

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
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	6
1.4	Überblick über das Konzept des Lehrbuches	7
2	Aufbau der Atomkerne	9
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	15
2.3.2	Ladungsverteilung im Kern	16
2.4	Aufbau der Kerne aus Nukleonen; Isotope und Isobare	19
2.5	Kerndrehimpulse, magnetische und elektrische Momente	20
2.5.1	Magnetische Kernmomente	21
2.5.2	Elektrisches Quadrupolmoment	24
2.6	Bindungsenergie der Kerne	26
2.6.1	Experimentelle Ergebnisse	26
2.6.2	Nukleonenkonfiguration und Pauli-Prinzip	28
2.6.3	Tröpfchenmodell und Bethe-Weizsäcker-Formel	30
	Zusammenfassung	33
	Übungsaufgaben	33
3	Instabile Kerne, Radioaktivität	35
3.1	Stabilitätskriterien; Stabile und instabile Kerne	36
3.2	Instabile Kerne und Radioaktivität	39
3.2.1	Zerfallsgesetze	39
3.2.2	Natürliche Radioaktivität	41
3.2.3	Zerfallsketten	42
3.3	Alphazerfall	44
3.4	Betazerfall	47
3.4.1	Experimentelle Befunde	47
3.4.2	Neutrino-Hypothese	48
3.4.3	Modell des Betazerfalls	48
3.4.4	Experimentelle Methoden zur Untersuchung des β -Zerfalls	50
3.4.5	Elektroneneinfang	51
3.4.6	Energiebilanzen und Zerfallstypen	52
3.5	Gammastrahlung	52
3.5.1	Beobachtungen	52
3.5.2	Multipol-Übergänge und Übergangswahrscheinlichkeiten	53
3.5.3	Konversionsprozesse	55
3.5.4	Kernisomere	56
	Zusammenfassung	57
	Übungsaufgaben	57

4	Experimentelle Techniken und Geräte in Kern- und Hochenergiephysik . .	59
4.1	Teilchenbeschleuniger	60
4.1.1	Geschwindigkeit, Impuls und Beschleunigung bei relativistischen Energien	60
4.1.2	Physikalische Grundlagen der Beschleuniger	62
4.1.3	Elektrostatische Beschleuniger	64
4.1.4	Hochfrequenz-Beschleuniger	65
4.1.5	Beschleunigung durch Laser	67
4.1.6	Kreisbeschleuniger	68
4.1.7	Stabilisierung der Teilchenbahnen in Beschleunigern	72
4.1.8	Speicherringe	76
4.1.9	Die großen Maschinen	80
4.2	Wechselwirkung von Teilchen und Strahlung mit Materie	83
4.2.1	Geladene schwere Teilchen	83
4.2.2	Energieverlust von Elektronen	86
4.2.3	Wechselwirkung von Gammastrahlung mit Materie	87
4.2.4	Wechselwirkung von Neutronen mit Materie	89
4.3	Detektoren	91
4.3.1	Ionisationskammer, Proportionalzählrohr, Geigerzähler	91
4.3.2	Szintillationszähler	94
4.3.3	Halbleiterzähler	96
4.3.4	Spurendetektoren	97
4.3.5	Čerenkov-Zähler	101
4.3.6	Detektoren in der Hochenergiephysik	101
4.4	Streuexperimente	103
4.4.1	Grundlagen der relativistischen Kinematik	104
4.4.2	Elastische Streuung	106
4.4.3	Was lernt man aus Streuexperimenten?	109
4.5	Kernspektroskopie	109
4.5.1	Gamma-Spektroskopie	109
4.5.2	Beta-Spektrometer	112
	Zusammenfassung	112
	Übungsaufgaben	113
5	Kernkräfte und Kernmodelle	115
5.1	Das Deuteron	116
5.2	Nukleon-Nukleon-Streuung	120
5.2.1	Grundlagen	120
5.2.2	Spinabhängigkeit der Kernkräfte	121
5.2.3	Ladungsunabhängigkeit der Kernkräfte	123
5.3	Isospin-Formalismus	123
5.4	Meson-Austauschmodell der Kernkräfte	125
5.5	Kernmodelle	127
5.5.1	Nukleonen als Fermigas	127
5.5.2	Schalenmodell	131
5.6	Rotation und Schwingung von Kernen	137
5.6.1	Deformierte Kerne	137
5.6.2	Kernrotationen	138
5.6.3	Kernschwingungen	140
5.7	Experimenteller Nachweis angeregter Rotations- und Schwingungszustände	141
	Zusammenfassung	143
	Übungsaufgaben	144

