

Wolfgang Demtröder

# Experimentalphysik 4

Kern-, Teilchen- und Astrophysik

Zweite, überarbeitete Auflage

Mit 543, meist zweifarbigen Abbildungen,  
15 Farbtafeln, 62 Tabellen,  
zahlreichen durchgerechneten Beispielen  
und 104 Übungsaufgaben  
mit ausführlichen Lösungen

 Springer

# 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 .....	14
2.3.2	Ladungsverteilung im Kern .....	15
2.4	Aufbau der Kerne aus Nukleonen; Isotope und Isobare .....	18
2.5	Kernrehimpulse, magnetische und elektrische Momente .....	20
2.5.1	Magnetische Kernmomente .....	20
2.5.2	Elektrisches Quadrupolmoment .....	23
2.6	Bindungsenergie der Kerne .....	26
2.6.1	Experimentelle Ergebnisse .....	26
2.6.2	Nukleonenkonfiguration und Pauli-Prinzip .....	27
2.6.3	Tröpfchenmodell und Bethe-Weizsäcker-Formel .....	29
	Zusammenfassung .....	32
	Übungsaufgaben .....	33

## 3. Instabile Kerne, Radioaktivität

3.1	Stabilitätskriterien; Stabile und instabile Kerne .....	36
3.2	Instabile Kerne und Radioaktivität .....	38
3.2.1	Zerfallsgesetze .....	39
3.2.2	Natürliche Radioaktivität .....	41
3.2.3	Zerfallsketten .....	43
3.3	Alphazerfall .....	43
3.4	Betazerfall .....	46
3.4.1	Experimentelle Befunde .....	47
3.4.2	Neutrino-Hypothese .....	48
3.4.3	Modell des Betazerfalls .....	49
3.4.4	Experimentelle Methoden zur Untersuchung des $\beta$ -Zerfalls	51

	3.4.5	Elektroneneinfang .....	51
	3.4.6	Energiebilanzen und Zerfallstypen .....	52
✗	3.5	Gammastrahlung .....	53
	3.5.1	Beobachtungen .....	53
✗	3.5.2	Multipol-Übergänge und Übergangswahrscheinlichkeiten .....	54
	3.5.3	Konversionsprozesse .....	56
	3.5.4	Kernisomere .....	56
		Zusammenfassung .....	57
		Übungsaufgaben .....	58

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

	4.1	Teilchenbeschleuniger .....	61
	4.1.1	Geschwindigkeit, Impuls und Beschleunigung bei relativistischen Energien .....	61
	4.1.2	Physikalische Grundlagen der Beschleuniger .....	62
	4.1.3	Elektrostatische Beschleuniger .....	64
	4.1.4	Hochfrequenz-Beschleuniger .....	66
	4.1.5	Kreisbeschleuniger .....	67
	4.1.6	Stabilisierung der Teilchenbahnen in Beschleunigern .....	71
	4.1.7	Speicherringe .....	76
	4.1.8	Die großen Maschinen .....	80
	4.2	Wechselwirkung von Teilchen und Strahlung mit Materie .....	82
	4.2.1	Geladene schwere Teilchen .....	82
	4.2.2	Energieverlust von Elektronen .....	85
✗	4.2.3	Wechselwirkung von Gammastrahlung mit Materie .....	87
	4.2.4	Wechselwirkung von Neutronen mit Materie .....	89
	4.3	Detektoren .....	90
	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 .....	102
	4.4	Streuexperimente .....	104
	4.4.1	Grundlagen der relativistischen Kinematik .....	105
	4.4.2	Elastische Streuung .....	106
	4.4.3	Was lernt man aus Streuexperimenten? .....	109
	4.5	Kernspektroskopie .....	110
	4.5.1	Gamma-Spektroskopie .....	110
	4.5.2	Beta-Spektrometer .....	113
		Zusammenfassung .....	113
		Übungsaufgaben .....	114

