

Inhaltsverzeichnis

1 Überblick und Hilfsmittel

1.1	Strukturen der Materie	3
1.1.1	Teilchen und Kräfte	3
1.1.2	Abstandsskalen und Energieskalen	6
1.1.3	Intermezzo: Schreibweise und Maßsysteme	14
1.2	Die Elementarteilchen	17
1.2.1	Antimaterie	18
1.2.2	Leptonen	20
1.2.3	Hadronen	26
1.2.4	Quarks	32
1.2.5	Felder und Wechselwirkungen	37
1.2.6	Was ist ein Elementarteilchen?	42
1.3	Wirkungsquerschnitte und Zerfallsraten	43
1.3.1	Der Wirkungsquerschnitt	43
1.3.2	Zerfallsraten	46
1.4	Teilchenbeschleuniger	48
1.4.1	Linearbeschleuniger	48
1.4.2	Das Zyklotron	51
1.4.3	Das Synchrotron	52
	a) Prinzip	52
	b) Fokussierung	55
	c) Magnete	61
1.4.4	Speicherringe	62
1.5	Detektoren	64
1.5.1	Detektoren an <i>collidern</i>	64
	a) Spurenkammern	69
	b) Kalorimeter	70
1.5.2	Blasenkammer	73

2 Die Streumatrix und ihre Symmetrien

2.1	Die Streumatrix	77
2.1.1	Wirkungsquerschnitte und Streuamplitude	78
2.1.2	Zerfallsraten	83
2.1.3	Symmetrien der <i>S</i> -Matrix	85
2.1.4	Anhang über die δ -Funktion	88
2.2	Drehungen in drei Dimensionen	89
2.2.1	Drehungen	89
2.2.2	Die Drehgruppe	91
2.2.3	Darstellungen der Drehgruppe	92
2.2.4	Drehgruppe und halbzahlige Spins	97
2.2.5	Produkte von Darstellungen	99
2.3	Drehungen und Verschiebungen in vier Dimensionen	102
2.3.1	Lorentz-Transformationen	102
2.3.2	Die Poincaré-Gruppe	103
2.3.3	Darstellungen der Poincaré-Gruppe	105
2.4	Anwendungen	107
2.4.1	Kinematik der Zwei-Körper-Reaktionen	107
2.4.2	Zwei-Körper-Zerfälle	109

2.4.3	Partialwellenentwicklung der Streuamplitude	112
2.4.4	Resonanzen in Formationsexperimenten	113
2.4.5	Pion-Resonanzen	120
2.4.6	Der Spin des Photons	121
2.4.7	Der Spin des neutralen Pions	122
2.5	Spiegelungen und Paritätsinvarianz	124
2.5.1	Die Paritätstransformation	124
2.5.2	Die Parität des Photons, des ρ -Mesons und der Pionen	128
2.5.3	Spin und Parität des K -Mesons	130
2.5.4	Paritätsverletzung in der schwachen Wechselwirkung	131
2.6	Die Zeitumkehr	134
2.6.1	Zeitumkehr und das Prinzip des detaillierten Gleichgewichts	134
2.6.2	Invarianz der Wechselwirkungen unter Zeitspiegelungen	136
2.7	Innere Symmetrien I	138
2.7.1	Globale Phasentransformationen	138
2.7.2	Die Teilchen-Antiteilchen-Konjugation	140
2.7.3	Lang- und kurzlebige neutrale K -Mesonen	143
2.7.4	CP -Verletzung im K_L -Zerfall	148
2.8	Innere Symmetrien II, Isospin und SU_2	156
2.8.1	Die Form der SU_2 -Matrizen	156
2.8.2	Darstellungen	158
2.8.3	Antiteilchen in der SU_2	159
2.8.4	Die Isoinvarianz der Kernkraft	161
2.8.5	Isospin und Quarks	162
2.8.6	Reguläre Darstellung und G -Parität	163
2.8.7	Isospin und K -Zerfälle	164
3	Elementare Quantenelektrodynamik	
3.1	Dirac-Gleichung und Feynman-Regeln	169
3.1.1	Die Dirac-Gleichung	169
3.1.2	Lösungen der freien Dirac-Gleichung	173
3.1.3	Feynman-Regeln	183
3.1.4	Die Renormierung und die laufende Kopplung	185
3.2	Basis-Reaktionen der QED	192
3.2.1	e^-e^+ -Vernichtung in $\mu^-\mu^+$ -Paare	192
3.2.2	Die Elektron-Myon-Streuung	196
3.2.3	Bhabha- und Møller-Streuung	201
3.2.4	Anwendungen der Streuformeln	204
	a) Energieverlust geladener Teilchen	204
	b) Der mittlere Winkel der Vielfachstreuung	206
3.2.5	Die Compton-Streuung	208
3.3	Prozesse höherer Ordnung	215
3.3.1	Die Bremsstrahlung	215
	a) Die Weizsäcker-Williams-Methode	216
	b) Der Wirkungsquerschnitt der Bremsstrahlung	218
	c) Energieverlust durch Bremsstrahlung	221
3.3.2	Strahlungskorrekturen zur Mott-Streuung	222
4	Hadronen in der Quantenchromodynamik	
4.1	Quarks mit Farbe	230
4.1.1	Das Statistik-Problem	230
4.1.2	Die Gruppe SU_3	231
4.1.3	Mesonen als $q\bar{q}$ -Zustände	235
4.1.4	Baryonen als qqq -Zustände	236

