
Christoph Berger

Elementarteilchen- physik

Von den Grundlagen
zu den modernen Experimenten

Zweite, aktualisierte
und überarbeitete Auflage

Mit 217 Abbildungen, 51 Tabellen
und 88 Übungen mit Lösungshinweisen



Springer

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
1.5.2 Spurenkammern	69
a) Detektoren mit Gasverstärkung	69
b) Festkörperzähler	71
1.5.3 Kalorimeter	72
a) Elektromagnetische Kalorimeter.	72
b) Hadronische Kalorimeter.	74
1.5.4 Blasenkammer	74

2 Die Streumatrix und ihre Symmetrien

2.1 Die Streumatrix	79
2.1.1 Wirkungsquerschnitte und Streuamplitude	80
2.1.2 Zerfallsraten	85
2.1.3 Symmetrien der S -Matrix	87
2.1.4 Das optische Theorem	90
2.1.5 Anhang über die δ -Funktion	91
2.2 Drehungen in drei Dimensionen	92
2.2.1 Drehungen	92
2.2.2 Die Drehgruppe	94
2.2.3 Darstellungen der Drehgruppe	96
2.2.4 Drehgruppe und halbzahlige Spins	100
2.2.5 Produkte von Darstellungen	102

2.3	Drehungen und Verschiebungen in vier Dimensionen	105
2.3.1	Lorentz-Transformationen	105
2.3.2	Die Poincaré-Gruppe	107
2.3.3	Darstellungen der Poincaré-Gruppe	108
2.4	Anwendungen	110
2.4.1	Kinematik der Zwei-Körper-Reaktionen	110
2.4.2	Zwei-Körper-Zerfälle	113
2.4.3	Partialwellenentwicklung der Streuamplitude	115
2.4.4	Resonanzen in Formationsexperimenten	116
2.4.5	Pion-Resonanzen	124
2.4.6	Der Spin des Photons	125
2.4.7	Der Spin des neutralen Pions	127
2.5	Spiegelungen und Paritätsinvarianz	128
2.5.1	Die Paritätstransformation	128
2.5.2	Die Parität des Photons, des ρ -Mesons und der Pionen	132
2.5.3	Spin und Parität des K -Mesons	134
2.5.4	Paritätsverletzung in der schwachen Wechselwirkung	135
2.6	Die Zeitumkehr	138
2.6.1	Zeitumkehr und das Prinzip des detaillierten Gleichgewichts	138
2.6.2	Invarianz der Wechselwirkungen unter Zeitspiegelungen	140
2.7	Innere Symmetrien I	142
2.7.1	Globale Phasentransformationen	142
2.7.2	Die Teilchen-Antiteilchen-Konjugation	144
2.7.3	Lang- und kurzlebige neutrale K -Mesonen	147
2.7.4	CP -Verletzung im K_L -Zerfall	152
2.8	Innere Symmetrien II, Isospin und SU_2	160
2.8.1	Die Form der SU_2 -Matrizen	161
2.8.2	Darstellungen	162
2.8.3	Antiteilchen in der SU_2	164
2.8.4	Die Isoinvarianz der Kernkraft	165
2.8.5	Isospin und Quarks	167
2.8.6	Reguläre Darstellung und G -Parität	168
2.8.7	Isospin und K -Zerfälle	169

3 Elementare

Quantenelektrodynamik

3.1	Dirac-Gleichung und Feynman-Regeln	175
3.1.1	Die Dirac-Gleichung	175
3.1.2	Lösungen der freien Dirac-Gleichung	179
3.1.3	Feynman-Regeln	189
3.1.4	Die Renormierung und die laufende Kopplung	191
3.2	Basis-Reaktionen der QED	198
3.2.1	e^-e^+ -Vernichtung in $\mu^-\mu^+$ -Paare	198
3.2.2	Die Elektron-Myon-Streuung	202
3.2.3	Bhabha- und Møller-Streuung	207
3.2.4	Anwendungen der Streuformeln	210
	a) Energieverlust geladener Teilchen	210
	b) Der mittlere Winkel der Vielfachstreuung	212
3.2.5	Die Compton-Streuung	214
3.3	Prozesse höherer Ordnung	221
3.3.1	Die Bremsstrahlung	221
	a) Die Weizsäcker-Williams-Methode	222
	b) Der Wirkungsquerschnitt der Bremsstrahlung	224
	c) Energieverlust durch Bremsstrahlung	227
3.3.2	Strahlungskorrekturen zur Mott-Streuung	228

