

# Inhaltsverzeichnis

## 1. Einleitung

1.1	Was ist Kern-, Elementarteilchen- und Astrophysik? .....	1
1.2	Historische Entwicklung der Kern- und Elementarteilchenphysik .	2
1.3	Bedeutung der Kern-, Elementarteilchen- und Astrophysik; offene Fragen .....	6
1.4	Überblick über das Konzept des Lehrbuches .....	7

## 2. Aufbau der Atomkerne

2.1	Untersuchungsmethoden .....	9
2.2	Ladung, Größe und Masse der Kerne .....	10
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 .....	34
	Übungsaufgaben .....	35

## 3. Instabile Kerne, Radioaktivität

3.1	Stabilitätskriterien; Stabile und instabile Kerne .....	38
3.2	Instabile Kerne und Radioaktivität .....	40
3.2.1	Zerfallsgesetze .....	41
3.2.2	Natürliche Radioaktivität .....	43
3.2.3	Zerfallsketten .....	45
3.3	Alphazerfall .....	45
3.4	Betazerfall .....	48
3.4.1	Experimentelle Befunde .....	49
3.4.2	Neutrino-Hypothese .....	50
3.4.3	Modell des Betazerfalls .....	51
3.4.4	Experimentelle Methoden zur Untersuchung des $\beta$ -Zerfalls .....	53

3.4.5	Elektroneneinfang .....	53
3.4.6	Energiebilanzen und Zerfallstypen .....	54
3.5	Gammastrahlung .....	55
3.5.1	Beobachtungen .....	55
3.5.2	Multipol-Übergänge und Übergangswahrscheinlichkeiten .....	56
3.5.3	Konversionsprozesse .....	58
3.5.4	Kernisomere .....	59
	Zusammenfassung .....	59
	Übungsaufgaben .....	60

#### 4. Experimentelle Techniken und Geräte in Kern- und Hochenergiephysik

4.1	Teilchenbeschleuniger .....	63
4.1.1	Geschwindigkeit, Impuls und Beschleunigung bei relativistischen Energien .....	63
4.1.2	Physikalische Grundlagen der Beschleuniger .....	65
4.1.3	Elektrostatische Beschleuniger .....	67
4.1.4	Hochfrequenz-Beschleuniger .....	69
4.1.5	Beschleunigung durch Laser .....	71
4.1.6	Kreisbeschleuniger .....	71
*4.1.7	Stabilisierung der Teilchenbahnen in Beschleunigern .....	75
4.1.8	Speicherringe .....	80
4.1.9	Die großen Maschinen .....	85
4.2	Wechselwirkung von Teilchen und Strahlung mit Materie .....	87
4.2.1	Geladene schwere Teilchen .....	88
4.2.2	Energieverlust von Elektronen .....	91
4.2.3	Wechselwirkung von Gammastrahlung mit Materie .....	92
4.2.4	Wechselwirkung von Neutronen mit Materie .....	95
4.3	Detektoren .....	96
4.3.1	Ionisationskammer, Proportionalzählrohr, Geigerzähler ..	97
4.3.2	Szintillationszähler .....	100
4.3.3	Halbleiterzähler .....	102
4.3.4	Spurendetektoren .....	103
4.3.5	Čerenkov-Zähler .....	107
4.3.6	Detektoren in der Hochenergiephysik .....	108
4.4	Streuexperimente .....	110
4.4.1	Grundlagen der relativistischen Kinematik .....	111
4.4.2	Elastische Streuung .....	113
4.4.3	Was lernt man aus Streuexperimenten? .....	116
4.5	Kernspektroskopie .....	116
4.5.1	Gamma-Spektroskopie .....	116
4.5.2	Beta-Spektrometer .....	119
	Zusammenfassung .....	119
	Übungsaufgaben .....	120

