

Christoph Berger

Teilchenphysik

Eine Einführung

Mit 156 Abbildungen
und 38 Tabellen

Springer-Verlag

Berlin Heidelberg New York

London Paris Tokyo

Hong Kong Barcelona

Budapest

Inhaltsverzeichnis

1. Überblick und Hilfsmittel	1
1.1 Strukturen der Materie	1
1.1.1 Teilchen und Kräfte	1
1.1.2 Abstandsskalen und Energieskalen	4
1.1.3 Schreibweise und Maßsysteme	9
1.2 Die Elementarteilchen	12
1.2.1 Antimaterie	12
1.2.2 Die Leptonen	14
1.2.3 Hadronen	19
1.2.4 Quarks	23
1.2.5 Feldteilchen	26
1.3 Wirkungsquerschnitte und Zerfallsraten	29
1.3.1 Der Wirkungsquerschnitt	29
1.3.2 Die Streumatrix	31
1.3.3 Feynman-Graphen	33
1.3.4 Wirkungsquerschnitte und Streuamplitude	34
1.3.5 Zerfallsraten	39
Übungen	41
Literatur	42
2. Symmetrien und Erhaltungssätze	43
2.1 Die unitäre S -Matrix	43
2.2 Die Drehgruppe und ihre Darstellungen	46
2.2.1 Drehungen	46
2.2.2 Die Drehgruppe	47
2.2.3 Darstellungen der Drehgruppe	49
2.2.4 Drehgruppe und halbzahlige Spins	53
2.2.5 Produkte von Darstellungen	55
2.3 Die Poincaré-Gruppe und ihre Darstellungen	57
2.3.1 Lorentz-Transformationen	57
2.3.2 Die Poincaré-Gruppe	58
2.3.3 Darstellungen der Poincaré-Gruppe	59
2.4 Anwendungen	61
2.4.1 2-Körperzerfälle	61
2.4.2 Partialwellenentwicklung der Streuamplitude	63
2.4.3 Resonanzen in Formationsexperimenten	64

2.4.4	Pion-Resonanzen	70
2.4.5	Der Spin des Photons	71
2.4.6	Der Spin des neutralen Pions	72
2.5	Spiegelungen und Paritätsinvarianz	73
2.5.1	Die Paritätstransformation	73
2.5.2	Die Parität des Photons, des Rho-Mesons und der Pionen	76
2.5.3	Spin und Parität des K -Mesons	78
2.5.4	Paritätsverletzung in der schwachen Wechselwirkung	80
2.6	Die Zeitumkehr	83
2.6.1	Zeitumkehr und das Prinzip des detaillierten Gleichgewichts	83
2.6.2	Invarianz der Wechselwirkungen unter Zeitspiegelungen	86
2.7	Innere Symmetrien I	87
2.7.1	Globale Phasentransformationen	87
2.7.2	Die Teilchen-Antiteilchenkonjugation	89
2.7.3	Lang- und kurzlebige neutrale K -Mesonen	92
2.7.4	CP-Verletzung im K_L -Zerfall	96
2.8	Innere Symmetrien II	102
2.8.1	Das pn -System	102
2.8.2	Die Form der SU_2 -Matrizen	103
2.8.3	Darstellungen	105
2.8.4	Antiteilchen in der SU_2	106
2.8.5	Die Isoinvarianz der Kernkraft	107
2.8.6	Isospin und Quarks	109
2.8.7	Reguläre Darstellung und G -Parität	109
	Übungen	111
	Literatur	112
3.	Hadronen in der Quantenchromodynamik	115
3.1	Quarks mit Farbe	115
3.1.1	Das Statistik-Problem	115
3.1.2	Die Gruppe SU_3	116
3.1.3	Mesonen als $q\bar{q}$ -Zustände	119
3.1.4	Baryonen als qqq -Zustände	120
3.2	Farbdynamik	121
3.2.1	Gluonen und das Potential der QCD	121
3.2.2	Die laufende Kopplungskonstante	126
3.3	Der Aufbau der Hadronen	128
3.3.1	Die Werte von Spin und Parität im Quarkmodell	129
3.3.2	Hadronen aus u - und d -Quarks	131
3.3.3	Die Massen der u - und d -Quarks	135
3.3.4	Hadronen aus u, d, s -Quarks	136
3.4	Die chromodynamische Hyperfeinstruktur	141
3.4.1	Die Aufspaltung für Hadronen aus u - und d -Quarks	141
3.4.2	Hyperfeinstruktur und „seltsame“ Quarks	143

