

# Jenseits der Nanowelt

Hans Günter Dosch

# Jenseits der Nanowelt

Leptonen, Quarks und Eichbosonen

Mit 91 Abbildungen

 Springer

Prof. Dr. Hans Günter Dosch

Universität Heidelberg  
Institut für Theoretische Physik  
Philosophenweg 16  
69120 Heidelberg

Bibliographische Information der Deutschen Bibliothek.

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet über <<http://dnb.ddb.de>> abrufbar.

ISBN 3-540-22889-6 Springer Berlin Heidelberg New York

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes..

Springer ist ein Unternehmen von Springer Science+Business Media  
[springer.de](http://springer.de)

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2005  
Printed in Germany

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, daß solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z.B. DIN, VDI, VDE) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden sein, so kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.

Satz: Daten vom Autor mit einem Springer  $\text{T}_{\text{E}}\text{X}$  Makropaket erstellt  
Einbandgestaltung: Erich Kirchner, Heidelberg

Printed on acid-free paper 54/3141/mh 5 4 3 2 1 0

Dem Andenken von J.H.D. Jensen  
Für Simon, Lino, Jonas und Bippo

# Vorwort

Daß die Materie aus Atomen und Molekülen aufgebaut ist, ist schon weit in unser Bewußtsein vorgedrungen. Aufnahmen mit Hilfe von Tunnelmikroskopen machen diesen „körnigen Aufbau“ der Materie sogar direkt bildlich wahrnehmbar. Die Welt der Atome und Moleküle, die etwa eine Million mal kleiner sind als die Strukturen, die wir direkt sehen und fühlen können, ist die „Nanowelt“. Ihrer bemächtigt sich heute auch die Technik in zunehmendem Maße. Dieses Buch handelt von Strukturen jenseits der Nanowelt, von *Leptonen*, *Quarks* und *Eichbosonen*. Leptonen und Quarks sind die kleinsten Bausteine der Atome, zusammengehalten wird dieses Innerste der Welt von den Eichbosonen.

Um die Eigenschaften dieser Teilchen zu untersuchen, braucht man „Mikroskope“, die um mindestens eine millionmal stärker vergrößern als die Tunnelmikroskope. Dies können die großen Beschleuniger, wie sie seit der Mitte des 20. Jahrhunderts gebaut werden. Die theoretischen Konzepte, die im ersten Drittel des vorigen Jahrhunderts zur Erklärung der Physik der Atome entwickelt wurden, reichen jedoch aus, um auch die Strukturen jenseits der Nanowelt zu erklären.

Das Buch ist zwar historisch aufgebaut, versucht aber eher eine Ideengeschichte als eine Tatsachengeschichte zu vermitteln. Prioritätsfragen interessieren weniger als die Entwicklung der grundlegenden Gedanken und das Zusammenspiel von Experiment und Theorie. Natürlich lassen sich bei einer solchen Darstellung persönliche Ansichten des Autors nicht ausblenden. Sollte ein Spezialist der Elementarteilchenphysik in dieses Buch schauen, so hoffe ich zwar, daß er nichts findet, was er für falsch hält, aber ich bin sicher, daß er die Gebiete, auf denen er sich besonders gut auskennt, als viel zu stiefmütterlich behandelt ansieht. Ich habe versucht, einigen wirklich grundlegenden Konzepten einen verhältnismäßig breiten Raum einzuräumen, andere Gebiete dagegen – auch wenn sie in der Entwicklung eine entscheidende Rolle spielten – werden dagegen oft nur recht kurz behandelt; dies trifft besonders zu, wenn solche Gebiete nur schwer zu vermitteln sind.

