

Gian Francesco Giudice

ODYSSEE IM ZEPTORAUM

Eine Reise
in die Physik des LHC

 Springer

ODYSSEE IM ZEPTORAUM

GIAN FRANCESCO GIUDICE

ODYSSEE IM ZEPTORAUM

EINE REISE IN DIE PHYSIK DES LHC

AUS DEM ENGLISCHEN VON NICOLA FISCHER



Springer

Gian Francesco Giudice
Theoretical Physics Division
CERN, Geneva 23
Schweiz
Gian.Giudice@cern.ch

A Zeptospace Odyssey: A Journey into the Physics of the LHC, Die Erstauflage erschien 2009 auf Englisch. Diese Übersetzung erscheint mit freundlicher Genehmigung von Oxford University Press. © Gian Francesco Giudice 2010

ISBN 978-3-642-22394-5

e-ISBN 978-3-642-22395-2

DOI 10.1007/978-3-642-22395-2

Springer Heidelberg Dordrecht London New York

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

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2012

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.

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.

Einbandentwurf: KünkelLopka GmbH, Heidelberg

Gedruckt auf säurefreiem Papier

Springer ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media (www.springer.com)

VORWORT

*Werden wir nicht nachlassen in unserm Kundschaften
Und das Ende unseres Kundschaftens
Wird es sein, am Ausgangspunkt anzukommen
Und den Ort zum ersten Mal zu erkennen.*

THOMAS STEARNS ELIOT¹

Der Kontrollraum des Large Hadron Collider (LHC) ist voller Menschen. Sie alle blicken gebannt auf den Monitor an der Wand, der in diesem Augenblick nur einen grauen Hintergrund zeigt. Der letzte Absorberblock ist bereits entfernt worden, die Protonen können also ungehindert in ihre Kreisbahn durch den 27 Kilometer langen unterirdischen Tunnel eintreten. Es ist 10.28 Uhr am 10. September 2008. Wir befinden uns am CERN, dem europäischen Laboratorium für Teilchenphysik, das sich nahe Genf entlang der deutsch-französischen Grenze erstreckt.

Wie ein Magier kurz vor seinem spektakulärsten Trick spricht Lyn Evans, der Direktor des LHC-Projekts auf Französisch den Zauberspruch, ohne dabei seinen Waliser Akzent zu verbergen: »Trois, deux, un faisceau!« Im selben Moment sind auf dem Bildschirm einen

¹ T. S. Eliot: Vier Quartette: Little Gidding (Four Quartets: Little Gidding, 1943). Dt. v. N. Wydenbruck, 1988.

Moment lang zwei helle Punkte zu sehen. Ringsum bricht Beifall los. Das Geschehen im Kontrollraum wird live ins Hauptauditorium übertragen, wo CERN-Physiker und -Personal sich mehrheitlich versammelt haben. Auch hier schließen sich alle, voller Zufriedenheit und tief bewegt, dem spontanen Applaus an. Das Abenteuer, auf das man so lange hingearbeitet und gewartet hatte, hat tatsächlich begonnen.

Die ersten offiziellen Studien für den Large Hadron Collider, den leistungsstärksten Teilchenbeschleuniger der Welt, stammen aus den frühen 1980er Jahren; endgültig genehmigt wurde das Projekt jedoch erst 1994. Vierzehn Jahre später nun signalisieren die zwei hellen Punkte auf dem Bildschirm das Ende der Bauphase und den Beginn des experimentellen Programms im Bereich der Teilchenphysik. Diese Punkte waren zwei Abbilder des Protonenstrahls auf einem dünnen Leuchtfilm: Ein Punkt zeigte den Strahl im Augenblick seines Eintritts in den LHC, der zweite bei seiner Wiederkehr nach einer Runde um den Ring, nach 27 Kilometern in nur 90 Millionsteln einer Sekunde. Es stimmt, die Energie des Protonenstrahls betrug erst einen Bruchteil der letztlich vollen Kraft des LHC, und auch die Dichte der zirkulierenden Protonen war extrem niedrig. Dennoch ist der ehrlich empfundene Beifall der anwesenden Physiker vollkommen gerechtfertigt: Dieses Ereignis war der entscheidende Praxistest, dass die Technologie, auf die der LHC aufbaut, tatsächlich funktioniert.

Anwesend im Kontrollraum sind die letzten fünf Generaldirektoren des LHC. Sie haben das Laboratorium durch die einzelnen Planungs- und Bauphasen geführt: Herwig Schopper, Carlo Rubbia, Christopher Llewellyn Smith, Luciano Maiani und Robert Aymar, dem nach Ende seiner Amtszeit im Dezember 2008 Rolf Heuer folgte. »Es sind nur deshalb bloß fünf, weil die anderen bereits tot sind!«, kommentiert Lyn Evans mit einem Lachen. Einige der älteren Direktoren teilen seine Heiterkeit nicht. Dennoch sichtbar begeistert, gehen sie in ihren Anzügen und Krawatten auf Evans zu, der eher für die Modetradition des CERN steht—Jeans und Turnschuhe—, um ihrer Freude Ausdruck zu verleihen. Glückwünsche aus allen großen teilchenphysikalischen Laboratorien der Welt treffen ein. Die originellste Botschaft kommt von Nigel Lockyer, dem Direktor des kanadischen Labors TRIUMF, der



ABB. 1 Der Kontrollraum des LHC am 10. September 2008

Quelle: CERN.

die Worte Neil Armstrongs beim Betreten der Mondoberfläche abwandelt: »Eine kurze Reise für ein Proton, aber ein großer Schritt für die Menschheit!«

Der Large Hadron Collider ist tatsächlich ein außergewöhnliches Abenteuer für die Menschheit: ein großes Abenteuer der Bautechnik etwa durch die Aushebung von fast 80.000 Kubikmetern Erde in 100 Metern Tiefe—einer Menge, mit der man das Mittelschiff der Kathedrale von Canterbury füllen könnte. Ein Abenteuer an der absoluten Spitze der Technologie durch die Entwicklung neuartiger Instrumente unter konstant extremen Anforderungen wie der jahrelangen Kühlung von 37.000 Tonnen Material, verteilt über eine Strecke von 27 Kilometern, auf $-271\text{ }^{\circ}\text{C}$, eine Temperatur unterhalb jener des leeren Weltraums. Ein beispielloses Abenteuer der Informationstechnologie mit einem Datenfluss von etwa einer Million Gigabyte pro Sekunde—als würden alle Menschen auf der Erde über einen einzigen Betreiber gleichzeitig jeweils rund zehn Anrufe aussenden. Vor allem aber ist es ein fantastisches geistiges Abenteuer, denn der Large Hadron Collider wird Räume erforschen, in die zuvor noch kein Experiment hat vordringen können.