6	Kernreaktionen	145
6.1	Grundlagen	146
6.1.1	Die inelastische Streuung mit Kernanregung	146
6.1.2	Die reaktive Streuung	146
6.1.3	Die stoßinduzierte Kernspaltung	147
6.1.4	Energieschwelle	147
6.1.5	Reaktionsquerschnitt	148
6.2	Erhaltungssätze	149
6.2.1	Erhaltung der Nukleonenzahl	149
6.2.2	Erhaltung der elektrischen Ladung	150
6.2.3	Drehimpuls-Erhaltung	150
6.2.4	Erhaltung der Parität	150
6.3	Spezielle stoßinduzierte Kernreaktionen	151
6.3.1	Die (α , p)-Reaktion	151
6.3.2	Die (α , n)-Reaktion	152
6.4	Stoßinduzierte Radioaktivität	152
6.5	Kernspaltung	154
6.5.1	Spontane Kernspaltung	154
6.5.2	Stoßinduzierte Spaltung leichter Kerne	156
6.5.3	Induzierte Spaltung schwerer Kerne	156
6.5.4	Energiebilanz bei der Kernspaltung	158
6.6	Kernfusion	159
6.7	Die Erzeugung von Transuranen	160
	Zusammenfassung	163
	Übungsaufgaben	164
7	Physik der Elementarteilchen	167
7.1	Die Entdeckung der Myonen und Pionen	168
7.2	Der Zoo der Elementarteilchen	168
7.2.1	Lebensdauer des Pions	169
7.2.2	Spin des Pions	171
7.2.3	Parität des π -Mesons	171
7.2.4	Entdeckung weiterer Teilchen	172
7.2.5	Klassifikation der Teilchen	174
7.2.6	Quantenzahlen und Erhaltungssätze	175
7.3	Leptonen	176
7.4	Das Quarkmodell	178
7.4.1	Der achtfache Weg	178
7.4.2	Quarkmodell der Mesonen	179
7.4.3	Charm-Quark und Charmonium	180
7.4.4	Quarkaufbau der Mesonen	182
7.4.5	Quarkaufbau der Baryonen	183
7.4.6	Farbladungen	185
7.4.7	Experimentelle Hinweise auf die Existenz von Quarks	185
7.4.8	Quarkfamilien	187
7.4.9	Valenzquarks und Seequarks	188
7.5	Quantenchromodynamik	188
7.5.1	Gluonen	189
7.5.2	Quark-Gluonen-Modell der Hadronen, Quarkeinschluss	190
7.5.3	Die Masse der Quarks	192
7.6	Starke und schwache Wechselwirkungen	192
7.6.1	W- und Z-Bosonen als Austauschteilchen der schwachen Wechselwirkung	193
7.6.2	Reelle W- und Z-Bosonen	195
7.6.3	Paritätsverletzung bei der schwachen Wechselwirkung	196

7.6.4	Die CPT-Symmetrie	198
7.6.5	Erhaltungssätze, Symmetrien und Stabilität von Teilchen	200
7.7	Das Standardmodell der Teilchenphysik	201
7.8	Neue, bisher experimentell nicht bestätigte Theorien	203
	Zusammenfassung	204
	Übungsaufgaben	205
8	Anwendungen der Kern- und Hochenergiephysik	207
8.1	Radionuklid-Anwendungen	208
8.1.1	Strahlendosis, Messgrößen und Messverfahren	208
8.1.2	Technische Anwendungen	210
8.1.3	Anwendungen in der Biologie	212
8.1.4	Anwendungen von Radionukliden in der Medizin	212
8.1.5	Nachweis geringer Atomkonzentrationen durch Radioaktivierung	213
8.1.6	Altersbestimmung mit radiometrischer Datierung	214
8.1.7	Hydrologische Anwendungen	216
8.2	Anwendungen von Beschleunigern	216
8.3	Kernreaktoren	217
8.3.1	Kettenreaktionen	217
8.3.2	Aufbau eines Kernreaktors	220
8.3.3	Steuerung und Betrieb eines Kernreaktors	221
8.3.4	Reaktortypen	223
8.3.5	Sicherheit von Kernreaktoren	226
8.3.6	Radioaktiver Abfall und Entsorgungskonzepte	228
8.3.7	Neue Konzepte	228
8.3.8	Vor- und Nachteile der Kernspaltungsenergie	230
8.4	Kontrollierte Kernfusion	230
8.4.1	Allgemeine Anforderungen	231
8.4.2	Magnetischer Einschluss	233
8.4.3	Plasmaheizung	235
8.4.4	Laserinduzierte Kernfusion	236
	Zusammenfassung	237
	Übungsaufgaben	237
9	Grundlagen der experimentellen Astronomie und Astrophysik	239
9.1	Einleitung	240
9.2	Messdaten von Himmelskörpern	242
9.3	Astronomische Koordinatensysteme	242
9.3.1	Das Horizontsystem	242
9.3.2	Die Äquatorsysteme	243
9.3.3	Das Ekliptikalsystem	244
9.3.4	Das galaktische Koordinatensystem	245
9.3.5	Zeitliche Veränderungen der Koordinaten	245
9.3.6	Zeitmessung	246
9.4	Beobachtung von Sternen	247
9.5	Teleskope	249
9.5.1	Lichtstärke von Teleskopen	249
9.5.2	Vergrößerung	249
9.5.3	Teleskopanordnungen	250
9.5.4	Große Teleskope	252
9.5.5	Nachführung	253
9.5.6	Radioteleskope	254
9.5.7	Stern-Interferometrie	256
9.5.8	Röntgenteleskope	256