4.2 Farbdynamik	240
4.2.1 Gluonen und das Potential der QCD	240
4.2.2 Die laufende Kopplungskonstante	246
4.3 Der Aufbau der Hadronen	249
4.3.1 Die Werte von Spin und Parität im Quarkmodell	250
4.3.2 Hadronen aus u - und d -Quarks	252
4.3.3 Die Massen der Quarks	257
4.3.4 Hadronen aus u -, d - und s -Quarks	258
4.4 Die chromodynamische Hyperfeinstruktur	267
4.4.1 Die Aufspaltung für Hadronen aus u - und d -Quarks	267
4.4.2 Hyperfeinstruktur und „seltsame“ Quarks	269
4.5 Elektromagnetische und starke Zerfälle von Hadronen	270
4.5.1 Radiative Zerfälle der Vektormesonen	270
4.5.2 Zerfälle der Vektormesonen in Leptonenpaare	273
4.5.3 Radiative Zerfälle der pseudoskalaren Mesonen	277
4.5.4 Zerfälle in Hadronen	279
4.6 Neue schwere Quarks	282
4.6.1 Das Vektormeson $J/\psi(1S)$	282
4.6.2 Die Υ -Mesonen	285
4.6.3 Quarkonium, $c\bar{c}$ und $b\bar{b}$	286
4.6.4 Hadronen mit <i>charm</i> und <i>bottom</i>	292
5 Elektronen und Quarks	
5.1 Elektron-Positron-Annihilation in Hadronen	297
5.1.1 Der Wirkungsquerschnitt	297
5.1.2 QCD-Korrekturen	300
5.1.3 Der Endzustand	304
5.2 Die elastische Elektron-Nukleon-Streuung	309
5.2.1 Der Wirkungsquerschnitt	310
5.2.2 Experimente zur elastischen Elektronenstreuung	312
5.2.3 Das $e\pi$ -System	314
5.3 Inelastische Elektron-Nukleon-Streuung	316
5.3.1 Der Wirkungsquerschnitt im Quarkmodell	316
5.3.2 Allgemeine Form des Wirkungsquerschnitts	319
5.3.3 Modelle und Ergebnisse für F_2^{eN}	323
5.3.4 QCD-Korrekturen	327
5.3.5 Der Endzustand	334
5.4 Zwei-Photonen-Physik	336
5.4.1 Resonanzzeugung	337
5.4.2 Die Strukturfunktion des Photons	340
6 Von der schwachen zur elektroschwachen Wechselwirkung	
6.1 Schwache Wechselwirkung von Leptonen	347
6.1.1 Quasielastische $\nu_\mu e^-$ -Streuung	347
6.1.2 Der Zerfall des Myons	351
6.2 Schwache Wechselwirkung von Quarks	354
6.2.1 Der Cabibbo-Winkel	354
6.2.2 Der β -Zerfall des Neutrons	356
6.2.3 Der Zerfall $\pi \rightarrow \mu\nu$	360
6.2.4 Zerfälle von K -, D - und B -Mesonen	361
6.2.5 Der Zerfall des top -Quarks	365
6.2.6 Inelastische Neutrino-Nukleon-Streuung	365
6.3 Die elektroschwache Wechselwirkung	370
6.3.1 Die Entdeckung der neutralen Ströme	370

6.3.2	Elektroschwache Wechselwirkung der Leptonen	372
6.3.3	Elektroschwache Wechselwirkung von Quarks	377
7	Das Standard-Modell	
7.1	Die Neutrino-Elektron-Streuung	383
7.2	Die e^-e^+ -Vernichtung in Fermion-Antifermion-Paare	387
7.2.1	Die Bornsche Näherung	387
7.2.2	Strahlungskorrekturen	392
7.3	Die Elektron-Proton-Streuung bei Berücksichtigung des Z^0 -Austausches	394
7.4	Die Erzeugung des W -Bosons in Quark-Antiquark-Stößen	396
7.5	Die Produktion des top -Quarks in Hadron-Hadron-Stößen	399
7.6	Intermezzo: Die Hadron-Hadron-Streuung	401
7.7	Higgs-Bosonen	406
7.8	CP -Verletzung im Standard-Modell	415
7.8.1	Die CKM-Matrix	415
7.8.2	CP -Verletzung und b -Quarks	419
7.9	Neutrinomassen und Neutrino-Oszillationen	423
7.10	Jenseits des Standard-Modells	434
7.10.1	Majorana-Neutrinos	434
7.10.2	Das Parameter-Problem	440
7.10.3	Die große Vereinheitlichung	442
7.10.4	Hierarchie und Feinabstimmung	448
7.10.5	Die supersymmetrische Erweiterung des Standard-Modells	450
	Lösungshinweise zu den Übungsaufgaben	459
	Literatur	473
	Sachverzeichnis	481