Der LHC ist eine Reise zu den tiefstgelegenen Materiestrukturen mit dem Ziel, die fundamentalen Gesetze zu entdecken, die das Verhalten der Natur lenken. Es geht um ein Verstehen der elementaren Prinzipien, die über das Universum bestimmen; darum, wie—und insbesondere warum—die Natur so funktioniert, wie wir sie beobachten.

Das Faszinierendste am Large Hadron Collider ist seine Reise zum Unbekannten. Der LHC gleicht einem gigantischen Mikroskop, das in Dimensionen von weniger als etwa 100 Zeptometer vorzudringen in der Lage ist. Die selten verwendete Einheit von einem Zeptometer entspricht einem Milliardstel eines Milliardstels eines Millimeters. Die Bezeichnung wurde 1991 vom *Bureau International des Poids et Mesures* geprägt mit der Begründung: »Die Vorsilbe ‚zepto‘ leitet sich von ‚septo‘ ab und bezieht sich auf die Zahl sieben (1.000 hoch 7), und der Buchstabe ‚s‘ wird durch den Buchstaben ‚z‘ ersetzt, um die Mehrfachverwendung des Buchstabens ‚s‘ als Zeichen zu vermeiden.«² Eine recht seltsame Definition für eine seltsame Maßeinheit. Alles an diesem Wort »zepto« ist so seltsam, dass es mir zur Beschreibung des unbekanntem und fremdartigen Raums extrem geringer Entfernungen sehr gut zu passen scheint. Diesen unendlich kleinen Raum von nicht mehr als einigen Hundert Zeptometer haben bislang nur Elementarteilchen und die blühende Fantasie der theoretischen Physiker betreten. In diesem Buch wird er *Zeptoraum* genannt. Der LHC wird die erste Maschine sein, die den Zeptoraum erkundet.

Während die erste bemannte Reise zum Mond ein konkretes, in wolkenlosen Nächten für jedermann sichtbares Ziel hatte, ist die Reise, auf die sich der Large Hadron Collider begeben hat, eine Odyssee in fremdere Räume, bei der niemand voraussagen kann, was wir finden oder wo wir landen werden. Es ist eine Suche nach unbekanntem Welten mithilfe komplexer, modernster Technologien, gelenkt von theoretischen Mutmaßungen, die nur nachvollziehen kann, wer sich in höherer Physik und Mathematik auskennt. Eben diese Aspekte haben die Arbeit der Physiker in einen Nebel geheimnisvoller Exklusivität gehüllt und

² Beschluss 4 des 19. Treffens der *Conférence générale des poids et mesures* (1991). [Anm. d. Übers.: Zitate ohne Angabe deutscher Quellen wurden sämtlich für das vorliegende Buch übersetzt.]

Nichteingeweihten die Neugier genommen. Dieses Buch dagegen will zeigen, dass die Fragen, die sich aus der Arbeit des LHC ergeben, für jeden spannend und interessant sind, der fundamentale Fragen über die Natur als der Mühe wert empfindet.

Die Regierungen der zwanzig Mitgliedstaaten der Europäischen Organisation für Kernforschung CERN finden offensichtlich, dass diesen Fragen nachzugehen der Mühe wert ist, haben sie doch beträchtliche Mittel in das Unternehmen gesteckt. Der Bau des LHC-Beschleunigerrings hat einschließlich der Testläufe, des Baus der Maschine und des CERN-Zuschusses zu LHC-Rechnern und Detektoren, jedoch ohne die CERN-Personalkosten, rund 3 Milliarden Euro gekostet. Diese riesige Finanzlast wäre ohne die maßgeblichen Beiträge vieler Nicht-Mitgliedstaaten des CERN, darunter Kanada, Indien, Japan, Russland und die USA, nicht zu stemmen gewesen. An Entwurf, Bau und Erprobung der Instrumente waren Physiker aus 53 Ländern und fünf Kontinenten beteiligt (Physiker oder Pinguine aus der Antarktis konnten sich leider keine zur Mitarbeit entschließen). Der Large Hadron Collider ist ein beeindruckendes Beispiel für internationale Zusammenarbeit im Namen der Wissenschaft. Da der LHC mit den Mitteln und der körperlichen und geistigen Arbeitskraft so vieler verschiedener Länder gebaut wurde, sind seine Ergebnisse Wertbesitz der gesamten Menschheit. Diese Ergebnisse sollen nicht nur einigen wenigen Physikern Nutzen bringen, und hinter ihrem technisierten und spezialisierten Charakter darf die Bedeutung ihres universellen Erkenntnisgehalts nicht verborgen bleiben.

Der Large Hadron Collider ist das komplexeste und ehrgeizigste wissenschaftliche Projekt, das die Menschheit je auf den Weg gebracht hat. Jede Herausforderung während Planung und Bau des LHC erforderte Neuentwicklungen an den Grenzen der Technologie. Die Forschungsarbeiten im Vorfeld des LHC werden fraglos in Spin-offs und praktischen Anwendungen münden, die über den rein wissenschaftlichen Nutzen hinausreichen. Auch das World Wide Web wurde 1989 am CERN erfunden, um den Daten- und Informationsaustausch zwischen Physikern und Laboratorien in verschiedenen Teilen der Welt zu ermöglichen. Vier Jahre darauf beschloss das CERN die Freigabe

dieses Instruments, das heute aus dem Alltagsleben der Menschen weltweit nicht mehr wegzudenken ist. Aus der Grundlagenforschung ergeben sich häufig unvermutete Anwendungen. Mitte des 19. Jahrhunderts fragte der britische Schatzkanzler William Gladstone den mit der Erforschung des Elektromagnetismus beschäftigten Physiker Michael Faraday, worin der Nutzen von dessen Entdeckungen liegen könnte. »Ich weiß es nicht, Sir«, war Faradays Antwort, »aber eines Tages werden Sie Steuern darauf erheben können.«

Für Physiker aber besteht das letzte Ziel des LHC ausschließlich in der reinen Erkenntnis. Weit über jede technologische Anwendung hinaus ist Wissenschaft eine Bereicherung der Gesellschaft. So wurde 1969 Robert Wilson, Direktor eines führenden US-amerikanischen Laboratoriums, vor den Kongress gerufen. Man debattierte über die möglichen Argumente für eine Ausgabe von 200 Millionen Dollar zugunsten eines teilchenphysikalischen Forschungsprojekts. Senator John Pastore vom Atomenergie-Ausschuss des Kongresses befragte Wilson, der in seiner Replik die Bedeutung der Grundlagenforschung auf den Punkt brachte.