9.5.9	Detektoren für kosmische Gammastrahlung	257
9.5.10	Nachweis der Kosmischen Höhenstrahlung	258
9.5.11	Gravitationswellen-Detektoren	259
9.6	Parallaxe, Aberration und Refraktion	260
9.7	Entfernungsmessungen	262
9.7.1	Geometrische Verfahren	262
9.7.2	Andere Verfahren der Entfernungsmessung	266
9.8	Scheinbare und absolute Helligkeiten	266
9.9	Messung der spektralen Energieverteilung	268
	Zusammenfassung	268
	Übungsaufgaben	269
10	Unser Sonnensystem	271
10.1	Allgemeine Beobachtungen und Gesetze der Planetenbewegungen	273
10.1.1	Planetenbahnen; Erstes Kepler'sches Gesetz	273
10.1.2	Zweites und drittes Kepler'sches Gesetz	275
10.1.3	Die Bahnelemente der Planeten	276
10.1.4	Die Umlaufzeiten der Planeten	279
10.1.5	Größe, Masse und mittlere Dichte der Planeten	280
10.1.6	Energiehaushalt der Planeten	281
10.2	Die inneren Planeten und ihre Monde	283
10.2.1	Merkur	283
10.2.2	Venus	284
10.2.3	Die Erde	285
10.2.4	Der Erdmond	287
10.2.5	Mars	289
10.3	Die äußeren Planeten	292
10.3.1	Jupiter und seine Monde	292
10.3.2	Saturn	295
10.3.3	Die äußersten Planeten	297
10.4	Kleine Körper im Sonnensystem	298
10.4.1	Zwergplaneten	298
10.4.2	Die Planetoiden	299
10.4.3	Kometen	302
10.4.4	Meteore und Meteorite	304
10.5	Die Sonne als stationärer Stern	305
10.5.1	Masse, Größe, Dichte und Leuchtkraft der Sonne	305
10.5.2	Mittelwerte für Temperatur und Druck im Inneren der Sonne . .	307
10.5.3	Radialer Verlauf von Druck, Dichte und Temperatur	308
10.5.4	Energieerzeugung im Inneren der Sonne	310
10.5.5	Das Sonnen-Neutrino-Problem	312
10.5.6	Der Energietransport in der Sonne	314
10.5.7	Die Photosphäre	315
10.5.8	Chromosphäre und Korona	319
10.6	Die aktive Sonne	320
10.6.1	Sonnenflecken	320
10.6.2	Das Magnetfeld der Sonne	323
10.6.3	Fackeln, Flares und Protuberanzen	324
10.6.4	Die pulsierende Sonne, Helioseismologie	325
	Zusammenfassung	326
	Übungsaufgaben	328

