

Teilchenphysik ohne Beschleuniger

Von Prof. Dr. rer. nat. Hans Volker Klapdor-Kleingrothaus
Max-Planck-Institut für Kernphysik, Heidelberg
und Dr. rer. nat. Andreas Staudt
Zentrale Forschung Bayer AG, Leverkusen
Mit zahlreichen Abbildungen und Tabellen



B. G. Teubner Stuttgart 1995

Prof. Dr. rer. nat. Hans Volker Klapdor-Kleingrothaus

Geboren 1942 in Reinbek. Studium der Physik in Hamburg. Promotion 1969, Habilitation 1971. Seit 1969 am Max-Planck-Institut für Kernphysik in Heidelberg. Seit 1980 Professor an der Universität Heidelberg. Physikpreis der DPG 1982.

Dr. rer. nat. Andreas Staudt

Geboren 1964 in Bad Homburg. Studium der Physik an der Universität Heidelberg. Promotion 1991 mit einer Dissertation am Max-Planck-Institut für Kernphysik. Anschließend wissenschaftliche Tätigkeit am MPI in Heidelberg. Seit 1992 Leitender Mitarbeiter in Forschung und Entwicklung der Bayer AG, Leverkusen.

Die Deutsche Bibliothek – CIP-Einheitsaufnahme

Klapdor-Kleingrothaus, Hans Volker:

Teilchenphysik ohne Beschleuniger : mit zahlreichen Tabellen /
von Hans Volker Klapdor-Kleingrothaus und Andreas Staudt. –
Stuttgart : Teubner, 1995

(Teubner-Studienbücher : Physik)

ISBN-13: 978-3-519-03088-1

e-ISBN-13: 978-3-322-89144-0

DOI: 10.1007/978-3-322-89144-0

NE: Staudt, Andreas

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlags unzulässig und strafbar. Das gilt besonders für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

© B. G. Teubner Stuttgart 1995

Satz: Schreibdienst Henning Heinze, Nürnberg

Vorwort

Viele zentrale Fragen der Teilchenphysik jenseits der Möglichkeiten moderner Beschleuniger lassen sich durch Nicht-Beschleuniger-Experimente untersuchen. Andere hängen in vielfältiger Weise mit der Evolution des Universums und der Kosmologie zusammen. Sich dies und die sich daraus ergebenden Möglichkeiten vor Augen zu führen, mag von besonderer Aktualität sein in einem Augenblick, wo die Elementarteilchenphysik in ein Stadium extremer Anforderungen an neue Beschleunigergenerationen getreten ist. Die rasante Entwicklung und zunehmende Bedeutung von Nicht-Beschleuniger-Experimenten u.a. in zahlreichen Untergrundlabors in den letzten Jahren spricht eine deutliche Sprache. In diesem Buch werden die wichtigsten auf diese Weise gegebenen Möglichkeiten, zum Verständnis der Teilchenphysik beizutragen, zusammengetragen und diskutiert. Wir glauben, damit eine Lücke in der gegenwärtigen Literatur auszufüllen.

Das Buch gibt damit zugleich einen Einblick in aktuelle Aspekte der modernen Physik. Hervorgegangen aus Seminaren an der Universität Heidelberg – wendet es sich an Physikstudenten mittlerer Semester, aber auch an Leser, die sich allgemein für aktuelle Fragen der modernen Physik interessieren, insbesondere auch für die engen Zusammenhänge zwischen Teilchen-, Kern- und Astrophysik.

Zum Dank verpflichtet für kritisches Lesen des Manuskripts und nützliche Ratschläge sind wir den Herren Prof. Ewan Squires (Dep. of Mathematical Science, University of Durham) und Dr. Brian Foster (Physics Dep., University of Bristol), sowie Dr. Martin Hirsch (Max-Planck-Institut für Kernphysik, Heidelberg). Zu danken haben wir ferner Herrn Dr. Jens Bockholt für seine Hilfe beim Schreiben des Manuskripts und Frau Veronika Träumer für die unermüdliche Hilfe bei der Erstellung der Abbildungen.

Besonderen Dank gebührt Herrn Dr. P. Spuhler vom Teubner Verlag für die vertrauensvolle Zusammenarbeit.

