

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 β -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	Spuredetektoren	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 (α, p) -Reaktion	160
6.3.2	Die (α, 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 π -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 äußereren 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	Weiße 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 Planetesimalen	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
	Zeittafel zur Kern- und Hochenergiephysik	465
	Zeittafel zur Astronomie	467
	Lösungen der Übungsaufgaben	471
	Farbtafeln	519
	Literaturverzeichnis	529
	Sach- und Namensverzeichnis	537