#### 5. Kernkräfte und Kernmodelle

5.1	Das Deuteron .....	123
-----	--------------------	-----

5.2	Nukleon-Nukleon-Streuung .....	127
5.2.1	Grundlagen .....	127
5.2.2	Spinabhängigkeit der Kernkräfte .....	128
5.2.3	Ladungsunabhängigkeit der Kernkräfte .....	131
*5.3	Isospin-Formalismus .....	131
5.4	Meson-Austauschmodell der Kernkräfte .....	133
5.5	Kernmodelle .....	135
5.5.1	Nukleonen als Fermigas .....	136
5.5.2	Schalenmodell .....	139
5.6	Rotation und Schwingung von Kernen .....	146
5.6.1	Deformierte Kerne .....	146
5.6.2	Kernrotationen .....	148
5.6.3	Kernschwingungen .....	150
5.7	Experimenteller Nachweis angeregter Rotations- und Schwingungszustände .....	151
	Zusammenfassung .....	153
	Übungsaufgaben .....	154

## 6. Kernreaktionen

6.1	Grundlagen .....	155
6.1.1	Die inelastische Streuung mit Kernanregung .....	155
6.1.2	Die reaktive Streuung .....	156
6.1.3	Die stoßinduzierte Kernspaltung .....	156
6.1.4	Energieschwelle .....	156
6.1.5	Reaktionsquerschnitt .....	158
6.2	Erhaltungssätze .....	159
6.2.1	Erhaltung der Nukleonenzahl .....	159
6.2.2	Erhaltung der elektrischen Ladung .....	159
6.2.3	Drehimpuls-Erhaltung .....	159
6.2.4	Erhaltung der Parität .....	160
6.3	Spezielle stoßinduzierte Kernreaktionen .....	160
6.3.1	Die ( $\alpha$ , p)-Reaktion .....	160
6.3.2	Die ( $\alpha$ , n)-Reaktion .....	161
6.4	Stoßinduzierte Radioaktivität .....	162
6.5	Kernspaltung .....	164
6.5.1	Spontane Kernspaltung .....	164
6.5.2	Stoßinduzierte Spaltung leichter Kerne .....	165
6.5.3	Induzierte Spaltung schwerer Kerne .....	166
6.5.4	Energiebilanz bei der Kernspaltung .....	168
6.6	Kernfusion .....	169
*6.7	Die Erzeugung von Transuranen .....	170
	Zusammenfassung .....	174
	Übungsaufgaben .....	175

## 7. Physik der Elementarteilchen

7.1	Die Entdeckung der Myonen und Pionen .....	177
7.2	Der Zoo der Elementarteilchen .....	178

7.2.1	Lebensdauer des Pions .....	179
7.2.2	Spin des Pions .....	180
7.2.3	Parität des $\pi$ -Mesons .....	181
7.2.4	Entdeckung weiterer Teilchen .....	182
7.2.5	Klassifikation der Teilchen .....	184
7.2.6	Quantenzahlen und Erhaltungssätze .....	185
7.3	Leptonen .....	186
7.4	Das Quarkmodell .....	188
7.4.1	Der achtfache Weg .....	188
7.4.2	Quarkmodell der Mesonen .....	189
7.4.3	Charm-Quark und Charmonium .....	190
7.4.4	Quarkaufbau der Baryonen .....	193
7.4.5	Farbladungen .....	195
7.4.6	Experimentelle Hinweise auf die Existenz von Quarks ...	195
7.4.7	Quarkfamilien .....	197
*7.4.8	Valenzquarks und Seequarks .....	198
7.5	Quantenchromodynamik .....	198
7.5.1	Gluonen .....	199
7.5.2	Quarkmodell der Hadronen .....	200
7.6	Starke und schwache Wechselwirkungen .....	202
7.6.1	W- und Z-Bosonen als Austauschteilchen der schwachen Wechselwirkung .....	203
7.6.2	Reelle W- und Z-Bosonen .....	205
7.6.3	Paritätsverletzung bei der schwachen Wechselwirkung ...	206
7.6.4	Die CPT-Symmetrie .....	209
7.6.5	Erhaltungssätze und Symmetrien .....	211
7.7	Das Standardmodell der Teilchenphysik .....	212
*7.8	Neue, bisher experimentell nicht bestätigte Theorien .....	213
	Zusammenfassung .....	214
	Übungsaufgaben .....	215

