

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

© 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 $\text{\TeX}$ 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 halbwahren 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 unbekannten Referenten.

Heidelberg, im August 2004

Hans Günter Dosch

Inhaltsverzeichnis

1	Die heroische Zeit	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
2	Der große Sprung	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

3	Der Versuch, sich am eigenen Zopf aus dem Sumpf zu ziehen	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
4	Zusammengesetzte „Elementar“-Teilchen	117
4.1	Erste Anfänge	117
4.2	Der achtfache Weg	120
4.3	Das Quarkmodell	127
4.4	Die Quarks werden farbig	134
5	Auf dem Weg zum Standardmodell	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
6	Das Standardmodell der Elementarteilchenphysik	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

7	Dunkle Wolken oder Morgenröte einer neuen Physik?	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
8	Epilog	251
8.1	Besonderheiten der Elementarteilchenphysik	251
8.2	„... Philosophie zu Rate ziehn“	258
A	Anhänge	265
A.1	Physikalische Einheiten	265
A.2	Glossar	268
A.3	Nobelpreisträger	280
A.4	Kurzer Literaturhinweis	291
	Namensverzeichnis	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.

1 Die heroische Zeit

Die Grundlagen für die „moderne“ Physik – im Gegensatz zur „klassischen“ Physik – wurden in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts gelegt. Entscheidend war auf der Seite der Theorie die Entwicklung der Relativitätstheorie und der Quantenphysik, auf Seiten der Experimentalphysik die gesicherten Kenntnisse über den atomaren Aufbau der Materie und die Struktur der Atome. Fast jedes Gebiet der modernen Naturwissenschaft – von der Astrophysik bis zur medizinischen Diagnostik – ist durch die Methoden und Konzepte, die zu dieser Zeit entwickelt wurden, stark beeinflusst.

1.1 Einleitung

Die Wissenschaft von den Elementarteilchen ist alt. Die Hoffnung, die letzten Bausteine der Welt zu erforschen und sinnliche Eigenschaften wie süß und bitter, warm und kalt, auf diese letzten Bausteine der Materie, die Atome, zurückzuführen, ist schon ein Grundgedanke griechischer Naturphilosophie. Genauso alt ist die Hoffnung, die Sicherheit, die uns die Mathematik bietet, dabei auszunutzen. Dies versuchte schon vor mehr als 2000 Jahren Platon, der im Dialog „Timaios“ eine Theorie der Welt schilderte. Er benutzte dabei das strenge mathematische Ergebnis, daß es insgesamt nur fünf gleichflächige Körper gibt. Er ordnete den vier Elementen der Antike vier dieser „Platonischen Körper“ zu, wie in Abb. 1.1 dargestellt. „Der Erde wollen wir die Würfelgestalt zuweisen, denn die Erde ist von den vier Arten die unbeweglichste und unter den Körpern die plastischste. ... Was die wenigsten Grundflächen hat, und nach allen Richtungen beweglichste, schneidenste und spitzeste, die Pyramide, entspricht dem Feuer.“ Weiter ordnete er dem Wasser den Oktaeder und der Luft den Ikosaeder zu. Den noch übriggebliebenen Dodekaeder, der der Kugel am ähnlichsten ist, ordnete er dem All zu. Platon ist dabei wissenschaftlich sehr zurückhaltend, vorsichtiger etwa als später Galilei, wenn er nur Plausibilität, keineswegs aber Notwendigkeit für die Zuordnung beansprucht.

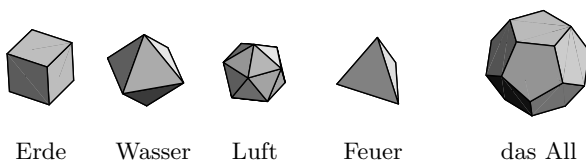


Abbildung 1.1. Die Zuordnung der vier Elemente der Antike und des Alls zu den „Platonischen Körpern“

In seinem Buch „Der Teil und das Ganze“ schreibt Werner Heisenberg, daß er dies als Abiturient zwar sehr spekulativ gefunden habe, aber einleuchtender und für die Wissenschaft fruchtbarer, als die Abbildungen der Atome aus seinen Schulbüchern, die Haken und Ösen hatten.

Die antike Atomlehre ist in den sechs Büchern des Lehrgedichts „Über die Natur“ von Lukretz zusammengefaßt. Natürlich bestehen ganz wesentliche Unterschiede zwischen der antiken Naturphilosophie und der modernen Elementarteilchenphysik, aber die grundsätzliche Idee und sogar manche methodischen Ansätze sind geblieben. Dies zeigt sich auch in dem großen Einfluß, den die antiken Gedanken bis in die Neuzeit hatten. Der Einfluß von Platon auf Galilei und Kepler ist wohl bekannt. Der Ausdruck „Lukretzsche Atome“ wurde noch im 19. Jahrhundert gebraucht. Der schottische Physiker Lord Kelvin schlug 1866 ein sehr abstraktes und modern anmutendes „topologisches“ Modell für Elementarteilchen vor, nämlich die Wirbelatome, in dem die Atome Wirbel im Äther waren. H. Helmholtz hatte kurz zuvor gezeigt, daß solche Wirbel in einer idealen Flüssigkeit absolut stabil sind, und deswegen erschienen sie Kelvin als ein sehr plausibles Modell für die – wie er schreibt – „Lukretzschen Atome“.

Als die ersten Elementarteilchen-Theoretiker im heutigen Sinne darf man wohl die Chemiker betrachten. Deren fundamentale Teilchen waren die Grundbausteine der chemischen Elemente, die wir heute noch Atome nennen. Sie zogen auch wichtige quantitative Konsequenzen aus dieser Atomtheorie. Mit der Entdeckung des Elektrons zeigte sich jedoch, daß man noch einfachere Teilchen finden konnte als die Atome der Chemiker.

Ich möchte hier nicht die Geschichte der gesamten Atomtheorie schildern, sondern die Frühgeschichte der modernen Elementarteilchenphysik mit der Entdeckung des Elektrons (1899) beginnen. Von da an war die Bezeichnung Elementarteilchen recht unterschiedlichen Objekten vorbehalten. Bis etwa 1935 war die Situation einfach, die gesicherten

Elementarteilchen waren: das *Proton* und das *Neutron* als Bestandteile des Atomkerns, das *Elektron* als Bestandteil der Atomhülle und das *Photon* als Quant der elektrodynamischen Strahlung. Dazu kamen in den späten dreißiger Jahren des 20. Jahrhunderts noch das „*Mesotron*“, das die Kernkräfte erklären, und das hypothetische *Neutrino*, das beim radioaktiven Zerfall entstehen sollte. Ab 1950 wurde die Situation immer komplexer, es wurden mehr und mehr Teilchen entdeckt, die man mit genauso gutem Recht als Elementarteilchen bezeichnen konnte wie die altbekannten. Auch die theoretische Beschreibung mit den bewährten Methoden schien nicht mehr sinnvoll. Dies führte zur Ära der sogenannten *nuclear democracy*. Danach sollte es sehr viele gleichberechtigte Teilchen geben, die sich gegenseitig in ihrer Existenz bedingten. Die Methoden dieses Programms stellten sich aber bald als unzureichend und teilweise sogar als inkonsistent heraus. Es entwickelte sich langsam ein theoretisch zunächst noch schlecht begründetes Bild, bei dem die Kernbestandteile wie Proton, Neutron und all die vielen anderen Teilchen der *nuclear democracy* selbst wieder aus einfacheren Bestandteilen, den sogenannten *Quarks*, zusammengesetzt sind. Dieses Modell wurde bald in eine sehr konsistente Theorie, die sogenannte Quantenchromodynamik, eingebaut. Die Entwicklung des „Teilchen-Zoos“ ist in Abb. 6.14 am Ende des Buches graphisch dargestellt.

