

Christian B. Lang
Leopold Mathelitsch

Haben Sie eines gesehen?

Eine unterhaltsame
Teilchenphysik

SACHBUCH

 Springer

Haben Sie eines gesehen?

Christian B. Lang · Leopold Mathelitsch

Haben Sie eines gesehen?

Eine unterhaltsame Teilchenphysik

 Springer

Christian B. Lang
Universität Graz
Graz, Österreich

Leopold Mathelitsch
Universität Graz
Graz, Österreich

ISBN 978-3-662-67971-5 ISBN 978-3-662-67972-2 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-67972-2>

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

© Der/die Herausgeber bzw. der/die Autor(en), exklusiv lizenziert an Springer-Verlag GmbH, DE, ein Teil von Springer Nature 2023

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Planung/Lektorat: Caroline Strunz
Springer ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer-Verlag GmbH, DE und ist ein Teil von Springer Nature.
Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany

Das Papier dieses Produkts ist recyclebar.

Vorwort

Seit Jahrtausenden sind wir Menschen auf der Suche nach den kleinsten Bausteinen unserer Welt. Mit dem Atom glaubten wir, dieses Unteilbare gefunden zu haben. Das war ein Irrtum. Es gibt noch kleinere Elemente: Wir nennen sie Elementarteilchen.

Aber leider ist die Natur in diesem Bereich kompliziert. Aus Energie kann Materie entstehen und bei näherem Hinsehen entpuppt sich das Elektron als umgeben von einer Wolke aus Teilchen und sonderbaren Antiteilchen. Das war eine Herausforderung für die Physikerinnen und Physiker, aber in den vergangenen 120 Jahren wurden enorme Fortschritte erzielt: Wir haben heute einen Katalog von Elementarteilchen und eine Theorie der Kräfte, die alle Experimente sehr gut beschreibt.

Doch das Bessere ist der Feind des Guten. Trotz aller Erfolge haben sich weitere Fragen aufgetan und es ist fast verwunderlich, dass die bisherige Theorie so erfolgreich war. Und neueste Experimente könnten bereits auf noch kleinere Einheiten hinweisen. Aber das ist dann eine andere Geschichte.

Leben und Werk von handelnden Personen sind auch in der Physik eng verflochten. In einem Lehrbuch beschränkt man sich auf die Darstellung von Phänomenen und deren experimenteller Erforschung und theoretischer Erklärung. Aber dahinter stehen Menschen und ihr oft kompliziertes Leben. Diesem „Menschlichen“ möchten wir in diesem Buch durch Einbindung kurzer Biografien Raum geben. Schärfere charakterisiert werden berühmte Personen aber häufig durch Erinnerungen von Zeitgenossen und durch Anekdoten. Für manche Physiker, wie zum Beispiel Einstein oder Feynman,

gibt es unzählige solcher Beiträge, oft sogar in eigenen Sammlungen. In diesem Buch haben wir versucht, eher unbekanntere auszuwählen. Viele Anekdoten und Zitate sind im Original in englischer Sprache, die Übersetzungen stammen von den Autoren. Zusätzlich haben wir kurze Einbettungen in die Zeitgeschichte gegeben, Erinnerungen an jeweils aktuelle Themen der Politik und des Alltags.

Wir folgen in diesem Buch dem Weg zum heutigen Verständnis und gehen daher näherungsweise chronologisch vor. Wir werden bei der Beschreibung die damals aktuelle Bezeichnung Elementarteilchen verwenden, selbst wenn sie inzwischen vom Podest gestoßen wurde.

Die Darstellung der Physik kann hier nicht so ausführlich und präzise wie in der wissenschaftlichen Fachliteratur sein, die Biographien nicht so detailliert wie in historischen Texten. Auf mathematische Formeln verzichten wir nach Möglichkeit. Unser vorrangiges Ziel ist, die wichtigsten Ergebnisse der experimentellen und theoretischen Forschungen zur Teilchenphysik allgemein verständlich und durch Einbindung von Anekdoten unterhaltsam zu beschreiben.

Wir wünschen viel Interesse und Vergnügen an der Welt der Elementarteilchen und deren Erforscherinnen und Erforscher.

Christian B. Lang
Leopold Mathelitsch

Danksagung

Besonderer Dank gilt Wolfgang Schweiger, der es auf sich genommen hat, das Manuskript in einer frühen Fassung zu lesen! Wir danken Heinrich Mitter und Ludwig Streit für viele Hinweise und Thomas Lang für Kritik und Diskussionen. Ein großes Dankeschön gilt auch dem Lektorat; zu Beginn hat uns Tobias Kompatscher betreut, dann hat Caroline Strunz übernommen. Bei der Produktion waren Jeevitha Juttu und Tanika Kawatra hilfreich. Die tägliche praktische und moralische Unterstützung durch Elly Lang und Anni Mathelitsch hat uns bei der Abfassung sehr geholfen, vielen herzlichen Dank!

Inhaltsverzeichnis

1	Das Atom	1
1.1	Unteilbar	1
1.2	Ham's eins g'sehn?	5
1.3	Das Rutherfordsche Atommodell	11
1.4	Das Bohrsche Atommodell	17
	Literatur und Quellennachweis für Anekdoten und Zitate	24
2	Große Theorien	27
2.1	Die Relativitätstheorie(n)	28
2.2	Die Quantenmechanik	33
	Literatur und Quellennachweis für Anekdoten und Zitate	51
3	Die Entdeckung der Fermionen	55
3.1	Fermionen und Bosonen	55
3.2	Elektron	56
3.3	Proton	58
3.4	Neutron	58
3.5	(Anti)Neutrino	60
3.6	Positron	62
3.7	Myon	66
	Literatur und Quellennachweis für Anekdoten und Zitate	68

X Inhaltsverzeichnis

4	Kräfte und Wechselwirkungen	71
4.1	Austauschkräfte	71
4.2	Diagramme	74
	Literatur und Quellennachweis für Anekdoten und Zitate	82
5	Die Jahre der Kernphysik	83
5.1	Stabile Kerne	84
5.2	Instabile Kerne	89
5.3	Die Atombombe	93
5.4	Der deutsche Uranverein	101
	Literatur und Quellennachweis für Anekdoten und Zitate	103
6	Seltsame Teilchen	105
6.1	Quantenzahlen	105
6.2	Pionen	111
6.3	Kaonen	113
6.4	Das Rätsel der K-Mesonen	114
6.5	CP Verletzung?	120
	Literatur und Quellennachweis für Anekdoten und Zitate	122
7	Die Zähmung der Unendlichkeit	125
7.1	Quantenelektrodynamik	125
7.2	Probleme der Quantenfeldtheorie	137
	7.2.1 Störungsreihe	137
	7.2.2 S-Matrix Theorie	140
	Literatur und Quellennachweis für Anekdoten und Zitate	143
8	Teilchen beschleunigen	145
8.1	Teilchen beschleunigen – geradeaus	146
8.2	Teilchen beschleunigen – im Kreis	150
8.3	Teilchen beschleunigen – gegeneinander	155
8.4	Teilchen beschleunigen – und zählen	159
	Literatur und Quellennachweis für Anekdoten und Zitate	162
9	Leptonen und Hadronen	165
9.1	Leptonen	165
	9.1.1 Elektron-Neutrino	166
	9.1.2 Myon-Neutrino	168
9.2	Hadronen	172
	Literatur und Quellennachweis für Anekdoten und Zitate	175

