
Teilchen und Kerne

Subatomare Physik

von
Hans Frauenfelder
und
Ernest M. Henley

3., überarbeitete und erweiterte Auflage

Mit 291 Abbildungen und 39 Tabellen

R. Oldenbourg Verlag München Wien 1995

Inhaltsverzeichnis

Vorwort zur ersten Ausgabe	XII
Vorwort zur zweiten und dritten Ausgabe	XVI
1. Hintergrund und Begriffe	1
1.1 Größenordnungen.....	1
1.2 Einheiten.....	1
1.3 Die Sprache – Feynman Diagramme.....	4
1.4 Literaturhinweise	7
Aufgaben.....	8
Teil I – Werkzeuge	11
2. Beschleuniger	12
2.1 Wozu Beschleuniger?	12
2.2 Der elektrostatische Generator (Van de Graaff).....	15
2.3 Der Linearbeschleuniger.....	17
2.4 Strahloptik	19
2.5 Das Synchrotron.....	22
2.6 Laborsystem und Schwerpunktsystem	28
2.7 Speicherringe	30
2.8 Zukünftige Entwicklungen	33
2.9 Literaturhinweise	37
Aufgaben.....	38
3. Durchgang von Strahlung durch Materie.....	41
3.1 Begriffe.....	41
3.2 Schwere geladene Teilchen	43
3.3 Photonen	46
3.4 Elektronen	48
3.5 Kernwechselwirkungen	51
3.6 Literaturhinweise	51
Aufgaben.....	52
4. Detektoren.....	55
4.1 Der Szintillationszähler	55
4.2 Statistische Betrachtungen.....	58
4.3 Der Halbleiterdetektor	62
4.4 Die Blasenkammer	65
4.5 Die Funkenkammer.....	67
4.6 Drahtfunkenkammer	69
4.7 Zeitprojektionskammern	70
4.8 Zählerelektronik	71

4.9	Elektronik: Logik	73
4.10	Literaturhinweise	75
	Aufgaben	75
Teil II – Teilchen und Kerne		79
5.	Der subatomare Zoo	81
5.1	Masse und Spin. Fermionen und Bosonen.....	81
5.2	Elektrische Ladung und magnetisches Dipolmoment.....	86
5.3	Massenbestimmung.....	90
5.4	Ein erster Blick auf den subatomaren Zoo.....	95
5.5	Eichbosonen	96
5.6	Leptonen	99
5.7	Zerfälle	100
5.8	Mesonen	106
5.9	Baryonen – Grundzustände	109
5.10	Quarks, Gluonen und intermediäre Bosonen.....	112
5.11	Angeregte Zustände und Resonanzen	116
5.12	Angeregte Zustände von Baryonen.....	120
5.13	Literaturhinweise	127
	Aufgaben	128
6.	Die Struktur der subatomaren Teilchen.....	133
6.1	Die elastische Streuung	133
6.2	Wirkungsquerschnitte und Luminosität	134
6.3	Rutherford- und Mott-Streuung	137
6.4	Formfaktoren.....	141
6.5	Die Ladungsverteilung kugelförmiger Kerne.....	144
6.6	Leptonen sind punktförmig	149
6.7	Der elastische Formfaktor der Nukleonen	154
6.8	Die Ladungsradien vom Pion und Kaon.....	162
6.9	Unelastische Elektronenstreuung.....	163
6.10	Tief unelastische Elektronenstreuung	166
6.11	Quark-Parton-Modell für tief unelastische Streuung	170
6.12	Streuung und Struktur	176
6.13	Literaturhinweise	195
	Aufgaben	196
Teil III – Symmetrien und Erhaltungssätze		201
7.	Additive Erhaltungssätze	203
7.1	Erhaltungsgrößen und Symmetrie	203
7.2	Die elektrische Ladung	209
7.3	Die Baryonenzahl	213
7.4	Leptonen- und Myonenzahl.....	215

7.5	Teilchen und Antiteilchen	219
7.6	Hyperladung und Strangeness (Fremdheitsquantenzahl)	226
7.7	Zusätzliche Quantenzahlen von Quarks	229
7.8	Literaturhinweise	231
	Aufgaben	232
8.	Drehimpuls und Isospin	234
8.1	Invarianz bezüglich der räumlichen Drehung	234
8.2	Symmetrieverletzung durch das magnetische Feld	237
8.3	Ladungsunabhängigkeit der starken Wechselwirkung	237
8.4	Der Isospin der Nukleonen	238
8.5	Isospininvarianz	239
8.6	Der Isospin von Elementarteilchen	242
8.7	Der Isospin in Kernen	246
8.8	Literaturhinweise	251
	Aufgaben	251
9.	P, C und T	254
9.1	Die Paritätsoperation	254
9.2	Die Eigenparität der subatomaren Teilchen	258
9.3	Erhaltung und Zusammenbruch der Parität	262
9.4	Die Ladungskonjugation	268
9.5	Die Zeitumkehr	272
9.6	Das Zweizustandsproblem	275
9.7	Die neutralen Kaonen	278
9.8	Der Sturz der <i>CP</i> -Invarianz	285
9.9	Literaturhinweise	288
	Aufgaben	289
Teil IV – Wechselwirkungen		295
10.	Elektromagnetische Wechselwirkung	297
10.1	Die Goldene Regel	297
10.2	Der Phasenraum	303
10.3	Die klassische elektromagnetische Wechselwirkung	306
10.4	Photonenemission	310
10.5	Multipolstrahlung	317
10.6	Elektromagnetische Streuung von Leptonen	321
10.7	Kollidierende Elektron-Positron-Strahlen	325
10.8	Gültigkeit der Quantenelektrodynamik (QED) bei hoher Impuls- übertragung	327
10.9	Die Photon-Hadron-Wechselwirkung: Vektormesonen	331
10.10	Elektron-Positron-Stöße und Quarks	336
10.11	Die Photon-Hadron-Wechselwirkung: reelle und raumartige Photonen	341
10.12	Zusammenfassung und offene Probleme	351