Heute fällt die Antwort auf die Frage nach „den“ Elementarteilchen wieder leichter als vor 40 Jahren. Die Ziele sind aber ehrgeiziger geworden: Man versucht heute nicht nur die Eigenschaften der Materie aus den Elementarteilchen zu erklären, sondern möchte auch noch die Eigenschaften der Elementarteilchen selbst aus allgemeinen Prinzipien herleiten: Dies ist der „Traum einer endgültigen Theorie“, den der Nobelpreistäger S. Weinberg in seinem Buch schildert. Wir sind heute von diesem Zustand der Theorie weiter entfernt als es 1993 erschien, als Weinberg seinen Traum träumte.

Während in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts die Theorie eine führende Rolle spielte, sind die Fortschritte in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts weitgehend durch die experimentelle Technik bestimmt. Zwar wurde auch hier die Basis in der ersten Hälfte des Jahrhunderts gelegt, doch die immense Entwicklung läßt sich schon an dem Größenwachstum der Geräte ablesen, wie aus der Abb. 1.2 ersichtlich wird: Der „große“ Beschleuniger, den E.O. Lawrence 1932 baute, hatten einen Durchmesser von weniger als einem Meter. Der z. Zt. im Ausbau befindliche *Large Hadron Collider* (LHC) am CERN in Genf überschreitet mit seinen 8.5 km Durchmesser die Grenzen des Kantons. Am Beschleunigerzentrum DESY in Hamburg wird ein Beschleuniger (TESLA) von etwa 33 km Länge geplant. Ursprüngliche Detektoren wa-

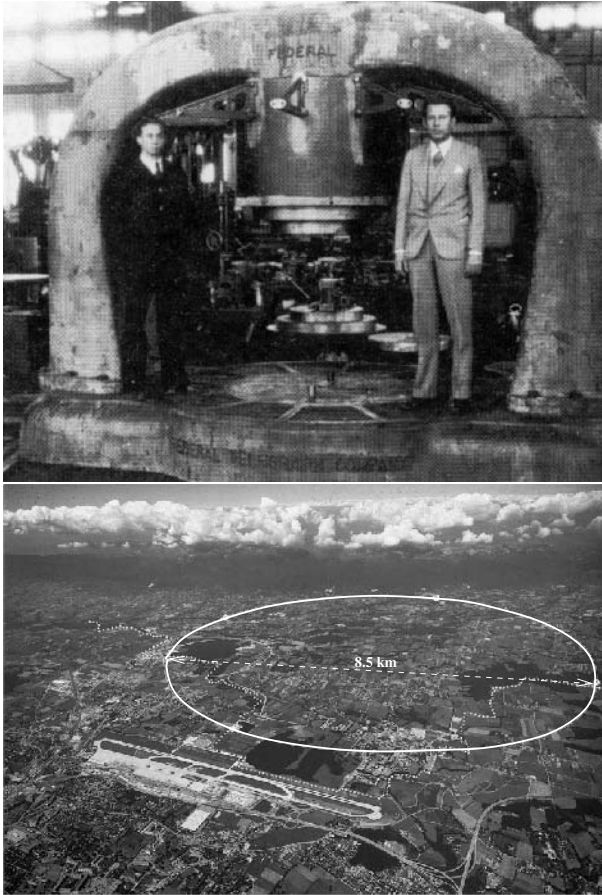


Abbildung 1.2. Wie die Beschleuniger größer wurden. **(Oben):** Lawrence (*rechts*) und ein Mitarbeiter im Joch des Magneten eines 37 Zoll-Zyklotrons von 1932. Das Joch des Magneten konnte günstig von der Federal Telegraph Company erstanden werden, da es durch die technische Entwicklung der Vakuumröhren nicht mehr benötigt wurde. **(Unten):** Der Ring vom großen Hadronen-Beschleuniger (LHC) am CERN in Genf

ren eher so groß wie Zigarrenkisten, heute sind sie so groß wie Häuser. Die Datenflüsse, die bei typischen Messungen auftreten, flößen selbst Kommunikationswissenschaftlern Ehrfurcht ein. Kein Wunder, daß das *world wide web* an einem Hochenergie-Labor, dem CERN in Genf, entwickelt wurde. Dementsprechend sind auch immer mehr Personen an einem Experiment beteiligt. Der Nachweis der Existenz von Antimaterie gelang C.D. Anderson 1933, sein Artikel in der Zeitschrift *Physical Review* ist vier Seiten lang. An der Entdeckung des *top*-Quarks im Jahre 1995 waren zwei große Forschungsgruppen beteiligt. Hier nimmt die Liste der beteiligten Autoren und Institutionen allein schon fast vier Seiten in Anspruch.

Die Neuzeit der Elementarteilchenphysik lasse ich etwa im Jahre 1950 beginnen. Seit dieser Zeit spielen die Beschleuniger die dominante Rolle in der Entwicklung. Heute läuft die Theorie wieder der Experimentalphysik voraus, wir haben zahlreiche theoretische Vorhersagen und Spekulationen, zu deren Überprüfung die Geräte der Experimentalphysik noch nicht ausreichen.

Wir glauben heute mit dem feldtheoretischen Standardmodell der Teilchenphysik die Dynamik der Teilchen erklären zu können. Viele Physiker machen sich eher Sorgen, daß diese Theorie zu gut erfüllt ist („keine Neue Physik“), statt sich über die bestehenden „schwarzen Wolken“ Gedanken zu machen. Es besteht weitgehender Konsens darüber, daß wir einen weiteren wesentlichen Fortschritt erst dann erzielen, wenn wir auch die Schwerkraft in die Quantentheorie der Felder einbeziehen können. Schon heute gibt es faszinierende Beziehungen zwischen der Physik des Größten und des Kleinsten: der Kosmologie und der Elementarteilchenphysik. Die Ergebnisse der Teilchenphysik sind wesentlich für das Verständnis der frühen Geschichte des Universums, und manche ihrer Spekulationen lassen sich nur durch Ergebnisse kosmologischer Untersuchungen testen.

Die physikalischen Einheiten, die in der Teilchenphysik benutzt werden, sind in einem eigenen Anhang erläutert und zusammengestellt. Ich möchte hier in der Einleitung nur das Allerwichtigste dazu erwähnen.

Zwei Naturkonstanten werden uns im Verlaufe immer wieder begegnen, die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum, abgekürzt mit dem Buchstaben c , und das Plancksche Wirkungsquantum h .

Die *Lichtgeschwindigkeit* wurde von dem dänischen Astronomen Olaf Römer zwar schon 1676 bestimmt, doch ihre überragende Bedeutung für die gesamte Physik wurde erst durch die spezielle Relativitätstheorie Einsteins 1905 deutlich. Die Geschwindigkeit des Lichts hat nämlich für alle Beobachter den gleichen Wert, gleichgültig, ob sie sich gegenüber der Lichtquelle bewegen oder ruhen. Nichts kann

schneller sein als das Licht, und insbesondere kann kein Signal schneller übermittelt werden als mit Lichtgeschwindigkeit. Das führt unter anderem zu der berühmten „Relativität der Zeit“. Ein und derselbe Vorgang kann für verschiedene Beobachter verschieden lange dauern. Das klingt zwar ungewohnt, ist aber eine empirisch bestens bestätigte Tatsache. Die Lichtgeschwindigkeit ist – was unsere tägliche Erfahrung betrifft – sehr groß: 300 000 Kilometer pro Sekunde.