4 Hadronen in der Quantenchromodynamik

4.1 Quarks mit Farbe	236
4.1.1 Das Statistik-Problem	236
4.1.2 Die Gruppe SU_3	237
4.1.3 Mesonen als $q\bar{q}$ -Zustände	241
4.1.4 Baryonen als qqq -Zustände	242
4.2 Farbdynamik	246
4.2.1 Gluonen und das Potential der QCD	246
4.2.2 Die laufende Kopplungskonstante	252
4.3 Der Aufbau der Hadronen	255
4.3.1 Die Werte von Spin und Parität im Quarkmodell	256
4.3.2 Hadronen aus u - und d -Quarks	258
4.3.3 Die Massen der Quarks	263
4.3.4 Hadronen aus u -, d - und s -Quarks	264
4.4 Die chromodynamische Hyperfeinstruktur	273
4.4.1 Die Aufspaltung für Hadronen aus u - und d -Quarks	274
4.4.2 Hyperfeinstruktur und „seltsame“ Quarks	275
4.5 Elektromagnetische und starke Zerfälle von Hadronen	277
4.5.1 Radiative Zerfälle der Vektormesonen	277
4.5.2 Zerfälle der Vektormesonen in Leptonenpaare	279
4.5.3 Radiative Zerfälle der pseudoskalaren Mesonen	283
4.5.4 Zerfälle in Hadronen	285
4.6 Neue schwere Quarks	288
4.6.1 Das Vektormeson $J/\psi(1S)$	288
4.6.2 Die Υ -Mesonen	291
4.6.3 Quarkonium, $c\bar{c}$ und $b\bar{b}$	293
4.6.4 Hadronen mit <i>charm</i> und <i>bottom</i>	299

5 Elektronen und Quarks

5.1 Elektron-Positron-Annihilation in Hadronen	305
5.1.1 Der Wirkungsquerschnitt	305
5.1.2 QCD-Korrekturen	308
5.1.3 Der Endzustand	312
5.2 Die elastische Elektron-Nukleon-Streuung	318
5.2.1 Der Wirkungsquerschnitt	318
5.2.2 Experimente zur elastischen Elektronenstreuung	320
5.2.3 Das $e\pi$ -System	322
5.3 Inelastische Elektron-Nukleon-Streuung	324
5.3.1 Der Wirkungsquerschnitt im Quarkmodell	324
5.3.2 Allgemeine Form des Wirkungsquerschnitts	328
5.3.3 Modelle und Ergebnisse für F_2^{eN}	331
5.3.4 QCD-Korrekturen	335
5.3.5 Der Endzustand	343
5.4 Zwei-Photonen-Physik	345
5.4.1 Resonanzzeugung	346
5.4.2 Die Strukturfunktion des Photons	349

6 Von der schwachen zur elektroschwachen Wechselwirkung

6.1 Schwache Wechselwirkung von Leptonen	355
6.1.1 Quasielastische $\nu_\mu e^-$ -Streuung	355
6.1.2 Der Zerfall des Myons	359
6.2 Schwache Wechselwirkung von Quarks	363
6.2.1 Der Cabibbo-Winkel	363

6.2.2	Der β -Zerfall des Neutrons	365
6.2.3	Der Zerfall $\pi \rightarrow \mu\nu$	369
6.2.4	Zerfälle von K -, D - und B -Mesonen	370
6.2.5	Der Zerfall des top -Quarks	374
6.2.6	Inelastische Neutrino-Nukleon-Streuung	374
6.3	Die elektroschwache Wechselwirkung	379
6.3.1	Die Entdeckung der neutralen Ströme	379
6.3.2	Elektroschwache Wechselwirkung der Leptonen	380
6.3.3	Elektroschwache Wechselwirkung von Quarks	386
7	Das Standard-Modell	
7.1	Die Neutrino-Elektron-Streuung	391
7.2	Die e^-e^+ -Vernichtung in Fermion-Antifermion-Paare	395
7.2.1	Die Bornsche Näherung	395
7.2.2	Strahlungskorrekturen	400
7.3	Die Elektron-Nukleon-Streuung bei Berücksichtigung des Z - und W -Austausches	402
7.4	Die Erzeugung des W -Bosons in Quark-Antiquark-Stößen	405
7.5	Die Produktion des top -Quarks in Hadron-Hadron-Stößen	408
7.6	Intermezzo: Die Hadron-Hadron-Streuung	410
7.7	Higgs-Bosonen	415
7.8	CP -Verletzung im Standard-Modell	424
7.8.1	Die CKM-Matrix	424
7.8.2	CP -Verletzung und b -Quarks	429
7.9	Neutrinomassen und Neutrino-Oszillationen	434
7.10	Jenseits des Standard-Modells	447
7.10.1	Majorana-Neutrinos	447
7.10.2	Das Parameter-Problem	453
7.10.3	Die große Vereinheitlichung	455
7.10.4	Hierarchie und Feinabstimmung	461
7.10.5	Die supersymmetrische Erweiterung des Standard-Modells	463
	Lösungshinweise zu den Übungsaufgaben	471
	Literatur	485
	Sachverzeichnis	493