Ich wende mich an allgemein naturwissenschaftlich interessierte Leserinnen und Leser und versuche, den Stoff so verständlich wie nur irgend möglich darzustellen. Die moderne Physik hat wie vielleicht keine andere Wissenschaft gezeigt, wie der menschliche Verstand die durch die Alltagserfahrung bestimmten Grenzen unserer Anschauung überwinden kann und wie er ordnend erklären kann, was wir durch die kaum vorstellbare Erweiterung unserer möglichen Erfahrung an Wissen sammeln. Dies wäre ohne die Mathematik nicht möglich, und daher spielt sie eine wesentliche Rolle, wenn man das spezifisch Neue der Teilchenphysik erfassen will. Dennoch verzichte ich weitgehend auf Formeln, versuche aber, komplexere mathematische Zusammenhänge in Worten zumindest anzudeuten, auch wenn dies manchmal zu Verzerrungen und halbweisen Formulierungen führen mag. Dies gilt besonders für die Abschnitte 1.4 und 1.5. Ein Anhang mit (einfachen) Formeln und Rechnungen ist auf der *homepage* des Buches zu finden: <http://www.thphys.uni-heidelberg.de/~dosch/transnano>

Ein unentbehrlicher Leitfaden durch das Labyrinth der Geschichte war mir das Buch „Inward Bound“ von Abraham Pais, der selbst ein Hauptakteur der Geschichte der Elementarteilchenphysik war; sein Buch behandelt die Zeit von etwa 1890–1990.

Manche Einzelheit verdanke ich den historischen Übersichtsartikeln, die andere aktiv arbeitende Physikerinnen und Physiker verfaßt haben, mein grundlegendes Material sind aber die Originalarbeiten, die in den Fachzeitschriften publiziert sind.

Ich gebe, neben den Quellen für die Abbildungen, nur wenige Bücher und Übersichtsartikel an, ein ausführliches Verzeichnis der Originalliteratur ist auf der oben erwähnten *homepage* zu finden.

Ich bin vielen Kolleginnen und Kollegen für zahlreiche Diskussionen zu Dank verpflichtet, mein besonders herzlicher Dank für wertvolle Hinweise gilt Prof. Dr. W. Beiglböck, I. Köser, Prof. Dr. B. Lohff und einem mir unbekanntem Referenten.

Heidelberg, im August 2004

*Hans Günter Dosch*

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Die heroische Zeit</b>	1
1.1	Einleitung	1
1.2	Die heile Welt	7
1.3	Kontrolle ist besser	16
1.4	Die Quantenphysik wird entscheidend	21
1.4.1	Spezielle Relativitätstheorie und Quantenphysik	22
1.4.2	Feldtheorie und Quantenphysik	27
1.4.3	Quantenphysik und Fehler	39
1.5	Das Ebenmaß der Elementarteilchen	40
1.5.1	Symmetrien und Transformationen	41
1.5.2	Das Wunder des Spins	46
1.5.3	Der Isospin	49
1.5.4	Diskrete Symmetrien	52
1.6	Die Entdeckung des Positrons und des „Mesotrons“	54
1.7	Frühe Beschleuniger	61
<b>2</b>	<b>Der große Sprung</b>	65
2.1	Das vorhergesagte Meson wird wirklich entdeckt	65
2.2	Seltsame Teilchen sorgen für Aufregung	69
2.3	Leicht verstimmte Teilchen	74
2.4	Erfolge und Mißerfolge der Quantenfeldtheorie	77
2.5	Beginn einer neuen Spektroskopie	82
2.6	Man kann immer mehr produzieren und immer besser sehen	86
2.7	Immer mehr neue Teilchen	89
2.8	Die Überraschungen der schwachen Wechselwirkung	94
2.8.1	Einschub: Rechts- und linkshändige Teilchen	97
2.8.2	Zurück zur schwachen Wechselwirkung	99