Obwohl die Gesetze der speziellen Relativitätstheorie allgemein gelten, sind die Abweichungen von unseren anschaulichen Erwartungen erst dann zu bemerken, wenn wir Systeme betrachten, die sich mit einer Geschwindigkeit bewegen, die der des Lichts vergleichbar ist. Dann müssen die Gesetze der Newtonschen Mechanik durch die der speziellen Relativitätstheorie ersetzt werden. In der Teilchenphysik ist die Lichtgeschwindigkeit die natürliche Einheit für Geschwindigkeiten. „Ein Teilchen ist langsam“ heißt, seine Geschwindigkeit ist klein gegenüber der Lichtgeschwindigkeit, man sagt, es sei schnell, wenn seine Geschwindigkeit vergleichbar mit ihr ist.

Das Plancksche Wirkungsquantum wurde zur Erklärung von Strahlungsphänomenen 1900 von Max Planck eingeführt. Es ist bedeutend für atomare und subatomare Vorgänge und es ist die fundamentale Naturkonstante der Quantenphysik. Die „Wirkung“ ist in der Physik definiert als Produkt von Energie mal Zeit. Der Zahlenwert ist in Einheiten, die dem täglichen Leben angemessen sind, sehr klein. Er ist $6.626 \dots \cdot 10^{-34}$ Js (Joule mal Sekunde, das sind Kilogramm mal Meter zum Quadrat durch Sekunde); 10^{-34} bedeutet, daß die erste 6 an 34. Stelle hinter dem Komma steht. Höchstwahrscheinlich gilt die Quantenphysik auch für makroskopische Vorgänge, aber bei Prozessen, bei denen die Wirkung groß gegen das Plancksche Wirkungsquantum ist, kann man dieses näherungsweise gleich Null setzen und man kommt zur klassischen Physik. Der Drehimpuls hat die gleichen Einheiten wie die Wirkung, deshalb ist das Plancksche Wirkungsquantum die natürliche Einheit für diesen. Aus praktischen Gründen benutzt man meist das Plancksche Wirkungsquantum geteilt durch zwei π , bezeichnet mit $\hbar$ (sprich h-quer): $\hbar = h/(2\pi) = 1.05 \dots \cdot 10^{-34}$ Js.

Die in der Teilchenphysik übliche Energieeinheit ist das *Elektronenvolt*. Das ist die Energie, die ein Elektron gewinnt, wenn es eine Spannung von einem Volt durchläuft. Elektronen in einer Röntgenröhre, an die 10 000 Volt angelegt sind, haben also eine kinetische Energie von 10 000 Elektronenvolt.

Aus praktischen Gründen benutzt man meist das Mega-Elektronenvolt, MeV, das sind eine Million Elektronenvolt und das Giga-Elektronenvolt, GeV, das sind Tausend Mega-Elektronenvolt, also eine Milli-

arde Elektronenvolt. Als Masseneinheit benutzt man üblicherweise das Mega-Elektronenvolt geteilt durch das Quadrat der Lichtgeschwindigkeit, MeV/c^2 oder auch GeV/c^2 .

In einem Glossar sind die wichtigsten, immer wiederkehrenden Begriffe zusammengefaßt, mit Verweisen auf die Stellen im Buch, wo sie eingeführt werden.

1.2 Die heile Welt

Zunächst schildere ich kurz die Entdeckung und einige Eigenschaften der Elementarteilchen, die „natürlich“ vorkommen und unter normalen Bedingungen den Aufbau der Materie bestimmen.

Das Proton. Beim Proton, einem der wichtigsten Bausteine der Materie, ist es unmöglich, einen festen Zeitpunkt für die Entdeckung zu bestimmen. Wir wissen heute, daß das Proton der Atomkern des leichtesten chemischen Elements, nämlich des Wasserstoffs, ist. Aber als das Element Wasserstoff 1766 von dem Privatgelehrten Henry Cavendish entdeckt wurde, war keinesfalls klar, was ein chemisches Element, und noch viel weniger, was der Kern eines Atoms sei. Bemerkenswert ist allerdings die These, die der Mediziner William Prout 1815 aufstellte: Er folgerte aus den damals bekannten chemischen Atomgewichten, daß alle Elemente aus Wasserstoff zusammengesetzt seien. Diese These war in der Folgezeit sehr fruchtbar, auch wenn sie sich später als nicht ganz zutreffend herausstellte.

Die Ladung des Protons wird auch als Elementarladung bezeichnet. Sagt man, ein Teilchen habe die Ladung minus eins, so ist damit das Negative der Elementarladung gemeint. Die Masse des Protons ist $1.672 \dots \cdot 10^{-27}$ Kilogramm, in den für die Teilchenphysik üblichen Einheiten $938.2720 \text{ MeV}/c^2$. Ich möchte es hier bei diesen kurzen Bemerkungen belassen und einige andere wichtige Eigenschaften des Protons erst im Zusammenhang mit dem anderen Baustein der Atomkerne, dem Neutron, besprechen.

Das Elektron. Das Elektron ist das erste Elementarteilchen, bei dem man von einer recht klar umrissenen „Entdeckung“ sprechen kann, und es hält seinen Rang als Elementarteilchen auch noch heute.

Es fing an mit dem Bonner Glasbläser und Mechaniker H. Geissler, der um 1850 so dichte Röhren mit eingeschmolzenen Elektroden und so gute Luftpumpen baute, daß der Druck in den Röhren nur noch etwa ein Zehntausendstel des Atmosphärendrucks betrug. Damit untersuchte sein Chef J. Plücker, der auch als Mathematiker bekannt ist, sehr genau elektrische Entladungen in stark verdünnten Gasen. Er fand, daß

von dem negativ geladenen Pol, der Kathode, Strahlen ausgingen, die die gegenüberliegende Glaswand grün aufleuchten ließen. Dieser Effekt wird auch heute noch ausgenutzt, so z. B. bei Radarschirmen und in raffinierterer Form beim Farbfernseher. Der Entdecker der Radiowellen, Heinrich Hertz, fand, daß diese Strahlen dünne Aluminiumfolien durchdringen können, und dies wiederum brachte seinen Schüler Ph. Lenard auf die Idee, die Röhre mit einem Aluminiumfenster zu versehen, durch das die Strahlen aus der Röhre treten konnten. So konnte man bequem mit diesen „Kathodenstrahlen“ experimentieren. Die Natur der Strahlen lag im Dunkeln; in England war man geneigt, sie als Teilchenstrahlen zu betrachten, in Deutschland eher als „Vorgänge im Äther“. Wenn man sich die Interpretation als Teilchenstrahlen zu eigen machte, konnte man aus der Ablenkung im elektrischen und im magnetischen Feld das Verhältnis der Ladung zur Masse bestimmen. Im Januar 1897 schätzte E. Wiechert in Königsberg dieses Verhältnis auf Grund seiner Experimente als 2000 bis 4000 mal größer ab als beim Wasserstoffion, dem Proton. Er nahm gleiche Stärke für die Ladung an und schloß daraus auf die Existenz eines subatomaren Teilchens, das zwei bis viertausend mal leichter ist als ein Wasserstoffion.