PASTORE: Gibt es in Zusammenhang mit den Hoffnungen hinsichtlich dieses Beschleunigers irgendetwas, das in irgendeiner Weise mit der Sicherheit dieses Landes zu tun hat?

WILSON: Nein, Sir, das glaube ich nicht.

PASTORE: Gar nichts?

WILSON: Gar nichts.

PASTORE: Er hat in der Hinsicht keinen Wert?

WILSON: Er hat allein mit dem Respekt zu tun, mit dem wir einander begegnen, mit der Würde des Menschen, unserer Liebe zur Kultur. . . Er hat nichts unmittelbar mit der Verteidigung unseres Landes zu tun, außer dass es durch ihn der Verteidigung wert ist.³

³ Anhörungen vor dem *Joint Committee on Atomic Energy*, Kongress der Vereinigten Staaten. Erste Sitzung zu: Allgemeines, Physikalisches Forschungsprogramm, Raum-Kernforschungsprogramm und »Plowshare«-Projekt, 17.–18. April 1969; Teil I. US Government Printing Office, Washington, DC.

Dieses Buch befasst sich mit der Reise des Large Hadron Collider: Warum sie unternommen wurde und was wir aus ihr lernen wollen. Es liegt in der Natur dieses Themas, dass es sehr umfangreich, kompliziert und hoch technisch ist, wogegen diesem Buch ein vergleichsweise begrenzter Rahmen gesteckt ist. Ich werde nicht alle Aspekte systematisch behandeln und beanspruche nicht, hier eine vollständige Geschichte des LHC zu erzählen. Mein Ziel ist lediglich, einen Einblick in die Problemstellungen aus Sicht eines Physikers zu geben und gleichzeitig die geistige Breite und Tiefe der Fragen hervorzuheben, derer sich das LHC annimmt. Ich möchte den Lesern dieses Buchs die Bedeutung dieser Reise und den Grund dafür nahebringen, dass die gesamte teilchenphysikalische Wissenschaftlergemeinschaft den Ergebnissen dieser Reise so gespannt entgegenfiebert.

Im ersten Teil dieses Buchs geht es um die Welt der Teilchen und wie die Physiker sie zu verstehen gelernt haben. Eine Würdigung der Ergebnisse des LHC ist ohne eine gewisse Vorstellung vom Aufbau der Teilchenwelt nicht möglich. Wie der theoretische Physiker Richard Feynman einmal sagte: »Ich verstehe nicht, warum die Journalisten und andere selbst dann etwas über die neuesten Entdeckungen in der Physik wissen wollen, wenn sie nichts über die früheren Entdeckungen wissen, die den neuesten Entdeckungen Bedeutung verleihen.«⁴

Der Large Hadron Collider ist eine Maschine der Superlative von extremer technologischer Komplexität. Der zweite Teil dieses Buchs beschreibt, was der LHC ist und wie er arbeitet. Die technologischen Innovationen, die zum Bau des LHC nötig waren, bilden nur einen der vielen erstaunlichen Aspekte dieses wissenschaftlichen Abenteuers. Wir werden auch die Detektoren kennenlernen, mit denen die Teilchen untersucht werden, die bei den Protonenkollisionen im LHC entstehen. Diese Instrumente sind moderne Wunderwerke; in ihnen wird erstklassige Mikrotechnologie mit gigantischen Proportionen verbunden.

Das LHC-Projekt dient in erster Linie der Erkundung des Unbekannten. Daher mündet dieses Buch in einem Überblick über die

⁴ R. P. Feynman, zitiert in S. Weinberg: *The Discovery of Subatomic Particles*. Cambridge University Press, Cambridge 2003.

INHALTSVERZEICHNIS

Teil I Teilchen in der Materie

- 1 Die Zerlegung der Materie 3
- 2 Die Naturkräfte 31
- 3 Das Erhabene Wunder 61

Teil II Das Raumschiff des Zeptoraums

- 4 Eine Leiter zum Himmel 97
- 5 Der Herr der Ringe 121
- 6 Teleskope für den Zeptoraum 155

Teil III Missionen im Zeptoraum

- 7 Symmetriebrechungen 191
- 8 Vom Umgang mit der Natürlichkeit 237
- 9 Supersymmetrie 251
- 10 Von neuen Dimensionen zu neuen Kräften 273

11	Das Universum unter dem Mikroskop	293
12	Nachwort	327
	Glossar	335
	Danksagungen	347
	Sachverzeichnis	349

TEIL I

TEILCHEN IN DER MATERIE

DIE ZERLEGUNG DER MATERIE

*Es wäre eine traurige Angelegenheit, ein Atom in einem
Universum ohne Physiker zu sein.*

GEORGE WALD¹

Ein Tröpfchen Öl auf der Wasseroberfläche kann sich nicht unendlich ausbreiten; die Größe des Ölflecks wird von der Moleküldicke des Öls begrenzt. Salz ist in Wasser nur bis zu einer Höchstkonzentration löslich; jenseits dieser Grenze sinkt es auf den Boden des Gefäßes. Das sind einfache Hinweise auf ein beobachtbares Faktum der Natur: Materie ist kein Kontinuum; sie ist aus Einzelteilen zusammengesetzt.

Hinter der simpel scheinenden Erkenntnis, dass Materie aus diskreten Teilen besteht, verbergen sich einige der bemerkenswertesten Geheimnisse der Natur. Im Innern der Materie sind erstaunliche neue Welten zu entdecken, revolutionäre Grundprinzipien und ungewöhnliche Phänomene, die unserem intuitiven Verständnis zuwiderlaufen und unsere Sinneswahrnehmungen Lüge strafen. Die wichtigste Erkenntnis aus den Tiefen der Materie allerdings ist, dass die Natur einem Muster folgt. Hinter der Komplexität unserer Welt verbergen sich einfache fundamentale Gesetze, die erst dann erkennbar werden, wenn wir in die

¹ Vorwort von G. Wald in L. J. Henderson: *The Fitness of the Environment*. Beacon, Boston 1958.

kleinsten Bestandteile der Materie vordringen. Bei der Zerlegung der Materie geht es ausschließlich um die Suche nach diesen fundamentalen Naturgesetzen. Richard Feynman hat dies so formuliert: »Würden in einer Katastrophe sämtliche wissenschaftlichen Erkenntnisse ausgelöscht und lediglich ein einziger Satz an die nächste Generation weitergegeben, welche Behauptung enthielte die meiste Information in den wenigsten Worten? Ich glaube, die Atomhypothese . . . In diesem einen Satz steckt, wie Sie sehen werden, eine riesige Menge an Information über die Welt, wenn man nur ein bisschen Fantasie und Kopfarbeit aufbringt.«²

ATOME

Demokrit nannte ihn Atome, Leibniz nannte ihn Monaden. Glücklicherweise sind diese beiden Männer einander nie begegnet, sonst hätte es sicher sehr törichte Streitereien gegeben.