## 8. Anwendungen der Kern- und Hochenergiephysik

8.1	Radionuklid-Anwendungen .....	217
8.1.1	Strahlendosis, Messgrößen und Messverfahren .....	217
8.1.2	Technische Anwendungen .....	220
8.1.3	Anwendungen in der Biologie .....	221
8.1.4	Anwendungen von Radionukliden in der Medizin .....	221
8.1.5	Nachweis geringer Atomkonzentrationen durch Radioaktivierung .....	223
8.1.6	Altersbestimmung mit radiometrischer Datierung .....	223
8.1.7	Hydrologische Anwendungen .....	226
8.2	Anwendungen von Beschleunigern .....	226
8.3	Kernreaktoren .....	227
8.3.1	Kettenreaktionen .....	227
8.3.2	Aufbau eines Kernreaktors .....	230
8.3.3	Steuerung und Betrieb eines Kernreaktors .....	231
8.3.4	Reaktortypen .....	233

8.3.5	Sicherheit von Kernreaktoren .....	237
8.3.6	Radioaktiver Abfall und Entsorgungskonzepte .....	239
8.3.7	Neue Konzepte .....	239
8.3.8	Vor- und Nachteile der Kernspaltungsenergie .....	241
8.4	Kontrollierte Kernfusion .....	241
8.4.1	Allgemeine Anforderungen .....	242
8.4.2	Magnetischer Einschluss .....	243
8.4.3	Plasmaheizung .....	246
8.4.4	Laserinduzierte Kernfusion .....	246
	Zusammenfassung .....	248
	Übungsaufgaben .....	249

## 9. Grundlagen der experimentellen Astronomie und Astrophysik

9.1	Einleitung .....	251
9.2	Messdaten von Himmelskörpern .....	253
9.3	Astronomische Koordinatensysteme .....	254
9.3.1	Das Horizontsystem .....	254
9.3.2	Die Äquatorsysteme .....	255
9.3.3	Das Ekliptikalsystem .....	256
9.3.4	Das galaktische Koordinatensystem .....	256
9.3.5	Zeitliche Veränderungen der Koordinaten .....	257
9.3.6	Zeitmessung .....	258
9.4	Beobachtung von Sternen .....	259
9.5	Teleskope .....	261
9.5.1	Lichtstärke von Teleskopen .....	261
9.5.2	Vergrößerung .....	262
9.5.3	Teleskopanordnungen .....	262
9.5.4	Nachführung .....	264
9.5.5	Radioteleskope .....	265
9.5.6	Stern-Interferometrie .....	267
9.5.7	Röntgenteleskope .....	268
9.5.8	Gravitationswellen-Detektoren .....	269
9.6	Parallaxe, Aberration und Refraktion .....	270
9.7	Entfernungsmessungen .....	272
9.7.1	Geometrische Verfahren .....	272
9.7.2	Andere Verfahren der Entfernungsmessung .....	276
9.8	Scheinbare und absolute Helligkeiten .....	276
9.9	Messung der spektralen Energieverteilung .....	278
	Zusammenfassung .....	278
	Übungsaufgaben .....	280

## 10. Unser Sonnensystem

10.1	Allgemeine Beobachtungen und Gesetze der Planetenbewegungen	283
10.1.1	Planetenbahnen; Erstes Kepler'sches Gesetz .....	283
10.1.2	Zweites und drittes Kepler'sches Gesetz .....	283
*10.1.3	Die Bahnelemente der Planeten .....	286
10.1.4	Die Umlaufzeiten der Planeten .....	288