Im gleichen Jahr hatten auch W. Kaufmann in Berlin und J.J. Thomson in Cambridge, England, dieses Verhältnis der Ladung zur Masse gemessen. Kaufmann fand einen Wert der etwa 1000 größer war als beim Wasserstoffion, Thomson einen etwa 770 mal größeren Wert. Die Schlußfolgerungen, die die beiden zogen, waren aber grundverschieden: Kaufmann argumentierte, daß sein Ergebnis schwer mit einer Teilcheninterpretation der Kathodenstrahlung zu vereinen sei, da man so leichte Teilchen nicht kannte. Thomson aber schloß: Es handelt sich um Teilchen die entweder erheblich leichter sind oder wesentlich stärker geladen sind als Wasserstoffionen (oder beides). 1899 kam dann der endgültige Durchbruch: Thomson benutzte ein neuartiges Instrument, die Nebelkammer; sein Schüler R.W. Wilson hatte sie entwickelt und wir werden sie im Abschn. 1.3 ausführlicher besprechen. Durch Tröpfchenzählen in dieser Kammer konnte Thomson die Ladung der Konstituenten der Kathodenstrahlung direkt bestimmen. Er fand einen Wert für die Ladung, der etwa 40% größer war als der heute gemessene Wert und schloß unter Benutzung seines schon vorher gemessenen Verhältnisses von Ladung zu Masse, daß die Teilchen ungefähr 60 mal leichter seien als Wasserstoffionen. Dieser Wert ist zwar etwa 30 mal größer als der heute bestimmte, aber dennoch war damit die Existenz eines Teilchens, das wesentlich leichter ist als das einfachste Atom, gesichert. Das Elektron war entdeckt. Ladung und Masse des Elektrons sind heute sehr genau bekannt: die Ladung ist genau eine negative Ele-

mentarladung, die Masse beträgt $0.51999899 \text{ MeV}/c^2$. Das Elektron ist also 1836 mal leichter als das Proton.

Bei der Entdeckung der Elektronen konzentrierte man sich auf zwei Eigenschaften: Ladung und Masse. Mit der Entwicklung der Quantenmechanik in den zwanziger Jahren des vorigen Jahrhunderts stellte sich noch eine weitere ganz charakteristische Eigenschaft heraus, die in unserer klassischen Vorstellung nur teilweise verständlich ist, das Elektron hat einen „Spin“. Dieser Spin hat viele Eigenschaften mit dem klassischen Drehimpuls gemeinsam, und die formale Beschreibung in der Quantenmechanik ist analog. In mancher Hinsicht kann man sich den Spin also als einen Eigendrehimpuls vorstellen. Das klassische Modell eines Elektrons als ein geladenes Kügelchen, das sich um eine Achse dreht, erklärt zwar einige Eigenschaften, während es bei anderen Eigenschaften vollständig versagt. Der Spin des Elektrons ist genau ein halbes Plancksches Wirkungsquantum: $\frac{1}{2}\hbar$. Wir kommen auf den Spin in Abschn. 1.5.2 noch ausführlich zurück.

Das Elektron wirkt wie ein kleiner Magnet. Die Stärke dieses Magneten, das magnetische Dipolmoment des Elektrons, ist (recht genau) der Wert des Spins multipliziert mit dem Verhältnis der Ladung zur Masse. Wäre der Spin ein gewöhnlicher Drehimpuls, so würde man ein nur halb so großes magnetisches Dipolmoment erwarten.

Atommodelle. Nach der Entdeckung des Elektrons entwickelte J.J. Thomson ein Atommodell, bei dem die Elektronen in einem ausgedehnten Atom verteilt waren wie Rosinen in einem Kuchen, siehe Abb. 1.3a. Dieses Modell erklärte recht gut einige wichtige Eigenschaften der Materie, zum Beispiel den optischen Brechungsindex.

Das Modell von Thomson wurde allerdings unhaltbar durch die Interpretation, die E. Rutherford den von H. Geiger und E. Marsden durchgeführten Experimenten gab. Obwohl die Experimente nicht direkt zur Entdeckung neuer Elementarteilchen führten, spielen sie in deren Geschichte eine bedeutende Rolle. Zum einen entwickelte sich aus diesen Ergebnissen ein neuer Zweig der Physik, die Kernphysik, die wiederum Vorläuferin der Teilchenphysik ist. Zum anderen aber ist die Methode, durch Streuung von Teilchen Erkenntnisse über die fundamentale Struktur der Materie zu gewinnen, wegweisend für die gesamte moderne Physik geworden.

Rutherford hatte schon früher die Streuung von *alpha*-Teilchen, also Heliumkernen, die beim radioaktiven Zerfall entstehen, an dünnen Goldfolien untersucht. Geiger, der wissenschaftlicher Mitarbeiter von Rutherford an dessen Institut in Manchester war, hatte diese Untersuchungen fortgesetzt und bestätigt, daß die *alpha*-Teilchen die Folien durchdrangen und dabei nur wenig durch die Goldatome abgelenkt wur-

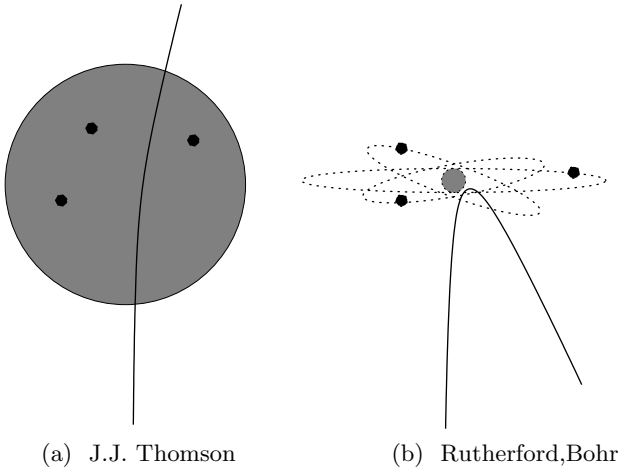


Abbildung 1.3. Atommodell von Thomson und von Rutherford. (a) Beim Thomsonschen Modell schwimmen die Elektronen (*schwarz*) im ausgedehnten, positiv geladenen Kern (*grau*) „wie Rosinen in einem Pudding“. (b) Beim Rutherford-Bohrschen Modell umkreisen die Elektronen wie Planeten den Kern. Die Zeichnung ist nicht maßstabgerecht. Die ausgezogene Kurve ist die Bahn eines *alpha*-Teilchens, das mitten auf das Atom trifft

den. Dies war zu erwarten, denn die Felder im ausgedehnten Thomson-Atom sind zu schwach, um ein *alpha*-Teilchen stark zu beeinflussen; in Abb. 1.3a ist eine typische Bahn eines *alpha*-Teilchens mitten durch ein Atom dargestellt. Obwohl die Ergebnisse den Erwartungen entsprachen, dachten Rutherford und Geiger, man könne den Studenten Marsden sinnvoll damit beschäftigen, nachzusehen, ob nicht vielleicht doch einige der *alpha*-Teilchen nach hinten abgelenkt würden, also die Folie gar nicht durchdrängen. Die ersten Resultate waren so unerwartet, als hätte man eine „15-Zoll-Granate auf ein Blatt Papier geschossen und sie wäre zurückgekommen“, wie Rutherford sagte. Er fand jedoch die Lösung: Ist die positive Ladung des Atoms nicht auf das ganze Atom mit seinem Durchmesser von etwa 0.1 Nanometer verteilt, sondern nur auf einen wesentlich kleineren Kern, so sind die elektrischen Felder stark genug, um auch ein – für damalige Verhältnisse – sehr energiereiches *alpha*-Teilchen abzulenken; dies ist in Abb. 1.3b gezeigt. Der Winkel zwischen der Einfallsrichtung und der Richtung des Teilchens, die es nach der Streuung hat, heißt Streuwinkel.