10	Symmetrie und Quantenfelder	177
10.1	Symmetrien	177
10.2	Globale und lokale Symmetrien	180
10.2.1	Globale abelsche Symmetrie	180
10.2.2	Lokale abelsche Symmetrie	181
10.2.3	Globale nicht-abelsche Symmetrie	182
10.2.4	Lokale nicht-abelsche Symmetrie	183
10.3	Die Yang-Mills Theorie	184
10.4	Spontane Symmetriebrechung	186
	Literatur und Quellenachweis für Anekdoten und Zitate	188
 11	 Quarks	 189
11.1	Ordnung schaffen	189
11.2	Partonen	196
11.3	Die Novemberrevolution	198
11.4	Schwere Quarks	201
11.4.1	Bottom Quark	201
11.4.2	Top Quark	202
	Literatur und Quellenachweis für Anekdoten und Zitate	204
 12	 Die starke Kraft	 207
12.1	Quantenchromodynamik (QCD)	207
12.2	Asymptotische Freiheit	212
12.3	Haben sie eines gesehen?	215
12.4	Jets	217
12.5	Quarkmassen	218
12.6	Gebrochene chirale Symmetrie	220
12.7	Gittereichtheorie	221
12.8	Andere Methoden	225
12.8.1	Instantonen	225
12.8.2	Effektive Theorien und Modelle	225
12.8.3	Dyson-Schwinger Gleichungen	225
	Literatur und Quellenachweis für Anekdoten und Zitate	227
 13	 Die elektroschwache Kraft	 229
13.1	Ströme	229
13.2	Das Zwischenboson	231
13.3	Gebrochene Eichsymmetrie?	232
13.4	Quarks	238
13.5	Higgs-Mechanismus und Massen	241

XII Inhaltsverzeichnis

13.6	Quantenflavordynamik (QFD)	242
	Literatur und Quellennachweis für Anekdoten und Zitate	243
14	Suche nach den fehlenden Teilchen	245
14.1	Tau Lepton	246
14.2	Neutrinos	247
14.3	Neutrino-Oszillationen	252
14.4	W^\pm, Z	254
14.5	Higgs	259
	Literatur und Quellennachweis für Anekdoten und Zitate	262
15	Das Standardmodell	265
	Literatur und Quellennachweis für Anekdoten und Zitate	270
16	Spekulative Teilchenphysik	271
16.1	Experimente	272
16.2	Erweiterungen des Standardmodells	274
16.3	„Grand Unified Theory“	274
16.4	Supersymmetrie	275
16.5	Supergravitation	276
16.6	Stringtheorie und Superstrings	276
16.7	Dunkle Materie und dunkle Energie	277
16.8	TOE	278
	Literatur und Quellennachweis für Anekdoten und Zitate	280
	Glossar	283
	Namenverzeichnis	285



1

Das Atom

Zusammenfassung Das Konzept des unteilbaren Kleinsten aus der Antike wurde im 19. Jahrhundert wieder aufgenommen und erlaubte es Ludwig Boltzmann, seine Theorie der Wärme aufzustellen. Nicht alle Physikerinnen und Physiker waren von der Existenz von Atomen überzeugt. Ernest Rutherford gelang es, die Struktur von Atomen experimentell zu zeigen: Atome haben einen kleinen Kern, der von Elektronen umhüllt ist. Niels Bohr zeigte, dass die Quantenhypothese es erlaubt, die Energiewerte der Elektronen in der Atomhülle und damit die atomaren Energiespektren zu erklären. Noch gab es aber keine Theorie, die begründen könnte, warum das so ist.

1.1 Unteilbar

Als Erfinder der Idee, dass es Atome, kleinste Teilchen, gibt, gelten die beiden griechischen Naturphilosophen Leukipp und Demokrit. Über Leukipp ist wenig bekannt, verschiedene Quellen führen ihn aber als Lehrer Demokrits an. Über diesen hat man gesichertere Informationen: Er wurde um 460 v.Chr. in Abdera (Thrakien) geboren, unternahm zahlreiche Reisen, auch nach Persien und Ägypten, kehrte dann aber wieder nach Abdera zurück und war Mittelpunkt einer sogenannten atomistischen Schule.

A 1.1 Demokrit mangelte es nicht an Selbstbewusstsein, denn er schrieb über sich: „Von allen Philosophen kam ich am meisten in der Welt herum, habe die meisten Länder besucht und die meisten gelehrten Männer gehört.“

Die Grundidee des Atomismus besagt, dass die gesamte Welt aus unteilbaren (*atomos*) Teilchen zusammengesetzt ist. Sie sind unzerstörbar und immer in Bewegung. Die Zahl der Atome ist unbegrenzt, sie unterscheiden sich jedoch in der Größe und Form. Mittels Haken und Ösen können sie sich in unterschiedlicher Weise verbinden, was zu den spezifischen Eigenschaften von Stoffen führt.

Zwischen den Atomen befindet sich leerer Raum. Dieser ermöglicht den Atomen die Bewegung, er ist aber ohnehin unabdingbar: Gäbe es keinen leeren Raum zwischen den Atomen, so wären alle Gegenstände unendlich hart und physikalisch unteilbar.

A 1.2 Demokrit: „Nur scheinbar hat ein Ding eine Farbe, nur scheinbar ist es süß oder bitter. In Wirklichkeit gibt es nur Atome und den leeren Raum.“

Diese atomistischen Ideen wurden von vielen antiken Philosophen, wie etwa von Platon oder Aristoteles, aus unterschiedlichen Gründen abgelehnt: Ein Argument betraf die planlose, zufällige Bewegung der Atome, ein anderes kritisierte die Leere zwischen den Atomen – es kann nicht „Nichts“ sein, es darf kein Vakuum geben (*horror vacui*).

Aus heutiger Sicht kamen die Ideen Leukipps und Demokrits dem Verständnis moderner Naturwissenschaften weitaus näher als alle anderen antiken Vorstellungen und Denksysteme.

Epikur, der etwa 150 Jahre nach Demokrit lebte, übernahm die atomistischen Ideen mit wenigen Veränderungen. So gab er die Anzahl von Atomformen nicht als unendlich, aber als unvorstellbar groß an. Zusätzlich als Eigenschaft kam bei Epikur neben Größe und Gestalt noch das Gewicht hinzu. Durch dieses fallen die Atome nach unten. Allerdings müssen immer einige von ihrer Bahn abweichen, damit es zur willkürlichen Bewegung und zu den notwendigen Kontakten zwischen den Atomen kommt.

A 1.3 Im Mittelpunkt von Epikurs Lehre stehen Lust, Lebensfreude, Abwesenheit von Schmerz und Leid. Von seinen Gegnern und nachfolgenden Generationen bis ins christliche Mittelalter wurde er deshalb häufig als Schlemmer und sittenloser Strolch diffamiert. Epikurs Sicht- und Handlungsweise war aber diffiziler: So empfahl er, um zufrieden zu sein, sich aus der Politik herauszuhalten, keine Geschäfte einzugehen, nicht zu heiraten.