11	Geburt, Leben und Tod von Sternen	329
11.1	Die sonnennächsten Sterne	330
11.1.1	Direkte Messung von Sternradien	331
11.1.2	Doppelsternsysteme und die Bestimmung von Sternmassen und Sternradien	333
11.1.3	Spektraltypen der Sterne	336
11.1.4	Hertzsprung-Russel-Diagramm	337
11.2	Die Geburt von Sternen	339
11.2.1	Das Jeans-Kriterium	339
11.2.2	Die Bildung von Protosternen	341
11.2.3	Der Einfluss der Rotation auf kollabierende Gaswolken	342
11.2.4	Der Weg des Sterns im Hertzsprung-Russel-Diagramm	343
11.3	Der stabile Lebensabschnitt von Sternen (Hauptreihenstadium)	344
11.3.1	Der Einfluss der Sternmasse auf Leuchtkraft und Lebensdauer	344
11.3.2	Die Energieerzeugung in Sternen der Hauptreihe	345
11.4	Die Nach-Hauptreihen-Entwicklung	347
11.4.1	Sterne geringer Masse	348
11.4.2	Die Entwicklung von Sternen mit mittleren Massen	348
11.4.3	Die Entwicklung massereicher Sterne und die Synthese schwerer Elemente	349
11.5	Entartete Sternmaterie	351
11.5.1	Zustandsgleichung entarteter Materie	352
11.5.2	Weißer Zwerge	353
11.5.3	Neutronensterne	356
11.5.4	Pulsare als rotierende Neutronensterne	359
11.6	Schwarze Löcher	361
11.6.1	Der Kollaps zu einem Schwarzen Loch	362
11.6.2	Schwarzschild-Radius	363
11.6.3	Lichtablenkung im Gravitationsfeld	364
11.6.4	Zeitlicher Verlauf des Kollapses eines Schwarzen Loches	365
11.6.5	Die Suche nach Schwarzen Löchern	366
11.7	Beobachtbare Phänomene während des Endstadiums von Sternen	366
11.7.1	Pulsationsveränderliche	367
11.7.2	Novae	369
11.7.3	Sterne stehlen Masse	370
11.7.4	Supernovae	371
11.7.5	Planetarische Nebel und Supernova-Überreste	374
11.8	Zusammenfassende Darstellung der Sternentwicklung	375
11.9	Zum Nachdenken	377
	Zusammenfassung	378
	Übungsaufgaben	379
12	Die Entwicklung und heutige Struktur des Universums	381
12.1	Experimentelle Hinweise auf ein endliches expandierendes Universum	382
12.1.1	Die Expansion des Weltalls	383
12.1.2	Kosmische Hintergrundstrahlung	383
12.1.3	Häufigkeitsverhältnisse der leichten Atome	383
12.1.4	Das Olber'sche Paradoxon	384
12.1.5	Homogenität des Weltalls	385
12.2	Die Metrik des gekrümmten Raumes	385
12.3	Das Standardmodell	387
12.3.1	Strahlungsdominiertes und massedominiertes Universum	387
12.3.2	Hubble-Parameter und kritische Dichte	388
12.3.3	Die frühe Phase des Universums	391
12.3.4	Die Synthese der leichten Elemente	395

12.3.5	Übergang vom Strahlungs- zum Masse-dominierten Universum	396
12.3.6	Entkopplung von Strahlung und Materie	396
12.3.7	Die Bildung von Kugelsternhaufen und Galaxien	397
12.3.8	Das Alter des Universums	397
12.3.9	Friedmann-Gleichungen	398
12.3.10	Die Rotverschiebung	400
12.3.11	Das Horizontproblem und das Modell des Inflationären Universums	403
12.4	Bildung und Struktur von Galaxien	406
12.4.1	Dunkle Materie und Strukturbildung	406
12.4.2	Was sind Galaxien?	407
12.4.3	Galaxien-Typen	407
12.4.4	Aktive Galaxien	410
12.4.5	Galaxienhaufen und Superhaufen	411
12.4.6	Kollidierende Galaxien	412
12.5	Die Struktur unseres Milchstraßensystems	413
12.5.1	Stellarstatistik und Sternpopulationen	413
12.5.2	Die Bewegungen der sonnennahen Sterne	415
12.5.3	Die differentielle Rotation der Milchstraßenscheibe	416
12.5.4	Die Spiralarme	419
12.5.5	Kugelsternhaufen	420
12.5.6	Offene Sternhaufen	422
12.5.7	Das Zentrum unserer Milchstraße	422
12.5.8	Schwarzes Loch im Zentrum unserer Milchstraße	424
12.5.9	Dynamik unserer Milchstraße	425
12.5.10	Der Raum zwischen den Sternen, Interstellare Materie	425
12.5.11	Das Problem der Messung kosmischer Entfernungen	429
12.6	Das dunkle Universum	430
12.6.1	Dunkle Materie	431
12.6.2	Dunkle Energie	431
12.7	Die Entstehung der Elemente	432
12.8	Die Entstehung unseres Sonnensystems	434
12.8.1	Kollaps der rotierenden Gaswolke	435
12.8.2	Die Bildung der Planetesimale	437
12.8.3	Die Trennung von Gasen und festen Stoffen	438
12.8.4	Das Alter des Sonnensystems	438
12.9	Andere Sonnensysteme und Exoplaneten	441
12.9.1	Beobachtungsmethoden	441
12.9.2	Bedingungen für die Entwicklung intelligenten Lebens	442
12.10	Die Entstehung der Erde	443
12.10.1	Die Separation von Erdkern und Erdmantel	443
12.10.2	Die Erdkruste	445
12.10.3	Vulkanismus	445
12.10.4	Bildung der Ozeane	446
12.10.5	Die Bildung der Erdatmosphäre	446
12.10.6	Die Entstehung des Lebens	447
	Zusammenfassung	448
	Übungsaufgaben	450
13	Lösungen der Übungsaufgaben	451
	Zeittafel zur Kern- und Hochenergiephysik	495
	Zeittafel zur Astronomie	497

Farbtafeln 501

Literaturverzeichnis 511

Sachverzeichnis 519