WOODY ALLEN³

Die thrakischen Philosophen Leukipp und sein Schüler Demokrit stellten im 5. und 4. Jahrhundert vor unserer Zeitrechnung die Behauptung auf, Materie bestehe aus Atomen (vom griechischen Wort *átomos*, das Unteilbare) und leerem Raum. Aristoxenos von Tarent berichtet, Platon habe die Lehre der Atomisten derart verabscheut, dass er den Wunsch äußerte, ihre im Umlauf befindlichen Schriften samt und sonders zu verbrennen. Wir wissen nicht, ob Platon diesen Wunsch in die Tat umgesetzt hat; die Zeit zumindest hat es getan. Ein einziges Textfragment Leukipps und 160 davon aus der Feder Demokrits—mehr ist uns nicht erhalten geblieben, und nur sehr wenige dieser Fragmente nehmen explizit Bezug auf Atome. Was wir heute von den Ansichten der ersten Atomisten wissen, stammt zum Großteil von späteren Philosophen und Historikern.

² R. P. Feynmann: The Feynmann Lectures on Physics. Addison-Wesley, Reading 1964.

³ W. Allen: Wie du dir, so ich mir (Getting Even, 1978). Dt. v. B. Schwarz, 1987.

Laut Leukipp und Demokrit setzt sich Materie aus einigen wenigen in Größe und Form verschiedenen Arten von Grundatomen zusammen. Die Komplexität der Natur entstehe, so die beiden Philosophen, durch die vielfältigen Verbindungen dieser Atome und durch ihre Position im leeren Raum. Die Eigenschaften der Materie, etwa Geschmack oder Temperatur, seien nichts weiter als der globale Effekt von ihr zugrundeliegenden mikroskopisch kleinen Objekten. Mit anderen Worten, diese Eigenschaften sind Folge einer tieferen Struktur der Natur—Folge der Atome. In zwei Fragmenten Demokrits heißt es: »Nun, dass wir nicht verstehen, wie jedes Einzelne in Wirklichkeit ist oder nicht ist, ist auf vielerlei Weise bewiesen worden. . . . Der Bestimmung zufolge [gibt es] Farbe, der Bestimmung zufolge Süßes, der Bestimmung zufolge Bitteres, in Wirklichkeit aber nur Atome und Leeres.«⁴

Gemeinhin heißt es, die antiken Atomisten seien durch Gerüche auf ihre Ideen gekommen: Materie bestehe aus Atomen, die sich von Substanzen lösen und in unsere Nase gelangen könnten. Das atomistische Konzept ist jedoch in erster Linie eine philosophische Annahme, die sich eher als Erwiderung auf Zenons Probleme mit der Idee des unendlichen teilbaren Raums eignet denn als Erklärung konkreter Beobachtungen von Naturphänomenen. Sicherlich verblüffen manche Aussagen in den Fragmenten der Atomisten heute durch ihre Nähe zur modernen Sichtweise; ihre Konzepte aber unterscheiden sich natürlich stark von der Wirklichkeit, wie wir sie heute begreifen. So wird Demokrit gemeinhin die Auffassung zugeschrieben, die unterschiedlichen Zustände der Materie hingen mit unterschiedlichen Atomen zusammen: Rund und glatt seien die Atome flüssiger Materie, feste Substanzen hingegen könnten sich aufgrund ihrer Form ineinander verhaken.

Die Sichtweise der Atomisten war eine prophetische Eingebung von ebenso wenig empirischer Validität wie das aristotelische Dogma von den Grundelementen (Luft, Feuer, Erde, Wasser) als kontinuierlichen Einheiten. Der Atomismus trat erst auf den wissenschaftlichen Plan, als man ihn, beginnend mit den Arbeiten Isaac Newtons, zur

⁴ Sextus Empiricus, Adv. math. VII; Galen, Med. emp. 15; Dt. v. J. Mansfeld. www.seilnacht.com. [Mai 2011]

Erklärung der Eigenschaften von Gasen und—hier machte John Dalton den Anfang—zur Interpretation der Mengenverhältnisse einzelner Bestandteile chemischer Reaktionen heranzog. Im Laufe des 19. Jahrhunderts begann man viele thermodynamische Eigenschaften mit der Hypothese zu erklären, die Materie sei kein Kontinuum, sondern bestehe aus Grundbausteinen. Dies mündete in einer neuen Sicht auf die Struktur von Materie: Jedes Gas ist aus einzelnen Molekülen zusammengesetzt. Diese Moleküle wiederum sind Verbindungen aus wahrhaft fundamentalen Bausteinen—den Atomen.

So erfolgreich diese Hypothese bestimmte Phänomene erklären konnte, so zögerlich waren manche Wissenschaftler bereit, die atomistische Weltsicht zu akzeptieren. Dies traf besonders auf Teile der deutschsprachigen Gemeinschaft zu, die stark vom Positivismus des österreichischen Physikers und Philosophen Ernst Mach beeinflusst war. Mach weigerte sich die physikalische Realität von diskreten Einheiten wie Atomen anzuerkennen, die sich nicht unmittelbar beobachten ließen. Diese Ablehnung des Atomismus trug zu Ludwig Boltzmanns depressivem Zustand bei, der den Suizid dieses großen österreichischen Physikers und Vaters der statistischen Mechanik herbeiführte.

Ganz anders stellte sich die Situation in England dar, wo die Tradition Newtons und Daltons einen philosophisch unvoreingenommenen Blick auf den Atomismus begünstigte. Es mag daher kein Zufall sein, dass die grundlegenden Entdeckungen, mit denen die Atome in der Wirklichkeit ankamen, in England gemacht wurden. Unwiderlegbar bewiesen allerdings wurde die Existenz des Atoms—des Unteilbaren—paradoxerweise erst mit seiner Spaltung.

DIE SPALTUNG DES ATOMS

Es ist schwieriger, ein Vorurteil zu zertrümmern als ein Atom.

ALBERT EINSTEIN⁵

⁵ Dieser Ausspruch wird A. Einstein zugeschrieben.

1897 gilt offiziell als das Jahr der Entdeckung des Elektrons, und die Hauptrolle dabei spielte Joseph John Thomson (1856–1940, Nobelpreis 1906). Thomson schloss 1880 sein Studium an der Cambridge University ab, und als er vier Jahre darauf zum Cavendish-Professor berufen wurde, rief dies in akademischen Kreisen Erstaunen hervor. Dieser Posten, den zuvor Physiker vom Kaliber eines Maxwell oder Rayleigh bekleidet hatten, genoss international höchstes Renommee—und Thomson war damals gerade einmal 28 Jahre alt. Zudem ging es um eine Professur in experimenteller Physik, und Thomson hatte bis dahin vor allem in theoretischer Physik und Mathematik gearbeitet. Dennoch sollte sich diese Entscheidung als äußerst weitsichtig erweisen.

