

Neutrino-physik

Von Prof. Dr. rer. nat. Norbert Schmitz
Max-Planck-Institut für Physik
(Werner-Heisenberg-Institut) München
Mit 192 Abbildungen und 23 Tabellen

SUB Göttingen
208 490 698

7



98 A 11486

V
95



B. G. Teubner Stuttgart 1997

Inhaltsverzeichnis

1 Die wichtigsten experimentellen Entdeckungen	9
1.1 „Erfindung“ des Neutrinos (1930)	9
1.2 Entdeckung des Neutrinos (1956)	11
1.3 Frage nach der Identität von Neutrino und Antineutrino; Leptonzahl	12
1.4 Nichterhaltung der Parität; Zwei-Komponenten-Theorie des Neutrinos	16
1.4.1 τ - θ -Rätsel, Vermutung der Nichterhaltung der Parität in der schwachen Wechselwirkung (1956)	16
1.4.2 Nachprüfung der (Nicht-)Erhaltung der Parität	17
1.4.3 Entdeckung der Nichterhaltung der Parität (1957)	19
1.4.4 Nichterhaltung der Parität beim Pion- und Myon-Zerfall (1957)	21
1.4.5 Direkte Messung der Neutrino-Helizität (1958)	23
1.4.6 Helizitäten in der schwachen Wechselwirkung	25
1.4.7 Zwei-Komponenten-Theorie des Neutrinos	27
1.5 Verschiedenheit von Elektron- und Myon-Neutrino (1962)	32
1.6 Entdeckung der „neutralen schwachen Ströme“ (1973)	36
1.7 Dritte Lepton-Familie	38
1.7.1 Entdeckung des schweren Leptons τ (1975)	38
1.7.2 Suche nach dem Tauon-Neutrino ν_τ	39
1.8 Entdeckung der schwachen Vektor-Bosonen W^\pm und Z^0 (1983)	43
1.9 Messung der Anzahl der leichten Neutrinoarten (1990)	47
2 Überblick über die elektroschwache Wechselwirkung	54
2.1 Teilchen und Wechselwirkungen	54
2.1.1 Fermionen	55
2.1.2 Vektorbosonen	56
2.2 Felder, Ströme, Wechselwirkungen	57
2.3 Die schwache Wechselwirkung	61

6 Inhaltsverzeichnis

2.3.1	Geladene schwache Leptonströme	61
2.3.2	Neutrale schwache Leptonströme	62
2.3.3	Geladene schwache Quarkströme	63
2.3.4	Neutrale schwache Quarkströme	67
2.3.5	Zusammenfassung	68
2.4	Systematik der schwachen Reaktionen und Zerfälle	69
2.4.1	CC-Prozesse	69
2.4.2	NC-Prozesse	73
2.5	Zusammenfassung der Glashow-Weinberg-Salam-Theorie	75
3	Experimente mit Neutrinos	84
3.1	Neutrino-Quellen	84
3.2	Neutrino-Strahlen an Beschleunigern	85
3.2.1	Prinzip und Kinematik	85
3.2.2	Schmalband- und Breitband-Strahl	90
3.3	Neutrino-Detektoren an Beschleunigern	99
4	Neutrino-Elektron-Streuung	114
4.1	Theoretische Grundlagen	115
4.2	Experimente und Ergebnisse	120
4.2.1	$\bar{\nu}_\mu e$ -Streuung	122
4.2.2	$\bar{\nu}_e e$ -Streuung	128
5	Neutrino-Nukleon-Streuung	130
5.1	CC-Reaktionen	131
5.1.1	Kinematik bei stationärem Target	131
5.1.2	Totale Wirkungsquerschnitte	133
5.1.3	Strukturfunktionen der Nukleonen; Skaleninvarianz	136
5.1.4	Quark-Parton-Modell; Parton-Verteilungsfunktionen	139
5.1.5	Anwendungen und Ergebnisse	152
5.1.6	QCD-Effekte	158
5.1.7	Hadronischer Endzustand	165
5.2	NC-Reaktionen	176
5.3	Tief-inelastische ep -Streuung bei HERA	182
5.3.1	Kinematik bei HERA	183

5.3.2	Die Reaktion $e + p \rightarrow e + X$	188
5.3.3	Die Reaktion $e + p \rightarrow \nu_e + X$	192
5.4	Quasielastische Neutrino-Nukleon-Streuung	195
6	Eigenschaften der Neutrinos	204
6.1	Theoretische Grundlagen	206
6.1.1	Dirac-Neutrino und Majorana-Neutrino	206
6.1.2	Dirac-Masse und Majorana-Masse	211
6.2	Direkte Bestimmung der Neutrinomassen	219
6.2.1	Masse des Elektronneutrinos	219
6.2.2	Masse des Myonneutrinos	239
6.2.3	Masse des Tauonneutrinos	241
6.3	Neutrino-Oszillationen im Vakuum	243
6.3.1	Phänomenologische Grundlagen	245
6.3.2	Experimente an Reaktoren	254
6.3.3	Experimente an Beschleunigern	260
6.4	Neutrino-Mischung in schwachen Zerfällen	267
6.5	Neutrino-Zerfälle	272
6.6	Neutrino-Oszillationen in Materie	278
6.6.1	Vom Vakuum zur Materie	279
6.6.2	MSW-Effekt	284
6.7	Elektromagnetische Eigenschaften der Neutrinos	293
6.7.1	Magnetisches Dipolmoment	293
6.7.2	Elektrische Ladung, elektrisches Dipolmoment	297
6.7.3	Übergangsdipolmomente	300
6.8	Doppel-Beta-Zerfall	300
6.8.1	Grundlagen	301
6.8.2	Experimente und Ergebnisse	309
7	Neutrinos in der Astrophysik und Kosmologie	322
7.1	Atmosphärische Neutrinos	322
7.2	Solare Neutrinos	329
7.2.1	Erzeugung der Sonnenneutrinos	330
7.2.2	Nachweis der Sonnenneutrinos	337
7.2.3	Experimente und Ergebnisse	343

8 Inhaltsverzeichnis

7.2.4	Problem der solaren Neutrinos	351
7.3	Neutrinos aus Supernovae	362
7.3.1	Supernovaphysik	363
7.3.2	Supernova SN1987A	371
7.4	Kosmologische Neutrinos	378
7.4.1	Kosmologische Grundlagen	378
7.4.2	Neutrinos aus dem Urknall	384
7.4.3	Primordiale Nukleosynthese; Anzahl der Neutrinoarten	392
7.4.4	Dunkle Materie; Neutrinoeigenschaften	398
7.5	Hochenergetische kosmische Neutrinos	407
7.6	Neue und zukünftige Detektoren in der Neutrino-Astrophysik	413
7.6.1	Unterirdische Detektoren	415
7.6.2	Unterwasser-Detektoren	422
Anhang		430
A.1	Instabile Teilchen	430
A.2	Helizität	431
A.3	Kinematik	432
A.4	Diagonalisierung	437
A.5	Supersymmetrische Teilchen	438
Literaturverzeichnis		441
Sachverzeichnis		468