5	Kerndrehimpulse, magnetische und elektrische Momente . . . . .	19
2.5.1	Magnetische Kernmomente . . . . .	19
2.5.2	Elektrisches Quadrupolmoment . . . . .	22
2.6	Bindungsenergie der Kerne . . . . .	24
2.6.1	Experimentelle Ergebnisse . . . . .	24
2.6.2	Nukleonenkonfiguration und Pauli-Prinzip . . . . .	26
2.6.3	Tröpfchenmodell und Bethe-Weizsäcker-Formel . . . . .	28
	Zusammenfassung . . . . .	31
	Aufgaben . . . . .	31
	Literaturverzeichnis . . . . .	32
<b>3</b>	<b>Instabile Kerne, Radioaktivität</b> . . . . .	<b>33</b>
3.1	Stabilitätskriterien; Stabile und instabile Kerne . . . . .	34
3.2	Instabile Kerne und Radioaktivität . . . . .	37
3.2.1	Zerfallsgesetze . . . . .	37
3.2.2	Natürliche Radioaktivität . . . . .	39
3.2.3	Zerfallsketten . . . . .	40
3.3	Alphazerfall . . . . .	41
3.4	Betazerfall . . . . .	44
3.4.1	Experimentelle Befunde . . . . .	44
3.4.2	Neutrino-Hypothese . . . . .	45
3.4.3	Modell des Betazerfalls . . . . .	45
3.4.4	Experimentelle Methoden zur Untersuchung des $\beta$ -Zerfalls . . . . .	47

3.4.5	Elektroneneinfang	48
3.4.6	Energiebilanzen und Zerfallstypen	49
3.5	Gammastrahlung	49
3.5.1	Beobachtungen	49
3.5.2	Multipol-Übergänge und Übergangswahrscheinlichkeiten	50
3.5.3	Konversionsprozesse	52
3.5.4	Kernisomere	53
	Zusammenfassung	53
	Aufgaben	54
	Literaturverzeichnis	55
<b>4</b>	<b>Experimentelle Techniken und Geräte in Kern- und Hochenergiephysik</b>	<b>57</b>
4.1	Teilchenbeschleuniger	58
4.1.1	Geschwindigkeit, Impuls und Beschleunigung bei relativistischen Energien	58
4.1.2	Physikalische Grundlagen der Beschleuniger	60
4.1.3	Elektrostatische Beschleuniger	62
4.1.4	Hochfrequenz-Beschleuniger	63
4.1.5	Beschleunigung durch Laser	65
4.1.6	Kreisbeschleuniger	66
4.1.7	Stabilisierung der Teilchenbahnen in Beschleunigern	69
4.1.8	Speicherringe	73
4.1.9	Die großen Maschinen	77
4.1.10	Der LHC	78
4.2	Wechselwirkung von Teilchen und Strahlung mit Materie	82
4.2.1	Geladene schwere Teilchen	83
4.2.2	Energieverlust von Elektronen	85
4.2.3	Wechselwirkung von Gammastrahlung mit Materie	86
4.2.4	Wechselwirkung von Neutronen mit Materie	88
4.3	Detektoren	89
4.3.1	Ionisationskammer, Proportionalzählrohr, Geigerzähler	90
4.3.2	Szintillationszähler	93
4.3.3	Halbleiterzähler	94
4.3.4	Spurendetektoren	95
4.3.5	Čerenkov-Zähler	98
4.3.6	Detektoren in der Hochenergiephysik	98
4.4	Streuexperimente	101
4.4.1	Grundlagen der relativistischen Kinematik	102
4.4.2	Elastische Streuung	103
4.4.3	Was lernt man aus Streuexperimenten?	106
4.5	Kernspektroskopie	106
4.5.1	Gamma-Spektroskopie	106
4.5.2	Beta-Spektrometer	108
	Zusammenfassung	109
	Aufgaben	110
	Literaturverzeichnis	111
<b>5</b>	<b>Kernkräfte und Kernmodelle</b>	<b>113</b>
5.1	Das Deuteron	114
5.2	Nukleon-Nukleon-Streuung	117
5.2.1	Grundlagen	118
5.2.2	Spinabhängigkeit der Kernkräfte	118
5.2.3	Ladungsunabhängigkeit der Kernkräfte	120

5.3	Isospin-Formalismus . . . . .	121
5.4	Meson-Austauschmodell der Kernkräfte . . . . .	123