Nach seiner Berufung wendete sich Thomson der Untersuchung von *Kathodenstrahlen* zu. Diese Strahlung wird zwischen zwei mit einer Hochspannungsquelle verbundenen Metallplatten erzeugt, wobei der Apparat in einen Glaskolben platziert und evakuiert, d. h. die Innenluft mit einer Pumpe abgesaugt wird. Kathodenstrahlen galten als elektromagnetische Strahlung, obwohl der französische Physiker Jean Baptiste Perrin (1870–1942, Nobelpreis 1926) die unerklärliche Beobachtung gemacht hatte, dass diese Strahlen elektrische Ladung auf die Metallplatte zu übertragen schienen. Im Bestätigungsfalle würde dies der Ausgangshypothese widersprechen, da elektromagnetische Strahlung keine elektrische Ladung besitzt.

Thomson nahm sich des Problems an, indem er in der Glasröhre ein elektrisches Feld ansetzte, um zu untersuchen, ob dieses Feld die Kathodenstrahlen beeinflussen würde. Er beobachtete eine Ablenkung der Kathodenstrahlen—ein unwiderlegbarer Beweis dafür, dass die Strahlen elektrische Ladung transportieren und keine elektromagnetische Strahlung sein können. Anderen Forschern vor ihm war es bei diesem Experiment nicht gelungen, messbare Auswirkungen festzustellen; Thomson verdankte seinen Erfolg in erster Linie stärkeren Vakuumpumpen, mit deren Hilfe er den Druck des Restgases in der Röhre reduzieren konnte.

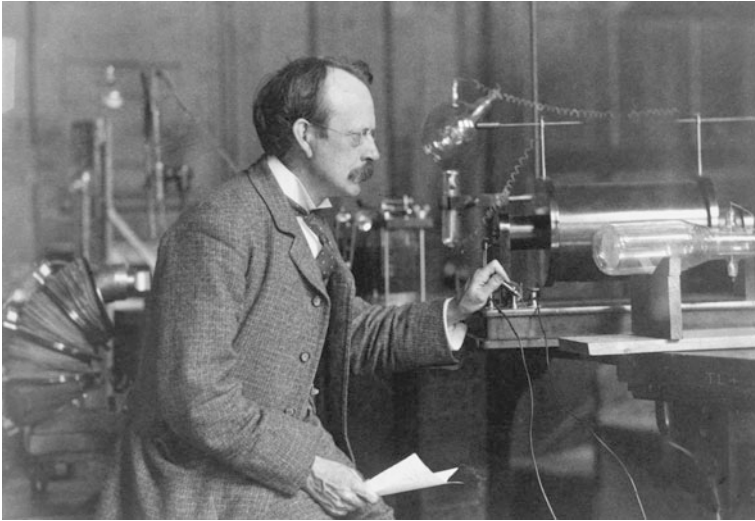


ABB. 1.1 Joseph John Thomson bei einer Vorlesungsdemonstration an der Universität Cambridge

Quelle: Cavendish Laboratory/University of Cambridge.

Thomsons Apparat ist nichts weiter als eine primitive Version der Kathodenröhre, wie sie in altmodischen Fernsehgeräten verwendet wurde. Ebenso wie in Thomsons Experiment lenken in einem Fernseher geeignete elektrische und magnetische Felder kontinuierlich den Kathodenstrahl ab, der auf eine Leuchtschicht trifft und dort einen Lichtpunkt hinterlässt. Auf dem Bildschirm verändern diese Lichtpunkte ihre Position schneller, als unsere Netzhaut wahrzunehmen imstande ist, wodurch die Bilder einander überlagern und unserem Gehirn den Eindruck eines zusammenhängenden Bildes vermitteln.

Thomson wiederholte sein Experiment mit verschiedenen elektrischen und magnetischen Feldern und maß die jeweilige Ablenkung der Kathodenstrahlen aus ihrer Bahn. Aus den gesammelten Messdaten zog er anschließend seine Schlüsse. Er ging von der Annahme aus, dass die Kathodenstrahlen aus elektrisch geladenen Teilchen bestünden, die er »Korpuskeln« nannte, und berechnete die Ablenkung des von elektrischen oder magnetischen Kräften beeinflussten Strahls. Er

verglich seine theoretische Berechnung mit den Messergebnissen und konnte sodann das Verhältnis zwischen Masse und Ladung der hypothetischen Teilchen herleiten: Dieses war, wie er feststellte, etwa um ein Tausendfaches kleiner als bei einem Wasserstoff-Ion, dem leichtesten bekannten Element. Thomson hatte keine Zweifel und zog den mutigen Schluss: »Dieser Ansicht zufolge haben wir in den Kathodenstrahlen Materie in einem neuen Zustand, einem Zustand, in dem die Unterteilung von Materie sehr viel weiter geht als im gewöhnlichen gasförmigen Zustand.«⁶ Mit anderen Worten: Das Atom war gespalten und eines seiner Fragmente beobachtet worden.

Mit seinen Messungen war es Thomson gelungen, das Verhältnis zwischen Masse und Ladung des Atomfragments zu reduzieren, nicht jedoch die beiden Größen getrennt. Noch gab es Erklärungsbedarf: »Der kleine Zahlenwert für m/e [das Masse-zu-Ladung-Verhältnis] kann auf einen kleinen Wert für m [die Teilchenmasse] oder auf einen großen Wert für e [die Teilchenladung] oder auf eine Kombination aus beidem zurückgehen.«⁷ Zwei Jahre später konnte Thomson die Elementarladung erstmals grob bestimmen; einen präziseren Wert berechneten später Robert Millikan (1868–1953, Nobelpreis 1923) und sein Student Harvey Fletcher (1884–1981). Damit war bestätigt worden, dass das Fragment deutlich leichter war als das ganze Atom: Das *Elektron* war entdeckt.

Mit dieser Entdeckung begann ein neues Kapitel in der Physik, denn nun hatte man gesehen, dass sich das Atom spalten ließ. Darüber hinaus hatte Thomson die Substanz identifiziert, die in elektrischem Strom die Ladung transportiert. Daraus folgte, dass elektrische Phänomene durch die Abspaltung von Elektronen aus Atomen verursacht werden oder, in Thomsons eigenen Worten: »Elektrisierung umfasst im Wesentlichen die Aufspaltung des Atoms, wobei ein Teil der Masse des Atoms freigesetzt wird und sich vom ursprünglichen Atom ablöst.«⁸

⁶ J. J. Thomson: »Cathode Rays«, *Philosophical Magazine* 44, 295 (1897).