10.13	Literaturhinweise	352
	Aufgaben	354
11.	Die schwache Wechselwirkung	358
11.1	Das kontinuierliche β -Spektrum	358
11.2	Halbwertszeiten beim β -Zerfall	363
11.3	Die Strom-Strom-Wechselwirkung	365
11.4	Ein Überblick über schwache Prozesse	371
11.5	Der Zerfall des Myons.....	376
11.6	Der schwache Strom aus Leptonen	379
11.7	Die schwache Kopplungskonstante G	384
11.8	Seltsame und nichtseltsame schwache Ströme	385
11.9	Schwache Ströme in der Kernphysik	388
11.10	Massive (massebehaftete) Neutrinos.....	393
11.11	Der schwache Strom von Hadronen bei hoher Energie	396
11.12	Literaturhinweise	409
	Aufgaben	410
12.	Einführung in die Eichfeldtheorie	415
12.1	Einführung.....	415
12.2	Potentiale in der Quantenmechanik – der Aharonov-Bohm-Effekt	419
12.3	Eichinvarianz für Nicht-Abelsche Felder.....	421
12.4	Massives (massebehaftetes) Eichboson	427
12.5	Literaturhinweise	434
	Aufgaben	435
13.	Die elektroschwache Theorie	436
13.1	Einleitung.....	436
13.2	Die Eichbosonen und der schwache Isospin.....	437
13.3	Die elektroschwache Wechselwirkung	441
13.4	Tests des Standard-Modells	448
13.5	Literaturhinweise	454
	Aufgaben	455
14.	Hadronische Wechselwirkungen	457
14.1	Reichweite und Stärke von niederenergetischen hadronischen Wechselwirkungen	459
14.2	Die Pion-Nukleon-Wechselwirkung – Überblick.....	463
14.3	Die Form der Pion-Nukleon-Wechselwirkung	468
14.4	Die Yukawa-Theorie der Kernkräfte	471
14.5	Eigenschaften der Nukleon-Nukleon-Kraft	473
14.6	Mesonentheorie der Nukleon-Nukleon-Kraft.....	482
14.7	Hadronische Prozesse bei hohen Energien	485
14.8	Die Farbkraft, Quantenchromodynamik	492
14.9	Literaturhinweise	500
	Aufgaben	502

Teil V – Modelle	507
15. Quarks, Mesonen und Baryonen	509
15.1 Einführung	509
15.2 Quarks als Bausteine der Hadronen.....	509
15.3 Jagd auf Quarks	512
15.4 Mesonen als gebundene Quarkzustände.....	513
15.5 Baryonen als gebundene Quarkzustände	517
15.6 Die Hadronenmassen	519
15.7 QCD (Quantenchromodynamik) und Quarkmodelle der Hadronen ...	522
15.8 Charmonium, Ypsilon: Schwere Mesonen.....	532
15.9 Ausblick und Probleme	535
15.10 Literaturhinweise	536
Aufgaben	538
16. Das Tröpfchen-Modell, Das Fermi-Gas-Modell, Schwere Ionen	542
16.1 Das Tröpfchenmodell	542
16.2 Das Fermi-Gas-Modell.....	547
16.3 Reaktionen schwerer Ionen	550
16.4 Literaturhinweise	556
Aufgaben	558
17. Das Schalenmodell	562
17.1 Die magischen Zahlen	563
17.2 Die abgeschlossenen Schalen	567
17.3 Die Spin-Bahn-Wechselwirkung	572
17.4 Das Einteilchen-Schalen-Modell	575
17.5 Verallgemeinerung des Einteilchen-Modells.....	577
17.6 Isobare Analog-Resonanzen	579
17.7 Literaturhinweise	586
Aufgaben	587
18. Kollektiv-Modell	590
18.1 Kerndeformationen	591
18.2 Rotationsspektren von Kernen ohne Spin.....	595
18.3 Rotationsfamilien.....	599
18.4 Einteilchenbewegung in deformierten Kernen (Nilssonmodell)	603
18.5 Vibrationszustände in sphärischen Kernen.....	608
18.6 Das wechselwirkende Bosonenmodell	612
18.7 Hochangeregte Zustände; Riesenresonanzen	614
18.8 Kernmodelle – Abschließende Bemerkungen.....	618
18.9 Literaturhinweise	622
Aufgaben	624

19. Nukleare Astrophysik	629
19.1 Kosmische Strahlung	629
19.2 Sternenergie	636
19.3 Neutrino-Astronomie	638
19.4 Kernsynthese	642
19.5 Erlöschen von Sternen und Neutronensterne	647
19.6 Der Anfang des Universums	653
19.7 Abschließende Bemerkungen	655
19.8 Literaturhinweise	657
Aufgaben	659
Anhang	661
A1 Die am häufigsten verwendeten Konstanten.....	662
A2 Eine vollständigere Zusammenstellung von Konstanten.....	663
A3 Eigenschaften stabiler Teilchen.....	666
A4 Stabile und instabile Mesonen.....	673
A5 Stabile und instabile Baryonen.....	676
A6 Periodensystem der Elemente.....	679
A7 Kumulierter Index von A-Ketten.....	680
A8 Kugelfunktionen.....	681
Sachregister	683