

Klaus Bethge Gertrud Walter
Bernhard Wiedemann

Kernphysik

Eine Einführung

Zweite, aktualisierte und erweiterte Auflage

Mit 200 Abbildungen, einer farbigen Klapptafel,
25 Tabellen, 100 Übungen mit ausführlichen Lösungen
sowie Kästen zur Erläuterung
und einem historischen Überblick
über die Entwicklung der Kern- und Elementarteilchenphysik



Springer

Professor Dr. Klaus Bethge
Dr. Bernhard Wiedemann

Johann-Wolfgang-Goethe-Universität
Institut für Kernphysik
August-Euler-Strasse 6
60486 Frankfurt am Main
Deutschland

E-Mail: bethge@ikf.uni-frankfurt.de
wiedemann@ikf.uni-frankfurt.de

Dr. Gertrud Walter

GSI
Gesellschaft für Schwerionenforschung mbH
Planckstraße 1
64291 Darmstadt
Deutschland

E-Mail: g.walter@gsi.de

ISBN 3-540-41444-4 2. Auflage Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York

ISBN 3-540-61236-X 1. Auflage Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York

Die Deutsche Bibliothek - CIP-Einheitsaufnahme

Bethge, Klaus: Kernphysik : eine Einführung ; mit 25 Tabellen, 100 Übungen mit ausführlichen Lösungen sowie Kästen zur Erläuterung und einem historischen Überblick über die Entwicklung der Kern- und Elementarteilchenphysik / Klaus Bethge ; Gertrud Walter ; Bernhard Wiedemann. - 2., aktualisierte und erw. Aufl. - Berlin ; Heidelberg ; New York ; Barcelona ; Hongkong ; London ; Mailand ; Paris ; Singapur ; Tokio : Springer, 2001
(Springer-Lehrbuch)

ISBN 3-540-41444-4

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-Verlag Berlin Heidelberg New York
ein Unternehmen der BertelsmannSpringer Science+Business Media GmbH

<http://www.springer.de>

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1996, 2001
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.

Herstellung: Gertrud Dimler, Heidelberg
Satz und Umbruch: Druckfertige Daten von den Autoren
Zeichnungen: Claudia Freudenberger, Frankfurt
Einbandgestaltung: *design & production* GmbH, Heidelberg

Gedruckt auf säurefreiem Papier SPIN 10791873 56/3141/di 5 4 3 2 1 0

Vorwort zur 2. Auflage

Die erste Auflage des Lehrbuches ist sowohl im Kreis der Kollegen, die das Fach Kernphysik lehren, als auch von den Studierenden gut aufgenommen worden. Viele nützliche Hinweise erreichten uns, die wir nach bestem Wissen in diese zweite Auflage aufgenommen haben. Für diese Mitarbeit sowie für die zahlreichen Hinweise auf Satz-, Schreib- und Sachfehler möchten wir allen danken, die uns geschrieben haben. Für die zweite Auflage ist der Autorenkreis erweitert worden, denn eine Reihe von Ergänzungen haben sich in der Lehrpraxis als erforderlich erwiesen. Dies betrifft sowohl den Inhalt als auch die Übungsaufgaben. Neben kleineren Änderungen, die zum besseren Verständnis beitragen sollen, sind zusätzliche Themen, wie Cluster-Emission, Spin der Nukleonen aber vor allem die Anwendungen kernphysikalischer Methoden in der Medizin aufgenommen worden.

Prof. Dr. Andreas Schäfer (Universität Regensburg) hat wertvolle Ratschläge zur Darstellung des Problems des Nukleonenspins gegeben. Prof. Dr. Joachim Maruhn (Universität Frankfurt/Main) hat wesentlich zur verständlichen Darstellung der Cluster-Emission beigetragen.