Epikurs Schriften fanden im antiken Rom weite Verbreitung, viele gingen allerdings verloren. Seine naturphilosophischen Gedanken sind im Werk

De Rerum Natura von Titus Lukrecius Carus, zumindest in Wiedergabe, erhalten geblieben. Das erste Buch dieser naturwissenschaftlichen Bücher ist gänzlich der atomistischen Theorie gewidmet, wobei neben Epikurs auch Leukipps und Demokrits Beiträge gezeigt und gewürdigt werden.

A 1.4 Lukrez: Denn zunächst bewegen sich von selbst die Atome, von ihnen werden die nächstkleineren Körper durch unsichtbare Stöße vorangetrieben, und sie wiederum bringen etwas größeres in Bewegung.

Auch im Mittelalter gab es etliche Denkansätze, die zum Großteil auf Lukrez basierten. Im Gegensatz zu Leukipp und Demokrit gingen sie jedoch auf den Raum zwischen den Atomen, auf das Vakuum, nicht ein. Für christliche atomistische Denker war die Zufälligkeit der Bewegung der Atome nicht akzeptabel.

Der französische Theologe und Naturforscher Pater Pierre Gassendi übernahm im 17. Jahrhundert die Gedanken Demokrits, ebenfalls aus den Schriften Epikurs. Für die christliche Kritik daran, dass Atome unzerstörbar seien und sich zufällig bewegten, fand er folgende Lösung: Atome sind nicht ewig, sondern von Gott geschaffen; Atome bewegen sich nicht willkürlich, sondern nach Gottes Willen.

A 1.5 Jean-Baptist Poquelin, besser bekannt als Moliere, hörte während seines Jus-Studiums Vorlesungen von Pierre Gassendi. Inwieweit dessen aufklärerische, religionskritische Ideen Molieres späteres Werk beeinflusst haben, ist schwer nachzuvollziehen.

In weiterer Folge gab es zwei gewichtige Entwicklungen, welche die atomistische Sicht unterstützten, eine von physikalischer, die andere von chemischer Seite.

Der Italiener Evangelista Torricelli und der Deutsche Otto von Guericke zeigten, dass ein luftleerer Raum, ein Vakuum, tatsächlich existiert. Torricelli stülpte ein mit Quecksilber gefülltes und oben geschlossenes Glasrohr in ein Quecksilberbad. Wurde das Glasrohr angehoben, so stieg die Quecksilbersäule mit, aber nur bis 76 cm über dem Quecksilberbad. Bei weiterem Anheben des Rohrs entstand ein luftleerer Raum über der Quecksilbersäule. Torricelli erkannte, dass die Ursache dafür im äußeren Luftdruck besteht, der die Quecksilbersäule hebt. Der luftleere Raum hat unabhängig von seiner Größe keinen Einfluss auf die Höhe der Säule.

A 1.6 In den letzten Lebensmonaten des völlig erblindeten Galileo Galilei war Torricelli dessen Vorleser und Sekretär. Torricelli wurde auch der Nachfolger von Galilei in dessen Funktionen als Hofmathematiker des Herzogs von Toskana und als Professor an der Universität Florenz.

Der Magdeburger Bürgermeister Otto von Guericke verbesserte die Qualität von Luftpumpen beträchtlich. Damit konnte er aus zwei aneinandergepressten Halbkugeln so viel Luft entleeren, dass der äußere Luftdruck so stark war, dass sechzehn Pferde die Halbkugeln nicht trennen konnten.

Durch die Versuche von Torricelli und Guericke übte das Vakuum keinen „Schrecken“ mehr aus.

A 1.7 In seiner Begeisterung für Naturwissenschaft schoss Otto von Guericke manchmal über das Ziel hinaus. 1663 wurden nahe Quedlingburg in Lößablagerungen eiszeitliche Knochen gefunden. Er ordnete die Knochen so an, dass sie die Form eines Einhorns hatten. Eine Zeichnung davon schickte er an den Philosophen Gottfried Wilhelm Leibniz, der sie in seinem Werk *Protogäa* veröffentlichte. Guericke's Einhorn bestand in Wirklichkeit aus einer Mischung der Knochen eines Mammuts und eines Wollnashorns.

Chemiker, wie der Franzose Joseph-Louis Proust, fanden heraus, dass sich chemische Elemente nur in bestimmten Massenverhältnissen miteinander verbinden. Der Engländer John Dalton zeigte, dass sich zwei Stoffe A und B in verschiedener Weise verbinden können, etwa AB (ein Teil A und ein Teil B), oder AAB (zwei Teile A und ein Teil B), ABB, aber nicht $(A/2) B$. Dieses Gesetz der multiplen Proportionen kann durch eine Atomhypothese perfekt erklärt werden: Die zugrunde liegenden Atome können sich ja nur in ganzzahligen Verhältnissen verbinden. Dalton führte die atomare Masseneinheit ein.¹

A 1.8 Dalton war Quäker und kleidete sich in grauer Kniebundhose, grauem Mantel und Stiefeln mit Schnallen. Anlässlich eines Besuchs bei seiner Mutter brachte er ihr ein rotes Tuch als Geschenk. Auf ihre Verwunderung hin und seine Bemerkung, dass das Tuch die gleiche Farbe habe wie sein Mantel, wurde die Farbenblindheit von Dalton bemerkt – und dies erst in relativ hohem Alter.

¹Eine atomare Masseneinheit u ist $1/12$ des neutralen, nicht gebundenen Kohlenstoff-12 Atoms im niedrigsten Energie-Zustand und in Ruhe.

1.2 Ham's eins g'sehn?

Nein, hatte er nicht. Um die Jahrhundertwende 1900 hatte noch niemand ein Atom „gesehen“. Das würde noch ein paar Jahre dauern. Mit dieser Frage ärgerte jedoch Ernst Mach wiederholt seinen geschätzten Kollegen Ludwig Boltzmann. Der war ein Vertreter der Atomistik und davon überzeugt, dass Atome real existieren. Er hatte seine Theorie der Thermodynamik darauf aufgebaut, dass Wärme auf der Bewegung von kleinen Teilchen, eben Atomen und Molekülen, beruht.

Ludwig Boltzmann, 1844 in Wien geboren, musste in jungen Jahren einige Schicksalsschläge ertragen. Als er 15 war, starb sein Vater, zwei Jahre danach sein jüngerer Bruder. Ab 1863 studierte er Mathematik und Physik an der Universität Wien und hörte Vorlesungen von bekannten Wissenschaftlern wie Andreas von Ettingshausen, Josef Stefan und Josef Petzval. Mathematik und Physik waren damals Institute der Philosophischen Fakultät. Mit 22 promovierte er zum Doktor der Philosophie. Er legte auch die Lehramtsprüfung für Mathematik und Physik ab und unterrichtete, wie vorgeschrieben, ein Probejahr, und zwar am Akademischen Gymnasium in Wien. 1868 erhielt er die akademische Lehrbefugnis „Venia Legendi“ und hielt eine Vorlesung über die Grundprinzipien der mechanischen Wärmelehre.