10.1.5	Größe, Masse und mittlere Dichte der Planeten .....	290
10.1.6	Energiehaushalt der Planeten .....	291
10.2	Die inneren Planeten und ihre Monde .....	293
10.2.1	Merkur .....	293
10.2.2	Venus .....	294
10.2.3	Die Erde .....	295
10.2.4	Der Erdmond .....	298
10.2.5	Mars .....	300
10.3	Die äußeren Planeten .....	302
10.3.1	Jupiter und seine Monde .....	303
10.3.2	Saturn .....	306
10.3.3	Die äußersten Planeten .....	308
10.4	Kleine Körper im Sonnensystem .....	309
10.4.1	Zwergplaneten .....	309
10.4.2	Die Planetoiden .....	311
10.4.3	Kometen .....	314
10.4.4	Meteore und Meteorite .....	316
10.5	Die Sonne als stationärer Stern .....	318
10.5.1	Masse, Größe, Dichte und Leuchtkraft der Sonne .....	318
10.5.2	Mittelwerte für Temperatur und Druck im Inneren der Sonne .....	319
10.5.3	Radialer Verlauf von Druck, Dichte und Temperatur .....	321
10.5.4	Energieerzeugung im Inneren der Sonne .....	323
10.5.5	Das Sonnen-Neutrino-Problem .....	325
10.5.6	Der Energietransport in der Sonne .....	327
10.5.7	Die Photosphäre .....	328
10.5.8	Chromosphäre und Korona .....	332
10.6	Die aktive Sonne .....	334
10.6.1	Sonnenflecken .....	334
10.6.2	Das Magnetfeld der Sonne .....	337
10.6.3	Fackeln, Flares und Protuberanzen .....	338
10.6.4	Die pulsierende Sonne, Helioseismologie .....	339
	Zusammenfassung .....	342
	Übungsaufgaben .....	343

## 11. Geburt, Leben und Tod von Sternen

11.1	Die sonnennächsten Sterne .....	345
11.1.1	Direkte Messung von Sternradien .....	346
11.1.2	Doppelsternsysteme und die Bestimmung von Sternmassen und Sternradien ...	349
11.1.3	Spektraltypen der Sterne .....	352
11.1.4	Hertzsprung-Russel-Diagramm .....	353
11.2	Die Geburt von Sternen .....	355
11.2.1	Das Jeans-Kriterium .....	355
11.2.2	Die Bildung von Protosternen .....	357
11.2.3	Der Einfluss der Rotation auf kollabierende Gaswolken ..	359
11.2.4	Der Weg des Sterns im Hertzsprung-Russel-Diagramm ...	359

11.3	Der stabile Lebensabschnitt von Sternen (Hauptreihenstadium) . . .	360
11.3.1	Der Einfluss der Sternmasse auf Leuchtkraft und Lebensdauer . . . . .	361
11.3.2	Die Energieerzeugung in Sternen der Hauptreihe . . . . .	361
11.4	Die Nach-Hauptreihen-Entwicklung . . . . .	363
11.4.1	Sterne geringer Masse . . . . .	364
11.4.2	Die Entwicklung von Sternen mit mittleren Massen . . . . .	364
11.4.3	Die Entwicklung massereicher Sterne und die Synthese schwerer Elemente . . . . .	366
11.5	Entartete Sternmaterie . . . . .	368
*11.5.1	Zustandsgleichung entarteter Materie . . . . .	368
11.5.2	Weißer Zwerge . . . . .	370
11.5.3	Neutronensterne . . . . .	372
11.5.4	Pulsare als rotierende Neutronensterne . . . . .	375
11.6	Schwarze Löcher . . . . .	378
11.6.1	Der Kollaps zu einem Schwarzen Loch . . . . .	378
11.6.2	Schwarzschild-Radius . . . . .	379
11.6.3	Lichtablenkung im Gravitationsfeld . . . . .	381
11.6.4	Zeitlicher Verlauf des Kollapses eines Schwarzen Loches . . . . .	382
11.6.5	Die Suche nach Schwarzen Löchern . . . . .	383
11.7	Beobachtbare Phänomene während des Endstadiums von Sternen . . . . .	383
11.7.1	Pulsationsveränderliche . . . . .	383
11.7.2	Novae . . . . .	386
11.7.3	Sterne stehlen Masse . . . . .	387
11.7.4	Supernovae . . . . .	388
11.7.5	Planetarische Nebel und Supernova-Überreste . . . . .	391
11.8	Zusammenfassende Darstellung der Sternentwicklung . . . . .	392
11.9	Zum Nachdenken . . . . .	394
	Zusammenfassung . . . . .	395
	Übungsaufgaben . . . . .	396