Wir danken ferner Prof. Dr. Peter Braun-Munzinger (GSI) für die Zurverfügungstellung des Phasendiagramms der Kernmaterie, Prof. Dr. Fritz Bosch (GSI) für neue Hinweise auf den β -Zerfall in gebundene Zustände und Prof. Dr. Gerhard Kraft (GSI) für Details der Tumortherapie mit schweren Ionen sowie Prof. Dr. Hans Geissel (GSI) für viele Hinweise und umfangreiche Diskussionen zur Frage des Energieverlustes von Teilchen beim Durchgang durch Materie. Herr Prof. Dr. Ernst W. Otten (Universität Mainz) hat uns dankenswerterweise den kürzlich gemessenen Wert für die Masse des Neutrinos mitgeteilt. Ferner hat uns Dr. Branko Stahl (TU-Darmstadt) wertvolle Anregungen zur Behandlung des Mößbauer-Effekts gegeben.

Unser Dank geht auch an Dr. Dieter Pommerrenig (Universität Frankfurt/Main) und Prof. Dr. Joachim Happ (Universität Mainz) für die kritische Durchsicht der Teile des Manuskripts, die die medizinischen Anwendungen der Kernphysik beinhalten. Herr Dr. Peter Kreisler (Siemens AG, Erlangen) hat für die Darstellung der Kernspinresonanz-Tomographie wertvolle Ratschläge gegeben und uns eine Reihe von Bildern zur Verfügung gestellt. Schließlich danken wir Dr. Dieter Hofmann für die sehr sorgfältige Durchsicht des Gesamtmanuskripts.

Besonderer Dank gebührt erneut Frau Claudia Freudenberger für ihren umfangreichen Beitrag durch die sehr sorgfältige Neugestaltung fast aller Bilder.

Die hervorragende Zusammenarbeit mit dem Springer-Verlag, insbesondere mit Dr. Hans J. Kölsch sowie mit Frau Gertrud Dimler, hat sehr zur termingerechten Fertigstellung der 2. Auflage des Lehrbuches beigetragen. Wir hoffen auf eine ebenso gute Aufnahme wie zuvor.

Frankfurt am Main, November 2000

*Klaus Bethge
Gertrud Walter
Bernhard Wiedemann*

Inhaltsverzeichnis

Kästen zur Vertiefung	XVII
Glossar der Symbole	XIX
1. Einleitung	1
1.1 Was ist Kernphysik?	1
1.2 Ziele der kernphysikalischen Forschung	2
1.3 Historischer Überblick	5
1.4 Begriffe und Nomenklatur	27
2. Äußere Eigenschaften der Atomkerne	33
2.1 Ladung der Atomkerne	33
2.2 Masse der Atomkerne	33
2.3 Größe, Ladungsverteilung, Massenverteilung	35
2.4 Übungen	43
3. Innere Eigenschaften von Atomkernen	47
3.1 Bindungsenergien – Tröpfchenmodell	47
3.2 Spins	52
3.3 Elektrische und magnetische Momente	57
3.3.1 Magnetisches Dipolmoment	59
3.3.2 Elektrisches Quadrupolmoment	64
3.3.3 Experimentelle Methoden	65
3.3.4 Die Spins und magnetischen Momente von Proton und Neutron	68
3.4 Parität	70
3.5 Anregungsenergien	71
3.6 Isospin	72
3.7 Übungen	74
4. Kernmodelle	77
4.1 Thomas-Fermi-Modell	78
4.2 Einzelteilchenmodell – Schalenmodell der Atomkerne	84
4.2.1 Einzelteilchenmodell in sphärischen Koordinaten	85