A 1.9 Boltzmann war ein hervorragender Vortragender. Seine Schülerin Lise Meitner schrieb: „Er war ein ungewöhnlich guter, temperamentvoller, anregender Vortragender, immer lebhaft diskutierend, und konnte ... seine eigene Begeisterung auf die Zuhörer übertragen.“

Ernst Mach wurde 1838 in Chirlitz bei Brünn geboren, er war damit um sechs Jahre älter als Boltzmann. Mach wurde zum Teil von seinem Vater unterrichtet, er besuchte aber auch das Stiftsgymnasium Seitenstetten und das Piaristengymnasium in Kremsier. Ab 1855 studierte er Naturwissenschaften in Wien, sein Doktorat schloss er 1859/60 ab. Nach seiner Habilitation 1861 nahm er 1864 eine Stelle an der Universität Graz an. 1867/68 wurde er an die Universität Prag berufen.

Boltzmann bewarb sich um diese freie Stelle in Graz und wurde 1869 zum ordentlichen Professor der mathematischen Physik an der Universität Graz ernannt. Allerdings lag Graz geographisch nicht so zentral wie die Hauptstadt des Österreich-Ungarischen Kaiserreiches. Darum nahm er 1873 eine Stelle als Ordinarius für Mathematik an der Universität Wien an.



Abb. 1.1 Boltzmann mit Gästen und Mitarbeitern (Graz, 1887). Von links (stehend): Walther Nernst, Heinrich Streintz, Svante Arrhenius, Richard Hiecke; (sitzend): Eduard Aulinger, Albert von Ettingshausen, Ludwig Boltzmann, Ignaz Klemenčič, Victor Hausmanning. [commons.wikimedia.org/wiki/File:Boltzmann-grp.jpg, Universität Graz, gemeinfrei]

Nach zwei Jahren kehrte Boltzmann als Ordinarius und Leiter des Physikalischen Instituts nach Graz zurück. Er blieb dort von 1876 bis 1890 und verbrachte 14 wissenschaftlich sehr produktive Jahre (Abb. 1.1). Privat gab es Freude und Kummer. Vier seiner fünf Kinder kamen zur Welt, seine Mutter starb, bald danach sein ältester Sohn, und dann seine Schwester in geistiger Umnachtung.

A 1.10 Aus dem Heiratsantrag von Ludwig Boltzmann an Henriette von Aigentler vom 27. 9. 1875:

Hochgeehrtes Fräulein,

.... . Ich möchte Sie aber schon Ihres eigenen Lebensglücks wegen bitten, nur nach sorgfältiger Prüfung Ihres Inneren und ruhiger Überlegung der Umstände mir zu antworten. Denn so wenig ich glaube, dass die kalten und unerbittlichen Konsequenzen der exakten Naturwissenschaft irgendwie auf das Gemüt hemmend wirken sollen und können, so ziemt es doch uns Vertretern derselben, in unseren Handlungen nur besonnener Überlegung, nicht momentanen Stimmungen zu folgen...

Ihr Sie innigliebender und verehrender Freund Ludwig Boltzmann

Für Boltzmann war die Existenz von Atomen insofern real, als dass diese Hypothese zu physikalisch nachprüfbareren Aussagen führte. In seinen ersten Arbeiten beschäftigte er sich mit kinetischer Gastheorie, wobei sich aus der statistischen Behandlung der Bewegung vieler Gasteilchen messbare Größen ableiten lassen. So lieferte dieser Ansatz unter anderem eine theoretische Begründung des zweiten Hauptsatzes der Wärmelehre, dass Wärme von selbst nur von wärmeren auf kältere Gegenstände übergeht.

Diese Wahrscheinlichkeitsberechnung bestimmter Zustände zeigte sich aber auch für Flüssigkeiten und Festkörper als äußerst erfolgreich, und Boltzmann gilt heute als einer der Begründer der Statistischen Physik. Seine Arbeiten waren auch bereits zu seinen Lebzeiten bekannt, wurden sehr geschätzt und führten zu Berufungen an zahlreiche Universitäten. Er suchte den Kontakt zur internationalen Fachwelt und unternahm zeitlebens zahlreiche Auslandsreisen.

Bezüglich seiner Anstellungen war Boltzmann unstat und wankelmütig. Einen Ruf an die Friedrich-Wilhelms-Universität zu Berlin (die heutige Humboldt-Universität) nahm er an, wurde ernannt, sagte ab, und wollte die Absage rückgängig machen, was nicht gelang. Max Planck erhielt die Stelle.

A 1.11 Bei einem Bankett anlässlich seiner möglichen Berufung nach Berlin wurde Ludwig Boltzmann mit einem heiklen Problem auseinandergesetzt. Er vertiefte sich so darin, dass er nicht merkte, dass er sich mit der Gabel hinter dem Ohr kratzte. „Das hätte ich nicht tun sollen“, berichtete er später, das kaiserliche Berlin war entsetzt – und die Missgunst blühte.

1890 nahm Boltzmann eine Professur an der Ludwig-Maximilians-Universität in München an. 1894 wurde an der Universität Wien das erste Ordinariat für Theoretische Physik gegründet und Boltzmann kehrte mit einer beträchtlichen Gehaltserhöhung nach Wien zurück.

A 1.12 Der hervorragende Wissenschaftler war im Alltagsleben unbeholfen. Stefan Meyer erinnerte sich: „Unvergesslich sind mir die Einladungen zu Boltzmanns wegen deren unglaublicher Naivität und Unbeholfenheit [...] Man bekäme wohl ein ganz falsches, schiefes Urteil [...], wollte man ihn nach solchen ‚Geschichteln‘ beurteilen. Er war nicht nur ein großer Gelehrter, sondern trotz all seiner Wunderlichkeit ein innerlich guter Mensch, mit stark ausgesprochenem Familiensinn und Wohlwollen für Andere.“

War in Graz Boltzmann der Nachfolger von Mach, so trafen sich ihre Wege in sehr ähnlicher Weise wieder in Wien. Auch für die Berufung von Ernst

Mach wurde an der Universität 1895 ein neuer Lehrstuhl geschaffen, nämlich der für Philosophie.

Obwohl die Existenz von Atomen und deren Klassifikation im Periodensystem bei den Chemikern seit Mitte des 19. Jahrhunderts unumstritten war, stellten sich immer noch einige Physiker dagegen, unter anderem Ernst Mach und Wilhelm Ostwald. Beide waren gegen Boltzmanns Ansatz der realen Atome, wenn auch aus unterschiedlichen Gründen. Mach war der Meinung, was man nicht sehen könne, nicht mit Sinnen erfassbar sei, das dürfe auch nicht als naturwissenschaftliche Theorie behandelt werden.

Mach erlitt 1898 einen Schlaganfall und trat 1901 in den Ruhestand.

A 1.13 Anlässlich seiner Pensionierung wurde Mach der Adelstitel angeboten, den er aber wegen seiner politischen Anschauungen ablehnte. Sehr wohl nahm er die lebenslange Ernennung zum Mitglied des Herrenhauses (Oberhaus des Österreichischen Reichsrates) an. Und er nahm diese Aufgabe sehr ernst: 1901 lag das Gesetz zum Neunstundentag zur Abstimmung vor. Da der Ausgang sehr kritisch war, ließ sich Mach im Krankenwagen zur Sitzung bringen. Dasselbe wiederholte sich 1907 bei der Abstimmung über die Wahlreform.

