

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis

xvi

1	Überblick und Hilfsmittel	1
1.1	Inward Bound	1
1.1.1	Teilchen und Kräfte	1
1.1.2	Der Vierervektor der Energie	5
1.1.3	Abstandsskalen und Energieskalen	7
1.1.4	Kernkraft, Pionen, starke und schwache Wechselwirkung	11
1.1.5	Konventionen im Buch	12
1.1.6	Die Invarianten s und q^2	13
1.2	Die Elementarteilchen	16
1.2.1	Antimaterie	16
1.2.2	Leptonen	19
1.2.3	Hadronen	25
1.2.4	Quarks	31
1.2.5	Felder und Wechselwirkungen	35
1.2.6	Was ist ein Elementarteilchen?	41
1.3	Wirkungsquerschnitte und Zerfallsraten	42
1.3.1	Der Wirkungsquerschnitt	42
1.3.2	Zerfallsraten	46
1.4	Teilchenbeschleuniger	48
1.4.1	Linearbeschleuniger	48
1.4.2	Das Zyklotron	50
1.4.3	Das Synchrotron	51
1.4.4	Speicherringe	61
1.5	Detektoren	63
1.5.1	Detektoren an <i>collidern</i>	63
1.5.2	Spurenkammern	67
1.5.3	Kalorimeter	70
1.5.4	Blasenkammer	73
1.6	Monte-Carlo-Simulation	74
1.6.1	Datenanalyse	74
1.6.2	Zufallszahlen	75
1.6.3	Simulation von Ereignissen	80

2 Die Streumatrix und ihre Symmetrien	85
2.1 Die Streumatrix	85
2.1.1 Definitionen	85
2.1.2 Wirkungsquerschnitte und Streuamplitude	86
2.1.3 Zerfallsraten	91
2.1.4 Symmetrien und Erhaltungssätze	94
2.1.5 Das optische Theorem	97
2.1.6 Anhang über die δ -Funktion	98
2.2 Drehungen in drei Dimensionen	100
2.2.1 Drehungen	100
2.2.2 Die Drehgruppe	101
2.2.3 Darstellungen der Drehgruppe	103
2.2.4 Drehgruppe und halbzahlige Spins	108
2.2.5 Produkte von Darstellungen	110
2.3 Drehungen und Verschiebungen in vier Dimensionen	113
2.3.1 Lorentz-Transformationen	113
2.3.2 Die Poincaré-Gruppe	115
2.3.3 Darstellungen der Poincaré-Gruppe	117
2.4 Anwendungen	120
2.4.1 Kinematik der Zwei-Körper-Reaktionen	120
2.4.2 Zwei-Körper-Zerfälle	122
2.4.3 Partialwellenentwicklung der Streuamplitude	125
2.4.4 Resonanzen in Formationsexperimenten	126
2.4.5 Pion-Resonanzen	134
2.4.6 Der Spin des Photons	134
2.4.7 Der Spin des neutralen Pions	136
2.4.8 Der Zerfall $H \rightarrow \gamma\gamma$ und der Spin des Higgs-Bosons	137
2.5 Spiegelungen und Paritätsinvarianz	138
2.5.1 Die Paritätstransformation	138
2.5.2 Die Parität des Photons, des ρ -Mesons und der Pionen	141
2.5.3 Spin und Parität des K -Mesons	144
2.5.4 Paritätsverletzung in der schwachen Wechselwirkung	145
2.6 Die Zeitumkehr	149
2.6.1 Zeitumkehr und das Prinzip des detaillierten Gleichgewichts	149
2.6.2 Invarianz der Wechselwirkungen unter Zeitspiegelungen	151
2.7 Innere Symmetrien I	153
2.7.1 Globale Phasentransformationen	153
2.7.2 Die Teilchen-Antiteilchen-Konjugation	154
2.7.3 Lang- und kurzlebige neutrale K -Mesonen	158
2.7.4 CP -Verletzung im K_L -Zerfall	164
2.8 Innere Symmetrien II, Isospin und $SU(2)$	172
2.8.1 Die Form der $SU(2)$ -Matrizen	172
2.8.2 Darstellungen	174
2.8.3 Antiteilchen in der $SU(2)$	176
2.8.4 Die Isoinvarianz der Kernkraft	177
2.8.5 Isospin und Quarks	178
2.8.6 Reguläre Darstellung und G -Parität	179
2.8.7 Isospin und K -Zerfälle	181
3 Elementare Quantenelektrodynamik	184
3.1 Dirac-Gleichung und Feynman-Regeln	184
3.1.1 Die Dirac-Gleichung	185
3.1.2 Lösungen der freien Dirac-Gleichung	189
3.1.3 P, T, C -Transformation der Spinoren	199
3.1.4 Feynman-Regeln	201
3.1.5 Die Renormierung und die laufende Kopplung	204