5.5	Kernmodelle . . . . .	124
5.5.1	Nukleonen als Fermigas . . . . .	125
5.5.2	Schalenmodell . . . . .	127
5.6	Rotation und Schwingung von Kernen . . . . .	133
5.6.1	Deformierte Kerne . . . . .	133
5.6.2	Kernrotationen . . . . .	135
5.6.3	Kernschwingungen . . . . .	136
5.7	Experimenteller Nachweis angeregter Rotations- und Schwingungszustände . . . . .	138
	Zusammenfassung . . . . .	139
	Aufgaben . . . . .	140
	Literaturverzeichnis . . . . .	140
<b>6</b>	<b>Kernreaktionen . . . . .</b>	<b>141</b>
6.1	Grundlagen . . . . .	142
6.1.1	Die inelastische Streuung mit Kernanregung . . . . .	142
6.1.2	Die reaktive Streuung . . . . .	142
6.1.3	Die stoßinduzierte Kernspaltung . . . . .	142
6.1.4	Energieschwelle . . . . .	143
6.1.5	Reaktionsquerschnitt . . . . .	144
6.2	Erhaltungssätze . . . . .	145
6.2.1	Erhaltung der Nukleonenzahl . . . . .	145
6.2.2	Erhaltung der elektrischen Ladung . . . . .	145
6.2.3	Drehimpuls-Erhaltung . . . . .	145
6.2.4	Erhaltung der Parität . . . . .	146
6.3	Spezielle stoßinduzierte Kernreaktionen . . . . .	146
6.3.1	Die ( $\alpha$ , p)-Reaktion . . . . .	146
6.3.2	Die ( $\alpha$ , n)-Reaktion . . . . .	147
6.4	Stoßinduzierte Radioaktivität . . . . .	148
6.5	Kernspaltung . . . . .	149
6.5.1	Spontane Kernspaltung . . . . .	149
6.5.2	Stoßinduzierte Spaltung leichter Kerne . . . . .	151
6.5.3	Induzierte Spaltung schwerer Kerne . . . . .	151
6.5.4	Energiebilanz bei der Kernspaltung . . . . .	153
6.6	Kernfusion . . . . .	154
6.7	Die Erzeugung von Transuranen . . . . .	155
	Zusammenfassung . . . . .	158
	Aufgaben . . . . .	159
	Literaturverzeichnis . . . . .	160
<b>7</b>	<b>Physik der Elementarteilchen . . . . .</b>	<b>161</b>
7.1	Die Entdeckung der Myonen und Pionen . . . . .	162
7.2	Der Zoo der Elementarteilchen . . . . .	163
7.2.1	Lebensdauer des Pions . . . . .	163
7.2.2	Spin des Pions . . . . .	165
7.2.3	Parität des $\pi$ -Mesons . . . . .	165

7.2.4	Entdeckung weiterer Teilchen	166
7.2.5	Klassifikation der Teilchen	168
7.2.6	Quantenzahlen und Erhaltungssätze	169
7.3	Leptonen	170
7.4	Das Quarkmodell	172
7.4.1	Der achtfache Weg	172
7.4.2	Quarkmodell der Mesonen	174
7.4.3	Charm-Quark und Charmonium	174
7.4.4	Quarkaufbau der Mesonen	176
7.4.5	Quarkaufbau der Baryonen	176
7.4.6	Farbladungen	178
7.4.7	Experimentelle Hinweise auf die Existenz von Quarks	179
7.4.8	Quarkfamilien	181
7.4.9	Valenzquarks und Seequarks	181
7.5	Quantenchromodynamik	182
7.5.1	Gluonen	182
7.5.2	Quark-Gluonen-Modell der Hadronen, Quarkeinschluss	183
7.5.3	Die Masse der Quarks	185
7.6	Starke und schwache Wechselwirkungen	185
7.6.1	W- und Z-Bosonen als Austauschteilchen der schwachen Wechselwirkung	186
7.6.2	Reelle W- und Z-Bosonen	187
7.6.3	Paritätsverletzung bei der schwachen Wechselwirkung	189
7.6.4	Die CPT-Symmetrie	191
7.6.5	Erhaltungssätze, Symmetrien und Stabilität von Teilchen	192
7.7	Das Standardmodell der Teilchenphysik	193
7.8	Neue, bisher experimentell nicht bestätigte Theorien	195
	Zusammenfassung	195