⁷ Ebd.

⁸ J. J. Thomson: »On the Masses of the Ions in Gases at Low Pressures«, *Philosophical Magazine* 48, 547 (1899).

Thomsons Schlussfolgerung aus den Ergebnissen von 1897, er habe einen »neuen Materienzustand« entdeckt und ein Atomfragment, das Elektron, identifiziert, war sicher ein bisschen gewagt. Tatsächlich beobachtet hatte er letztlich nur eine Verschiebung von Kathodenstrahlen; der Rest war vergleichsweise spekulative Herleitung. Ebenfalls 1897, wenige Monate bevor Thomson seine Untersuchungen abschloss, hatte in Berlin Walter Kaufmann (1871–1947) ganz ähnliche Versuchsergebnisse erzielt und veröffentlicht. Kaufmann hatte in Kathodenstrahlen Ablenkungen gemessen und beobachtet, dass diese unbeeinflusst vom Restgas in der Glasröhre stattfanden. Der aus dem Experiment abgeleitete niedrige Zahlenwert des Masse-zu-Ladung-Verhältnisses erschien ihm dermaßen absurd, dass er zu dem Schluss kam, die Annahme eines Teilchencharakters von Kathodenstrahlen müsse falsch sein: »Ich glaube deshalb zu dem Schlusse berechtigt zu sein, dass die Hypothese, welche annimmt, die Kathodenstrahlen seien abgeschleuderte Teilchen, zu einer befriedigenden Erklärung der von mir beobachteten Gesetzmäßigkeiten allein nicht ausreichend ist.«⁹ Kurz, Kaufmann gelangte zu den gleichen Versuchsergebnissen wie Thomson, zog aber die entgegengesetzten Schlüsse.

Thomson wird die Entdeckung des Elektrons zugeschrieben, Kaufmanns Arbeiten dagegen finden in Physiklehrbüchern keine Erwähnung. Sicher stand die wissenschaftliche Atmosphäre der Universität Berlin, die sich jeder Korpuskulardeutung widersetzte, Kaufmann entgegen. In der Physik aber erwirbt sich Verdienste, wer in einem Phänomen intuitiv den Schlüssel zu den Geheimnissen der Natur erkennen kann, und Thomson besaß diese Gabe der Intuition. Der Nobelpreisträger für Physiologie Albert Szent-Györgyi hat dies elegant formuliert: »Entdecken heißt sehen, was jeder gesehen, und denken, was keiner gedacht hat.«¹⁰

⁹ W. Kaufmann: »Die magnetische Ablenkbarkeit der Kathodenstrahlen und ihre Abhängigkeit vom Entladungspotenzial«, *Annalen der Physik und Chemie* 61, 544 (1897).

¹⁰ A. Szent-Györgyi, zitiert in I. J. Good (Hrg.): *The Scientist Speculates*. Heinemann, London 1962.

IM INNERN DES ATOMS

Wenn das hier stimmt, ist es viel wichtiger als euer Krieg.
ERNEST RUTHERFORD (NACHRICHT AN EINEN MILITÄRI-
SCHEN FORSCHUNGS-AUSSCHUSS WÄHREND DES ERSTEN
WELTKRIEGS ZUR BEGRÜNDUNG SEINES FERNBLEIBENS
WEGEN SEINER EXPERIMENTE AM ATOMKERN)¹¹

Nachdem die Existenz des Elektrons gesichert war, galt es nun noch die Substanz zu entdecken, die den Rest des Atoms ausmachte und seine elektrische Gesamtladung neutralisierte. Einige Fragmente des Atoms—die Elektronen—hatte man beobachtet, aber sie stellten nur einen winzigen Bruchteil der atomaren Gesamtmasse. Woraus bestand der Rest?

Thomson betrachtete das Atom als gleichförmige Einheit mit positiver Ladung und darin eingebetteten Elektronen. Dieses Bild vom Atom wurde »Thomson'sches Rosinenkuchenmodell« genannt, weil die Elektronen Trockenfruchtstückchen in einer klebrigen Substanz glichen. Dieser »plum pudding« aber war—ebenso wie sein sehr britisches kulinarisches Vorbild—Nichtbritten nur schwer schmackhaft zu machen. So präsentierte der japanische Physiker Hantaro Nagaoka (1865–1950) im Jahr 1903 ein Bild vom Atom als Sonnensystem mit einer »Sonne« in der Mitte, die von den Elektronen als »Planeten« umkreist wird. Auch Hermann Helmholtz und Jean Baptiste Perrin befassten sich mit einer ähnlichen Vorstellung. Doch die Hypothese eines atomaren »Sonnensystems« war unhaltbar: Man wusste bereits, dass elektrische Ladung auf einer Umlaufbahn elektromagnetische Strahlung abgibt und dabei Energie verliert, sodass die Elektronen schnell in die Mitte fallen und das Atom kollabieren würde. Die Struktur des Atoms blieb ein Rätsel.

Ernest Rutherford (1871–1937, Nobelpreis 1908) war ein brillanter Student aus Neuseeland, der dank eines Stipendiums und voller Hoffnung und Ehrgeiz an das grandiose Cavendish Laboratory in Cambridge

¹¹ E. Rutherford, zitiert in T. E. Murray: »More Important Than War«, *Science* 119, 3A (1954).

wechselte. Später wurde er Physikprofessor an der Universität Manchester. Dort schlug er 1909 seinem Kollegen Hans Geiger (1882–1945) und seinem Studenten Ernest Marsden (1889–1970) vor, die Streuung sogenannter *Alphateilchen* (positiv geladener Heliumionen) zu untersuchen, die von einer radioaktiven Quelle aus Radiumbromid ausgesandt werden. Zu einer Streuung kommt es, wenn die Alphateilchen auf eine dünne Gold- oder Aluminiumfolie treffen und beim Hindurchgehen von ihrer ursprünglichen Bahn abgelenkt werden. Schon zuvor war bei solchen Experimenten beobachtet worden, dass die Alphateilchen beim Durchdringen der Folie geringfügig abgelenkt werden. Neu war jedoch, dass Rutherford seine Mitarbeiter zu überprüfen bat, ob irgendwelche Alphateilchen abprallten, anstatt die Folie zu passieren.

Diese Aufgabenstellung Rutherfords klingt verdächtig nach einem Projekt, mit dem man seine Studenten beschäftigt, bis einem eine bessere Idee kommt. Wieso in aller Welt sollte eine dünne Metallfolie schwere und schnelle Geschosse wie die aus einer radioaktiven Quelle abgefeuerten Alphateilchen zurückwerfen?