Ostwald vertrat die Vorstellung, dass Materie eine besondere Erscheinungsform von Energie ist, physikalische Prozesse seien Übergänge verschiedener Energieformen. Bei der Naturforscherversammlung in Lübeck 1895 kam es zu einer heftigen Auseinandersetzung zwischen Boltzmann und Ostwald, bei der Boltzmann als Sieger hervorging.

A 1.14 Erinnerungen von Arnold Sommerfeld an die Naturforscherversammlung in Lübeck, 1895.

„Der Kampf zwischen Boltzmann und Ostwald glich, äußerlich und innerlich, dem Kampf des Stiers mit dem geschmeidigen Fechter. Aber der Stier besiegte diesmal den Torero trotz all seiner Fechtkunst. Die Argumente Boltzmanns schlugen durch. Wir damals jüngeren Mathematiker standen alle auf der Seite Boltzmanns.“

Boltzmann verbrachte ab 1900 zwei Jahre in Leipzig, eine Entscheidung, die er bald bedauerte. Wilhelm Ostwald, der als Begründer der Physikalischen Chemie gilt und der 1908 für seine Arbeiten zur Katalyse den Nobelpreis für Chemie verliehen bekommen würde, war ebenfalls dort. Die Familien pflegten freundliche Kontakte mit gemeinsamen Hausmusik-Abenden, aber die wissenschaftlichen Konflikte belasteten Boltzmann sehr. Seine psychischen Probleme nahmen zu und er hatte Suizidgedanken. Als sich 1902 die Möglichkeit ergab, kehrte er nach Wien zurück.

Boltzmann besuchte drei Mal Amerika (Abb. 1.2). Seine dritte Reise führte ihn 1905 nach San Francisco. Seine Vorlesungen in Berkeley waren aufgrund seines schlechten Englisch schwer verständlich. Sein humorvoller Bericht „Reise eines deutschen Professors ins Eldorado“ ließ nicht erkennen, unter welchen Beschwerden er litt.

A 1.15 Boltzmanns Erinnerungen „Reise eines deutschen Professors ins Eldorado“ beginnen folgendermaßen:

Noch am 8. Juni wohnte ich der Donnerstagssitzung der Wiener Akademie der Wissenschaften in gewohnter Weise an. Beim Fortgehen bemerkte ein Kollege, dass ich nicht wie sonst nach der Bäckerstraße, sondern nach dem



Abb. 1.2 Boltzmann nach seiner Rückkehr aus den USA 1905. (Zeitgenössische Karikatur von K. Przibram, einem Studenten Boltzmanns). [Eigenes Archiv]

Stubenring mich wandte und fragte, wohin ich gehe. Nach San Franzisko antwortete ich lakonisch.

Im Restaurant des Nordwestbahnhofes verzehrte ich noch in aller Gemütlichkeit Jungschweinsbraten mit Kraut und Erdäpfeln und trank einige Gläser Bier dazu. Mein Zahlengedächtnis, sonst erträglich fix, behält die Zahl der Biergläser stets schlecht.

Seit Jahren plagten Boltzmann Nervenschmerzen, Asthma, Nasenpolypen, Kopfschmerzen, Nieren- und Blasenleiden und verschiedene andere körperliche Beschwerden, und er unterlag extremen Stimmungsschwankungen. Obwohl er für seine Arbeit internationale Anerkennung erfuhr, traten vermehrt physische und psychische Probleme auf. 1906 setzte er seinem Leben ein Ende.

Boltzmann ist auf dem Wiener Zentralfriedhof begraben. Auf dem Grabstein ist seine berühmteste Gleichung $S = k \log W$ eingemeißelt. Dabei bezeichnet S die Entropie, W die Wahrscheinlichkeit eines Zustands, und k ist die universelle Boltzmann-Konstante.

A 1.16 Können oder sollen Theorien oder Formeln „elegant“ sein?

Im Vorwort zu seinem Buch „Über die spezielle und die allgemeine Relativitätstheorie.“ zitiert Albert Einstein Boltzmann:

„...man solle die Eleganz Sache der Schneider und Schuster sein lassen“.

Zur Zeitgeschichte: 1900–1909

Die Weltausstellung 1900 in Paris erfreut sich über 48 Mio. Besucher. Auch die 2. Olympischen Sommerspiele finden 1900 in Paris statt. Cricket ist zum ersten und auch letzten Mal olympische Sportart.

Das Deutsche Kaiserreich zählt 56 Mio. Einwohner, Österreich-Ungarn 47 Mio.

Die Kolonialisierung des afrikanischen Kontinentes ist in der Hochphase des Imperialismus. Europäische Staaten (Belgien, Deutschland, Frankreich, Großbritannien, Italien, Portugal, Spanien) beherrschen fast ganz Afrika. Queen Victoria stirbt 1901 im Alter von 81 nach einer Regentschaft von 64 Jahren. In China beginnt der Boxeraufstand gegen Kolonialisierung und Missionierung.

Die erste Telefonleitung zwischen Berlin und Paris wird freigeschaltet. Marconi gelingt die erste drahtlose Übertragung über den Atlantik. Er sendet den Morsecode „...“ von Cornwall nach Neufundland in Kanada.

Giacomo Puccinis Oper „Tosca“ hat 1900 erfolgreich Premiere. Vier Jahre später wird „Madama Butterfly“ bei der Uraufführung an der Oper am Teatro

alla Scala in Mailand ausgepiffen. Gustav Mahler beendet die Komposition seiner 4. Sinfonie (Uraufführung 1901). Arnold Schönberg wechselt von der Tonalität zur Atonalität.

Arthur Schnitzlers „Reigen“ wird als liederlich beschimpft. Thomas Mann veröffentlicht seinen ersten Roman „Buddenbrooks“.

Gustav Klimt malt „Adele Bloch-Bauer“. Ein französischer Kritiker bezeichnet Werke einiger Künstler um Henrie Matisse (1869–1954) als die Kunst „wilder Tiere“ (fauves) und prägt damit den Begriff „Fauvismus“ für die ausdrucksstarke Malerei der Franzosen.

David Hilbert präsentiert 23 Kernprobleme der Mathematik (drei davon sind auch heute noch ungelöst.). Sigmund Freud publiziert „Zur Psychopathologie des Alltagslebens“. Die Brüder Lumiere zeigen 1907 die ersten Farbfotos der Öffentlichkeit.

San Francisco wird durch das Erdbeben von 1906 und das anschließende Feuer schwer beschädigt. In der heutigen Region Krasnojarsk ereignen sich am 30. Juni 1908 eine oder mehrere große Explosionen, vermutlich verursacht durch einen Asteroiden, der in der Erdatmosphäre in einigen Kilometern Höhe explodierte (Tunguska-Ereignis).

Melitta Bentz gründet 1909 die Firma „Melitta“, mit der sie rechtlich geschützte Filtertüten vermarktet.

Robert Edwin Peary erreicht im selben Jahr als erster Mensch den Nordpol.