Geiger und Marsden führten sorgfältige und mühsame Versuchsreihen durch, deren Ergebnisse in Abb. 1.4 zusammengefaßt sind. Zwar

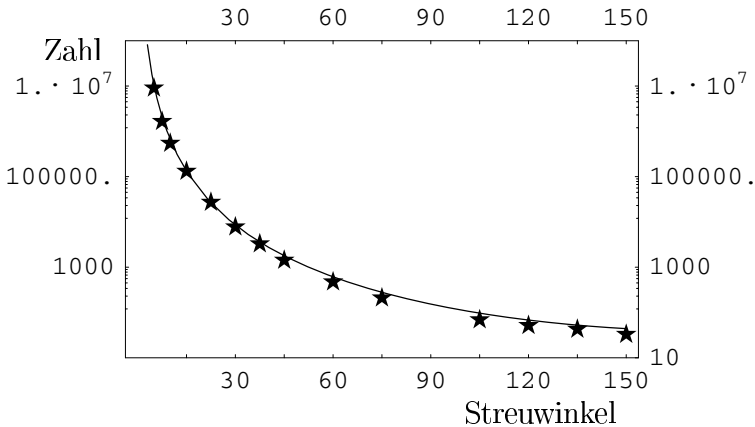


Abbildung 1.4. Ergebnisse des Streuexperiments von Geiger und Marsden. Aufgetragen ist die Zahl der gestreuten *alpha*-Teilchen, bezogen auf die gleiche Anzahl einfallender Teilchen, in Abhängigkeit vom Streuwinkel. Die durchgezogene Kurve ist der berechnete Wert für den Fall, daß die Ladung des Kerns in einem Punkt konzentriert ist

werden die meisten *alpha*-Teilchen nur wenig abgelenkt, d. h. die Zahl der Teilchen mit kleinen Streuwinkeln ist sehr groß, aber dennoch werden einige wenige auch nach hinten abgelenkt, das heißt der Streuwinkel ist größer als 90 Grad. Die ausgezogene Kurve zeigt den erwarteten Verlauf, wenn die gesamte positive Ladung auf einen Punkt konzentriert ist. Die kleine Abweichung der Meßwerte von dieser Kurve deutet allerdings schon an, daß auch der Kern eine endliche Ausdehnung hat. Aus dem Vergleich der theoretischen Kurve mit den experimentellen Daten konnte man schließen, daß der Durchmesser des positiven Atomkerns weniger als drei Tausendstel des Atomdurchmessers ist. Heute ist bekannt, daß der Kerndurchmesser des Goldatoms etwa 30 000 mal kleiner ist als dessen Atomdurchmesser.

Ich möchte hier in einem kurzen Einschub eine für die Streuung eminent wichtige Größe einführen, den *Wirkungsquerschnitt*. Nehmen wir an, wir haben n Streuzentren, die sich gegenseitig nicht stören; diese bilden das sogenannte Target. Auf das Target fällt ein Teilchenstrahl, bei dem pro Sekunde j Teilchen durch eine Fläche von einem Quadratzen-timeter fließen. Ist N die Zahl der pro Sekunde gestreuten Teilchen, so ist der Wirkungsquerschnitt das Verhältnis von der Zahl der gestreuten Teilchen zur Teilchenstrahldichte mal der Zahl der Streuzentren, also $N/(j \cdot n)$. Die Kurve in Abb. 1.4 ist dem Wirkungsquerschnitt proportional.

Das Rutherfordsche Atommodell regte Niels Bohr zu seinem Atommodell an, bei dem die Elektronen wie Planeten den Atomkern umkreisen. Das war eigentlich nach den gesicherten Gesetzen der klassischen Elektrodynamik unmöglich, da ein um einen Kern kreisendes Elektron laufend elektromagnetische Strahlung aussendet und dabei Energie verliert. Es würde also früher oder später soweit abgebremst, daß es in den Kern fallen müßte. Bohr nahm daher an, daß für ganz bestimmte erlaubte – *gequantelte* – Bahnen die Gesetze der klassischen Elektrodynamik nicht gelten und daß die Elektronen nur Energie abgeben oder aufnehmen können, wenn sie von einer erlaubten Bahn auf eine andere erlaubte Bahn wechseln. Dieser Übergang von einer Bahn zur anderen wurde Quantensprung genannt, der Name hat sich in der pseudowissenschaftlichen Literatur für große Umwälzungen eingebürgert, obwohl ein Quantensprung der kleinste mögliche Sprung ist. Der Quantensprung von einer energiereicheren Bahn in eine energieärmere geschieht unter Aussendung eines Lichtquants, dessen Frequenz die Energiedifferenz der gequantelten Bahnen geteilt durch das Plancksche Wirkungsquantum ist.

Die Bohrschen „Vorschriften“ wurden später von Heisenberg, Schrödinger, Pauli, Born und anderen durch die Quantenmechanik in einem geschlossenen theoretischen Rahmen begründet. Die nach dem Formalismus der Quantenmechanik möglichen Zustände entsprachen genau den „erlaubten Bahnen“ des Bohrschen Modells. Allerdings machte die Quantenmechanik noch viele weitere nachprüfbare Aussagen, die zwar unserer an der Alltagserfahrung geschulten unmittelbaren Anschauung widersprechen, die aber alle der experimentellen Nachprüfung standhalten. Im Streitfall entschied das Experiment immer zugunsten des mathematischen Formalismus und gegen die Anschauung. So wurden die sehr anschaulichen erlaubten Bahnen Bohrs keineswegs durch die Quantenmechanik bestätigt, sondern nur das Funktionieren des Bohrschen Modells in gewissen Fällen erklärt.

Ganz wesentlich für das Verständnis der Atomphysik und auch des Aufbaus des periodischen Systems der chemischen Elemente ist das „Paulische Ausschließungsprinzip“. Es besagt: Ist ein möglicher Zustand von einem Elektron besetzt, so kann in diesem Zustand kein zweites mehr unterkommen. Das Ausschließungsprinzip gilt nur für Teilchen mit dem Spin $\frac{1}{2}\hbar$; aus Gründen, die später klar werden, nennt man solche Teilchen Fermionen.

Das Neutron. Im Jahre 1930 fanden W. Bothe und H. Becker, daß beim Beschuß des Elementes Beryllium mit *alpha*-Teilchen eine neue harte, d. h. durchdringende Strahlung auftritt, „so hart, daß an ihrem Ursprung im Kern kaum gezweifelt werden kann“. Das Ehepaar

Irene Joliot-Curie (Tochter von Pierre und Marie Curie) und Frédéric Joliot untersuchten diese Strahlung, bestätigten im wesentlichen die Ergebnisse von Bothe und Becker, fanden aber auch einige charakteristische Abweichungen in der Absorption. Die Natur der Strahlung blieb auch für sie rätselhaft.