3.2	Basis-Reaktionen der QED	211
3.2.1	e^-e^+ -Vernichtung in $\mu^-\mu^+$ -Paare	211
3.2.2	Die Elektron-Myon-Streuung	215
3.2.3	Bhabha- und Møller-Streuung	220
3.2.4	Anwendungen der Streuformeln	223
3.2.5	Die Photon-Elektron-Streuung	228
3.3	Prozesse höherer Ordnung	235
3.3.1	Die Bremsstrahlung	235
3.3.2	Strahlungskorrekturen zur Mott-Streuung	242
4	Quarks und Gluonen in der Quantenchromodynamik	246
4.1	Quarks mit Farbe	246
4.1.1	Das Statistik-Problem	247
4.1.2	Die Gruppe $SU(3)$	248
4.1.3	Mesonen als $q\bar{q}$ -Zustände	253
4.1.4	Baryonen als qqq -Zustände	254
4.2	Farbdynamik	258
4.2.1	Gluonen und das Potential der QCD	258
4.2.2	Die laufende Kopplungskonstante	263
4.2.3	Basis-Reaktionen der QCD	266
4.3	Der Aufbau der Hadronen	277
4.3.1	Die Werte von Spin und Parität im Quarkmodell	277
4.3.2	Hadronen aus u - und d -Quarks	279
4.3.3	Die Massen der Quarks	284
4.3.4	Hadronen aus u -, d - und s -Quarks	285
4.3.5	Die chromodynamische Hyperfeinstruktur	296
4.4	Elektromagnetische und starke Zerfälle von Hadronen	300
4.4.1	Radiative Zerfälle der Vektormesonen	300
4.4.2	Zerfälle der Vektormesonen in Leptonenpaare	302
4.4.3	Radiative Zerfälle der pseudoskalaren Mesonen	307
4.4.4	Zerfälle in Hadronen	311
4.5	Neue schwere Quarks	314
4.5.1	Das Vektormeson $J/\psi(1S)$	314
4.5.2	Die Υ -Mesonen	317
4.5.3	Quarkonium, $c\bar{c}$ und $b\bar{b}$	318
4.5.4	Hadronen mit <i>charm</i> und <i>bottom</i>	324
4.5.5	Offene Fragen	326
5	Elektronen und Quarks	329
5.1	Elektron-Positron-Annihilation in Hadronen	330
5.1.1	Der Wirkungsquerschnitt	330
5.1.2	QCD-Korrekturen	333
5.1.3	Der Endzustand	337
5.2	Die elastische Elektron-Nukleon-Streuung	344
5.2.1	Der Wirkungsquerschnitt	344
5.2.2	Experimente zur elastischen Elektronenstreuung	346
5.2.3	Das $e\pi$ -System	351
5.3	Inelastische Elektron-Nukleon-Streuung	353
5.3.1	Der Wirkungsquerschnitt im Quarkmodell	353
5.3.2	Allgemeine Form des Wirkungsquerschnitts	356
5.3.3	Modelle und Ergebnisse für F_2^N	360
5.3.4	QCD-Korrekturen	363
5.3.5	Der Endzustand	371
5.4	Zwei-Photonen-Physik	374
5.4.1	Resonanzzeugung	374
5.4.2	Die Strukturfunktion des Photons	377
5.4.3	Die elastische $\gamma\gamma$ -Streuung	382