1.3 Das Rutherfordsche Atommodell

Mitte des 19. Jahrhunderts, bald nachdem 1840 die britische Krone sich im Vertrag von Waitangi mit den Eingeborenen, den Maori, geeinigt hatte, begann die große Einwanderungswelle in Neuseeland. Die Eltern von Ernest Rutherford (Abb. 1.7) wanderten als Jugendliche ein, und Ernest wurde 1871 als viertes von zwölf Kindern geboren. Dank eines Stipendiums konnte er das Nelson College auf der Südinsel besuchen. Von 1890 bis 1894 studierte Rutherford am Canterbury College in Christchurch und schloss als Bachelor of Science ab. Er bewarb sich um ein Stipendium in Großbritannien und erhielt es als Zweitgereihter, da der Erstgereichte absagte. Im Sommer 1895 verließ er seine Heimat und im Oktober begann er mit Forschungsarbeit, der Verbesserung eines Detektors für Radiowellen, am Cavendish-Laboratorium der University of Cambridge. Joseph John Thomson, der Leiter des Instituts, erkannte seine Begabung und lud ihn ein, mit Hilfe der kurz zuvor entdeckten Röntgenstrahlen die elektrische Leitfähigkeit von Gasen zu untersuchen.

Neuartige Strahlen waren der Hype um die Jahrhundertwende. Es begann 1895 mit Wilhelm Conrad Röntgens Entdeckung der nach ihm benannten Strahlung (auch X-Strahlung genannt; Nobelpreis 1901). Dann ging es Schlag auf Schlag. Joseph John Thomson entdeckte 1897 das Elektron (Nobelpreis 1906), fast zeitgleich mit Emil Wiechert. Das Elektron hat die negative Ladung $-e$ und definiert die Elementarladung e . Alle Elementarteilchen sind entweder neutral oder haben eine Ladung, die ein positives oder negatives ganzzahliges Vielfaches von e ist. Eine Ausnahme bilden die Quarks, wie wir in Kap. 10 sehen werden, diese können allerdings nicht als freie Teilchen beobachtet werden.

Antoine Henri Becquerel fand 1896 heraus, dass unbelichtete, lichtdicht verpackte Fotoplatten dennoch belichtet werden, wenn sie neben Uransalzen gelegen waren. Nach dem in der Fotografie damals notwendigen chemischen Entwicklungsbad fand er geschwärzte Stellen. Uran musste also eine Strahlung aussenden, welche die Verpackung durchdringen kann. Damit wurde er der Entdecker der Radioaktivität. Marie und Pierre Curie isolierten chemisch die Uran-Zerfallsprodukte Radium und Polonium, die ebenfalls strahlten. Die Curies und Becquerel erhielten 1903 den Nobelpreis für Physik.

A 1.17 Die Polin Marie Skłodowska heiratete in Paris den Wissenschaftler Pierre Curie. Geld hatten sie keines, auf die Hochzeitsreise gingen sie mit zwei Fahrrädern. Nach dem Aufpumpen der Reifen bemerkte ein Freund: „Na, dann lebt halt schön von Luft und Liebe.“

Rutherford verbrachte drei Jahre in Cambridge, 1898 wurde der 27-Jährige an die McGill-Universität in Montreal (Kanada) berufen. Das neu errichtete Physikgebäude der McGill-Universität zählte zu den modernsten Forschungseinrichtungen seiner Zeit. Nachdem er 1897 festgestellt hatte, dass die Uranstrahlung verschiedene Komponenten hat, klassifizierte er diese 1903 als Alpha-, Beta- und Gammastrahlen. Für seine Forschungsergebnisse aus dieser Zeit wurde ihm 1908 der Nobelpreis für Chemie „for his investigations into the disintegration of the elements, and the chemistry of radioactive substances“ verliehen. 1907 wechselte er an die Universität Manchester.

A 1.18 Rutherford erzählt über eine Begegnung mit dem berühmten und bereits sehr betagten William Thomson (Lord Kelvin):
Ich betrat den halbdunklen Raum und entdeckte bald Lord Kelvin im Publikum und erkannte, dass ich im letzten Teil meiner Rede, der sich mit

dem Alter der Erde befasste, in Schwierigkeiten geraten war, da meine Ansichten mit seinen im Widerspruch standen. Zu meiner Erleichterung schlief Kelvin schnell ein, aber als ich zum wichtigen Punkt kam, sah ich, wie sich der alte Vogel aufsetzte, ein Auge öffnete und mir einen bösen Blick zuwarf! Da kam eine plötzliche Eingebung, und ich sagte, Lord Kelvin habe das Alter der Erde begrenzt, vorausgesetzt, dass keine neue Quelle (von Energie) entdeckt wurde. Diese prophetische Äußerung bezieht sich auf das, was wir heute Abend betrachten, Radium! Siehe da! Der alte Knabe strahlte mich an.

Es waren spannende Zeiten mit zahlreichen neuen Erkenntnissen. Allerdings gab es auch unterschiedliche Erklärungen für experimentelle Befunde, so auch über die Gestalt der Atome. Der aufgrund der Entdeckung des Elektrons hochangesehene Joseph Thomson war der Meinung, dass ein Atom aus einer gleichmäßig verteilten positiv geladenen Substanz besteht, in der die Elektronen wie Rosinen in einem Plumpudding eingebettet sind.

Rutherford hatte eine andere Vorstellung: Es gibt einen kleinen, schweren Atomkern, der den Großteil der Masse trägt und positiv geladen ist. Die Elektronen befinden sich in einer Hülle rund um den Kern. Für neutrale Atome hebt die positive Kernladung die negative Ladung der Elektronenhülle auf. Sie musste daher ebenfalls ein ganzzahliges Vielfaches der Elementarladung sein.

A 1.19 Ein Student in Rutherfords Labor war sehr fleißig. Rutherford hatte es bemerkt und eines Abends gefragt:

Arbeitest du auch morgens?

Ja, antwortete der Student stolz und sicher, dass er gelobt werden würde.

Aber wann denkst du? erstaunte Rutherford.

Zu Rutherfords Idee, wie diese Diskrepanz experimentell zu beheben sei, soll uns ein Gedankenexperiment führen:

Stellen wir uns vor, wir schießen mit einem Kleinkalibergewehr mit Gummikugeln auf zwei Eisenstangen, eine mit quadratischem Querschnitt, eine mit rundem. Da wir keine perfekten Schützen sind, werden wir die Stangen nicht immer genau im Zentrum treffen. Die Kugeln werden an den Stangen gestreut. Die runde Stange wird die Geschosse in alle möglichen Richtungen ablenken. Die eckige Stange lenkt die Kugel nur in zwei Richtungen, abhängig davon, auf welche der Seitenflächen die Kugel auftrifft. Wenn eine Kantenfläche zu uns schaut, werden die Kugeln sogar zu uns zurück reflektiert. Wir lernen daraus, dass wir aus der Richtung der

