

Peter Schmöser

Feynman-Graphen und Eichtheorien für Experimentalphysiker

Zweite, neubearbeitete Auflage
Mit 82 Abbildungen



Springer

Inhalt

1	Relativistische Wellengleichungen	1
1.1	Vorbemerkungen	1
1.2	Betrachtungen zur Schrödingergleichung	1
1.3	Die Klein-Gordon-Gleichung	3
1.4	Die Dirac-Gleichung	5
1.5	Nichtrelativistischer Grenzfall der Dirac-Gleichung	7
1.6	Dirac-Gleichung für ein Elektron im elektromagnetischen Feld	9
1.7	Übungsaufgaben	10
2	Relativistische Kovarianz der Dirac-Gleichung	11
2.1	Vierervektoren, Lorentz-Transformation	11
2.1.1	Vierervektoren	11
2.1.2	Lorentz-Transformation	12
2.1.3	Drehung des Koordinatensystems	13
2.2	Die γ -Matrizen	13
2.3	Ebene Wellen, Dirac-Spinoren	15
2.4	Kovarianz der Dirac-Gleichung	17
2.4.1	Problemstellung	17
2.4.2	Transformation der Lösungen relativistischer Wellengleichungen	19
2.4.3	Rotation um die z -Achse	21
2.4.4	Lorentz-Transformation längs der z -Achse	22
2.4.5	Eigenschaften der Transformations-Matrizen	22
2.4.6	Raumspiegelung und Zeitumkehr	23
2.5	Spin des Elektrons	23
2.6	Skalare und vektorielle Bilinearformen	24
2.6.1	Skalar	25
2.6.2	Viererstromdichte	25
2.6.3	Pseudoskalar und Axialvektor	26
2.7	Übungsaufgaben	26
3	Interpretation der Lösungen negativer Energie	29
3.1	Stückelberg-Feynman-Bild der Antiteilchen	29
3.2	Die Wellenfunktionen des Positrons	32
3.3	Übungsaufgaben	33

4	Feynman-Graphen	35
4.1	Greensche Funktion	35
4.2	Elektron-Propagator	36
4.2.1	Berechnung der Greenschen Funktion	37
4.2.2	Propagator und zeitliche Entwicklung	39
4.3	Matrixelement für Elektronenstreuung	40
4.3.1	Matrixelement 1. Ordnung	41
4.3.2	Matrixelement 2. Ordnung	42
4.3.3	Anwendungsbeispiel: Streuung an einem Atomkern	43
4.4	Photon-Propagator	44
4.5	Feynman-Regeln	45
4.5.1	Konventionen zu Feynman-Diagrammen	46
4.5.2	Strom-Strom-Kopplung	47
4.5.3	Elementarprozesse	48
4.6	Übungsaufgaben	50
5	Anwendung der Feynman-Graphen	51
5.1	Streuung nichtrelativistischer Elektronen an Kernen	51
5.2	Streuung relativistischer Elektronen an Kernen	54
5.2.1	Spin-Summationen	54
5.2.2	Sätze über Spuren	56
5.2.3	Wirkungsquerschnitt für Elektron-Kern-Streuung	56
5.3	Elektron-Fermion-Streuung	57
5.3.1	Differentieller Wirkungsquerschnitt für Zweikörperreaktionen	58
5.3.2	Wirkungsquerschnitt für unpolarisierte Teilchen	60
5.4	Myon-Paarzerzeugung	62
5.5	Elektron-Elektron- und Elektron-Positron-Streuung	64
5.5.1	Elektron-Elektron-Streuung	64
5.5.2	Elektron-Positron-Streuung	65
5.6	Teilchen-Antiteilchen-Symmetrie	66
5.7	Compton-Streuung und Elektron-Positron-Vernichtung in γ -Quanten	68
5.7.1	Compton-Streuung	68
5.7.2	Annihilation in zwei γ -Quanten	71
5.8	Übungsaufgaben	74
6	Schwache Wechselwirkungen	77
6.1	Fermi-Theorie, intermediäre Bosonen	77
6.2	Paritätsverletzung, (V-A)-Theorie	79
6.2.1	Eigenparitäten der Leptonen und Quarks	80
6.2.2	Helizität und Chiralität	80
6.3	Pion-Zerfall	84
6.4	Neutrino-Lepton-Reaktionen	88
6.5	Schwache Wechselwirkungen von Hadronen, Cabibbo-Winkel	93
6.6	Schwache neutrale Ströme	94
6.7	Schwacher Isospin, Charm-Quark	97
6.8	Übungsaufgaben	101