Heidelberg/Köln
im Sommer 1995

H.V. Klapdor-Kleingrothaus, A. Staudt

Inhalt

1	Moderne Elementarteilchentheorien	9
1.1	Die elementaren Bausteine der Materie	10
1.1.1	Einführung	10
1.1.2	Leptonen und Quarks	10
1.1.3	Antiteilchen	13
1.1.4	Aufbau der Hadronen aus Quarks	13
1.2	Die elementaren Wechselwirkungen	14
1.2.1	Einleitung	14
1.2.2	Der Begriff der Wechselwirkung in modernen Quantenfeldtheorien	14
1.2.3	Die Reichweite einer Austauschwechselwirkung	19
1.2.4	Phänomenologie der bekannten Wechselwirkungen	21
1.3	Symmetrien und Invarianzen	26
1.3.1	Symmetrioperationen in der modernen Physik	26
1.3.2	Modelle für eine T - und CP -Verletzung	32
1.4	Eichtheorien und das Standardmodell	37
1.4.1	Einleitung	37
1.4.2	Das Eichprinzip	38
1.4.3	Die spontane Symmetriebrechung	44
1.4.4	Das Glashow-Weinberg-Salam-Modell	48
1.4.5	Die starke Wechselwirkung	51
1.4.6	Die $SU(3)_c \otimes SU(2)_L \otimes U(1)$ -Gruppe – das Standardmodell	53
1.5	Modelle der Großen Vereinigung	55
1.5.1	Motivation von GUT's	55
1.5.2	Effektive Kopplungskonstanten	56
1.5.3	Das $SU(5)$ -Modell	60
1.5.4	Das $SO(10)$ -Modell	62
1.5.5	Supersymmetrische GUT-Modelle	65
1.5.6	Superstrings	67

1.6	Die Beschreibung von Neutrinos	68
1.6.1	Parität und Ladungskonjugation bei Neutrinos	68
1.6.2	Dirac- und Majoranabeschreibung	70
1.6.3	Die physikalische Neutrinomasse	73
1.6.4	Neutrinos in GUT-Modellen	75
1.7	Ausblick	78
2	Zur Teilchenphysik mit Beschleunigern	82
2.1	Energieskalen gegenwärtiger und zukünftiger Beschleuniger . .	83
2.2	Zur Physik an den Beschleunigern bis um die Jahrtausendwende	101
2.2.1	Tests des Standardmodells durch LEP und SLC	108
2.3	Ausblick. Beschleuniger- und Nicht-Beschleuniger-Experimente	123
3	Das frühe Universum und Teilchenphysik	125
3.1	Das kosmologische Standardmodell	125
3.2	Inflationäre Modelle	133
3.3	Die primordiale Nukleosynthese	134
3.3.1	Beobachtete Häufigkeiten der primordialen Elemente	135
3.3.2	Der Ablauf der Nukleosynthese	136
3.3.3	Die Anzahl der Neutrinoflavours	141
4	Der Protonzerfall	144
4.1	Die Baryonenzahl	144
4.2	Theoretische Vorhersagen für die Lebensdauer des Protons .	146
4.2.1	Der Protonzerfall im $SU(5)$ -Modell	146
4.2.2	Der Protonzerfall in supersymmetrischen GUT-Modellen . . .	151
4.3	Experimente zum Protonzerfall	152
4.3.1	Indirekter Nachweis	153
4.3.2	Direkter Nachweis	154
5	Neutron-Antineutron-Oszillationen, elektrisches Dipolmoment des Neutrons	170
5.1	Das elektrische Dipolmoment von Elementarteilchen	170
5.2	Experimente zur Messung des elektrischen Dipolmoments des Neutrons	174
5.2.1	Das Prinzip der Messungen	174
5.2.2	Der Neutronenspiegel	175

6 Inhalt

5.2.3	Experimente an einem Neutronenstrahl	177
5.2.4	Experimente an gespeicherten Neutronen	179
5.2.5	Das θ -Problem	182
5.2.6	Das elektrische Dipolmoment anderer Teilchen	183
5.3	Neutron-Antineutron-Oszillationen	184
5.3.1	Einleitung	184
5.3.2	Die Phänomenologie der $n\bar{n}$ -Oszillationen	186
5.3.3	Experimente zu $n\bar{n}$ -Oszillationen	191
6	Experimente zur Bestimmung der Neutrinomasse	198
6.1	Die direkte Bestimmung der Neutrinomasse in Zerfallsexperimenten	199
6.1.1	Der Kernbetazerfall und die Masse des Elektronneutrinos	199
6.1.2	Das 17-keV-Neutrino	221
6.1.3	Die Massen von Myon- und Tauneutrino	226
6.2	Der Doppelbetazerfall	228
6.2.1	Einleitung	228
6.2.2	Die verschiedenen Zerfallsmodi	231
6.2.3	Der doppelte Betazerfall im Rahmen der Großen Vereinigungstheorien	236
6.2.4	Die Doppelbeta-Zerfallsraten	241
6.2.5	Experimente zum Doppelbetazerfall	256
6.2.6	Die Neutrinomischung im $0\nu\beta\beta$ -Zerfall	289
6.3	Die Supernova SN1987A	293
6.4	Der Neutrinozerfall	298
7	Neutrinooszillationen	303
7.1	Einleitung und Phänomenologie der Neutrinooszillationen	303
7.2	Der Formalismus	305
7.2.1	Die Massenmatrix und die Teilchenmischung	305
7.2.2	Flavoroszillationen	307
7.2.3	Zeitliche Mittelwerte	310
7.2.4	Neutrinooszillationen und die Prinzipien der Quantenmechanik	311
7.2.5	Mischung von zwei Neutrinoflavors	314
7.3	Experimente zu Neutrinooszillationen	316
7.3.1	Die Empfindlichkeit verschiedener experimenteller Anordnungen	316
7.3.2	Reaktorexperimente	320