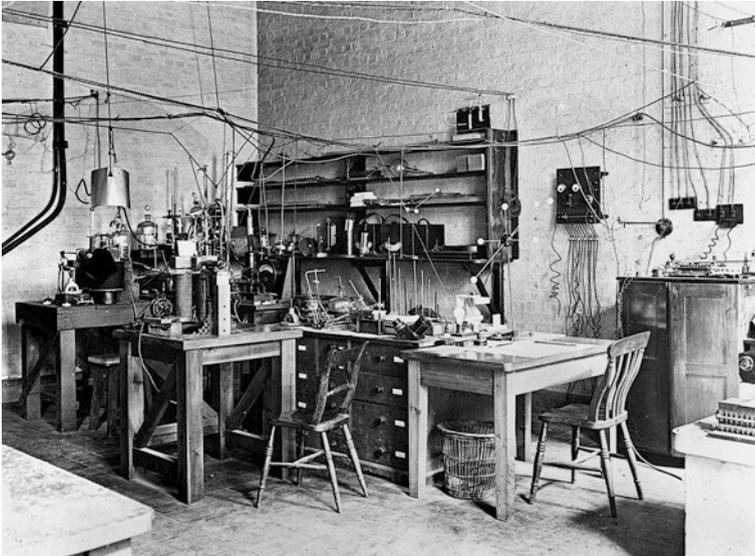


Abb. 1.3 Die Apparatur, die Ernest Rutherford in seinen Atomspaltungsexperimenten verwendete, aufgestellt auf einem kleinen Tisch in der Mitte seines Forschungsraums der Univ. Cambridge – Cavendish Laboratory (1926). [commons.wikimedia.org/wiki/File:Sir_Ernest_Rutherfords_laboratory,__early_20th_century._(9.660.575.343).jpg BY Science Museum London/Science and Society Picture Library licensed under CC BY-SA 2.0 Generic]

Ablenkung der Gummigeschosse etwas über die Form der Stangen lernen können. Wir brauchten dazu Gummikugeln, die im Vergleich zum Stangenquerschnitt nicht zu groß sein dürfen, mit Fußbällen wäre die Richtungsabhängigkeit zu ungenau.

Rutherford wollte auf diese Weise die Form oder Struktur von Atomen erkunden. Als Ziel wählte er eine Goldfolie. Von allen Metallen kann Gold am dünnsten gewalzt werden und damit sollten sich in der Folie möglichst wenige Goldatome hintereinander befinden. Die Projektile mussten kleiner als die vermuteten Goldatome sein und er hatte auch bereits welche zur Hand: 1908 zeigte Rutherford, dass die Alpha-Teilchen sich wie Helium-Atomkerne verhielten und damit hatte er die gesuchten kleinen Projektile (Abb. 1.3).

Im Jahr 1911 führte Rutherford sein berühmt gewordenes Experiment aus. Da die Alphateilchen nicht direkt beobachtbar sind, wurde folgende Apparatur entwickelt: Die gestreuten Alphateilchen prallten auf eine Fluoreszenzschicht und lösten einen Lichtblitz aus. Dieser war allerdings so schwach, dass er nur mit einem Mikroskop zu beobachten war. Das

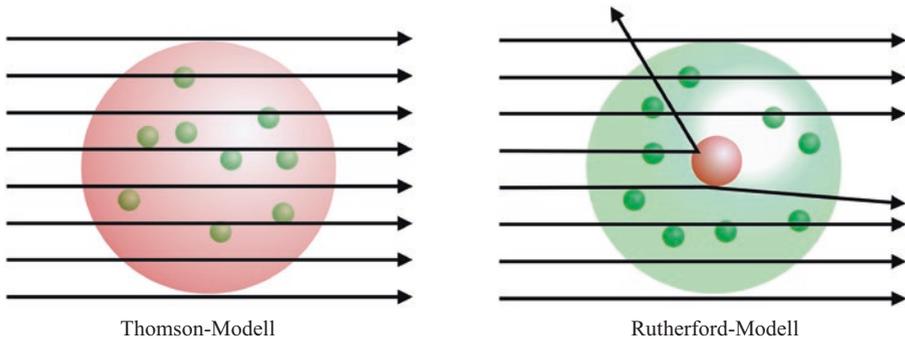


Abb. 1.4 Unterschied Thomson- vs. Rutherford-Modell

Experiment musste im Dunkeln durchgeführt werden und die Beobachter (unter anderem Rutherfords Assistenten Marsden und Geiger) mussten vor jedem Experiment einige Zeit im Dunkeln sitzen, um das Auge zu adaptieren.

A 1.20 Bei der Vorführung eines Experiments sprach Rutherford die legendären Worte: „Sie sehen jetzt, meine Herren, dass sie nichts sehen. Warum Sie nichts sehen, werden sie gleich sehen.“

In Thomsons Plumpudding-Modell hätte man erwartet, dass die Teilchen durch die Atome nur schwach abgelenkt werden (Abb. 1.4 links). Im Rutherford-Modell sollten die Alpha-Teilchen ungehindert durchgehen, wenn der Atomkern nicht getroffen wird. Trifft das Teilchen auf den Kern, sollte das zu starker Ablenkung, ja sogar Reflexion führen (Abb. 1.4 rechts). Im Experiment zeigte sich genau dies, und Rutherford schrieb: „It was almost as incredible as if you fired a 15-inch shell at a piece of tissue paper and it came back and hit you.“² [„Es war fast so unglaublich, als würde man eine 15-Zoll-Granate auf ein Stück Seidenpapier abfeuern und sie würde zurückkommen und einen treffen.“].

Die Existenz eines Atomkerns war damit bestätigt. Und, unerwartet, der Kern war sogar hunderttausendmal kleiner als das ganze Atom!

Die Jahre in Manchester waren für Rutherford sehr erfolgreich. Er konnte 1917 zeigen, dass Atome durch Bestrahlung mit Alpha-Teilchen zerfallen und in Atome anderer Ordnungszahl umgewandelt werden können.

²Zitiert nach: Laylin K. James: Nobel Laureates in chemistry, 1901–1992, S. 57.

A 1.21 Rutherford benötigte für seine Experimente auch Radium, das in Joachimsthal in Böhmen gewonnen wurde. Die Wiener Akademie der Wissenschaften ließ Rutherford 350 Milligramm Radium. Am Ende des Ersten Weltkriegs wollte die englische Regierung dieses Radium als Feindeseigentum konfiszieren. Rutherford bestand auf einer angemessenen Entschädigung, und er unterstützte damit maßgeblich die Wiener Akademie in ihrem Wiederaufbau.

Unter den Zerfallsprodukten entdeckte er ein positiv geladenes Teilchen mit einer dem Wasserstoff-Atom fast identischen Masse. Es war der Kern des Wasserstoff-Atoms, und er nannte es Proton nach dem griechischen Wort für „Erstes“. 1919 ging Rutherford als Professor und Direktor des Cavendish-Laboratoriums nach Cambridge.

A 1.22 Aussprüche, die Rutherford zugeschrieben werden:
Alle Wissenschaft ist entweder Physik oder Briefmarkensammeln.
Wir haben kein Geld, also müssen wir nachdenken!

A 1.23 Das sogenannte Mond-Gebäude des alten Cavendish-Labors wurde 1933 von der Royal Society für Peter Kapitza gebaut, um seine Arbeit in starken Magnetfeldern fortzusetzen. Kapitza bat darum, das Gebäude mit einer Schnitzerei eines Krokodils zu dekorieren. „Krokodil“ war Kapitzas Name für Rutherford. Rutherford sei wie das Krokodil in der Erzählung „Peter Pan“. Man höre es durch das Ticken von Captain Hooks Uhr im Bauch näher kommen, so wie sich Rutherford mit dröhnender Stimme ankündigte.