	Aufgaben	196
	Literaturverzeichnis	197
<b>8</b>	<b>Anwendungen der Kern- und Hochenergiephysik</b>	<b>199</b>
8.1	Radionuklid-Anwendungen	200
8.1.1	Strahlendosis, Messgrößen und Messverfahren	200
8.1.2	Technische Anwendungen	202
8.1.3	Anwendungen in der Biologie	203
8.1.4	Anwendungen von Radionukliden in der Medizin	203
8.1.5	Nachweis geringer Atomkonzentrationen durch Radioaktivierung	205
8.1.6	Altersbestimmung mit radiometrischer Datierung	205
8.1.7	Hydrologische Anwendungen	207
8.2	Anwendungen von Beschleunigern	208
8.3	Kernreaktoren	208
8.3.1	Kettenreaktionen	209
8.3.2	Aufbau eines Kernreaktors	211
8.3.3	Steuerung und Betrieb eines Kernreaktors	211
8.3.4	Reaktortypen	213
8.3.5	Sicherheit von Kernreaktoren	216
8.3.6	Radioaktiver Abfall und Entsorgungskonzepte	218
8.3.7	Neue Konzepte	219
8.3.8	Vor- und Nachteile der Kernspaltungsenergie	219

8.4	Kontrollierte Kernfusion	220
8.4.1	Allgemeine Anforderungen	221
8.4.2	Magnetischer Einschluss	222
8.4.3	Plasmaheizung	225
8.4.4	Laserinduzierte Kernfusion	225
	Zusammenfassung	226
	Aufgaben	227
	Literaturverzeichnis	228
<b>9</b>	<b>Grundlagen der experimentellen Astronomie und Astrophysik</b>	<b>231</b>
9.1	Einleitung	232
9.2	Messdaten von Himmelskörpern	234
9.3	Astronomische Koordinatensysteme	234
9.3.1	Das Horizontsystem	234
9.3.2	Die Äquatorsysteme	235
9.3.3	Das Ekliptikalsystem	236
9.3.4	Das galaktische Koordinatensystem	236
9.3.5	Zeitliche Veränderungen der Koordinaten	237
9.3.6	Zeitmessung	237
9.4	Beobachtung von Sternen	238
9.5	Teleskope	240
9.5.1	Lichtstärke von Teleskopen	240
9.5.2	Vergrößerung	240
9.5.3	Teleskopanordnungen	241
9.5.4	Große Teleskope	243
9.5.5	Nachführung	244
9.5.6	Radioteleskope	245
9.5.7	Stern-Interferometrie	247
9.5.8	Röntgenteleskope	248
9.5.9	Detektoren für kosmische Gammastrahlung	248
9.5.10	Nachweis der Kosmischen Höhenstrahlung	249
9.5.11	Gravitationswellen-Detektoren	250
9.6	Parallaxe, Aberration und Refraktion	251
9.7	Entfernungsmessungen	253
9.7.1	Geometrische Verfahren	253
9.7.2	Andere Verfahren der Entfernungsmessung	256
9.8	Scheinbare und absolute Helligkeiten	257
9.9	Messung der spektralen Energieverteilung	258
	Zusammenfassung	258
	Aufgaben	259
	Literaturverzeichnis	260
<b>10</b>	<b>Unser Sonnensystem</b>	<b>263</b>
10.1	Allgemeine Beobachtungen und Gesetze der Planetenbewegungen	265
10.1.1	Planetenbahnen; Erstes Kepler'sches Gesetz	265
10.1.2	Zweites und drittes Kepler'sches Gesetz	267
10.1.3	Die Bahnelemente der Planeten	268
10.1.4	Die Umlaufzeiten der Planeten	270
10.1.5	Größe, Masse und mittlere Dichte der Planeten	271
10.1.6	Energiehaushalt der Planeten	273

10.2	Die inneren Planeten und ihre Monde	274
10.2.1	Merkur	274
10.2.2	Venus	275
10.2.3	Die Erde	276
10.2.4	Der Erdmond	278
10.2.5	Mars	280
10.3	Die äußeren Planeten	282
10.3.1	Jupiter und seine Monde	283
10.3.2	Saturn	286
10.3.3	Die äußersten Planeten	288
10.4	Kleine Körper im Sonnensystem	289
10.4.1	Zwergplaneten	289