4.2.2	Einzelteilchenmodell in deformierten Potentialen	95
4.2.3	Teilchenkorrelationen	95
4.3	Kollektive Kernmodelle	100
4.3.1	Kernrotationen	102
4.3.2	Kernvibrationen	107
4.3.3	Kopplung von Einzelteilchen an die Kollektivbewegung	109
4.3.4	Riesenresonanzen	109
4.4	Exotische Kerne	111
4.5	Übungen	114
5.	Experimentelle Verfahren der Kernphysik	117
5.1	Energieverlust von Strahlung beim Durchgang durch Materie	117
5.1.1	Wechselwirkung geladener Teilchen	118
5.1.2	Elektromagnetische Strahlung in Materie	127
5.2	Messung kernphysikalischer Bestimmungsgrößen	134
5.2.1	Impulsmessung	135
5.2.2	Energiesmessung	140
5.2.3	Zeitmessung	149
5.3	Detektorsysteme	153
5.4	Beschleuniger	156
5.4.1	Kaskadenbeschleuniger (Kaskadengenerator)	156
5.4.2	Bandgenerator	158
5.4.3	Zyklotron	159
5.4.4	Synchrotron	161
5.4.5	Linearbeschleuniger	163
5.4.6	Hochfrequenz-Quadrupol-Beschleuniger (RFQ)	165
5.5	Übungen	166
6.	Streuprozesse und Kernreaktionen	169
6.1	Erhaltungssätze	169
6.2	Wirkungsquerschnitt	175
6.3	Wechselwirkungen zwischen Atomkernen	182
6.3.1	Streuprozesse	183
6.3.2	Kernreaktionen	192
6.3.3	Kernreaktionen bei hohen Energien	212
6.4	Übungen	217
7.	Kernzerfälle – Radioaktivität	219
7.1	Radioaktives Zerfallsgesetz	219
7.2	Alpha-Zerfall	226
7.2.1	Protonen-Zerfall	234
7.2.2	Cluster-Emission	236
7.3	Kernspaltung	237
7.4	Beta-Zerfall	242
7.4.1	Phänomenologie des Beta-Zerfalls	242

7.4.2	Systematik der Beta-Zerfälle	246
7.4.3	Fermi-Theorie des Beta-Zerfalls	248
7.4.4	Neutrinos	252
7.4.5	Beta-Zerfall in gebundene Zustände	257
7.4.6	Nichterhaltung der Parität im Beta-Zerfall	259
7.5	Gamma-Übergänge, Multipolstrahlung	265
7.5.1	Kernisomerie	269
7.5.2	Konversionsprozesse	270
7.6	Mößbauer-Effekt	271
7.7	Übungen	275
8.	Kernkräfte	279
8.1	Das Deuteron	279
8.2	Streuzustände	280
8.2.1	Streuzustände im Zwei-Nukleonensystem	280
8.2.2	Streuzustände zur Bestimmung der Spin-Bahn-Wechselwirkung	282
8.3	Das phänomenologische Kernpotential	283
8.4	Vom Quark zum Kern	287
8.5	Der Nukleonenspin	292
8.6	Übungen	295
9.	Anwendungen der Kernphysik	297
9.1	Kernenergie	297
9.1.1	Kernkraftwerke	298
9.1.2	Energiegewinnung aus Fusionsreaktionen	302
9.2	Astrophysik	308
9.2.1	Energieerzeugungszyklen in Sternen	309
9.2.2	Prozesse der Elemententstehung	311
9.3	Datierungen	313
9.4	Festkörperphysik und Materialforschung	316
9.4.1	Elementanalyse	316
9.4.2	Strukturanalyse	322
9.5	Medizin	324
9.5.1	Biologische Strahlenwirkung und Strahlenschutz	324
9.5.2	Szintigraphie	330
9.5.3	Tumorthherapie	333
9.5.4	Positronen-Emissionstomographie	339
9.5.5	Kernspin-Tomographie (MRT)	340
9.6	Übungen	347
10.	Ausblick	349
A.	Physikalische Konstanten	353

B. Nützliche Internet-Adressen	355
C. Lösungen zu den Übungen	359
Literaturverzeichnis	381
Originalliteratur	381
Lehrbücher und weiterführende Literatur	391
Sachverzeichnis	395
Farbige Nuklidtafel	403