Geiger und Marsden machten ihre Messungen—und kamen atemlos zu Rutherford zurückgelaufen. Sie hatten beobachtet, dass einige der Alphateilchen tatsächlich abgeprallt waren. Rutherford beschrieb dies so: »Es war bestimmt das unglaublichste Erlebnis, das mir je in meinem Leben widerfahren ist. Es war fast so unglaublich, als wenn einer eine 15-Zoll-Granate auf ein Stück Seidenpapier abfeuerte und diese zurückkommen und ihn treffen würde.«¹² Diese schnellen und schweren Alphateilchen mussten, um zurückzukommen, im Innern der Folie auf ein Hindernis und eine Kraft gestoßen sein, die ausreichte, um ihre Bewegungsrichtung vollständig umzukehren. Die Elektronen kamen als Hindernis nicht in Frage, sie sind zu leicht—wie beim Wurf einer Bowlingkugel gegen ein paar Tischtennisbälle: Auch hier kann man nicht erwarten, dass die Bowlingkugel zurückkommt. Aber auch die klebrige Substanz aus Thomsons Rosinenkuchen reichte nicht aus, um die energiereichen Alphateilchen zu reflektieren.

¹² zitiert in E. N. da Costa Andrade: Rutherford and the Nature of the Atom. Doubleday, New York 1964.

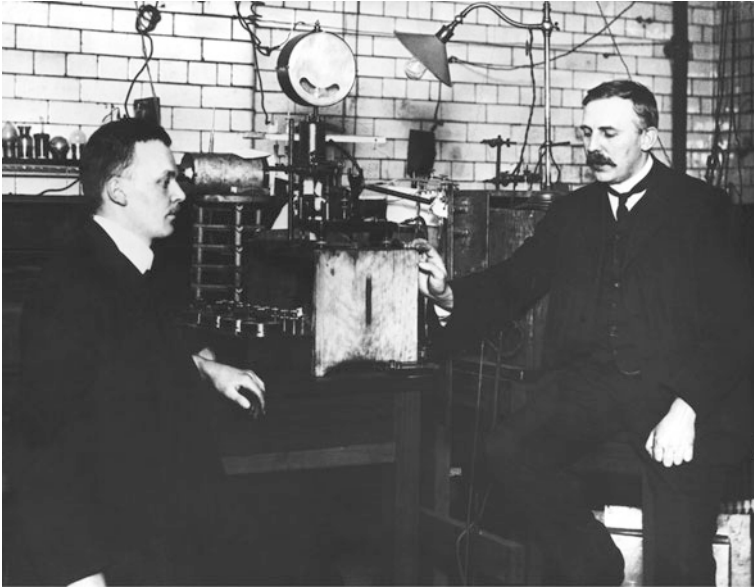


Abb. 1.2 Ernest Rutherford (*rechts*) und Hans Geiger im Schuster Laboratory der University of Manchester

Quelle: Bettmann Archive/Corbis/Specter.

Rutherford war zeitlebens ein eingefleischter und genialer Experimentalphysiker mit einiger Skepsis gegenüber den meisten theoretischen Physikern, die er für zu spekulativ und abstrakt hielt. Dieses eine Mal jedoch spielte er nach den Regeln der theoretischen Physik. Er berechnete die Wahrscheinlichkeit, mit der ein Alphateilchen in einem Winkel von über 90 Grad abgelenkt (also zurückgeworfen) würde, wenn, so die Grundannahme, die gesamte Masse und positive Ladung des Atoms in einem Punkt—einem *atomaren Kern*—konzentriert wäre. Das Ergebnis der Berechnung stimmte mit Geigers und Marsdens Messdaten ebenso perfekt überein wie mit späteren Versuchen Rutherfords in Zusammenarbeit mit Marsden.

Die Alphateilchen, die eine positive Ladung besitzen, dringen in die Metallfolie ein und werden dabei aufgrund der elektromagnetischen Kräfte, die von den unterschiedlichen Ladungen in der Folie ausgehen, im Allgemeinen nur geringfügig von ihrer Bahn abgelenkt. Dies

erklärt die kleinen Abweichungen, mit denen die Mehrzahl der Teilchen gestreut werden. Es besteht jedoch eine wenn auch sehr geringe Wahrscheinlichkeit, dass die Bahn eines Alphateilchens sehr nahe an einem Kern vorbeiführt, wo die gesamte atomare Masse und positive elektrische Ladung konzentriert sind. In diesem Fall kann das Teilchen zurückgeworfen werden, weil die elektromagnetische Kraft in der Nähe des schweren Kerns sehr groß ist—wie beim Wurf einer Bowlingkugel gegen eine ruhende und große Kanonenkugel: Hier besteht die Möglichkeit, dass die Bowlingkugel zurückprallt. Dasselbe übrigens geschieht bei der Ablenkung einer Kometenbahn. Ein Komet, der durch einen Asteroidengürtel fliegt, wird kaum von seiner Bahn abgebracht; nähert er sich jedoch der Sonne, kann er durch die große Anziehungskraft in einem großen Winkel entlang einer hyperbolischen Bahn abgelenkt werden.

Rutherford hatte ins Innere des Atoms geblickt und etwas ganz Anderes gesehen, als die Physiker erwartet hatten: Ein Kern in der Mitte, viel kleiner als das eigentliche Atom, hält die gesamte positive Ladung und praktisch die vollständige atomare Masse. Der Rest ist nichts weiter als eine Wolke aus leichten Elektronen mit der gesamten negativen Ladung.

Rein interessehalber wollen wir einmal die Größen- und Gewichtsverhältnisse in unserem Sonnensystem jenen im Atom gegenüberstellen: Das Verhältnis zwischen der Größe des Sonnensystems (mit dem Neptun-Orbit als Grenze) und dem Durchmesser der Sonne liegt bei etwa 6.000:1, die Masse der Sonne steht zur Masse aller Planeten in einem Verhältnis von rund 700:1. Bei mittelgroßen Atomen ist das Größenverhältnis zwischen Atom und Kern ungefähr 20.000:1, das Masseverhältnis zwischen Kern und Elektronen knapp 4.000:1. Im Vergleich gesehen ist das Atom also sehr viel leerer als das Sonnensystem, und seine Masse ist viel stärker im Zentrum konzentriert. In einer anderen Größenordnung betrachtet ist der Kern im Innern des Atoms so groß wie »eine Fliege in einer Kathedrale«.¹³

¹³ J. Rowland: *Understanding the Atom*. Gollancz, London 1938; B. Cathcart: *The Fly in the Cathedral*. Viking, London 2004.