6	Von der schwachen zur elektroschwachen Wechselwirkung	384
6.1	Schwache Wechselwirkung von Leptonen	384
6.1.1	Quasielastische $\nu_\mu e^-$ -Streuung	385
6.1.2	Der Zerfall des Myons	389
6.2	Schwache Wechselwirkung von Quarks, Teil I	393
6.2.1	Der Cabibbo-Winkel	393
6.2.2	Der β -Zerfall des Neutrons	394
6.2.3	Der Zerfall $\pi \rightarrow \mu \nu$	398
6.2.4	Zerfälle von K -, D - und B -Mesonen	402
6.2.5	Der Zerfall des top -Quarks und des W -Bosons	405
6.2.6	Inelastische Neutrino-Nukleon-Streuung	406
6.3	Schwache Wechselwirkung von Quarks, Teil II	413
6.3.1	Die CKM-Matrix	413
6.3.2	<i>Flavor</i> -Oszillationen	417
6.3.3	CP -Verletzung	421
6.4	Die elektroschwache Wechselwirkung	428
6.4.1	Die Entdeckung der neutralen Ströme	428
6.4.2	Elektroschwache Wechselwirkung der Leptonen	429
6.4.3	Elektroschwache Wechselwirkung von Quarks	435
6.5	Tests der elektroschwachen Wechselwirkung	438
6.5.1	Die Neutrino-Elektron-Streuung	438
6.5.2	Die e^-e^+ -Vernichtung in Fermion-Antifermion-Paare	440
6.5.3	Die Elektron-Nukleon-Streuung bei Berücksichtigung des Z- und W-Austausches	449
7	Das Standardmodell als Eichtheorie	452
7.1	Ein skalares Teilchen wird benötigt	452
7.2	Eichtheorien	458
7.2.1	Der Lagrange-Formalismus	458
7.2.2	Eichsymmetrie	461
7.2.3	Feynman-Regeln und Lagrange-Dichte	465
7.2.4	Renormierbarkeit	467
7.3	Higgs-Mechanismus	471
7.3.1	Massenterme	471
7.3.2	Higgs-Mechanismus mit einem komplexen Feld	472
7.3.3	Der Higgs-Mechanismus im $SU(2)_L \times U(1)_Y$ Modell	475
7.3.4	Eigenschaften des Higgs-Bosons	497
8	Hadron-Hadron-Wechselwirkungen	503
8.1	Berechnung perturbativer Wirkungsquerschnitte	503
8.1.1	Kinematik	504
8.1.2	Partondichten	507
8.1.3	Wirkungsquerschnitte	509
8.1.4	Partonluminosität	514
8.1.5	Monte-Carlo-Simulation von Ereignissen	520
8.2	Weiche und harte QCD-Prozesse	523
8.2.1	Der totale hadronische Wirkungsquerschnitt	523
8.2.2	Inklusive Querschnitte	528
8.2.3	Pileup	532
8.2.4	Jet-Produktion	535
8.3	Eichbosonen und top -Quark	539
8.3.1	Drell-Yan-Prozess	539
8.3.2	Masse des W -Bosons	546
8.3.3	top -Quark	548
8.4	Higgs-Boson	554
8.4.1	Frühe Suchen	554
8.4.2	Entdeckung des Higgs-Bosons	556

8.4.3	Potential des Higgs-Felds	562
9	Neutrinomassen und Neutrino-Oszillationen	564
9.1	Neutrino-Oszillationen	564
9.1.1	Oszillationen im Vakuum	565
9.1.2	Oszillationen in Materie	576
9.2	Experimente zu Neutrino-Oszillationen	586
9.2.1	Atmosphärische Neutrinos	586
9.2.2	Solare Neutrinos	589
9.2.3	Reaktorneutrinos	593
9.2.4	Beschleunigerneutrinos	594
9.3	Erweiterung des Standardmodells mit Neutrinomassen	596
9.3.1	Dirac-Masse	597
9.3.2	Majorana-Masse	599
9.3.3	Erweiterung des Standardmodells	604
10	Jenseits des Standardmodells	609
10.1	Offene Fragen	609
10.1.1	Gravitation und Kosmologie	610
10.1.2	Freie Parameter	613
10.1.3	Hierarchie und Feinabstimmung	615
10.2	Die große Vereinigung	618
10.3	Die supersymmetrische Erweiterung	624
10.4	Ausblick	636
A	Anhang	638
A.1	Maßsysteme und Konstanten	638
A.2	Feynman-Regeln	642
A.3	Python	653
	Literatur	654
	Sachverzeichnis	668