#### 5. Kernkräfte und Kernmodelle

	5.1	Das Deuteron .....	117
	5.2	Nukleon-Nukleon-Streuung .....	121

5.2.1	Grundlagen	121
5.2.2	Spinabhängigkeit der Kernkräfte	122
5.2.3	Ladungsunabhängigkeit der Kernkräfte	125
5.3	Isospin-Formalismus	125
5.4	Meson-Austauschmodell der Kernkräfte	127
5.5	Kernmodelle	129
5.5.1	Nukleonen als Fermigas	130
5.5.2	Schalenmodell	133
5.6	Rotation und Schwingung von Kernen	140
5.6.1	Deformierte Kerne	140
5.6.2	Kernrotationen	142
5.6.3	Kernschwingungen	144
5.7	Experimenteller Nachweis angeregter Rotations- und Schwingungszustände	145
	Zusammenfassung	147
	Übungsaufgaben	148
<b>6. Kernreaktionen</b>		
6.1	Grundlagen	149
6.1.1	Die inelastische Streuung mit Kernanregung	149
6.1.2	Die reaktive Streuung	150
6.1.3	Die stoßinduzierte Kernspaltung	150
6.1.4	Energieschwelle	150
6.1.5	Reaktionsquerschnitt	152
6.2	Erhaltungssätze	153
6.2.1	Erhaltung der Nukleonenzahl	153
6.2.2	Erhaltung der elektrischen Ladung	153
6.2.3	Drehimpuls-Erhaltung	153
6.2.4	Erhaltung der Parität	154
6.3	Spezielle stoßinduzierte Kernreaktionen	154
6.3.1	Die $(\alpha, p)$ -Reaktion	154
6.3.2	Die $(\alpha, n)$ -Reaktion	155
6.4	Stoßinduzierte Radioaktivität	156
6.5	Kernspaltung	158
6.5.1	Spontane Kernspaltung	158
6.5.2	Stoßinduzierte Spaltung leichter Kerne	159
6.5.3	Induzierte Spaltung schwerer Kerne	160
6.5.4	Energiebilanz bei der Kernspaltung	162
6.6	Kernfusion	163
6.7	Die Erzeugung von Transuranen	164
	Zusammenfassung	167
	Übungsaufgaben	168
<b>7. Physik der Elementarteilchen</b>		
7.1	Die Entdeckung der Myonen und Pionen	169
7.2	Der Zoo der Elementarteilchen	170
7.2.1	Lebensdauer des Pions	171

7.2.2	Spin des Pions .....	172
7.2.3	Parität des $\pi$ -Mesons .....	173
7.2.4	Entdeckung weiterer Teilchen .....	174
7.2.5	Klassifikation der Teilchen .....	176
7.2.6	Quantenzahlen und Erhaltungssätze .....	176
7.3	Leptonen .....	177
7.4	Das Quarkmodell .....	179
7.4.1	Der achtfache Weg .....	180
7.4.2	Quarkmodell der Mesonen .....	181
7.4.3	Charm-Quark und Charmonium .....	182
7.4.4	Quarkaufbau der Baryonen .....	184
7.4.5	Farbladungen .....	186
7.4.6	Experimentelle Hinweise auf die Existenz von Quarks ...	187
7.4.7	Quarkfamilien .....	189
7.5	Quantenchromodynamik .....	190
7.5.1	Gluonen .....	190
7.5.2	Quarkmodell der Hadronen .....	191
7.6	Starke und schwache Wechselwirkungen .....	193
7.6.1	W- und Z-Bosonen als Austauscheteilchen der schwachen Wechselwirkung .....	194
7.6.2	Reelle W- und Z-Bosonen .....	196
7.6.3	Paritätsverletzung bei der schwachen Wechselwirkung ...	198
7.6.4	Die CPT-Symmetrie .....	200
7.6.5	Erhaltungssätze und Symmetrien .....	202
7.7	Das Standardmodell der Teilchenphysik .....	203
7.8	Neue, bisher experimentell nicht bestätigte Theorien .....	204
	Zusammenfassung .....	205
	Übungsaufgaben .....	206

## 8. Anwendungen der Kern- und Hochenergiephysik

8.1	Radionuklid-Anwendungen .....	207
8.1.1	Strahlendosis, Messgrößen und Messverfahren .....	207
8.1.2	Technische Anwendungen .....	210
8.1.3	Anwendungen in der Biologie .....	211
8.1.4	Anwendungen von Radionukliden in der Medizin .....	211
8.1.5	Nachweis geringer Atomkonzentrationen durch Radioaktivierung .....	213
8.1.6	Altersbestimmung mit radiometrischer Datierung .....	213
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 .....	229