7.3.3	Beschleunigerexperimente	330
7.3.4	Experimente mit solaren Neutrinos	334
7.3.5	Der Mikheyev-Smirnov-Wolfenstein-Effekt	352
7.3.6	Das magnetische Moment des Neutrinos	370
7.3.7	Der Neutrinozerfall	373
7.3.8	Neuere Experimente zum Nachweis solarer Neutrinos	373
7.3.9	Atmosphärische Neutrinos	383
8	Magnetische Monopole	386
8.1	Einleitung, historischer Überblick	386
8.2	Theoretische Konzepte zur Einführung von magnetischen Monopolen	387
8.2.1	Die Symmetrie der Maxwell-Gleichungen	387
8.2.2	Die Diracsche Quantisierungsbedingung	389
8.2.3	GUT-Monopole	394
8.2.4	Die Häufigkeit magnetischer Monopole im Universum	398
8.3	Prinzipien zum Nachweis magnetischer Monopole	401
8.3.1	Induktionstechniken	401
8.3.2	Wechselwirkung von Monopolen mit Materie	403
8.4	Experimentelle Ergebnisse	406
8.4.1	Die Suche nach Dirac-Monopolen	406
8.4.2	Die Suche nach GUT-Monopolen	407
9	Die Suche nach dunkler Materie im Kosmos	416
9.1	Hinweise auf die Existenz dunkler Materie	418
9.1.1	Rotationskurven von Galaxien	418
9.1.2	Die Dynamik von Galaxienhaufen	423
9.1.3	Hinweise aus der Kosmologie	424
9.2	Kandidaten für dunkle Materie	428
9.2.1	Die kosmologische Konstante, MOND-Theorie, zeitabhängige Gravitationskonstante	428
9.2.2	Baryonische dunkle Materie	430
9.2.3	Nicht-baryonische dunkle Materie	431
9.3	Experimente zum Nachweis dunkler Materie	441
9.3.1	Experimente zum Nachweis des Axions	442
9.3.2	Der Nachweis von WIMP's	445
9.3.3	Suche nach Quark-Nuggets (Nukleariten)	451

10	Fraktionell geladene Teilchen	452
10.1	Das Quark-Confinement	452
10.2	Experimente zur Suche nach freien Quarks	453
10.2.1	Der Millikan-Versuch	453
10.2.2	Erzeugung freier Quarks an Beschleunigern	455
10.2.3	Die Suche in der kosmischen Strahlung	456
10.2.4	Die Suche nach fraktionell geladenen Teilchen in Materie . . .	459
11	Fünfte Kraft: Theoretische Erwartungen und experimenteller Status	468
11.1	Einleitung	468
11.2	Theoretische Erwartungen	468
11.2.1	Das Äquivalenzprinzip	469
11.2.2	Das Yukawa-Potential in Bosonenaustausch-Modellen	471
11.2.3	Baryonenzahlabhängige fünfte Kraft	474
11.2.4	Quantentheorien der Gravitation	476
11.3	Die experimentelle Suche nach einer fünften Kraft	478
11.3.1	Das geophysikalische Fenster	478
11.3.2	Die Überprüfung des $1/r^2$ -Gesetzes	479
11.3.3	Substanzabhängigkeit der Gravitation	485
12	Zeitabhängigkeit von Naturkonstanten	499
12.1	Einleitung	499
12.2	Vorhersagen der Theorie	503
12.3	Experimente zur Suche nach der Zeitabhängigkeit von Naturkonstanten	508
12.3.1	Die Auslegung von Experimenten	508
12.3.2	Experimente zur gegenwärtigen Variation	509
12.3.3	Experimente zu früheren Variationen	515
12.4	Abschließende Bemerkungen und Ausblick	524
	Literaturverzeichnis	526
	Quellennachweis	565
	Sachverzeichnis	566