Doch wie bereits erwähnt war die Vorstellung von Atomen als Miniaturversionen von Sonnensystemen mit den Gesetzen des Elektromagnetismus völlig unvereinbar. Dann stellte der dänische Physiker Niels Bohr (1885–1962, Nobelpreis 1922) die Hypothese auf, dass die Elektronen im Innern des Atoms auf bestimmte Bahnen beschränkt sein müssten. Im Sonnensystem werden die Abstände zwischen Sonne und Planeten von keinem Grundprinzip diktiert. Kein physikalisches Gesetz verbietet die Existenz weiterer Sonnensysteme mit anderen Abständen zwischen Zentralgestirn und umkreisenden Planeten als in unserem. Bohr zufolge gilt dies für Elektronen nicht: Nur ganz bestimmte Bahnen sind möglich; alles Andere ist ausgeschlossen.

Stellen wir uns einmal vor, ein Tourist in Ägypten möchte ein schönes Panoramafoto von der Wüste machen. Um einen besseren Blickwinkel zu bekommen, braucht er eine erhöhte Stelle, doch es gibt in der Gegend keine Hügel. Da kommt ihm der schlaue Gedanke, die Große Pyramide von Gizeh zu erklimmen, deren Seiten wir uns vollkommen glatt denken. Unser Tourist kann nun frei wählen, aus welcher Höhe er seine Aufnahme machen will, indem er ein bisschen höher hinauf- oder ein Stückchen hinabklettert. Einige Tage später besucht derselbe Tourist die berühmte Djoser-Stufenpyramide in Sakkara. Wieder verspürt er den Drang, aus erhöhtem Blickwinkel ein Foto zu machen, und beginnt seinen Aufstieg. Hier aber sind ihm nur bestimmte Höhen zugänglich, die ihm die Stufen der Pyramide vorgeben. Sämtliche Zwischenhöhen sind dem Touristen verwehrt, da er sofort auf die nächsttiefere Stufe zurückrutschen würde. Desgleichen können die Planeten in einem Sonnensystem jeden Orbit besetzen; den Elektronen dagegen sind nur bestimmte und klar definierte Ebenen im Innern des Atoms zugänglich.

Von dieser Hypothese ausgehend ersann Bohr für die Bewegung von Teilchen neue Regeln, die zur Geburt einer neuen Theorie führen sollten: der *Quantenmechanik*. Diese neue Theorie sollte bald die Newton'sche Beschreibung von Bewegung ins Wanken bringen und zahlreiche Grundlagen der Physik einschneidend verändern. In der Quantenmechanik verlieren selbst Begriffe wie »Bahn« und »Orbit« ihre Bedeutung.



Abb. 1.3 Niels Bohr (*rechts*) im Gespräch mit Werner Heisenberg
Quelle: Pauli-Archiv/CERN.

Bohrs ebenso simple wie seltsame Hypothese von den Elektronenbahnen entbehrte zunächst jeder vernünftigen physikalischen Grundlage. Dennoch ließ sich mit ihr nicht nur die Atomstruktur erklären, sondern auch das *Frequenzspektrum* des Wasserstoffatoms vorhersagen. Das Spektrum eines chemischen Elements ist die Gesamtheit der Lichtfrequenzen, die das Element aufnimmt oder abgibt. Diese Frequenzen sind das unverwechselbare Kennzeichen eines jeweiligen chemischen Elements, das sich anhand dieses Fingerabdrucks zweifelsfrei identifizieren lässt. Eine Natriumdampflampe zum Beispiel strahlt kein unbuntes oder »weißes« Licht ab—Licht also, das sich auf alle Frequenzen verteilt—, sondern nur solches von zwei bestimmten Frequenzwerten. Da wir genau diese Werte als Farben wahrnehmen, geben Natriumdampflampen für unsere Augen das charakteristische orange-gelbe Licht ab, das wir aus der Straßenbeleuchtung kennen.

Umgekehrt werden bei der Zerlegung von unbuntem Licht, das ein Gas passiert hat, durch ein Prisma schwarze Linien sichtbar, die exakt mit den charakteristischen Frequenzen, dem Fingerabdruck dieses Gases zusammenfallen. Das Element, aus dem das Gas besteht,

hat die Lichtfrequenzen seines Spektrums absorbiert. Eine Analyse der Spektralverteilung von Sternenlicht brachte im 19. Jahrhundert eine fundamentale wissenschaftliche Erkenntnis zutage: Die in den Himmelskörpern vorhandenen chemischen Elemente stimmen exakt mit jenen auf der Erde überein—die Elemente der Sterne haben den gleichen Fingerabdruck wie die terrestrischen. Das Element Helium wurde kurioserweise zunächst in der Sonne und erst später auf der Erde entdeckt, woran sein Name (der sich vom griechischen Wort *helios* für Sonne ableitet) noch heute erinnert.

Bohr postulierte, dass das Frequenzspektrum eines Elements mit den Energieunterschieden zwischen den potenziellen Bahnen der Elektronen im atomaren Innern übereinstimmt. In unserer Analogie ist die Frequenz jene Energie, die aufgewendet werden muss, um von einer Stufe der Djoser-Pyramide zur nächsten zu springen. Aufgrund der begrenzten Anzahl möglicher Stufen werden die Spektrallinien eines Elements von einigen wenigen diskreten Werten bestimmt. Bohr konnte nun das Frequenzspektrum des Wasserstoffatoms berechnen, das experimentell bereits mit hoher Genauigkeit untersucht war. Die Übereinstimmung zwischen Bohrs Resultat und den Messungen war absolut verblüffend.

Mit der Entdeckung des Atomkerns war nicht nur die verborgenste Struktur der Materie enthüllt, sondern auch offenbart worden, dass die fundamentalen Naturgesetze eine Welt beschreiben, die sich stark von jener unterscheidet, die wir gemeinhin wahrnehmen. Die Absonderlichkeit der Hypothese Bohrs und ihr Erfolg bei der Erklärung der Eigenschaften des Wasserstoffatoms löste bei vielen Wissenschaftlern tiefste Verwunderung aus. Die in jenen Tagen am häufigsten gestellte Frage unter theoretischen Physikern soll gelautet haben: »Glaubst du das?« Die wohl angemessenste Antwort auf diese Frage lieferte Bohr selbst, wenn auch in einem völlig anderen Zusammenhang. Ein Besucher in Bohrs Landhaus im dänischen Tisvilde war überrascht, über der Eingangstür ein Hufeisen hängen zu sehen, und fragte Bohr, ob dieser wirklich glaube, dass ein Hufeisen Glück bringe. »Natürlich nicht«, entgegnete Bohr, »aber wie ich höre, funktioniert es auch,