7	Lepton-Quark-Wechselwirkungen, Parton-Modell	105
7.1	Einführung	105
7.2	Elektron-Kern-Streuung, Formfaktor	105
7.3	Nukleon-Formfaktoren	107
7.4	Inelastische Elektron-Nukleon-Streuung	110
7.4.1	Inelastische Streuung als Mittel der Struktur-Analyse	110
7.4.2	Kinematik und Wirkungsquerschnitt für inelastische Elektron-Nukleon-Streuung	111
7.5	Skaleninvarianz und Parton-Modell	112
7.6	Quark-Parton-Modell	117
7.7	Tief inelastische Neutrino-Nukleon-Streuung	119
7.7.1	Strukturfunktionen der Neutrino-Streuung	120
7.7.2	Antiquark-Inhalt der Nukleonen	121
7.8	Elektron-Positron-Vernichtung in Hadronen	123
7.9	Lepton-Paarerzeugung in Hadron-Stößen	124
7.10	Übungsaufgaben	125
8	Divergenz-Probleme in der schwachen Wechselwirkung	127
8.1	Überschreiten der Unitaritätsgrenze bei der Punkt- Wechselwirkung	127
8.2	Divergenzen im W -Boson-Modell	128
8.3	Kompensation der Divergenz durch ein neutrales Feldquant	131
9	Eichinvarianz als dynamisches Prinzip	133
9.1	Eichinvarianz und Maxwell'sche Gleichungen	133
9.2	Eichinvarianz in der Quantenmechanik	135
9.3	Globale und lokale Phasentransformationen	136
9.4	Das Eichprinzip	139
9.5	Eichinvarianz und Masse der Feldquanten	140
9.6	Polarisationsvektoren für Photonen	142
9.7	Bedeutung der Potentiale in der Quantentheorie	143
9.8	Übungsaufgaben	144
10	Eichinvarianz bei massiven Vektor-Feldern	145
10.1	Die Erzeugung einer Photon-Masse im Supraleiter	145
10.2	Die Higgs-Teilchen als Verallgemeinerung der Cooper-Paare	149
10.2.1	Das Higgs-Potential	151
10.3	Der Higgs-Mechanismus im Lagrange-Formalismus	153
10.3.1	Wechselwirkung zwischen Higgs-Feld und elektromagnetischem Feld	154
10.4	Übungsaufgaben	157
11	Das Standard-Modell der elektroschwachen Wechselwirkung	159
11.1	Phaseninvarianz in der $SU(2)$ -Symmetrie	159
11.2	Schwacher Isospin, schwache Hyperladung	161
11.3	Lokale $SU(2)_L \times U(1)$ -Transformationen, Kopplungen der Fermionen	163
11.4	Feynman-Regeln der elektroschwachen Wechselwirkung	167
11.5	Die Massen der W - und Z -Bosonen	169
11.6	Die Massen der geladenen Fermionen	172

11.7	Selbstwechselwirkung der Eichbosonen	174
11.8	Eigenschaften der W - und Z -Bosonen	176
11.8.1	Berechnung der Zerfallsraten	176
11.8.2	Erzeugung der Z^0 -Bosonen in der e^-e^+ -Annihilation	180
11.9	Experimentelle Verifikation des Standard-Modells	182
11.9.1	Zahl der Neutrino-Familien	182
11.9.2	Lepton-Universalität, Mischungswinkel	185
11.9.3	Eingrenzung der Top-Quark-Masse	186
11.10	Übungsaufgaben	187
12	Quanten-Chromodynamik	189
12.1	Historische Entwicklung der QCD	189
12.2	$SU(3)$ -Symmetrie und Quarkmodell	190
12.2.1	Antiquarks	192
12.2.2	Quark-Antiquark-Zustände: Mesonen	193
12.2.3	Drei-Quark-Zustände: Baryonen	195
12.3	Farbladungen	195
12.3.1	Die Farbe als innere Quantenzahl der Quarks	195
12.3.2	Experimentelle Evidenz für die drei Farben	197
12.3.3	Farbladungen der Gluonen	198
12.4	Lokale $SU(3)_C$ -Invarianz, Gluon-Felder	199
12.4.1	Lokale $SU(3)_C$ -Transformationen	199
12.4.2	Kopplungen zwischen Quarks und Gluonen	202
12.4.3	Singulett-Gluon und Reichweite der starken Kräfte	204
12.5	Stabilität der $q\bar{q}$ - und qqq -Systeme	205
12.6	Asymptotische Freiheit und Confinement	209
12.6.1	Einführung effektiver Ladungen	209
12.6.2	Renormierung und Q^2 -Abhängigkeit der Kopplung	211
12.6.3	Confinement	213
12.7	Experimentelle Ergebnisse zur QCD	214
12.7.1	Entdeckung und Eigenschaften der Gluonen	214
12.7.2	Verletzung der Skaleninvarianz	216
12.7.3	Bestimmung von α_s	217
12.8	Ausblick	220
12.9	Übungsaufgaben	222
A	Lagrange-Funktion für ein Teilchen im elektromagnetischen Feld	223
B	Lagrange-Formalismus in der Quantenfeldtheorie	227
C	Polarisationsvektoren für Spin-1-Teilchen	231
D	Propagatoren der W - und Z -Bosonen	233
	Literatur	235
	Index	237