## 12. Die Entwicklung und heutige Struktur des Universums

12.1	Experimentelle Hinweise auf ein endliches expandierendes Universum . . . . .	398
12.1.1	Das Olber'sche Paradoxon . . . . .	399
12.1.2	Homogenität des Weltalls . . . . .	400
12.2	Die Metrik des gekrümmten Raumes . . . . .	400
12.3	Das Standardmodell . . . . .	402
12.3.1	Strahlungsdominiertes und massedominiertes Universum . . . . .	403
12.3.2	Hubble-Parameter und kritische Dichte . . . . .	404
12.3.3	Die frühe Phase des Universums . . . . .	406
12.3.4	Die Synthese der leichten Elemente . . . . .	410
12.3.5	Übergang vom Strahlungs- zum Masse-dominierten Universum . . . . .	411
12.3.6	Die Bildung von Kugelsternhaufen und Galaxien . . . . .	411
12.3.7	Das Alter des Universums . . . . .	411
12.3.8	Friedmann-Gleichungen . . . . .	412

12.3.9	Die Rotverschiebung .....	414
12.3.10	Das Horizontproblem und das Modell des Inflationären Universums .....	417
12.4	Bildung und Struktur von Galaxien .....	420
12.4.1	Galaxien-Typen .....	421
12.4.2	Aktive Galaxien .....	424
12.4.3	Galaxienhaufen und Superhaufen .....	425
12.4.4	Kollidierende Galaxien .....	426
12.5	Die Struktur unseres Milchstraßensystems .....	427
12.5.1	Stellarstatistik und Sternpopulationen .....	427
12.5.2	Die Bewegungen der sonnennahen Sterne .....	430
12.5.3	Die differentielle Rotation der Milchstraßenscheibe .....	431
12.5.4	Die Spiralarme .....	434
12.5.5	Kugelsternhaufen .....	436
12.5.6	Offene Sternhaufen .....	437
12.5.7	Das Zentrum unserer Milchstraße .....	439
12.5.8	Schwarzes Loch im Zentrum unserer Milchstraße .....	439
12.5.9	Dynamik unserer Milchstraße .....	441
12.5.10	Der Raum zwischen den Sternen, Interstellare Materie ...	441
12.5.11	Das Problem der Messung kosmischer Entfernungen .....	445
12.6	Das dunkle Universum .....	446
12.6.1	Dunkle Materie .....	447
12.6.2	Dunkle Energie .....	447
12.7	Die Entstehung der Elemente .....	449
12.8	Die Entstehung unseres Sonnensystems .....	451
12.8.1	Kollaps der rotierenden Gaswolke .....	451
12.8.2	Die Bildung der Planetesimale .....	453
12.8.3	Die Trennung von Gasen und festen Stoffen .....	454
12.8.4	Das Alter des Sonnensystems .....	455
12.9	Die Entstehung der Erde .....	458
12.9.1	Die Separation von Erdkern und Erdmantel .....	458
12.9.2	Die Erdkruste .....	459
12.9.3	Vulkanismus .....	460
12.9.4	Bildung der Ozeane .....	460
12.9.5	Die Bildung der Erdatmosphäre .....	461
	Zusammenfassung .....	463
	Übungsaufgaben .....	464
	<b>Zeittafel zur Kern- und Hochenergiephysik .....</b>	<b>465</b>
	<b>Zeittafel zur Astronomie .....</b>	<b>467</b>
	<b>Lösungen der Übungsaufgaben .....</b>	<b>471</b>
	<b>Farbtafeln .....</b>	<b>519</b>
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>529</b>
	<b>Sach- und Namensverzeichnis .....</b>	<b>537</b>