

Inhalt

N	Notationen	1
N.1	Natürliche Einheiten	1
N.2	Relativistische Größen	2
N.3	Operatoren und Matrizen	3
N.4	Vektoren	3
N.5	Symbole für mathematische Operationen	3
N.6	Dirac-Matrizen	4
N.7	Isospin	5
N.8	Zur Bezeichnung von Teilchen, Teilchensuständen und Teilchenoperatoren (Feldoperatoren)	5
1	Elementarteilchen und Wechselwirkungen — Überblick	6
1.1	Die elementaren Bausteine der Materie	6
1.1.1	Leptonen und Quarks	6
1.1.2	Antiteilchen	8
1.2	Die elementaren Wechselwirkungen und die Feldquanten	10
1.2.1	Phänomenologie der Wechselwirkungen	10
1.2.2	Moderne Quantenfeldtheorien der elementaren Wechselwirkungen	12
1.3	Quantenzahlen und Erhaltungsgrößen in Kern- und Elementarteilchenphysik	26
1.3.1	Elektrische Ladung Q	27
1.3.2	Baryonenzahl B	27
1.3.3	Leptonenzahl L	28
1.3.4	Flavorquantenzahlen	29
1.3.5	Isospin \vec{T}	29
1.3.6	Schwacher Isospin \vec{T}_w	32
1.3.7	Parität	32
1.3.8	Ladungskonjugation C (Teilchen-Antiteilchen-Konjugation)	34
1.3.9	CP-Konjugation	34
1.3.10	Das CPT-Theorem, Zeitumkehr	36

2	Klassische Theorie der schwachen Wechselwirkung, Kernbetazerfall	38
2.1	Phänomenologie des Kernbetazerfalls	38
2.1.1	Der Zerfall des freien Neutrons	40
2.1.2	Erlaubter Kernbetazerfall	41
2.1.3	Energiespektren und Zerfallsraten für erlaubte Übergänge . . .	44
2.1.4	Verbotene Übergänge	51
2.2	Vier-Fermionen-Punkt-Wechselwirkung	53
2.2.1	Relativistische Wechselwirkungsströme	53
2.2.2	Fermi's Ansatz	56
2.2.3	Mögliche Lorents-invariante Wechselwirkungsstrukturen	58
2.2.4	Paritätsverletzung und die V-A-Struktur der schwachen Wechselwirkung	60
2.2.5	Die universelle Strom-Strom-Wechselwirkung, CVC und PCAC	65
2.3	Formalismus des Kernbetazerfalls	74
2.3.1	Neutronzerfall	74
2.3.2	β -Zerfall des Atomkerns	76
2.3.3	Relationen zwischen β^- , β^+ -Zerfall, Elektron- und Neutrino- Einfang	80
2.4	Doppel-Betazerfall	83
2.4.1	Matrixelemente für den Doppel-Betazerfall	86
2.5	Grenzen der klassischen Theorie	97
2.5.1	Renormierung des Axialvektorstromes	97
2.5.2	Meson-Zerfälle	97
2.5.3	Hochenergieverhalten: Verletzung der Unitarität, Nicht-Renormierbarkeit	98
3	Kernstruktur und Betazerfall	103
3.1	Allgemeine Bedeutung	103
3.2	Betazerfall und kollektive Kernanregungen	104
3.2.1	GT-Zerfall und Ladungsaustauschreaktionen	111
3.3	Summenregeln für erlaubten Betazerfall	112
3.4	Kernmatrixelemente für den β -Zerfall	113
3.4.1	Modell unabhängiger Teilchen	115
3.4.2	Das Paarungs-Modell	121
3.4.3	Die TDA-Methode	126

3.4.4	Die RPA-Methode	135
3.5	Quenching der Gamow-Teller-Stärke	147
3.6	Matrizelemente für den Doppel-Betaserfall	152
3.6.1	Matrizelemente für den 2ν $\beta\beta$ -Zerfall in speziellen Modellen	152
3.6.2	Matrizelemente für den 0ν $\beta\beta$ -Zerfall	162
4	Eichtheorien	165
4.1	Das Eichprinzip	166
4.1.1	Globale innere Symmetrien	167
4.1.2	Lokale (= Eich-)Symmetrien	172
4.2	$SU(2)$, eine Vorstufe zur schwachen Wechselwirkung	177
4.2.1	$SU(2)$ -Transformationen des Dubletts $\begin{pmatrix} \nu \\ e \end{pmatrix}$	177
4.2.2	Die W -Bosonen	180
4.2.3	Vergleich mit der Realität	187
4.3	Spontane Symmetriebrechung	188
4.3.1	Higgs-Felder	189
4.3.2	Das Higgs-Potential	190
4.3.3	W -Massen	194
5	Die Glashow-Weinberg-Salam Theorie der elektroschwachen Wechselwirkung	196
5.1	Die Verkopplung von schwacher und elektromagnetischer Wechselwirkung	196
5.1.1	Die Notwendigkeit einer gemeinsamen Beschreibung	196
5.1.2	Elektroschwache Eichtransformationen	197
5.1.3	Die Eichfelder $B_\mu(x)$ und $\vec{W}_\mu(x)$	200
5.1.4	Spontane Brechung der $SU(2)_L \otimes U(1)$ -Symmetrie, Generierung der Bosonen- und Fermionen-Massen	200
5.1.5	Vergleich der GWS-Theorie mit der klassischen Strom-Strom-Theorie	206
5.2	Hadronischer schwacher Strom auf Quarkebene	209
5.2.1	Der geladene Quarkstrom g_μ^c	209
5.2.2	Neutrale Quarkströme	211
5.2.3	Zerfall des π -Mesons, PCAC und CVC im Quarkbild	213
5.2.4	Schwache Zerfälle mit Strangeness, Cabibbo-Mischung	216
5.2.5	Der GIM-Mechanismus, c -Quark, Kobayashi-Maskawa-Matrix	218
5.3	Tests der GWS-Theorie	222