3.5	Elektromagnetische und starke Zerfälle von Hadronen	144
3.5.1	Radiative Zerfälle der Vektormesonen	144
3.5.2	Zerfälle der Vektormesonen in Leptonenpaare	147
3.5.3	Radiative Zerfälle der pseudoskalaren Mesonen	151
3.5.4	Zerfälle in Hadronen	153
3.6	Neue schwere Quarks	155
3.6.1	Das Vektormeson $J/\psi(3097)$	155
3.6.2	Charmonium, $c\bar{c}$	158
3.6.3	Hadronen mit Charm	162
3.6.4	b -Quarks	164
	Übungen	165
	Literatur	166
4.	Elektromagnetische Streuprozesse	167
4.1	Relativistische Fermionen	167
4.1.1	Die Dirac-Gleichung	167
4.1.2	Lösungen der freien Dirac-Gleichung	170
4.1.3	Feynman-Regeln	177
4.2	Elementare Reaktionen der QED	180
4.2.1	Elektron-Positron-Vernichtung in $\mu^- \mu^+$ -Paare	180
4.2.2	Die Elektron-Myon-Streuung	184
4.2.3	Bhabha- und Möller-Streuung	186
4.2.4	Die Compton-Streuung	187
4.3	Reaktionen mit Hadronen	189
4.3.1	Elektron-Positron-Annihilation in Hadronen	189
4.3.2	Die elastische Elektron-Nukleon-Streuung	195
4.3.3	Das $e\pi$ -System	199
4.3.4	Inelastische Elektron-Nukleon-Streuung	201
4.3.5	Der elektromagnetische Strom der Hadronen	209
4.4	Prozesse höherer Ordnung	211
4.4.1	Die Bremsstrahlung	211
4.4.2	Zwei-Photonen-Physik	214
	Übungen	220
	Literatur	221
5.	Die elektroschwache Wechselwirkung	223
5.1	Schwache Wechselwirkung von Leptonen	223
5.1.1	Quasielastische $\nu_\mu e^-$ -Streuung	223
5.1.2	Der β -Zerfall des Myons	227
5.2	Schwache Wechselwirkung von Quarks	229
5.2.1	Der β -Zerfall des Neutrons	230
5.2.2	Der Zerfall $\pi \rightarrow \mu \nu$	232
5.2.3	Zerfälle von K - und D -Mesonen	234
5.2.4	Inelastische Neutrino-Nukleon-Streuung	235

5.3	Elektroschwache Wechselwirkung der Leptonen	242
5.3.1	Die Entdeckung der neutralen Ströme	242
5.3.2	Das Glashow-Salam-Weinberg-Modell	245
5.4	Elektroschwache Wechselwirkung von Quarks	251
5.5	Das Standard-Modell	253
5.5.1	Die e^-e^+ -Vernichtung in Fermion-Antifermion-Paare .	254
5.5.2	Die Erzeugung des W -Bosons in Quark-Antiquark-Stößen	259
5.5.3	Die CKM-Matrix	261
5.5.4	Higgs-Bosonen	263
5.6	Jenseits des Standard-Modells	266
5.6.1	Das Parameter-Problem	266
5.6.2	Die große Vereinheitlichung	269
5.6.3	Das Hierarchie-Problem	274
	Übungen	277
	Literatur	278
Anhang		281
I.	Eigenschaften von Teilchen	283
	Gauge and Higgs Bosons	283
	Leptons	284
	Mesons	286
	Baryons	300
II.	Clebsch-Gordan Koeffizienten, Kugelflächenfunktionen und d -Funktionen	309
Sachverzeichnis		311