Lange vor diesen Experimenten, nämlich 1920, hatte Rutherford in den Baxter Lectures spekuliert, daß es vielleicht einen engen, elektrisch neutralen Bindungszustand von einem Proton und einem Elektron geben könne, der etwa so groß und schwer wie ein Proton sei. Er kam darauf, weil er nicht sah, wie ohne neutrale Teilchen die Elemente in den Sternen entstehen könnten. J. Chadwick, ein enger Mitarbeiter Rutherfords, suchte nach diesem neutralen Teilchen. Angeregt durch die Untersuchungen von Joliot-Curie und Joliot fand er sehr schnell, daß die Bothe-Becker-Strahlung tatsächlich zum Teil aus diesen von ihm gesuchten neutralen Teilchen bestand, das Neutron war entdeckt (1932). Vor der Entdeckung des Neutrons hatte man angenommen, daß der Atomkern aus Protonen und Elektronen besteht. Dies erklärte recht gut, warum die Massen der Atomkerne ungefähr Vielfache der Masse des Wasserstoffkerns sind, was ja schon 1815 W. Prout hypothetisch angenommen hatte. Außerdem erklärte es leicht den radioaktiven *beta*-Zerfall, bei dem ein Elektron vom Atomkern ausgesandt wird. Daß die beim *beta*-Zerfall ausgesandten Teilchen tatsächlich Elektronen sind, hatte Kaufmann schon 1901 durch sehr sorgfältige Bestimmung des Verhältnisses der Ladung zur Masse bestätigt. Die Annahme, daß der Kern aus Protonen und Elektronen zusammengesetzt sei, führte allerdings zu theoretischen Schwierigkeiten. Nach den Gesetzen der Quantenmechanik war es nicht klar, wie man so leichte Objekte wie die Elektronen in einem so kleinen Raum wie dem Atomkern unterbringen könne. Unmittelbar nach der Entdeckung des Neutrons schlug daher Heisenberg vor, daß der Atomkern aus Protonen und Neutronen zusammengesetzt sei. Wie das Elektron haben auch das Proton und das Neutron einen Spin $\frac{1}{2}$ und – wie sich später herausstellte – auch ein magnetisches Moment. Die magnetischen Eigenschaften des Protons und die der Kerne allgemein spielen heute in der medizinischen Diagnostik eine wichtige Rolle, da die Kernspintomographie darauf beruht.

Das Neutron hat ungefähr die gleiche Masse wie das Proton, es ist nur etwa ein Promille schwerer. Als isoliertes Teilchen zerfällt es radioaktiv in ein Proton, ein Elektron und ein weiteres neutrales Teilchen, das wir später besprechen. Die nahezu gleiche Masse von Proton und Neutron führte Heisenberg schon 1932 zu der Annahme, daß beide durch eine Symmetrie verbunden seien, die man später Isospin-Symmetrie nannte; sie wird ausführlicher im Abschn. 1.5.3 behandelt.

In großer Konzentration kommen Neutronen in den Neutronensternen vor. Diese haben einen Durchmesser von nur etwa 20 km und durch ihre Rotation senden sie wegen ihrer hohen Magnetfelder elektromagnetische Signale wie Leuchttürme aus. Aus der extrem kurzen Periode (30–100 Millisekunden) von diesen als Pulsare wahrgenommenen Objekten schließt man auf ihren kleinen Durchmesser.

Rutherford hatte zwar vermutet, daß ein Neutron existiert, und diese Vermutung war auch für Chadwicks gezielte Suche sehr wichtig, aber dennoch kann man beim Neutron nicht von einer echten theoretischen Vorhersage sprechen. Bei den beiden Teilchen, die wir jetzt behandeln ist das anders.

Das Photon. Die Frage nach der Natur des Lichts spaltete die Naturgelehrten seit Beginn der Neuzeit in zwei Lager, die sich oft sehr heftig bekämpften. Die einen nahmen an, Licht bestehe aus kleinen Körpern (Korpuskulartheorie), die anderen betrachteten es als einen Schwingungsvorgang (Wellentheorie). Durch die Überlegungen und Experimente vor allem von Th. Young und A.-J. Fresnel setzte sich zu Beginn des 19. Jahrhunderts die Wellentheorie durch. Maxwell erklärte das Licht als ein elektromagnetisches Phänomen: Er konnte alle wesentlichen Eigenschaften aus seiner vereinheitlichten Theorie der Elektrizität und des Magnetismus erklären. Als dann H. Hertz 1887 auch noch die Existenz elektromagnetischer Wellen direkt nachwies, schien die Natur des Lichts ein für allemal geklärt: Es waren Ätherschwingungen. Aber 1905 veröffentlichte der Technische Experte III. Klasse am Patentamt in Bern, Albert Einstein, drei Arbeiten, die die Physik des 20. Jahrhunderts weitgehend prägten. Eine davon hatte den Titel: „Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt“. Er faßte selbst seine Arbeit zusammen: „Nach der hier ins Auge zu fassenden Annahme ist bei der Ausbreitung eines von einem Punkte ausgehenden Lichtstrahls die Energie nicht kontinuierlich auf größer und größer werdende Räume verteilt, sondern es besteht dieselbe aus einer endlichen Zahl von in Raumpunkten lokalisierten Energiequanten, welche sich bewegen, ohne sich zu teilen und nur als Ganze absorbiert oder erzeugt werden können.“ Diese Quanten nennt man heute Lichtquanten, *gamma*-Quanten oder Photonen. Die Masse der Photonen ist 0, ihre Energie ist proportional der Frequenz des Lichts, die Proportionalitätskonstante ist das Plancksche Wirkungsquantum.

Einstein konnte damit eine sehr rätselhafte Eigenschaft des sogenannten Photoeffekts erklären, die Lenard beobachtet hatte. Fällt Licht auf gewisse Metalle, so werden durch seine Wirkung Elektronen aus dem Metall gelöst. Dies ist der von H. Hertz entdeckte Photoeffekt. Die

Energie der herausgeschlagenen Elektronen hängt nicht von der Intensität des eingestrahnten Lichtes, also dem Energiefluß, sondern von der Wellenlänge des Lichts ab. Je kleiner die Wellenlänge und desto höher damit die Frequenz ist, desto mehr Energie haben die herausgeschlagenen Elektronen. Ist die Frequenz kleiner als ein gewisser Grenzwert, so tritt der Photoeffekt erst gar nicht auf. Dies ist im Einsteinschen Lichtquantenmodell sehr einfach zu erklären: Beim Photoeffekt wird ein Lichtquant absorbiert. Dessen Energie ist proportional der Frequenz; ist diese zu klein, so ist die Energie des einzelnen Photons kleiner als die Arbeit, die nötig ist, um ein Elektron aus dem Metall herauszulösen. Ist die Frequenz hoch, ist auch die Energie des Photons groß und neben der Ablösearbeit steht noch ein Rest zur Beschleunigung des herausgeschlagenen Elektrons zur Verfügung. Dies erklärt auch, warum ultraviolette Strahlung mit ihrer hohen Frequenz chemisch sehr viel aggressiver ist als normales sichtbares Licht. Einstein konnte die Experimente zum Photoeffekt nicht nur qualitativ, sondern auch quantitativ erklären. Die Energie eines Photons ist durch das Produkt von Frequenz f und Planckschem Wirkungsquantum h gegeben, d. h.

$$E = hf.$$

Das Wirkungsquantum h war schon von Planck recht genau bestimmt worden. Einstein leitete später auch sehr elegant die Plancksche Strahlungsformel aus den Gasgesetzen für ein Photonen-Gas her.

Trotz ihrer Erfolge stießen diese Ideen Einsteins nicht bei allen Physikern auf Gegenliebe und der vorsichtig formulierte Titel der Einsteinschen Arbeit zeigt auch, daß er selbst sich des Widerspruchs voll bewußt war. Die kontinuierliche Wellennatur des Lichts galt durch die Beugungsexperimente als bestens gesichert. In den zwanziger Jahren führte K.T. Compton Streuexperimente von Röntgenstrahlung durch, die am einfachsten als Stöße von teilchenartigen Photonen mit Elektronen interpretiert werden konnten. Als schließlich mit der weiteren Entwicklung der Quantenmechanik durch L. de Broglie auch Objekten, die ausschließlich als Teilchen interpretiert wurden, z. B. Elektronen, Wellencharakter zugesprochen wurde, setzte sich das Konzept des Photons allgemein durch. Im folgenden meinen wir immer, wenn wir von „Teilchen“ sprechen, Objekte, die durch quantenphysikalisch zu behandelnde Felder beschrieben werden. Wir gehen darauf im Abschn. 1.4.2 und im Epilog noch einmal genauer ein. Es ist eine Frage der Definition, ob man die Photonen als Bestandteile der Materie bezeichnen will, aber sicher sind sie ein ganz wesentlicher Bestandteil unserer Welt. Die weitaus größte Zahl der Teilchen in unserem Universum sind Photonen.