8.3.7	Neue Konzepte .....	229
8.3.8	Vor- und Nachteile der Kernspaltungsenergie .....	231
8.4	Kontrollierte Kernfusion .....	231
8.4.1	Allgemeine Anforderungen .....	232
8.4.2	Magnetischer Einschluss .....	233
8.4.3	Plasmaheizung .....	236
8.4.4	Laserinduzierte Kernfusion .....	236
	Zusammenfassung .....	238
	Übungsaufgaben .....	239
<b>9. Grundlagen der experimentellen Astronomie und Astrophysik</b>		
9.1	Einleitung .....	241
9.2	Messdaten von Himmelskörpern .....	243
9.3	Astronomische Koordinatensysteme .....	244
9.3.1	Das Horizontsystem .....	244
9.3.2	Die Äquatorsysteme .....	245
9.3.3	Das Ekliptikalsystem .....	246
9.3.4	Das galaktische Koordinatensystem .....	246
9.3.5	Zeitliche Veränderungen der Koordinaten .....	247
9.3.6	Zeitmessung .....	247
9.4	Beobachtung von Sternen .....	248
9.5	Teleskope .....	250
9.5.1	Lichtstärke von Teleskopen .....	250
9.5.2	Vergrößerung .....	251
9.5.3	Teleskopanordnungen .....	251
9.5.4	Nachführung .....	253
9.5.5	Radioteleskope .....	254
9.5.6	Stern-Interferometrie .....	256
9.5.7	Röntgenteleskope .....	256
9.5.8	Gravitationswellen-Detektoren .....	257
9.6	Parallaxe, Aberration und Refraktion .....	258
9.7	Entfernungsmessungen .....	260
9.7.1	Geometrische Verfahren .....	261
9.7.2	Andere Verfahren der Entfernungsmessung .....	264
9.8	Scheinbare und absolute Helligkeiten .....	264
9.9	Messung der spektralen Energieverteilung .....	266
	Zusammenfassung .....	266
	Übungsaufgaben .....	268
<b>10. Unser Sonnensystem</b>		
10.1	Allgemeine Beobachtungen und Gesetze der Planetenbewegungen	269
10.1.1	Planetenbahnen; Erstes Kepler'sches Gesetz .....	269
10.1.2	Zweites und drittes Kepler'sches Gesetz .....	271
10.1.3	Die Bahnelemente der Planeten .....	272
10.1.4	Die Umlaufzeiten der Planeten .....	275
10.1.5	Größe, Masse und mittlere Dichte der Planeten .....	276
10.1.6	Energiehaushalt der Planeten .....	278

10.2	Die inneren Planeten und ihre Monde .....	279
10.2.1	Merkur .....	280
10.2.2	Venus .....	280
10.2.3	Die Erde .....	281
10.2.4	Der Erdmond .....	284
10.2.5	Mars .....	286
10.3	Die äußeren Planeten .....	289
10.3.1	Jupiter und seine Monde .....	289
10.3.2	Saturn .....	292
10.3.3	Die äußersten Planeten .....	294
10.4	Kleine Körper im Sonnensystem .....	296
10.4.1	Die Planetoiden .....	296
10.4.2	Kometen .....	298
10.4.3	Meteore und Meteorite .....	300
10.5	Die Sonne als stationärer Stern .....	302
10.5.1	Masse, Größe, Dichte und Leuchtkraft der Sonne .....	302
10.5.2	Mittelwerte für Temperatur und Druck im Inneren der Sonne .....	303
10.5.3	Radialer Verlauf von Druck, Dichte und Temperatur .....	305
10.5.4	Energieerzeugung im Inneren der Sonne .....	306
10.5.5	Der Energietransport in der Sonne .....	311
10.5.6	Die Photosphäre .....	312
10.5.7	Chromosphäre und Korona .....	315
10.6	Die aktive Sonne .....	317
10.6.1	Sonnenflecken .....	317
10.6.2	Das Magnetfeld der Sonne .....	319
10.6.3	Fackeln, Flares und Protuberanzen .....	320
10.6.4	Die pulsierende Sonne .....	321
	Zusammenfassung .....	323
	Übungsaufgaben .....	324

## 11. Geburt, Leben und Tod von Sternen

11.1	Die sonnennächsten Sterne .....	327
11.1.1	Direkte Messung von Sternradien .....	328
11.1.2	Doppelsternsysteme und die Bestimmung von Sternmassen und Sternradien ...	331
11.1.3	Spektraltypen der Sterne .....	334
11.1.4	Hertzsprung–Russel-Diagramm .....	335
11.2	Die Geburt von Sternen .....	337
11.2.1	Das Jeans-Kriterium .....	337
11.2.2	Die Bildung von Protosternen .....	339
11.2.3	Der Einfluss der Rotation auf kollabierende Gaswolken ..	340
11.2.4	Der Weg des Sterns im Hertzsprung–Russel-Diagramm ..	341
11.3	Der stabile Lebensabschnitt von Sternen (Hauptreihenstadium) ...	342
11.3.1	Der Einfluss der Sternmasse auf Leuchtkraft und Lebensdauer .....	343
11.3.2	Die Energieerzeugung in Sternen der Hauptreihe .....	343