10.4.2	Die Planetoiden	290
10.4.3	Kometen	292
10.4.4	Meteore und Meteorite	294
10.5	Die Sonne als stationärer Stern	295
10.5.1	Masse, Größe, Dichte und Leuchtkraft der Sonne	296
10.5.2	Mittelwerte für Temperatur und Druck im Inneren der Sonne	297
10.5.3	Radialer Verlauf von Druck, Dichte und Temperatur	298
10.5.4	Energieerzeugung im Inneren der Sonne	300
10.5.5	Das Sonnen-Neutrino-Problem	302
10.5.6	Der Energietransport in der Sonne	304
10.5.7	Die Photosphäre	305
10.5.8	Chromosphäre und Korona	308
10.6	Die aktive Sonne	310
10.6.1	Sonnenflecken	310
10.6.2	Das Magnetfeld der Sonne	313
10.6.3	Fackeln, Flares und Protuberanzen	314
10.6.4	Die pulsierende Sonne, Helioseismologie	315
	Zusammenfassung	317
	Aufgaben	318
	Literaturverzeichnis	318
<b>11</b>	<b>Geburt, Leben und Tod von Sternen</b>	<b>321</b>
11.1	Die sonnennächsten Sterne	322
11.1.1	Direkte Messung von Sternradien	324
11.1.2	Doppelsternsysteme und die Bestimmung von Sternmassen und Sternradien	325
11.1.3	Spektraltypen der Sterne	328
11.1.4	Hertzsprung-Russel-Diagramm	329
11.2	Die Geburt von Sternen	330
11.2.1	Das Jeans-Kriterium	330
11.2.2	Die Bildung von Protosternen	332
11.2.3	Der Einfluss der Rotation auf kollabierende Gaswolken	333
11.2.4	Der Weg des Sterns im Hertzsprung-Russel-Diagramm	334
11.3	Der stabile Lebensabschnitt von Sternen (Hauptreihenstadium)	335
11.3.1	Der Einfluss der Sternmasse auf Leuchtkraft und Lebensdauer	335
11.3.2	Die Energieerzeugung in Sternen der Hauptreihe	336
11.4	Die Nach-Hauptreihen-Entwicklung	338
11.4.1	Sterne geringer Masse	338
11.4.2	Die Entwicklung von Sternen mit mittleren Massen	338
11.4.3	Die Entwicklung massereicher Sterne und die Synthese schwerer Elemente	340

11.5	Entartete Sternmaterie . . . . .	342
11.5.1	Zustandsgleichung entarteter Materie . . . . .	342
11.5.2	Weißer Zwerge . . . . .	343
11.5.3	Neutronensterne . . . . .	346
11.5.4	Pulsare als rotierende Neutronensterne . . . . .	348
11.6	Schwarze Löcher . . . . .	351
11.6.1	Der Kollaps zu einem Schwarzen Loch . . . . .	351
11.6.2	Schwarzschild-Radius . . . . .	352
11.6.3	Lichtablenkung im Gravitationsfeld . . . . .	353
11.6.4	Zeitlicher Verlauf des Kollapses eines Schwarzen Loches . . . . .	354
11.6.5	Die Suche nach Schwarzen Löchern . . . . .	355
11.7	Quasare . . . . .	355
11.8	Beobachtbare Phänomene während des Endstadiums von Sternen . . . . .	356
11.8.1	Pulsationsveränderliche . . . . .	356
11.8.2	Novae . . . . .	358
11.8.3	Sterne stehlen Masse . . . . .	359
11.8.4	Supernovae . . . . .	360
11.8.5	Planetarische Nebel und Supernova-Überreste . . . . .	363
11.9	Zusammenfassende Darstellung der Sternentwicklung . . . . .	364
11.10	Zum Nachdenken . . . . .	366
	Zusammenfassung . . . . .	366
	Aufgaben . . . . .	367
	Literaturverzeichnis . . . . .	368
<b>12</b>	<b>Die Entwicklung und heutige Struktur des Universums . . . . .</b>	<b>369</b>
12.1	Experimentelle Hinweise auf ein endliches expandierendes Universum . . . . .	370
