
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	Kerndrehimpulse, 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 β -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

6. Kernreaktionen

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 (α , p)-Reaktion	154
6.3.2	Die (α , 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

7. Physik der Elementarteilchen

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 π -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 Austauschteilchen 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
9.	Grundlagen der experimentellen Astronomie und Astrophysik	
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
10.	Unser Sonnensystem	
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	Weißer 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
	Zeittafel zur Kern- und Hochenergiephysik	435
	Zeittafel zur Astronomie	437
	Lösungen der Übungsaufgaben	441
	Farbtafeln	489
	Literaturverzeichnis	497
	Sach- und Namensverzeichnis	503