<b>3</b>	<b>Der Versuch, sich am eigenen Zopf</b>	
	<b>aus dem Sumpf zu ziehen</b> .....	103
3.1	<i>S</i> -Matrix-Theorie .....	103
3.2	Streuamplituden .....	105
3.3	„Bootstrap“ und „nuclear democracy“ .....	111
3.4	Strenge Theoreme und komplexe Drehimpulse .....	114
<b>4</b>	<b>Zusammengesetzte „Elementar“-Teilchen</b> .....	117
4.1	Erste Anfänge .....	117
4.2	Der achtfache Weg .....	120
4.3	Das Quarkmodell .....	127
4.4	Die Quarks werden farbig .....	134
<b>5</b>	<b>Auf dem Weg zum Standardmodell</b> .....	139
5.1	Der Eichmeister .....	139
5.2	Die Eichungen werden mehrdimensional .....	146
5.3	Spontane Symmetriebrechung .....	149
5.4	Das Festmahl von Higgs und Kibble .....	154
5.5	Anomalien .....	157
5.6	Bessere Zähler, bessere Beschleuniger und bessere Strahlen .....	159
5.7	Die Elektronenmikroskope der Elementarteilchenphysik .....	164
5.8	Tief inelastische Streuung .....	168
<b>6</b>	<b>Das Standardmodell</b>	
	<b>der Elementarteilchenphysik</b> .....	173
6.1	Einleitung .....	173
6.2	Ein Modell für Leptonen .....	175
6.3	Schwache Ströme .....	179
	6.3.1 Ein Wunder wird weggezaubert .....	179
	6.3.2 Die Nadel im Heuhaufen wird gefunden .....	183
6.4	Eine Dynamik für die starke Wechselwirkung .....	185
6.5	Laufende Kopplung und asymptotische Freiheit .....	188
6.6	Quantitative Rechnungen in der starken Wechselwirkung .....	195
6.7	Quantenchromodynamik auf dem Gitter .....	199
6.8	Die Konsolidierung des Standardmodells .....	202
6.9	Die Massen der Quarks und deren Folgen .....	213
6.10	Das Standardmodell in voller Schönheit .....	216



<b>7</b>	<b>Dunkle Wolken oder Morgenröte</b>	
	<b>einer neuen Physik?</b> .....	223
7.1	Auch die Neutrinos sind verstimmt .....	223
7.2	Warum haben Elementarteilchen Massen ? .....	230
7.3	Die große Einheit .....	231
7.4	Die Supersymmetrie .....	234
7.5	Monopole .....	238
7.6	Der Mikrokosmos und der Makrokosmos .....	240
	7.6.1 Was wir wissen und was wir noch nicht wissen ..	240
	7.6.2 Materie im Universum .....	241
	7.6.3 Die widerspenstige Schwerkraft .....	244
7.7	Ruhige Saiten .....	246
<b>8</b>	<b>Epilog</b> .....	251
8.1	Besonderheiten der Elementarteilchenphysik .....	251
8.2	„... Philosophie zu Rate ziehn“ .....	258
<b>A</b>	<b>Anhänge</b> .....	265
A.1	Physikalische Einheiten .....	265
A.2	Glossar .....	268
A.3	Nobelpreisträger .....	280
A.4	Kurzer Literaturhinweis .....	291
	<b>Namensverzeichnis</b> .....	293

# Quellennachweise für übernommene Abbildungen

Copyright bei den Verlagen

- Abb. 1.2, 2.9, 2.10, 2.11 H.L. Anderson. Early History of Physics with Accelerators. *Journal de Physique*, 43, Colloque C-8,:C8–101, 1982.
- Abb. 2.1, 2.2, 2.3, 2.4 Ch. Peyrou The Role of Cosmic Rays in the Development of Particle Physics. *Journal de Physique*, 43, Colloque C-8,:C101–162, 1982.
- Abb. 1.22(**Links**): C.D. Anderson. *Phys. Rev.*, 43:491, 1933.
- Abb. 1.23: S.H. Neddermeyer and C.D. Anderson. *Phys. Rev.*, 51:884, 1937.
- Abb. 3.4, 7.5 8.2: S. Donnachie, G. Dosch, P. Landshoff, and O. Nachtmann. *Pomeron Physics and QCD*. Cambridge University Press, Cambridge, England, 2002.
- Abb. 4.5: Barnes, V.E. *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 12:204, 1964.
- Abb. 5.8: R. Schwitters. Development of Large Detectors for Colliding-Beam Experiments. In L. Hoddeson *et al.*, editors, *The Rise of the Standard Model*, page 299. Cambridge University Press, 1997.
- Abb. 6.11, 6.12, 7.2, 8.1: S. Eidelman *et al.* [Particle Data Group Collaboration]. Review of particle physics. *Phys. Lett.*, B 592:1, 2004.