Die Ladung des Protons ist gleich groß wie die des Elektrons, aber entgegengesetzt. Dadurch ist das Atom neutral. Wenn die Ladungen sich nicht neutralisieren würden, dann wäre die Materie nicht stabil. Alle Atome würden sich abstoßen.

Das Rutherford'sche Atommodell hatte allerdings einen Angriffspunkt. Dass die Elektronen um den Kern kreisen, wie der Mond um die Erde, klang plausibel. Die Anziehungskraft zwischen dem positiv geladenen Kern und den negativ geladenen Elektronen wird durch die Fliehkraft im Gleichgewicht gehalten. Nach den Gesetzen des Elektromagnetismus müssten die Elektronen dabei allerdings aufgrund ihrer Richtungsänderung elektromagnetische Strahlung aussenden und dadurch Bewegungsenergie verlieren und nach kürzester Zeit in den Kern stürzen. Das passiert aber nicht, die Atome sind stabil. Irgendetwas an dem Modell war noch krank.

1.4 Das Bohrsche Atommodell

Dabei war die Medizin zur Heilung schon vorhanden. Bereits 1900 hatte Max Planck (Abb. 1.5) eine Formel für die temperaturabhängige Strahlung eines „schwarzen Körpers“ (das ist zum Beispiel ein Hohlraum oder ein glühendes Metall) „glücklich erraten“, wie er es in seiner Nobelpreisrede 1920 selbst ausdrückte. Darin kommt eine Konstante vor, die wir heute als Plancksches Wirkungsquantum h kennen. Die Formel ergibt sich aus der Annahme, dass elektromagnetische Strahlung, also auch Licht, nur in portionierten Energiepaketen auftritt, in Quanten.

Andererseits manifestiert sich die Strahlung auch als Welle. Die Verbindung zwischen der Energie E der Quanten und der Frequenz der Welle ν ist durch die universelle Konstante h gegeben: $E = h \nu$. Da die Kombination $h/2\pi$ häufig vorkommt, hat man dafür ein neues Zeichen erfunden: \hbar (ein h mit einem kleinen Querstrich, gesprochen als „*h-quer*“, auch als reduzierte Planck-Konstante bezeichnet). Die physikalische Dimension von h und \hbar ist Energie mal Zeit, das ist auch die Dimension der physikalischen Wirkung oder des Drehimpulses. Der Drehimpuls ist ein Maß für die kreisförmige Bewegung eines Objekts.

A 1.24 Planck war musikalisch sehr begabt, er spielte Geige, Klavier und die Orgel. Er komponierte sogar eine Operette „Die Liebe im Wald“. Als er nach dem Abitur einen Professor nach den Aussichten für ein Musikstudium befragte, meinte dieser: „Wenn sie schon fragen, studieren sie etwas anderes.“

A 1.25 Werner Heisenberg suchte bei einer Zugreise nach einem passenden Abteil. In einem sah er einen Eispickel hängen und dachte, wer mit dem Eispickel reist, ist sicher ein netter Mensch. Er behielt recht, denn der 70jährige Max Planck betrat das Abteil.

Planck erstieg noch mit 85 Jahren einen Dreitausender. Er saß gerne mit Holzfällern und Bergsteigern zusammen: „Von jedem gescheiterten Menschen, der seinen Beruf gut ausfüllt, kann man noch was lernen.“

Mit dieser Lichtquantenhypothese erklärte der damals 26 Jahre alte Albert Einstein (Abb. 1.5) den photoelektrischen Effekt: Experimente hatten gezeigt, dass Licht erst über einer Grenzfrequenz Elektronen aus einer Metalloberfläche lösen kann, egal wie stark das Metall bestrahlt wird. Entscheidend ist also die Frequenz des Lichts, nicht dessen Intensität. Mittels Lichtquanten konnte dieser Befund erklärt werden: Die Energie der Lichtquanten, und damit die Frequenz, muss größer sein als die Energie, die

zum Herauslösen der Elektronen aus dem Metall nötig ist. Diese Austrittsarbeit entspricht der Grenzfrequenz. Ist die Energie der Quanten höher als die Austrittsarbeit, ergibt sich aus der überschüssigen Energie die Bewegungsenergie der herausgelösten Elektronen. Einstein wurde 1921 für die Erklärung des Photoeffekts der Nobelpreis für Physik verliehen, obwohl er damals bereits sowohl die Spezielle als auch die Allgemeine Relativitätstheorie veröffentlicht hatte.

Quanten mussten also ernst genommen werden. 1913 heilte Niels Bohr das „kranke“ Rutherford'sche Atommodell und formulierte das Bohrsche Atommodell: Er erweiterte das Quantenprinzip auf die Elektronen der Atomhülle. Bohr zufolge bewegen sich diese auf klassischen Kreisbahnen mit einem Drehimpuls, der ein ganzzahliges Vielfaches von \hbar ist. Man kann daraus die Radien der Kreisbahnen und die Energien E_n der Elektronen für $n=1, 2, \dots$ berechnen. Für das Wasserstoff-Atom gilt $E_n = -E_R/n^2$, wobei die sogenannte Rydberg-Energie E_R aus der Elementarladung, der Elektronenmasse und h berechnet wird. Das negative Vorzeichen zeigt an, dass es sich um eine Bindung handelt, es muss Energie aufgewendet werden, um das Elektron aus dem Atom zu entfernen. Je größer n ist, desto weiter weg vom Atomkern bewegt sich das Elektron und desto weniger Energie muss zugeführt werden, um es aus der Hülle zu lösen und das Atom zu einem Ion zu verwandeln.

A 1.26 Als Siebzigjähriger sagte Einstein: Die Arbeit Bohrs erschien und erscheint mir wie ein Wunder, die höchste Musikalität auf dem Gebiet der Gedanken.

Bohr postulierte: Die Elektronen bewegen sich auf gequantelten Bahnen und können nicht kontinuierlich Energie abstrahlen, daher sind die Bahnen stabil. Übergänge zwischen verschiedenen Bahnen sind möglich, dabei wird die Energiedifferenz entweder abgestrahlt oder aufgenommen, je nachdem, ob das Elektron auf eine niedrige Bahn wechselt oder auf eine höhere Bahn gehoben wird. Dies erklärte das Jahrzehnte alte Rätsel der Spektrallinien.

Wenn man zum Beispiel ein Natriumsalz in einer Flamme verbrennt, ist die Flammenfarbe Orange. Die Zerlegung mit einem Prisma zeigt eine starke Spektrallinie im orangen Bereich des sichtbaren Spektrums, eine Art Fingerabdruck des Natrium-Atoms (Abb. 1.6). Andere Metalle ergeben andere Farben, so dominiert bei Kupfer grün. Die Wasserstoff-Flamme liefert im sichtbaren Bereich mehrere solche Linien, die sogenannte Balmer-Serie. Man spricht vom Emissionsspektrum. Wenn man weißes Licht durch Wasserstoffgas betrachten, ergeben sich an diesen Stellen des Spektrums