5.3.1	Neutrale Ströme und der Weinberg-Winkel	223
5.3.2	Nachweis der W - und Z -Bosonen	226
5.4	Kernbetazerfall als schwache Wechselwirkung der Quarks	229
5.4.1	Quarkmodell der Nukleonen	231
5.4.2	Beta-Matrixelemente im Quarkmodell	233
6	Die schwache Wechselwirkung im Rahmen der Großen Vereinigungs-	239
	theorien	
6.1	Was versteht man unter einer großen Vereinigung?	239
6.1.1	Quantenchromodynamik	240
6.1.2	Grundprinzipien einer Großen Vereinigung	244
6.2	Die minimale Lösung (Georgi-Glashow-Modell)	250
6.2.1	$SU(5)$ -Multipletts und -Transformationen	250
6.2.2	Brechung der $SU(5)$ -Symmetrie	253
6.2.3	Protonserfall	254
6.2.4	Grenzen des minimalen Modells	258
6.3	$SO(10)$, die einfachste Erweiterung von $SU(5)$	260
6.3.1	$SO(10)$ -Multipletts	260
6.3.2	Brechung der $SO(10)$ -Symmetrie und intermediäre Symmetrien	261
6.4	Supersymmetrische GUT-Modelle	262
6.4.1	Was ist Supersymmetrie?	263
6.4.2	Das supersymmetrische Teilchenspektrum	264
6.4.3	Proton-Zerfall in SUSY-GUT-Modellen	265
6.4.4	Das Massenhierarchie-Problem	266
6.4.5	Super-Gravitation	268
6.4.6	Superstrings	271
7	Neutrinos	273
7.1	Majorana- contra Dirac-Neutrinos	273
7.1.1	Beschreibung masseloser Neutrinos	273
7.1.2	Massive Neutrinos	280
7.2	Neutrinos innerhalb der GUT-Modelle	285
7.2.1	$SU(5)$ -Neutrinos	286
7.2.2	$SO(10)$ -Neutrinos	286
7.2.3	Ein Modell mit drei Neutrinoefeldern je Familie	289
7.2.4	Neutrinos in Superstring-Modellen	290

7.3	Möglichkeiten experimenteller Prüfung der Natur der Neutrinos	291
7.3.1	Neutrino-Ossillationen	291
7.3.2	Einfluß der Neutrinomasse auf das Energiespektrum erlaubter Betaübergänge	304
7.3.3	Neutrinozerfall	306
7.3.4	Neutrinoloser Doppel-Betazerfall	307
7.3.5	Neutrinos aus Supernova-Explosionen	319
8	Schwache Wechselwirkung und Astrophysik	322
8.1	Der Kollaps schwerer Sterne und die schwache Wechselwirkung	322
8.1.1	Schwache Reaktionen im Core schwerer Sterne, Neutrino-Emission bei Supernova-Explosionen	332
8.1.2	Deleptonisierung, Gravitationskollaps und Supernova-Explosion	338
8.2	Die Synthese der schweren Elemente im Universum	341
8.2.1	Der r-Prozeß	343
8.2.2	Explosives Helium-Brennen	346
8.2.3	Kosmochronometer und das Alter des Universums	349
9	GUT und Kosmologie	355
9.1	Das kosmologische Standardmodell	355
9.2	Grenzen des Standardmodells	362
9.2.1	Die Krümmung des Weltalls	362
9.2.2	Das Horizontproblem	364
9.2.3	Magnetische Monopole	366
9.2.4	Baryonenasymmetrie, CP-Verletzung	367
9.3	Inflation	369
9.3.1	Lösung kosmologischer Probleme im inflationären Universum .	372
9.4	Die kosmologische Konstante Λ	373
9.4.1	'Experimentelle' Einschränkungen für Λ	373
9.4.2	Das Λ -Problem	377
9.5	Neutrinos im Kosmos	379
9.5.1	Die Massendichte ρ_0	379
9.5.2	Kosmologische Einschränkungen für die Neutrino-Masse	382

A Anhang	386
A.1 Relativistisch invariante Bewegungsgleichungen der Quantenmechanik	386
A.1.1 Die Klein-Gordon-Gleichung	386
A.1.2 Die Dirac-Gleichung	388
A.2 Zweite Quantisierung, Feldoperatoren	397
A.2.1 Erzeugungs- und Vernichtungsoperatoren	397
A.2.2 Quantenfelder	398
A.3 Lagrange-Formalismus	400
A.3.1 Lagrangedichte des Dirac-Feldes	400
A.3.2 Lagrangedichte eines Elektrons mit elektromagnetischer Wechselwirkung, Feynman-Diagramme	401
A.4 Diskrete Symmetrien eines Dirac-Feldes	407
A.4.1 Paritätstransformation	407
A.4.2 Ladungskonjugation (Teilchen-Antiteilchen-Konjugation) . . .	407
A.4.3 Zeitumkehr	408
A.4.4 Händige Dirac-Felder, Ladungskonjugation und CP-Konjugation	408
A.5 Lie'sche Gruppen und kontinuierliche Symmetrietransformationen . . .	409
A.5.1 Definition einer Lie'schen Gruppe	410
A.5.2 Darstellungen einer Gruppe	410
A.5.3 Die $SU(n)$ Gruppen	413
A.5.4 Das Noether-Theorem	417
A.5.5 Das Wigner-Eckart-Theorem	418
L Literaturverzeichnis	422
S Sachverzeichnis	451