Das Neutrino. Wolfgang Pauli bezeichnete das Neutrino als das „nährische Kind meiner Lebenskrise, das sich auch weiterhin nährisch benahm“. Letzteres stimmt auch heute noch, bis jetzt war es immer für Überraschungen gut. Pauli führte ein neues neutrales Teilchen 1930 aus zwei Gründen ein: Beim radioaktiven *beta*-Zerfall sendet der Kern ein Elektron aus; man hatte festgestellt, daß sich dabei der Spin des Kerns um eine geradzahlige Einheit ändert, während das Elektron nur den Spin $\frac{1}{2}$ hat. Ferner – und das ist noch auffälliger – haben die Elektronen keine feste Energie, sondern eine kontinuierliche Energieverteilung, die von Null bis zu einer für den Zerfall typischen Maximalenergie reicht. Zerfele der Mutterkern nur in zwei Teilchen, nämlich in den Tochterkern und ein Elektron, so müßte dieses Elektron wegen der Erhaltung des Impulses und der Energie eine feste Energie haben, gegeben durch die Massendifferenz von Mutter- und Tochterkern. So ist es ja auch beim radioaktiven *alpha*-Zerfall, bei dem der Mutterkern nur *ein* Teilchen, einen Helium-Kern, aussendet.

Pauli postulierte, daß beim *beta*-Zerfall nicht nur ein Elektron, sondern noch ein weiteres neutrales Teilchen ausgesandt wird, es wurde von Pauli Neutron, aber später Neutrino genannt. Das Neutrino sollte sehr viel leichter sein als ein Elektron, möglicherweise sogar masselos wie das Photon, und den Spin $\frac{1}{2}$ haben. Diese Hypothese löste mit einem Schlag die beiden oben besprochenen Probleme: Neutrino und Elektron bilden zusammen einen ganzzahligen Spin, was das Spinproblem löst, und sie teilen sich die Energie, was das kontinuierliche Energiespektrum der Elektronen erklärt.

Das Neutrino wurde erst 1956 von Reines experimentell nachgewiesen, wie in Abschn. 2.8 ausführlicher geschildert wird. In Abschn. 7.1 werden wir sehen, daß die Neutrinos zur Zeit wieder im Mittelpunkt des wissenschaftlichen Interesses stehen.

1.3 Kontrolle ist besser

Die moderne Elementarteilchenphysik unterscheidet sich von früheren Versuchen seit der Antike bis ins 19. Jahrhundert dadurch, daß sie nicht nur über Elementarteilchen spekulierte, sondern begann, die Teilchen mehr oder weniger direkt nachzuweisen. Daher kommt den Detektoren, mit deren Hilfe man die Teilchen nachweist, eine ganz besondere Bedeutung zu, und der Erfolg der Teilchenphysik ist zu großen Teilen bedingt durch die Entwicklung immer feinerer und leistungsfähigerer Nachweisgeräte.

In den meisten Fällen ist das Grundprinzip eines Teilchendetektors das der Ionisation: Ein geladenes Teilchen, z. B. ein Proton, schlägt aus

einem Atom ein Elektron heraus, spaltet also das Atom in ein freies Elektron und ein positives Ion. Dieser Prozeß hat vielfache Konsequenzen:

1. Er kann zu chemische Änderungen, z. B. in der Emulsion einer photographischen Platte führen.
2. Bei der Rekombination der Ionen mit Elektronen kann Licht ausgesandt werden.
3. Gase oder Flüssigkeiten werden durch die Trennung der Ladungen leitend.
4. Die Ionen bilden in Gasen oder Flüssigkeiten Kondensationskeime für Tröpfchen oder Bläschen.

Geladene Teilchen verlieren entlang ihrer Bahn praktisch ihre gesamte kinetische Energie durch Ionisationsprozesse, was die Bestimmung der Teilchenenergie erlaubt. Auch der Energieverlust pro zurückgelegter Wegstrecke läßt sich messen. Da dieser wiederum hauptsächlich durch die Geschwindigkeit des ionisierenden Teilchens bestimmt ist, läßt sich daraus die Geschwindigkeit des Teilchens ermitteln.

Die Photonen sind zwar elektrisch neutral, aber dennoch können sie Atome ionisieren und deshalb ähnlich wie geladene Teilchen nachgewiesen werden. Ein wichtiger zusätzlicher Effekt zum Nachweis der Photonen ist die Paarbildung: Ein Photon wandelt sich hierbei in ein Elektron und ein Positron, also ein positiv geladenes Teilchen, um. Dieser Effekt ist nur im Rahmen einer Quantentheorie der Felder zu beschreiben, und er spielte überhaupt bei der Entwicklung einer Theorie der Elementarteilchen eine große Rolle, wie wir im nächsten Abschnitt noch sehen werden.

In neuerer Zeit wird auch der sogenannte Cherenkov-Effekt beim Nachweis geladener Teilchen benutzt. Dieser Effekt ist sehr ähnlich der Aussendung der Schockwelle durch einen Körper, der sich mit Überschallgeschwindigkeit bewegt, z. B. durch einen Düsen-Jet. Beim Cherenkov-Effekt wird aber keine Schall-, sondern eine Lichtwelle ausgesandt. Um Cherenkov-Licht auszusenden muß die Geschwindigkeit eines geladenen Teilchens größer sein als die Lichtgeschwindigkeit in dem betreffenden Medium. Für die Entdeckung und Erklärung des Cherenkov-Effektes wurden P.M. Cherenkov, I.M. Frank und I.M. Tamm 1958 mit dem Nobelpreis ausgezeichnet.

Ich beschreibe nun einige Nachweisgeräte, die bei der Entwicklung der Teilchenphysik eine wichtige Rolle spielten.

Photoemulsionen. Die photographische Platte ist der älteste Teilchen-Detektor. 1896 entdeckte Henri Becquerel die radioaktiven Strahlen, weil sie eine in dunkles Papier eingewickelte photographische

Platte schwärzten. Die geladenen Strahlen führen entlang ihrer Bahn durch die Ionisation zu den gleichen chemischen Reaktionen, die auch das Licht hervorruft. Entwickelt man also eine Photoplatte, durch die ein ionisierendes Teilchen lief, so wird die Bahn als schwarze Spur in der photographischen Emulsion sichtbar. Diese Methode wurde besonders in Wien verfeinert und erreichte ihren Höhepunkt mit der Entwicklung spezieller „Kernemulsionen“ durch die Firmen Illford und Kodak. Wichtige Entdeckungen der Teilchenphysik verdanken wir dieser alten Methode.

Fluoreszenz, Szintilloskop. Bei einigen Substanzen wird bei der Rekombination der Ionen sichtbares Licht ausgesandt. Dieser Vorgang heißt Fluoreszenz. Die Elektronen der Kathodenstrahlen in den Geisslerschen Röhren machten sich durch grünes Licht auf der Glaswand der Röhre bemerkbar; es ist das Fluoreszenzlicht der durch die Elektronen im Glas erzeugten Ionen. Conrad Röntgen fand die nach ihm benannte Strahlung, weil die Photonen der Röntgenstrahlung einen Schirm, der mit einer Platinverbindung bestrichen war, zum Fluoreszieren brachten.