11.4	Die Nach-Hauptreihen-Entwicklung .....	345
11.4.1	Sterne geringer Masse .....	346
11.4.2	Die Entwicklung von Sternen mit mittleren Massen .....	346
11.4.3	Die Entwicklung massereicher Sterne und die Synthese schwerer Elemente .....	348
11.5	Entartete Sternmaterie .....	350
11.5.1	Zustandsgleichung entarteter Materie .....	350
11.5.2	Weiße Zwerge .....	352
11.5.3	Neutronensterne .....	354
11.5.4	Pulsare als rotierende Neutronensterne .....	357
11.6	Schwarze Löcher .....	360
11.6.1	Der Kollaps zu einem Schwarzen Loch .....	360
11.6.2	Schwarzschild-Radius .....	361
11.6.3	Lichtablenkung im Gravitationsfeld .....	362
11.6.4	Zeitlicher Verlauf des Kollapses eines Schwarzen Loches .....	363
11.6.5	Die Suche nach Schwarzen Löchern .....	364
11.7	Beobachtbare Phänomene während des Endstadiums von Sternen .....	364
11.7.1	Pulsationsveränderliche .....	365
11.7.2	Novae .....	367
11.7.3	Sterne stehlen Masse .....	368
11.7.4	Supernovae .....	369
• 11.7.5	Planetarische Nebel und Supernova-Überreste .....	371
11.8	Zusammenfassende Darstellung der Sternentwicklung .....	371
11.9	Zum Nachdenken .....	373
	Zusammenfassung .....	374
	Übungsaufgaben .....	375

## 12. Die Entwicklung und heutige Struktur des Universums

12.1	Experimentelle Hinweise auf ein endliches expandierendes Universum .....	378
12.1.1	Homogenität des Weltalls .....	380
12.2	Die Metrik des gekrümmten Raumes .....	380
12.3	Das Standardmodell .....	382
12.3.1	Strahlungsdominiertes und massedominiertes Universum .....	382
12.3.2	Hubble-Parameter und kritische Dichte .....	383
12.3.3	Die frühe Phase des Universums .....	385
12.3.4	Die Synthese der leichten Elemente .....	387
12.3.5	Die Bildung von Kugelsternhaufen und Galaxien .....	388
12.3.6	Das Alter des Universums .....	389
12.3.7	Friedmann-Gleichungen .....	389
12.3.8	Die Rotverschiebung .....	391
12.4	Bildung und Struktur von Galaxien .....	393
12.4.1	Galaxien-Typen .....	394
12.4.2	Aktive Galaxien .....	397
12.4.3	Galaxienhaufen und Superhaufen .....	398
12.4.4	Kollidierende Galaxien .....	399
12.5	Die Struktur unseres Milchstraßensystems .....	400

12.5.1	Stellarstatistik und Sternpopulationen .....	400
12.5.2	Die Bewegungen der sonnennahen Sterne .....	402
12.5.3	Die differentielle Rotation der Milchstraßenscheibe .....	403
12.5.4	Die Spiralarme .....	406
12.5.5	Kugelsternhaufen .....	408
12.5.6	Offene Sternhaufen .....	409
12.5.7	Das Zentrum unserer Milchstraße .....	411
12.5.8	Dynamik unserer Milchstraße .....	412
12.5.9	Interstellare Materie .....	413
12.5.10	Das Problem der Messung kosmischer Entfernungen .....	416
12.6	Die Entstehung der Elemente .....	418
12.7	Die Entstehung unseres Sonnensystems .....	420
12.7.1	Kollaps der rotierenden Gaswolke .....	420
12.7.2	Die Bildung der Planetesimale .....	422
12.7.3	Die Trennung von Gasen und festen Stoffen .....	424
12.7.4	Das Alter des Sonnensystems .....	424
12.8	Die Entstehung der Erde .....	427
12.8.1	Die Separation von Erdkern und Erdmantel .....	427
12.8.2	Die Erdkruste .....	428
12.8.3	Vulkanismus .....	429
12.8.4	Bildung der Ozeane .....	429
12.8.5	Die Bildung der Erdatmosphäre .....	430
	Zusammenfassung .....	432
	Übungsaufgaben .....	433
	<b>Zeittafel zur Kern- und Hochenergiephysik .....</b>	<b>435</b>
	<b>Zeittafel zur Astronomie .....</b>	<b>437</b>
	<b>Lösungen der Übungsaufgaben .....</b>	<b>441</b>
	<b>Farbtafeln .....</b>	<b>489</b>
	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>497</b>
	<b>Sach- und Namensverzeichnis .....</b>	<b>503</b>