12.1.1	Die Expansion des Weltalls . . . . .	370
12.1.2	Kosmische Hintergrundstrahlung . . . . .	371
12.1.3	Häufigkeitsverhältnisse der leichten Atome . . . . .	372
12.1.4	Das Olber'sche Paradoxon . . . . .	372
12.1.5	Homogenität des Weltalls . . . . .	373
12.2	Die Metrik des gekrümmten Raumes . . . . .	373
12.3	Das Standardmodell . . . . .	375
12.3.1	Strahlungsdominiertes und massedominiertes Universum . . . . .	375
12.3.2	Hubble-Parameter und kritische Dichte . . . . .	376
12.3.3	Die frühe Phase des Universums . . . . .	379
12.3.4	Die Synthese der leichten Elemente . . . . .	382
12.3.5	Übergang vom Strahlungs- zum Masse-dominierten Universum . . . . .	383
12.3.6	Entkopplung von Strahlung und Materie . . . . .	383
12.3.7	Die Bildung von Kugelsternhaufen und Galaxien . . . . .	384
12.3.8	Das Alter des Universums . . . . .	384
12.3.9	Friedmann-Gleichungen . . . . .	385
12.3.10	Die Rotverschiebung . . . . .	387
12.3.11	Bisher ungelöste Probleme . . . . .	389
12.3.12	Das inflationäre Universum . . . . .	390
12.4	Bildung und Struktur von Galaxien . . . . .	392
12.4.1	Dunkle Materie und Strukturbildung . . . . .	392
12.4.2	Was sind Galaxien? . . . . .	393
12.4.3	Galaxien-Typen . . . . .	393

12.4.4	Aktive Galaxien	396
12.4.5	Galaxienhaufen und Superhaufen	397
12.4.6	Kollidierende Galaxien	398
12.4.7	Gravitationslinsen	399
12.5	Die Struktur unseres Milchstraßensystems	399
12.5.1	Stellarstatistik und Sternpopulationen	400
12.5.2	Die Bewegungen der sonnennahen Sterne	401
12.5.3	Die differentielle Rotation der Milchstraßenscheibe	402
12.5.4	Die Spiralarme	405
12.5.5	Kugelsternhaufen	406
12.5.6	Offene Sternhaufen	408
12.5.7	Das Zentrum unserer Milchstraße	409
12.5.8	Schwarzes Loch im Zentrum unserer Milchstraße	409
12.5.9	Dynamik unserer Milchstraße	411
12.5.10	Der Raum zwischen den Sternen, Interstellare Materie	411
12.5.11	Das Problem der Messung kosmischer Entfernungen	414
12.6	Das dunkle Universum	416
12.6.1	Dunkle Materie	416
12.6.2	Dunkle Energie	417
12.7	Die Entstehung der Elemente	418
12.8	Die Entstehung unseres Sonnensystems	419
12.8.1	Kollaps der rotierenden Gaswolke	419
12.8.2	Die Bildung der Planetesimale	421
12.8.3	Die Trennung von Gasen und festen Stoffen	422
12.8.4	Das Alter des Sonnensystems	423
12.9	Andere Sonnensysteme und Exoplaneten	425
12.9.1	Beobachtungsmethoden	425
12.9.2	Bedingungen für die Entwicklung intelligenten Lebens	426
12.10	Die Entstehung der Erde	427
12.10.1	Die Separation von Erdkern und Erdmantel	427
12.10.2	Die Erdkruste	429
12.10.3	Vulkanismus	429
12.10.4	Bildung der Ozeane	430
12.10.5	Die Bildung der Erdatmosphäre	430
12.10.6	Die Entstehung des Lebens	431
	Zusammenfassung	432
	Aufgaben	433
	Literaturverzeichnis	433
<b>13</b>	<b>Lösungen der Übungsaufgaben</b>	<b>435</b>
	<b>Zeittafel zur Kern- und Hochenergiephysik</b>	<b>477</b>
	<b>Zeittafel zur Astronomie</b>	<b>479</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>481</b>
	<b>Sachverzeichnis</b>	<b>483</b>