Das Szintilloskop beruht auch auf der Fluoreszenz. Bei ihm weist man den Lichtblitz, der durch ein einzelnes Teilchen erzeugt wird, nach. Dies geschah in den Pionierzeiten mit dem Auge. Bei den klassischen Experimenten von Geiger und Marsden, die in Abschn. 1.2 kurz beschrieben sind, wurden die am Kern gestreuten *alpha*-Teilchen mühsam mit einem visuellen Szintilloskop nachgewiesen und einzeln gezählt. Bei modernen Szintillationszählern wird das ausgesandte Licht mit Hilfe von Photozellen gemessen und elektronisch registriert.

Ionisationskammer. Henri Becquerel fand schon bald nach der Entdeckung der Radioaktivität 1896, daß die radioaktive Strahlung Luft leitend machte und zur Entladung eines Elektroskops führte. In der Ionisationskammer ionisiert die Strahlung das in ihr befindliche Gas, und man mißt den Strom, der durch getrennte Ladungsträger geleitet wird; dies ist in Abb. 1.5 dargestellt. Früher maß man den Stromstoß durch die Entladung eines Elektroskops, heute wird er elektronisch verstärkt und registriert.

Die Ionisationskammer spielt seit der Frühzeit der Teilchenphysik eine bedeutende Rolle. Chadwick hatte die Neutronen mit Hilfe einer Ionisationskammer entdeckt. Sie war mit Paraffin ausgekleidet, die Neutronen stießen die Wasserstoffkerne im Paraffin an, und diese wurden dann über ihre Ionisationseffekte nachgewiesen.

Geiger-Müller-Zähler. Der sicher bekannteste Teilchendetektor ist der Geiger-Müller-Zähler. Dieser besteht aus einer Ionisationskammer, in der die freigesetzten Elektronen durch ein hohes elektrisches

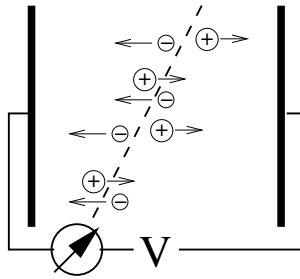


Abbildung 1.5. Durch ein geladenes Teilchen werden die Atome oder Moleküle entlang der Teilchenbahn (*gestrichelte Linie*) in der Ionisationskammer ionisiert. Die angelegte Spannung V zieht die positiven Ionen zum negativen, die Elektronen zum positiven Pol. Der dadurch fließende Strom wird gemessen, aus dem Verlauf des Stromflusses lassen sich Rückschlüsse auf die Energie des ionisierenden Teilchens ziehen

Feld stark beschleunigt werden. Sind sie schnell genug, können sie ihrerseits weitere Atome oder Moleküle ionisieren; dabei wird die Zahl der Ladungsträger durch eine Kettenreaktion vergrößert. Man erzielt hohe elektrische Felder durch eine bestimmte geometrische Anordnung, z. B. nimmt bei einem zylindrischen Zählrohr die Feldstärke zur Mitte hin stark zu. Der durch ein ionisierendes Teilchen ausgelöste Stromstoß kann dann registriert werden. Man kann ihn auch nach Verstärkung auf einen Lautsprecher geben, was dann zum typischen Knacken führt, das in Filmen gemeinhin radioaktive Strahlung anzeigt. Damit die Kettenreaktion nicht zu stark anwächst und dann zu einem permanenten Strom im Geigerzähler führt, werden sie durch geringe Mengen eines mehratomigen Gases (z. B. Alkoholdampf) in der Füllung stabilisiert. Ob dies, wie kolportiert wird, eine Zufallsentdeckung war, weil einer der Mitarbeiter Geigers Alkoholiker war, und seine Fahne automatisch den Zusatz brachte, sei dahingestellt. Ist die angelegte Spannung nicht zu groß, dann ist der durch ein ionisierendes Teilchen ausgelöste Stromstoß proportional der Zahl der erzeugten Ionen, also dem Energieverlust des Teilchens im Zählrohr. Man spricht dann von einem Proportionalzähler.

Eine sehr wichtige Methode bei der Anwendung von Zählrohren ist die Koinzidenz-Methode, die ab 1925 von W. Bothe mit Mitarbeitern entwickelt wurde. Bothe und Geiger untersuchten den Compton-Effekt, d. h. die Streuung von Photonen an Elektronen, mit zwei Zählern und stellten fest, daß das gestreute Elektron und das gestreute Photon die getrennten Zähler gleichzeitig ansprechen ließen. Dabei wurden die Elektroskope beider Zähler gefilmt. Später entwickelte Bothe auch

eine elektronische Koinzidenzschaltung, die durch B. Rossi 1930 wesentlich verbessert wurde. Koinzidenz und Antikoinzidenz-Methoden spielen auch heute noch eine wesentliche Rolle bei Teilchennachweis und -identifikation.

Nebelkammer. Die Entwicklung der Nebelkammer durch R.W. Wilson geht direkt auf den Entdecker des Elektrons, J.J. Thomson zurück. Der hatte sich schon früh mit dem Einfluß elektrischer Ladungen auf den Dampfdruck beschäftigt. Über einer ebenen Wasseroberfläche in einem geschlossenen Gefäß bei fester Temperatur befinden sich die Wassermoleküle in der Flüssigkeit und die im darüber befindlichen Gas im Gleichgewicht, welches durch zwei konkurrierende Mechanismen bestimmt wird. Die thermische Bewegung der Moleküle bewirkt, daß einige von ihnen aus der Flüssigkeit entweichen, aber die anziehende Kraft der Wassermoleküle in der Flüssigkeit verhindert, daß das zu oft geschieht. Bei einer stark gekrümmten Fläche hat ein Wassermolekül auf der Oberfläche weniger Nachbarn als auf einer ebenen Fläche und wird dadurch weniger stark in der Flüssigkeit gehalten. Deshalb verdampft ein kleines Wassertröpfchen auch unter Bedingungen, bei denen eine ebene Oberfläche im Gleichgewicht mit dem Wasserdampf ist. Je kleiner ein Tröpfchen ist, desto weniger anziehende Nachbarn hat es, und deshalb ist die Verdampfung eines Tröpfchens umso stärker, je kleiner es ist. Man kann sogenannten übersättigten Wasserdampf bilden, in dem sich mehr Wassermoleküle befinden, als es im Gleichgewicht sein dürften. Ist das Gas vollkommen rein, so können sich keine kleinen Tröpfchen bilden, weil diese sofort wieder verdampfen würden; da aber alle Tröpfchen einmal klein anfangen müssen, bilden sich überhaupt keine. Die elektrische Ladung eines Ions aber zieht Wassermoleküle an und das kann im übersättigten Wasserdampf dazu führen, daß sich um das Ion ein Tröpfchen bildet, weil die anziehende elektrische Kraft des Ions die schnelle Verdampfung verhindert. Dadurch bilden Ionen Keime für die Kondensation von Wassertröpfchen. Diese Vorgänge hatte Thomson theoretisch untersucht und die relevanten Formeln hergeleitet. Sein Student R.W. Wilson entwickelte daraus eines der wichtigsten Nachweisgeräte der Elementarteilchenphysik: die Nebelkammer. Der Aufbau ist im Prinzip einfach: Durch Ausdehnung wird die Temperatur in einem mit Wasserdampf gesättigten Gefäß erniedrigt, dadurch wird der Wasserdampf übersättigt. Nur an vorhandenen Ionen können sich Nebeltröpfchen bilden. Da ein geladenes Teilchen entlang seiner Bahn Ionen erzeugt, wird sie durch die daran kondensierten Nebeltröpfchen sichtbar. Durch geschickte Wahl der Versuchseinrichtung läßt sich sogar erreichen, daß die Zahl der Tröpfchen pro Weglänge erlaubt, die Geschwindigkeit des Teilchens zu bestimmen. Die Bahn wird mit Hilfe